



Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft

Dissertation



Ein Beitrag zum Verständnis der
Wechselwirkung von Gebirge und Versatz

Dipl.-Ing. Anja Moser, MSc

Juli 2019


EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 15.07.2019



Unterschrift Verfasser/in
Anja, Moser
Matrikelnummer: 00935106

Widmung und Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Bergrat h.c. em.O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Horst Wagner bedanken. Prof. Wagner hat mich in den letzten 4 Jahren beim Verfassen meiner Dissertation betreut und dabei sehr viel Zeit und Energie investiert um den Forschungsgeist und die wissenschaftliche Neugierde in mir zu wecken und aufrecht zu erhalten. Durch seine gezielte Kritik hat er versucht das Beste aus meiner Arbeit herauszuholen und mich zur stetigen Verbesserung angespornt, wobei ich mich für die dadurch verursachten schlaflosen Nächte entschuldigen möchte. Durch die Arbeit mit ihm habe ich jedoch sehr viel gelernt, sowohl fachlich als auch persönlich, was mich nachhaltig geprägt hat und mir auf meinem weiteren Lebensweg noch von großem Nutzen sein wird – herzlichen Dank dafür. Lieber Horst, wie du festgestellt hast, sind wir zwei sehr unterschiedliche Menschen, jedoch hoffe und denke ich, dass wir im Rahmen unserer Zusammenarbeit sehr viel Neues entdecken und einiges dazulernen konnten.

Nicht unerwähnt möchte ich jedoch auch die Unterstützung durch das Laborpersonal, Markus Kirl, Klaus Lackner und Geröld Wölfler lassen, welche mir immer eine große Hilfe waren und mich bei all meinen Ideen unterstützt haben. Natürlich möchte ich auch allen anderen Kollegen am Lehrstuhl für Bergbaukunde danken, die mir in der Zeit meiner Dissertation eine große Stütze waren und meinen Arbeitsalltag bereichert haben.

Ein herzlicher Dank gilt auch den Mitarbeitern des Bergbaus Breitenau, welche mich von Beginn an unterstützt haben und mir meinen eigenen „Versuchsbergbau“ zur Verfügung gestellt haben.

Widmen möchte ich diese Arbeit meinen Eltern, die mir von klein auf immer zur Seite standen, mir sämtliche Möglichkeiten geboten, Wege geebnet und Steine aus dem Weg geräumt haben, damit ich meine Ziele erreichen konnte. Von ganz besonderer Bedeutung waren für mich auch die aufbauenden Gespräche, liebe Mama, die mich aus so manchem Tief geholt haben und den Abschluss meiner Dissertation erst ermöglicht haben. Es ist ein wunderschönes Gefühl, Eltern wie euch zu haben und dass ich weiß, dass ich immer auf euch zählen kann und ihr immer hinter mir steht. DANKE!!!

Abstract

For an efficient and safe underground mining operation, the use of backfill is often required. "Backfill" describes any type of filling material which is introduced into underground openings for a variety of reasons, the stabilization of the underground openings being usually the main reason for filling activities. In general, it is known that backfill has a positive effect on the stability of the underground openings as well as on pillar stability, but questions about the occurring phenomena as well as on backfill effect in mining activities of alpine deposits are largely unexplored. Thus, the objective of the present work is to investigate the interaction of rock mass and backfill, especially concerning mining activities in the alpine region. In this context, the focus will be placed on the influence of backfill on the stability of the rock mass, in particular of slender pillars commonly used in alpine mining. In this context, also the backfill properties, in particular the binding agent addition to the backfill material is of great importance, since a variety of different backfill types are used, but there is no information on the exact effect of different backfill properties. To answer the quoted questions, the basics of backfill technology were discussed in a first step and a literature review of existing research was carried out in order to raise open questions and to integrate them into the research activities. Underground measurements and laboratory tests were carried out, which, in combination, should contribute to the current state of knowledge in the field of the interaction of rock mass and backfill. The in situ investigations were carried out in the underground mine Breitenau, a magnesite mine located in the Eastern Alps, where magnesite is extracted by means of open stoping with cemented backfill in the lowest mining level. The laboratory tests are model pillar tests in which model pillars out of cement mortar are tested in a steel frame, which constitutes the rock mass. The model pillars were surrounded by three different backfill materials and loaded under uniaxial stress. On the basis of the underground measurements and the laboratory experiments, the positive backfill effect on the stability of slender pillars could be clearly demonstrated. The influence of backfill on the maximum strength of the pillars is likely to be of minor importance but shows a pronounced stabilization in the post-failure behavior. All underground measurements showed that there is immediate stabilization of the rock mass after backfill placement. Concerning backfill properties, the uniaxial compressive strength plays a minor role for the stabilization of the rock mass, since its stabilizing effect could be perceived even before curing of the backfill body. Here, a highly compacted and cohesive backfill is of advantage, as it prevents slipping along fracture surfaces and thus increases the residual strength of the pillars. On the basis of the underground measurements and the laboratory investigations a simple model for the backfill effect was created, which also shows that already small backfill pressures are sufficient to prevent the slipping of rock wedges out of the rock mass.

Zusammenfassung

Um Rohstoffe im untertägigen Bergbau möglichst effizient und sicher abbauen zu können, ist der Einsatz von Versatz häufig erforderlich. Unter „Versatz“ versteht man jede Art von Füllmaterial, welches in untertägige Hohlräume aus vielfachen Gründen eingebracht wird, wobei die Stabilisierung der Hohlräume meist im Vordergrund der Versatzarbeiten steht. Generell ist bekannt, dass sich die Verfüllung der Hohlräume positiv auf die Stabilität des Gebirges sowie von Abbaufesten auswirkt, Fragestellungen über die auftretenden Phänomene sowie über die Versatzwirkung im alpinen Bergbau sind jedoch weitestgehend nicht erforscht. Somit ist das Ziel der gegenständlichen Arbeit die Erforschung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz im alpinen Bergbau. In diesem Zusammenhang wird der Fokus auf den Einfluss von Versatz auf die Stabilität des Gebirges, insbesondere von schlanken Bergfesten, wie sie häufig im alpinen Bergbau zur Anwendung kommen, gelegt. In diesem Zusammenhang kommt auch den Versatzeigenschaften, insbesondere der Bindemittelzugabe zum Versatzmaterial eine große Bedeutung zu, da unterschiedlichste Versatzprodukte zum Einsatz kommen, es jedoch keine Information über die genaue Wirkung von unterschiedlichen Versatzeigenschaften gibt. Um die angeführten Fragestellungen zu beantworten, wurde in einem ersten Schritt die Theorie der Versatztechnologie diskutiert und eine Literaturanalyse der bereits vorhandenen Forschungsergebnisse zum vorliegenden Thema durchgeführt um noch offene Fragen aufzuwerfen und in die Forschungstätigkeiten zu integrieren. Auf Basis der theoretischen Grundlagen wurden in weiterer Folge untertägige Messungen und Laborversuche durchgeführt, welche in Kombination zum aktuellen Wissensstand im Bereich der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz beitragen sollten. Die untertägigen Untersuchungen wurden im Bergbau Breitenau, einem in den Ostalpen gelegenen Magnesitbergbau durchgeführt, wo im tiefstliegenden Abbaurevier Magnesit mittels Kammer-Festen-Abbaus gewonnen wird. Bei den Laborversuchen handelt es sich um Modellfestenversuche, wobei Modellfesten aus Zementmörtel in einem Stahlrahmen, welcher den Gebirgsverband darstellen sollte, umgeben von verschiedenen Versatzmaterialien, unter Druck belastet wurden. Anhand der untertägigen Messungen und der Laborversuche konnte die positive Versatzwirkung auf schlanke Bergfesten eindeutig gezeigt werden. Der Einfluss von Versatz auf die maximale Festigkeit dürfte von untergeordneter Bedeutung sein, im Nachbruchbereich zeigt sich jedoch eine ausgeprägte Stabilisierung der Festen durch Versatz. Aus allen untertägigen Messungen ging hervor, dass es zur unmittelbaren Stabilisierung des Gebirges nach Versatzeinbringung kommt. Bei den Versatzeigenschaften konnte anhand der untertägigen Messungen festgestellt werden, dass die einaxiale Druckfestigkeit bei der Gebirgsstabilisierung eine untergeordnete Rolle spielt, da bereits vor Aushärten des Versatzes dessen stabilisierende Wirkung wahrgenommen werden konnte. Hier ist ein stark verdichteter beziehungsweise ein kohäsiver Versatz von Vorteil, welcher ein Abgleiten entlang von Bruchflächen verhindert und die Restfestigkeit somit erhöhen kann. Auf Basis der untertägigen Messungen und der Laboruntersuchungen wurde ein einfaches Modell zur Versatzwirkung erstellt, welches ebenfalls zeigt, dass bereits geringe Versatzdrücke in Höhe des passiven Versatzdruckes ausreichen um das Herausgleiten von Felskeilen aus dem Gebirgsverband zu verhindern.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Widmung und Danksagung	III
Abstract	IV
Zusammenfassung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einführung und Zielsetzung	1
2 Grundsätzliche Darlegung der Thematik	4
2.1 Versatz	4
2.1.1 Versatzarten	7
2.1.2 Einfluss der Bindemittelzugabe	9
2.1.3 Zusammenfassung	13
3 Versatz als Element zur Gebirgsstabilisierung	15
3.1 Versatz als regionales Stabilisierungselement	16
3.2 Vermeidung von Gebirgsauflockerung über Abbauhohlräumen	17
3.3 Verringerung der Gebirgsschlaggefahr	18
3.4 Versatz und Steinfall	20
3.5 Spezialfall: Versatz in Kombination mit Bergfesten	20
3.6 Zusammenfassung	27
4 Literaturanalyse und offene Fragen	29
4.1 Wechselwirkung von Gebirge und Versatz	29
4.2 Erkenntnisse über Einflussfaktoren bezüglich der gebirgsmechanischen Versatzwirkung	44
4.3 Zusammenfassung	46
4.4 Offene Fragen	48
5 Untersuchung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz	52
5.1 Charakteristika mehrfach tektonisch überprägter Gebirgskörper – Beispiel: Alpine Lagerstätten	54
5.2 Magnesitbergbau Breitenau	56
5.2.1 Geologie	56
5.2.2 Auswahl der Untersuchungsbereiche	58
5.2.3 Abbaumethodik im Revier VI des Bergbaus Breitenau	59
5.2.4 Versatzsystem im Breitenau	63
5.2.5 Spannungssituation im Bergbau Breitenau	65

6	In-situ Untersuchungen an Gebirge und Versatz	67
6.1	Gebirge	67
6.1.1	Fotografische Dokumentation, geologische Beschreibung und Gefügaufnahmen	67
6.1.2	Kernbohrungen im Gebirge	69
6.1.3	Extensometermessungen.....	73
6.2	Versatz	76
6.2.1	Kernbohrungen im Versatzkörper.....	76
6.2.2	Bestimmung der mechanischen Versatzeigenschaften.....	78
6.2.3	Spannungsmessungen im Versatzkörper.....	82
6.3	Beobachtungen aus untertägigen Messungen	85
6.3.1	Gebirge	85
6.3.2	Versatz	95
6.4	Zusammenfassung.....	100
7	Simulation der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz im Labormaßstab	101
7.1	Grundlagen der experimentellen Modelltechnik	102
7.2	Ähnlichkeitstheorie	103
7.2.1	Überprüfung der Statischen Ähnlichkeit für den gewählten Aufbau.....	106
7.3	Zielsetzung.....	108
7.4	Versuchsplanung.....	109
7.5	Einflussgrößen bei der Versuchsdurchführung	110
7.5.1	Festmaterial.....	110
7.5.2	Festengeometrie	111
7.5.3	Versatzmaterial	114
7.5.4	Verfüllhöhe	115
7.5.5	Belastungsgeschwindigkeit	115
7.5.6	Zusammenfassung – gewählte Untersuchungsparameter und getroffene Vereinfachungen	116
7.6	Versuchsaufbau	117
7.7	Verwendete Messtechnik	118
7.8	Modellfestenvorbereitung und Prüfablauf.....	119
7.9	Ergebnisse	123
7.9.1	Last-Verformungsverhalten der Modellfesten ohne Versatz.....	124
7.9.2	Versatzeigenschaften.....	128
7.9.3	Einfluss von Versatz auf maximale Festigkeit und Restfestigkeit	139

7.9.4	Druckaufbau und Reaktionsspannungen im Versatzkörper – Zusammenhang Querverformung und Druckaufbau	145
7.9.5	Einfluss der Bindemittelzugabe	147
7.9.6	Einfluss der Verdichtung	154
7.10	Zusammenfassung	156
8	Schlussfolgerungen, Ableitungen und Erkenntnisse zur Wechselwirkung von Gebirge und Versatz	158
8.1	Analyse der Beobachtungen bezüglich der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz	158
8.1.1	Feste E	159
8.1.2	Feste F	160
8.1.3	Feste G	161
8.1.4	Auflagerfeste 600H	162
8.2	Analyse der vertikalen Versatzdrücke	164
8.3	Modell zur Wirkung von geringen Versatzdrücken	166
8.4	Erklärung zu erhöhten untertägig gemessenen Versatzdrücken	172
8.5	Untertägige Schalenbildung und ihr Versagensmechanismus	174
8.6	Erkenntnisse aus Laborversuchen	180
8.7	Analyse und Interpretation der Ergebnisse	180
8.7.1	Zusammenfassung Erkenntnisse aus Laborversuchen	185
8.7.2	Offene Fragen aus Laborversuchen	186
8.7.3	Vergleich Modell und in-situ Verhalten	187
9	Zusammenfassung	191
10	Literaturverzeichnis	195
11	Abbildungsverzeichnis	203
12	Tabellenverzeichnis	211
	Anhang - Inhaltsverzeichnis	I
	Anhang	II
1	Auslegung von Versatzsystemen	II

1 Einführung und Zielsetzung

Zum Zwecke der Rohstoffgewinnung im untertägigen Bergbau müssen einige Herausforderungen überwunden werden, wobei sowohl Aspekte bezüglich Arbeitssicherheit, die technologische Gewinnung der Rohstoffe, die Wirtschaftlichkeit der Abbautätigkeiten als auch die Betriebslogistik und Umweltaspekte in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden müssen. Um die untertägige Gewinnung erst möglich zu machen, ist die Stabilität der Grubenbauten Voraussetzung. Dies betrifft auf der einen Seite die lokale Stabilität von Strecken, Schächten und Abbaukammern sowie die regionale Stabilität von Abbaurevieren und des gesamten Grubengebäudes. Zusätzlich muss der Einfluss des Grubengebäudes auf die Tagesoberfläche berücksichtigt werden.

Zur lokalen Stabilisierung wird in den meisten Fällen auf klassische Ausbauelemente wie Gebirgsanker, Seilanker, Stahlgitter und Spritzbeton zurückgegriffen. Als regionales Stabilisierungselement können die bergmännisch erstellten Hohlräume unter anderem mit unterschiedlichen Materialien verfüllt werden, was unter dem Begriff „Versatz“ bzw. „Versetzen“ bekannt ist. Laut der BVÖ-Versatzrichtlinie wird das Versetzen als alle Aktivitäten bezeichnet, die das teilweise oder vollständige Verfüllen von Hohlräumen im Rahmen von Bergbauaktivitäten betreffen (Hohl und Frömmer, 2013). Das Verfüllen kann wie bereits beschrieben zum Zwecke der Hohlraumstabilisierung durchgeführt werden, was den Haupteinsatzgrund für Versatz darstellt. Jedoch gibt es weitere Gründe für das Verfüllen von Hohlräumen, welche in bergtechnische, sicherheitstechnische, wirtschaftliche und umweltrelevante Gründe eingeteilt werden können. (Reuther, 1989)

Als Verfüllmaterialien können unterschiedlichste Stoffe wie Aufbereitungsabgänge, Bergematerial, aber auch Bindemittel zum Einsatz kommen, wobei versucht wird, die Kosten für das Versatzprodukt möglichst gering zu halten um die Wirtschaftlichkeit der Rohstoffgewinnung zu gewährleisten. Die Bindemittelzugabe führt zu höheren Versatzfestigkeiten, stellt jedoch einen der Hauptkostenkomponenten von Versatzsystemen dar. Deshalb wird versucht den Bindemittelanteil im Versatzprodukt möglichst gering zu halten.

Die Wechselwirkung von Versatz und Gebirge ist äußerst komplex, da einerseits die Bewegungen und Verformungen des Gebirges um bergmännisch geschaffene Hohlräume berücksichtigt und andererseits die Belastungen, welche der Versatzkörper aufnimmt, und dessen Reaktion auf Verformungen im Gebirge analysiert werden müssen. Zudem weisen Versatz und Gebirge vollkommen unterschiedliche Charakteristika auf, sowohl was Entstehungsursprung als auch mechanische Eigenschaften betrifft. Gebirge ist auf natürliche Art und Weise entstanden, Versatz wurde künstlich geschaffen. In den meisten Fällen weist das Gebirge eine weitaus größere Festigkeit und Steifigkeit auf als das

Versatzmaterial, weswegen es zusätzlich zu einer ausgeprägten Wechselwirkung und gegenseitigen Beeinflussung dieser Materialien unter Belastung kommt.

Bei der Auslegung von Versatzsystemen für den Einsatz im untertägigen Bergbau ist es von großer Bedeutung, das Versatzsystem auf die jeweiligen individuellen Anforderungen des Bergbaubetriebes abzustimmen und somit das für den Einsatzzweck richtige System zusammenzustellen. Die positive Wirkung der Verfüllung untertägiger Hohlräume auf die lokale, sowie regionale Stabilität des Gebirges ist bekannt, jedoch fehlt ein Verständnis über die genaue Wirkungsweise des Versatzes. Auch fehlt quantitative Information über die festigkeitssteigernde Wirkung von Versatz auf Bergfesten (Blaha, 2012). Somit basiert die Auslegung von Versatzsystemen in den meisten Fällen auf Erfahrungswerten, da sehr wenig über die genaue Wirkung von Versatz in Bezug auf seine gebirgsmechanische Wirkung und die zum Tragen kommenden Phänomene sowie die Interaktion von Versatz und verschiedenen Versatzmaterialien mit dem Gebirgskörper bekannt ist. In einigen Fällen werden aufgrund des fehlenden Wissens über die Versatzwirkung Versatzprodukte zusammengestellt, welche Eigenschaften besitzen, die für ihren Anwendungszweck nicht benötigt werden und nur zu erhöhten Kosten führen. Zudem ist nicht bekannt, welche Parameter im Rahmen der Verfüllung einen Einfluss auf die Wirkung des Versatzes haben können. Daher ist es Ziel der gegenständlichen Arbeit einen Beitrag zum Verständnis der Wirkungsweise von Versatz zur Stabilisierung des Gebirges zu leisten, insbesondere im Bereich des alpinen Bergbaues, wo noch keine veröffentlichten Forschungsergebnisse zur besprochenen Problematik zur Verfügung stehen.

Um einen Beitrag zum Verständnis des Gesamtsystems Gebirge-Versatz zu leisten, sollen aufbauend auf einer Auswertung der in der Literatur vorhandenen Informationen zur Wechselwirkung von Gebirge und Versatz offene Fragen bezüglich der Problematik definiert werden. In weiterer Folge sollen die im Vorfeld definierten Fragen mittels untertägiger Messungen im Magnesitbergbau Breitenau und Untersuchung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz im Labormaßstab beantwortet werden.

Bei den untertägigen Messungen handelt es sich um Verformungsmessungen im Gebirge sowie um Druckmessungen im Versatzkörper, welche in Kombination mit einer genauen Dokumentation der Abbautätigkeiten in einen gemeinsamen Kontext gebracht werden sollen, aus welchem Rückschlüsse auf die Versatzwirkung gezogen werden sollen. In weiterer Folge soll im Labormaßstab mittels eines Modellversuches eines allgemeinen Versatz-Festensystems die Wirkungsweise von Versatz auf die Festigkeit von Festen, wobei im Labormaßstab ebenfalls die Verformung der Modellfeste sowie der Druckaufbau im Versatzkörper gemessen werden, nachgestellt werden. Die in-situ Messergebnisse werden mit den Ergebnissen der Laborversuche verglichen um zu überprüfen, ob die Laborversuche in der Lage sind den Einfluss von Versatz auf das Gebirge realistisch nachzustellen. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen sollen Modelle für die Wechselwirkung von Gebirge und Versatz sowie für die

unterschiedlichen Arten der Versatzwirkung gefunden werden. Ziel der Arbeit ist damit die gewonnenen Erkenntnisse derart auszuwerten, dass den Bergbaubetrieben zukünftig eine Grundlage zur richtigen Auslegung eines Versatzsystems für den jeweiligen Anwendungszweck zur Verfügung steht, wobei das Hauptaugenmerk auf der gebirgsmechanisch optimalen Wirkung des Versatzkörpers liegt.

Zu diesem Zweck wird im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit auf den aktuellen Wissensstand im Bereich der Versatztechnologie eingegangen, wobei der gebirgsmechanischen Versatzwirkung aufgrund seiner Bedeutung das darauffolgende Kapitel gewidmet wird. Kapitel 4 befasst sich mit einer genauen Analyse der veröffentlichten Literatur und der aktuellen Forschung im Bereich der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz. Im Rahmen dieses Kapitels sollen die noch offenen Fragen bezüglich der vorliegenden Problematik definiert werden. Kapitel 5 liefert in weiterer Folge die Herangehensweise zur Beantwortung der noch offenen Fragen. Im darauffolgenden Abschnitt wird auf die Methodik und die Ergebnisse aus den untertägigen Messungen eingegangen. Zur Vervollständigung der Resultate aus den untertägigen Messungen wird in Kapitel 7 die Herangehensweise zur Untersuchung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz im Labormaßstab erläutert sowie die Ergebnisse der Versuche präsentiert. Im abschließenden Kapitel 8 werden schlussendlich alle aus den Versuchen und Untersuchungen resultierenden Erkenntnisse zusammengefasst, interpretiert und analysiert. Kapitel 8 dient weiters der Erläuterung von Beobachtungen, welche während der Messungen gemacht wurden und welche eine gesonderte Behandlung erfordern. Auf Basis der Interpretation der Ergebnisse werden hier auch Modelle zur Wirkung von Versatz präsentiert sowie Erkenntnisse aus Untersuchungen im Bereich der Versatztechnologie erläutert, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemacht wurden und eine Hilfestellung für zukünftige Untersuchungen darstellen sollen.

2 Grundsätzliche Darlegung der Thematik

Um den Einfluss von Versatz auf das Gebirge festzustellen, werden in einem ersten Schritt die Einzelkomponenten „Versatz“ und „Gebirge“ betrachtet und deren Eigenschaften und Verhalten diskutiert. Im darauffolgenden Schritt kann auf die Wechselwirkung im Gesamtsystem eingegangen werden. Die Komponente „Versatz“ wird im Rahmen dieser Arbeit lediglich in ihren Grundzügen beschrieben, da die Grundlage der Versatztechnologie von der Autorin im Rahmen ihrer Diplomarbeit erarbeitet wurde. Für weiterführende Details sei somit auf die Diplomarbeit „State of the art of backfill technology in underground mining excavations“ (Moser, 2015) verwiesen. Die Charakteristika der Gebirgsformationen, welche für Untersuchungszwecke herangezogen werden, werden in Kapitel 3 beschrieben.

2.1 Versatz

Die Verfüllung von bergmännisch geschaffenen Hohlräumen stellt mittlerweile einen integralen Bestandteil untertägiger Rohstoffgewinnung dar. Einige Lagerstätten könnten ohne die Verfüllung der Hohlräume nicht abgebaut werden, wobei zu beachten ist, dass technologische und gebirgsmechanische Gründe nicht die alleinige Motivation für die Verfüllung von Hohlräumen darstellen.

Bevor die unterschiedlichen Gründe für den Einsatz von Versatz diskutiert werden, werden nachstehend einige Grundbegriffe definiert:

Wenn von Versatzmaterial gesprochen wird, handelt es sich um die Bestandteile von Versatz, wie Wasser, Bindemittel oder Aufbereitungsberge, die nach einem Mischvorgang das Versatzprodukt ergeben, welches in weiterer Folge an seinen Einsatzort transportiert wird. Der Mischvorgang ist nur dann von Nöten, wenn der Versatz ein Mehrkomponentensystem aus unterschiedlichen Bestandteilen ist. Versatz kann aber auch unaufbereitetes Taubmaterial ohne Zugabe von Wasser oder Bindemittel sein.

Der Versatzkörper ist der in-situ eingebrachte meist homogene Versatz, welcher konsolidiert ist und je nach Bindemittelzugabe auch eine gewisse Festigkeit entwickelt.

Allgemeine Anforderungen und Aufgaben von Versatzsystemen

Allgemein betrachtet gibt es vielfältige Gründe für die Verfüllung von untertägigen Hohlräumen. Es ist jedoch zu beachten, dass Versatz nicht, wie weit verbreitet, rein zum Zwecke der Hohlraumstabilisierung eingesetzt wird, sondern es durchaus unterschiedlichste Gründe für die Versatzeinbringung gibt.

Die Gründe für den Einsatz von Versatz und die daraus resultierenden Anforderungen an Versatzsysteme können folgendermaßen unterteilt werden:

- Gebirgsmechanische Aspekte
- Technische und operative Aspekte
- Umweltrelevante Aspekte
- Verfügbarkeit des Versatzmaterials
- Wirtschaftliche Aspekte

(Wagner, 2009)

Versatz bewirkt Einspannungseffekte im Gebirge, die durch die Mobilisierung von Reibungskräften die Festigkeit erhöhen, limitiert Konvergenzen in Hohlräumen und erhält die Integrität des Gebirges um Hohlräume. Somit können Auflockerungsvorgänge im Gebirge vermieden werden. Der kritische Parameter ist hier die freie Höhe (unverfüllter Bereich) des Abbauhohlraumes, welcher die Höhe der Auflockerungszone maßgeblich beeinflusst. Durch Verfüllung der Hohlräume kann die freie Höhe des Abbauhohlraumes und dadurch die Höhe der Auflockerungszone reduziert werden. Hier kommt dem Porenvolumen im Versatzkörper ebenfalls eine große Bedeutung zu, da ein bedeutendes Porenvolumen im Versatzkörper die Setzung des Versatzkörpers bzw. eine Zusammendrückung des Versatzkörpers ermöglicht. Dies würde folglich die freie Höhe des Hohlraumes vergrößern, was zu zusätzlichen Auflockerungen im Gebirge führen kann. Abhilfe kann hier die Zugabe von Bindemittel schaffen, da der Bindemittelleim bzw. die Bindemittelmilch die Poren füllt und somit das Porenvolumen reduziert wird. Bei oberflächennahen Abbautätigkeiten kann durch die Vermeidung von Gebirgsauflockerung die Oberflächenbeeinträchtigung erheblich reduziert werden, wie beispielsweise im Bergbau Mittersill, wo die Verfüllung oberflächennaher Abbaue mit bindemittelverfestigtem Versatz erfolgt.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Verbesserung der Stabilität von Bergfesten durch die Verfüllung der zwischen den Bergfesten vorhandenen Hohlräume, wie es auch im Bergbau Breitenau zur Anwendung kommt. Durch das Einbringen von Versatz werden ein Umschlingungsdruck auf die Festen ausgeübt, die Querverformung der belasteten Bergfesten reduziert, das Herausgleiten von Felskeilen verhindert und das Verhalten der Bergfesten nach Überschreiten der maximalen Festigkeit beeinflusst. Hier kommt der Dichte des Versatzes, der Höhe der Versatzschicht und den Verformungseigenschaften des Versatzkörpers große Bedeutung zu.

In besonders tiefem Bergbau wird Versatz auch zur Verringerung der Gebirgsschlaggefahr eingebracht. Aufgrund der hohen Spannungskonzentrationen kann es zu ausgeprägten Brucherscheinungen kommen, die schlagartig unter Freisetzung hoher Energiebeträge erfolgen können. Durch das Einbringen von Versatz kann das Konvergenzvolumen erheblich reduziert werden und somit die zu erwartenden Brucherscheinungen und die Gebirgsschlaggefährdung reduziert

werden. Da die gebirgsmechanische Wirkung von Versatz eine seiner Hauptaufgaben darstellt und im Fokus dieser Arbeit liegt, wird in Kapitel 3 im Detail auf den gegenwärtigen Wissensstand zur gebirgsmechanischen Versatzwirkung eingegangen um potentielle Wissenslücken in diesem Bereich herausarbeiten zu können, welche im Rahmen dieser Arbeit bearbeitet werden sollen.

Ein weiterer Einsatzgrund von Versatz betrifft die unmittelbaren Abbautätigkeiten und verschiedenen Abbauprozesse. Bei Abbaumethoden wie zum Beispiel dem Firstenstoßbau ist das Einbringen von Versatz erforderlich, um eine Arbeitsplattform zu schaffen. Auch im Bergbau Breitenau dient der Versatz sowohl in den oberen Abbaubereichen beim Post-pillar Abbauprozess sowie beim im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Kammerfestenbau dem Schaffen einer Arbeitsplattform. Unter Zuhilfenahme von Versatz können unter gewissen Voraussetzungen auch Lagerstättenbereiche und Bergfesten zurückgewonnen werden. Obwohl die mechanischen Eigenschaften wie z.B. Festigkeit und Steifigkeit von Versatzprodukten im Vergleich zum anstehenden Gebirge gering sind, zeigen einige Beispiele, dass durch das Verfüllen der Hohlräume Bergfesten teilweise zurückgewonnen werden können (Hunt 1990, Zur 2004, Sun 2018).

Weiters kann durch das Versetzen mit Taubmaterial dessen Transport an die Tagesoberfläche reduziert werden, was sich positiv auf die Abbaukosten auswirkt und logistisch ebenfalls von Vorteil ist. Zusätzlich wird die Flächeninanspruchnahme durch Taubmaterial an der Tagesoberfläche reduziert, was die Umwelt schont, das Landschaftsbild bewahrt und Probleme mit Anrainern vermindert. Die relevanten Parameter betreffen in diesem Fall nicht das Material selbst, da hier die betrieblichen Aktivitäten im Vordergrund stehen. Das Hauptaugenmerk liegt in diesem Fall auf der Koordination der Volumina aus anfallendem Taubmaterial und zur Verfüllung zur Verfügung stehenden Hohlraumvolumina. Weiters sollten Gewinnungs- und Verfüllorte aufeinander abgestimmt sein um auch innerbetriebliches Verkehrsaufkommen möglichst gering zu halten.

Im tiefen Bergbau dient der Versatz zusätzlich der Verbesserung der Wetterführung und Klimatisierung. Durch die Verfüllung wird der Wärmezutritt aus dem Gebirge aufgrund der reduzierten exponierten Fläche vermindert, das Eintreten von gefährlichen Grubengasen durch die Hohlraumversiegelung gehemmt und das nötige Frischwettervolumen kann reduziert werden. (Wagner, 2009)

All die angeführten Einsatzgründe und Anforderungen an Versatz haben einen nicht unbedeutenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Abbautätigkeiten. Grundsätzlich sollten die Abbaukosten so gering wie möglich gehalten werden um den Gewinn des Bergbaubetriebes zu maximieren. Wenn beim Abbau anfallendes Taubmaterial oder Nebengestein als Versatz verwendet werden kann, können Transportkosten gespart, Ablagerungskosten an der Oberfläche vermindert und die Kosten für die Einhaltung der Umweltschutzanforderungen reduziert werden.

Wie hier dargestellt gibt es unterschiedlichste Einsatzgründe für Versatz. Da es jedoch Ziel dieser Arbeit ist die Wechselwirkung zwischen Versatz und Gebirge aus gebirgsmechanischer Sicht zu betrachten, wird in weiterer Folge lediglich auf die gebirgsmechanischen Aspekte der Versatztechnologie eingegangen.

2.1.1 Versatzarten

In diversen Literaturquellen werden unterschiedliche Versatzsysteme beschrieben. So finden sich in deutschsprachigen Quellen häufig die Begriffe „Sturzversatz“, „Spülversatz“, „Pumpversatz“, „Blasversatz“ und „Schleuderversatz“. In der englischsprachigen Literatur werden die Begriffe „Rock fill“, „Hydraulic fill“ und „Paste fill“ am häufigsten verwendet. Diese Begriffe beziehen sich vorwiegend auf die Methode der Versatzeinbringung, die bei „Sturzversatz“ bzw. „Rock fill“ und in manchen Fällen auch bei Spülversatz bzw. „Hydraulic fill“ durch Schwerkraft erfolgt, wohingegen für das Einbringen von „Pumpversatz“ oder „Pastösem Versatz“, wie schon der Name verrät, meist Pumpleistung von Nöten ist. Im Folgenden werden die grundlegenden Typen „Rock fill/Sturzversatz“, „Hydraulic fill/Spülversatz“ und „Paste fill/Pastöser Versatz“ kurz erklärt um eine Grundlage für die darauffolgende Diskussion zu schaffen.

"Rock fill" – bestehend aus Taubmaterial aus untertägigen Abbautätigkeiten oder Abraum aus dem Tagebau – wird händisch, maschinell oder durch Schwerkrafftförderung eingebracht.

"Hydraulic fill" im Deutschen "hydraulischer Versatz" oder "Spülversatz" nützt Wasser als Transportmedium für Versatzmaterialien wie Schlacke, Sand oder Aufbereitungsabgänge. Der Feinstkornanteil im Spülversatz sollte keine Feinstkornanteile $< 75 \mu\text{m}$ beinhalten oder nach Thomas et al. darf der Feinstkornanteil $< 10 \mu\text{m}$ 10% nicht überschreiten (Wagner, 2009)

"Paste fill" - "pastöser Versatz", "Pumpversatz" oder "Cemented paste backfill" ist eine bindemittelverfestigte Suspension aus Wasser, Bindemittel und Zuschlagsstoffen. Es sollten mindesten 15 % von Kornfraktionen $< 20 \mu\text{m}$ vorhanden sein, damit das problemlose Einbringen und der Transport mittels Pumpen für den pastösen Versatz gewährleistet sind. (Moser, 2014) (Wagner, 2009). Der Bindemittelanteil im pastösen Versatz dient einerseits der Bindung von Wasser durch die Hydratation, weiterhin kann dadurch eine Konsistenz erreicht werden, um die Pumpbarkeit zu gewährleisten. Durch richtige Dosierung und Auswahl eines geeigneten Bindemittels können Endfestigkeiten von mehreren MPa erreicht werden.

Diese Begrifflichkeiten geben jedoch keine Auskunft über das verwendete Versatzmaterial oder die Bindemittelzugabe, wobei eine grundlegende Unterscheidung zwischen bindemittelverfestigtem und nicht

bindemittelverfestigtem Versatz getroffen werden sollte. Bindemittelzugabe ist für jede Art von Versatzmaterial möglich, ist sie doch bei pastösem Versatz aufgrund seiner Zusammensetzung unbedingt erforderlich.

Das verwendete Versatzmaterial ist in den meisten Fällen dem Betrieb zur Verfügung stehendes Material, wie Taubmaterial oder Aufbereitungsabgänge, aus welchen das Unternehmen keinen monetären Gewinn erzielen kann. Sollten dem Betrieb kein Taubmaterial, Abraum oder Aufbereitungsberge zur Verfügung stehen, muss das Versatzmaterial zugekauft werden. Hier wird auf Schotter, Sand oder, wenn behördlich genehmigt, auf Reststoffe von anderen Produktionsbetrieben zurückgegriffen. Die Zusammensetzung all dieser Materialien unterscheidet sich demnach grundlegend, wobei es bei Versatz auch keine Anforderungen an die Zusammensetzung oder Mineralogie gibt. Von Bedeutung ist jedoch die Korngröße beziehungsweise ebenfalls die Korngrößenverteilung, welche unter anderem darüber entscheidet, welcher Versatztyp zur Anwendung kommen kann. Bei sehr feinkörnigem Material, welches das Resultat von Aufbereitungsvorgängen darstellt und häufig in einer Suspension anfällt, wäre beispielsweise die Verwendung von klassischem Sturzversatz, welcher über SLKW in die Hohlräume abgekippt wird, nicht möglich. Hier müsste auf einen Versatztyp wie Spülversatz oder Pumpversatz zurückgegriffen werden.

Nach der Auswahl des verwendeten Versatzmaterials muss in weiterer Folge über den Versatzprodukttransport und die Versatzeinbringung in die zu verfüllenden Hohlräume entschieden werden. Hier werden grundlegend folgende Mechanismen unterschieden:

- Transport mittels Schwerkraft
- Pumpversatz
- Maschinelle Versatzeinbringung

Unter Schwerkrafttransport fällt hier das Abstürzen des Materials über Bohrlöcher, Rohre oder Sturzschächte. Beim Pumpversatz wird auf die Leistung von Pumpen zurückgegriffen, welche nur bei feinkörnigem in einer Suspension vorliegendem Versatzprodukt zum Einsatz kommen. Die Pumpleistung ist vor allem für den horizontalen Versatzprodukttransport durch Rohrleitungen erforderlich. Unter maschinelle Versatzeinbringung fällt jede Art von Versatz, wo für die Einbringung Geräte erforderlich sind, wie zum Beispiel das Abkippen von Taubmaterial mittels SLKW oder das Einblasen bzw. Einschleudern des Materials mittels eigens für diesen Zweck konstruierten Maschinen. Heutzutage sind letztere von untergeordneter Bedeutung, da die Verfüllleistung relativ gering ist (90-250m³/h) und in modernen Hochleistungsbetrieben demensprechend nicht verwendet werden können und die Methoden zudem sehr große Energiemengen benötigen. Einschleudern und Einblasen des Versatzproduktes wird nur in vereinzelt Fällen eingesetzt, wo es sich um kleine Hohlraumgrößen und eine notwendige firstbündige Verfüllung der Hohlräume handelt.

Die unterschiedlichen Arten des Versatzes bringen einige Vor- und Nachteile mit sich. Beim Spülversatz und Pumpversatz müssen Kosten, Transport, Entwässerung und Festigkeit berücksichtigt werden. Während beim Pumpversatz aufgrund des hohen Feinstkornanteiles die Bindemittelzugabe unbedingt erforderlich ist und die Kosten für den Versatz daher höher sind, benötigt der Spülversatz – wo die Bindemittelzugabe optional erfolgt – im Normalfall ein Drainagesystem, damit der Versatzkörper entwässert wird. Unzureichende Entwässerung des Versatzkörpers bzw. Überschusswasser im Versatzkörper kann zum Aufbau von Porenwasserdruck und in weiterer Folge zur Verflüssigung des Versatzkörpers führen („liquefaction“), was ein erhebliches Risiko darstellt. Unter dynamischer Belastung (Sprengungen, Gebirgsschläge) kann es zur Bildung einer Art Schwimmsand kommen, wobei die aufgebauten Versatzbarrikaden der Belastung durch diese Schlammlawinen nicht standhalten, was verheerende Folgen haben kann. Im untertägigen Bergbau stellt dieses Phänomen im Bereich Versatz den häufigsten und schwerwiegendsten Unfallgrund. Beim Pumpversatz ist die Entwässerung des Versatzkörpers nicht notwendig, da das zum Transport und zur Festigkeitsentwicklung zugegebene Wasser durch die Zugabe von Bindemittel gebunden wird. Die Hydratationswärme, welche bei der Reaktion von Wasser mit Bindemittel entsteht, kann sowohl beim Pumpversatz als auch beim bindemittelverfestigten Spülversatz negative Auswirkungen auf das Grubenklima bewirken. Durch die Bindemittelzugabe kann jedoch eine höhere Festigkeit erreicht werden.

2.1.2 Einfluss der Bindemittelzugabe

Aufgrund der körnigen Versatzstruktur, im Falle von Aufbereitungsabgängen häufig gleichförmiger Korngrößenverteilung, kommt es je nach Zusammensetzung zu einem erheblichen Anteil an Porenvolumen im Versatzkörper (meist zwischen 25 und 60%). Aufgrund dieses großen Porenanteils zeigt der Versatz unter Belastung ein stark nichtlineares Last-Verformungsverhalten, da es zuerst zur Kornumlagerung und Reduktion des Porenvolumens kommt, bevor das Korngerüst Widerstand gegen die Belastung zeigt. Durch Bindemittel- und Wasserzugabe, welches für die hydraulische Reaktion des Bindemittels von Nöten ist, kommt es zur Auffüllung des Porenraumes durch die Bindemittel-Milch. Dies führt dazu, dass es unter Belastung nicht zu einer Kornumlagerung kommen kann und der Versatz wesentlich früher Belastungen aufnimmt und generell steiferes Last-Verformungsverhalten zeigt. In ihrer Arbeit zeigten Gürtunca und Gay (1993), dass die Bindemittelzugabe zu einem steiferen Versatzmaterial führt und dass der Versatz ohne Bindemittelzugabe eine größere Porosität und somit ein weniger steifes Last-Verformungsverhalten aufweist.

Die finale Festigkeit von bindemittelverfestigtem Versatz hängt von dem Hauptzuschlagstoff des Versatzes, dessen Korngrößenverteilung, der zugegeben

Wassermenge und der Menge und Art an verwendetem Bindemittel ab. Weiters können sich in der Aufbereitung verwendete Reagenzien und zu früh eintretende Erstarrung des Bindemittels negativ auf die Festigkeitsentwicklung des Versatzkörpers auswirken. (Walkner, 2017) Bei bindemittelhaltigem Versatz spielt vor allem auch die Aushärtedauer des Versatzes eine große Rolle. Aufgrund der für den problemlosen Transport zugegeben großen Wassermengen laufen die chemischen Reaktionen im Versatz langsamer ab und somit entwickeln sich große Versatzfestigkeiten erst nach längerer Zeit als es für Beton der Fall ist.

Zusätzlich zum Bindemittel werden dem Versatz noch Reagenzien zugegeben um dessen Eigenschaften zu modifizieren und an die örtlichen Gegebenheiten anzupassen. Dies betrifft in den meisten Fällen die Konsistenz zum Zwecke eines problemlosen Versatzprodukt-Transportes durch Rohrleitungen und Bohrlöcher sowie den Erstarrungszeitpunkt. Hier handelt es sich um dieselben Reagenzien wie sie in der Betontechnologie verwendet werden, wie Verzögerer, Fließmittel oder Beschleuniger. Verzögerer kommen dann zum Einsatz, wenn das Versatzprodukt über größere Distanzen zu seinem Einsatzort transportiert werden muss, Beschleuniger werden benötigt, wenn eine frühe Verfestigung des Versatzkörpers von Nöten ist, wie es bei freistehenden Versatzböschungen der Fall ist.

Als Bindemittel kommen klassischer Portlandzement sowie alternative Bindemittel mit hydraulischen oder latent hydraulischen Eigenschaften zum Einsatz. Diese werden verwendet um einerseits die Fließeigenschaften zu verbessern und andererseits Kosten zu sparen. Bei der Verwendung von alternativen Bindemitteln muss jedoch in den meisten Fällen ein größerer Bindemittelanteil gewählt werden um dieselben Eigenschaften zu erhalten. Als alternative Bindemittel kommen Hochofenschlacke, Flugasche, Sulfide oder auch Gips zum Einsatz. Insbesondere Flugasche ist ein beliebter Zusatzstoff und wird häufig in Kombination mit Portlandzement oder als günstige Alternative zum Portlandzement eingesetzt. Filterasche fällt bei Verbrennungsvorgängen, wie Holz- oder Kohleverbrennung an, wobei ihre Korngröße von der jeweiligen Filterstufe abhängt. Die hydraulischen Eigenschaften der Filterasche hängen stark von der chemischen Zusammensetzung ab (Lutze et al., 2008) Je feinkörniger die Filterasche ist, desto stärker sind ihre hydraulischen Eigenschaften ausgeprägt. Die Filteraschepartikel sind rund und haben einen großen Einfluss auf die Viskosität des bindemittelverfestigten Versatzes und dementsprechend auf die Fließeigenschaften.

Durch die Erhöhung des Bindemittelanteils wird die Festigkeit des Versatzkörpers erhöht, wobei Helms (1988) festgestellt hat, dass die einaxiale Druckfestigkeit von bindemittelverfestigtem Versatz nicht direkt proportional mit dem Zementgehalt ansteigt (Abbildung 1).

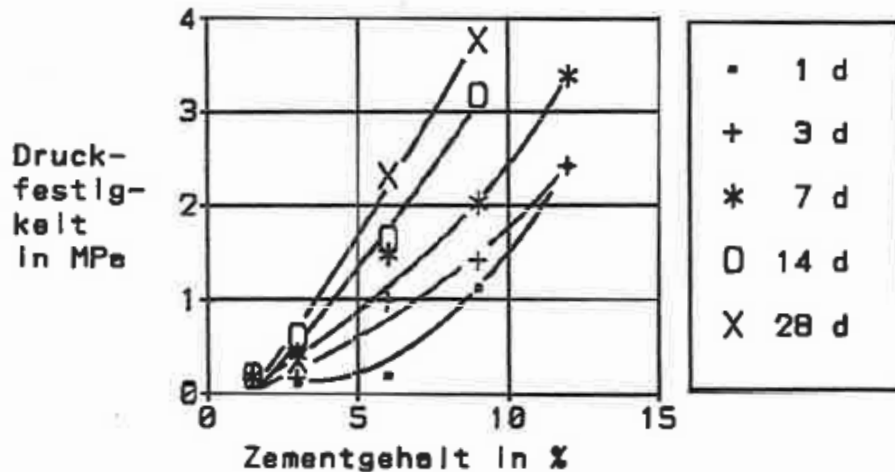


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen einaxialer Druckfestigkeit und Zementgehalt für bindemittelverfestigten Versatz aus Aufbereitungsabgängen (Helms 1988, S.59)

Andererseits konnte im australischen Bergbau ein linearer Zusammenhang zwischen Bindemittelanteil und einaxialer Druckfestigkeit des Versatzkörpers festgestellt werden (Wagner, 2009):

$$\sigma_d = 140b - 217 \quad (1)$$

σ_d ...einaxiale Druckfestigkeit [kPa]

b ...Bindemittelanteil

Auch Pirapakaran et al. (2007) und Benzaazoua et al. (2004) haben für pastösen Versatz einen linearen Festigkeitszuwachs mit dem Bindemittelgehalt festgestellt.

Diese Unterschiede in den Beobachtungen könnten auch an der Wassermenge, welche die Endfestigkeit aber auch die Festigkeitsentwicklung erheblich beeinflusst, liegen. Grundsätzlich muss Wasser den Mischungen beigefügt werden um die Hydratationsreaktion des Bindemittels zu ermöglichen und bei Pump- und Spülversatz die für den Transport notwendige Konsistenz zu schaffen. Das Wasser im Versatz ist für die Hydratation des Bindemittels, sowie für die Fällung von Hydratphasen aus der Porenlösung erforderlich. Die durch die Wasserzugabe hervorgerufenen Hydratationsreaktionen sind ein ausschlaggebender Faktor für die Festigkeit und Steifigkeit des Versatzproduktes. (Walkner, 2017) Es muss ausreichend Wasser für eine vollständige Hydratationsreaktion und zur Bedeckung der Partikeloberflächen vorhanden sein, ein zu hoher Wassergehalt wirkt sich jedoch negativ auf die Frühfestigkeit sowie die Endfestigkeit aus. Je feiner der Zuschlagstoff ist, desto mehr Wasser wird benötigt um die Partikel vollständig mit der Zementmilch zu umgeben, da feine Partikel eine größere spezifische Oberfläche aufweisen. Wenn der Versatzmischung jedoch zu viel Wasser beigefügt wird, läuft die Hydratationsreaktion langsamer ab und wenn Überschusswasser im Versatzkörper verbleibt, setzt dies die Endfestigkeit herab.

Die Relation zwischen Wasser und Zementgehalt wird in der Zementtechnologie durch den W/Z-Wert ausgedrückt:

$$\frac{w}{z} = \frac{m_w}{m_z} \quad (2)$$

m_w ...Wassermasse [kg]

m_z ...Zementmasse [kg]

In der Versatztechnologie kommt diesem Ausdruck eine vollkommen andere Bedeutung zu, da sowohl der Wassergehalt der Zuschlagstoffe variiert als auch alternative Bindemittel zum Einsatz kommen. Diese besitzen nicht dieselbe festigkeitsbildende Wirkung wie reiner Zement, weswegen alternative Bindemittel meist in größeren Mengen als reiner Zement zugegeben werden müssen. In der Versatztechnologie könnte der Zusammenhang folgendermaßen lauten:

$$\frac{w}{b} = \frac{m_w}{m_b} = (m_{wk} + m_{wb})/m_b \quad (3)$$

m_w ...Wassermasse [kg]

m_b ...Bindemittelmasse [kg]

m_{wk} ...Wassermasse im Zuschlagstoff [kg]

m_{wb} ...Masse des zusätzlichen Wassers [kg]

In der Zementtechnologie wird ein W/Z-Wert von 0,5 als optimal für die vollständige Hydratation des Zements angesehen. In der Versatztechnologie variieren die W/B-Werte aufgrund der unterschiedlichen verwendeten Bindemittel stark und liegen in der Größenordnung von 2,5-20. (Belem & Benzaazoua, Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology, 2007) In der Betonindustrie werden in etwa W/B-Werte von 0,5 verwendet. In der Betontechnik hat der W/Z-Wert eine konkrete Bedeutung, da hier Mischungen aus 3 Komponenten mit großteils konstanten Eigenschaften zum Einsatz kommen. Bei Versatzprodukten können die Eigenschaften der Zuschlagsstoffe stark variieren, in den meisten Fällen wird zur Kostenreduktion kein reiner Zement, sondern ein alternatives Bindemittel verwendet. Zudem wird das Versatzprodukt häufig durch lange Rohrleitungen transportiert, wo es sich nicht entmischen und auch nicht erhärten darf. Aus diesem Grund hat der W/B-Wert in der Versatztechnik untergeordnete Relevanz, wird er dennoch herangezogen um einigermaßen konstante Versatzeigenschaften zu erhalten.

Ein geringer W/B-Wert begünstigt die mechanischen Eigenschaften des Versatzes. Zur Herstellung des Versatzproduktes wird dennoch ein hoher Wasser/Bindemittel-Wert verwendet. Dies liegt daran, dass unter anderem auch die Pumpfähigkeit für das Einbringen des Versatzes in die Abbaukammer

gewährleistet sein muss, was durch die rheologischen Eigenschaften des Versatzes beschrieben werden kann. (Sheshpari, 2015).

Rheologische Eigenschaften

Die Pumpfähigkeit/Pumpbarkeit ist ein wichtiges Merkmal für das Versatzprodukt um einen raschen und problemlosen Transport, in den meisten Fällen durch ein bereits vorhandenes System aus Rohrleitungen und Bohrungen von der Versatzmischanlage bis zum Einsatzort zu gewährleisten. Sie wird durch verschiedene rheologische Eigenschaften (z.B. Viskosität, Fließgrenze und innere Reibung) beeinflusst. (Secieru, Butler, & Mechtcherine, 2014)

Die Schmierfilmbildung, die plastische Viskosität und die Fließgrenze sind unter anderem wichtige Beurteilungskriterien um die Pumpfähigkeit zu verbessern und Verstopfungen in den Rohrleitungen zu vermeiden. (Wu, Fall, & Cai, 2013)

Erstarrungsbeginn

Im Falle von bindemittelverfestigtem Versatz, wie er in den meisten untertägigen Betrieben zum Einsatz kommt, spielt der Erstarrungsbeginn ebenfalls eine große Rolle, welcher erst nach Einbringen in die Abbaukammer eintreten darf. Aus diesem Grund sollte bei der Überprüfung der Versatzeigenschaften von bindemittelhaltigen Produkten der Erstarrungsbeginn in Betracht gezogen werden. Die Bedeutung des Erstarrungsbeginns ergibt sich aufgrund der Tatsache, dass es zur unmittelbaren Bildung von Hydratphasen kommt, wenn Wasser mit Bindemittel gemischt wird. Diese Hydratphasen sind für die Erstarrung und die Erhärtung des Bindemittelleims grundlegend. Bei der Erstarrung kommt es zur Kristallbildung, welche für die Festigkeitsentwicklung eine große Rolle spielt. Setzt die Kristallbildung während der Förderung ein, können die Kristalle zerstört werden und sich negativ auf die Festigkeitsentwicklung im Versatzkörper auswirken, was die Endfestigkeit des Versatzkörpers negativ beeinflusst. (Walkner, 2017)

2.1.3 Zusammenfassung

Das vorhergehende Kapitel hat kurz die unterschiedlichen Versatzarten, Anforderungen und Aufgaben von Versatz im Untertagebergbau beschrieben. Zudem wurde die Bindemittelzugabe zu Versatzmischungen besprochen. Die Ausführungen haben aufgezeigt, wie komplex ein Versatzsystem ist, da ein Versatzmaterial in den meisten Fällen aus Stoffen aufgebaut ist, welche aus Vortriebsarbeiten bzw. aus der Wertstoffaufbereitung anfallen. Dies bedeutet jedoch, dass ein Versatzmaterial häufig keine konstanten Eigenschaften aufweist. Dennoch ist es von großer Bedeutung die benötigten Versatzeigenschaften für die jeweiligen Aufgaben des Versatzes bei der Planung des Versatzsystems festzulegen und im Laufe der betrieblichen Aktivitäten regelmäßig auf ihre Qualität zu überprüfen. Die Festlegung der benötigten Versatzeigenschaften erfolgt je nach

betriebsspezifischer Aufgabe des Versatzes, sei es beispielsweise rein um Halden an der Tagesoberfläche zu vermeiden oder um das Gebirge zu stabilisieren. Die Anforderungen an das Versatzmaterial unterscheiden sich in diesen beiden Fällen stark voneinander. In ersterem Anwendungsfall ist die Menge der Volumina, welche eingebracht werden können, von Bedeutung. Im Gegensatz dazu werden im zweiten Anwendungsfall Ansprüche an die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit oder Steifigkeit in den Vordergrund treten. Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, wie wichtig die Definition der jeweiligen Anforderungen an das Versatzsystem ist. Im Zentrum dieser Arbeit steht jedoch die Versatzwirkung zur Stabilisierung des Gebirgsverbandes, welche im nachfolgenden Kapitel im Detail besprochen wird.

3 Versatz als Element zur Gebirgsstabilisierung

Hinsichtlich des Einsatzes von Versatz zur Stabilisierung von Grubengebäuden und zur Verringerung von Steinfallgefahr sowie der Vermeidung bzw. Verringerung von Bergschäden kommt dem Einfluss von Versatz auf Bruchvorgänge im Gebirge eine große Bedeutung zu. In diesem Einsatzbereich müssen die geotechnischen Anforderungen an den Versatz genauer betrachtet werden.

Bei der Betrachtung von geotechnischen Anforderungen an das Versatzsystem muss zwischen unterschiedlichen Einsatzfällen unterschieden werden:

- Vermeidung von Gebirgsauflockerung (Vermeidung von unkontrollierten Gebirgsbewegungen und Bergschäden)
- Erhöhung der Standfestigkeit von Bergfesten
- Verringerung der Gebirgsschlaggefahr
- Verringerung von Steinfällen

In Hinblick auf seine gebirgsmechanische Wirkung kann Versatz aus mehreren Gründen eingebracht werden. Einerseits kann Versatz zur lokalen Stabilisierung von Grubenbauten, zur Vergrößerung der Stabilität von Bergfesten sowie zur Verringerung von Auflockerungserscheinungen über den Abbauen eingesetzt werden. Andererseits wird Versatz zudem zur Kontrolle von weiträumigen Gebirgsbewegungen verwendet, somit als regionales Stabilisierungselement, wobei er hier ein möglichst geringes Porenvolumen aufweisen sollte.

Im Vergleich zum künstlich hergestellten Stoff Versatz ist das den Versatzkörper umgebende Material natürlichen Ursprungs. Diese Tatsache bedingt eine vollkommen unterschiedliche Ausgangssituation bezüglich des Umgangs, der Beschreibung und Untersuchung des Materials. Sowohl Belastungszustand als auch Beschreibung der Gebirgseigenschaften sind nicht im Labormaßstab möglich, weswegen hier sehr viele Abschätzungen bzw. indirekte Verfahren zur Anwendung kommen, welche in den betreffenden Abschnitten im Detail erläutert werden. In der vorliegenden Arbeit soll die Wechselwirkung von Versatz und Gebirge anhand eines Bergbaus aus der alpinen Region beschrieben werden. Alpine Lagerstätten sind zusätzlich zum grundlegenden natürlichen Entstehungsursprung durch eine komplexe tektonische Vorgeschichte, die sich in starker Zerklüftung, markanten Diskontinuitäten und Trennflächensystemen und einer komplexen Spannungssituation äußert, gekennzeichnet. Es ist zu erwähnen, dass dies natürlich kein Alleinstellungsmerkmal der alpinen Region ist und überall dort vorgefunden werden kann, wo eine mehrfache tektonische Überprägung stattgefunden hat. Da die Untersuchungen jedoch anhand eines Bergbaus aus dem alpinen Bereich durchgeführt werden sollen, wird im Folgenden auf die besonderen Herausforderungen, mit welchen man bei kleinräumigen, mehrfach

überprägten Lagerstättenkörpern, wie sie im alpinen Bergbau vorgefunden werden können, eingegangen.

3.1 Versatz als regionales Stabilisierungselement

Weist Versatz ein geringes Porenvolumen auf, wird die Zusammendrückung des Versatzes durch das aufgelockerte Gebirge reduziert, wodurch Brucherscheinungen im Gebirge ebenfalls verringert werden und es großräumig zu keinen derartigen Auflockerungen kommen kann. Aus diesem Grund ist das Verhalten von Versatz unter Kompression, welches maßgeblich vom Porenvolumen bestimmt wird, von großer Bedeutung. (Wagner und Sanak-Oberndorfer, 1996). Das Verhalten unter Kompression kann mit folgendem Zusammenhang beschrieben werden (Ryder und Wagner, 1978):

$$\sigma_v = \frac{a \cdot \varepsilon}{b - \varepsilon} \quad (4)$$

σ_v ...*Reaktionsspannung im Versatz*

a, b ...*Materialparameter*

ε ...*Zusammendrückung des kohäsionslosen Versatzes*

Der Materialparameter „a“ beschreibt das Anfangsverhalten des Versatzes unter Belastung und „b“ ist ein Maß für das Porenvolumen des Versatzes und somit für seine maximale Zusammendrückbarkeit. Ein gegen Auflockerungserscheinungen im Gebirge sehr wirksames Versatzmaterial weist Werte für „a“ im Bereich von 10MPa und für „b“ von weniger als 0,3 auf (Wagner und Sanak-Oberndorfer, 1996). Bei Lagerstätten in geringen Teufen kommt es nicht zu großer Belastung des Versatzkörpers, weswegen der Parameter „a“ von größerer Bedeutung ist. Im tiefen Bergbau hingegen, wo größere Gebirgsdeformationen und infolgedessen größere Zusammendrückung des Versatzkörpers zu erwarten sind, kommt dem Parameter b größere Bedeutung zu. Abbildung 2 zeigt das Verhalten von bindemittelverfestigten und nicht bindemittelverfestigten Versatzmaterialien unter Kompression. Die unterschiedlichen Last-Verformungskurven zeigen deutlich den Einfluss der Bindemittelzugabe auf das Verhalten von Versatz unter Belastung.

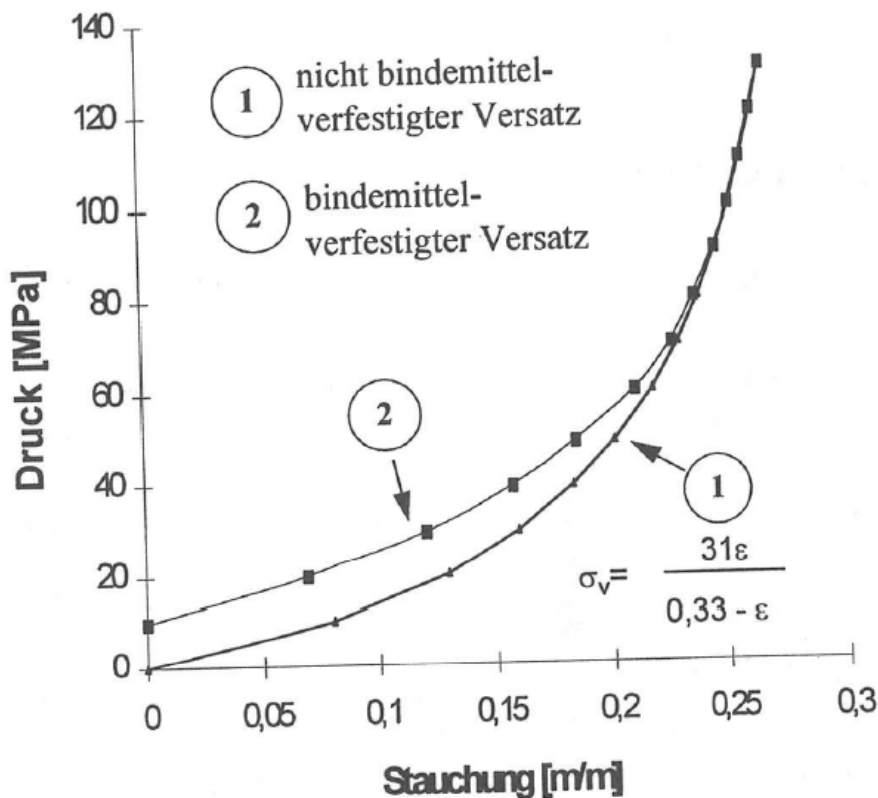


Abbildung 2: Verhalten nicht bindemittelverfestigter und bindemittelverfestigter Versatzmaterialien unter Kompression (Wagner et Sanak-Oberndorfer 1996, S. 192)

3.2 Vermeidung von Gebirgsauflockerung über Abbauhohlräumen

Durch die Verfüllung von bergmännisch geschaffenen Hohlräumen können Auflockerungserscheinungen im Gebirge vermieden beziehungsweise reduziert werden.

Aufgrund der durch den Abbau teilweise großen freigelegten Firstflächen kommt es zu Brucherscheinungen über dem Hohlraum, wobei die freie Höhe des Abbauhohlraums h_0 berücksichtigt für die Beurteilung des Ausmaßes der Auflockerungszone berücksichtigt werden muss. Beim flächenartigen Abbau wird die Höhe der Auflockerungszone h_c folgendermaßen bestimmt:

$$h_c = \frac{h_0}{K-1} \quad (5)$$

K...Auflockerungsfaktor der Dachschichten (1,2-1,8)

Der Auflockerungsfaktor der Dachschichten hängt stark von den Gebirgseigenschaften ab und kann nicht beeinflusst werden. Die freie Höhe des Abbauhohlraumes kann jedoch durch die Verfüllung mit Versatz reduziert werden und somit kann auch die Höhe der Gebirgsauflockerungszone reduziert werden. Zhao et al. (2015) haben in diesem Zusammenhang die positive Wirkung der Verfüllung der Hohlräume beim Einsatz von Sturzversatz beim Abbau von steilstehenden Kohleflözen mittels numerischer Untersuchungen und Laborversuchen gezeigt. Durch den Einsatz von Versatz konnte einerseits das Versagen der Dachschichten über den Abbauhohlräumen vermieden sowie die Höhe der Auflockerungszone reduziert werden. Bezüglich des Ausmaßes der Auflockerungszone wurde jedoch festgestellt, dass der lose Sturzversatz durch das gebrochene Gebirgsmaterial zuerst kompaktiert wurde und erst dann seine Stützwirkung entfalten konnte. Dies zeigt ebenfalls die große Bedeutung des Porenvolumens im Versatzkörper für die stabilisierende Wirkung von Versatz. Im Vergleich zum Abbau ohne Versatz konnte die Höhe der Auflockerungszone in diesem Fall um 18% reduziert werden. (Zhao et al., 2015) Bei geringen Spannweiten der Hohlräume kommt es in den meisten Fällen nicht zur Absenkung der Firste, was bedeutet, dass bei geringen Spannweiten der Verfüllungsgrad ausschlaggebend ist, während bei breiten Baufeldern das Porenvolumen aufgrund der möglichen Zusammendrückung des Versatzkörpers berücksichtigt werden muss. (Wagner, 2009) Der Absenkungsfaktor a beschreibt den Einfluss von Versatz auf die Firstabsenkung (v_{zmax}) bei Kohleflözen in Abhängigkeit der abgebauten Flözmächtigkeit M (Wagner, 2009):

$$v_{zmax} = a * M \quad (6)$$

Für Blasversatz beträgt der Absenkungsfaktor beispielsweise 0,5, Informationen für andere Versatzarten liegen nicht vor.

3.3 Verringerung der Gebirgsschlaggefahr

Insbesondere im tiefen Bergbau kann es aufgrund der erhöhten Spannungen zu Spannungskonzentrationen in massiven Lagerstättenbereichen wie den Auflagerzonen um die Abbaufelder und infolgedessen zu vermehrten Brucherscheinungen kommen. Diese Brucherscheinungen können einerseits stabil, jedoch auch unkontrolliert und plötzlich unter der Freisetzung von großen Energiemengen kommen, was als Gebirgsschlag bezeichnet wird. Die Energie, welche bei einem Gebirgsschlag entladen wird, kann über die Energiefreisetzungsrates oder „Energy Release Rate“ ERR folgendermaßen beschrieben werden (Wagner, 2009):

$$ERR = \Gamma * \sigma_v * D_h \quad (7)$$

Γ ...Faktor der Spannungskonzentration im Abbaubereich

σ_v ...Vertikalspannungen

D_h ...Konvergenz im Abbaubereich

Wird nun die beschriebene Formel betrachtet, kann der Einfluss von Versatz auf Gebirgsschläge deutlich gezeigt werden. Durch die Verfüllung der Hohlräume kann die Konvergenz in den Abbaubereichen reduziert und somit die bei einem Bruchvorgang freigesetzte Energie reduziert werden. Somit können Bruchvorgänge stabil und kontrolliert ablaufen. Die Voraussetzung für die Reduktion des Konvergenzvolumens durch den Versatz ist eine möglichst firstbündige Verfüllung des Hohlraumes sowie eine große Anfangssteifigkeit und ein geringes Porenvolumen des Versatzkörpers. Die beste Art die Qualität eines Versatzmaterials in Bezug auf seine Wirkung M zur Kontrolle von Gebirgsschlägen kann mit folgender einfacher Beziehung beschrieben werden

$$M = \frac{ERR \text{ mit Versatz}}{ERR \text{ ohne Versatz}} \quad (8)$$

Im tiefen Goldbergbau konnte folgende empirische Formel zur Abschätzung der Versatzwirkung in Bezug auf Gebirgsschläge anhand der in-situ Vertikalspannungen σ_v abgeleitet werden:

$$M = b \left(1 - \sqrt{\frac{a}{2\sigma_v}} \right) \quad (9)$$

Wobei a und b die Materialparameter aus Formel (4) sind, welche die Anfangssteifigkeit (a) und das Porenvolumen (b) beschreiben. Je kleiner der Wert für M ist, desto wirkungsvoller ist ein Versatzmaterial zur Kontrolle von Gebirgsschlägen (Wagner, 1981).

Beispiele aus dem tiefen südafrikanischen Bergbau haben gezeigt, dass durch eine möglichst frühe und vollständige Verfüllung der Hohlräume mit bindemittelverfestigtem Versatz die Gebirgsschlaggefahr um 50-70% verringert werden konnte. (Wagner, 2009)

Quesnel et al. (1989) führten Untersuchungen zum Einsatz von zwei verschiedenen Versatzmaterialien zur Beherrschung von Gebirgsschlägen in Kanada durch. Es wurde festgestellt, dass die Anzahl an Gebirgsschlägen bereits durch die Verfüllung mit losem Sturzversatz erheblich reduziert wurde. Durch den Einsatz von Versatz mit einem steiferen Last-Verformungsverhalten konnte zudem der Schaden, welcher durch Gebirgsschläge verursacht wurde, reduziert werden. Die Anwendung eines steiferen Versatzmaterials hatte jedoch keine Auswirkung auf die Häufigkeit, mit welcher die Gebirgsschläge auftraten. (Quesnel et al., 1989) Ähnliche Beobachtungen wurden von Close und Klokow (1986), Brace und

Klokow (1986) und Gay et al. (1986) gemacht. Watermayer und Hoffenberg (1932), Close und Klokow (1986) und Gay et al. (1988) zeigten in ihren Arbeiten, dass verfüllte Abbaukammern unter dynamischer Belastung weniger Schaden erleiden als unverfüllte Kammern. Gay et al. (1986) gaben als Grund dafür die Stützwirkung des Versatzes über eine große durchgängige Fläche sowie die größere Steifigkeit des Versatzes im Vergleich zu Stempelausbau an. Adams et al. (1990) hat zudem gezeigt, dass die Verfüllung von Hohlräumen die Schwingungsdauer des Gebirgskörpers nach einem seismischen Ereignis reduziert und Versatz die Gebirgsbewegungen im Allgemeinen dämpft. Gürtunca und Adams (1991) erklärten dieses Phänomen über die Energieabsorption des Versatzkörpers, welcher während eines Gebirgsschlages bis zu 260 kJ/m² absorbieren kann. Im Vergleich dazu zeigten Jager et al. (1987), dass ein timberpack Ausbau nahe der Abbaufont 43 kJ/m² absorbieren kann. All diese Beispiele zeigen deutlich die große Wirkung, die Versatz zur Kontrolle von Gebirgsschlägen erzielt.

3.4 Versatz und Steinfall

Versatz zeigt auch sehr positiven Einfluss auf die Unterstützung des Hangenden im Bereich der Abbaufont. Versatz übt Einspannungseffekte auf Risse aus, welche sich häufig unter sehr hohen Spannungen beinahe vertikal im Hangenden ausbilden und zu vermehrtem Steinfall führen können. In Kombination mit der Versatzwirkung in Bezug auf die Verringerung der Hohlraumkonvergenz kann so das Hangende lokal stabilisiert und Steinfall aus dem Hangenden reduziert werden. Von großer Bedeutung ist hier jedoch, dass der Versatz sehr nahe an der Abbaufont eingebracht wird. (Wagner, 1981) Gürtunca und Squelch (1990) haben die Bedeutung von Versatz zur Kontrolle von Steinfall mittels Analysen von Unfallsdaten im südafrikanischen Bergbau gezeigt. Dieselben Autoren haben in ihrer Arbeit 1991 gezeigt, dass Steinfall an der Abbaufont durch den Einsatz von Versatz erheblich reduziert werden kann, wenn die Verfüllhöhe mehr als 60% des Abbauhohlraumes beträgt und der Abstand vom Versatz zur Abbaufont nicht mehr als 6m beträgt. (Squelch und Gürtunca, 1991)

3.5 Spezialfall: Versatz in Kombination mit Bergfesten

Bei der Betrachtung unterschiedlicher Abbaumethoden wird klar ersichtlich, dass beim Einsatz von Versatz in den meisten Fällen Versatz in Kombination mit Bergfesten zur Anwendung kommt, sei es im Örterbau mit Versatz, im Kammer-Festenbau oder im Kammerbau mit einer Primär-Sekundärkammersequenz und unterschiedlichen Versatzmaterialien. Die häufige Anwendung dieser zwei

Stabilisierungselemente zeigt deutlich die Bedeutung der Untersuchung der Wechselwirkung von Versatz und Festen.

Wenn Versatz in Kombination mit Bergfesten eingesetzt wird, übt er einerseits eine laterale Kraft auf die Festenstößen aus (passiver Versatzdruck) und andererseits behindert er aktiv die Querverformung von belasteten Bergfesten.

Der passive Versatzdruck wird folgendermaßen beschrieben:

$$\sigma_{pass} = \rho g h_v K_{OH} \quad (10) \quad (\text{Wagner, 2009})$$

ρ ...Dichte des Versatzmaterials [kg/m³]

g ...Erdbeschleunigung [m/s²]

h_v ...Höhe der Versatzschicht [m]

$K_{OH}=1-\sin(\phi)$...Erdrubdruckbeiwert

Der passive Versatzdruck hingegen entspricht der Einspannung, welche durch das Einbringen des Versatzes auf das Gebirge wirkt. Der passive Versatzdruck ist, wie aus der angeführten Formel hervorgeht, abhängig von der Versatzhöhe, der Versatzdichte und dem Winkel der inneren Reibung des Versatzmaterials.

Typische Winkel der inneren Reibung für Versatzmaterial liegen zwischen 15° und 35°, wodurch K_{OH} zwischen 0,74 und 0,43 liegt. Mit einer Versatzdichte von 2000kg/m³ ergibt sich ein horizontaler Versatzdruck von 9-15kPa je Meter Versatzhöhe, welcher als Umschlingungsdruck auf die Feste wirkt und zur Erhöhung der Festigkeit der Feste führt. (Wagner und Sanak-Oberndorfer, 1996) Die lineare Zunahme des passiven Versatzdruckes ist aber nur bis zu einer Versatzhöhe von 20-30m beobachtbar, da durch den Siloeffekt Vertikalspannungen seitlich auf die Bergfesten übertragen werden. (Askew, 1978)

Siloeffekt

Bei der Verfüllung von bergtechnisch geschaffenen Hohlräumen mittels Versatzes muss auch der Siloeffekt berücksichtigt werden. Der Siloeffekt beschreibt eine Spannungsübertragung vom Versatzkörper auf Bergfesten, wodurch es zu reduzierten Spannungen im Versatzkörper kommen kann. Der Entstehungsursprung des Siloeffektes ist die Tatsache, dass es sich bei Versatz, auch wenn er einen bedeutenden Anteil an Bindemittel beinhaltet, um ein sehr weiches Material im Vergleich zum ihn umgebenden Gebirge handelt. Aus diesem Grund kann es zu durch Reibung verursachten Wechselwirkungskräften an den Kontaktflächen der zwei Komponenten Gebirge und Versatz kommen, was zu einer Spannungsübertragung vom Versatz auf das Gebirge führen kann. Wenn sich ein Gewölbe im Versatzkörper ausbildet, bedeutet dies, dass sich ein großer Anteil des Gewichtes des Versatzkörpers auf das ihn umgebende Gebirge überträgt und es unter dem „Gewölbe“ zur Reduktion der Spannungen kommt. Schmale Abbaukammern und große Reibungseffekte an den Kontaktflächen begünstigen die Gewölbebildung (Aubertin et al., 2003). Die im Rahmen dieser

Arbeit betrachteten Abbaukammern weisen eine Höhe von 21m auf, weswegen der Siloeffekt nicht zur Wirkung kommen sollte.

Sollten größere Versatzhöhen ab 30m zum Einsatz kommen, muss der Siloeffekt bei Spannungsmessungen im Versatzkörper berücksichtigt werden, da es dadurch zu einer bedeutsamen Reduktion der Vertikalspannungen im Versatzkörper kommen kann. (Aubertin et al., 2003)

Zusätzlich zum passiven Versatzdruck kommt als Resultat der Verformung von Festen der aktive Versatzdruck zum Tragen. Das Ausmaß des aktiven Versatzdruckes hängt von der Zusammendrückung des Versatzes durch die Querverformung der Feste und von den Verformungseigenschaften des Versatzes ab:

$$\sigma_{akt} = \varepsilon_{lat} E_v \quad (11) \quad (\text{Wagner, 2009})$$

ε_{lat} ...Verformung des Versatzes, $\varepsilon_{lat} = (\Delta w/b)$

Δw ...Querverformung der Bergfeste [m]

b ...Örterbreite [m]

E_v ...Verformungsmodul des Versatzes [Pa]

Die gesamte Wirkung des Versatzes auf die Bergfesten ist die Summe aus aktivem und passivem Versatzdruck. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Dichte des Versatzmaterials, seine Verformungseigenschaften und der Winkel der inneren Reibung des Versatzmaterials. Zusätzlich muss auch noch die Abbaugeometrie mitberücksichtigt werden. (Wagner, 2009) Wagner und Sanak-Oberndorfer (1996) stellten fest, dass der Widerstand, den Versatz der Querverformung der Feste entgegensetzt, also der aktive Versatzdruck, von größerer Bedeutung für die Stabilität der Feste ist als der passive Versatzdruck. Durch den Widerstand gegen die Querverformung kommt es zum Aufbau einer Reaktionsspannung im Versatzkörper, welche eine zusätzliche stabilisierende Wirkung auf die Feste ausübt. Die im Versatz erzeugte Spannung ist direkt proportional zur Querverformung der Feste Δb und dem Verformungsmodul des Versatzes, und indirekt proportional zur Örterbreite (Wagner und Sanak-Oberndorfer, 1996). Informationen über die Größe der aufgebauten Spannung sind jedoch nicht vorhanden.

Neben der stabilisierenden Wirkung des Versatzkörpers muss auch auf einen für die Stabilität negativen Aspekt der Wechselwirkung von Versatz und Bergfesten hingewiesen werden. Aufgrund der Verdichtung des Versatzkörpers durch sein Eigengewicht bewegt sich der Versatz um den Betrag ΔH nach unten (Abbildung 3). Da es zu keiner Zusammendrückung des Gebirges kommt, entsteht eine Relativbewegung zwischen Versatz und Bergfeste, wodurch Scherspannungen in der Feste entstehen. Durch die Scherspannungen wird ein Teil des Versatzgewichtes auf die Festen übertragen, wodurch der obere Festenteil

entlastet und der untere Festenabschnitt zusätzlich belastet wird. Dieses Phänomen kann untertage anhand von Entspannungsrissen im oberen Festenbereich beobachtet werden. (Blaha und Wagner, 2009)

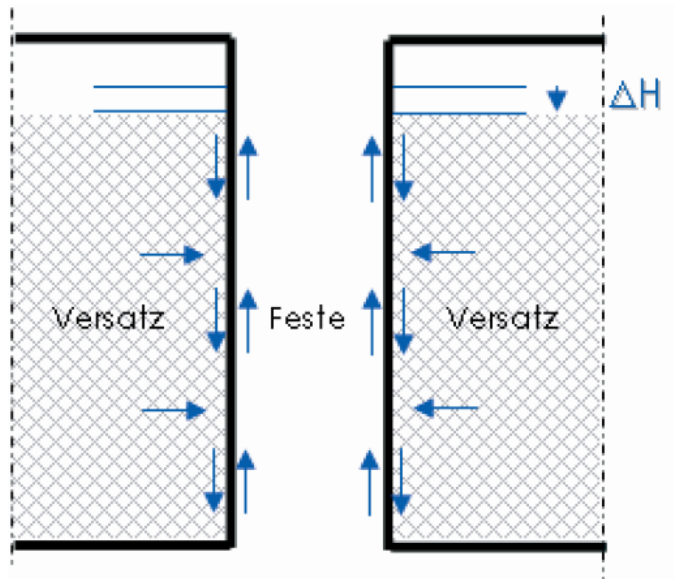


Abbildung 3: Wechselwirkung zwischen Versatz und Bergfesten (Blaha und Wagner 2009, S. 63)

Im Falle von bindemittelverfestigtem Versatz muss auch die Bedeutung der Anfangssteifigkeit des Versatzes angesprochen werden. Wird beispielsweise ein Versatzmaterial mit einer einaxialen Druckfestigkeit von 2MPa betrachtet (Abbildung 4), wird diese angenähert entlang eines linearen Belastungsastes erreicht. Die Belastung kommt durch die Querverformung des Gebirges zu Stande. Bei einem weichen Versatzmaterial kann die Verformung des Gebirges unter Umständen nicht ausreichen um die gesamte Versatzwirkung (2MPa) zu erzielen, weswegen eine hohe Anfangssteifigkeit des Versatzes benötigt wird um die optimale Wirkung des Versatzes zu erzielen. (Blaha, 2012)

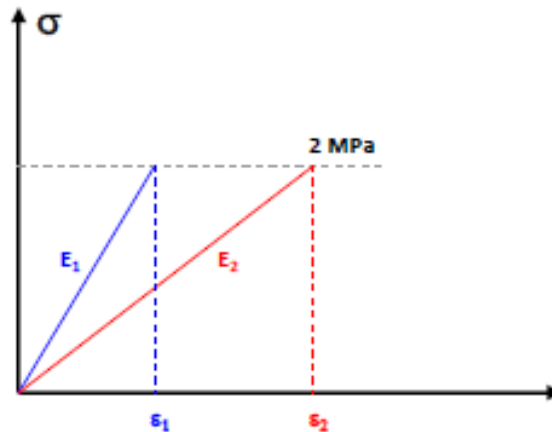


Abbildung 4: Last-Verformungsverhalten zweier Versatzmaterialien mit unterschiedlicher Steifigkeit (Blaha 2012, S. 56)

Auch die Untersuchungen von Galvin und Wagner (1981) zeigen deutlich, dass die Hauptaufgabe von Versatz die Einspannung auf das Gebirge ist und nicht das Gewicht der überlagernden Schichten zu tragen. Die Hauptaufgabe von Versatz ist es der lateralen Verformung der Festen entgegen zu wirken und eine Reaktionsspannung auf die Festenverformung aufzubauen. (Galvin und Wagner, 1981)

Blaha (2012) hat Überlegungen angestellt um zu begründen, warum bereits geringe einaxiale Druckfestigkeiten des Versatzes eine sofortige Reaktionsspannung mit sich bringen, welche Bergfesten unterstützt. Wird beispielsweise eine Festenseite mittels Systemankerung mit einer Ankerdichte von $0,5\text{m}^2$ und einer Ankerfestigkeit von 180kN gesichert, ergibt sich ein flächiger Ausbaudruck von 90kN/m^2 , was dem Luftdruck an der Tagesoberfläche entspricht. Ein bindemittelverfestigter Versatz mit einer einaxialen Druckfestigkeit von 2MPa entspricht einem Ausbaudruck von 2MPa , was bedeutet, dass die zuvor beschriebene Systemankerung nur $1/20$ des Ausbaudruckes des Versatzes erreicht. (Blaha, 2012)

Blaha (2012) beschreibt die qualitative Versatzwirkung auf Bergfesten auch anhand des Beispiels eines einaxialen bzw. dreiaxialen Druckversuches. Wird eine Bergfeste analog zu einer zylindrischen Gesteinsprobe unter einaxialer Druckbelastung betrachtet, bewirkt die Verfüllung durch Versatz einen dreiaxialen Spannungszustand, was die Festigkeit der Bergfeste erhöht. (Abbildung 5)

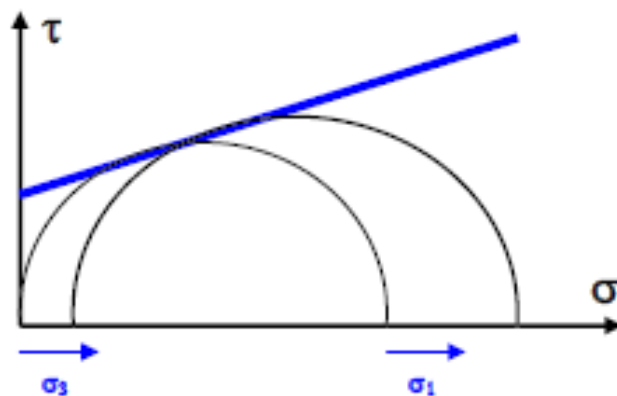


Abbildung 5: Darstellung der Auswirkung des Versatzes in Form eines dreiaxialen Spannungszustands (Blaha 2012, S.57)

Einfluss von Versatz auf das (Nach)Bruchverhalten von Festen

Versatz wirkt nicht nur stabilisierend auf intaktes Gebirge bzw. Bergfesten, sondern beeinflusst auch das Verhalten einer Bergfeste, nachdem ihre maximale Belastbarkeit überschritten wurde. Galvin und Wagner (1981) haben festgestellt, dass das Nachbruchverhalten von Kohlefesten durch die Verfüllung verändert wird und die Festen durch die Verfüllung der die Feste umgebenden Hohlräume im Nachbruchbereich noch weitere Spannungen aufnehmen können. Abbildung 6 zeigt den Einfluss der Verfüllung auf das Last-Verformungsverhalten der Bergfesten, insbesondere im Bereich nach dem Erreichen der maximalen Festigkeit, wo die Wirkung des Versatzes zum Tragen kommt (Abbildung 6). Eine Feste in Kombination mit Versatz zeigt einen wesentlich stabileren und langsameren Festigkeitsabfall als eine Feste ohne Versatz. Je langsamer der Festigkeitsabfall verläuft, desto stabiler ist ein Festensystem. Sowohl Tragfähigkeit als auch das Bruchverhalten von Bergfesten können somit beeinflusst werden. Bezogen auf das Bruchverhalten ist bekannt, dass schlanke Bergfesten häufig schlagartig versagen und ihr Widerstand gegen Verformung nach Überschreiten der maximalen Festigkeit rasch abnimmt, wohingegen gedrungene Bergfesten langsam und stabil zu Bruch gehen. Bergfesten, die mit Versatz ummantelt sind, gehen wie gedrungene Festen langsam und stabil zu Bruch. (Wagner, 2009)

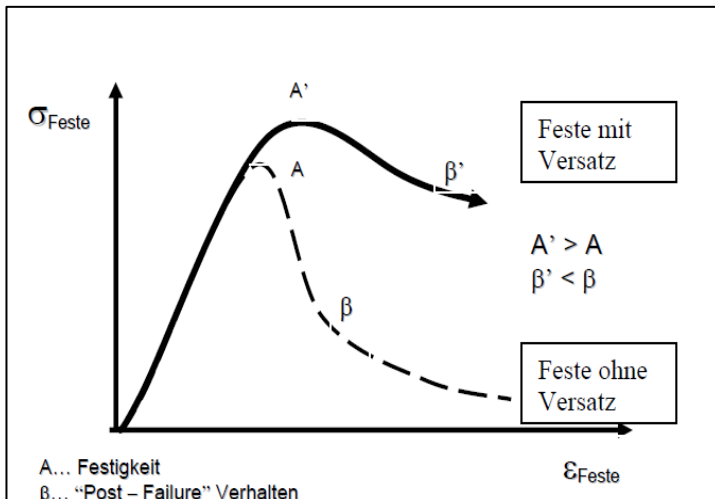


Abbildung 6: Qualitative Darstellung des Einflusses von Versatz auf das Last-Verformungsverhalten von Bergfesten (Wagner, 2009)

Abbildung 7 zeigt die Erhöhung der Druckfestigkeit und das geänderte Last-Verformungsverhalten einer Feste, die im Versatz steht (rechts) und einer Feste ohne Versatz (links). Durch die Verfüllung kann auch eine höhere Bruchstauchung der Feste erreicht werden. Die laterale Verformung der Feste bewirkt eine horizontale Reaktionsspannung im Versatzkörper, welche sich auf bis zu 600kPa beläuft. (Blaha, 2012)

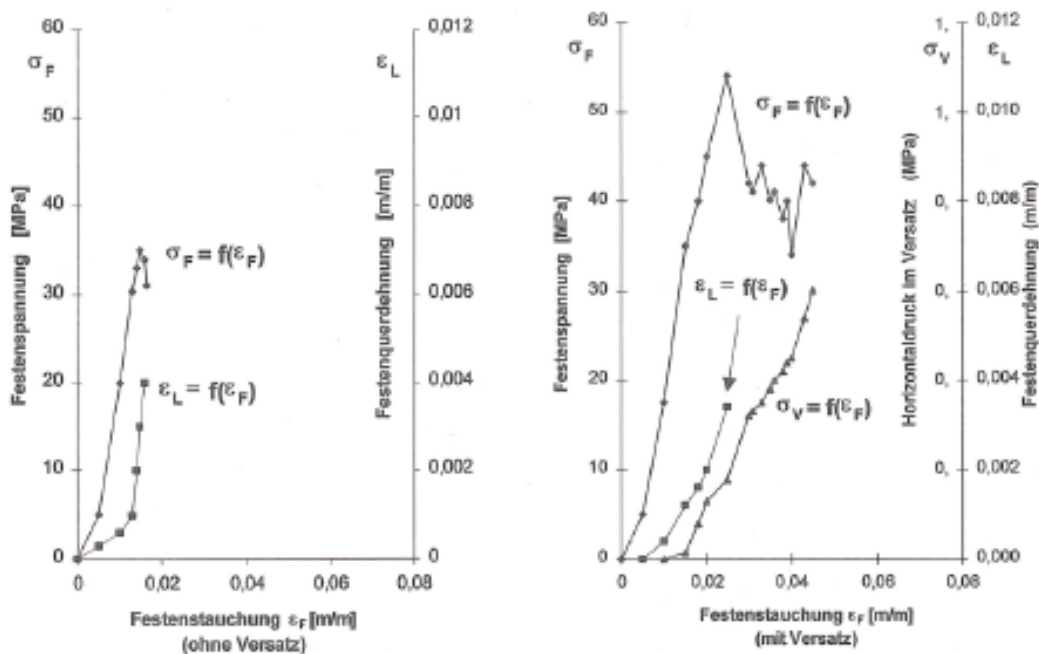


Abbildung 7: Einfluss eines bindemittelhaltigen Versatzes auf das Last-Verformungsverhalten von Bergfesten (Wagner und Sanak-Oberndorfer, 1996)

Versatz in Kombination mit gedrungenen Bergfesten

Insbesondere im tiefen Bergbau werden Festen zur langfristigen regionalen Stabilisierung von Abbaufeldern sehr gedrungen ausgeführt. Aufgrund der hohen Spannungen im tiefen Bergbau und des großen Widerstands, den diese Festen der Belastung entgegensetzen, sind gedrungene Festen im tiefen Bergbau sehr großen Spannungen ausgesetzt. Wegen ihrer großen Breite sind sie in ihrer Struktur beinahe unzerstörbar. Zum Versagen kann es dennoch kommen, wenn First- bzw. Hangendschichten zu Bruch gehen und sich ausgeprägte Scherrisse bilden. Somit kann es entlang dieser Scherflächen zum Abscheren des Gebirges kommen. Durch eine 20-30m breite Versatzzone um die Festen kann die Kantenwirkung der Feste reduziert und somit die Bildung von Scherrissen verhindert werden. (Wagner, 2009)

3.6 Zusammenfassung

Wie im vorhergehenden Kapitel ausgeführt, findet Versatz in unterschiedlichen Bereichen des untertägigen Bergbaus Anwendung, woraus variierende Anforderungen an den Versatzkörper resultieren. Wird Versatz als regionales Stabilisierungselement eingesetzt, kann es zur unmittelbaren Belastung des Versatzkörpers durch aufgelockerte überlagernde Gebirgsschichten kommen, was zum Zusammendrücken des Versatzkörpers führt. Daher ist in diesem Zusammenhang ein steifer Versatzkörper mit einem geringen Porenvolumen von großer Bedeutung, welcher der Auflockerung des Gebirges entgegenwirkt. Dies kann beispielsweise durch Bindemittelzugabe erreicht werden. Ähnliche Anforderungen werden an den Versatz gestellt, wenn die Vermeidung der lokalen Gebirgsauflockerung über Abbauhohlräumen betroffen ist. Zur Beherrschung und Verringerung der Gebirgsschlaggefahr, welche insbesondere unter erhöhten Spannungen in tiefliegenden Bergbauen vorherrscht, kann Versatz ebenfalls eingesetzt werden. Hier spielt die durch einen Gebirgsschlag freigesetzte Energie eine große Rolle, welche proportional zur Konvergenz des Abbaubereiches ist. Die Konvergenz des Abbaubereiches kann durch die Verfüllung der Hohlräume reduziert und somit die bei einem Bruchvorgang freigesetzte Energie verringert werden. Auch zur Verringerung von Steinfall aus dem Hangenden wird Versatz verwendet, wobei hier das Einbringen von Versatz möglichst nahe an der Abbaufont im Vordergrund steht. Unter Belastung durch Gebirgsverformungen reagiert Versatz mit der Ausbildung von Reaktionsspannungen, welche als „aktiver Versatzdruck“ bezeichnet werden. Zudem wirkt im Versatzkörper der „passive Versatzdruck“, welcher durch das Eigengewicht des Versatzes zu Stande kommt und eine Spannung auf das den Versatz umgebende Gebirge verursacht. Von großer Bedeutung ist auch der Einfluss von Versatz auf das Nachbruchverhalten von Gebirge, insbesondere von Bergfesten. Durch die Verfüllung der die

Bergfesten umgebenden Hohlräume können Festen im Nachbruchbereich weitere Spannungen aufnehmen und zeigen zudem einen langsameren und stabileren Festigkeitsabfall als Festen ohne Versatz. Mittels der durchgeführten Literaturstudie konnten zudem Parameter identifiziert werden, welche die gebirgsmechanische Wirkung von Versatz beeinflussen. Als Haupteinflussfaktoren wurden die Versatzhöhe, der Verfüllzeitpunkt und die Aushärtedauer (bei bindemittelverfestigtem Versatz) hervorgehoben.

Nach der Diskussion der Komponenten Gebirge und Versatz und den Grundlagen der gebirgsmechanischen Versatzwirkung wird im folgenden Kapitel auf in der Literatur vorhandene Erkenntnisse über die Wechselwirkung von Gebirge und Versatz eingegangen. Hier wird versucht einen Überblick über in-situ Experimente, Laborversuche und numerische Simulation im Bereich der Wechselwirkung Gebirge und Versatz zu schaffen und aufzuzeigen, in welchen Bereichen noch offene Fragen vorhanden sind.

4 Literaturanalyse und offene Fragen

Aufgrund der immer größer werdenden Bedeutung des Einsatzes von Versatz im untertägigen Bergbau mit zunehmender Teufe rückt das Verständnis der Wirkungsweise von Versatz für die jeweiligen Herausforderungen weiter in den Vordergrund. Daher wird vielfältige Forschung im Bereich der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz betrieben, wobei Laborversuche, in situ Untersuchungen und numerische Simulation zur Anwendung kommen.

4.1 Wechselwirkung von Gebirge und Versatz

Die Erforschung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz stellt die Wissenschaftler vor eine besondere Herausforderung, da hier mit zwei Komponenten gearbeitet wird, welche jede für sich unter mechanischer Beanspruchung unterschiedliches Verhalten zeigen und zudem, wenn sie in Kombination eingesetzt werden, noch in Wechselwirkung miteinander treten und sich gegenseitig beeinflussen. Dies wirkt sich wiederum auf das Verhalten unter Beanspruchung aus. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die Wechselwirkung und gegenseitige Beeinflussung von Gebirge und Versatz zu erforschen. Grundlage der durchgeführten Tätigkeiten ist eine Studie über bestehende Versuchsergebnisse in diesem Anwendungsfeld. Aufbauend auf die bestehenden Erkenntnisse der Wechselwirkung im Bereich Gebirge-Versatz sollen die im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten Messungen und Analysen eine Ergänzung zum aktuellen Wissensstand darstellen.

Die in der Literatur beschriebenen Analysen wurden großteils mittels numerischer Simulation durchgeführt. Einige Erkenntnisse konnten jedoch auch durch Modellversuche und in-situ Beobachtungen gewonnen werden. Auf Basis der Ergebnisse aus Laborversuchen werden in der Regel verschiedene vereinfachende Modelle eingesetzt, um die komplexen Wechselwirkungen von Versatz mit seiner Umgebung beschreiben zu können. In der Regel bedarf die Lösung dieser Modelle numerischer Methoden beziehungsweise Simulationsprogramme. Eine der am häufigsten eingesetzten Softwares ist FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua).

Dabei handelt es sich um ein Programm zur computergestützten Lösung von technisch-mechanischen Problemen mit der Finiten-Differenzen-Methode (FDM) beziehungsweise zur Durchführung von Spannungsanalysen im geotechnischen Anwendungsbereich. Für die Untersuchung des Versatzsystems hat vor allem letzteres in der Vergangenheit an großer Bedeutung gewonnen. Bei diesem Verfahren werden eine Differentialgleichung und die dazugehörigen Rand- und Anfangswerte durch ein System von linearen Gleichungen ersetzt. Diese werden anschließend

gelöst. In Abbildung 8 sind die verschiedenen Elemente eines FLAC Modelles exemplarisch dargestellt. Für die Lösung mit FDM wird in einem ersten Schritt der Modellbereich mittels eines Punktnetzes diskretisiert. In einem weiteren Schritt wird das gewünschte Materialverhalten (elastisch, Mohr-Coulomb, universell oder modifiziertes Hoek-Brown) ausgewählt und mit den aus Labor- oder In-situ Versuchen ermittelten Parametern hinterlegt. Im Anschluss werden die entsprechenden Differentialgleichungen an jedem Punkt dieses Netzes gelöst. (Itasca Consulting Group 2018, Ganster 2018)

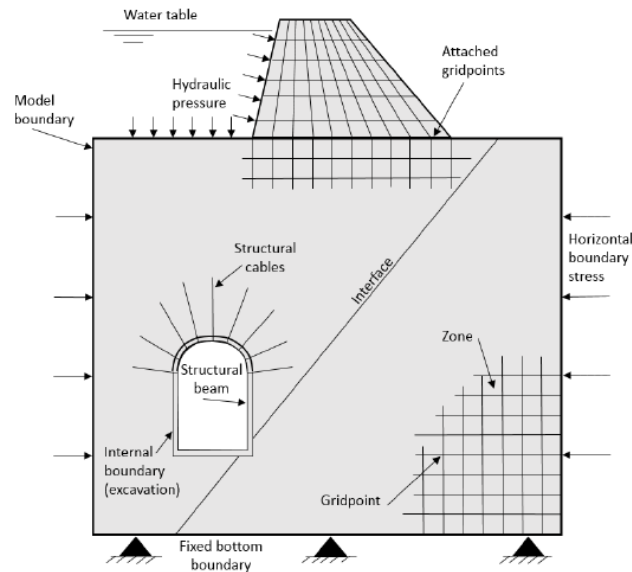


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines FLAC Modells (Itasca Consulting Group, 2018)

Andererseits kommt PLAXIS 2D zur Anwendung, welches eine finite Elemente Methode für zweidimensionale Stabilitätsanalysen für geotechnische und gebirgsmechanische Fragestellungen ist. PLAXIS wird für die Simulation von Hohlräumen, Fundamenten sowie im Bereich von Erdölreservoirien verwendet. Das Programm inkludiert statische elastoplastische Verformungen, Bodenmodelle, Stabilitätsanalysen und Konsolidierungsvorgänge. Geotechnische und gebirgsmechanische Fragestellungen erfordern Materialgesetze zur Beschreibung von nicht-linearem, zeitabhängigem und anisotropem Verhalten von Boden und/oder Gesteinen bzw. Gebirge, welche von PLAXIS zur Verfügung gestellt werden. Das Materialverhalten kann in PLAXIS beispielsweise mittels linear elastischem Ansatz, dem Mohr-Coulomb Modell, einem Hardening Bodenmodell, einem Soft Soil Modell, einem Soft Soil Creep Modell, einem Jointed Rock Modell, dem Hoek-Brown Modell sowie einem modifizierten Cam-Clay Modell beschrieben werden. (PLAXIS, 2018)

Durch die Hohlrumbaue als Folge der Rohstoffgewinnung kommt es im Gebirge zur Spannungsumlagerung. Diese erfolgt auf das den Abbau umgebende unmittelbar anstehende Gebirge sowie auf weiter entfernte Auflagerbereiche. Es

stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Verfüllung der Hohlräume auf die Spannungssituation im Gebirge hat und wie sich die Verfüllung auf Bruchvorgänge im Gebirge auswirkt. Zudem ist es von großer Bedeutung die entstehenden Spannungen im Versatzkörper als Reaktion auf Bruchvorgänge im Gebirge zu analysieren um Information über die Wechselwirkung dieser zwei Komponenten zu erhalten.

Adams et al. (1991) haben zur Bearbeitung dieser Fragestellungen numerische Simulation zu flachgelagerten Golderzlagerstätten in Südafrika durchgeführt, insbesondere um die Verformungen und den Spannungsaufbau im Versatz abschätzen zu können. Es wurde festgestellt, dass die **maximalen Spannungen in einer Übergangszone in ca. 1-3m Abstand von der Randzone des Versatzkörpers gemessen werden (Abbildung 9) und im untersuchten Fall zwischen 5 und 10MPa liegen.** Laut Adams et al. (1991) hängt der Spannungsaufbau im Versatzkörper im untersuchten Fallbeispiel in erster Linie von der **Breite des Abbaufeldes sowie von den auftretenden Konvergenzen im Abbaufeld ab. Je geringer die abgebaute Mächtigkeit und je größer die Konvergenzen, desto größer werden die Spannungen im Versatzkörper sein. K-Werte, wobei $K=\sigma_H/\sigma_V$, im Versatzkörper für die getesteten Versatzmaterialien lagen im Bereich 0,3-0,6.** (Adams et al., 1991) Dieses Verhältnis der Horizontal- zu Vertikalspannungen im Versatzkörper ist typisch für weitläufige flach gelagerte Lagerstätten, wo vertikale Konvergenzen in den Hohlräumen überwiegen und es somit zum Aufbau von Vertikalspannungen im Versatzkörper kommt. Adams et al. (1991) berichten ebenfalls von einer großen Bandbreite an möglichen Versatzdrücken, je nachdem ob der Versatz als lokales oder regionales Stabilisierungselement verwendet wird. Zum Zwecke der **lokalen Stabilisierung baut der Versatz Drücke bis zu 10MPa** auf, wird er jedoch zur **regionalen Stabilisierung eingesetzt können in Teufen von 4-5km bis zu 100MPa** große Spannungen aufgebaut werden. (Adams et al., 1991) Der Grund für derart hohe Spannungen im Versatzkörper liegt an den geringen abgebauten Mächtigkeiten, welche zu einem Breiten zu Höhen-Verhältnis des Abbauhohlraumes von 20-50 führen. Aufgrund der beachtlichen Breiten der Abbaufelder kann sich im Inneren des Versatzkörpers über große Distanzen ein dreidimensionaler Spannungszustand aufbauen, welcher zu einer größeren Widerstandskraft des Versatzkörpers gegen Belastungen führt.

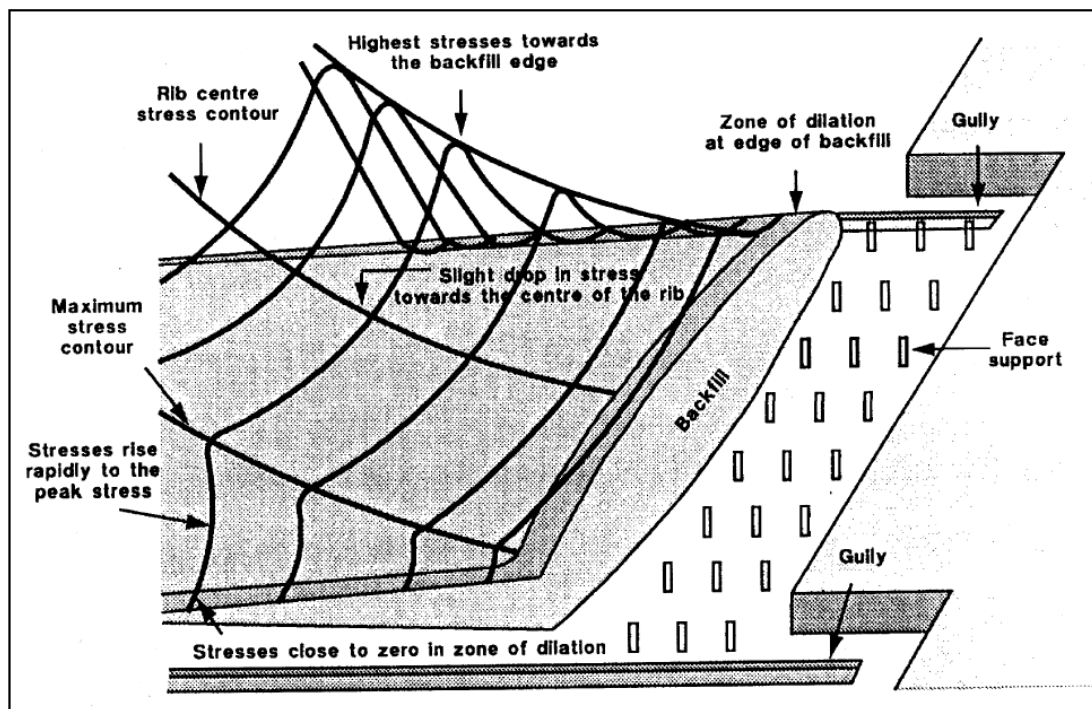


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Vertikalspannungen eines Versatzkörpers (Adams et al, 1991)

Sobhi und Li (2017) haben in ihren jüngsten Untersuchungen mittels numerischer Simulation mit PLAXIS 2D den Spannungsaufbau in mit kohäsionslosem Versatzmaterial verfüllten, durch eine künstliche Schweben (sill mat) getrennten Abbaukammern untersucht, wobei keine genauen Informationen über das verwendete Schwebenmaterial vorhanden sind. Das Ziel der Untersuchungen war es den Spannungsaufbau im Versatzkörper beim Abbau von übereinanderliegenden Kammern und den Einfluss der Tiefe auf die Spannungen im Versatzkörper im Vergleich zu Versatz in isolierten Abbaukammern zu evaluieren. Sowohl Versatz, Schweben als auch Gebirge wurden als homogene isotrope Materialien mit einem elasto-plastischen Materialgesetz nach Mohr-Coulomb simuliert. Die Höhe der oberen Abbaukammer beträgt dabei 10m, die Mächtigkeit der künstlichen Schweben 3m und die Höhe der unteren Abbaukammer 13,5m. **Es wurde festgestellt, dass die Spannungen im Versatzkörper erheblich ansteigen, wenn der Abbau um eine weitere Kammer unter der künstlichen Schweben erweitert wird.** (Abbildung 10) Zudem nehmen die Spannungen im Versatzkörper mit der Tiefe und einer steigenden Steifigkeit des Versatzkörpers zu und werden reduziert, wenn die Steifigkeit des umgebenden Gebirges oder die Breite der Abbaukammern erhöht werden. Zudem sind die vertikalen Versatzdrücke wesentlich geringer als die horizontalen Versatzdrücke. Die simulierten Versatzdrücke können in einer Größenordnung von einigen hundert kPa gefunden werden. Diese Erkenntnisse zeigen einen deutlichen Einfluss von benachbarten Abbautätigkeiten auf den Spannungszustand im Versatzkörper. (Sobhi und Li, 2017) Die Verbreiterung der Abbaukammern

reduziert die Größe der horizontalen Versatzspannungen, da der Einfluss der lateralen Hohlraumkonvergenzen reduziert wird.

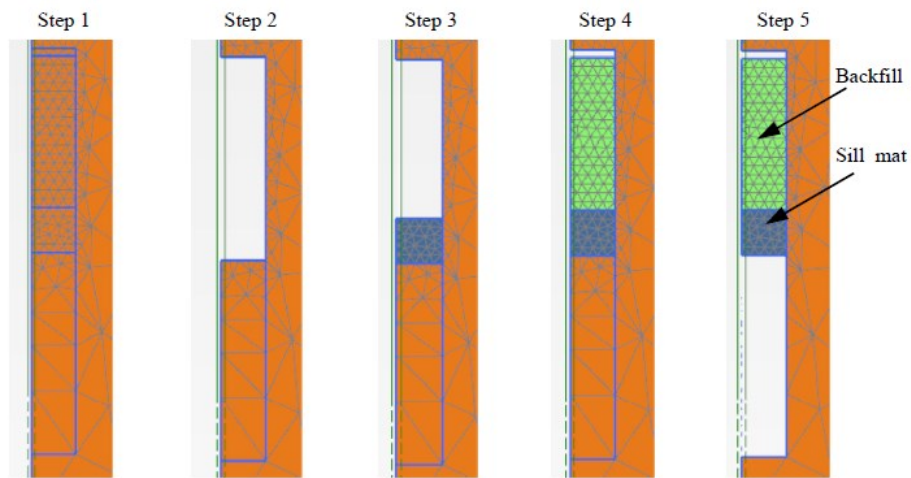


Abbildung 10: Simulierte Abbausequenz für die Untersuchungen der Spannungssituation im Versatzkörper nach Sobhi und Li (2017)

Hassani et al. (2008) haben mittels numerischer Simulation mit FLAC 2D die Wechselwirkung von Gebirge und Versatz beim Abbau von schmalen Erzgängen untersucht. Hier wurden 65° geneigte Abbauhohlräume von 50m Höhe und 6m Breite mit einem plain strain Modell simuliert, wobei die Teufe 500m beträgt und ein Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalspannungen von 2 angenommen wird, wie es typischerweise für das Kanadische Schild vorgefunden werden kann. (Modell siehe Abbildung 11)

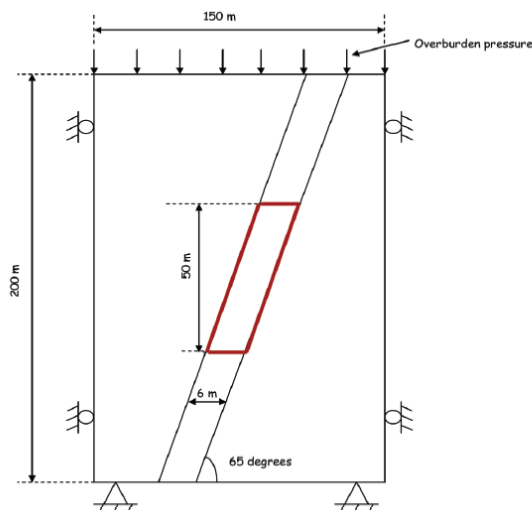


Abbildung 11: FLAC-Modell zu Untersuchungen von Hassani et al. (2008)

Das Gebirge wurde als homogenes und isotropes Material mit einem strain-softening Materialgesetz simuliert und für den Versatz wurde das Mohr-Coulomb Materialgesetz verwendet. Zusätzlich wurden interface Elemente für die Grenzfläche zwischen Gebirge und Versatz simuliert. Es wurde festgestellt, dass die **Größe des Spalts zwischen Versatz und Firste der Kammer einen signifikanten Einfluss auf die Versatz-Gebirge Wechselwirkung** hat, insbesondere bezogen auf Scher- und Normalspannungsverteilung im Gebirge. Aus diesem Grund sollten Hohlräume in Erzkörpern mit stark variierenden Einfallswinkeln und unter hohen Spannungsbedingungen firstbündig verfüllt werden. (Hassani et al., 2008) Für geringmächtige steilstehende Lagerstätten scheint diese Erkenntnis fragwürdig, da die horizontalen Spannungen aufgrund von Hohlraumkonvergenzen normal auf den Kammerulm im Vordergrund stehen. Die numerische Simulation von Hassani et al. (2008) zeigt jedoch, dass der Versatzkörper im unteren Kammerbereich vollständig eingespannt ist und unter einem vollständigen dreiachsialen Spannungszustand steht und ein „hardening“ Verhalten aufweist. Im Firstbereich ist der Versatzkörper hingegen nicht vollständig eingespannt und zeigt dadurch in der Simulation kein „hardening“ Materialverhalten, was die Stützwirkung des Versatzes auf das Gebirge im oberen Kammerbereich reduziert. Aus diesem Grund schließen Hassani et al. (2008) aus ihren Untersuchungen auf den bedeutsamen Einfluss des Spalts zwischen Versatzkörper und Firste auf die Versatzwirkung.

Wang et al. (2010) untersuchte den Einfluss der Verfüllung von Strecken im Kohlen-Örterbau auf die Festigkeit von Kohlefesten mit unterschiedlichen Breite/Höhe-Verhältnissen unter der Verwendung von kohäsionslosem und kohäsivem Material mittels numerischer Simulation mit FLAC3D. Zusätzlich zum Einfluss der unterschiedlichen Materialeigenschaften des Versatzes wurde auch der Einfluss der unterschiedlichen Verfüllhöhen auf die Festigkeit der Kohlefesten untersucht. Wang et al. (2010) haben 120 numerische Modelle erstellt, wobei für die Kohlefesten b/h-Verhältnisse zwischen 2-4 und für die Verfüllhöhe zwischen 0 und 90% angenommen wurden. Die Festen wurden mit einem strain-softening Materialgesetz basierend auf dem Mohr-Coulomb Versagenskriterium simuliert. Das kohäsive Versatzmaterial wird mit einer einaxialen Druckfestigkeit von 1MPa und der kohäsionslose Versatz mit einem Reibungswinkel von 42° simuliert. Es hat sich gezeigt, dass die **Festigkeit der Kohlefesten bei einer Verfüllhöhe bis 50% linear und danach überproportional ansteigt, wobei der festigkeitssteigernde Effekt für hohe, schlanke Bergfesten ausgeprägter ist als für gedrungene Bergfesten.** Zusätzlich hat sich gezeigt, dass **kohäsiver Versatz zu einer größeren Festigkeitszunahme führt als loser Versatz. Im post-failure Bereich wurde festgestellt, dass sich das Materialverhalten von Kohlefesten von einem strain softening Verhalten zu einem strain-hardening Materialverhalten ändert.** Kostecki und Spearing (2014) haben mittels numerischer Simulation von Kohlefesten in kohäsionslosem und kohäsivem Versatz ebenfalls die festigkeitssteigernde Wirkung von Versatz auf die

Festigkeit gezeigt. Im Gegensatz zu Wang et al. (2010) konnte die **festigkeitssteigernde Wirkung von 10-40% je nach Verfüllhöhe (25-75% der Abbauhöhe) jedoch nur für kohäsiven Versatz festgestellt werden**. Kohäsionsloser Versatz zeigte wenig Einfluss auf die Festigkeit, auch im Falle von großen Verfüllhöhen. Kostecki et Spearing (2014) haben festgestellt, dass bei einer Verringerung der Versatzqualität, also schlechteren mechanischen Eigenschaften, die festigkeitssteigernde Wirkung ein Resultat der Einspannung des Versatzes durch das Gebirge ist und nicht aufgrund der Versatzwirkung an sich einhergeht, was auch aus der Forschungsarbeit von Sobhi und Li (2017) hervorgeht.

Li und Aubertin (2014) haben mittels numerischer Simulation mit FLAC 3D versucht notwendige Eigenschaften für bindemittelverfestigten Versatz im untertägigen Kammerbau mit Primär- und Sekundär Kammersequenz anzugeben, wobei der Versatzkörper mit einem elasto-plastischen Ansatz simuliert wurde. Ein komplexer Ansatz zur Berechnung der für die Abbaustabilität notwendigen Kohäsion des Versatzes wurde erstellt, wobei die erforderliche **Kohäsion maßgeblich vom Winkel der inneren Reibung, der Höhe und Länge des Versatzkörpers abhängt**. Dieser Ansatz soll als Verbesserung der Berechnungen von Mitchell. et al. (1982) gesehen werden, welcher einen wesentlich einfacheren Ansatz zur Berechnung der notwendigen Festigkeit des Versatzkörpers für einen Sicherheitsfaktor von 1 und zur Vereinfachung einen Reibungswinkel von $\varphi=0$ angibt:

$$UCS = 2c = \frac{\gamma H}{1 + \frac{H}{L}} \quad (12) \quad (\text{Mitchell et al., 1982})$$

Blaha und Wagner (2009) sowie Blaha (2012) haben mittels numerischer Simulation unter Verwendung des Simulationsprogrammes FLAC2D die Wechselwirkung von Versatz und Bergfesten beim Post-pillar Abbauverfahren erforscht. Das Modell beschäftigt sich vor allem mit der Wechselwirkung zwischen Versatz und sehr schlanken Bergfesten. Abbildung 12 zeigt eine schematische Darstellung eines „Post-pillar“ Abbauverfahrens, auf welches sich das Modell bezieht. (Blaha und Wagner 2009, Blaha 2012)

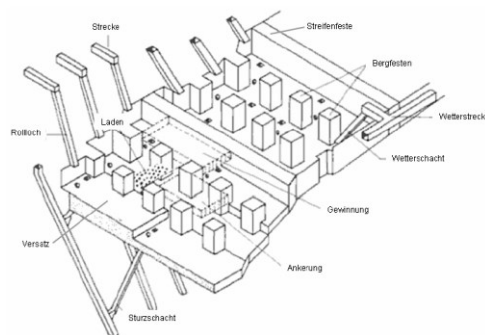


Abbildung 12: Darstellung eines „Post-pillar“ Abbauverfahrens (Blaha und Wagner, 2009)

Die Basis für dieses Modell bildet der Sicherheitsfaktor SF. Dieser ist als das Verhältnis der Festigkeit zur Belastung der Feste definiert. Im Örterbau im südafrikanischen und australischen Kohlerevier kann dieser Sicherheitsfaktor relativ leicht bestimmt werden, da sich diese Lagerstätten durch große Gleichmäßigkeit der Geologie, der Teufe und der Lagerstättenmächtigkeit auszeichnen. Zudem handelt es sich um gleichmäßige Abbaufelder mit weitreichender Erstreckung, wo eine sehr große Anzahl an Abbaufesten vorhanden ist. Aufgrund dieser großen Anzahl kann das Festenverhalten einfach statistisch erfasst und ausgewertet werden. Im Falle komplexer Geologie, wie es zum Beispiel im Alpenraum der Fall ist, stellt die Feststellung der Stabilität und die Berechnung des Sicherheitsfaktors eine große Herausforderung dar, da sowohl Spannungszustände als auch die Belastung der Festen weitestgehend unbekannt sind und lediglich abgeschätzt werden können. Nahezu jede Feste stellt im alpinen Bergbau ein Unikat bezüglich Spannungszustands und Geologie dar, weswegen hier eine statistische Auswertung nicht möglich ist. (Blaha und Wagner, 2009)

Mechanisch betrachtet handelt es sich bei einer belasteten Bergfeste um ein statisch unbestimmtes System, welches in Abbildung 13 in seiner einfachsten Form veranschaulicht wird. Das Gebirge über einer Bergfeste soll durch einen Biegebalken beschrieben werden, welcher die Bergfeste belastet. Diese wird als Feder mit einer gewissen Federsteifigkeit beschrieben. Im Falle einer sehr festen Bergfeste (Feder), wird der Gebirgsverformung ein hoher Widerstand entgegengesetzt. Eine steife Feder bedeutet, dass die Federkonstante relativ hoch und der von der Feder zurück gelegte Weg relativ klein ist; bei sehr weichen Federn sind große Verformungen möglich. (Blaha und Wagner 2009, Blaha 2012)

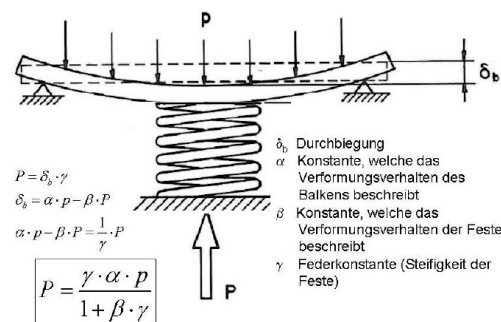


Abbildung 13: Statisch unbestimmtes Belastungssystem für Bergfesten (Blaha und Wagner, 2009)

Beim post-pillar Abbauverfahren ändern sich die Steifigkeit der Feste und die Mächtigkeit der überlagernden Schichten, da die Festen mit jeder abgebauten Scheibe schlanker werden und ihre Steifigkeit dadurch reduziert wird. In ihren Betrachtungen haben sich Blaha und Wagner (2009) in weiterer Folge mit der Wirkung des Versatzes auf oben beschriebenes System befasst. Abbildung 14 zeigt die Wechselwirkung zwischen Versatz und Bergfesten schematisch auf. Die erste der drei Darstellungen zeigt den Widerstand des Versatzes gegen das Herausgleiten von Felskeilen aus der Bergfeste. Im zweiten Bild ist zu erkennen,

dass der Versatz einen seitlichen Druck auf die Feste ausübt, was aus dem „passiven Versatzdruck“ resultiert. Als Reaktion auf Festenverformungen werden im Versatz zudem Horizontalspannungen aufgebaut, was als „aktiver Versatzdruck“ bezeichnet wird. Blaha (2012) hat zudem festgestellt, dass es neben **der Stützwirkung des Versatzes auch zu zusätzlicher Belastung der Festen im unteren Festenbereich durch die Zusammendrückung** des Versatzes kommen kann. Der Versatz kompaktiert sich durch sein Eigengewicht, wodurch es zu Scherspannungen an der Kontaktfläche zwischen Versatz und Festen kommen kann, welche die Festen zusätzlich belasten und somit schwächen.

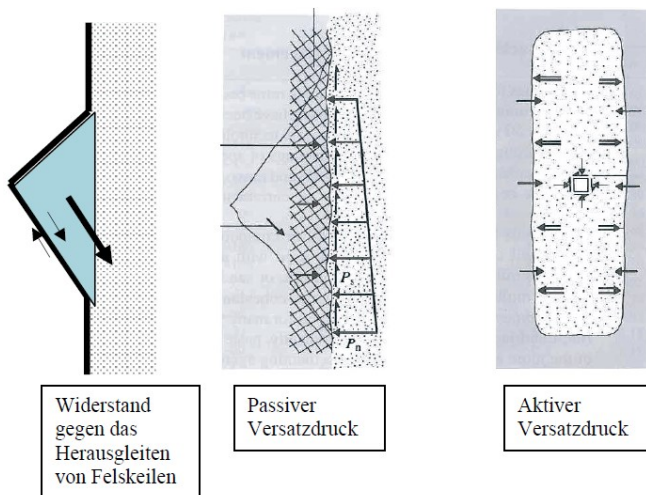


Abbildung 14: Qualitative Darstellung der Wechselwirkung zwischen Versatz und Bergfesten (Blaha und Wagner, 2009)

In einer weiteren Forschungsarbeit wurde die Wechselwirkung von Versatz und Gebirge entlang der Grenzflächen, welche laut Blaha (2012) zu einer Schwächung der Bergfesten führen kann, von Koupouli et al. (2016) mittels direkten Scherversuchen im Labormaßstab untersucht. Das Ziel der Untersuchungen war es Information über das Scherverhalten und die Scherfestigkeit von Versatz-Gebirge Kontaktflächen zu erhalten, welche die Zusammendrückung des Versatzkörpers und eventuell auch die Ausbildung des Siloeffekts und somit den Spannungsaufbau im Versatzkörper beeinflussen kann (Abbildung 15). Dabei wurden als Normalspannungen, welche vom Versatz auf das Gebirge ausgeübt werden, Drücke in der Größenordnung der Horizontalspannungen im Versatz auf Basis seines Eigengewichts, angenommen. Diese belaufen sich laut Koupouli et al. (2016) auf Drücke zwischen 50 und 150kPa. Bei ihren Untersuchungen haben die Autoren festgestellt, dass die **Scherspannungen in der Grenzfläche nicht vom Bindemittelgehalt abhängen, jedoch stark von der Höhe der Normalspannungen beeinflusst wird**. (Koupouli et al., 2016) Diese sind einerseits ein Resultat des passiven Versatzdruckes, resultierend aus dem Eigengewicht des Versatzmaterials, sowie der Spannungen, welche im Versatzkörper als Reaktion auf Gebirgsverformungen aufgebaut werden.

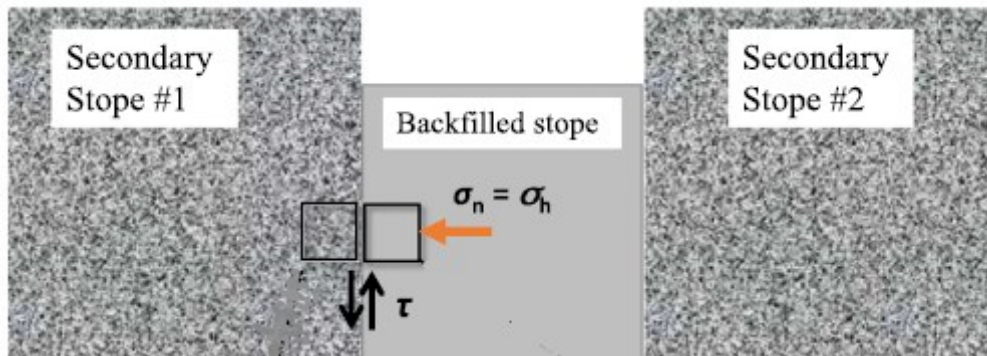


Abbildung 15: Schema zur Beschreibung der Versatz-Gebirge Wechselwirkung (nach Koupouli et al. (2016))

Galvin und Wagner (1981) haben Modellversuche anhand von zylindrischen Kohleproben mit 150mm Durchmesser und d:h Verhältnissen von 1 und 2 durchgeführt um die Wirkung von Flugaschenversatz auf Festigkeit von Kohlefesten beurteilen zu können. Die Proben wurden in Stahlrohre mit 235mm Durchmesser und 6mm Wandstärke gestellt und mit Flugaschenversatz umgeben. Die Proben wurden nach 100, 200 und 400 Tagen getestet um den Einfluss der unterschiedlichen Aushärtezeit für den Flugascheversatz beurteilen zu können. Nach den unterschiedlichen Aushärtezeitpunkten wurden die Proben mit einaxialem Druck mit einer Verformungsrate von 6mm/h belastet. Hier wurde die vertikale und laterale Verformung der Proben während des gesamten Versuchs beobachtet. Es konnte festgestellt werden, dass **Flugaschenversatz sowohl die Festigkeit von Modellfesten um 40-50% erhöht** (je nach Versatzalter) und auch das **Nachbruchverhalten von Kohlefesten deutlich positiv beeinflusst** wird. (Galvin und Wagner, 1981) Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen von Wang et al. (2010) aus der numerischen Simulation von Kohlefesten, welche ebenfalls den positiven Einfluss des Versatzes auf das Nachbruchverhalten von Kohlefesten feststellen konnten.

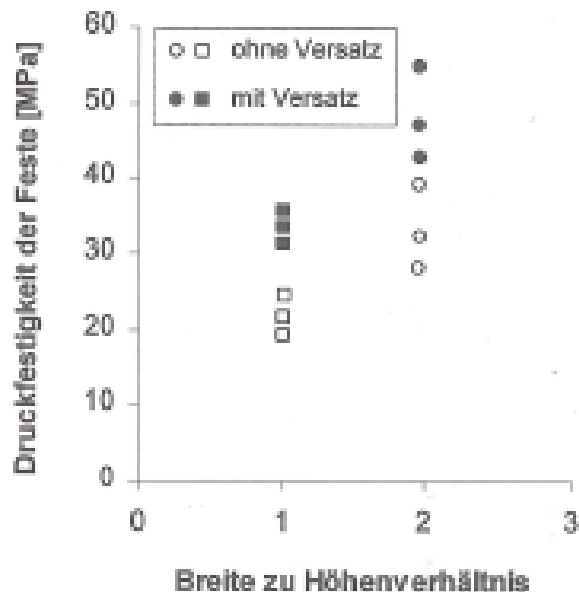


Abbildung 16: Einfluss des Versatzes auf die Festigkeit von Bergfesten mit unterschiedlichen Breiten: Höhen Verhältnissen (Wagner und Sanak-Oberndorfer, 1996)

Hasewend (2004) untersuchte den Einfluss von Versatz auf die Festigkeit und das Versagensverhalten von Sandstein. Als Versatzmaterial wurde Alpagips verwendet, welcher einen Versatz sehr hoher Qualität darstellt. Zu diesem Zweck wurden Sandsteinproben mit d/h-Verhältnissen von 1:2 bzw. 1:4 in einem Stahlzylinder mit Alpagips in unterschiedlichen Höhen verfüllt. Hasewend (2004) stellte fest, dass für eine **Druckfestigkeitserhöhung nicht die integrale Festenhöhe sondern die Höhe des nicht versetzten Teils der Feste ausschlaggebend** ist. Dies bedeutet, dass sich die nicht verfüllten Festeabschnitte wie Feste ohne Versatz verhalten und es zu keiner festigkeitssteigernden Wirkung durch die Verfüllung kommt. Erst wenn der nicht versetzte Teil der Feste ein d/h-Verhältnis von kleiner als 1:2 hat, wirkt der Versatz druckfestigkeitssteigernd. Einer der Hauptgründe für diese Beobachtungen dürfte das verwendete Versatzmaterial sein, da Alpagips eine sehr hohe Festigkeit vorweist und somit die versetzten Abschnitte der Feste durch ein hochfestes Material gestützt werden. (Hasewend, 2004)

Neben Untersuchungen im Labormaßstab wurden in einer Vielzahl an Bergbaubetrieben weltweit in-situ Versatzuntersuchungen zur Beobachtung der Versatzwirkung und der Stabilität des Grubengebäudes durchgeführt. Die ersten veröffentlichten in situ Versatzuntersuchungen stammen von McNay und Corson (1961), wobei hier der Druckaufbau im Versatzkörper und Verformung des Gebirges im Coeur d'Aléne district in den USA beobachtet wurden. Hier handelt es

sich um steilstehende geringmächtige Silber- bzw. Gold- Ganglagerstätten, welche untertägig durch Firstenstoßbau abgebaut werden (Abbildung 17).

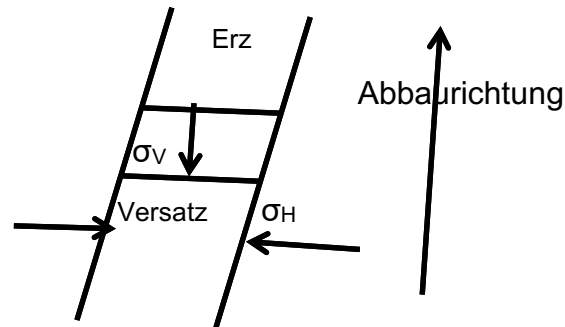


Abbildung 17: Skizze des Abbaus in einer Ganglagerstätte im Coeur d'Alene district

Das Hauptziel der Untersuchungen war die Feststellung des Druckaufbaus im Versatzkörper durch die Gebirgsverformungen. Der Druckaufbau im Versatzkörper wurde mittels hydraulischer Druckmesskissen (Messbereich 3-6MPa) gemessen, welche im Versatz platziert wurden. Die gemessenen Drücke liegen im Bereich von 2,5-4MPa. Zudem wurden auch Bohrlochdruckmesszellen verwendet um Spannungsänderungen im Gebirge aufzunehmen sowie Extensometermessungen zur Beobachtung der Gebirgsverformungen.

1967 haben Corson und Wayment Untersuchungen in der „Star Mine“ in Idaho, einem Bergbau in einer steilstehenden Silberlagerstätte, in einer Teufe von 2000m durchgeführt, wobei hier in wiederum 3m breiten Kammern ebenfalls Druckmesszellen und Extensometermessungen zum Einsatz kamen. Die gemessenen Versatzdrücke quer zum Erzgang belaufen sich auf maximal 3,5MPa, wohingegen die Versatzdrücke in vertikaler Richtung und in Richtung des Erzganges lediglich auf 1MPa anstiegen. Die zugehörige Verformung des Gebirges belief sich auf 100mm. (Corson und Wayment, 1967) Hier zeigt sich wiederum, dass bei steilstehenden geringmächtigen Hohlräumen die Spannungen normal auf den Kammerulm dominieren und stark von den Hohlraumkonvergenzen beeinflusst werden, was auch aus den Simulationen von Sobhi et Li (2017) hervorgeht.

In der Lucky Friday Mine haben McNay und Corson ebenfalls Untersuchungen zur Versatzwirkung durchgeführt. Hier handelt es sich um eine steilstehende geringmächtige Lagerstätte, wobei der Abbau in übereinanderliegenden Kammern erfolgt. Hier wird in einem ersten Schritt eine Abbaukammer abgebaut, eine darunterliegende Abbaukammer wird in einem zweiten Schritt schwebend gewonnen, wodurch eine Restschwebe zwischen den Abbaukammern entsteht. Wird nun die untere Kammer in Richtung der darüberliegenden Kammer abgebaut, steigen die Spannungen in der Restschwebe an, wodurch es häufig zu

Gebirgsschlägen in den Restschweben gekommen ist. Aufgrund dieser Gebirgsschläge kam es zu hohen Konvergenzen in den Abbauhohlräumen und folglich konnten Versatzdrücke von bis zu 5MPa gemessen werden. (McNay und Corson, 1961)

Im Vergleich dazu berichten Gay et al. (1986) aus dem südafrikanischen Goldbergbau von zweierlei Arten von Versatzwirkung: einerseits Versatz als lokales Stabilisierungselement, wobei hier die Versatzdrücke unter 10MPa liegen und andererseits Versatz als regionales Stabilisierungselement, wobei die Versatzdrücke in Teufen von 4000-5000m bis zu 100MPa betragen können. (Gay et al., 1986) Der Grund für diese hohen Versatzdrücke liegt wie bereits im Falle von Adams et al. (1991) beschrieben an dem dreiaxialen Spannungszustand, welcher sich im Inneren des Versatzkörpers aufgrund der großen Erstreckung der Abbaufelder sowie der geringen abgebauten Mächtigkeiten im Versatzkörper aufbaut.

Bruce und Klokow (1988) führten Untersuchungen in der West Driefontein Mine in Südafrika durch, wobei hier die Versatzdrücke mit Glötzl Druckmesszellen beobachtet wurden. Zudem wurden zum Vergleich der in-situ Messungen auch zugehörige Versatzuntersuchungen im Labormaßstab durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass in situ gemessene Drücke wesentlich geringer sind als gemessene Drücke im Labormaßstab unter vergleichbaren Bedingungen.

1989 hat Clark Versatzdrücke in drei Raumrichtungen und Verformungen im anstehenden Gebirge gemessen. Auf Basis der Messungen hat Clark (1989) ein Modell zu unterschiedlichem Verformungsverhalten des Versatzes aufgestellt, welches in Zusammenhang mit der Relation zwischen vertikalen und horizontalen Versatzdrücken steht.

Squelch (1990) beobachtete Versatzdrücke und Gebirgsverformungen in einem Grubengebäude in einer Teufe von 2030m, wobei die Höhe der Abbaukammer lediglich 1,22m betrug. Die maximale Versatzspannung betrug 4,5MPa bei einer Gebirgsverformung von 130mm.

Eine etwas aktuellere Studie von Tesarik et al. (2009) beschäftigt sich mit Langzeit in-situ Untersuchungen im Bereich Versatz in einem Blei-Zink-Kupfer Örtterbau in Nordamerika, wobei der Großteil der Festen nach Verfüllung rückgewonnen wurde. Hier kamen Untersuchungen sowohl im Versatzkörper sowie im Gebirge zum Einsatz. Im Versatzkörper kamen Dehnmessstreifen, vertikale Extensometer und Erddruckzellen zum Einsatz. Das Gebirge wurde mittels Spannungsmessungen und Extensometern in den Festen, den Firsten der Örtter und den Auflagern des Abbaufeldes beobachtet. Als Versatz kam bindemittelverfestigter Sturzversatz (Cemented Rockfill) zum Einsatz. Die Bergfesten haben eine Dimension von 8x12m mit einer Höhe von 18m. Das Ziel der Untersuchungen war die Beobachtung der kurz- und langfristigen Stabilität des Abbaufeldes. Die Druckmesszellen wurden installiert um die Vertikalspannungsänderungen im Versatzkörper aufzuzeichnen. Die Zellen hatten

einen Durchmesser von 23cm und eine Belastungsgrenze von 6,9MPa. Zum Zwecke der einfacheren Installation in der Mitte der Festenhöhe wurden die Zellen in Holzformen einzementiert. Vor Einbringen der Zellen wurden die Holzformen entfernt. Das Einzementieren erfolgte vorrangig um die Messzellen vor den groben Fragmenten des Versatzes zu schützen.

Bei der Überwachung der Festen mittels Extensometern stand der Unterschied zwischen verfülltem und unverfülltem Festenulm im Vordergrund. Die Extensometer in der Firste der Örtler wurden installiert um das Absetzen der Firsten zu überwachen und die Belastung der Versatzkörper in vertikaler Richtung abschätzen zu können.

Die Untersuchungen wurden 16 Jahre lang durchgeführt und nach 16 Jahren waren noch 68% aller Messinstrumente intakt. Im Versatzkörper einzementiert waren sogar noch 90% aller Messinstrumente funktionstüchtig.

Die horizontal installierten Zweifach-Extensometer in den Festen zeigen den Einspannungseffekt, welchen die Verfüllung bereitstellt. Hier wurde eine Festenseite verfüllt während die andere Festenseite unverfüllt blieb. Hier zeigte sich eine doppelt so große laterale Verformung der Feste auf der unverfüllten im Vergleich zur verfüllten Festenseite. (Tesarik et al., 2009)

Bei Spannungsmessungen im Versatzkörper konnten Tesarik et al. (2009) eine Zunahme der Vertikalspannungen innerhalb von 10 Stunden nach jeder Sprengung beobachten, gefolgt von einem temperaturverursachten Spannungsabfall. 200 Tage nach Verfüllung konnte beobachtet werden, dass der Temperatureffekt nicht mehr so ausgeprägt ist. Es wurden jedoch plötzliche Spannungsänderungen im Versatz beobachtet, welche nicht direkt in Verbindung mit Sprengungen gebracht werden konnten. Während des gesamten Beobachtungszeitraumes konnten Spannungen zwischen 370kPa und 1,5MPa gemessen werden, wobei eine ungleichmäßige Spannungsverteilung über den Versatzkörper beobachtet wurde, welche auf ungleichmäßiges Absenken der Firste und somit eine ungleichmäßige Belastung des Versatzkörpers zurückgeführt wurde. Die Spannungszunahme nach jeder Sprengung war 19% der gemessenen Gesamtspannungsänderung. Die Spannungsänderung, welche auf den Zeitraum nach den Abbautätigkeiten zurückzuführen ist, beträgt 35% der gesamten Spannungsänderungen.

Die angeführten Untersuchungen dienten vorwiegend dem Zweck der Überwachung der Hohlraumstabilität während der Rohstoffgewinnung, wobei den Mechanismen der Versatzwirkung nicht weiter auf den Grund gegangen wurde. Nachfolgend angeführte Forschungsarbeiten beziehen sich auf in-situ Versatz-Gebirge Untersuchungen, wobei hier die genaue Versatzwirkung im Fokus der Untersuchungen steht.

1979 haben Galvin und Wagner neben ihren Modellversuchen auch in-situ Experimente zum Flugascheneinsatz im Kohlebergbau durchgeführt. Auch hier konnte festgestellt werden, dass zur Unterstützung der Festen keine firstbündige

Verfüllung erforderlich ist und eine Verfüllhöhe von 2/3 der Abbauhöhe ausreicht. Bei ihren Untersuchungen betrug der Spannungsaufbau im Versatzkörper typischerweise 50kPa. Wagner (1981) hat auch anhand des tiefen Goldbergbaus gezeigt, dass die Größe von Bergfesten durch den Einsatz von Versatz erheblich reduziert werden konnte und somit die Lagerstättenverluste vermindert werden konnten.

In der Forschungsarbeit von Gürtunca et al. (1989) wurden drei unterschiedliche Arten von Versatz und deren Wirkung genauer analysiert. Bei den Versatzarten handelt es sich um unaufbereiteten Sturzversatz, trockene Aufbereitungsabgänge und entwässerte Flotationsabgänge. **Es wurde festgestellt, dass je geringer die Anfangsporosität des Versatzes ist, desto geringer werden Verformungen im Versatzkörper sein.**

Um die Versatzwirkung auf Gebirgsverformungen beschreiben zu können, führten Gürtunca und Adams (1991) zudem untertägige Untersuchungen in einem Goldbergbau (West Driefontein gold mine) durch, wobei es sich hier um eine flachgelagerte Lagerstätte mit weiter Erstreckung in einer Teufe von 600-3300m handelt. In drei Bereichen des Bergbaus wurden Untersuchungen durchgeführt, wobei Verformungsmessungen und hydraulische Spannungsmesszellen der Firma Glötzl zum Einsatz kamen. **Es wurde festgestellt, dass die größten Drücke im Versatzkörper bei konstanten Verformungsraten in einigen Metern Entfernung vom Versatzkörpertrand auftreten.** In Richtung des Versatzkörper-Randes nehmen die Versatzdrücke ab. (Gürtunca und Adams, 1991) Diese Erkenntnisse aus in-situ Untersuchungen decken sich mit der Forschungsarbeit von Adams et al. (1991), welche in 1-3m Entfernung der Randzone des Versatzkörpers die größten Versatzdrücke festgestellt haben.

Auch Thibodeau (1989) berichtet von einem Messprogramm im Bereich Versatztechnologie in der Levack Mine in Kanada, wobei hier das Ziel der Untersuchungen die genaue Reaktion des Versatzkörpers unter Belastung war. **Thibodeau (1989) konnte keine Gewölbebildung im Versatzkörper feststellen und führte den Druckaufbau im Versatzkörper auf Verformungen in den Versatz umgebenden Bergfesten zurück** (Thibodeau, 1989).

Hassani et al. (2001) haben Versatzdrücke und Gebirgsverformungen zum Zwecke der Untersuchung des Einflusses von Versatz auf Gebirgsschlaggefährdung in 2 Abbaukammern (bxhxl=4x70x90m) durchgeführt, wobei es sich hier wiederum um eine steilstehende Lagerstätte handelt. Als Untersuchungsinstrumente kamen hydraulische Druckmesskissen, welche in 3 Raumrichtungen an einem Stahlrahmen befestigt wurden, Stangenextensometer und Gebirgsspannungsmessgeber zum Einsatz. Der im Versatz gemessene Vertikaldruck stimmte mit dem Gewicht des überlagernden Versatzkörpers überein, wenn kein Abbau in unmittelbarer Umgebung des Versatzkörpers stattfand. Im Falle von benachbarten Abbautätigkeiten betrug der vertikale Versatzdruck in etwa das Dreifache des zu erwartenden Versatzdruckes aufgrund

des Versatzeingewichts. Die höchsten Versatzdrücke konnten normal auf die Ulmen der Abbaukammern beobachtet werden und beliefen sich auf 245kPa bzw. 1MPa, wobei letztere als Reaktion auf benachbarte Abbautätigkeiten zurückgeführt wurden. Der Anstieg von 500kPa auf 1MPa erfolgte im Laufe von 20 Tagen vor einem Gebirgsschlag, wobei Hassani et al. (2001) den Anstieg im Versatzdruck als Indikator für Bewegungen im Hangenden des Versatzkörpers und in weiterer Folge für das Stattfinden eines Gebirgsschlages sehen. Hassani et al. (2001) kamen zu dem Schluss, dass der gemessene Versatzdruck Funktion der Hohlraumkonvergenz und des E-Moduls des Versatzes ist. Die gemessenen Verformungen im Gebirge betragen 8cm bzw. 32cm. Zudem konnten Spannungsänderungen im Versatzkörper mit Spannungsänderungen im Gebirge in Zusammenhang gebracht werden (Hassani et al., 2001). **Zusammengefasst konnte im Rahmen der durchgeführten Messungen die positive Versatzwirkung auf Bewegungen im Gebirge sowie zur Reduktion von Gebirgsschlagauswirkungen festgestellt werden.** Bei den Arbeiten von Hassani et al. (2001) zeigt sich deutlich der Aufbau des Versatzdruckes für steilstehende geringmächtige Lagerstätten. Hier ist der horizontale Versatzdruck, also der Versatzdruck normal auf den Festenulm dominierend und hängt stark von der Hohlraumkonvergenz ab, wobei der vertikale Versatzdruck eine untergeordnete Rolle spielt und in den meisten Fällen dem Gewicht der überlagernden Versatzschichten entspricht. Im Gegensatz dazu dominiert bei weit erstreckten flach gelagerten Erzkörpern der vertikale Versatzdruck.

4.2 Erkenntnisse über Einflussfaktoren bezüglich der gebirgsmechanischen Versatzwirkung

Einfluss der Versatzhöhe

Galvin und Wagner (1981) sowie Galvin (1981) haben ebenfalls festgestellt, dass die Versatzhöhe einen wichtigen Einflussfaktor darstellt und eine Verfüllung von 2/3 der Abbauhöhe ausreicht um die stabilisierende Wirkung auf die Festen zu erzielen. In diesem Fall steht die Einspannungswirkung von Versatz im Vordergrund, da wie Wagner (1974) festgestellt hat, belastete Kohlefesten aus einem kompakten Kern umgeben von einer Bruchzone bestehen. Der Kern der Kohlefesten ist hauptbelastet und trägt die Belastung aus den überlagernden Schichten, auch wenn die Festenoberflächen bereits verbrochen sind. Durch die Verfüllung wird mittels passiven Versatzdrucks eine Einspannung auf die Festenoberflächen und folglich auf den Festenkern erzielt, welcher somit eine höhere Festigkeit besitzt.

Die größte Versatzwirkung kann erzielt werden, wenn die Festen mindestens bis zur Hälfte von Versatz umgeben sind, da aufgrund der Einspannungseffekte durch

Firste und Sohle in diesem Bereich die größten Verformungen auftreten. (Galvin und Wagner 1981, Galvin 1981)

Wie Wagner (2009) zeigte, ändert sich durch die Veränderung der Verfüllhöhe, welche zwischen vollständiger Verfüllung (100%), einer 30cm Lücke zwischen Firste und Versatz, der Verfüllung bis zur Hälfte der Festen (50%) und keiner Versatzverwendung variiert wurde, insbesondere das Nach-Versagensverhalten der Bergfesten (Abbildung 18). Die maximale Festenspannung konnte durch vollständige Verfüllung im Vergleich zu Festen ohne Versatz lediglich um 10% erhöht werden. Im Nachbruchbereich wurde jedoch festgestellt, dass die bereits versagte Feste durch Verfüllung von einem strain-softening in ein strain-hardening Verhalten wechselt und die aufnehmbare Spannung verdreifacht wird. Die von Wagner angeführten Beobachtungen beziehen sich auf die bereits besprochenen Modellfestenversuche von Hasewend mit Alphasgips (Blaha et al. 2003, Hasewend 2004, Wagner 2009)

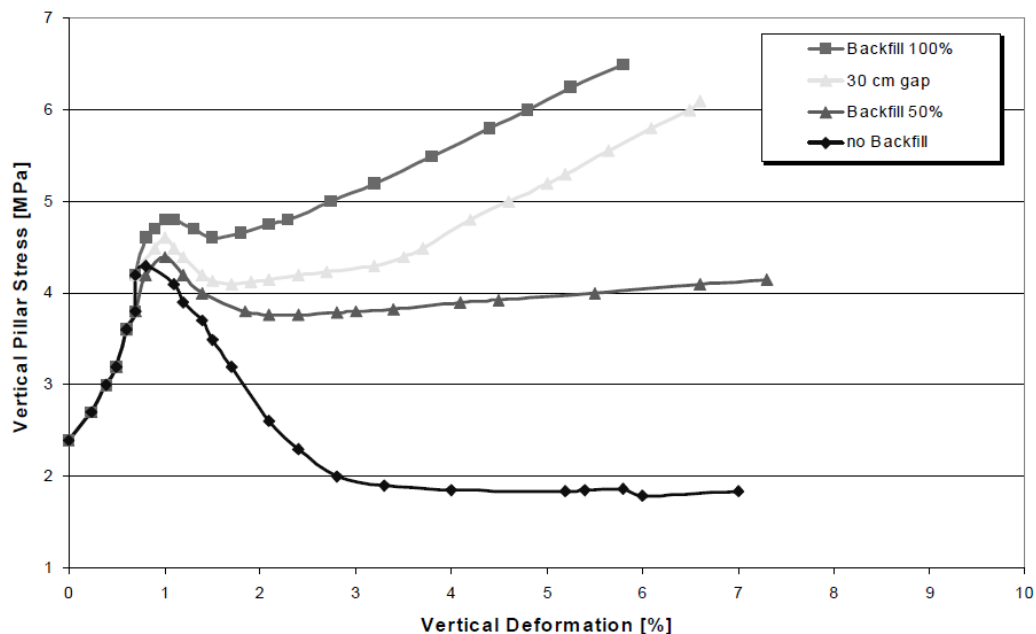


Abbildung 18: Einfluss der Verfüllhöhe auf die Festigkeit von Bergfesten (Wagner 2009, S.56)

Anhand des südafrikanischen Goldbergbaus konnte Wagner (1981) feststellen, dass es bei geringmächtigen Goldlagerstätten nicht notwendig ist den gesamten Abbauhohlraum zu verfüllen um eine stabilisierende Wirkung zu erzielen. Studien haben gezeigt, dass bereits durch die Verfüllung von 20-30% der abgebauten Fläche mehr als 80% der Reduktion der ERR erzielt werden konnte im Vergleich zu einer vollständigen Verfüllung. (Wagner, 1981)

Einfluss des Verfüllzeitpunktes

Der Verfüllzeitpunkt ist ebenso von großer Bedeutung, da die Versatzreaktionsspannung nicht von der Gesamtverformung der Feste sondern

von der Verformung nach Verfüllung der Hohlräume abhängt. (Galvin und Wagner, 1981)

Einfluss der Aushärtedauer

Es konnte auch festgestellt werden, dass die Versatzwirkung mit zunehmender Aushärtedauer zunimmt und die Festigkeit der Proben bei längerer Aushärtedauer des Flugaschenversatzes (400 Tage) um weitere 10% zunimmt. Dies deutet darauf hin, dass Versatz mit größerer Festigkeit die Festigkeit von Bergfesten erhöht.

Messtechnische Einflüsse – Temperatureffekt

Bei der Messung von Spannungen und Verformungen in bindemittelverfestigten Versatzkörpern kann es zu messtechnischen Einflüssen aufgrund von Temperaturschwankungen im Versatzkörper kommen. Insbesondere der Temperatureffekt durch die Abkühlung des Versatzes nach Erhärten wurde in einigen Studien hervorgehoben und untersucht (Tesarik et al., 2009). Es wurde gezeigt, dass Temperaturänderungen die Spannungen beeinflussen, welche durch Erddruckzellen aufgezeichnet werden. Der beobachtete Temperatureffekt resultiert laut Tesarik et al. (2009) in Absinken der Spannungen und Verformungen im Versatzkörper. Schwankungen bezüglich des Spannungsaufbaus im Versatzkörper sollten mit Temperaturschwankungen abgeglichen und bei der Messung der Gesamtverformungen und Gesamtspannungsänderungen nicht berücksichtigt werden. Dies konnte ebenfalls bei Messungen von Hassani et al. (2001) beobachtet werden.

4.3 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Literaturliteraturarbeit wurde versucht ein möglichst vollständiges Bild über die gebirgsmechanische Anwendung von Versatz zur Stabilisierung von Hohlräumen und Grubenbauten zu erlangen.

Ausgangspunkt der Literaturrecherchen war der Stand der Technik der Versatztechnologie, wobei die verschiedenen Versatzarten und deren Anforderungen überblicksmäßig dargestellt wurden. Verschiedene Anwendungsfälle von Versatz im untertägigen Bergbau zeigten die Individualität jedes Versatzsystems, das basierend auf den vorhandenen Ausgangsmaterialien sowie den definierten Anforderungen an das Versatzsystem ausgelegt wird. Sehr häufig werden Versatzprodukten Bindemittel zugegeben, wobei der Anwendungszweck von Bindemitteln in der Versatztechnologie zu Transportzwecken, der Erhöhung der Festigkeit sowie der Bindung von überschüssigem Wasser dient. Grundsätzlich zeigen einige Studien (Helms 1988, Pirapakaran et al. 2007, Walkner 2017), dass die Endfestigkeit des Versatzkörpers mit der Bindemittelzugabe steigt.

Weiters ist bekannt, dass im Versatzkörper Spannungen aufgebaut werden, einerseits auf Basis seines Eigengewichts und andererseits als Reaktion auf Verformungen im Gebirge (Wagner und Sanak-Oberndorfer, 1996). Über die Größe der aufgebauten Spannungen insbesondere bei der Anwendung von Versatz im alpinen Bergbau ist keine Information vorhanden. Blaha und Wagner (2009) konnten jedoch feststellen, dass Versatz aufgrund seines zum Gebirge unterschiedlichen Verhaltens unter Kompression im Gebirge Scherspannungen induzieren kann, was zu Entspannungsrissen im oberen Festenbereich und in weiterer Folge zur Schwächung des Gebirges führt. Zu den für eine gewisse Stabilisierungswirkung benötigten Versatzeigenschaften liegt wenig Information aus früheren Anwendungsfällen vor. Blaha (2012) hat qualitative Überlegungen zur Versatzwirkung auf Bergfesten angestellt, wobei er die Erhöhung der Festigkeit des Gebirges durch Versatz mit der Umschlingungsspannung bei einem dreiaxialen Druckversuch vergleicht. Wagner (2009) beschreibt ebenfalls einen qualitativen positiven Einfluss des Versatzes auf das Nachbruchverhalten von Festen, welches sich von einem Spröbruchversagen hin zu einem strain-hardening Versagen entwickelt.

Auch die Frage der benötigten Verfüllhöhe zur Stabilisierung stellt häufig Kernthema von Versatz-Gebirge Untersuchungen dar. In dem Großteil der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass zur Hohlraumstabilisierung keine vollständige Verfüllung notwendig ist. (Galvin und Wagner 1981, Wagner 1981, Wagner 2009)

Im Bereich der in der Vergangenheit durchgeführten Studien zu Gebirge und Versatz liegt der Fokus auf der numerischen Simulation der Wechselwirkung, insbesondere im Bereich des Kohlebergbaus (Wang et al. 2010, Kostecki und Spearing 2014). Vorwiegend kam die finite Differenzen-Methode FLAC zur Anwendung, wobei Ziel des Großteils der Untersuchungen die Feststellung des Spannungsaufbaus im Versatzkörper sowie die Veränderung des Spannungszustands im Gebirge als Folge der Verfüllung war. Auch zur Verfüllhöhe wurden unterschiedliche Modelle erstellt (Wang et al. 2010, Hassani et al. 2008).

Auch der Einfluss von unterschiedlichen Versatzeigenschaften, speziell der Einsatz von kohäsionslosem bzw. bindemittelverfestigtem Versatz wurde im Rahmen einiger Studien behandelt. (Wang 2010, Kostecki und Spearing 2014, Li und Aubertin, Sobhi und Li 2017)

Bei in-situ Untersuchungen zur Wechselwirkung von Versatz und Gebirge kamen Verformungsmessungen und Spannungsmessungen im Gebirge sowie im Versatzkörper zum Einsatz. (Corson 1961, Corson und Wayment 1967, Bruce und Klokow 1988, Thibodeau 1989, Gürtunca et al. 1989, Clark 1989, Squelch 1990, Gürtunca und Adams 1991, Hassani et al. 2001, Tesarik et al. 2009) Die Verformungsmessungen im Gebirge wurden mittels Extensometern und die Spannungsmessungen im Versatzkörper mittels hydraulischen Druckmesskissen

durchgeführt. Die gemessenen Versatzdrücke lagen im Bereich von einigen hundert kPa bis hin zu 5MPa. Bei den durchgeführten Studien wurde der Spannungsaufbau im Versatz als Reaktion auf Gebirgsverformungen beobachtet. Die angeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass bei steilstehenden geringmächtigen Erzkörpern die Spannungen normal auf die Kammerulme dominieren und stark von den Hohlraumkonvergenzen abhängen (McNay und Corson 1961, Corson und Wayment 1967, Hassani et al. 2001). Bei flach gelagerten weitläufig erstreckten Lagerstätten sind die Vertikalspannungen im Versatzkörper ausgeprägter (Adams et al. 1991, Gürtunca und Adams 1991).

4.4 Offene Fragen

Im Vergleich zum künstlich hergestellten Versatzprodukt, dessen Eigenschaften durch die Kombination unterschiedlicher Stoffe und Zusätze beeinflusst werden kann, ist das Gebirge Resultat tektonischer Aktivitäten in der Erdkruste, welche dessen Eigenschaften und dessen Verhalten während der Hohlraumerstellung und der Abbauaktivitäten maßgeblich beeinflussen. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen finden sich in einer in den Ostalpen gelegenen Magnesitlagerstätte, welche zu den mehrfach tektonisch überprägten Gebirgskörpern zählt. Diese sind gekennzeichnet durch eine hohe Dichte an Klüften und Trennflächen sowie unregelmäßige Geometrien und Gehaltsverteilungen. Diese Voraussetzungen stellen eine zusätzliche Herausforderung für die Stabilität der Hohlräume und in weiterer Folge für die Untersuchung der die Hohlraumstabilität beeinflussenden Parameter dar. Über die Wechselwirkung des Versatzes mit dem Gebirge ist eine grundsätzliche Stabilisierung des Gebirgsverbandes bekannt. In Bezug auf seine gebirgsmechanische Wirkung wird Versatz eingesetzt um Gebirgsauflockerungen zu vermeiden, die Standfestigkeit von Bergfesten zu erhöhen und die Gebirgsschlaggefahr sowie Steinfällproblematik zu reduzieren (Wagner, 2009), genaue Informationen über die Mechanismen der gebirgsmechanischen Versatzwirkung im alpinen Bergbau sind jedoch nicht vorhanden.

Die Analyse einiger Arbeiten zum Thema der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz hat gezeigt, dass eine Vielzahl an Untersuchungen im Bereich der Wechselwirkung Gebirge und Versatz mittels numerischer Simulation durchgeführt wurden. Ein großes Forschungsgebiet stellt der Einsatz von Versatz im Kohlebergbau dar, wobei auch hier großteils numerische Simulation herangezogen wird um Erkenntnisse über die Interaktion Gebirge-Versatz zu erlangen. Zudem liegen Untersuchungen zum tiefen südafrikanischen Bergbau vor.

Bei den in-situ Untersuchungen kamen in den analysierten Studien sowohl Verformungs- als auch Spannungsmessungen zur Anwendung, wobei einige

Arbeiten aus dem südafrikanischen Goldbergbau flachgelagerter Lagerstätten sowie dem nordamerikanischen Örterbau stammen. Sowohl bei den Analysen aus numerischer Simulation als auch aus in-situ Untersuchungen ist ersichtlich, dass es lediglich möglich ist spezielle Anwendungsfälle von unterschiedlichen Versatzmaterialien mit verschiedenen Gebirgstypen zu untersuchen und es nicht möglich ist ein allgemein gültiges Gebirge-Versatz-Verhalten zu beschreiben. Das Hauptaugenmerk der bekannten Studien liegt zudem auf Messungen zum Zwecke der Überwachung des Gebirges, wobei meist wenig Interpretation der Ergebnisse durchgeführt wurde. Häufig ist aus den veröffentlichten Studien nicht ersichtlich, welche Versatzdrücke gemessen werden (horizontal oder vertikal) und worauf die gemessenen Versatzdrücke, welche zwischen kPa-Bereich und einigen MPa variieren können, zurückzuführen sind.

Die durchgeführten Recherchen haben zudem deutlich die geringe Anzahl an Laborversuchen zur beschriebenen Problematik gezeigt, wobei bei den dem Autor bekannten Laborversuchen keine Hinweise auf die Berücksichtigung der mechanischen Ähnlichkeit zwischen Realität und Modell vorliegt. Nach Wissen des Autors fehlen zudem Vergleiche zwischen Laborversuchen und in-situ Untersuchungen, insbesondere über die Untersuchung des Druckaufbaus im Versatzkörper im Labormaßstab als Vergleich zum in-situ Verhalten sind keine Studien vorhanden.

Bezüglich der beobachteten Gebirgsformationen stammen die Untersuchungen aus dem Kohlebergbau und dem südafrikanischen Golderzbergbau. Untersuchungen im Hartgesteinsbergbau sind begrenzt vorhanden, Beobachtungen von Gebirgsformationen im alpinen Bereich, insbesondere anhand von schlanken Bergfesten, sind nicht bekannt.

Noch offen ist vor allem die Behandlung der Frage der Reaktion von Versatz auf die stetige Verformung im Gebirge, welche nicht im Kontext mit Gebirgsschlägen auftreten sowie wie sich die Verfüllung der Hohlräume auf Verformungen fern des Abbaus auswirkt.

Die Fragen der benötigten Versatzeigenschaften, der Einfluss des Verfüllzeitpunktes sowie die benötigten Drücke im Versatzkörper um eine gewünschte Stabilisierung des Gebirges zu erzielen bleiben auf Basis der analysierten Studien weiterhin unbeantwortet. Auch der Problematik der Bindemittelzugabe kommt in diesem Kontext große Bedeutung zu.

Ganz allgemein konnte in allen Studien eine positive Versatzwirkung beobachtet werden, es fehlen jedoch genaue Analysen und Modelle zu den wirkenden Phänomenen und zu den Gründen der Stabilisierungswirkung des Versatzkörpers.

Zusätzlich zu den beschriebenen offenen Fragen konnte festgestellt werden, dass nur vereinzelte Studien über den Einsatz von Versatz im alpinen Bergbau bekannt sind, was bei der Komplexität dieser Gebirgsformationen von großer Bedeutung wäre.

Die aus der durchgeführten Literaturstudie aus numerischer Simulation und in-situ Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse sollen somit im Rahmen dieser Arbeit durch in-situ Messungen in einem Magnesitbergbau in den Ostalpen sowie durch Laboruntersuchungen auf ihre Übertragbarkeit auf den alpinen Bergbau überprüft bzw. ergänzt werden. Im Fokus der Untersuchungen steht die „stabilisierende Wirkung“ des Versatzes, welche sich im Detail auf folgende Wirkungsweisen bezieht:

- Versatz zur Reduktion von exzessiven Verformungen im Gebirge (regionale Stabilisierung)
- Versatz zur Erhöhung der Festenfestigkeit von schlanken Bergfesten (Lokale und regionale Wirkungsweise von Versatz)

Wie gezeigt wurde, hat die durchgeführte Studie der veröffentlichten Untersuchungen zur Wechselwirkung von Gebirge und Versatz einige Fragen aufgeworfen, woraus sich die zentrale Problemstellung der gegenständlichen Arbeit ergibt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll somit ein Beitrag zur Beantwortung der folgenden Fragen geleistet werden:

- Welche Phänomene sind für die Stabilisierungswirkung des Versatzes auf das Gebirge verantwortlich?
- Welche Spannungen entstehen im Versatzkörper in Relation zur auftretenden Gebirgsverformung?
- Welche Versatzeigenschaften sind notwendig um eine stabilisierende Wirkung auf das Gebirge zu erzielen?
- Wie wirken sich unterschiedliche Versatzeigenschaften, insbesondere die Bindemittelzugabe auf die stabilisierende Wirkung von Versatz aus?
- Welche Bedeutung kommt der Verfüllung im alpinen Hartgesteinsbergbau beim Einsatz von Versatz in Kombination mit schlanken Bergfesten zu?

Ziel der gegenständlichen Arbeit ist es einen Beitrag auf Basis der gestellten Fragen zum Verständnis der Wechselwirkung des Gesamtsystems Gebirge-Versatz zu leisten. Zur Beantwortung der Fragestellungen sollen untertägige Messungen, Laboruntersuchungen und theoretische Modelle herangezogen werden. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen soll ein Einblick in die Wirkung von Versatz auf Bruchvorgänge und Verformungen im Gebirge gewonnen werden sowie in Erfahrung gebracht werden, welche Parameter das Gesamtsystem Gebirge-Versatz beeinflussen und bei der Auslegung von Versatzsystemen von besonderer Bedeutung sind. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten in-situ Untersuchungen und Überlegungen sollen insbesondere den aktuellen Wissensstand gewonnen aus Untersuchungen im Kohle- und Goldbergbau ergänzen und wurden aus diesem Grund anhand eines Bergbaus im alpinen Bereich durchgeführt, da keine Information über die Versatzwirkung in alpinen Gebirgsformationen vorhanden ist und Studien über Versatz in Kombination mit schlanken Bergfesten fehlen. Hierbei handelt es sich um einen

untertägigen Magnesitbergbau in den Ostalpen, welcher im folgenden Kapitel beschrieben wird.

5 Untersuchung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz

Zur Untersuchung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz wurde für die vorliegende Arbeit folgende Herangehensweise gewählt:

- Großmaßstäbliche Versuche untertage (Kapitel 6)
- Versuche im Labormaßstab (Kapitel 7)
- Theoretische Modelle (Kapitel 8)

Die untertägigen Messungen und Untersuchungen wurden in einem in den Ostalpen gelegenen Magnesitbergbau durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es die Wechselwirkung von Versatz und Gebirge anhand eines Beispiels aus dem alpinen Bergbau zu untersuchen um den Einfluss von Versatz auf alpine Hartgesteinsformationen beurteilen zu können. Zu diesem Zwecke wurden am Gebirge folgende Messungen und Arbeiten durchgeführt:

- Fotografische Dokumentation
- Geologische Beschreibung und Gefügaufnahmen
- Kernbohrungen
 - Bestimmung der mechanischen Gesteinseigenschaften
- Untersuchungen mittels Bohrlochkamera
- 11 Extensometermessungen
 - 2-fach Stangenextensometer und 3-fach Stangenextensometer
 - 7 Extensometer im südlichen Auflager des Abbaufeldes
 - 4 Extensometer in den Abbaufesten

Am Versatzkörper wurden folgende Untersuchungen gemacht:

- Kernbohrungen
 - Bestimmung der Verformungsparameter des Versatzkörpers
- Spannungsmessungen im Versatzkörper
 - Versatzdruckmessrahmen

Zusätzlich wurde eine genaue Dokumentation der betrieblichen Aktivitäten, insbesondere der Sprengarbeiten im Referenzbereich, durchgeführt um die Messresultate mit dem Betriebsgeschehen in Zusammenhang bringen zu können.

Ziel der fotografischen Dokumentation sowie der geologischen Beschreibung und Gefügaufnahmen war es den Ist-Zustand vor Abbau- und Verfülltätigkeiten im Referenzbereich zu erheben. In weiterer Folge wurde die fotografische Dokumentation fortgeführt um Veränderungen des Gebirgszustandes an definierten Referenzpunkten im Laufe des fortschreitenden Abbaus feststellen zu können. Bei den Gefügaufnahmen stand die Unterscheidung zwischen

geologischen Trennflächen und spannungs- bzw. abbauinduzierten Trennflächen im Vordergrund. Durch die Aufnahme der geologischen Trennflächen vor Beginn der Abbautätigkeiten konnte eine Einschätzung des Zustandes des Gebirges getroffen und zusätzlich entstandene spannungsinduzierte Brucherscheinungen identifiziert werden. Die Kernbohrungen dienten ebenfalls der Untersuchung des Ist-Zustandes im Gebirge. Hier stand die Bestimmung der mechanischen Gesteinseigenschaften, wie einaxiale Druckfestigkeit, E-Modul und Poissonzahl im Vordergrund, welche im Labor mittels einaxialen Druckversuchen anhand der in-situ gewonnenen Bohrkerne erfolgte. Auch die Bestimmung des RQD-Wertes wurde im Labor durchgeführt, da somit Informationen zum Zerklüftungsgrad des Gebirges zur Verfügung standen. Die erstellten Kernbohrungen dienten in weiterer Folge auch der Untersuchung mittels Bohrlochkamera, welche regelmäßig erfolgte. Aus den Bohrlochkameraaufnahmen konnte der Zustand des Gebirges in unmittelbarer Umgebung der Strecken und Hohlräume beobachtet werden. So konnte beispielsweise die Bildung von Schalen oder das Öffnen von geologischen Trennflächen in Abhängigkeit der Abbautätigkeiten, der Sprengarbeiten und der Verfüllung der Hohlräume dokumentiert werden. In einen Teil der Kernbohrungen wurden zudem Extensometer eingebracht. Diese wurden horizontal installiert und sollten die Querverformung der Festen und des Auflagers aufnehmen. Die Zweifach- bzw. Dreifachextensometer erlaubten es die Querverformung des Gebirges in Abhängigkeit der Entfernung vom Hohlraum unterschiedlichen Bereichen zuzuordnen. Parallel zu allen Extensometern wurden ebenfalls Kernbohrungen erstellt (Parallelabstand ca. 1m) um die gemessenen Gebirgsverformungen auch anhand von Bohrlochkameraaufnahmen zu beobachten und analysieren zu können.

Um den Einfluss des Versatzes auf das Gebirge beschreiben zu können, ist es von großer Bedeutung, die tatsächlichen Eigenschaften des Versatzkörpers zu kennen. Die verwendete Versatzmischung wird regelmäßig im Labormaßstab auf seine Eigenschaften untersucht, wovon jedoch nicht unmittelbar auf die Versatzkörpereigenschaften geschlossen werden kann. Aufgrund des Pumpvorganges über eine größere Distanz wie im Falle vom Bergbau Breitenau 2km, kommt es zu Veränderungen in der Korngrößenverteilung des Materials, zu Entmischungsvorgängen und aufgrund der Bindemittelzugabe auch zu Konsistenzveränderungen. Diese wirken sich unmittelbar auf die Versatzeigenschaften aus. Zudem wird der Versatz im Labor unter Normbedingungen geprüft, wohingegen untertage andere Bedingungen, was Luftfeuchtigkeit und Temperatur anbelangt, herrschen. Aus diesem Grund wurden Kernbohrungen im Versatzkörper zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt um auch Information über die in-situ Langzeitfestigkeitsentwicklung des Versatzkörpers zu erhalten.

Von großer Bedeutung für die Beschreibung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz ist die Reaktion des Versatzkörpers auf Verformungen im Gebirge. In diesen Fällen entwickelt der Versatz eine Reaktionsspannung, welche mittels

Spannungsmessungen beobachtet werden sollte. Hier stand der Aufbau des Versatzdruckes als Reaktion auf die Festenverformungen im Vordergrund.

Ziel der angeführten Methoden war es möglichst vollständige, ergänzende und teilweise sich überschneidende Ergebnisse über das Verhalten von Gebirge und Versatz zu erhalten. Auf Basis von Informationen über die Reaktion des Gebirges auf die Verfüllung sowie der Reaktion von Versatz auf Verformungen kann die Wechselwirkung von Gebirge und Versatz eindeutig beschrieben werden. Um die benötigten Informationen zu sammeln, wurden Messungen in einem alpinen Untertage Hartgesteinsbergbau durchgeführt. Auf Basis der untertägigen Untersuchungen können in weiterer Folge Modelle für die Wechselwirkung dieser zwei Komponenten erstellt werden.

In den folgenden Abschnitten wird nun der Untersuchungsbergbau vorgestellt. Dieser ist in den Ostalpen gelegen und stellt somit ein Beispiel für einen alpinen Lagerstättenkörper dar, welcher zu den mehrfach tektonisch überprägten Gebirgsformationen zählt. Die Besonderheiten dieser Lagerstätten werden nachfolgend erläutert sowie der Untersuchungsbergbau vorgestellt. Die genaue Beschreibung der jeweiligen verwendeten Messmethoden sowie der Ergebnisse der untertägigen Untersuchungen erfolgt im Kapitel „In-situ Untersuchungen an Gebirge und Versatz“. Die durchgeführten Laboruntersuchungen sollen der Analyse der Interaktion eines allgemeinen Versatz-Festensystems dienen, wobei der genauen Beschreibung der Laborversuche das Kapitel 7 gewidmet wird.

5.1 Charakteristika mehrfach tektonisch überprägter Gebirgskörper – Beispiel: Alpine Lagerstätten

Eine der größten Herausforderungen im alpinen Bergbau stellt die Bestimmung des Primärspannungszustandes dar. Die vorherrschenden Vertikalspannungen sind vorwiegend durch die Topographie bestimmt, wobei diese in Bereichen größerer Überlagerung ausgeprägter sind. Die Horizontalspannungen sind durch die tektonische Vorgeschichte bestimmt und können sich bereits in kleinräumigen Bereichen stark unterscheiden. Zusätzlich hat die tektonische Vorgeschichte der alpinen Region große, teils nicht bekannte Trennflächen verursacht, welche einen negativen Einfluss auf die Gebirgsstabilität haben und während Abbau- und Vortriebsarbeiten eine große Rolle spielen. (Wagner, 2004)

Tektonische Aktivitäten in der alpinen Region und Bewegungen in der Erdkruste sind ebenfalls der Grund für die kleinen und räumlich begrenzten Lagerstätten- bzw. Erzkörper, welche die kleinen Abbaufelder bedingen (wenige 100m). (Wagner, 2004)

Die geringe horizontale Erstreckung der Lagerstätten ist ebenfalls ein Resultat der mehrfachen tektonischen Überprägung. Die Erzkörper sind unregelmäßig

ausgebildet und meist steilstehend. Im Vergleich zu ihrer geringen horizontalen Erstreckung zeigen sie jedoch eine große vertikale Ausdehnung mit Erstreckungen weit in die Teufe. Aufgrund der Unregelmäßigkeit der Erzkörper in Bezug auf Geometrie und Gehalte sind die Abbaufelder meist nicht regelmäßig verteilt und dementsprechend versetzt angeordnet. Zudem bedingen die Lagerstättenbedingungen sehr hohe Abbaufelder mit sehr schlanken Bergfesten, was eine zusätzliche Herausforderung bezüglich der unterschiedlichen Abbaureviere, Wahl eines geeigneten Ausbaus und der Gesamtstabilität des Grubengebäudes darstellt. (Wagner, 2004)

Die tektonische Aktivität im alpinen Bereich verursacht zudem komplexe Erzgehaltsverteilungen, welche in unregelmäßigen Abbausituationen sowie Abbausequenzen resultieren. (Wagner, 2004)

Aus den genannten Gründen stellt die Bestimmung des in-situ Spannungszustandes im alpinen Bereich eine große Herausforderung dar, was in weiterer Folge die Wahl einer geeigneten Abbaumethode, der Abbaugeometrie und des notwendigen Ausbaus erschwert.

Die untertägigen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit werden im Magnesitbergbau Breitenau durchgeführt, welcher in den oberostalpinen Einheiten des Grazer Paläozoikums gefunden werden kann. Hier wechseln sich Schichten aus Magnesiten, Dolomiten, Tonsteinen, Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen und Kalksteine ab. (Gallhofer, 2010) Zusätzlich wurde das Gebirge durch mehrfache Gebirgsbildungsvorgänge tektonisch überprägt, wodurch es zur Ausbildung von markanten Trennflächen gekommen ist. Die Unregelmäßigkeiten der Lagerstätte und der Abbaue machen die Beurteilung des Gebirgszustandes und der vorherrschenden Spannungen zu einer besonderen Herausforderung. Die Beurteilung des Gebirges ist jedoch von großer Bedeutung um die Stabilität des Grubengebäudes sowie von Abbauhohlräumen abschätzen zu können.

Anhand dieses Beispiels ist klar erkennbar, welche komplexen Bedingungen in alpinen Lagerstätten vorherrschen. Diese Zustände beziehen sich sowohl auf den wechsellagigen Gebirgskörper sowie die daraus resultierende komplexe Spannungssituation, welche lediglich anhand von indirekten Methoden abgeschätzt werden kann. Diese Bedingungen stellen eine zusätzliche Herausforderung bei der Bestimmung des Einflusses von Versatz auf das Gebirge dar, da in diesen Gebirgstypen aufgrund der teilweise großräumigen Trennflächensysteme und Scherbänder noch zusätzliche Unsicherheiten bezüglich Spannungsumlagerung aufgrund von Abbauaktivitäten gegeben sind. Aufgrund des fehlenden Wissensstands über die Versatzwirkung in alpinen Lagerstätten ist es somit von großer Bedeutung die Wirkung von Versatz auf diesen Gebirgstyp zu untersuchen.

Nach der Darlegung der Besonderheiten von alpinen Gebirgsformationen wird im nachfolgenden Kapitel der Untersuchungsbergbau „Magnesitbergbau Breitenau“ vorgestellt.

5.2 Magnesitbergbau Breitenau

Die untertägigen Messungen zur Beantwortung der gestellten Fragen wurden im Magnesitbergbau Breitenau durchgeführt. In den tiefsten Abbaurevieren des in den Ostalpen gelegenen Bergbaus wird Magnesit mittels Kammer-Festenbau gewonnen, wobei die Verfüllung der Hohlräume mittels Pumpversatz erfolgt. Dieses Abbaurevier bietet die einzigartige Möglichkeit die Wechselwirkung von Versatz und Gebirge sowie von Versatz und Bergfesten anhand von unterschiedlichen Messungen in einem Hartgesteinsbergbau im alpinen Bereich zu untersuchen. Im Folgenden werden die Lagerstätte, die Gewinnungsmethode und das Versatzsystem kurz vorgestellt und auf einige Charakteristika eingegangen.

5.2.1 Geologie

Im Bergbau Breitenau wird eine Spatmagnesitformation abgebaut, welche mit ungefähr 25° entlang der über- und unterlagernden Gesteinsformationen gegenäufig zur Topographie Richtung Süden einfällt und eine Erstreckung in Streichrichtung von bis zu 500m aufweist und zwischen 50 und 200m mächtig ist (Abbildung 19, Abbildung 20). In Einfallsrichtung liegt eine Erstreckung von mehr als 2km vor. (Blaha 2012, Garber 2011)

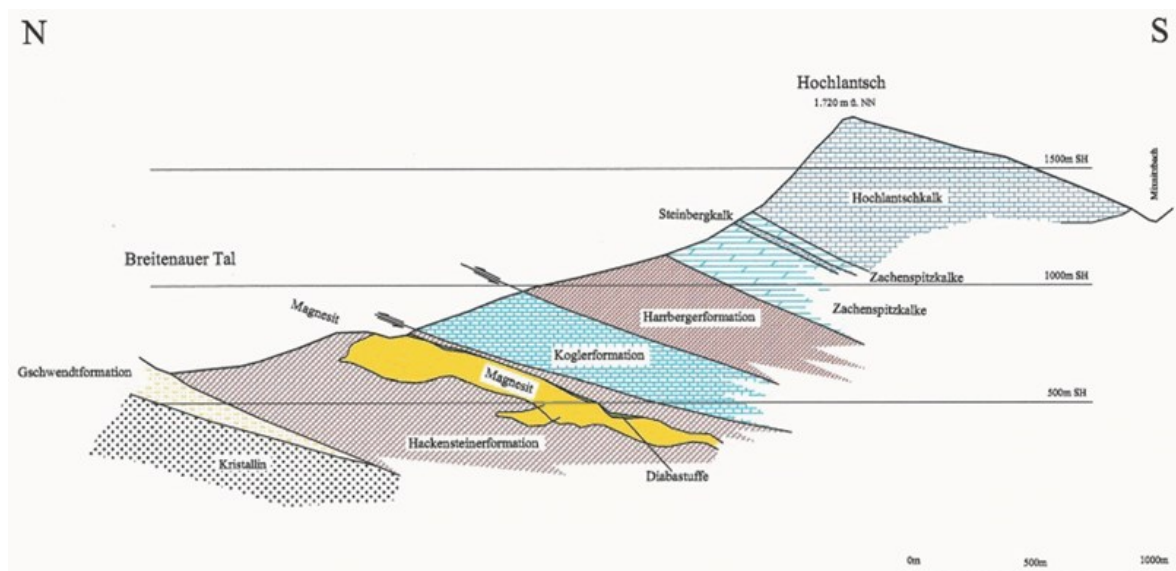


Abbildung 19: Lagerstättenquerschnitt (Schenkl 2012, S. 350)

Tabelle 1: Lithologie der relevanten Formationen (Schenkl 2012, S.350)

Koglerformation der Kalkschieferfolge	Bänderkalk
Gschwendtformation der Kalkschieferfolge	Schuttkalk, Tonsandstein, kalkiger Schiefer
Harrbergerformation der Laufnitzer Gruppe	Tonsandstein, Lydit, Metatuffit, Kalk
Hackensteinerformation der Laufnitzer Gruppe	Metavulkanite, Tonsandstein, Tonstein, Kalk

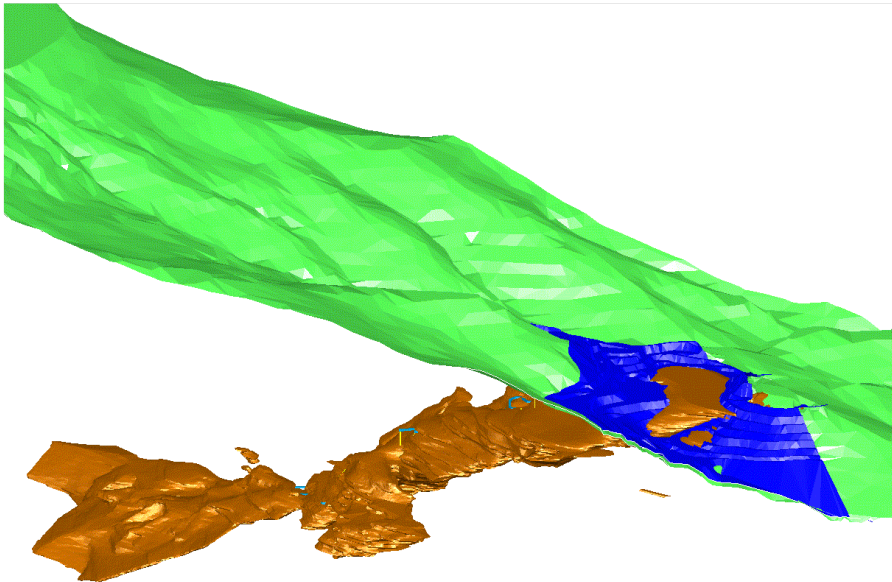


Abbildung 20: Modell der Magnesitlagerstätte (Garber 2011, S.14)

Der Karbonatkörper „Breitenau Subformation“ bildet den Ausgangspunkt der Magnesitlagerstätte, welche aus unterschiedlich ausgebildeten Magnesitkörpern aufgebaut ist. Auch Dolomite können in der Lagerstätte vorgefunden werden, wobei diese meist als massig-graues Taubmaterial auftreten. Insbesondere die Kontaktflächen zwischen den Dolomiten und dem Magnesitkörper sind stark tektonisch überprägt, was charakteristisch für den alpinen Bergbau ist (Tabelle 2).

Gebirgsmechanisch problematisch ist der kohlenstoffreiche, silikatische Schiefer (Schwarzschiefer genannt), welcher sich im Hangenden des Magnesitkörpers befindet. Der Begriff „Schwarzschiefer“ steht für ein feingeschichtetes, durch organische Restbestandteile und sulfidische Erze dunkel gefärbtes Sediment (Murawski und Meyer, 2010). Im Anschluss an den Schwarzschiefer ist ein karbonatischer, grün gefärbter Metatuffit ausgebildet, an welchen in weiterer Folge ein schwarzer Tonschiefer angrenzt. Im Liegenden der Lagerstätte kann eine weitere Schieferformation vorgefunden werden (Gallhofer, 2010).

5.2.2 Auswahl der Untersuchungsbereiche

Die Auswahl der Referenzbereiche hat zum Ziel einen Untersuchungsbereich auszuwählen um definierte Abschnitte für die Instrumentierung und Versuchsdurchführung untertage zur Verfügung zu haben.

Die Referenzbereiche wurden auf Basis folgender Voraussetzungen ausgewählt:

- 1.) Abbaubereich, welcher in naher Zukunft abgebaut wird
- 2.) Keine bzw. geringe Einflüsse von benachbarten Bereichen
- 3.) Geologischer Homogenbereich
- 4.) Sicherer Zugang über mindestens 3 Jahre

Für die Auswahl wurden Vor-Ort Befahrungen durchgeführt, Gebirge und Geologie beurteilt und die zukünftigen Abbauschritte miteinbezogen.

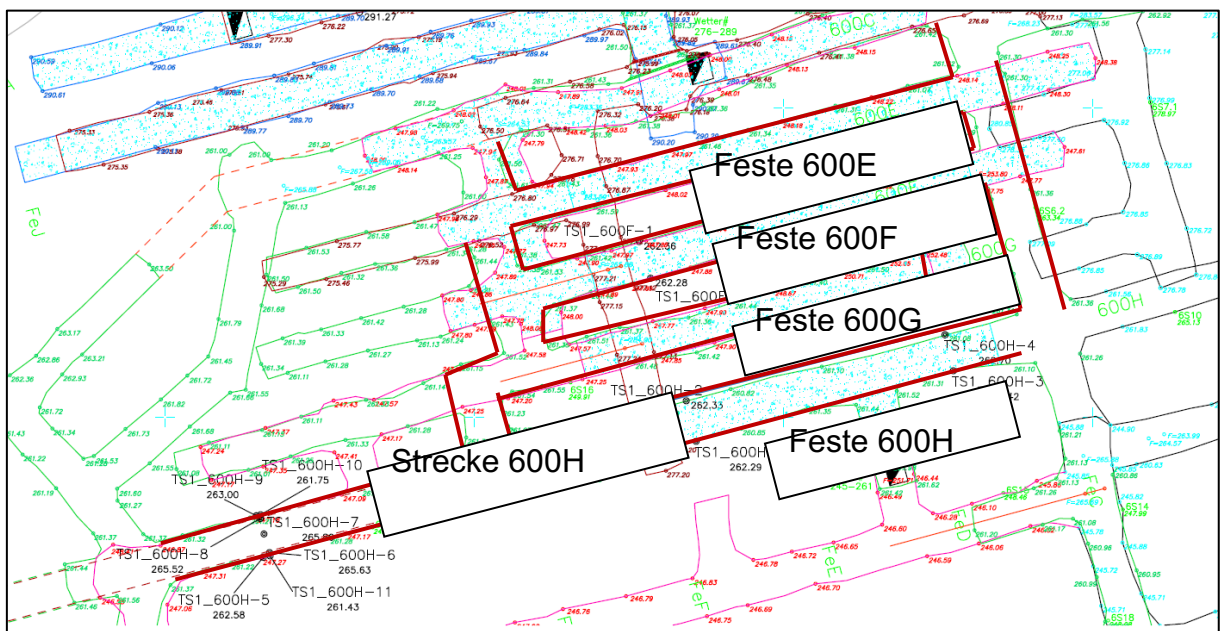


Abbildung 21: Grubenplan Bergbau Breitenau mit Referenzbereichen (rot markiert)

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, wurde als Referenzbereich das Revier 6 des Bergbau Breitenau mit den Abbaufesten 600E, 600F und 600G und der Auflagerfeste 600H gewählt (rot markierte Abschnitte in Abbildung 21). Der Grund für die Wahl dieser Bereiche lag in den definierten Anforderungen an die Referenzbereiche. Die Kammern 600E-600G wurden im Zeitraum 2015-2018 abgebaut und stellen großteils geologische Homogenbereiche dar. Weiters bestehen keine Einflüsse von benachbarten Abbautätigkeiten und auf der Teilsohle 1 (grün auf den Karten) besteht Zugang für laufende Untersuchungen und Aufnahmen. Die beobachteten Strecken auf Teilsohle 1 bezogen auf die

Kammern 600E-600G sind ursprünglich die Kopfstrecken dieser Kammern, die dem Abbau dienen und offengehalten werden sollten, da sie als zukünftige Fußstrecken für den nächsten darüberliegenden Abbaublock dienen sollten. Diese Bedingung hat sich jedoch geändert, da aufgrund von Qualitätsanforderungen kein Abbaublock über dem bestehenden Abbaublock vorgesehen wurde und die Kopfstrecken nachträglich verfüllt wurden. Hier ist noch anzumerken, dass bei den Aufnahmen nicht die gesamten abgebauten Kammern mit einer Höhe von 21m dokumentiert wurden, sondern hier nur die Kopfstrecken der Kammern 600E-600G den Untersuchungen dienen, da die Kammern zum Zeitpunkt der Aufnahmen selbst mit Versatz bis zum Kopfstreckenniveau verfüllt waren.

Zusätzlich wurde die Strecke 600H gewählt, da sie unmittelbar parallel zum Abbaubereich verläuft und sich weiter außerhalb des Abbaubereiches fortsetzt. Diese Strecke befindet sich zudem direkt zwischen dem Abbaubereich und einer mehrere 10m breiten Auflagerfeste, was zusätzliche Untersuchungen bezüglich des Einflusses von Baufelderweiterung und Versatzeinbringung auf diese Auflagerfeste erlaubt.

5.2.3 Abbaumethodik im Revier VI des Bergbaus Breitenau

Im Tagebau sowie im Untertagebergbau werden in der Breitenau jährlich ca. 450 000t Magnesit abgebaut. Die Magnesitgewinnung erfolgt im Untertagebergbau verteilt auf 6 Teilsohlen, wo auf den Teilsohlen 1-5 Magnesit mittels Post-pillar Mining und auf der 6. Teilsohle mittels Kammer-Festebau mit Versatz abgebaut wird. Die Umstellung auf Kammer-Festebau im tiefsten Revier erfolgte aufgrund der mit der Teufe zunehmenden Vertikalspannungen, wofür Post-pillar Mining nicht geeignet ist. Das tiefste Abbaurevier weist eine Überlagerung von ca. 950m auf. Aufgrund der variierenden Lagerstättenmächtigkeit im Bereich des Reviers VI können in einigen Bereichen mehrere Abbaukammern übereinander abgebaut werden, was zusätzliche Herausforderungen an das Versatzmaterial sowie die Infrastruktur für die Verfüllung stellt. Für die untertägigen Untersuchungen wurde das Westfeld des Reviers 6 gewählt, welches in Abbildung 22 dargestellt ist.

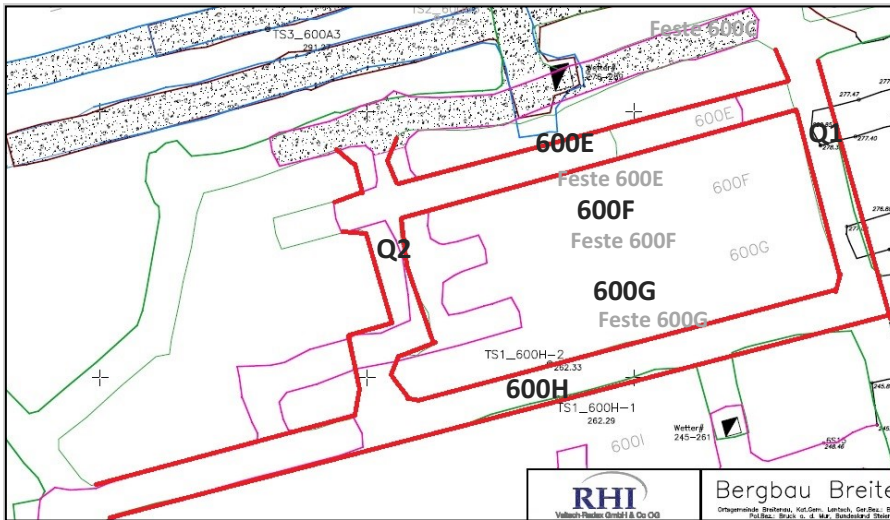


Abbildung 22: Referenzbereich im Revier 6 des Bergbau Breitenau

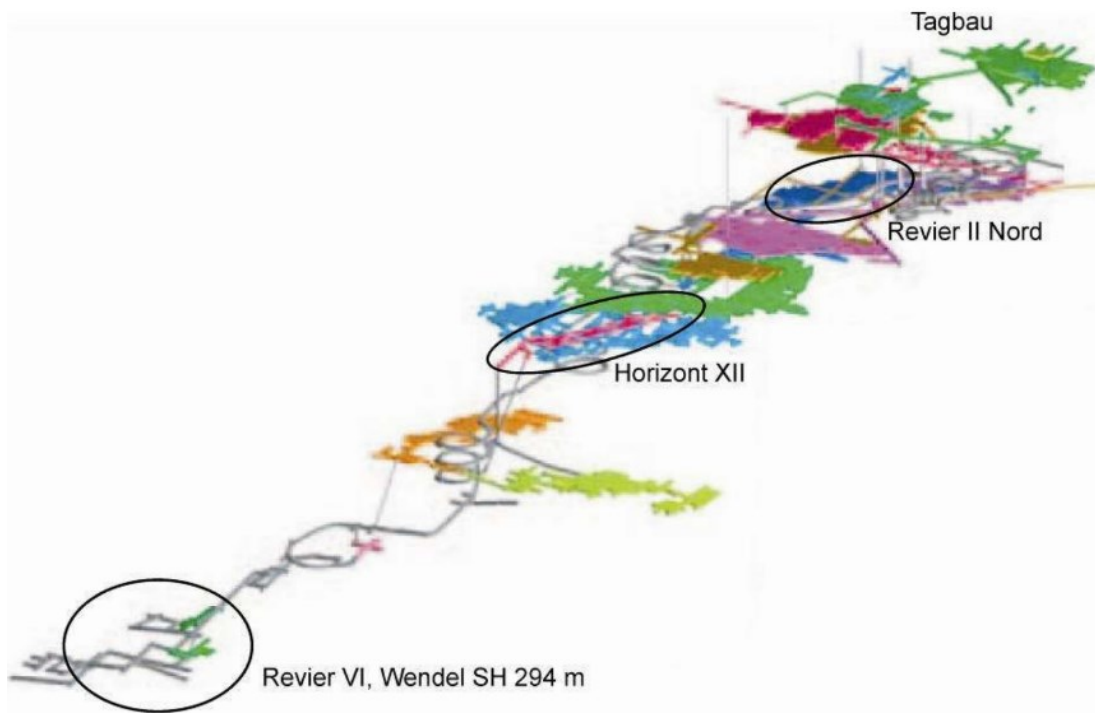


Abbildung 23: Übersicht der Reviere im Bergbau Breitenau (rhi-ag.com, 25.06.2010)

Abbildungen 24-26 zeigen die Abfolge der Gewinnungstätigkeiten mittels Kammer-Festebau im Revier 6. Die Abbaukammern sind 21m hoch, 6m breit und je nach Mächtigkeit der Lagerstätte zwischen 70 und 100m lang. Wie aus der Darstellung hervorgeht, werden in einem ersten Schritt Kopf- und Fußstrecken mittels Bohrens und Sprengen in einem Vertikalabstand von 11m aufgefahren. Die Sicherung der Firste der Strecken erfolgt in beiden Fällen mittels mechanischer Endanker.

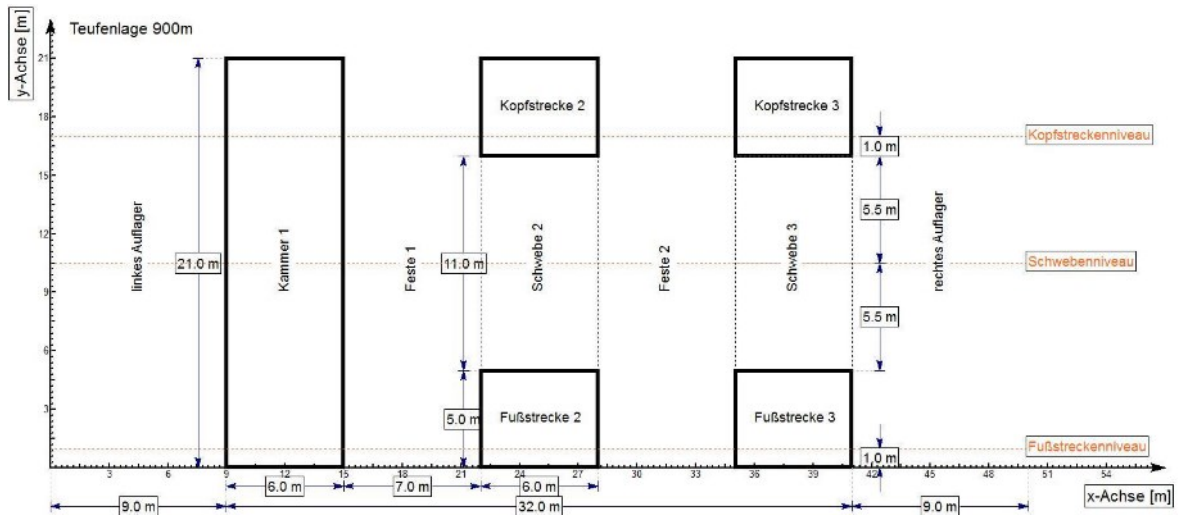


Abbildung 24: Zuschnitt des Abbaufeldes

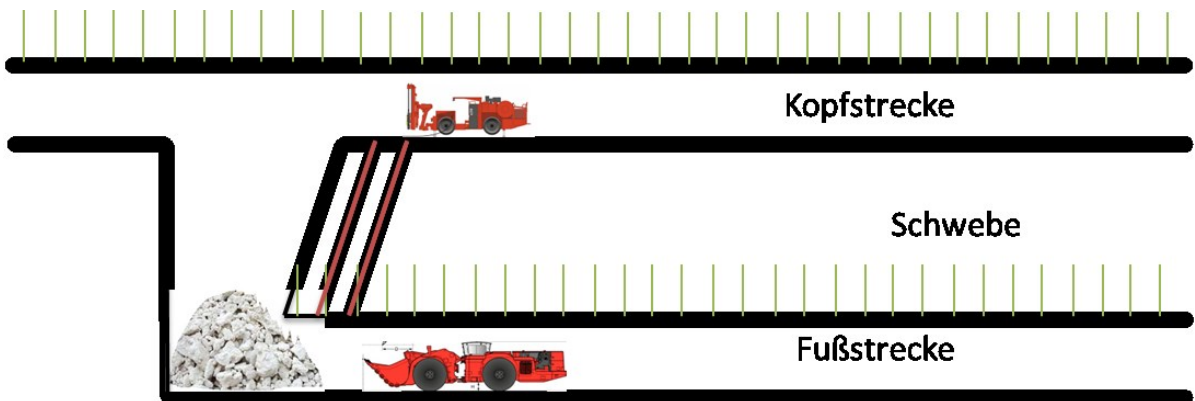


Abbildung 25: Hereingewinnen der Schwebe (Schinagl 2017, S.45)



Abbildung 26: Abbaufortschritt (Schinagl 2017, S.45)

Anschließend an die Streckenerstellung wird die Schwebe im Rückbau durch Bohren und Sprengen gewonnen. Die Bohrlöcher zur Schwebengewinnung werden von der Kopfstrecke ausgehend nach unten gebohrt. Von der Kopfstrecke

aus werden die Bohrlöcher in weiterer Folge mit Sprengstoff beladen. Die Fußstrecke dient nach dem schrittweisen Hereingewinnen der Schweben zum Abtransport des gesprengten Materials mittels ferngesteuerten Radladers. Je nach Mächtigkeit der Lagerstätte werden bis zu 6 Kammern parallel aufgeföhren, wobei die Kammern durch Festen von 7m Mächtigkeit getrennt sind und das Aufföhren einer Kammer erst nach Verfüllung der Nachbarkammer erfolgt.

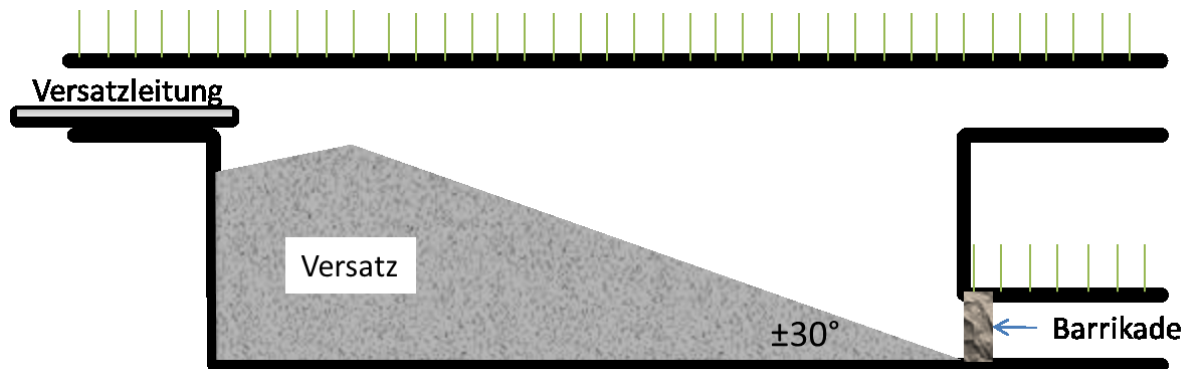


Abbildung 27: Pumpversatzeinbringung (Schinagl 2017, S.46)

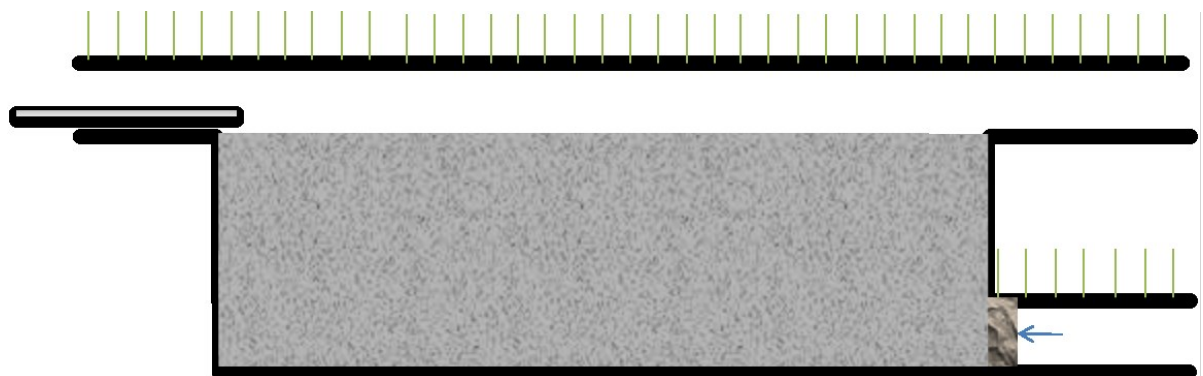


Abbildung 28: Versetzen bis auf Höhe des Sohlenniveaus der Kopfstrecke (Schinagl 2017, S.46)

Nachdem die Schweben über die gesamte Länge der Kammer hereingewonnen ist, wird die Kammer mit bindemittelhaltigem Pumpversatz verfüllt. Die Verfüllung der Kammer erfolgt über eine Rohrleitung, welche über die Kopfstrecke der Kammer eingebracht wird. Die Rohrleitung wird an der Firste der Kammer befestigt, wobei die Verfüllung je nach Länge der Kammer im Rückzug an mehreren Punkten erfolgt. Zu diesem Zweck werden Rohrabschnitte, welche zuvor mit einer detonierenden Zündschnur versehen wurden, schrittweise gesprengt. Diese Vorgehensweise dient dazu, die Kammer möglichst vollständig zu verfüllen. Die Kammer wird bis zur Firste der Kopfstrecke verfüllt. Wenn es die Lagerstättenmächtigkeit jedoch erlaubt, erfolgt die Verfüllung lediglich bis zum Sohlenniveau der Kopfstrecke (Abbildung 28), welche für eine darüber liegende Kammer in weiterer Folge als Fußstrecke dienen kann (Abbildung 29).

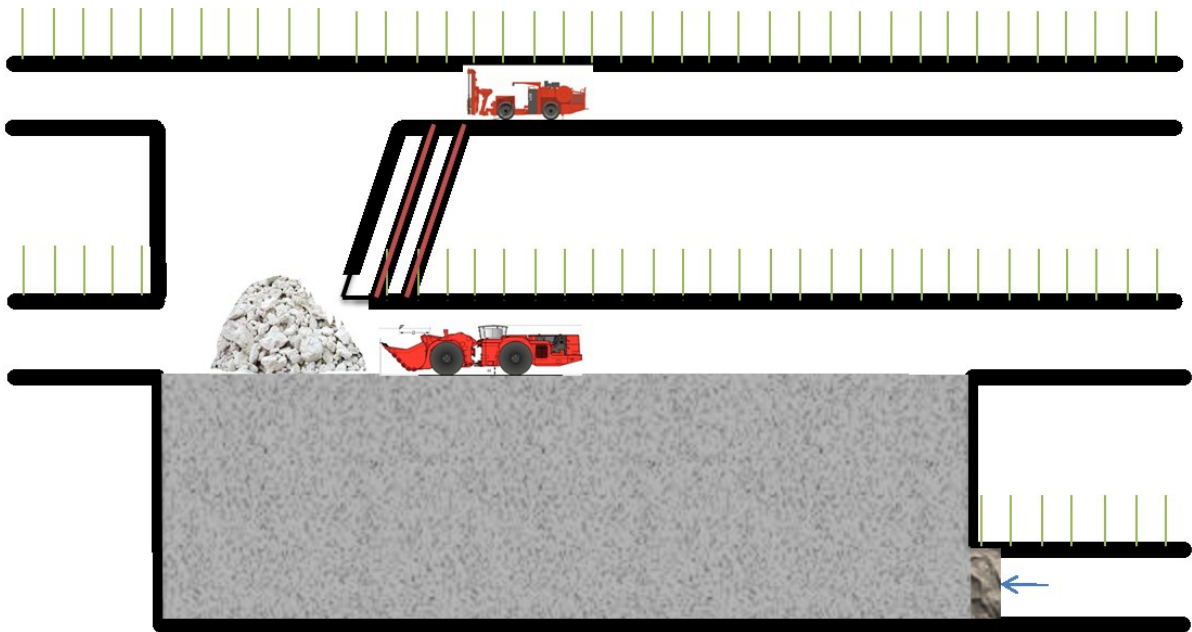


Abbildung 29: Benützung der alten Kopfstrecke als neue Fußstrecke (Schinagl 2017, S.47)

Im nachfolgenden Abschnitt wird nun das im Bergbau Breitenau verwendete Pumpversatzsystem vorgestellt.

5.2.4 Versatzsystem im Breitenau

Im Bergbau Breitenau werden aktuell 3 Rezepturen zur Verfüllung der Kammern im Revier 6 verwendet:

- Rezeptur 1-4: 62,4M% Ankercolor, 12,5 M% Bindemittel (80% CEM3, 20% Supermix), 24,5M% Wasser, 0,6M% Fließmittel
- Rezeptur 4: 35,13M% Ankercolor, 18,98M% Schiefer (0/22), 20,81M% Bindemittel (40% CEM3, 60% Supermix), 24,98M% Wasser, 0,25M% Fließmittel
- Rezeptur 3: 68,26M% Schiefer, 14,63M% Bindemittel (33,33% CEM3, 66,67% Supermix), 17,06% Wasser, 0,15% Fließmittel

Als Bindemittel wird neben einem hydraulisch wirksamen Zusatzstoff Portlandzement des Typs CEM III eingesetzt. Diese Sorte bestehend aus Portlandzementklinker, Gips und Hüttensand erreicht eine Druckfestigkeit nach 28 Tagen bei Normenprüfung nach EN 196 von 43 N/mm². Charakteristisch für den CEM III ist die geringe Frühfestigkeit gegenüber hochwertigeren Portlandzementen und weiters bietet er eine mäßige Beständigkeit gegen Sulfatangriffe. Durch den späteren Erstarrungsbeginn von ca. 240 min kann der „Paste fill“, welcher an der Tagesoberfläche angemischt wird, über das Rohrleitungssystem nach Untertage transportiert werden, wobei die Verweildauer im Rohrleitungssystem ungefähr eine Stunde beträgt. Durch den verzögerten

Beginn der Erstarrung tritt die Kristallbildung bei der Hydratation erst nach dem Pumpvorgang ein. Als Zusatz zum Zement wird Supermix C (AHWZ) gemäß ÖNORM B3309-1 verwendet. Es handelt sich dabei um eine Zusammensetzung aus Hüttensand, Kalkstein und Flugasche. Durch Zugabe des AHWZ wird das Versatzprodukt hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, Dichtigkeit, Temperaturentwicklung, Wasserundurchlässigkeit und Porengefüge verbessert. (ÖNORM B3309-1).

Als Zuschlagstoff für das Versatzmaterial wird entweder Abraum aus dem Tagebau oder der sogenannten Ankercolor der MAGNIFIN-GmbH - ein Filterkuchen aus der Magnesiaerzeugung – in Kombination mit Zement oder Flugasche und Luftporenmittel, Fließmittel und Wasser mit Hilfe der Sonderbetonmischanlage zu einem pumpbaren Suspensionsgemisch verarbeitet. Dieses wird in weiterer Folge über Pumpleitungen in die Abbaukammern eingebracht. Dazu wird der im Tagebau gewonnene Zuschlagstoff über einen Schacht von Etage 4 auf Horizont VI gestürzt und von dort mit einem Tiefschaufelfahrlader oder Radlader zur Sonderbetonmischanlage gebracht.

Versatztransport

Um den bindemittelhaltigen Versatz einzubringen, werden eine elektrisch-stationäre und eine dieselbetriebene Standby - Pumpe eingesetzt. Der Pumpenbetrieb wird vornehmlich mit der elektromotorisch angetriebenen Betonpumpe durchgeführt. Bei Ausfall dieser Pumpe (Stromausfall, Reinigungs- und Wartungsarbeiten, etc.) und zur Stopferbeseitigung im jeweiligen Leitungsabschnitt wird die dieselbetriebene Pumpe eingesetzt.

Die zum Transport des Versatzes erforderliche Rohrleitung, ausgelegt für einen Pumpendruck von 200bar, mit einem Durchmesser von 125mm und einer Wandstärke von 8,8mm ist im untertägigen Schrägstrecken-/Wendel-/Schachtsystem verbaut und hat eine Länge von ca. 2400m. Die zentrale Steuereinheit befindet sich im Container der Mischanlage. Von der zentralen Steuereinheit aus wird die Versatzpumpanlage in den einzelnen Ablaufphasen des Förderungsprozesses gesteuert und überwacht.

Über die gesamte Leitungslänge sind 6 Absperrschieber verteilt. Die Absperrschieber werden hydraulisch betätigt. Demzufolge ist jeder Absperrung ein Hydraulikaggregat zugeordnet (Antriebsleistung 4kW). Vor jeder Absperrung befindet sich ein Druckmessumformer. Sollte während des Pumpbetriebes einer der Druckmessumformer den maximalen Messdruck von 200bar erreichen, so schaltet die Betonpumpe ab.

Sonderbetonmischanlage

Die Anlage ist eine Sonderbetonmischanlage zur Herstellung von bindemittelhaltigem Mulden- bzw. Pumpversatz.

Es wird nicht nur Pumpversatz sondern auch sogenannter Muldenversatz (obere Abbaureviere) mit dieser Anlage erzeugt. Der Unterschied zum Pumpversatz liegt

darin, dass bei annähernd gleicher Rezeptur der Versatz annähernd erdfeucht hergestellt wird und mittels SLKW in den Bergbau verbracht wird.

Durch die Zugabe von Bindemittel, Luftporenmittel, Fließmittel und Wasser werden die Zuschlagstoffe so aufbereitet, dass ein geeignetes, pumpfähiges Versatzmaterial für den Bergbau hergestellt wird.

5.2.5 Spannungssituation im Bergbau Breitenau

Der Beurteilung des in-situ Spannungszustandes im beobachteten Gebirgsverband kommt großer Bedeutung zu, da zur Beurteilung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz der Ursprungszustand des Gebirges vor der Hohlraumerstellung und Verfüllung und die herrschenden Spannungen bekannt sein sollten, da die Stabilität der Hohlräume und des gesamten Abbaubereiches unmittelbar von den vorherrschenden Spannungen abhängt. Besonders im alpinen Bergbau mit seiner umfangreichen und komplexen tektonischen Vorgeschichte ist die Beurteilung des in-situ Spannungszustandes eine große Herausforderung. Da im beobachteten Bergbau keine Spannungsmessungen vorliegen, muss der in-situ Spannungszustand im Referenzbereich abgeschätzt werden. Das Abbaurevier VI, welches für in-situ Untersuchungen herangezogen wird, befindet sich in einer Teufe von 950m, wobei die Überlagerungshöhe für die Abschätzung der Vertikalspannungen auf Basis einer durchschnittlichen Dichte dient. Da die überlagernden Formationen zum Großteil aus Kalkstein und Schiefer aufgebaut sind, scheint eine mittlere Dichte von 2700kg/m^3 als realistisch, was zu Vertikalspannungen im unverritzten Gebirge von $25,6\text{MPa}$ führen würde. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich der Erzkörper unter der Bergflanke des Hochlantschs befindet, was die in-situ Spannungen beeinflusst. Zur genaueren Abschätzung der in-situ Spannungen wurde aus diesem Grund ein Geländemodell herangezogen, welches aus dem steirischen Geoinformationssystem entnommen wurde. Mit Hilfe der Software „Settle3D 3.0“ konnte aus dem Geländemodell unter der Auflast durch den Hochlantsch eine Spannungsverteilung berechnet werden, wobei eine Dichte der Gebirgsmassen von 2700kg/m^3 und eine Poissonzahl von 0,2 als Grundlage für die Berechnungen mit der Methode nach Westergaard dienten (Schinagl, 2017). Als Profil wurde ein Schnitt gewählt, welcher die Rechts- und Hochwerte der Kreuzung am westlichen Ende der Strecke 600H mit dem Gipfelpunkt des Hochlantsch verbindet (Abbildung 30 und Abbildung 31) (Schinagl, 2017).

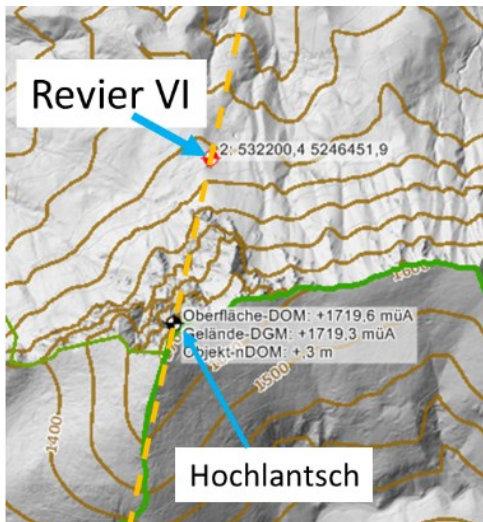


Abbildung 30: Position des Profils (Schinagl 2017, S.48)

Aus den durchgeführten Berechnungen geht hervor, dass sich die Vertikalspannungen im Referenzbereich auf 24MPa belaufen, was gleichzeitig als Hauptnormalspannung im beobachteten Abbauabschnitt betrachtet wird (Schinagl, 2017).

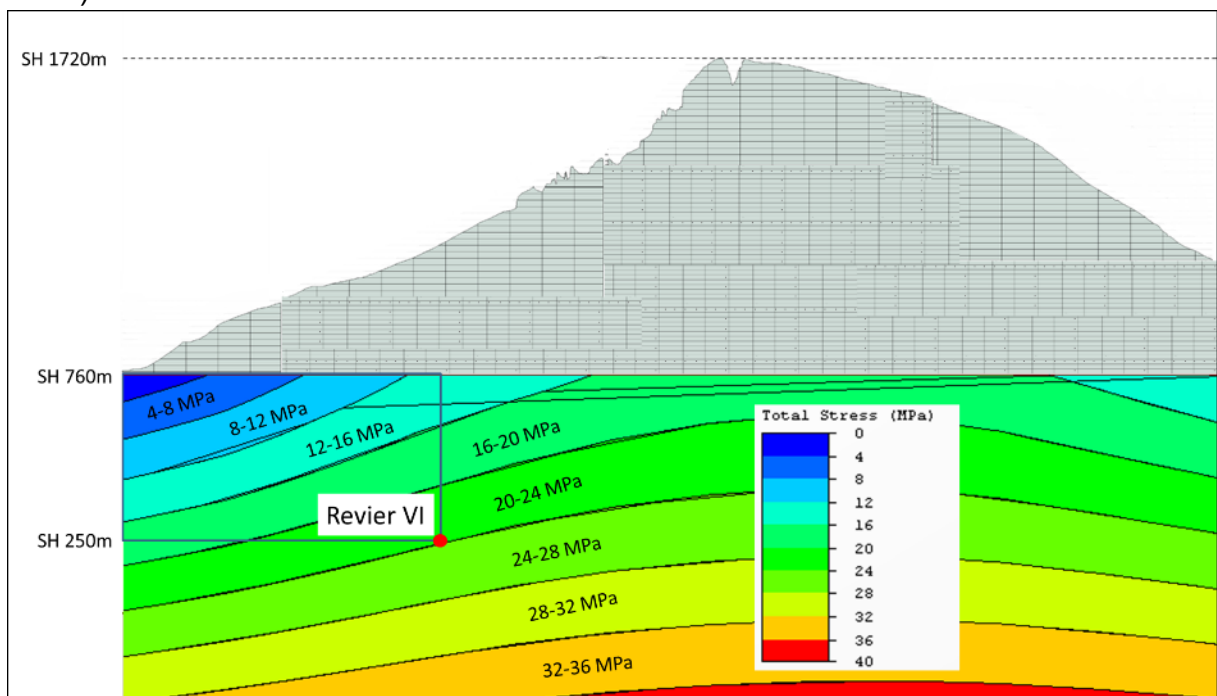


Abbildung 31: Topografisches Profil des Revier 6 mit den berechneten Spannungen (Schinagl 2017, S.49)

6 In-situ Untersuchungen an Gebirge und Versatz

Vorliegendes Kapitel dient der Beschreibung der Vorgehensweise bei den untertägigen Untersuchungen des Gebirges sowie des Versatzkörpers zum Zwecke der Analyse dieser zwei Elemente und deren Wechselwirkung. Aufbauend auf die Beschreibung der Methodik der Messungen werden in weiterer Folge die Beobachtungen der Untersuchungen präsentiert.

6.1 Gebirge

6.1.1 Fotografische Dokumentation, geologische Beschreibung und Gefügaufnahmen

In einem ersten Schritt wurden die ausgewählten Referenzbereiche sorgfältig aufgenommen und beschrieben. Hierbei wurde die gesamte Strecke 600H, die Kopfstrecken der Kammern 600E-600G und die querschlägigen Verbindungen zwischen der Strecke 600H und den Kammern dokumentiert.

Die Aufnahme der ausgewählten Referenzbereiche im Bergbau Breitenau wurde mit Hilfe von Gefügaufnahmen, geologischer und allgemeiner Beschreibung durchgeführt. Um die gewählten Abschnitte möglichst genau dokumentieren zu können, wurde der Gesamtbereich in Abschnitte unterteilt. Die Länge dieser Abschnitte wurde den jeweiligen Gegebenheiten angepasst und variiert zwischen 5 und 18m.

Während der Gefügaufnahmen wurden Abschnitt für Abschnitt die Hauptklufscharen und Großklüfte identifiziert und eingemessen.

Die geologische und allgemeine Beschreibung beinhaltet das Anfertigen einer Handskizze jedes Abschnittes und die Dokumentation jedes Abschnittes mittels Fotos und kurzer Beschreibung in Worten (Abbildung 32 und Abbildung 33).

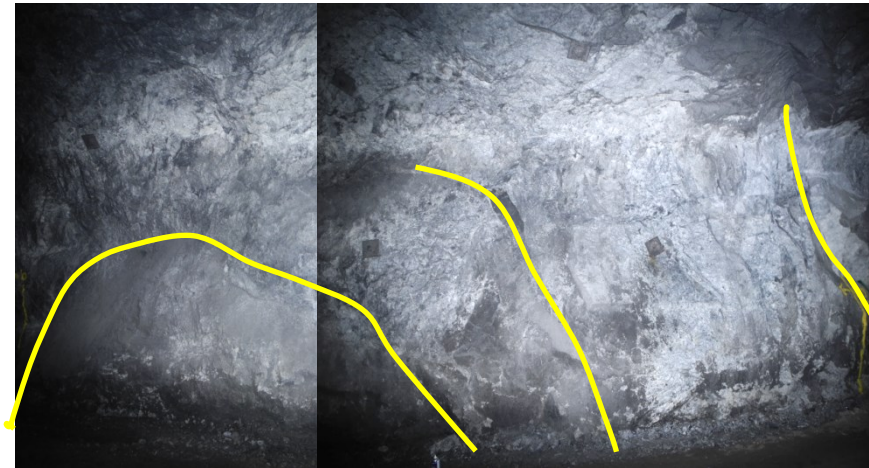


Abbildung 32: Fotodokumentation eines Abschnitts mit Andeutung der Haupt-Trennflächen

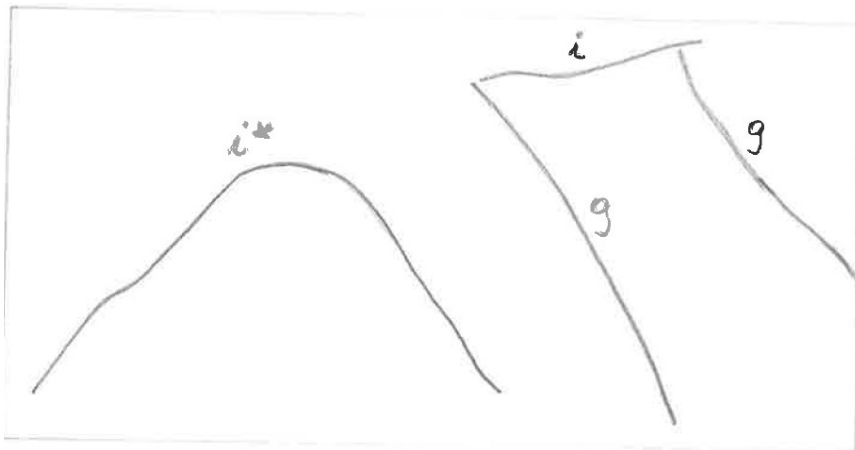


Abbildung 33: Handskizze des dazugehörigen Abschnitts (i...spannungsinduzierter Riss, g...geologisch bedingter Riss)

Bei den Handskizzen wurden Diskontinuitäten im jeweiligen Abschnitt vermerkt. Die Diskontinuitäten sollten auf Basis ihres Entstehungsursprunges in Gruppen eingeteilt werden. Hierbei wurde zwischen geologisch bedingten Trennflächen und spannungsinduzierten Trennflächen unterschieden. Bei den spannungsinduzierten Trennflächen wurde eine zusätzliche Unterscheidung zwischen Rissen parallel zur Streckenachse (Schalen, Platten, „spalling“), Rissen in geometrischer Abhängigkeit zur Auffahrung der Strecke und Zugrissen gemacht. Der Grund für die durchgeführte Unterteilung war es den ursprünglichen von Abbaueinflüssen nicht beeinträchtigten Zustand des Gebirges aufzunehmen und somit leichter zusätzlich entstehende Risse identifizieren zu können.

6.1.2 Kernbohrungen im Gebirge

Um weitere Informationen über die Bruchvorgänge im Gebirge, die Wechselwirkung zwischen Gebirge und Versatz und Proben zur Bestimmung der Gesteins- bzw. Gebirgseigenschaften im Labor zur Verfügung zu haben, wurden im Gebirge insgesamt 22 Kernbohrungen, genauer gesagt ca. 160 Bohrmeter erstellt. (Abbildung 34) Es wurden 10 Bohrungen in das südliche Auflager des Abbaufeldes (Auflagerfeste 600H) sowie 12 Kernbohrungen in Abbaufesten erstellt. Die Bohrungen in das Auflager wiesen jeweils eine Länge von 10m auf, die Bohrungen in die Abbaufesten eine Länge von ca. 6m, welche durch die Mächtigkeit der Abbaufesten von 7m limitiert war. Eine Kernbohrung im Abstand von 10m von der Strecke in das Auflager des Abbaufeldes erlaubt Aussagen über Brucherscheinungen unmittelbar um den Hohlraum sowie außerhalb des unmittelbaren Abbaueinflusses zu treffen, was von großer Bedeutung für die Beurteilung des Einflusses von Versatz auf die regionale Stabilität des Abbaufeldes ist.

Zur Erstellung der Kernbohrungen wurde ein Kernbohrgerät der Marke Sandvik (DE110) verwendet. Die erbohrten Kerne haben einen Durchmesser von 62mm (Abbildung 35).

In den Abbaukammern wurde jeweils vor Schwebengewinnung normal auf die Streckenachse von der Kopfstrecke der Kammern ausgehend ungefähr 1,2m über der Sohle horizontal in die Festen gebohrt. Der Grund hierfür war die Notwendigkeit der Einbringung der Extensometer vor den Produktionssprengungen, um die Bergfesten während des gesamten Abbauzyklus überwachen zu können. Zudem konnten die Festen somit vor Schwebengewinnung und nach der Verfüllung mittels Bohrlochkamera begutachtet werden.

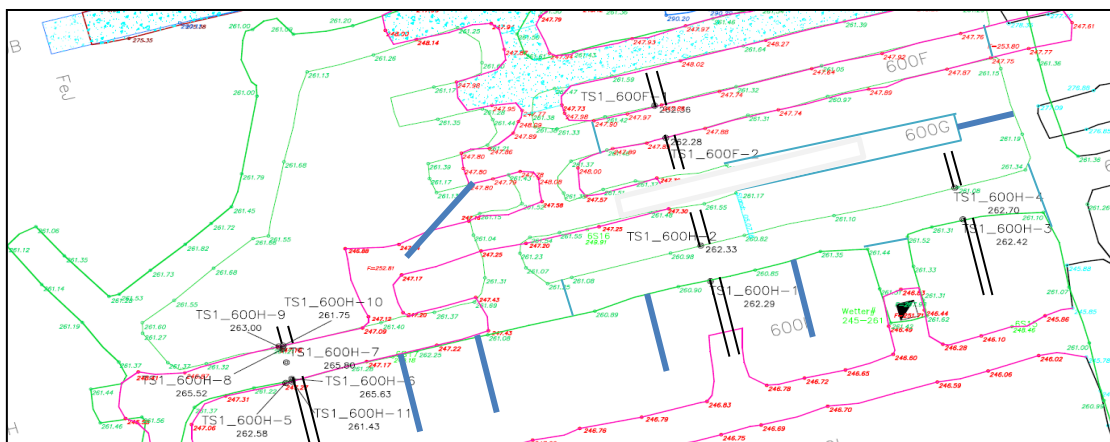


Abbildung 34: Übersicht über Kernbohrungen im Revier 6 Bergbau Breitenau



Abbildung 35: Kernbohrgerät Sandvik DE110

In dieser Arbeit wurden die so gewonnenen Bohrkern auf ihre mechanischen Eigenschaften (einaxiale Druckfestigkeit), Verformungseigenschaften (E-Modul und Poisson-Zahl) und auf ihren Zerlegungsgrad (RQD-Wert) untersucht.

Bestimmung der mechanischen Gesteinseigenschaften und des RQD-Wertes

Die einaxialen Druckversuche wurden laut ISRM-Norm anhand von den in-situ gebohrten Kernen durchgeführt (Abbildung 36). Es wurde versucht Proben von jedem Bohrmeter zu testen um ein möglichst vollständiges Bild über den mechanischen Gebirgszustand des betroffenen Abbaufeldes zu erhalten.



Abbildung 36: In der hydraulischen Prüfpresse eingespannte Probe

Alle Druckversuche wurden mit einem Durchmesser- zu Höhenverhältnis von ca. 62mm zu 124 mm (1:2) durchgeführt.

Ebenheit und Parallelität der Probenenden bestimmen das gemessene Last-Verformungsverhalten der Probe mit und beeinflussen damit auch die Festigkeit. Die Ebenheit wurde mittels Haarlineal im Gegenlicht qualitativ überprüft und die Probe gegebenenfalls nachgefräst. Der maximal zulässige Fehler betrug im Falle der Endflächenparallelität $0,25^\circ$; entsprechend 0,27 mm Höhendifferenz bei 62 mm Durchmesser. Da solche Abweichungen deutlich über den von der ISRM geforderten 0,10 mm (Brady und Brown, 2005) liegen, wurde bei allen Versuchen eine Kugelkalotte eingesetzt. Die hohe Abweichung bei der Endflächenparallelität bei gleichzeitig guter Oberflächenebenheit kann durch die nur mäßige Achsfluchtung der Probenfräse erklärt werden.

Die Belastungsgeschwindigkeit sollte laut ISRM-Kommission gleichförmig sein und zwischen 0.5 und 1 MPa/s liegen. Deutlich höhere Belastungsgeschwindigkeiten (z.B. 100 MPa/s) führen in der Regel zu leicht höheren Festigkeiten, aber auch zu verändertem Verformungsverhalten. (Brady und Brown, 2005)

Es wurden alle kraftgesteuerten Versuche mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 MPa/s durchgeführt.

Die Steuerung der Versuche erfolgte in der vorliegenden Arbeit zu etwa 90% kraftgesteuert und lediglich zu 10% aufgrund des höheren Aufwands umfangsdehnungsgesteuert. Letztere Fahrweise der Prüfpresse ermöglicht die Ermittlung des Verformungsverhaltens der Gesteinsprobe im Nachbruchbereich.

Aus den kraftgesteuerten Versuchen kann die einaxiale Druckfestigkeit ermittelt werden, und wenn Be- und Entlastungsschleifen durchgeführt werden, können Elastizitätsmodul und Verformungsmodul bestimmt werden. Mittels Extensometern wird die tatsächlich an der Probe auftretende Verformung gemessen, da die in der Prüfmaschine integrierte Wegmessung auch die Maschinenverformung mitberücksichtigt. Bei einer umfangsdehnungsgesteuerten Belastung kann auch der Nachbruchbereich mitaufgenommen werden, wodurch die Belastung auf Basis der lateralen Verformung der Probe angepasst wird. Somit kann auch das Verhalten unter Belastung im Nachbruchbereich, wie es häufig auch im Gebirge vorkommen kann, untersucht werden.

Die Bestimmung des RQD-Wertes dient der Einschätzung des Zerlegungsgrades des Gebirges. So können einerseits geologische Trennflächen und spannungsinduzierte Risse im Gebirge identifiziert werden und andererseits die an den Bohrkernen erkennbaren Risse mit den Bohrlochkameraaufnahmen verglichen werden. Diese Vergleiche bieten die Möglichkeit zu überprüfen, ob die Risse bereits bei der Erstellung des Bohrloches vorhanden waren oder im Laufe der Abbautätigkeiten entstanden sind. Anhand eines Bohrkernes wird exemplarisch die Vorgehensweise bei der Bestimmung des RQD-Werts erläutert.

In einem ersten Schritt wurden alle Bohrkern fotografisch dokumentiert:



Abbildung 37: Bohrkern aus der Strecke F – Bohrloch F-2 (Feste F)

Die Form und Größe der Bohrkern-Bruchstücke wurden in weiterer Folge in eine Vorlage eingetragen. Diese hat einem Foto gegenüber den Vorteil, natürliche von durch den Bohrvorgang verursachte Brüche unterscheiden zu können.

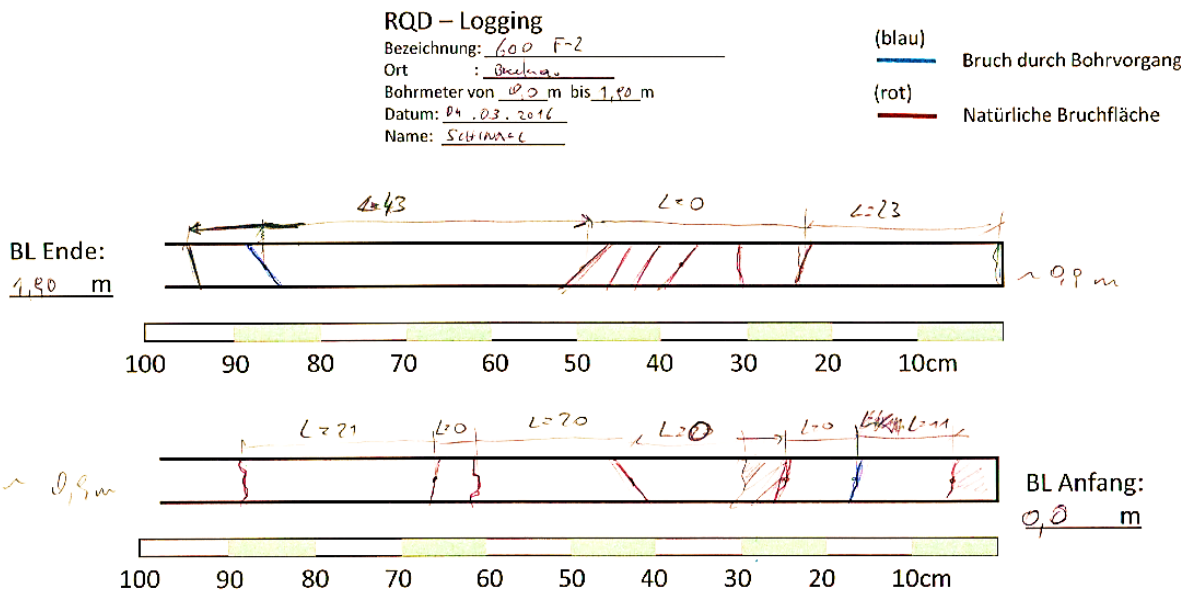


Abbildung 38: Ausgefüllte Vorlage zur Bohrkernokumentation

Die Längen der Bruchstücke wurden mittels Maßband an den Bohrkernen bestimmt und in die Vorlage eingetragen. Die Berechnung der RQD-Werte wurde für jeden Bohrkisten-Meter einzeln vorgenommen.

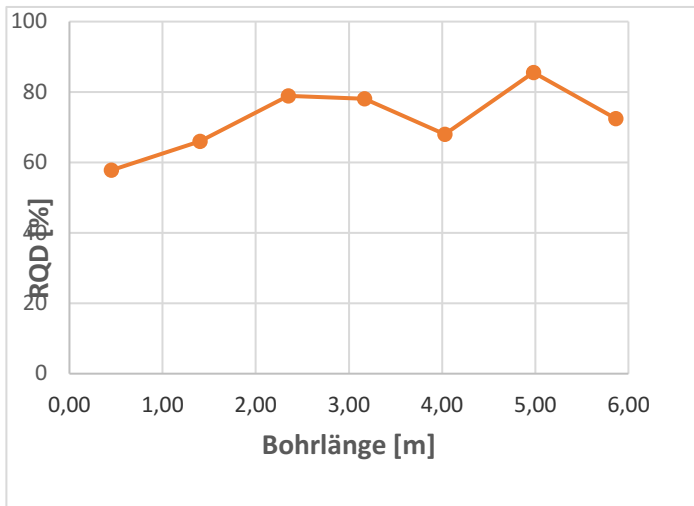


Abbildung 39: Verlauf RQD-Wert in Bohrloch F-2

In Abbildung 39 ist der RQD-Wert-Verlauf (Bestimmung RQD-Wert pro Meter) für das oben angeführte Bohrloch dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein rund 6m langes Bohrloch im unmittelbaren Abbaubereich (Feste 600E). Bei der Bestimmung des RQD-Werts pro Meter Bohrloch ist eine Zunahme des RQD-Wertes in Richtung Festen Kern ersichtlich. Die Auflockerungszonen nahe des Ulms werden einerseits durch die zuvor beschriebenen Sprengschäden, andererseits durch die Bildung von spannungsinduzierten Brucherscheinungen am Hohlraumrand hervorgerufen.

6.1.3 Extensometermessungen

Im Abbaurevier 6 im Bergbau Breitenau wurden auf Teilsohle 1 zur Beurteilung der Wechselwirkung zwischen Versatz und Gebirge in die bestehenden Kernbohrlöcher folgende Extensometer installiert:

- 12 Extensometern in Strecke 600H (3 3-fach Extensometer, 6 Einfach Extensometer, 3 2-fach Extensometer)
- 2 Extensometern in der Kopfstrecke der Kammer 600F

Bei den verwendeten Extensometern handelt es sich um Stangenextensometer der Firma Geodata (Abbildung 40 rechts). Unter Zuhilfenahme der Extensometer ist es möglich Bereiche zu identifizieren, wo Verformungen auftreten. Das Messprinzip erfolgt über ein Ankerstück, welches im Bohrloch tiefsten befestigt wird, sodass es jede Bewegung im Gebirge aufnehmen kann (Abbildung 40 links). Das Ankerteil ist mit der Messstange fest verbunden, welche die Bewegung zu einem Messanschlag im Messkopf überträgt, welcher am Bohrlochmund befestigt wird. Indem der Abstand zwischen dem Messkopf und dem Messanschlag gemessen wird, kann zu jedem Zeitpunkt die relative Bewegung zwischen dem Anker und dem Bohrlochmund aufgenommen werden (Geodata Group, 2008). Es kann jedoch nicht eindeutig festgestellt werden, ob sich das den Hohlraum umgebende Gebirge Richtung Hohlraum bewegt, oder ob sich der im Bohrloch tiefsten fixierte Anker vom Hohlraum wegbewegt. Letzteres ist bei

Messungen in einer mächtigen Auflagerfeste oder im massiven Gebirgsverband höchst unwahrscheinlich, kann es doch bei Messungen in Abbaufesten, welche an beiden Ulmenseiten freistehen, auftreten. Dies sollte bei der Interpretation der Messergebnisse berücksichtigt werden. Die Relativbewegung wurde im vorliegenden Fall mittels Handmessgerät in regelmäßigen Abständen, insbesondere vor und nach Sprengtätigkeiten und Verfüllung, gemessen. Eine weitere Möglichkeit wäre die Installation eines Datenloggers, welcher die Verschiebungen permanent misst. Da ein Teil der mit Extensometern ausgestatteten Kopfstrecken aufgrund von betriebsinternen Entscheidungen nachträglich verfüllt wurden, wurden die betroffenen Extensometer mit elektronischen Weggebern ausgestattet um lateralen Verformungen selbst nach Verfüllung beobachten zu können.

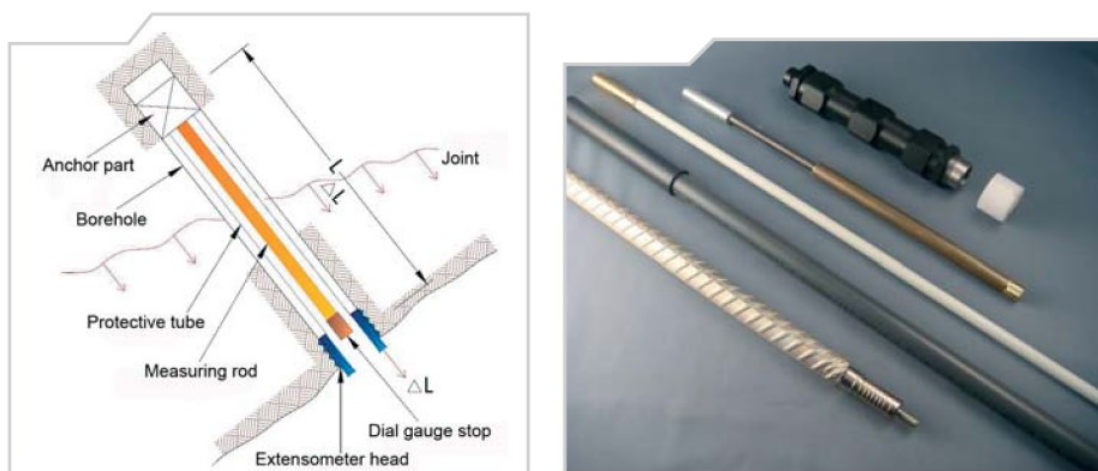


Abbildung 40: Messprinzip der verwendeten Stangenextensometer (links) und exemplarische Darstellung eines Stangenextensometers (rechts) (Geodata Group, 2008)

Die 3-fach Extensometer wurden ausschließlich in die Auflagerfeste 600H mit den Messlängen 9, 5,5 und 3m eingebracht. Bei den 2-fach Extensometern wurden die Messlängen 5,5 und 3m gewählt, wobei 1 2-fach Extensometer je in die Festen 600E und 600F, 2 2-fach Extensometer in die Abbaufeste 600G und ein 2-fach Extensometer in die Auflagerfeste 600H eingebracht wurden. Die Einfach Extensometer (Messlänge 3m) wurden um den Streckenquerschnitt 600H angeordnet um das Bruchverhalten des Gebirges in unmittelbarer Streckenumgebung zu beobachten.

Weiters wurden die gesammelten Ergebnisse um Extensometermessungen erweitert, die in den Festen 600A (Abbau und Versatz 2011) und 600B (Abbau und Versatz 2012) durchgeführt wurden (Abbildung 41). Diese Messungen bieten die außergewöhnliche Möglichkeit den Datensatz für die Interpretation der Ergebnisse zu erweitern und zusätzliche Erkenntnisse über die Wechselwirkung zwischen Gebirge und Versatz zu erhalten.

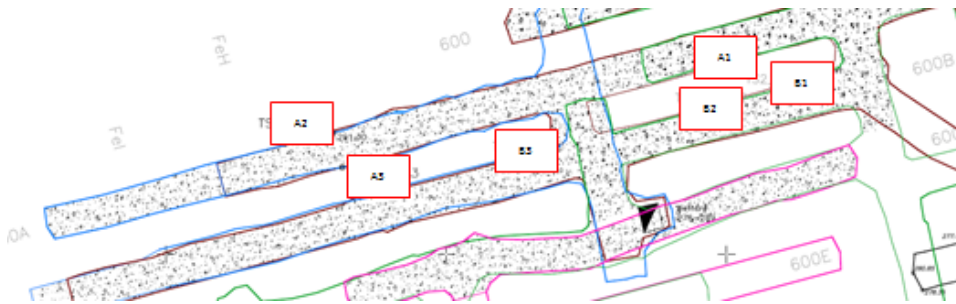


Abbildung 41: Extensometermessungen in Kammer 600A und 600B (nördlich des definierten Referenzbereiches)

In Abbildung 42 ist ein Grundriss des Reviers 6 (Teilsohle 1 und Teilsohle 2) dargestellt, worauf die Positionen der installierten Extensometer (rote Linien) und die erstellten Kernbohrungen (schwarze Linien) ersichtlich sind.

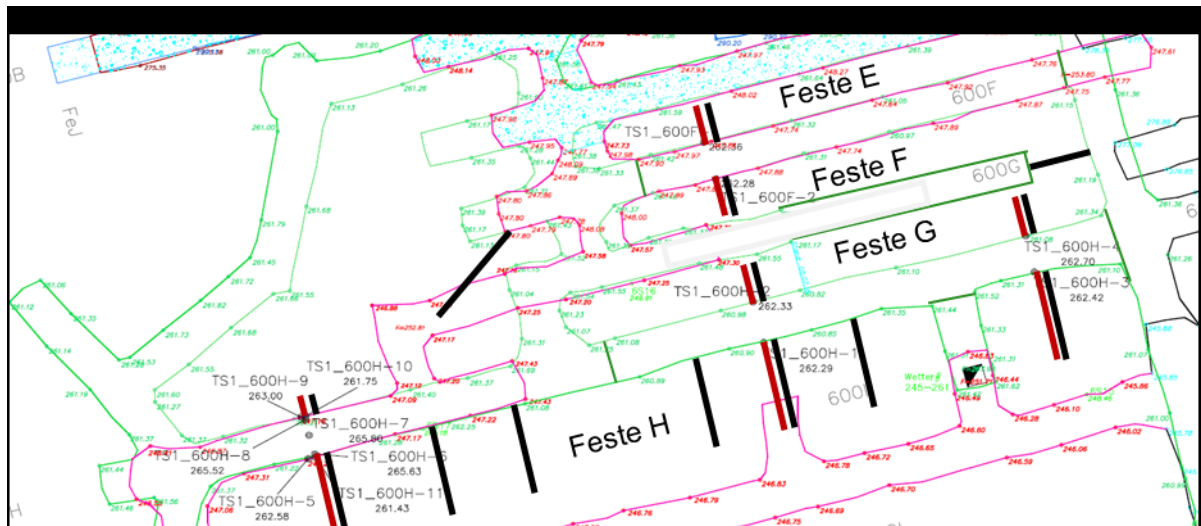


Abbildung 42: Überblick über Extensometermessungen und Kernbohrungen (Schematische Darstellung)

Im Westen der Strecke 600H wurden zur genauen Beobachtung der Bruchvorgänge in Zusammenhang mit der Versatzeinbringung insgesamt 7 Extensometer um den Streckenquerschnitt 600H wie folgt angeordnet:

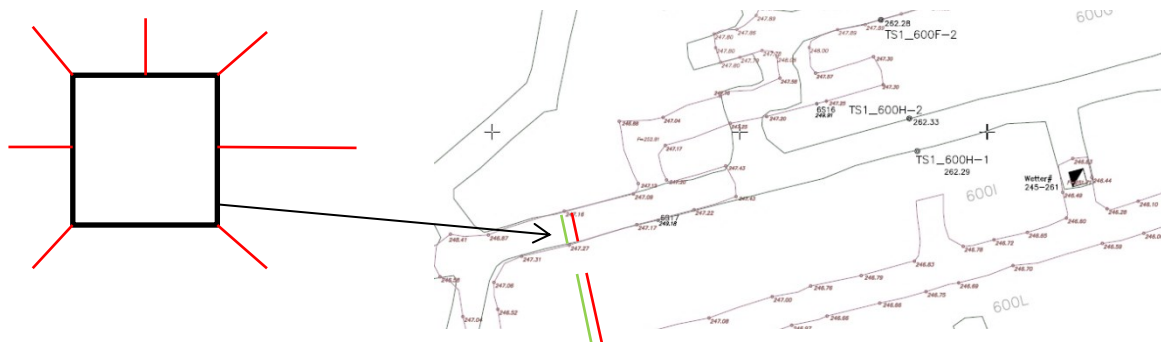


Abbildung 43: Anordnung der Extensometer um den Streckenquerschnitt 600H (links) und Position dieser Extensometer im Revier 6 (rechts)

In Richtung der Auflagerfeste 600H/I wurde horizontal ein 3-fach-Extensometer ($L_1=9\text{m}$, $L_2=5\text{m}$ und $L_3=3\text{m}$) eingebracht. Die restlichen 6 Extensometer sind einfache Extensometer mit einer Messlänge von 3m.

Nach der Diskussion der Untersuchungen des Gebirges wird in den folgenden Abschnitten auf die Messungen im Versatz eingegangen.

6.2 Versatz

6.2.1 Kernbohrungen im Versatzkörper

Kernbohrungen im Versatzkörper ermöglichen die Feststellung der in-situ Versatzeigenschaften sowie die Überprüfung der Festigkeitsentwicklung des Versatzes. Die Bohrungen wurden, wie die Kernbohrungen im Gebirge, mit einer Kernbohrmaschine der Firma Sandvik (DE110) durchgeführt. Im Vergleich zum Gebirge wurde hier jedoch mit einem größeren Bohrkern Durchmesser (90mm) gebohrt. Insgesamt wurden drei Kernbohrungen, jeweils eine vertikale Bohrung in die Versatzkörper der Kammern 600C, 600E und 600F gebohrt. Die Bohrung in der Kammer 600E weist aufgrund von Problemen während der Bohrarbeit lediglich 3m auf, wohingegen die anderen zwei Bohrungen ca. 10m in den Versatzkörper abgeteuft wurden. Die Lage der Kernbohrungen ist als schwarze Ringe in Abbildung 44 ersichtlich.

nur unter großer Anstrengung wieder aus dem Bohrloch gezogen werden kann.

- Lagerung
 - Nachdem die Kerne ausgebohrt worden sind, werden sie bis zur Dokumentation und Probenahme im Labor in verschließbaren Plastikrohren gelagert um möglichst die in-situ Eigenschaften zu erhalten und ein Austrocknen der Proben zu verhindern.
- Probenahme
 - Standardmäßiges Fotografieren der Bohrkerne und Erfassen der Bohrkernlängen.
 - Auswahl von einer Probe pro Bohrmeter (Ausbringen abhängig von Versatzkörperbeschaffenheit)
 - Probenlänge: 2,5 Mal Durchmesser
 - Planparalleles Fräsen der Endflächen gestaltet sich schwierig und kann zu Ausbrüchen an den Kanten der Endflächen führen.
 - Kürzen auf 2 Mal Durchmesser
 - Wassergehaltsbestimmung erfolgt durch Wiegen und anschließender Lagerung im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz.

Im Bergbau Breitenau werden wie bereits beschrieben verschiedene Versatzmischungen verwendet (Rezept 1-4 und Rezept 3), wobei sich nur Rezeptur 3 aufgrund der Versatzkörperbeschaffenheit für Kernbohrungen eignet.

Die Kerne mit einem Durchmesser von 90mm werden in weiterer Folge auf ihre einaxiale Druckfestigkeit und ihre Verformungseigenschaften im Labor untersucht.

6.2.2 Bestimmung der mechanischen Versatzeigenschaften

Um die Wechselwirkung von Gebirge und Versatz beschreiben zu können ist es einerseits wichtig, die in-situ Gebirgseigenschaften festzustellen und andererseits die in-situ Eigenschaften des Versatzkörpers zu bestimmen. Insbesondere bei bindemittelverfestigten Versatzmaterialien spielt die regelmäßige vor Ort Probenahme eine große Rolle da die Festigkeitsentwicklung aufgrund des hohen Wasser/Bindemittelverhältnisses bei Versatzmischungen über einen längeren Zeitraum stattfindet als bei Beton. Die folgenden Abbildungen zeigen die gebohrten Bohrkerne aus dem Versatzkörper der Kammer 600C, welche bis zur Prüfung wie zuvor beschrieben in Plastikrohren gelagert wurden. Abbildung 48 zeigt den Übergang zwischen den zwei Versatzrezepturen und macht deutlich, dass aus der „roten Mischung“ (Rezeptur 1-4) keine Proben für einaxiale Druckversuche gewonnen werden können.

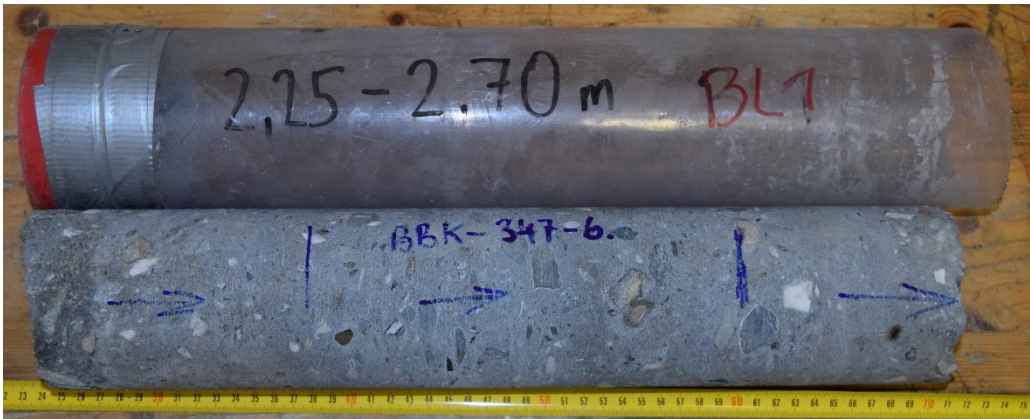


Abbildung 45: Bohrkern aus Kammer 600C, Rezeptur 3



Abbildung 46: Kerne aus der Kammer C



Abbildung 47: Probe 347-6 vor und nach dem Zuschnitt (Kammer C)



Abbildung 48: Grenze zwischen Filterkuchen und Versatz

Die einaxiale Druckfestigkeit UCS wurde wie bei den Gesteinsproben laut ISRM-Norm mit der im Labortechnikum für Bergbaukunde vorhandenen Prüfpresse durchgeführt. Aufgrund der geringeren Festigkeiten der Versatzproben wurde hier jedoch die Belastung mit einer andere Kraftmessdose (250kN) aufgebracht. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug bei allen Versuchen wie von der Norm empfohlen 0,5 MPa/s. Der mittlere E-Modul aller Versatzproben (exkl. Roter Filterkuchen) liegt in etwa zwischen 7 und 10 GPa. Es wurde hierbei nur die Belastungskurve berücksichtigt, da das Nachbruchverhalten der Proben nicht mit aufgenommen werden konnte. Die obere Grenze der Belastungskurve wurde je nach zu erwartender Druckfestigkeit eingestellt.

Der Versatz besteht in beiden Kammern aus Lagen verschiedener Pumpversatzarten. Tests konnten nur am „grauen Versatz“ (Rezeptur 3) durchgeführt werden, während der „rote Filterkuchen“ (Rezeptur 1-4) keine messbare Festigkeit entwickelt und bereits beim Bohren so stark beeinträchtigt wurde, dass Druckversuche nicht möglich waren. Folgendes Profil zeigt den Verlauf der gemessenen einaxialen Druckfestigkeiten und E-Moduli, wobei der grau dargestellte Bereich die Rezeptur 3 und der gelb markierte Bereich die Rezeptur 1-4 darstellt. In den mit Rezeptur 1-4 verfüllten Bereichen wird in nachfolgender Abbildung die einaxiale Druckfestigkeit mit 0 angenommen, da es nicht möglich war aus diesem Versatzmaterial aufgrund mangelnder Festigkeit Proben für einaxiale Druckversuche herzustellen. Die Festigkeit der Rezeptur 1-4 ist nicht zwangsläufig null, jedoch ist sie zu gering um mit der vorhandenen Messinfrastruktur festgestellt zu werden, weswegen sie in der nachfolgenden Abbildung mit 0 angenommen wird.

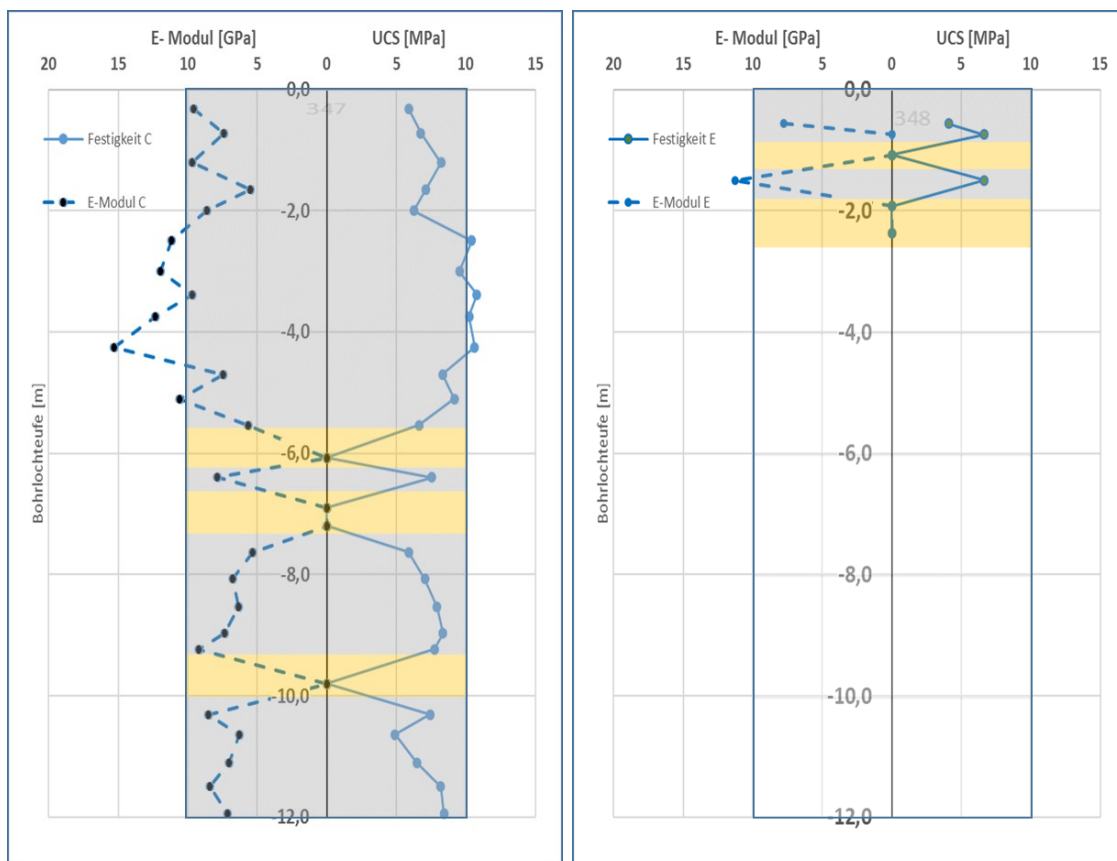


Abbildung 49: Versatzprofil anhand der Bohrung, Vergleich der Festigkeiten und E-Modul (Kammer C links, Kammer E rechts)

6.2.3 Spannungsmessungen im Versatzkörper

Um den Einfluss von Versatz sowohl auf die Bruchvorgänge im Gebirge als auch auf das gebrochene Gebirgsmaterial beurteilen zu können, ist Information über den Druckaufbau im Versatzkörper erforderlich. Der Aufbau der Horizontalspannungen ist von besonderer Bedeutung, da er mit der lateralen Festendeformation in Verbindung gebracht werden kann. Auch die Messung der vertikalen Spannungen im Versatzkörper kann herangezogen werden um zu überprüfen, ob die gemessenen Spannungen dem Gewicht des überlagernden Versatzmaterials entsprechen oder darüber hinausgehen. Dies ist ebenfalls für die Beurteilung von Auflockerungserscheinungen in den Festen bzw. über dem Abbauhohlraum von Bedeutung. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit insgesamt drei Druckmessrahmen zum Zwecke von Spannungsmessungen in drei orthogonalen Raumrichtungen in den Versatzkörpern der Kammern 600E, 600F und 600G eingebracht. Die Rahmen wurden alle wie in Abbildung 41 ersichtlich in der Messlinie der Extensometermessungen in den Festen positioniert. Somit sollte ein Zusammenhang zwischen Festenverformungen und Druckaufbau im Versatzkörper hergestellt werden. Von Interesse ist hier auch der Aufbau der Spannung im Versatzkörper bezogen auf die Verfestigung des Versatzmaterials, sowie der Einfluss der fortschreitenden benachbarten Abbauaktivitäten auf die Entwicklung der Spannungen im Versatzkörper.

Für die Versatzdruckmessungen wurden 3 Spannungsmesszellen, so genannte „Flat jacks“ auf einem Messrahmen aus Stahl befestigt (Abbildung 50). Im vorliegenden Fall handelt es sich um elektrische Spannungsaufnehmer mit hydraulischem Druckkissen und Drucksensor der Firma Glözl Baumesstechnik, welche normalerweise zur Messung von Erddruck, Schalungsdruck, Beton- und Fugendruck verwendet werden, sich jedoch ebenfalls ausgezeichnet zur Messung von Spannungen im Versatzkörper eignen. In einem Druckkissen, das an einen elektrischen Aufnehmer angeschlossen ist, befindet sich im geschlossenen System eine Hydraulikflüssigkeit. Bei Belastung des Druckkissens wird der entstehende Hydraulikdruck auf die Membrane des elektrischen Aufnehmers übertragen und in eine Spannung proportional zur Belastung gewandelt (Glözl Baumesstechnik, 2014). Die Anzahl der Messzellen ergibt sich aus den 3 Richtungen der Versatzspannung, 2 Messzellen in horizontaler Richtung (parallel zur Feste und normal zur Feste) und eine Messzelle auf der Oberseite des Messrahmens zur Ermittlung der vertikalen Versatzspannung. Die Messung des Versatzdruckes erfolgt über ein Handmessgerät.



Abbildung 50: Versatzdruckmessrahmen

Der Rahmen wird während der Verfüllung in die Abbaukammer eingebracht. Wenn möglich, wird der Rahmen auf dem Versatzmaterial (nachdem ein gewisser Bereich bereits verfüllt ist) befestigt um Einspannungseffekte durch das Gebirge zu reduzieren. In den Fällen, wo dies aus bergtechnischen und sicherheitlichen Gründen nicht möglich ist, werden die Messrahmen auf Betonwürfeln befestigt und horizontalisiert und mittels ferngesteuerten Radladers in der Kammer positioniert. In weiterer Folge wird die Kammer dann planmäßig verfüllt, wobei, wenn möglich, der Versatzdruck bereits während der Verfüllung mit aufgenommen wird. Voraussetzung für eine zuverlässige Messung der Spannungen ist eine vollständige Einbettung der Druckmesskissen im Versatzkörper. Aus diesem Grund wurde der Druckmessrahmen derart konstruiert, sodass er während des Pumpvorganges von allen Seiten mit Versatz umspült werden konnte.

Die Befestigung des Rahmens auf dem Versatzkörper bzw. auf dem Betonwürfel erfolgte mittels Gewindestangen und Kleber im Versatzkörper bzw. Beton. Die Position des Rahmens wurde auf Höhe der Extensometer in der Strecke 600H gewählt (Abbildung 51 links), um in diesem Bereich ein möglichst vollständiges Bild über die Gebirgsbewegungen und Bruchvorgänge in Abhängigkeit der Verfüllung zu erhalten. Bei der Ausrichtung des Rahmens wurde darauf geachtet, dass eine Messzelle zur Messung des horizontalen Versatzdruckes parallel zur Kammer-Längsachse ausgerichtet ist.

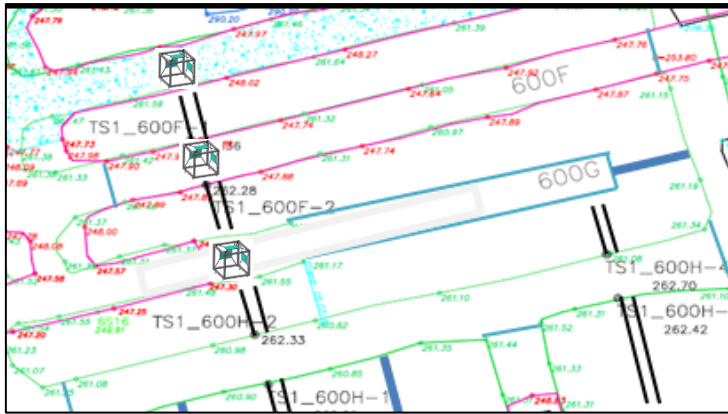


Abbildung 51: Position der eingebrachten Druckmessrahmen im Abbaufeld (links) und eingebrachter Rahmen (rechts)

Ein Druckanstieg im Versatzkörper kann einerseits als Reaktionsspannung auf Gebirgsverformungen oder durch zusätzliche Auflast (wie beispielsweise durch Herausbrechen von Gesteinsfragmenten) entstehen. Die Beobachtungen aus den untertägig gemachten Aufnahmen im Gebirge und im Versatz werden nun im folgenden Kapitel zusammengefasst, erläutert und besprochen und dienen in weiterer Folge als Grundlage zur Erstellung von Modellen zur Beschreibung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz.

6.3 Beobachtungen aus untertägigen Messungen

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Messungen und Untersuchungen wurden zum Zwecke der Untersuchung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz über eine Laufzeit von drei Jahren im Revier VI des Bergbau Breitenau durchgeführt. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die Beobachtungen, welche anhand der Messungen am Gebirge gemacht wurden, besprochen. Der zweite Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit den Beobachtungen am Versatzkörper, wobei hier Analysen des Versatzmaterials und Druckmessungen im Versatzkörper besprochen werden. Hier soll auch erwähnt werden, dass das vorliegende Kapitel lediglich die Ergebnisse der Messungen und Beobachtungen aufzeigen soll und der Auswertung der gewonnenen Daten dient, jedoch keinerlei Interpretation der Ergebnisse beinhaltet. Die separate Diskussion der Beobachtungen für Gebirge und Versatz soll gemeinsam mit den Ergebnissen der Laborversuche in weiterer Folge als Grundlage für die Analyse und Interpretation der Ergebnisse sowie der Modellbildung bezüglich der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz dienen, welche in Kapitel 8 erläutert wird.

6.3.1 Gebirge

Im Folgenden sind die Beobachtungen dargestellt, die im Rahmen der Untersuchungen in den jeweiligen Referenzbereichen festgestellt wurden.

Zum Zwecke der Aufnahmen wurden die jeweiligen Strecken in Abschnitte (ungefähr 10m Länge, je nach lokalen Gegebenheiten) eingeteilt und das Gebirge somit abschnittsweise analysiert. Für eine vollständige Gebirgscharakterisierung sind sowohl visuelle Beobachtungen als auch Information von Bohrlöchern und Bohrkernen erforderlich. Aufgrund der tektonischen Vorgeschichte der Ostalpen weist das Gebirge im Bergbau Breitenau eine große Anzahl an Trennflächen auf, was sich in einer starken Schwankung bezüglich der Gebirgs- und Gesteinseigenschaften niederschlägt. Somit werden nur jene Abschnitte in Betracht gezogen, in denen auch Kernbohrungen durchgeführt wurden, welche für einen gewissen Homogenbereich (mehrere Abschnitte) repräsentativ sind. So kann sichergestellt werden, dass sich die erhaltenen Resultate in den jeweiligen Abschnitten auf die tatsächlich aufgenommenen und gemessenen Gesteinseigenschaften beziehen und die Ergebnisse nicht aufgrund verwendeter Durchschnittswerte verfälscht wurden.

Feste 600E

Für die Beobachtungen der Feste 600E stehen die Informationen aus einer Extensometermessung (5,5m und 3m Messlänge) und einer Kernbohrung zur Verfügung.

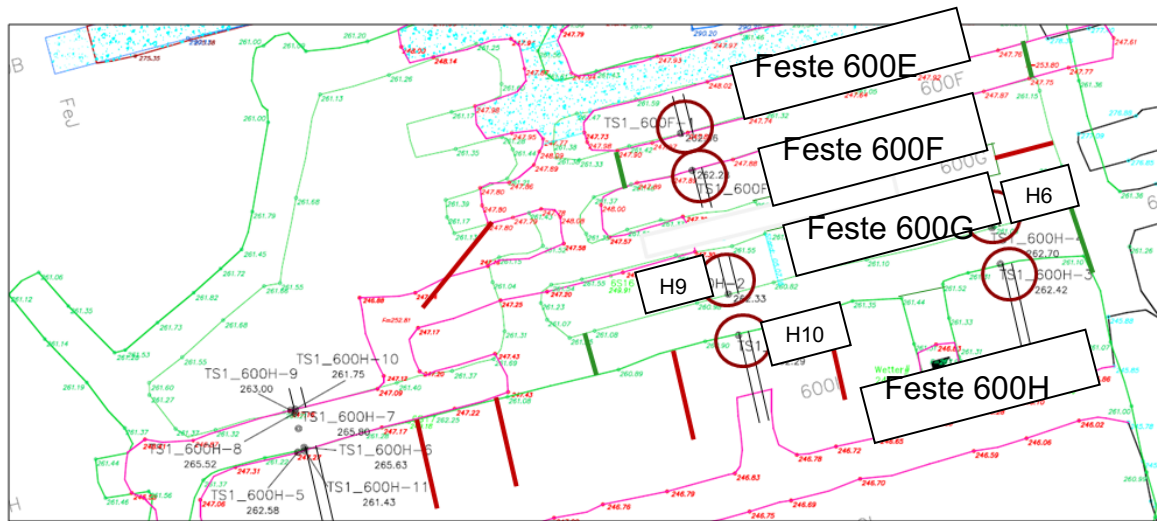


Abbildung 52: Grubenplan Bergbau Breitenau inklusive durchgeführter Kernbohrungen und Extensometermessungen

Das folgende Diagramm (Abbildung 53) zeigt die Ergebnisse der Extensometermessungen in der Feste 600E. Insgesamt konnte über die gesamte Festenbreite eine Gesamt-Querverformung von nahezu 120mm beobachtet werden. Aufgrund der großen Querverformung versagte der 3m-Extensometer-Messkopf, weswegen nur noch auf die Messungen des 5,5m-Messkopfes zurückgegriffen werden kann. Zusätzlich zu den Extensometermessungen zeigt das Diagramm die Abbau- bzw. Verfülltätigkeiten. Auffällig ist hier die große Anzahl an „Sprengungen 600G“. Hier ist anzumerken, dass im Falle der Kammer 600G sowohl Streckenvortriebs- als auch Gewinnungssprengungen aufgezeichnet wurden, welche, wie aus dem Diagramm ersichtlich, auch schon während der Verfüllung der Kammer 600F erfolgten. Der Unterschied bei Streckenvortriebssprengungen im Vergleich zu Gewinnungssprengungen besteht darin, dass im Falle ersterer ein kürzerer Abschlag unter großer Einspannung erfolgt. Im Falle von Gewinnungssprengungen wird die Restschwebe nach Erstellung der Kopf- und Fußstrecke im Rückbau durch vertikale Bohrlöcher gewonnen, wobei somit ein Stützelement abgebaut wird, was einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität der Festen hat. Im Fall der anderen Kammern sind nur die Gewinnungssprengungen dargestellt. Die Verfüllung der Kammer 600E erfolgte vor Extensometereinbringung, wobei die Verfüllung der benachbarten Kammer im Süden der Feste E, nämlich 600F, nach Extensometereinbringung erfolgte. Da die Extensometer von der Kammer 600F aus in die Feste 600E eingebracht wurden, konnten während des Offenstehens der Kammer 600F keine Messungen durchgeführt werden (in Abbildung 53 als strichlierte Linien dargestellt). Erst nach Beendigung der Verfüllung der Kammer konnten die

Messungen fortgesetzt werden. Es wurde beobachtet, dass sich während der Verfülltätigkeiten, die sich bei der Kammer 600F aufgrund einiger Probleme beim Füllvorgang über 3 Monate erstreckten, Querverformungen der Feste von über 90 mm ergaben. Nach Beendigung der Verfüllung verlangsamten sich die Querverformungen der Feste, die nach zusätzlicher Verfüllung der Kopfstrecke der Kammer 600F (vollständige Verfüllung der gesamten Kammer) nahezu zum Stillstand kamen.

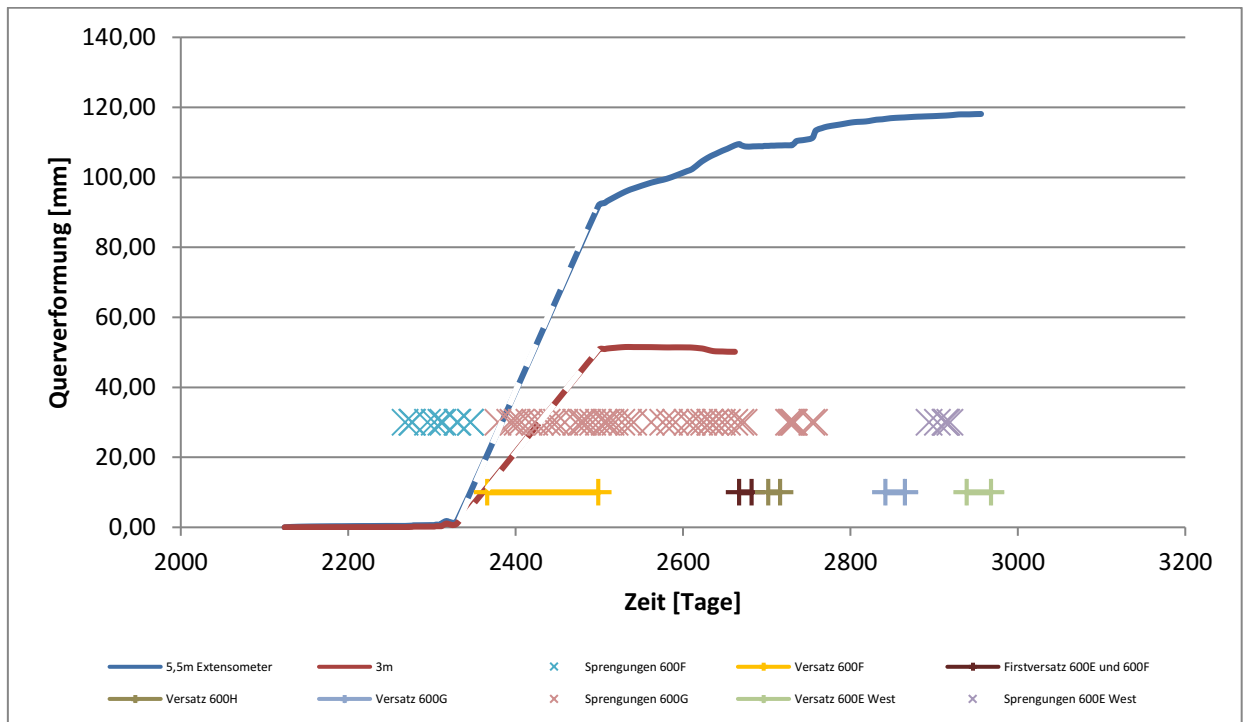


Abbildung 53: Extensometermessung Feste 600E

Die Bohrlochkameraaufnahmen zeigten entlang des beobachteten Bohrloches in der Feste 600E 8 markante Risse. Bei 4,4m (ausgehend von der Strecke 600F) wurden ein vertikaler Bohrlochversatz um ca. die Hälfte des Bohrloches (ca. 35mm) und Ausbrüche in der Firste des Bohrloches festgestellt. Insgesamt konnten ca. 85mm der zum damaligen Zeitpunkt gemessenen 100mm Gesamtverformung (aus Aufnahmen abgeschätzt) beobachtet werden. Die folgende Abbildung zeigt den Bohrlochversatz bei 4,4m. Exemplarisch wird weiters ein markanter Riss bei ca. 2m Abstand der Strecke 600F dargestellt (Öffnung abgeschätzt 15mm)

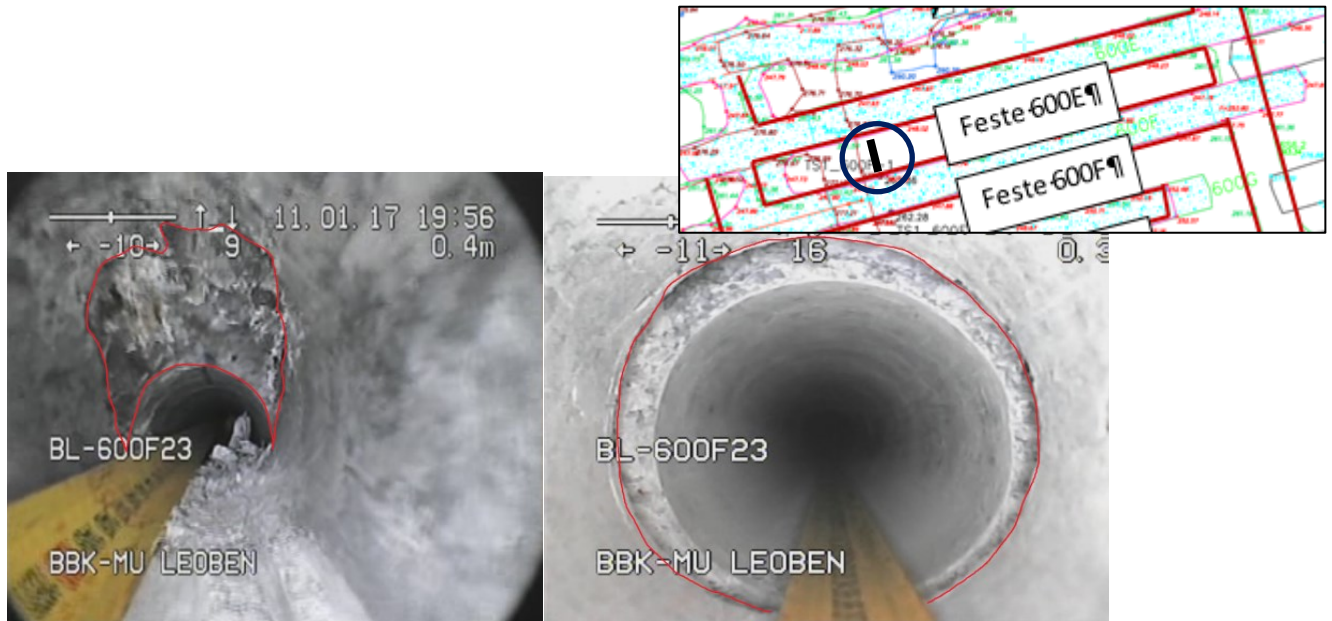


Abbildung 54: Bohrlochkameraaufnahmen Feste 600E

Feste 600F

Auch zur Beurteilung der Feste 600F wurden die beschriebenen Gebirgsaufnahmen gemacht. Für die Feste F steht eine Extensometermessung mittels 2-fach Extensometer (5,5m und 3m Messlänge) zur Verfügung. Weiters stand ein Bohrloch zur Beobachtung zur Verfügung.

Im Laufe der Abbau- und Verfülltätigkeiten hat sich die Feste 600F insgesamt um 90mm verformt, dh. um 30mm weniger als die Feste 600E. Während der Verfüllung der Kammer 600F (gelbe Markierung in Abbildung 55) konnten auch hier keine Messungen durchgeführt werden (strichlierte Linien), da die Extensometer von der Kammer 600F ausgehend in die Feste 600F eingebracht wurden. Die Extensometermessungen zeigen nach Verfüllung der Kammer 600F eine Beruhigung in der Querverformung der Feste, insbesondere unmittelbar um den Hohlraum. Durch die Auffahrung der benachbarten Kopfstrecke und Kammer 600G kam es zu zusätzlichen Verschiebungen in der Feste 600F, welche sich auf zusätzliche 40mm belaufen. Nach Verfüllung der Kammer 600G (benachbarte Kammer der Feste 600F südlich) beruhigten sich die Bewegungen erneut und kamen in weiterer Folge nahezu zum Stillstand. Auch die Sprengungen im Westen des Abbaufeldes in der Kammer 600E West hatten keinen merkbaren Einfluss auf die Querverformung in der beobachteten Feste.

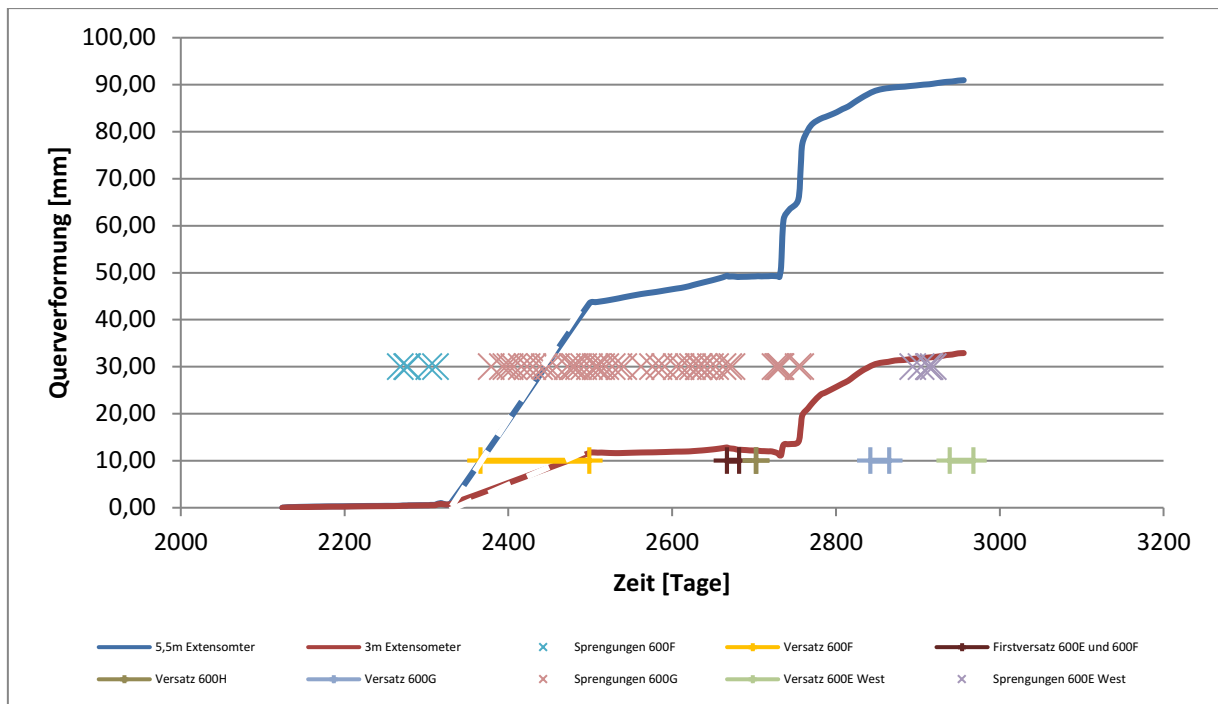


Abbildung 55: Extensometermessungen Feste 600F

Die Aufnahmen mittels Bohrlochkamera zeigen auch in der Feste 600F einen Versatz im Bohrloch um mehr als die Hälfte des Bohrloches bei 4,4m Abstand von der Strecke 600F, sowie Brucherscheinungen (Abbildung 56 links). Dies bedeutet bei einer 7m Meter mächtigen Feste, dass sich die den Bohrlochversatz verursachende Trennfläche in der Nähe des Festenkerns befindet. Die zweite Darstellung (Abbildung 56 rechts) zeigt das Bohrloch bei 2m Abstand der Strecke 600F, dh. in unmittelbarer Hohlräumnähe. Wie in Abbildung 56 rechts ersichtlich, zeigt sich das Bohrloch an dieser Position als sehr kompakt. Das Bild wurde zur besseren Analyse gedreht, da das im Bild erkennbare Maßband auf der Bohrlochsohle aufliegt und diese somit kennzeichnet. Von den zum Zeitpunkt der Aufnahme gemessenen 58mm Gesamtverformung können anhand der Bohrlöchaufnahmen ungefähr 54mm Öffnung entlang von Rissen abgeschätzt wurden.

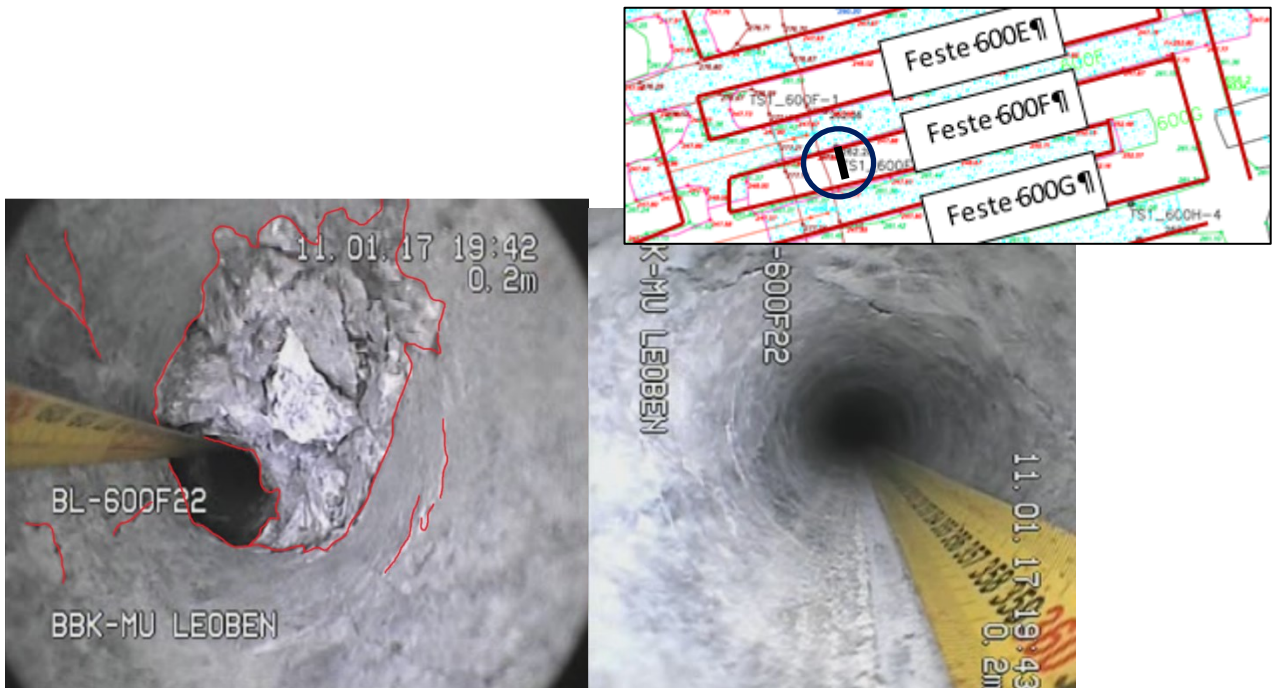


Abbildung 56: Bohrlochkameraaufnahmen Feste 600F

Feste 600G

Zur Untersuchung des Zustandes der Feste 600G (zwischen Kammer 600G und Strecke 600H) standen zwei Zweifach-Extensometer (Messlängen 5,5m und 3m), sowie zwei Kernbohrlöcher zur Verfügung. Grundsätzlich zeigt die Feste 600G sehr hohe RQD-Werte („sehr gute“ Gebirgsbeurteilung). Hier ist anzumerken, dass die Bohrkerne, anhand welcher die RQD-Wert-Aufnahme erfolgte, gebohrt wurden als die Feste 600G noch nicht im unmittelbaren Einfluss der benachbarten Abbauaktivitäten standen.

Bei dem Zweifach-Extensometer stehen für die Beurteilung des Festenzustandes lediglich Daten aus dem 3m Messkopf zur Verfügung, da aufgrund von Vortriebssprengungen in der benachbarten Strecke 600G der 5,5m Messkopf beschädigt wurde (Abbildung 57 schwarze Markierung bei blauer Linie). Ab der schwarzen Markierung in Abbildung 57 können nur noch die Daten aus dem 3m Extensometer (rote Linie) berücksichtigt werden. Die gesamte Querverformung der Feste 600G beträgt (in den ersten 3m ausgehend von Strecke 600H) ca. 130mm. Die großen Verformungen stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit den benachbarten Sprengaktivitäten. Nach Verfüllung der Kammer 600G verlangsamten sich die Bewegungen und kamen schlussendlich zum Stillstand (Abbildung 57).

Die zur Verfügung stehenden Aufnahmen aus den Bohrlochbefahrungen zeigen zwei deutlich unterschiedliche Gebirgszustände. Die Aufnahmen aus dem Bohrloch H6 (Osten Strecke 600H) zeigen ein sehr kompaktes Gebirgsverhalten (Abbildung 58 links – Zustand bei 4,5m im Bohrloch). Es ist zu erwähnen, dass in diesem Bereich keine Abbautätigkeiten in 600G erfolgten, da die Kammer aus Qualitätsgründen nicht vollständig abgebaut wurde.

Das Bohrloch H9 befindet sich im Einflussbereich der benachbarten Sprengaktivitäten, parallel zum installierten Extensometer. Bei 2,6m Abstand von der Strecke 600H kann ein wenig zerklüftetes, kompaktes Gebirge beobachtet werden (Abbildung 58 rechts).

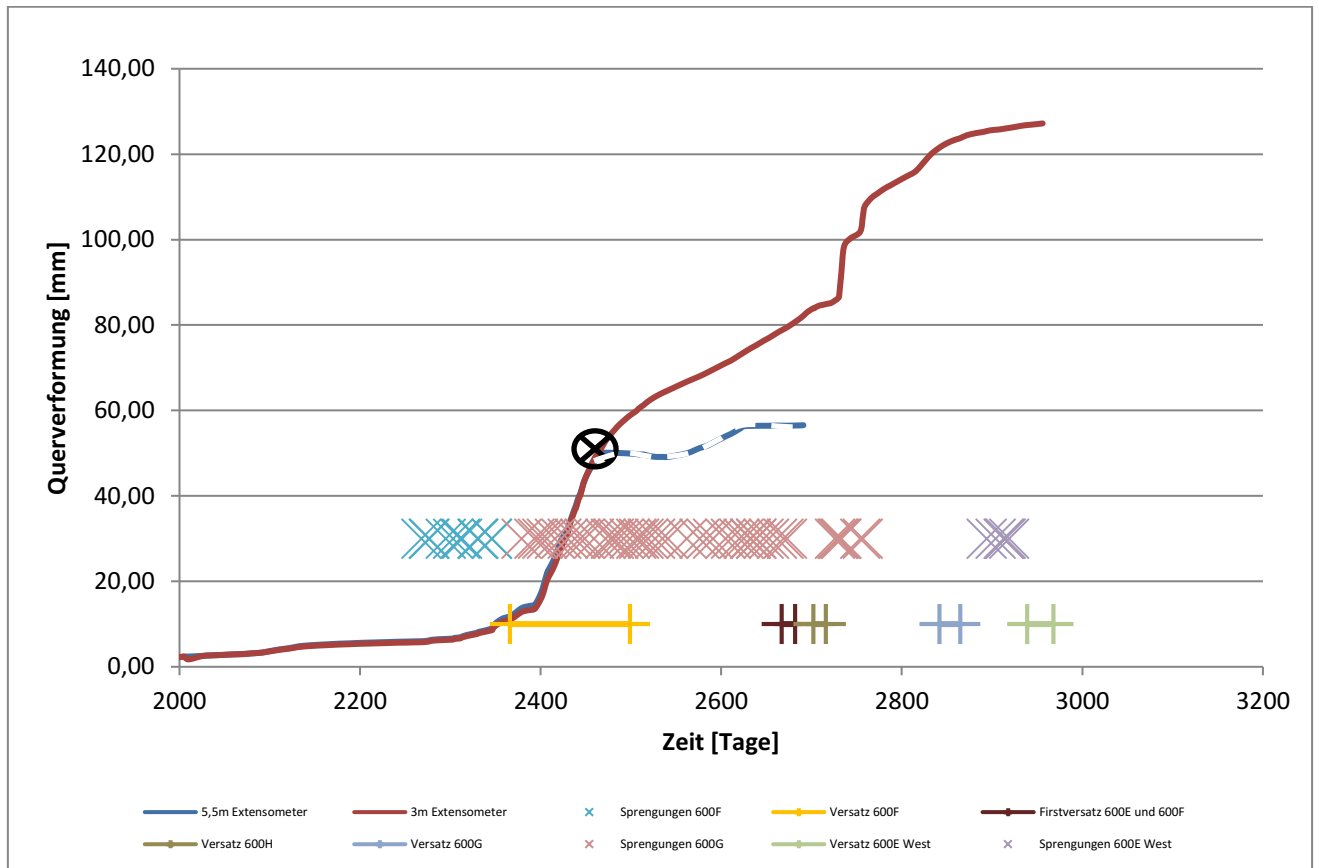


Abbildung 57: Extensometermessungen Feste 600G



Abbildung 58: Bohrlochkameraaufnahmen 600G (links – Bohrloch H6 bei 4,5m von der Strecke 600H ausgehend, rechts – Bohrloch H9 bei 2,6m von der Strecke 600H ausgehend)

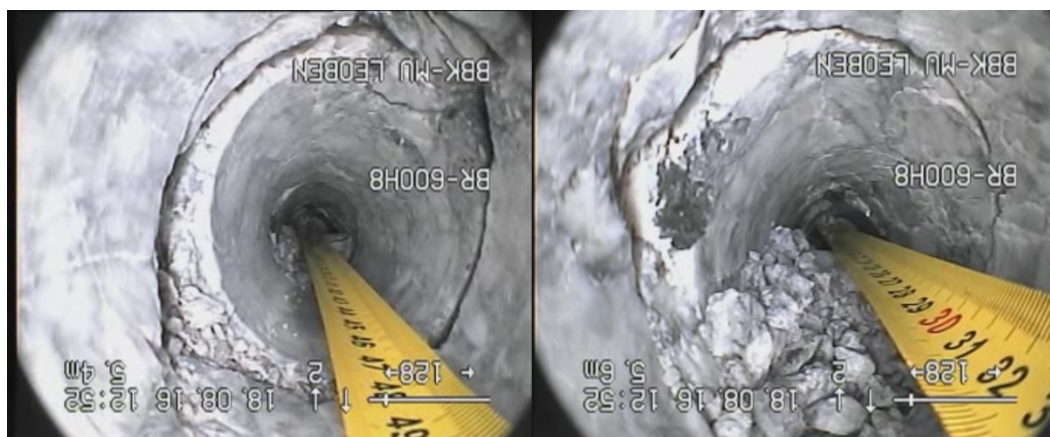


Abbildung 59: Bohrloch H9 bei 5,5m (links) bzw. bei 5,7m (rechts) Abstand der Strecke 600H

Im Festenkern bzw. in der zweiten Hälfte der Feste 600G (5,5m Abstand von der Strecke 600H aus) kann ein großer Einfluss der Sprengaktivitäten in 600G beobachtet werden. Weiter konnte das Bohrloch nicht befahren werden, da es bei 5,7m verbrochen war (Abbildung 59)

Auflagerfeste 600H

Auch die Auflagerfeste 600H wurde im Bereich des Abbaufeldes geologisch dokumentiert und mittels Fotos aufgenommen.

Für die Auflagerfestenbeurteilung im Abbaubereich liegen Daten aus einer Extensometermessung vor. Diese zeigt eine Gesamtverformung von ca. 38mm, wobei die Bewegungen in unmittelbarer Streckenumgebung auftraten (selbe Verformung beim 3m und 5,5m Messkopf). Insgesamt haben die Abbauaktivitäten in Kammer 600F und 600G zu zusätzlichen Verformungen in der Auflagerfeste geführt, die jedoch im Vergleich zu den Querverformungen in den Abbaufesten deutlich geringer ausfallen. Nach Verfüllung der Kammer 600G sowie der Kopfstrecke der Kammer 600H kamen die Bewegungen in der Feste zu einem vollständigen Stillstand (Abbildung 60).

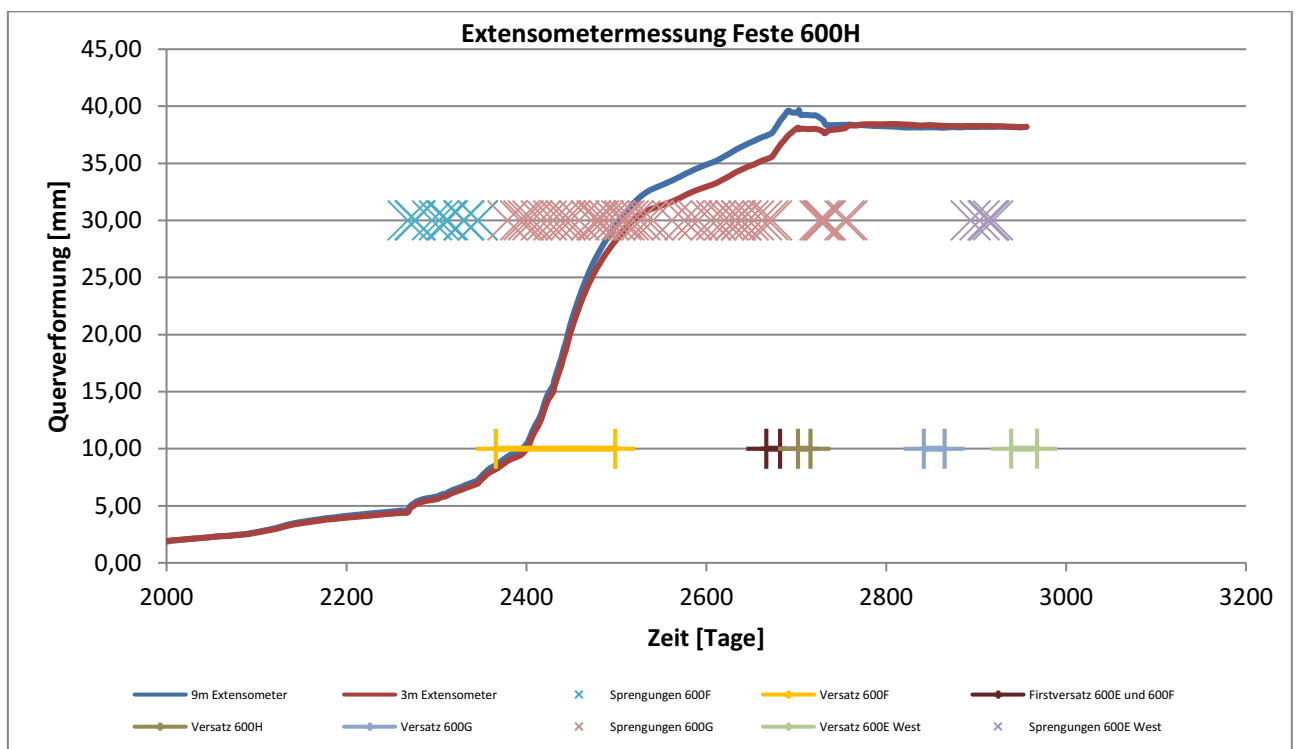


Abbildung 60: Extensometermessungen Auflagerfeste 600H

Parallel zu den Extensometermessungen stand ein Bohrloch für die Beobachtung des Gebirges zur Verfügung. Die folgenden Abbildungen wurden an unterschiedlichen Punkten im Bohrloch aufgenommen. Grundsätzlich befindet sich das Bohrloch in einem geologisch sehr zerklüfteten Gebirgsbereich, mit kompakteren Zwischenschichten. Es überwiegt hier jedoch deutlich das gebankte und zerklüftete Gebirge. Die geringen Querverformungen, die mittels Extensometermessungen beobachtet wurden, sind aus diesem Grund überraschend. Hier dürften die Klüfte und Trennflächen schon vor Einbringen des Extensometers (2014) vorhanden gewesen sein. Die massiven geologischen

Trennflächen können auch anhand der Bohrkerne beobachtet werden (Abbildungen 61-64).

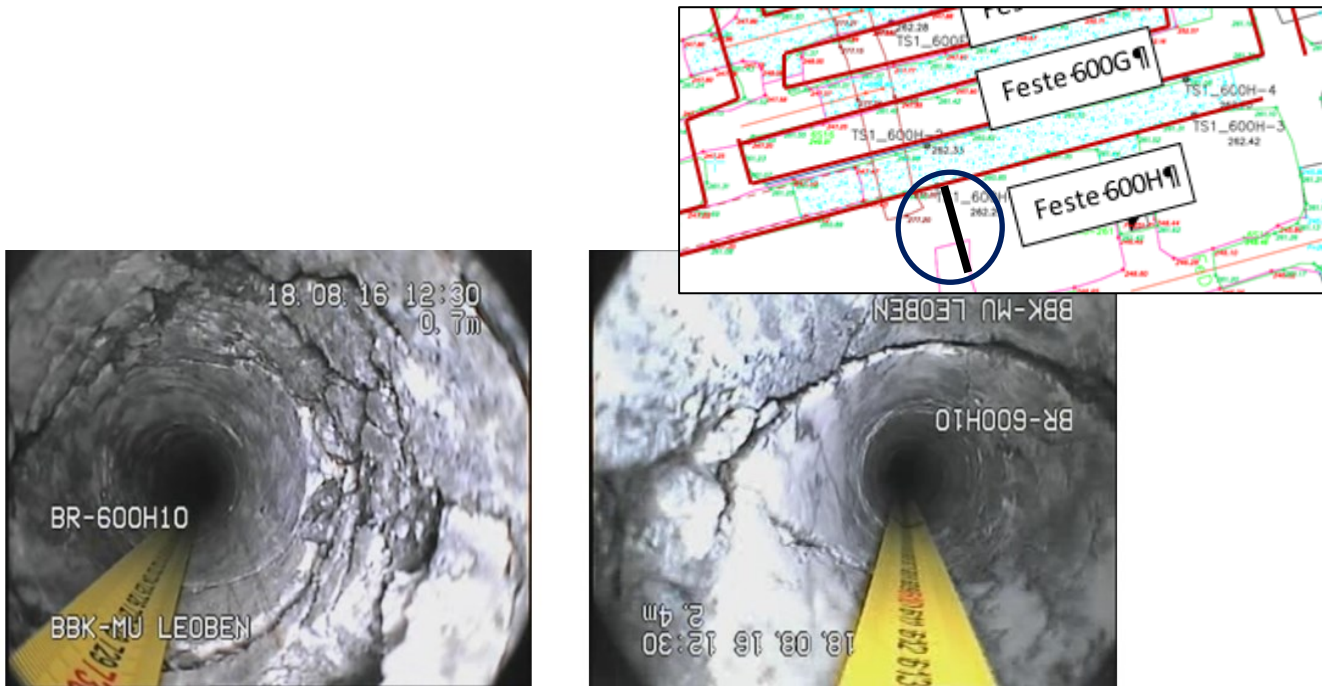


Abbildung 61: Bohrloch bei 0,2m Abstand der Strecke 600H (links) und bei 1,4m Abstand der Strecke 600H (rechts)

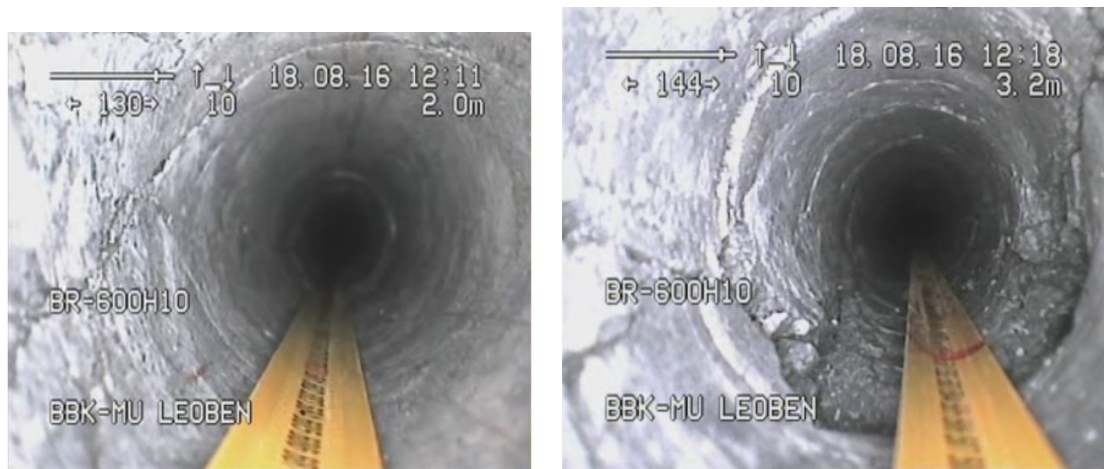


Abbildung 62: Bohrloch bei 0,6m Abstand der Strecke 600H (links) bzw. bei 2,45m (rechts)



Abbildung 63: Bohrloch bei 5,2m Abstand der Strecke 600H (links) bzw. bei 6,1m (rechts)



Abbildung 64: Bohrkern aus Bohrloch H10

6.3.2 Versatz

Zum Zwecke der Überprüfung der in-situ Eigenschaften des Versatzkörpers werden folgende Tätigkeiten empfohlen:

- Versatzdruckmessungen mit Hilfe eines im Rahmen des Projekts entwickelten Druckmessrahmens
- Kernbohrungen im Versatzkörper und Laboruntersuchungen des Versatzproduktes
- Versatzdruckmessungen als Werkzeug zur Messung der Interaktion zwischen Versatz und Gebirge

Im Bergbau Breitenau wurden im Juli 2015 der erste Versatzdruck-Messrahmen in die Kammer 600E und der zweite im Juni 2016 in die Kammer 600F eingebracht. Beide Rahmen wurden direkt am Versatzkörper in einer Höhe von 5m über der Sohle der Kammer (entspricht ca. der Firste der Fußstrecke) eingebracht (Abbildung 65).

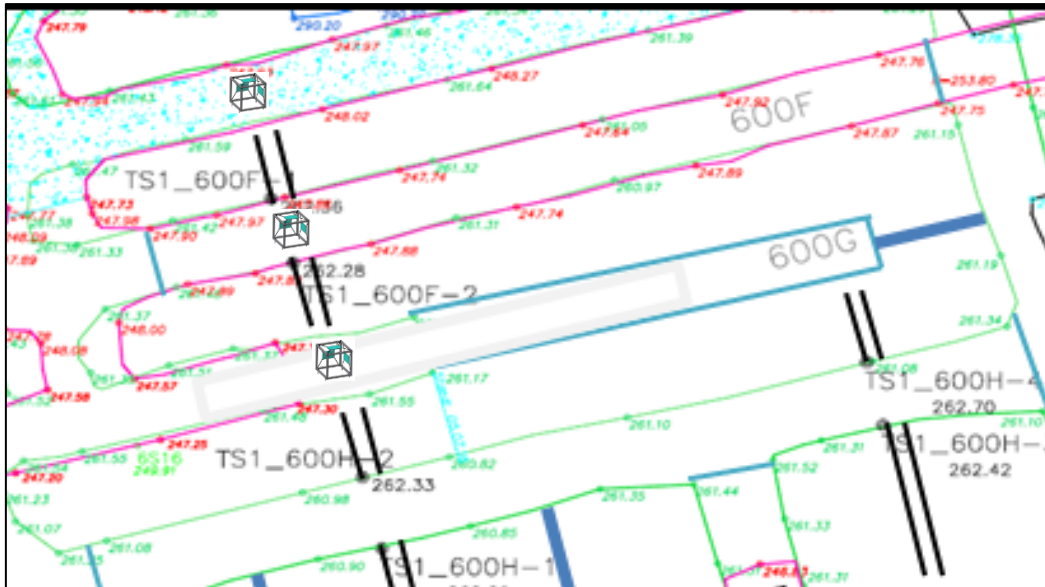


Abbildung 65: Übersicht über Druckmessrahmen Revier 6 Bergbau Breitenau

Der erste Druckmessrahmen wurde in der Abbaukammer 600E im Revier 6 eingebracht. Im Laufe der beinahe 3-jährigen Messzeit konnten hier keine signifikanten Druckanstiege beobachtet werden, die über das Eigengewicht des Versatzes hinausgehen. (Abbildung 66) Die mit Kreuzen markierten Zeiträume stellen die Verfülltätigkeiten in den jeweiligen Kammern bzw. Streckenabschnitten dar und die „X“ markieren einzelne Sprengungen. Sowohl Paralleldruck als auch Querdruck zur Kammerlängsachse belaufen sich in 600E auf denselben Wert, ca. 0,3MPa. Der Vertikaldruck im Versatzkörper ist etwas höher mit 0,45MPa, was dem Gewicht der überlagernden Versatzschichten entspricht. Ein Anstieg insbesondere im Vertikaldruck konnte mit Verfüllung der Kopfstrecke der Kammer 600E (rostbraune Markierung) beobachtet werden. Dies bestätigt auch die Funktionsweise der Messzellen, da eine unmittelbare Reaktion auf das zusätzliche Gewicht des Versatzes der Kopfstrecke festgestellt werden kann. Sprengtätigkeiten in den benachbarten Kammern zeigen keinerlei Auswirkung auf den Versatzdruck in der Kammer 600E.

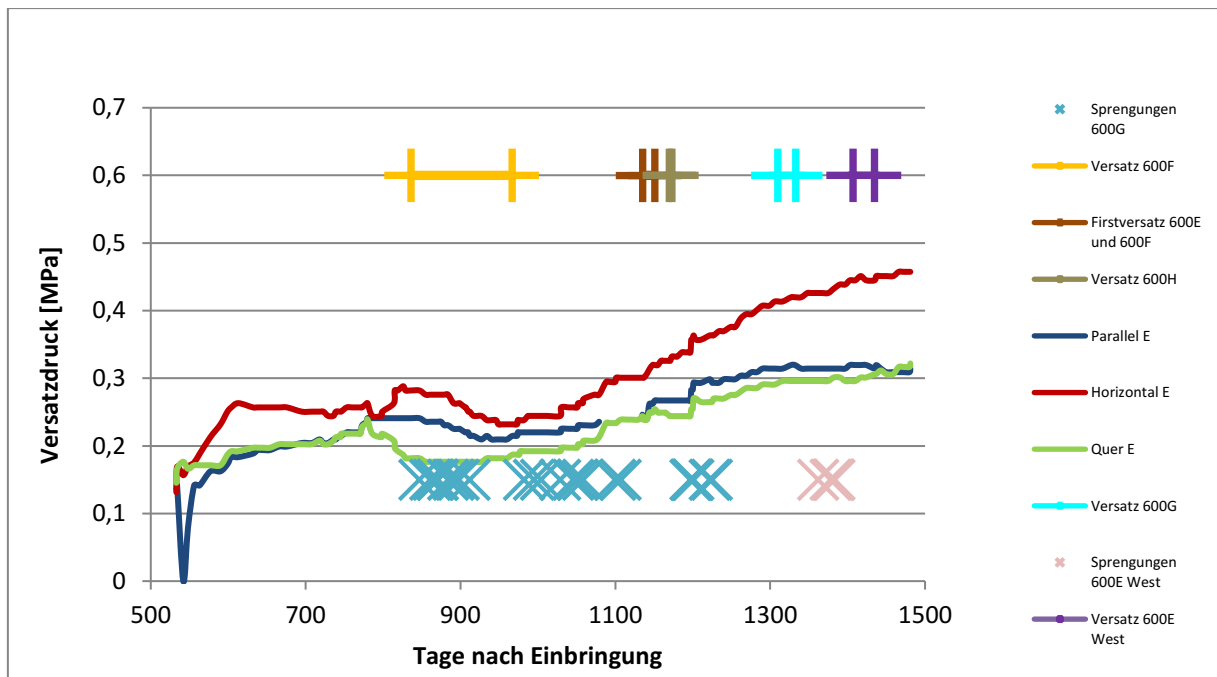


Abbildung 66: Versatzdruckmessung Kammer 600E

Ganz im Gegensatz dazu zeigt der Druckmessrahmen in der benachbarten Kammer 600F große Druckanstiege, insbesondere im Paralleldruck, dh. das zur Kammerlängsachse parallel positionierte Druckmesskissen (Abbildung 67 blaue Kurve, in der Abbildung Darstellung von 1/10 des tatsächlich gemessenen Druckes). Die Verfüllung der Kammer 600F dauerte in Summe 4 Monate (im Vergleich dazu dauert die problemlose Füllung einer Kammer ca. 1 Monat). Während der Verfüllung der Kammer fanden bereits Sprengungen in der benachbarten Kammer 600G statt. Im Laufe der Verfüllung stieg der parallele Versatzdruck in einem ersten Schritt auf 3,5 und in weiterer Folge auf ca. 5MPa an. Der Querdruck in der Kammer verzeichnete ebenfalls einen Anstieg um das 1,5-fache, jedoch in der Größenordnung von einem Zehntel des Paralleldruckes. Über den gesamten Beobachtungszeitraum stiegen die Versatzdrücke in allen Messzellen tendenziell an. Während des Firstversatzes in 600E und 600F kam es zu einem leichten Absinken des Paralleldruckes (um ca. 0,3MPa). In weiterer Folge sank der Paralleldruck auf 2,7MPa ab und stieg dann stetig an, wobei er bei der letzten dokumentierten Messung knapp unter 4 MPa lag. Die beiden anderen Druckmesszellen in Kammer 600F sind wie der Paralleldruck ebenfalls leicht angestiegen und haben sich auf das ca. 1,5-fache erhöht (Größenordnung immer noch 1/10 des Paralleldruckes). Die möglichen Gründe für die gemachten Beobachtungen werden in weiterer Folge im Kapitel „Modelle zur Wechselwirkung von Gebirge und Versatz“ diskutiert und erläutert.

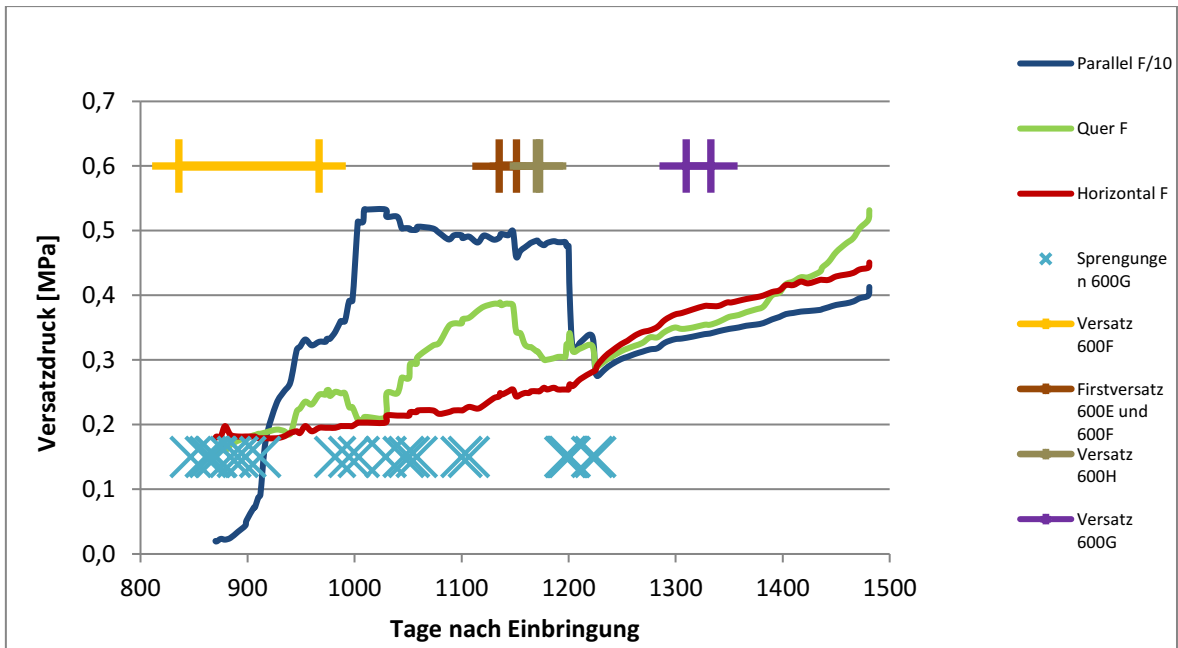


Abbildung 67: Versatzdruckmessung Kammer 600F

Abbildung 68 zeigt die Ergebnisse des zuletzt eingebrachten Druckmessrahmens in Kammer 600G. Hier konnten wie in Kammer 600E keine ungewöhnlichen Versatzdruckanstiege beobachtet werden.

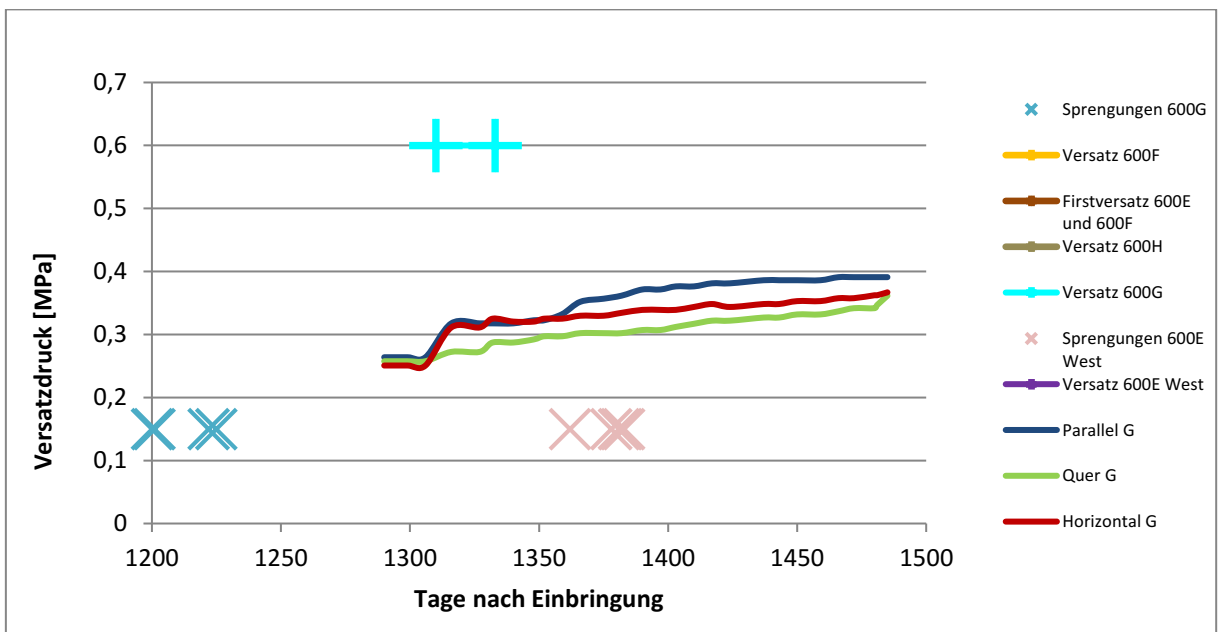


Abbildung 68: Versatzdruckmessung Kammer 600G

Zum Zwecke der Feststellung der in-situ Versatzeigenschaften haben sich Kernbohrungen im Versatzkörper als geeignete Methode herausgestellt. Die aus dem Versatzkörper gebohrten Kerne können in weiterer Folge im Labor auf Festigkeits- und Verformungseigenschaften untersucht werden. In Kombination mit einer Untersuchung des Versatzproduktes unmittelbar bei der Erzeugung bzw. 28 Tage nach Erzeugung (28-Tage-Festigkeit) können zusätzlich Rückschlüsse auf die in-situ Verfestigung des Versatzproduktes gezogen werden. Die erwähnten Untersuchungen wurden für die im Rahmen des Projektes verfüllten Kammern 600C, 600E und 600F durchgeführt. Es hat sich ein bedeutsamer Festigkeitsanstieg gezeigt, der insbesondere in der Kammer 600C und 600F ähnlich verläuft. Hier ist anzumerken, dass sich die Prüfdaten der Versatzprodukte aufgrund unterschiedlicher Verfüllzeiträume bzw. Bohrtätigkeiten unterscheiden und somit versucht wurde einen linearen Zusammenhang für die Festigkeitsentwicklung anzugeben. In weiterer Folge sollte der Versatzkörper erneuten Kernbohrungen unterzogen werden um zu überprüfen, wie sich die Festigkeit im Laufe der Zeit entwickelt und Rückschlüsse auf generelle Festigkeitsentwicklung von den verwendeten Versatzprodukten ziehen zu können. Es ist hier noch anzumerken, dass es sich bei den Versatzuntersuchungen lediglich um Proben der Rezeptur 3 handelt, da aus den anderen Versatzrezepturen aufgrund der Materialeigenschaften keine vollständigen Bohrkernge gezogen werden konnten.

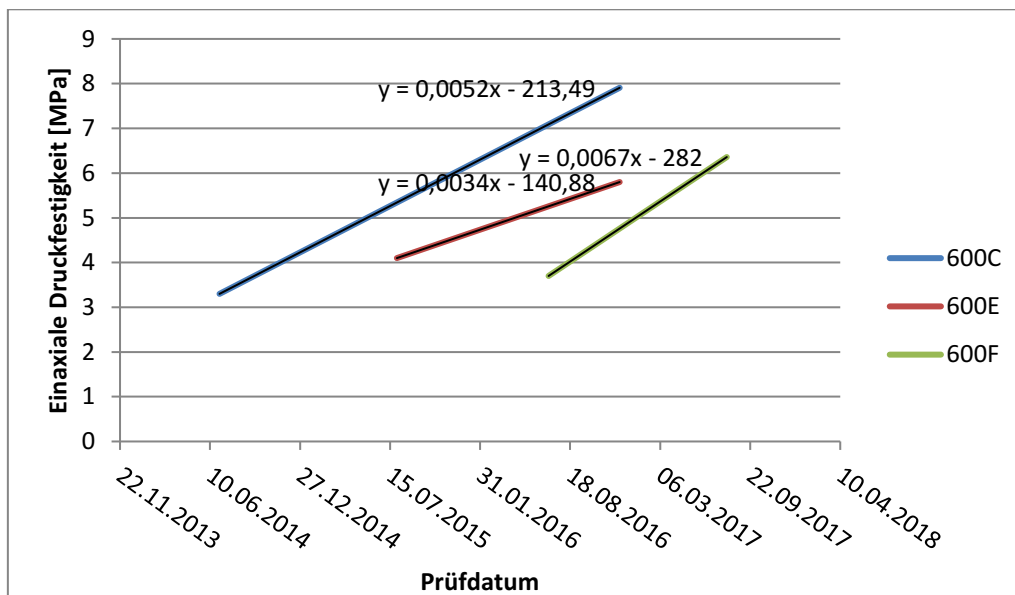


Abbildung 69: Festigkeitsentwicklung Versatz Bergbau Breitenau

6.4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel wurde ein Überblick über die durchgeführten untertägigen Messungen im Gebirge und am Versatzkörper gegeben. In einem ersten Schritt wurde das Gebirge in Abschnitte unterteilt, dokumentiert, fotografiert und markante Trennflächen aufgenommen. Mittels Kernbohrungen konnten Proben aus dem Gebirge entnommen werden um im Labormaßstab die Gesteinseigenschaften (E-Modul, einaxiale Druckfestigkeit) bzw. den RQD-Wert zu bestimmen. Die Kernbohrlöcher dienten zudem auch der Untersuchung des Gebirges mittels Bohrlochkamera. In einen Teil der Bohrlöcher wurden zudem Extensometer eingebracht, welcher der Konvergenzmessung um die Hohlräume dienten. Auch der Versatzkörper wurde genauer untersucht, wobei hier vertikale Kernbohrungen zum Einsatz kamen und die Bohrkerne ebenfalls im Labor auf ihre einaxiale Druckfestigkeit und ihren E-Modul untersucht wurden. In die Versatzkörper wurden zudem Druckmesskissen eingebracht, welche der Messung des Druckaufbaus im Versatzkörper in vertikaler Richtung sowie parallel zum und normal auf den Kammerulm dienten. Begleitend zu den untertägigen Messungen wurden sämtliche Gewinnungs- und Versatz Tätigkeiten genau dokumentiert, welche im abschließenden Teil des vorliegenden Kapitels kombiniert dargestellt werden konnten. Die Interpretation der untertägig gemachten Beobachtungen erfolgt in Kapitel 8 „Schlussfolgerungen, Ableitungen und Erkenntnisse zur Wechselwirkung von Gebirge und Versatz“. Im nachfolgenden Kapitel wird nun mittels Modellfestenversuchen untersucht, ob dieselben Phänomene der Versatzwirkung auch anhand von Modellen beobachtet werden können. In Kombination mit den untertägig gemachten Untersuchungen soll somit die Grundlage zur Analyse der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz geschaffen werden.

7 Simulation der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz im Labormaßstab

Untersuchungen am Gebirge sowie am Versatzkörper selbst stellen die beste Möglichkeit dar das tatsächliche Verhalten der Materialien und deren Wechselwirkung zu untersuchen. Vor Ort Messungen stoßen jedoch an ihre Grenzen, was sicherheitliche Aspekte und gesetzliche Vorgaben betrifft und sind aufgrund der betrieblichen Rahmenbedingungen nur bedingt flexibel und anpassbar. Zudem sind untertägige Messungen kostspielig, weswegen die Problemstellungen häufig auf Basis mathematischer Analytik oder modelltechnischer Versuche bearbeitet werden. (Denkhaus und Bieniawski, 1968)

Unter der Verwendung der mathematischen Analytik wird ein mathematisches Modell bzw. Gedankenmodell erstellt um alle charakteristischen Eigenschaften des Gebirges widerzugeben, welches jedoch einfach genug ist um die Problematik durch eine theoretische Herangehensweise zu behandeln. Aus diesem Grund werden bei der Erstellung mathematischer Modelle einige Vereinfachungen getroffen wie das Gebirge als homogenes isotropes Kontinuum zu betrachten. Meist sind diese Modelle auch auf Hohlräume mit einfachen geometrischen Formen beschränkt. (Denkhaus und Bieniawski, 1968) Aus diesem Grund werden experimentelle Methoden herangezogen um das Gebirgsverhalten in der Umgebung von bergmännisch erstellten Hohlräumen zu untersuchen.

Im Laufe der Zeit ist so die physikalische Modelltechnik ein klassisches Instrument zur Ergänzung bzw. Unterstützung von gebirgsmechanischen Fragestellungen geworden. Modellversuche an Modellfesten und Versatz im Labormaßstab stellen eine ausgezeichnete Möglichkeit dar die Wechselwirkung von Gebirge und Versatz zu analysieren. Sie bieten die Möglichkeit unter Berücksichtigung der richtigen Kräfte- und geometrischen Verhältnisse, die untertägig gemachten Beobachtungen im Labormaßstab zu reproduzieren und durch Variation verschiedener Parameter zu ergänzen. Voraussetzung für Modellversuche im Labormaßstab zur Untersuchung physikalischer Abläufe sind die geometrische sowie die mechanische Ähnlichkeit, welche im Vorfeld eines Versuchsaufbaus abgeklärt werden müssen. Im Bergbau Breitenau handelt es sich wie beschrieben um 70-100m lange Abbaukammern mit ebenso langen Bergfesten. Diese Geometrie ist im Labormaßstab nicht problemlos nachzustellen, da weder die langgestreckten Festen noch die Einspannung an der Längsseite durch das Gebirge reproduziert werden können. Zudem stellt die Modellierung des Versatzkörpers eine weitere Schwierigkeit dar, da sich der Versatz während der Einbringung unter seinem Eigengewicht verdichtet, was im Labormaßstab nicht 1:1 nachmodelliert werden kann. Aufgrund der beschriebenen Besonderheiten der realen Abbausituation müssen im Labormaßstab gewisse Vereinfachungen getroffen werden, welche bei der Interpretation der Laborergebnisse und der

Übertragung auf den tatsächlichen Anwendungsfall berücksichtigt werden müssen. Im vorliegenden Fall wird anstelle eines Kammer-Festensystems mit langgestreckten Festen als Vereinfachung ein Abbausystem mit quadratischen Festen modelliert, welche von allen Seiten von Versatz umgeben sind. Dies hat zur Folge, dass in einem ersten Schritt bei der Übertragung der Ergebnisse von den quadratischen Modellfesten auf quadratische Festen in der Realität geschlossen werden kann. In einem weiteren Schritt muss dann der Einfluss der Geometrie der untertägigen Abbaufesten auf deren Festigkeit und Verformungsverhalten in die Interpretation mit einbezogen werden. Dies betrifft insbesondere die Überprüfung des Einflusses der Festenlänge auf die Festenfestigkeit. Bei der Modellierung des Versatzes wird die natürliche Kompaktion des Versatzkörpers durch künstliche Verdichtung des Versatzes mittels einer Rüttelmaschine nachgestellt. Die Verdichtung des Versatzes erfolgt in 3 Lagen, wobei die unterste Lage am längsten und die oberste Lage am kürzesten verdichtet werden. Dieser Verdichtungsprozess wirkt sich im speziellen auf die passive Versatzwirkung aus. In einer realen Abbausituation ist die Eigenverdichtung des Versatzes durch sein Eigengewicht aufgrund des Siloeffektes, welcher eine Funktion der Abbaugeometrie ist, nur für eine bestimmte Versatzhöhe wirksam, weswegen der Versatzkörper im Labormaßstab nicht über die gesamte Höhe verdichtet werden muss. Die aktive Versatzwirkung auf der anderen Seite kommt aufgrund der Verformung der Festen zu Stande. Die Übertragung der Modellfestenverformung auf die Verformung der Abbaufesten wird mittels Hooke'schem Modellgesetz berücksichtigt und in Abschnitt 7.3 auf mechanische Ähnlichkeit zwischen Modell und Original überprüft.

7.1 Grundlagen der experimentellen Modelltechnik

Denkhaus und Bieniawski (1968) unterscheiden zwei Kategorien von Modellen, Analogmodelle und physikalische Modelle. Analogmodelle machen sich Analogien zwischen gewissen Gleichungen der Elastizitätstheorie und Gleichungen, die andere physikalische Erscheinungen beschreiben, wie optische oder elektrische Phänomene, zu Nutzen. Physikalische Modelle sind Modelle eines Art Prototyps in verkleinertem Maßstab, wobei die Gesetze der Ähnlichkeitsmechanik berücksichtigt werden müssen. (Denkhaus und Bieniawski, 1968) Häufig kommen elektrische Analogmodelle, spannungsoptische Modelle und Sprödbbruchmodelle zum Einsatz. Für die Untersuchung von Gebirge und Versatz sind Sprödbbruchmodelle von besonderem Interesse, da diese das Gebirge nicht rein im elastischen Spannungs-Verformungsbereich betrachten, sondern auch den Nachbruchbereich des Gebirges berücksichtigen. Sprödbbruchmodelle verwenden äquivalente Materialien, die nach den Gesetzen der Ähnlichkeitsmechanik das zum Sprödbbruch neigende Material, wie im vorliegenden Fall, beispielsweise den Magnesit, nachahmen. Die größte Herausforderung besteht hier in der Wahl eines geeigneten äquivalenten Materials, welches das Verhalten des zu untersuchenden

Materials möglichst nach den Gesetzen der Ähnlichkeitsmechanik beschreibt. Meist kommen als äquivalente Materialien künstlich erstellte Mischungen wie Gipsmischungen oder Zementmischungen zum Einsatz. (Denkhaus und Bieniawski, 1968) Im Vergleich zu Analogmodellen besteht der hauptsächlichste Wert von Modellen mit äquivalenten Materialien in der Beleuchtung des Charakters von gebirgsmechanischen Prozessen, welche mit dem Auftreten von plastischen Verformungen, Brucherscheinungen und Verschiebungen des Gebirges zusammenhängen. Diese Methode bietet die Möglichkeit verschiedene Gesteinsschichten nachzubilden und auch die Arbeitsweise des Ausbaus zu erforschen. (Kuznecov und Menzel, 1968)

Bei gebirgsmechanischen Fragestellungen wird die Belastung durch das Gebirge mit einer Prüfmaschine nachgeahmt, welche eine definierte Spannung aufbringen kann. Für den nachzustellenden Abschnitt, wie im vorliegenden Fall ein Zusammenwirken aus Bergfeste und Versatz, sollte ein Belastungsrahmen erstellt werden. (Denkhaus und Bieniawski, 1968)

Grundsätzlich müssen im Labormaßstab einige Vereinfachungen getroffen werden. Besonders ist hier auf die Reihenfolge der Hohlraumerstellung und Belastungszustände hinzuweisen. Am Beispiel eines Modells von Versatz und Bergfeste im Labormaßstab kann dies einfach erklärt werden: Wo in der Realität das Gebirge dauerhaft belastet ist und somit die Feste bereits vor Verfüllung der Hohlräume unter erhöhten Spannungen stehen, kann dieser Zustand im Labormaßstab nicht nachgestellt werden. Hier wird der die Modellfeste umgebende Hohlraum durch das Verfüllmaterial versetzt, ohne dass die Modellfeste mit einer Spannung belastet ist. Die Belastung erfolgt erst nach Verfüllung. Diese Vereinfachung kann jedoch getroffen werden, da davon auszugehen ist, dass sich eine Bergfeste vor Verfüllung größtenteils im elastischen Bereich verformt und die Verformungen im Vergleich zur Verformung nach Verfüllung vernachlässigbar klein sind. (Denkhaus und Bieniawski, 1968)

Wie bereits beschrieben, müssen bei der Gestaltung eines Modellversuches im Labormaßstab mit äquivalenten Materialien sowohl Modellmaterialien und Geometrien sorgfältig ausgewählt werden, da die mechanische Ähnlichkeit des Modells zur Realität gegeben sein muss um vom Modell auf eine reale Abbausituation schließen zu können. Im Folgenden werden die der mechanischen Ähnlichkeit zu Grunde liegenden Prinzipien erläutert und in weiterer Folge die mechanische Ähnlichkeit einer möglichen Modellgeometrie zur Realität überprüft.

7.2 Ähnlichkeitstheorie

Die Ähnlichkeitsmechanik hat die Aufgabe, Gesetze aufzustellen, nach denen am Modell gewonnene Versuchsergebnisse auf die wirkliche Ausführung übertragen

werden können. Voraussetzung für die Durchführung von Modellversuchen ist die geometrische Ähnlichkeit, also die maßstabsgetreue Ähnlichkeit von Längen und Winkeln, wie im vorliegenden Fall beispielsweise das richtige Verhältnis zwischen Festenbreite und Versatzbreite. Sind alle an einem physikalischen Ablauf beteiligten Parameter entsprechend den physikalischen Gesetzen ähnlich übertragbar, kann von einer vollständigen Ähnlichkeit gesprochen werden. Es sollten möglichst alle am physikalischen Prozess beteiligten Größen wie Wege, Zeiten, Kräfte, Spannungen, Geschwindigkeiten, Drücke, Arbeiten etc. entsprechend den physikalischen Gesetzen ähnlich übertragen werden. Dies gilt insbesondere für die mechanische Ähnlichkeit der Stoffparameter, welche zusätzlich zur geometrischen Ähnlichkeit Voraussetzung für Rückschlüsse vom Modell auf den Realzustand ist. Im vorliegenden Fall betrifft dies die Ähnlichkeit der Stoffparameter wie Festenmaterial und Versatzmaterial, welche so gewählt werden sollen, dass sie den untertägigen Abbauzustand möglichst realitätsgetreu widerspiegeln. Ist die Anpassung der Stoffparameter jedoch nicht ausreichend, dass dem Modell dasselbe physikalische Modell zu Grunde liegt, kann man sich auf die Ähnlichkeit der Größen beschränken, welche einen Prozess am dominantesten beeinflussen. (Beitz und Grote, 1997) Bei der Anpassung der Stoffparameter ist die Größenabhängigkeit der Materialeigenschaften als äußerst kritisch zu betrachten. Der Zerlegungsgrad des Gebirges beispielsweise, wie er aufgrund von natürlicher Zerklüftung vorliegt, wirkt sich im Gebirgsverband weitaus weniger kritisch aus, als bei der Modellierung mittels Modellfesten kleinerer Geometrie, was bei der Auswahl des Modellfestenmaterials in Betracht gezogen werden muss.

Bei der Modellierung im Labormaßstab ist es von großer Bedeutung, alle relevanten Größen zu berücksichtigen, die den Vorgang, welcher untersucht werden soll, beeinflussen. Dies könnten im Bereich der Gebirgsmechanik z.B. Spannungsverteilungen oder Verformungen sein. Bei gebirgsmechanischen Fragestellungen muss wie bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben mit äquivalenten Materialien gearbeitet werden, wobei deren mechanisch relevante Eigenschaften wie Druckfestigkeit oder Verformungen in einem zur Originalsubstanz gleichen maßstäblichen Verhältnis stehen müssen. (Junker et al., 2004) Für den Nachweis der mechanischen Ähnlichkeit des gewählten Versuchsaufbaus werden folgende Symbole und Abkürzungen verwendet:

l_m ...Länge im Modell [m]

l_o ...Länge im Original [m]

l_v ...Skalierungsfaktor Länge [m]

σ_m ...Spannung im Modell [Pa]

σ_o ...Spannung im Original [Pa]

F_m ...Kraft im Modell [N]

F_o ...Kraft im Original [N]

F_v ...Skalierungsfaktor Kraft [N]

E_m ...E-Modul im Modell [Pa]

E_o ...E-Modul im Original [Pa]

ε_o ...hier: Querverformung im Original [mm] (Anmerkung: ε ist im Allgemeinen eine spezifische Dehnung-Stauchung (mm/mm))

ε_m ...hier: Querverformung im Modell [mm]

A_m ...Querschnittsfläche im Modell [m²]

A_o ...Querschnittsfläche im Original [m²]

Für die Grundgrößen der an einem Prozess beteiligten Parameter wie Länge (l), Zeit (t), Kraft (F) und Temperatur (T) müssen Maßstabsfaktoren berechnet werden um die Ergebnisse des Modells auf die Realität übertragen zu können. Die Skalierungsfaktoren für die einzelnen Größen sind wie folgt definiert:

$$\frac{l_m}{l_o} = l_v \quad (15)$$

$$\frac{t_m}{t_o} = t_v \quad (16)$$

$$\frac{F_m}{F_o} = F_v \quad (17)$$

$$\frac{T_m}{T_o} = T_v \quad (18)$$

Von mechanischer Ähnlichkeit kann gesprochen werden, wenn zusätzlich zur geometrischen Ähnlichkeit auch die kinematische und die dynamische Ähnlichkeit gegeben sind. Die Gesetzmäßigkeiten der mechanischen Ähnlichkeit basieren auf dem Gleichgewicht der einen physikalischen Prozess bestimmenden Kräfte, wobei zwischen statischer, dynamischer und thermischer Ähnlichkeit unterschieden wird. Im vorliegenden Versuchsaufbau sind thermische Einflüsse von untergeordneter Bedeutung und werden daher nicht berücksichtigt. Auch die dynamische Ähnlichkeit wird nicht in Betracht gezogen, da die Verformungen untertage über sehr lange Zeiträume stattfinden und somit nicht als dynamischer Prozess, sondern eher als statischer Prozess beschrieben werden. (Beitz und Grote, 1997) Junker et al. (2004) definieren die relevanten Parameter für gebirgsmechanische Untersuchungen im Labormaßstab als die richtigen Längenverhältnisse und Spannungsverhältnisse. Das richtige Längenverhältnis (λ_1) und Spannungsverhältnis (λ_2) werden laut Junker et al. (2004) wie folgt definiert:

$$\lambda_1 = \frac{l}{l'} \quad (19)$$

$$\lambda_2 = \frac{\sigma}{\sigma'} \quad (20)$$

Wobei:

l...Länge in der Natur [m]
l'... Länge im Modell [m]
σ...Spannung in der Natur [N/m²]
σ'...Spannung im Modell [N/m²]

Sind Spannungs- und Längenmaßstäbe definiert, können weitere Maßstäbe durch die Bildung dimensionsloser Argumente abgeleitet werden, wie beispielsweise der Kräftemaßstab:

$$\frac{F}{F'} = \frac{\sigma l^2}{\sigma' l'^2} = \lambda_2 \lambda_1^2 \quad (21)$$

F...Kraft in der Natur [N]
F'... Kraft im Modell [N]

Sämtliche dimensionslosen Größen wie beispielsweise die Poissonzahl können im Maßstab 1:1 verwendet werden.

Der gewählte Versuchsaufbau muss ebenso dem Hooke'schen Modellgesetz Folge leisten, welches besagt, dass sich zwei Körper bezüglich ihrer elastischen Dehnungen mechanisch ähnlich verhalten, wenn die Hooke'sche Kennzahl H_0 übereinstimmt:

$$H_0 = \frac{F_m}{E_m l_m^2} = \frac{F_o}{E_o l_o^2} \quad (22)$$

7.2.1 Überprüfung der Statischen Ähnlichkeit für den gewählten Aufbau

Wie bereits dargelegt, ist es nicht möglich die Abbausituation im Bergbau Breitenau unmittelbar im Labormaßstab nachzustellen. Dennoch sollte überprüft werden, ob das gewählte Versatz-Festensystem im Modellversuch der Abbausituation im Bergbau Breitenau mechanisch ähnelt um Rückschlüsse vom Modell auf eine reale Abbausituation ziehen zu können. Da es sich im Bergbau Breitenau um 70-100m lange und 21m hohe Abbaufesten handelt, unterscheidet sich der Querschnitt der Feste (Rechtecksform) vom Querschnitt der Modellfeste, welche quadratisch ist. Für die Überprüfung der mechanischen Ähnlichkeit sollten jedoch in einem ersten Schritt gleiche Geometrien miteinander verglichen werden. Dies bedeutet, dass in einem ersten Schritt zum Zwecke der Überprüfung der statischen Ähnlichkeit eine quadratische Feste mit dem Querschnitt 7x7m und einer Höhe von 21m mit der Modellfeste der Kantenlänge von 40mm und einer Höhe von 160mm miteinander verglichen werden.

Die statische Ähnlichkeit des Modellaufbaus wurde in weiterer Folge anhand von folgenden Parametern ermittelt:

Tabelle 2: Parameter zur Ermittlung der statischen Ähnlichkeit

Original	Modell
$l_o=7$ (m)	$l_m=0,04$ (m)
$A_o=49$ (m ²)	$A_m=0,0016$ (m ²)
$\sigma_o=32e6$ (Pa)	$\sigma_m=30e6$ (Pa)
$F_o=1,57e9$ (N)	$F_m=4,8e4$ (N)
$E_o=20e9$ (Pa)	$E_m=14e9$ (Pa)
$H_o=1,6e-3$	$H_m=2,1e-3$

Für die Belastung der Bergfeste wurden Ergebnisse aus einer numerischen Simulation herangezogen, welche mit der diskreten Elemente Methode FLAC2D für die Festenbelastung eines Abbaufeldes mit 6 parallelen Abbaukammern ermittelt wurde. Die im Labor getestete Gesteinsfestigkeit des Magnesits aus dem Bergbau Breitenau lag durchschnittlich bei 110MPa. Dieser Wert kann nicht unmittelbar für die Festigkeit der Bergfesten herangezogen werden. Hier spielt die Berücksichtigung der Geometrie und des Zerlegungsgrades, welcher sich bei schlanken Festen wesentlich stärker auswirkt als im Gebirge, eine bedeutsame Rolle. Die Berücksichtigung des Zerlegungsgrades erfolgte, wie in Kapitel 6 besprochen, mittels Gebirgsklassifikation (GSI), welcher von der Gesteinsfestigkeit unter Einbeziehung des Zerlegungsgrades und des Trennflächenzustandes auf die Gebirgsfestigkeit rückrechnet. Für die betrachteten Bergfesten lag der GSI im Bereich von 60-70, woraus eine Gebirgsfestigkeit von ca. 35MPa berechnet werden kann. Der im Labormaßstab ermittelte Gesteins-E-Modul für Magnesit lag durchschnittlich bei 100GPa, der mittels Gebirgsklassifikation abgeleitete Gebirgs-E-Modul durchschnittlich bei 44GPa. Bei hohen, schlanken Bergfesten muss davon ausgegangen werden, dass sie aufgrund ihrer Geometrie geringere E-Moduli aufweisen. Da keine Berechnungen zum E-Modul der Bergfesten vorliegen, wurde der für das Gebirge abgeleitete E-Modul für die Berechnungen der mechanischen Ähnlichkeit der Abbaufesten halbiert. Bei der Überprüfung auf mechanische Ähnlichkeit wurde für die Bergfesten in einem ersten Schritt wie beschrieben eine 7x7m quadratische Feste gewählt, da es nicht möglich ist die gesamte langgestreckte Feste zu betrachten, wodurch sich die Querschnittsfläche von 49m² ergibt. Der E-Modul der Modellfesten liegt bei 14GPa, was im Labor mittels einaxialen Druckversuchen festgestellt wurde. Laut den durchgeführten Berechnungen liegen die ermittelten Hooke'schen Kennzahlen mit $H_o=1,6e-3$ und $H_m=2,1e-3$ sehr nahe beieinander, woraus auf mechanische Ähnlichkeit zwischen Modell und Original geschlossen wird.

In einem nächsten Schritt soll nun versucht werden den Einfluss der langgestreckten Abbaufesten, wie sie in der Breitenau Anwendung finden, im Rahmen der Ähnlichkeitsüberprüfung zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck soll

der Einfluss der Festengeometrie, insbesondere der Festenlänge auf die Festigkeit der Bergfesten mit in Betracht gezogen werden. Einige Autoren haben den Einfluss der Festenlänge einer rechteckigen Feste auf die Festenfestigkeit mit Hilfe einer effektiven Festenbreite, welche die Festenlänge einbezieht, berücksichtigt (Wagner 1992, Esterhuizen 1995, Esterhuizen 2011, Salamon et al. 1996). Für langgestreckte schlanke Festen präsentiert Wagner (1992) auf Basis der Querschnittsfläche A_p folgende neue Festenbreite:

$$w_{eff} = \frac{4A_p}{c} \quad (23)$$

Wobei A_p die Querschnittsfläche und C den Umfang der Festen darstellen. Esterhuizen (2011) hat den von Wagner (1992) entwickelten Ansatz weiterentwickelt, indem er die positive Wirkung einer rechteckigen Feste mittels eines „Length benefit ratio“ Faktors in Bezug auf das Breiten zu Höhen-Verhältnis folgendermaßen wertet:

$$w_e = w + \left(\frac{4A}{c} - w\right) \times LBR \quad (24)$$

Wobei folgende Werte in Abhängigkeit des Breiten zu Höhenverhältnisses für LBR herangezogen werden können:

Tabelle 3: Werte für den LBR Faktor in Abhängigkeit des Breiten-zu-Höhen Verhältnisses einer Feste

Width-to-height ratio	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
Length benefit ratio (LBR)	0.00	0.06	0.22	0.50	0.76	0.89	0.96	0.98	0.99	1.00

Im vorliegenden Fall beträgt das Breiten zu Höhenverhältnis der Festen in der Breitenau, welche 7m mächtig und 21m hoch sind, 0,33. Aus dem von Esterhuizen (1995) entwickelten Ansatz geht hervor, dass für ein Breiten zu Höhenverhältnis von 0,33, der LBR-Faktor 0 beträgt und somit kein Einfluss der Festenlänge auf die Festigkeit der Feste besteht. Aus diesem Grund entspricht die effektive Festenbreite der tatsächlichen Festenbreite. Dies bedeutet, dass die durchgeführte Ähnlichkeitsbetrachtung auch für die Festen mit rechteckigem Querschnitt gültig ist und die mechanische Ähnlichkeit zwischen Original und Modell dementsprechend gegeben ist.

7.3 Zielsetzung

Ziel der im Labor durchgeführten Versuchsreihe ist es die untertage beobachtete positive Wirkung des Versatzes im Labormaßstab anhand von Modellfesten nachzuweisen. In weiterer Folge sollen drei unterschiedliche Versatzmaterialien zum Einsatz kommen um den Einfluss der verschiedenen Versatzeigenschaften auf das Gebirgsverhalten zu untersuchen und Auskunft über den Einfluss auf das Gebirge zu erhalten. Von besonderer Bedeutung ist hier die Messung des

Druckaufbaus im Versatzkörper, welcher bereits untertage beobachtet werden konnte. Hier soll nachgewiesen werden, dass auch im Labormaßstab kleine Drücke ausreichen um die Verformung von Festen zu unterbinden und die Festigkeit der Modellfestenkörper zu erhöhen.

7.4 Versuchsplanung

Durch den gewählten Versuchsaufbau soll ein allgemeines Versatz-Festensystem nachgebaut werden um anhand dieses Modells die Versatzwirkung auf Festen im Labormaßstab zu untersuchen. Es ist nicht möglich die Abbausituation des Bergbaus Breitenau im Labormaßstab nachzustellen, da die Modellierung der langgestreckten Abbaufesten von 80-100m, welche an ihrer Querseite vom Gebirge eingespannt sind, in Laborversuchen nicht durchführbar ist. Es könnte lediglich ein Streifenelement aus der Abbaufeste simuliert werden, wobei in diesem Fall nur limitiert aus den Laborversuchen Rückschlüsse auf die realen Abbaubedingungen gezogen werden können. Aus diesem Grund wurde beschlossen die Versuche auf ein allgemeines Versatz-Festensystem zu beziehen, wobei dennoch versucht wird, sich an die geometrischen Verhältnisse des untertägigen Abbausystems im Bergbau Breitenau anzulehnen. Dies bedeutet, dass der Fokus der Untersuchungen auf schlanken Festen liegt und auch das Höhen/Breiten-Verhältnis der Modellfesten jenem im Bergbau Breitenau ähnelt. Laut den Gesetzen der Ähnlichkeitsmechanik ist die Voraussetzung für die Untersuchung von physikalischen Abläufen anhand von Modellen die geometrische Ähnlichkeit, welche jedoch durch eine längen- und winkeltreue Anordnung der Komponenten gegeben ist. Im gewählten Versuchsaufbau ist die längen- und winkeltreue Anordnung der Komponenten gewährleistet.

Bei der Versuchsplanung sind in einem ersten Schritt die Rahmenbedingungen des Versuches festzulegen, wobei hier die möglichst realistische Nachstellung der untertägigen Abbaubedingungen, des Festenverhaltens sowie der Versatzwirkung im Fokus steht. Dies betrifft insbesondere die Festlegung der Festengeometrie bzw. des Festenmaterials, die Wahl eines geeigneten Versatzmaterials sowie die Reproduktion des Gebirgsverbandes, welcher die Modellfestenkörper umgibt. Auch die Wahl einer geeigneten Belastungsgeschwindigkeit der Modellfesten spielt bei der Versuchsplanung eine bedeutsame Rolle. In den durchgeführten Laborversuchen sollen die Festen von allen Seiten von Versatz umgeben sein, was Auskunft über die Versatzwirkung in der Ebene, entlang welcher Versagen eintritt, sowie in der normal darauf stehenden Ebene gibt. Hier soll im Versuchsaufbau auch die durch die Einbringung und das Eigengewicht des Versatzkörpers resultierende natürliche Verdichtung des Versatzmaterials über die Kammerhöhe durch einen geeigneten Versuchsaufbau berücksichtigt werden.

7.5 Einflussgrößen bei der Versuchsdurchführung

Bei der Modellierung von Versatz und Bergfesten im Labormaßstab müssen alle Faktoren berücksichtigt werden, welche einen Einfluss auf die Wirkung des Versatzes auf die Stabilität der Modellfesten haben könnten. Die das System beeinflussenden Faktoren sind

- Festenmaterial
- Festengeometrie
- Versatzmaterial
- Belastungsgeschwindigkeit

7.5.1 Festenmaterial

Die Wahl des Materials für die Modellfesten gestaltet sich als eine große Herausforderung, da die Wechselwirkung von Versatz und Festenmaterial und nicht das Festenmaterial selbst im Fokus der Untersuchungen steht. Es ist wichtig das Festenmaterial so zu wählen, dass möglichst viel Auskunft über die Wechselwirkung der zwei Komponenten erhalten wird und das Festenmaterial selbst keinen unsicheren Parameter darstellt. So ist die grundlegende Voraussetzung für das Festenmaterial, dass es homogen ist und reproduzierbare Eigenschaften besitzt. Dies bedingt, dass kein Material aus dem Gebirge für die Versuche herangezogen werden kann, da hier zu viele Unsicherheiten bezüglich der Variation der mechanischen Eigenschaften des Materials selbst bestehen. Außerdem besteht bei natürlichen Materialien bei zu geringen Festenquerschnitten bzw. zu schlanken Modellfesten ein zu großer Einfluss von Trennflächen und Defekten auf die Endfestigkeit. Aus den genannten Gründen kommen somit entweder künstlich hergestellte Modellfesten oder Modellfesten aus einem sehr homogenen Gestein in Frage.

Im Rahmen der Laboruntersuchungen soll neben der Verformung der Festen auch der Druckaufbau im Versatzkörper gemessen werden. Durch größere Festenverformungen baut sich laut Theorie der Reaktionsspannung im Versatzkörper (aktiver Versatzdruck) ein größerer Versatzdruck auf. Aus diesem Grund sollte ein Material verwendet werden, welches unter Belastung größere Verformungen aufweist, d.h. welches unter Belastung weicher reagiert. Aus diesem Grund sind steife und spröde Gesteine wie homogener Sandstein nicht als Festenmaterial geeignet. Zudem hat Hasewend (2004) gezeigt, dass bei Modellfesten aus Sandstein die Druckfestigkeit unterhalb eines Breiten-Höhenverhältnisses von 0,5 zunimmt. Dies würde bedeuten, dass die Geometrie der Feste einen zu großen Einfluss auf das Festigkeitsergebnis hätte und

wiederum nicht rein der Einfluss des Versatzes auf die Festigkeit der Modellfeste beurteilt werden könnte.

Werden die Modellfesten künstlich hergestellt, kann die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden, sowie das Materialverhalten (Steifigkeit, Festigkeit) beeinflusst und angepasst werden. Hier würden sich beispielsweise Modellfesten aus Zement, Zementmörtel oder Gips eignen. Bei all diesen Materialien erfolgt die Herstellung im Gießverfahren und durch Zugabe unterschiedlicher Wassermengen können die Festigkeit und Handhabung des Materials beeinflusst werden. Hasewend (2004) hat im Rahmen seiner Laborversuche gezeigt, dass bei schlanken Modellfesten aus Alpagips weder Festenlänge noch Festenhöhe die Druckfestigkeit im Testbereich der Modellfesten beeinflussen. Bei diesen schlanken Modellfesten ($b/h=0,33$) kann bei den unterschiedlichen getesteten Geometrien keine Änderung der Druckfestigkeit beobachtet werden, was zeigt, dass die Festengeometrie bei Alpagips-Proben keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit der Festen hat (Hasewend, 2004). Kuznecov und Menzel (1968) empfehlen für die Modellierung vom Gebirge im Labormaßstab ebenfalls Modelle aus Gips oder Zement. Als Modellfestenmaterialien wurden somit Modellfesten aus Zementmörtel, Gips oder groben Fertigmörtelteilen in Betracht gezogen. Aufgrund der geringen maximalen Festigkeiten wurden Gipsmodellfesten ausgeschlossen und Modellfesten aus Zementmörtel disqualifizierten sich aufgrund der Festigkeitszunahme über längere Zeiträume sowie aufgrund der Herstellung mit der am Lehrstuhl für Bergbaukunde vorhandenen Infrastruktur. Aus diesem Grund wurden Modellfesten aus groben Fertigmörtelteilen zugeschnitten, deren mechanische Eigenschaften konstant sind, wie einige einaxiale Druckversuche zeigten. Detaillierte Untersuchungen zum Festenmaterial finden sich in Abschnitt 7.8 „Ergebnisse“. Die einaxialen Druckfestigkeiten der Modellfesten belaufen sich auf ca. 30MPa, was ungefähr der Festigkeit der Bergfesten im Bergbau Breitenau entspricht und auch der E-Modul der Modellfesten ähnelt jenem der untertägigen Bergfesten mit 15GPa.

7.5.2 Festengeometrie

Bei der Festengeometrie müssen die Querschnittsform sowie das Breiten bzw. Durchmesser/Höhen-Verhältnis festgelegt werden.

Festenquerschnitt

Bei natürlichen Materialien eignen sich zylindrische Probenkörper, da die Probenherstellung mittels Bohrung aus einem größeren Volumen erfolgt. Bei künstlich hergestellten Materialien, welche gegossen werden müssen, besteht die Möglichkeit die Probenkörper prismatisch herzustellen. Prismatische Probenkörper würden die Realität besser widerspiegeln als zylindrische Probenkörper, da auch die Bergfesten prismatisch ausgeführt sind.

Breiten/Höhen-Verhältnis

Bei der Wahl der zu testenden Breiten/Höhen-Verhältnisse können ebenso die in-situ Bedingungen als Richtwert herangezogen werden. Im Bergbau Breitenau ist das Breiten/Höhen-Verhältnis der Bergfesten 1:3 (Abbildung 70), wie es häufig im untertägigen Bergbau vorkommt (Esterhuizen, 2006). Untersuchungen von Esterhuizen (2006) haben gezeigt, dass schlanke Bergfesten ($b:h < 1$) stärker in ihrer Festigkeit schwanken als gedrungene Bergfesten.

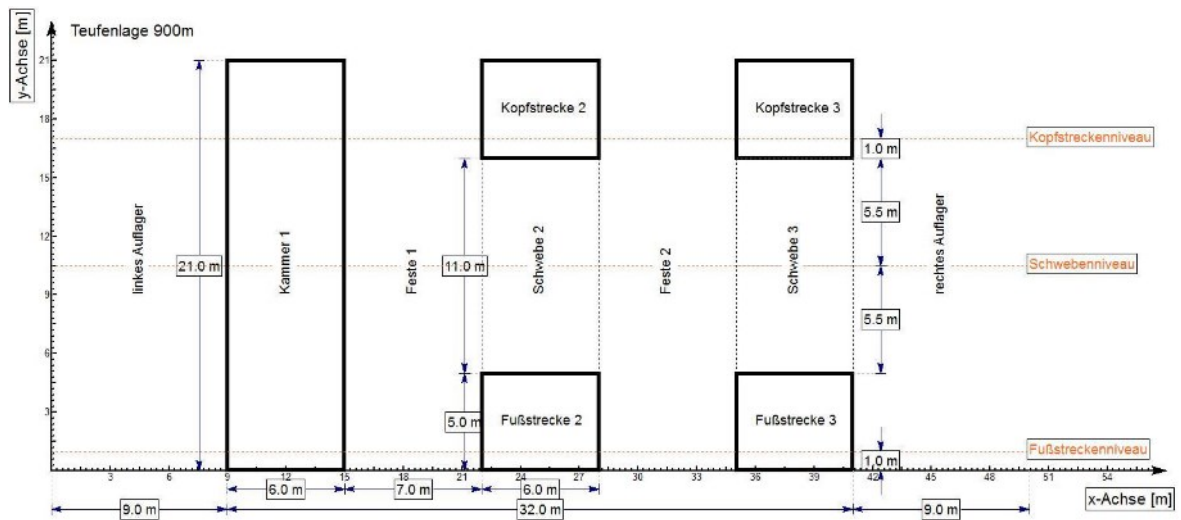


Abbildung 70: Abbausystem Revier 6 Bergbau Breitenau

Insbesondere unter einem Breiten/Höhen-Verhältnis von 1 schwankt die Festenfestigkeit stark (Abbildung 71). Der Hauptgrund für dieses Verhalten liegt an der fehlenden Einspannung des Festenkerns sowie am größeren Einfluss, den markante Trennflächen auf das Versagensverhalten von schlanken Festen haben. (Esterhuizen, 2006) Da im Rahmen dieser Arbeit künstlich hergestellte Modellfesten getestet werden, spielt der Einfluss von Trennflächen auf die Festigkeit der Modellfesten keine Rolle.

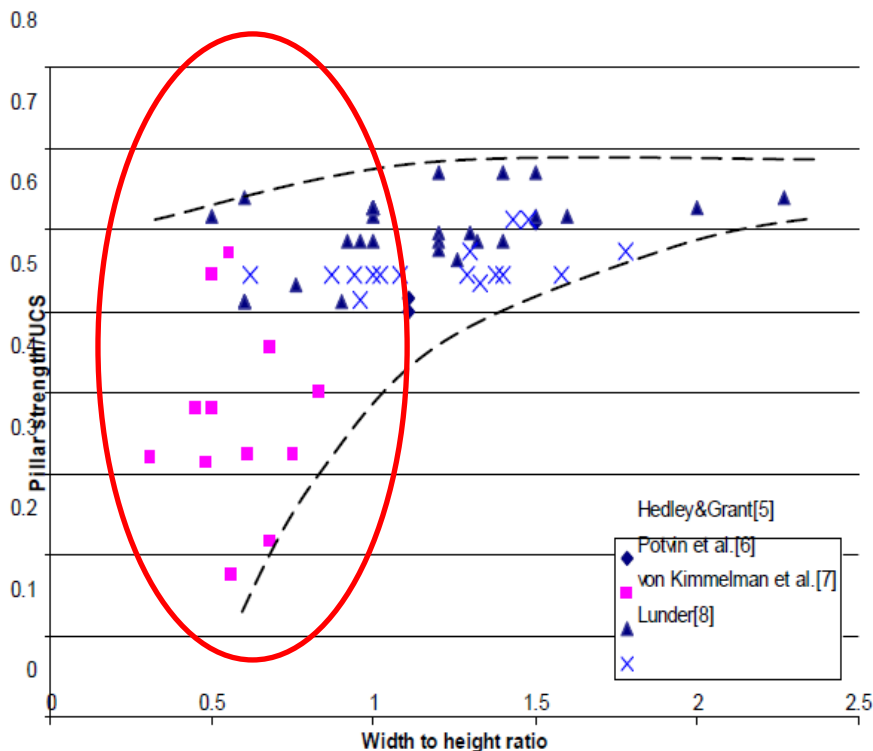


Abbildung 71: Ergebnisse von Fallstudien über Bergfestenfestigkeit in Abhängigkeit ihres Breiten/Höhen-Verhältnisses (Esterhuizen 2006, S. 2)

Bei der Analyse von 70 untertägigen Bergbauen hat Esterhuizen (2006) festgestellt, dass der Großteil der Bergfesten einen quadratischen Querschnitt besitzt. Lunder (1994), Martin und Maybee (2000) und Esterhuizen (2006) haben gezeigt, dass unter einem Breiten/Höhen Verhältnis von 0,8 keine Umschlingungsspannung auf den Festenkern herrscht und es zu Sprödbruchversagen durch den Festenkern kommt. Untersuchungen von mehr als 120 untertägigen Hartgesteinsbergbauen in den USA, welche Festen/Örterbau betreiben, haben typische Breiten/Höhen-Verhältnisse von durchschnittlich 1,4 (Min. 0,3, Max. 3,5) gezeigt (Esterhuizen et al., 2011). Bei der Studie von 18 Fällen, wo es zu Festenversagen gekommen ist, beläuft sich das Breiten/Höhen-Verhältnis auf durchschnittlich 0,68, wobei ein einziges Festenversagen bei einem b/h -Verhältnis >1 aufgetreten ist (Esterhuizen et al., 2011). Die Untersuchungen von Esterhuizen (2011) bezüglich der Schlankheitsgrade von Festen, welche in unterschiedlichen Bergbauen weltweit versagt haben, zeigen, dass es bei schlanken Bergfesten ($b/h < 1$) häufiger zu Versagen kommt. Zudem zeigen praktische Erfahrungen, dass das Versagensverhalten von schlanken Bergfesten durch den Einsatz von Versatz maßgeblich beeinflusst wird. Somit ist es von besonderem Interesse das Versagensverhalten von schlanken Festen unter dem Einfluss von Versatz im Labormaßstab zu untersuchen.

Bei der Wahl der Festengeometrien wurde in erster Linie versucht sich beim Versuchsaufbau den geometrischen Verhältnissen im Bergbau Breitenau anzunähern, welche ein B/H-Verhältnis von 1:3 aufweisen. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass Modellfesten mit quadratischem Querschnitt und folgendem Breiten/Höhen-Verhältnis im Rahmen der Modellversuche getestet werden:

- B/H=1:4

7.5.3 Versatzmaterial

Bei der Wahl des Versatzmaterials ist es von großer Bedeutung die in situ Versatzwirkung möglichst realistisch zu modellieren. Während der Einbringung kommt es aufgrund des Eigengewichtes des Versatzes zur Verdichtung des Versatzkörpers, folglich zu veränderten Eigenschaften des Versatzes über die Höhe der Kammer und somit zu einer variierenden Versatzwirkung über die Kammerhöhe. Trotz des Silo-Effekts, welcher bei einer Versatzhöhe von >20-30m zu einer Reduktion der Vertikalspannungen unterhalb des Spannungsgewölbes führen kann, ist der Versatz im unteren Kammerbereich stärker komprimiert, weist also ein geringeres Porenvolumen auf als im oberen Kammerbereich, wodurch es im unteren Kammerbereich zu einer anderen Versatzwirkung kommen dürfte als im oberen Kammerbereich. Dieser Effekt soll im Modellmaßstab mittels unterschiedlicher Verdichtung des Versatzmaterials berücksichtigt werden. Die Verdichtung soll mittels Vibrationstisch erfolgen, wobei der Versatz in Lagen eingebracht wird und verdichtet werden soll. Als Verfüllmaterialien eignen sich laut Kuznecov und Menzel (1968) je nach Versatztyp Quarzsand, Ton und Kreide sowie Mehlgut von schweren Mineralien und Glaskügelchen. Für die vorliegenden Versuche wurden drei verschiedene Materialien gewählt, welche die Eigenschaften von losem Versatz, hydraulischem Versatz und bindemittelverfestigtem Versatz möglichst gut nachstellen sollen. Hierbei handelt es sich um losen Quarzsand einer Körnung von 0,1-0,3mm (loser Versatz, „lv“), um eine Mischung aus Quarzsand und Wasser im Verhältnis Sand/Wasser von 3:1 (hydraulischer Versatz, „lvf“) und eine Mischung aus Sand, Zement und Wasser im Verhältnis 9:1:2,9 als bindemittelverfestigter Versatz („bmv“). Beim bindemittelverfestigten Versatz wurden für den Versuch unterschiedliche Aushärtezeiten gewählt (24, 48 und 72 Stunden), um die Entwicklung der Versatzfestigkeit sowie des E-Moduls des Versatzkörpers im Laufe der Aushärtezeit zu untersuchen.

7.5.4 Verfüllhöhe

Bei der Wahl der Verfüllhöhe ist wiederum das Ziel sich möglichst nahe an die untertägigen Bedingungen anzunähern. In den meisten Fällen werden Abbaukammern firstbündig oder beinahe firstbündig verfüllt. Aus diesem Grund sollen Modellfesten, welche nahezu über die gesamte Höhe von Versatz umgeben sind, getestet werden. Zudem können somit die Ergebnisse aus bereits durchgeführten Arbeiten von Wagner und Galvin (1981) bzw. von Hasewend (2004) überprüft werden.

7.5.5 Belastungsgeschwindigkeit

Die Belastungsgeschwindigkeit während des einaxialen Druckversuches beeinflusst die maximale Festigkeit sowie das Versagensverhalten der Modellfesten. Wird das Versatz-Festensystem in einem untertägigen Bergbau betrachtet, finden Verformungen und Bruchvorgänge in den Festen in den meisten Fällen über längere Zeiträume statt, wodurch der bindemittelverfestigte Versatz die Möglichkeit hat auszuhärten und eventuell Umschlingungsspannungen als Reaktion auf die Verformungen aufzubauen. Dieser Vorgang sollte im Labormaßstab ebenfalls berücksichtigt werden. Im Rahmen der Laborversuche ist es nicht möglich die Belastungsgeschwindigkeit der in-situ Bedingungen nachzuahmen; die Belastungsgeschwindigkeit sollte jedoch im Vergleich zu Standard-Druckversuchen langsamer gewählt werden um dem Versatzmaterial die Möglichkeit zu geben Reaktionsspannungen aufzubauen und dem Bediener eine einfachere Steuerung der Versuche zu ermöglichen. Die ISRM Empfehlungen für einaxiale Druckversuche an Gesteinsproben legen eine Belastungsgeschwindigkeit von 0,5-1MPa/s nahe bzw. dass das Versagen der Probe innerhalb von 5-10 Minuten erfolgen sollte (ISRM, 1974). Diese Empfehlungen gelten für belastungsgesteuerte Versuche. Für die vorliegenden Modellversuche wurde der verformungsgesteuerte Belastungsmodus gewählt, da dieser ein kontrolliertes Zubruchgehen der Modellfesten erlaubt und somit Auskunft über das Nachbruchverhalten der Modellfesten geben kann. Im Vergleich zum belastungsgesteuerten Druckversuch reduziert sich beim verformungsgesteuerten Belastungsmodus die Spannung als Resultat der axialen Verformung der Probenkörper, wodurch die Belastung im Bruchbereich reduziert und die Probe folglich kontrolliert zum Versagen gebracht werden kann. Da Versatz insbesondere das Nachbruchverhalten von Festen beeinflusst, ist es von großer Bedeutung diesen Einfluss auch im Labormaßstab zu beobachten. Aus diesem Grund sind die in den Normen angegebenen Belastungsgeschwindigkeiten für die vorliegenden Versuche nicht relevant. Es wurde entschieden die Versuche mit einer Verformungsrate von 0,1mm/min durchzuführen, da dies ein möglichst

vollständiges Beobachten des Last-Verformungsverhaltens sowohl im Bruchbereich als auch im Nachbruchbereich ermöglicht bei einer gleichzeitigen aufwandsgerechten Versuchsdauer von ungefähr 45 Minuten.

7.5.6 Zusammenfassung – gewählte Untersuchungsparameter und getroffene Vereinfachungen

Ziel der Überlegungen und Recherchen war es einen Versuchsaufbau zu gestalten, welcher den Fokus auf den Einfluss der Verfüllung auf die Festigkeit und das Versagensverhalten der Modellfesten legt. Um Einblick in die Wechselwirkung von Verfüllmaterial und Modellfeste zu erlangen, sollen im Rahmen der Versuche sowohl Druckaufbau im Versatzkörper als auch Querverformung der Modellfeste gemessen werden. Gleichzeitig soll die gewählte Geometrie in Anlehnung an realistische untertägige Verhältnisse, wie sie beispielsweise im Kammer-Festen Abbau im Bergbau Breitenau vorherrschen, festgelegt werden. Die Versuche werden verformungsgesteuert durchgeführt, wobei die Belastungsgeschwindigkeit mit 0,1mm/min festgelegt wurde, da dieser Belastungsmodus ein kontrolliertes Zubruchgehen der Modellfesten ermöglicht und somit auch der Nachbruchbereich der Modellfesten unter dem Einfluss von Versatz untersucht werden kann.

Auf Basis der durchgeführten Studien über die unterschiedlichen möglichen Festenmaterialien und Geometrien wurde unter Berücksichtigung der Versuchsvoraussetzungen ein Versuchsaufbau festgelegt. Im Rahmen der Laborversuche sollen Modellfesten aus grobem Zementmörtel mit einem quadratischen Querschnitt von 40x40mm zugeschnitten werden. Jacobi et al. (1964) und Everling (1964) wählten in ihren Laborversuchen einen Maßstab von 1:10, was mit der für die vorliegende Arbeit zur Verfügung stehenden Infrastruktur nicht umsetzbar ist, weswegen auf einen vergleichsweise kleinen Maßstab zurückgegriffen werden muss. Junker et al. (2004) berichten von typischen Maßstäben für Modellversuche zur Beantwortung gebirgsmechanischer Fragestellungen in der Größenordnung zwischen 1:1 und 1:100. Für die vorliegenden Versuche soll die maximale Modellfestenhöhe 160mm betragen, was einem B/H-Verhältnis von 0,25 entspricht und im Vergleich mit den Festen im Bergbau Breitenau in einem Maßstab von 1:150 erfolgt. Die Verfüllhöhe soll der vollständigen Verfüllung des Hohlraumes entsprechen. Als Versatz soll in einem ersten Schritt Quarzsand mit einer Körnung von 0,1-0,3mm zum Einsatz kommen (loser Versatz, „lv“), da dieses Material eine Verdichtung in Lagen bei gleichzeitiger Messung der Modellfestenquerverformung nach Versuchsdurchführung erlaubt. Zudem kann der Versatzkörper nach dem Versuch einfach entfernt werden, wodurch die gesamte Modellfeste untersucht und ihr

Versagensverhalten analysiert werden kann. Weiters wird eine Mischung aus Sand und Wasser als Versatzmaterial verwendet, welche in einem Verhältnis Sand/Wasser von 3 hergestellt wird und eine Art „hydraulischer Versatz“ bzw. Spülversatz darstellen soll („lvf“). Um den Einfluss von bindemittelverfestigtem Versatz im Vergleich zu losem Versatz auf das Versagensverhalten von Festen beurteilen zu können, kommt in weiterer Folge ein bindemittelverfestigter Versatz aus Sand, Zement und Wasser in einem Verhältnis von 9:1:2,9 zum Einsatz („bmv“) ($W/B=2,9$), was üblich für Versatzmaterialien ist. Als Zement wird ein CEMII/A-M(S-L) 42,5N WT38 der Marke W&P Tauern Zement verwendet.

7.6 Versuchsaufbau

Zur Nachstellung des Gebirgsverbandes dient ein Rahmen aus Stahl (Abbildung 72). In diesem Rahmen wird die Modellfeste der Maße 40x40x160mm befestigt (Abbildung 72 rotes Prisma), welche von den beschriebenen unterschiedlichen Versatzmaterialien umgeben sein soll und unter Druck bis zum Versagen belastet wird. Während des Versuchs sollen der Druckaufbau im Versatzkörper mittels Druckmessfolien sowie die maximale Querverformung der Modellfesten gemessen werden.

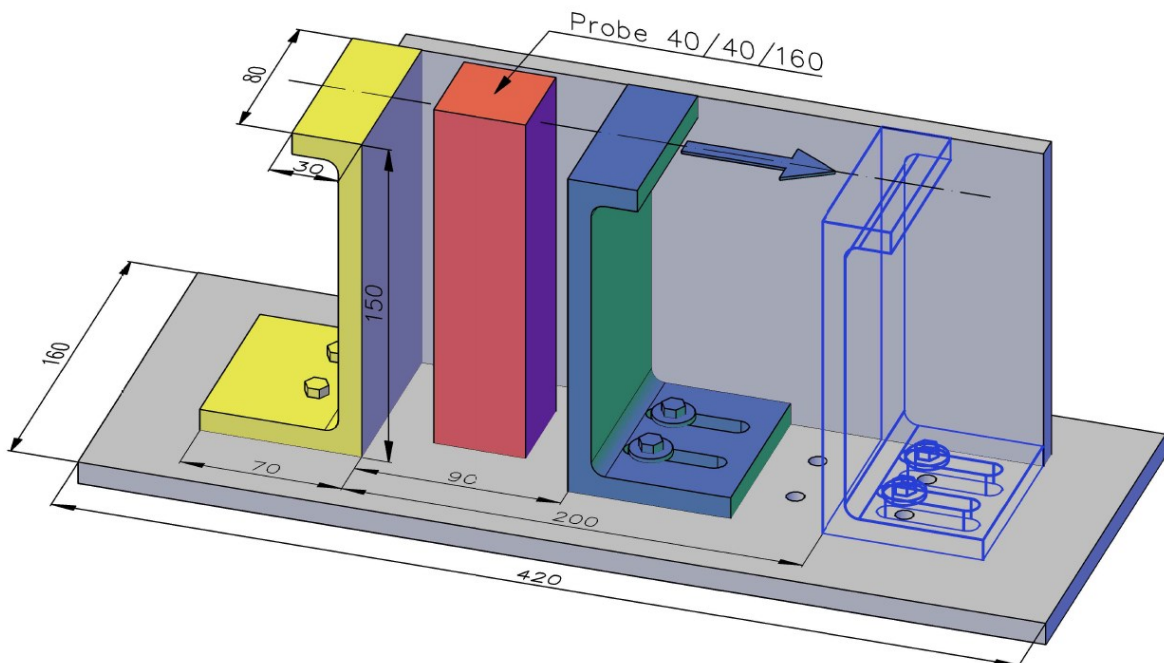


Abbildung 72: Skizze des Versuchsaufbaus

7.7 Verwendete Messtechnik

Während der Modellfestenbelastung soll der Druckaufbau im Versatzkörper aufgenommen werden. Zu diesem Zweck werden Prescale Druckmessfolien der Marke Fujifilm verwendet. Prescale Druckmessfolien wurden entwickelt um Druckverteilungen zwischen Bauteilen aufzunehmen. In Mikrokapseln eingebrachtes Färbematerial reagiert mit einem Farentwickler und erzeugt rote Farbflächen auf dem Folienträger, wenn Druck auf die Folie ausgeübt wird. Die Farbdichte verändert sich mit dem aufgewendeten Druckniveau. (Dichte: 0,1 ~ 1,4) Prescale Druckmessfolien sind in unterschiedlichen Empfindlichkeiten verfügbar. Es wird ein Druckbereich von 0,2N/mm² bis zu 300N/mm² abgedeckt. Je nach Belastungsgröße sind die Folien als einlagige oder zweilagige Druckmessfolien ausgeführt, wobei die Größe der Druckkraft durch die Intensität der Verfärbung der Druckmessfolie sichtbar wird.

Bei der einlagigen Folie befinden sich farbgefüllte Mikrokapseln und ein Entwickler auf einer Folienschicht. Unter einer definierten Druckbelastung platzen die Farbkapseln auf und verfärben die Folie, so dass die eingefärbten Bereiche als Maß für die Druckbelastung ausgewertet werden können. (Fujifilm Europe GmbH, 2018)

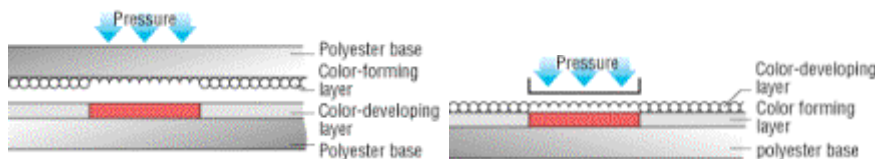


Abbildung 73: Einlagige Druckmessfolie (links) und zweilagige Druckmessfolie (rechts)
(<https://www.fujifilm.eu/de/produkte/industrieprodukte/prescale/uebersicht>, 2018)

Bei der zweilagigen Ausführung trägt die erste Folienlage eine Schicht unterschiedlich großer Mikrokapseln, die ebenfalls unter einer entsprechenden Flächenpressung aufplatzen und eine Flüssigkeit freigeben, die mit der hochempfindlichen Farbbildungsschicht der zweiten Lage reagiert und eine druckabhängige Rotfärbung hervorruft. (Fujifilm Europe GmbH, 2018)

Die Messung der Querverformung der Festen soll durch Messstifte erfolgen, welche vor Beginn des Versuches an der Modellfeste angelegt werden. Die Position der Stifte wird vor sowie nach dem Druckversuch bestimmt um die Querverformung der Modellfeste aufzunehmen. Insgesamt sind je 5 Messstifte auf beiden Modellfestenseiten angebracht. (Abbildung 74) Die Messung der Position der Messstifte erfolgt mit einer digitalen Schublehre.

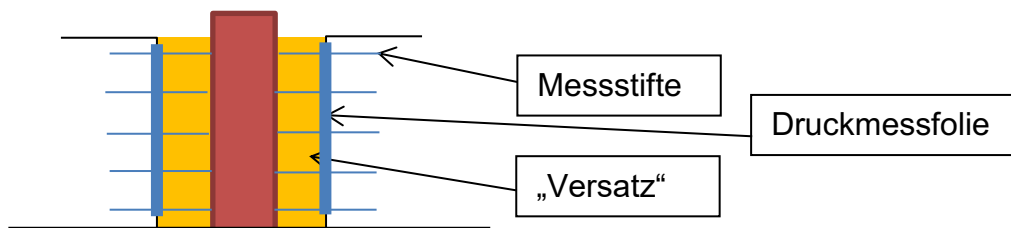


Abbildung 74: Messprinzipaufbau

7.8 Modellfestenvorbereitung und Prüfablauf

Die Herstellung der Modellfesten erfolgt durch Zuschneiden der Fertigmörtelteile auf Geometrien von 40x40x160mm. (Abbildung 75)

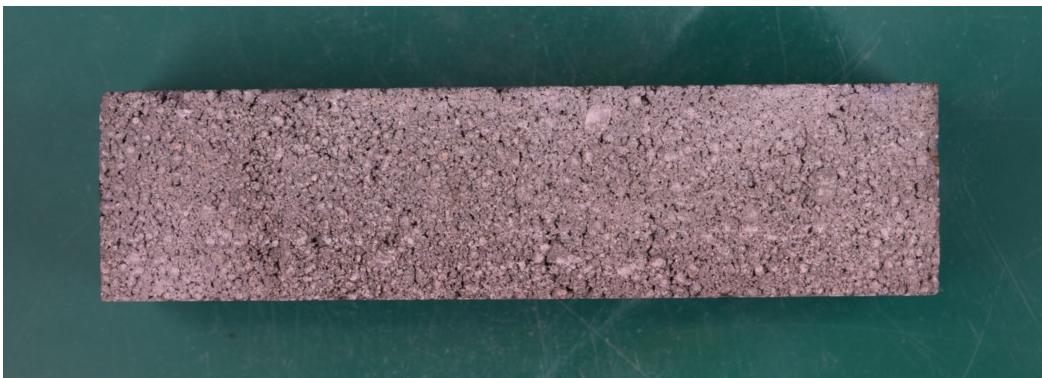


Abbildung 75: Modellfeste aus Fertigmörtel

Die Endflächen der Modellfesten werden nach dem Schneidevorgang planparallel gefräst. In weiterer Folge werden die Modellfesten in dem beschriebenen Stahlrahmen platziert.



Abbildung 76: Modellfeste in Stahlrahmen

Die Modellfesten werden mittels einer Schablone mittig in den Rahmen gestellt um bei allen Versuchen dieselbe Versatzeinbettung von allen Seiten zu gewährleisten (Abbildung 77).

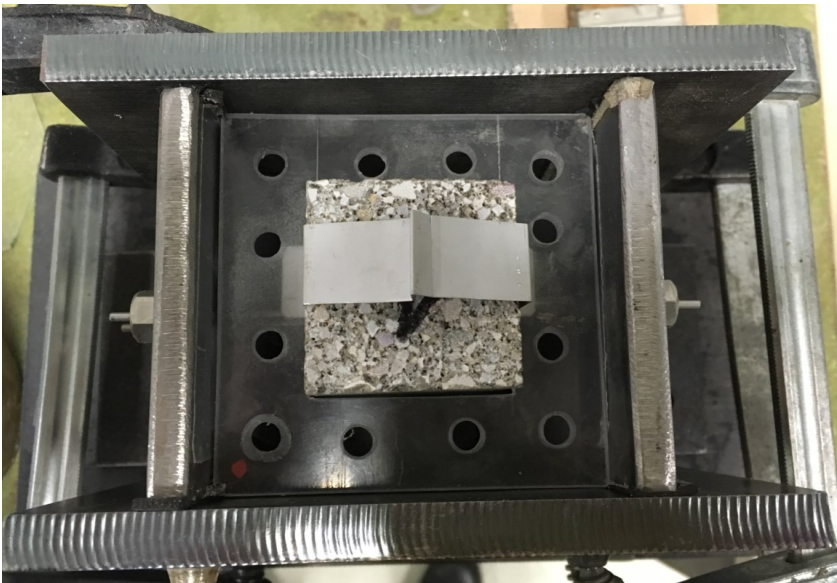


Abbildung 77: Modellfeste in Stahlrahmen mit Positionierschablone

Die Messstifte werden an die Modellfeste angelegt und diese somit im Rahmen fixiert.

Als nächster Schritt kann der Versatz eingebracht werden. Wie bereits beschrieben, muss die Versatzeinbringung in Lagen erfolgen, welche verdichtet werden, um die natürliche Kompaktion des Versatzes unter seinem Eigengewicht, welche in einer realen Abbausituation stattfindet, zu gewährleisten. Kommt loser Versatz (Sand der Körnung 0,1-0,3mm) zum Einsatz, wird dieser in drei Lagen eingebracht, wobei die erste Lage insgesamt 4 Minuten lang und die zweite Lage 2 Minuten lang auf einer Siebmaschine (Abbildung 78) verdichtet werden. Die oberste Lage wird unverdichtet eingebracht.



Abbildung 78: Siebmaschine zum Verdichten des Versatzmaterials

Im Falle von hydraulischem und bindemittelverfestigtem Versatz wird der Versatz ebenfalls in 3 Lagen eingebracht, wobei hier die doppelte Verdichtungszeit gewählt wurde. Die unterste Versatzlage wird hier in Summe 10 Minuten, die Zweite Lage 6 Minuten und die oberste Versatzlage 2 Minuten lang verdichtet.

In weiterer Folge kann die Position der Messstifte „vor Versuch“ bestimmt und die Modellfeste unter einaxialem Druck in einer hydraulischen Prüfpresse der Marke MTS (Abbildung 79) belastet werden. Um dem bindemittelverfestigtem Versatz die Möglichkeit zu geben eine gewisse Festigkeit aufzubauen, muss dieser für unterschiedliche Dauer (24h, 48h, 72h) aushärten und kann nach der jeweiligen Aushärtedauer getestet werden.

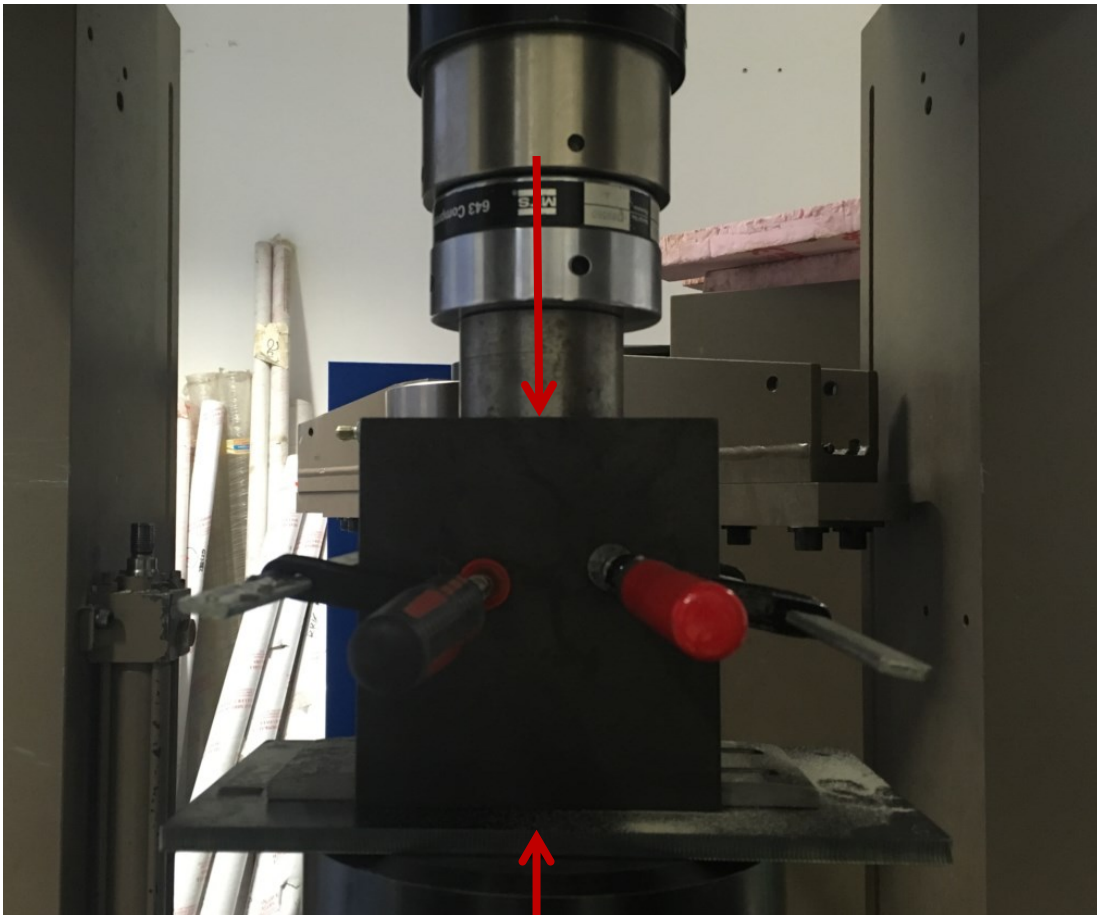


Abbildung 79: Rahmen in der Prüfpresse während des Versuchs

Die Versuche werden nach axialem Zylinderweg verformungsgesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,1mm/min durchgeführt. Diese Belastungsart ermöglicht die Beobachtung des Nachbruchverhaltens der Modellfesten. Als Grenzwert für den axialen Zylinderweg wurden 4mm axiale Verformung gewählt, was 2,5% der Modellfestenhöhe ausmacht.

In den nachfolgenden Abschnitten werden nun die Ergebnisse der Modellversuche in Bezug auf die einzelnen Beobachtungsparameter, die da wären: Einfluss des Versatzes auf die maximale Festigkeit, die Restfestigkeit sowie den Druckaufbau in Relation zur maximalen Querverformung der Modellfesten (Bestimmung mittels Messstiften nach den Versuchen), separat angeführt. In einem weiteren Abschnitt wird gesondert auf den Einfluss der Bindemittelzugabe auf die Versatzwirkung sowie die Aushärtezeit des bindemittelverfestigten Versatzes eingegangen.

7.9 Ergebnisse

Insgesamt wurden 11 Versuche mit losem Versatz, 5 Versuche mit hydraulischem Versatz sowie 13 Versuche mit bindemittelverfestigtem Versatz (eine Versatzmischung mit unterschiedlichen Aushärtezeiten) durchgeführt, wobei hier 4 Modellfesten nach 24h mit doppelter Verdichtungszeit, 2 Modellfesten nach 24h mit einfacher Verdichtungszeit (wie bei losem Versatz), 4 Modellfesten nach 48h und 3 Modellfesten nach 72h jeweils mit doppelter Verdichtungszeit getestet wurden (Tabelle 4). Als Referenz wurden ebenfalls Modellfesten ohne Versatz, Modellfesten nach 24 stündiger Lagerung im Wasserbad und eine Modellfeste in Zement als Versatzmaterial mit einem W/Z-Wert von 0,5 getestet. Die Modellfesten ohne Versatz geben Auskunft über den Einfluss von Versatz im Unterschied zu Modellfesten ohne Versatz, die Modellfeste in Zement soll eine Bergfeste in einem hochfesten Versatzkörper darstellen und zeigen, welchen Einfluss ein hochfester Versatzkörper auf das Versagensverhalten von Festen hat und welche Bedeutung der Bindemittelmenge im Versatz zukommt. Die feuchten Modellfesten sollen zeigen, ob sich die Feuchtigkeit des Versatzkörpers bei bindemittelhaltigem Versatz auf das Verformungsverhalten der Modellfesten auswirkt. Die nachfolgenden Abschnitte dienen der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt in weiterer Folge in Kapitel 8 „Schlussfolgerungen, Ableitungen und Erkenntnisse über die Wechselwirkung von Gebirge und Versatz“.

Tabelle 4: Überblick über alle durchgeführten Versuche

Probe	Maximale Festigkeit	Restfestigkeit (3mm)	Prozentueller Anteil R/E	Legende	Anzahl
MV_1_lv	19,820954	12,3730804	0,624242424	24h	4
MV_2_lv	19,321938	7,07803636	0,366321244	48h	4
MV_3_lv	28,147458	3,69966588	0,131438721	72h	3
MV_4_lv	25,659646	3	0,116915097	24h einfach verdichtet	2
MV_5_lv	27,743348	6,9	0,248708267	lose	11
MV_6_lv	29,307876	5,95	0,2030171	Wasser+Sand	5
MV_7_lv	25,089146	5,58	0,222406932	Zement	1
MV_8_lv	31,36934	6,4	0,204020869		
MV_10_lv	28,38369	6,4	0,225481606		
MV_11_lv	29,473596	12,8815716	0,437054632		
MV_12_lv	29,885838	6,38	0,21347904		
MV_13_bmv	25,719702	7,57	0,294326894		
MV_14_bmv	32,430944	13,9	0,428603003		
MV_15_z	31,160352	13,14	0,421689716		
MV_16_bmv	26,413	12,3	0,465679779		
MV_17_bmv	22,551724	14,18	0,628776762		

MV_18_bmv	27,764518	15,13	0,544940128
MV_19_bmv	25,24428	18,4	0,728877987
MV_20_bmv	24,028666	15,7	0,653386251
MV_21_lvf	24,259188	13,1	0,540001586
MV_22_bmv	21,664296	6,93	0,319881154
MV_23_lvf	23,066778	12,24	0,530633277
MV_24_lvf	20,26518	4,44	0,219095019
MV_25_bmv	32,477058	15,78	0,485881449
MV_26_lvf	19,131186	8,2	0,428619533
MV_27_bmv	27,960766	13,81	0,493906354
MV_28_lvf	23,87784	13,76	0,57626653
MV_29_bmv	21,706312	13,41	0,617792649
MV_30_bmv	32,479872	18,25	0,561886451
MV_31_bmv	30,895642	16,43	0,531790212

In den nachfolgenden Abschnitten werden zuerst das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten ohne Versatz diskutiert sowie die Eigenschaften der verwendeten Versatzmaterialien bestimmt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen kann die Diskussion der Modellfestenversuche erfolgen.

7.9.1 Last-Verformungsverhalten der Modellfesten ohne Versatz

Um den Einfluss von Versatz auf das Versagensverhalten unter einaxialem Druck beurteilen zu können, muss in einem ersten Schritt das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten ohne Versatz ermittelt werden. Da es sich bei den Fertigmörtelteilen um bis zu einem gewissen Grad inhomogenes Material mit einer maximalen Korngröße von bis zu 10mm handelt (Abbildung 80), muss eine große Anzahl von Modellfesten getestet werden, um so genannte „Ausreißer“ im Last-Verformungsverhalten sowie in der maximalen Festigkeit auszugleichen. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 31 Modellfesten unter einaxialem Druck belastet. Die Modellfesten wurden aus verschiedenen Blöcken zugeschnitten, was die Untersuchung einiger Modellfesten von unterschiedlichen Blöcken notwendig machte. Da der Versatz in den Rahmen eingerüttelt wird und die Modellfesten beim Einsatz von Versatz während der Versuche durch das Rütteln negativ beeinflusst werden könnten, wurden zusätzlich einige Modellfesten für dieselbe Zeit den Erschütterungen auf der Siebmaschine ausgesetzt und in weiterer Folge getestet. Die Modellfesten wurden außerdem im leeren Rahmen getestet um einen Einfluss der Testinfrastruktur ausschließen zu können. Die Modellfesten, welche in bindemittelhaltigem Versatz eingebettet waren, wurden der Feuchtigkeit der Versatzmischung ausgesetzt. Dies erforderte das Testen von feuchten

Modellfesten, um den Einfluss der Feuchtigkeit auf das Versagensverhalten bzw. die Festigkeit ausschließen zu können.



Abbildung 80: Modellfestenmaterial

Im nachfolgenden Diagramm sind die Ergebnisse einiger Untersuchungen des Modellfestenmaterials angeführt. Die Kürzel „Rr“ und „Rf“ stehen für „Modellfeste im Rahmen, gerüttelt“ sowie „Modellfeste im Rahmen, feucht“.

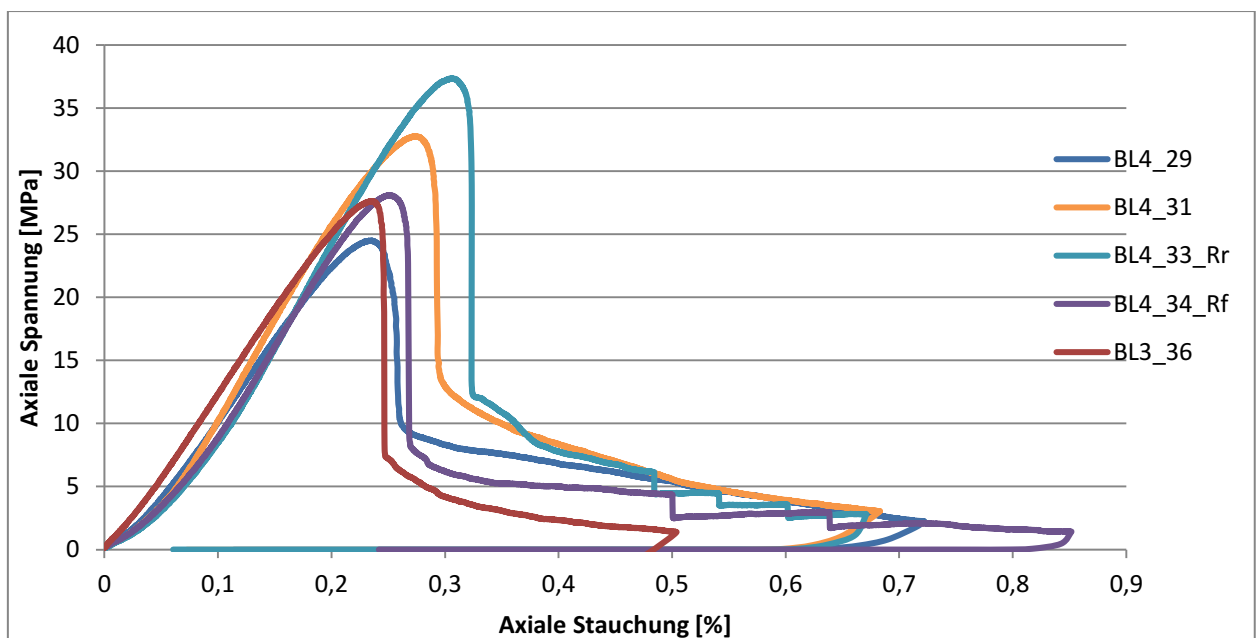


Abbildung 81: Last-Verformungsverhalten der Modellfesten ohne Versatz

Die Ergebnisse zeigen, dass das Rütteln keinen Einfluss auf das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten hat, die Feuchtigkeit jedoch die maximale Festigkeit der Modellfesten vermindert. (Abbildung 81-83).

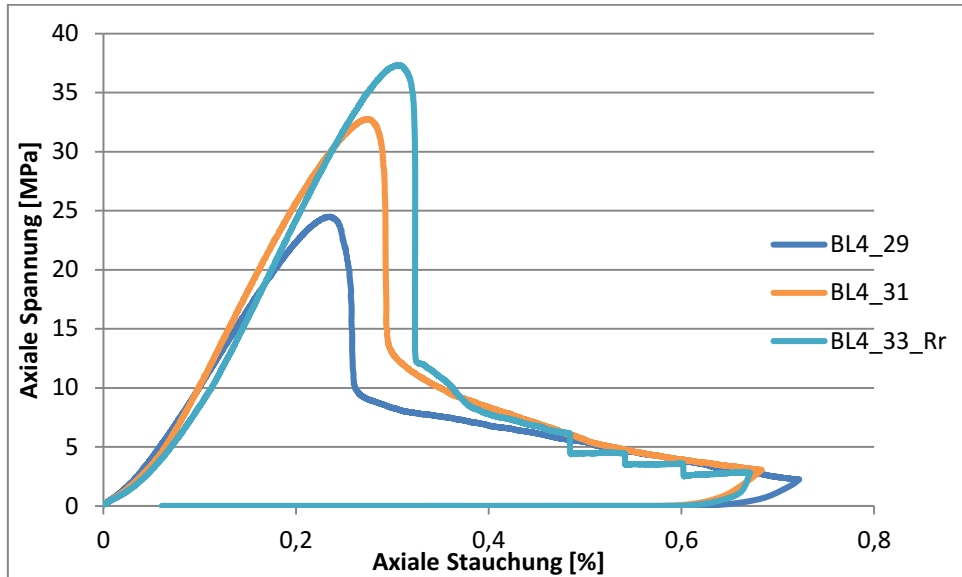


Abbildung 82: Vergleich gerüttelte „_Rr“ und nicht gerüttelte Modellfeste

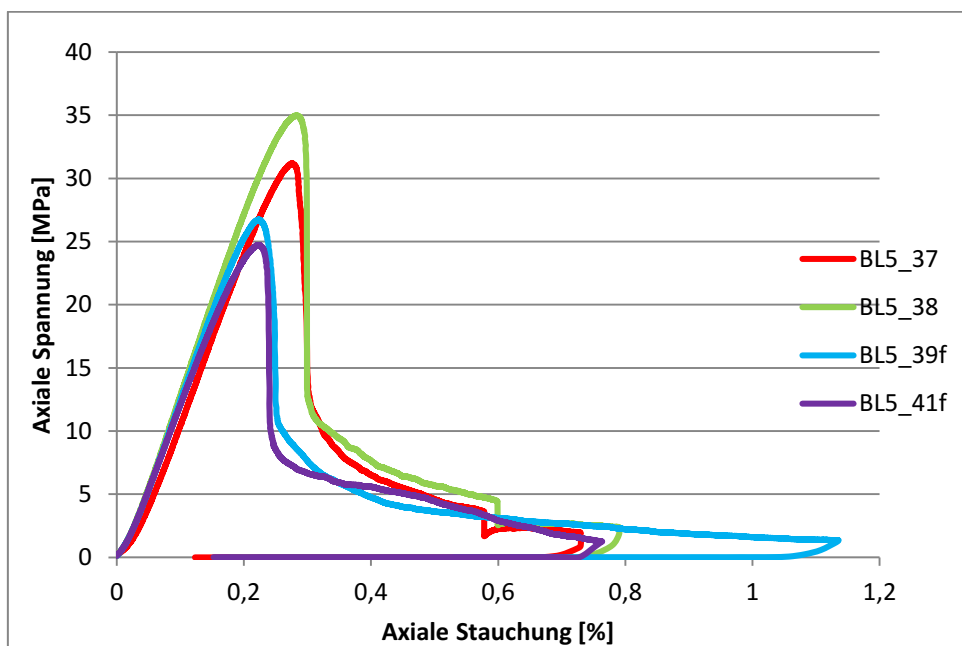


Abbildung 83: Vergleich feuchte Modellfeste „_f“ mit trockenen Modellfesten

Grundsätzlich streuen die einaxialen Druckfestigkeiten zwischen 21,64 und 37,34MPa, wobei der Großteil der Modellfesten einaxiale Druckfestigkeiten von 28-30MPa aufweisen und Modellfeste 1 mit 21,64MPa und Modellfeste 33 mit 37,34MPa Ausreißer darstellen. Aus 25 getesteten trockenen Modellfesten ging

eine durchschnittliche einaxiale Druckfestigkeit von 28,69MPa hervor (rote Linie in Abbildung 84).

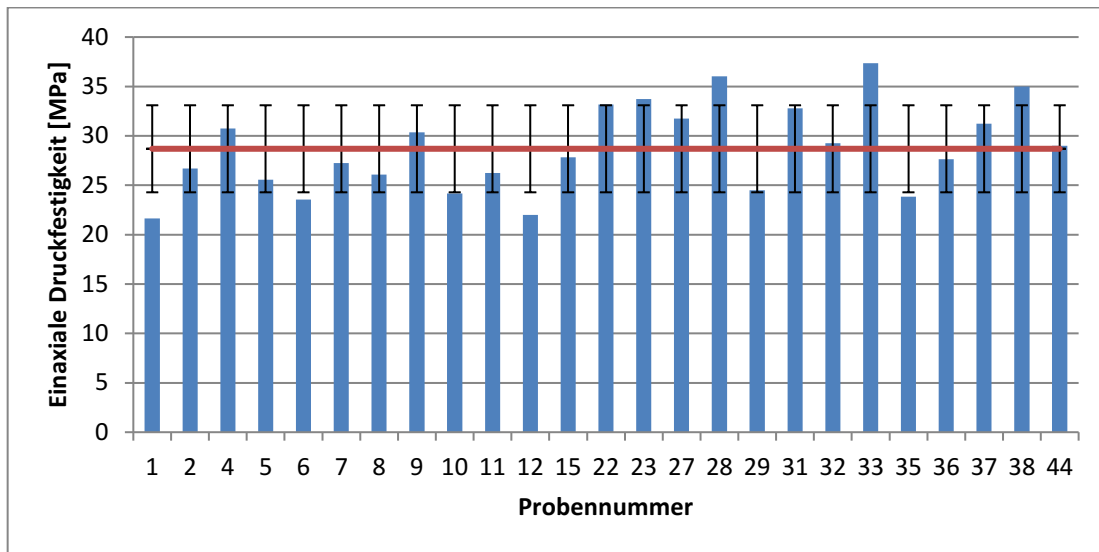


Abbildung 84: Einaxiale Druckfestigkeiten aller getesteten trockenen Modellfesten ohne Versatz

Die einaxialen Druckfestigkeiten der feuchten Modellfesten liegen im Durchschnitt bei 27,79MPa, und damit knapp unter der durchschnittlichen Festigkeit der trockenen Modellfesten. Wie die genaue Analyse der feuchten Modellfesten eines einzelnen Blockes im Vergleich zu den trockenen Modellfesten desselben Blockes zeigt, sind die einaxialen Druckfestigkeiten der feuchten Modellfesten im Vergleich zu den trockenen Modellfesten im Durchschnitt geringfügig geringer (Abbildungen 84 und 85).

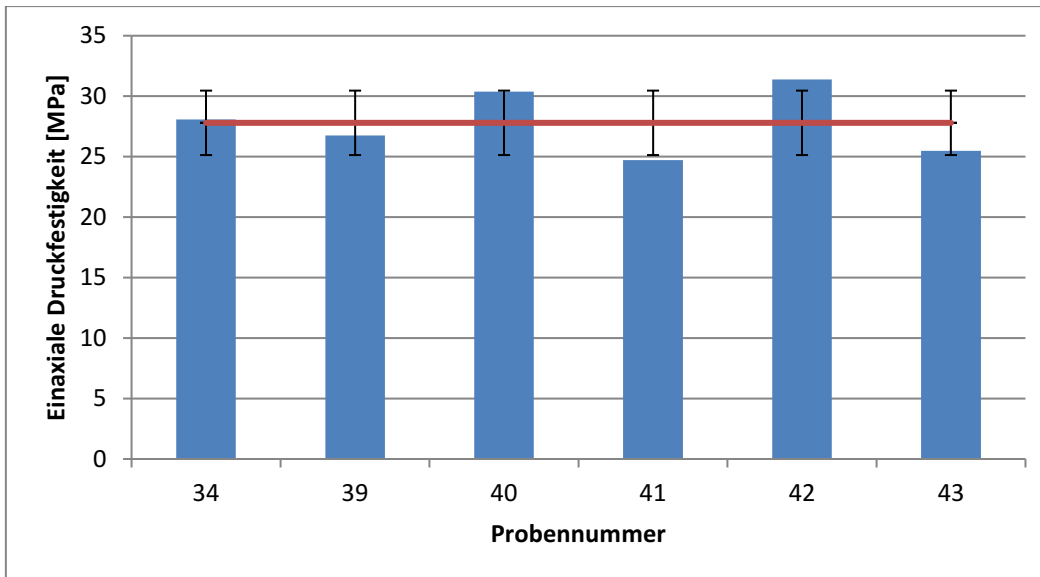


Abbildung 85: Einaxiale Druckfestigkeiten aller getesteten feuchten Modellfesten ohne Versatz

7.9.2 Versatzeigenschaften

Der lose Versatz, der hydraulische Versatz und auch der bindemittelverfestigte Versatz wurden in Lagen verdichtet eingebracht um die natürliche Kompaktion des Versatzkörpers durch sein Eigengewicht während der Einbringung nachzustellen. Zur Feststellung seines Last-Verformungsverhaltens wurde der Quarzsand (mit und ohne Wasser) in einen Stahlzylinder eingebracht und unter Druck belastet. Hier wurde einerseits der unverdichtete Versatz (Abbildung 86) sowie der in Lagen verdichtete Sand unter einaxialem Druck belastet. Die Abbildungen 87 und 88 zeigen einen Vergleich des Last-Verformungsverhaltens des verdichteten und des nicht verdichteten Sandes mit und ohne Wasserzugabe.

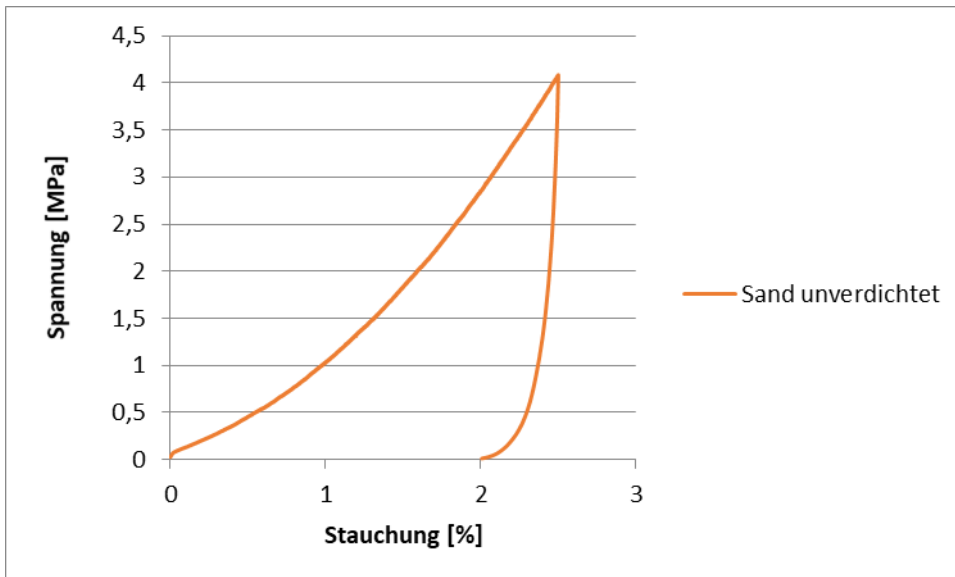


Abbildung 86: Last-Verformungsverhalten des unverdichteten Sandes

In den Abbildungen 87 und 88 ist klar erkennbar, dass der verdichtete Versatz (mit und ohne Wasserzugabe) steifer reagiert als der nicht verdichtete Sand und mehr Last aufnehmen kann, als der lose Sand. Hier muss angemerkt werden, dass sich im Rahmen des durchgeführten Versuches sehr hohe Festigkeiten der Versatzmaterialien ergeben haben, wie aus den nachfolgenden Diagrammen hervorgeht. Diese Festigkeiten können jedoch nicht als repräsentative Festigkeiten für die Versatzmaterialien herangezogen werden, da sie auf den Versuchsaufbau zurückzuführen sind und lediglich der Feststellung des Verhaltens des Versatzes unter Belastung dienen.

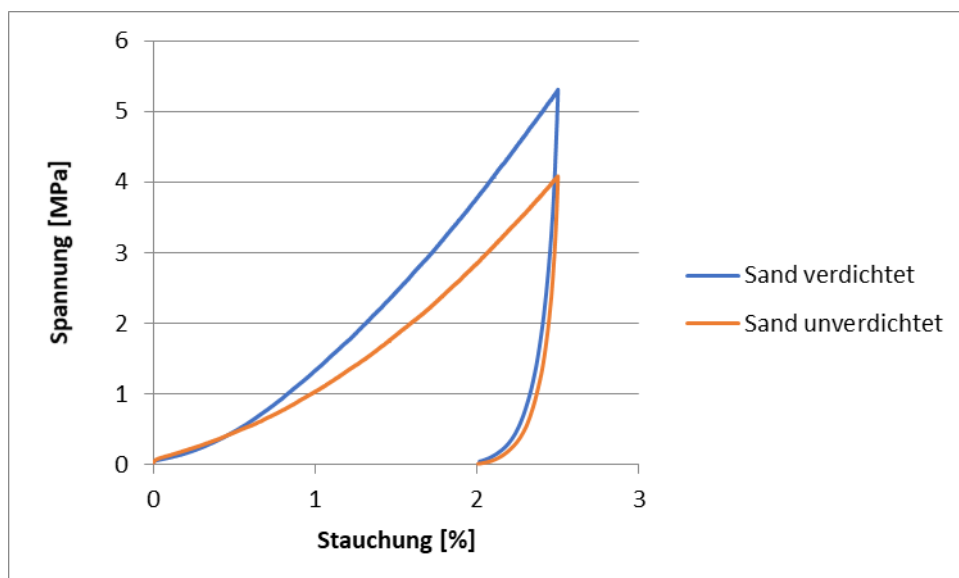


Abbildung 87: Vergleich des Last-Verformungsverhaltens des unverdichteten und des in Lagen verdichteten Sandes

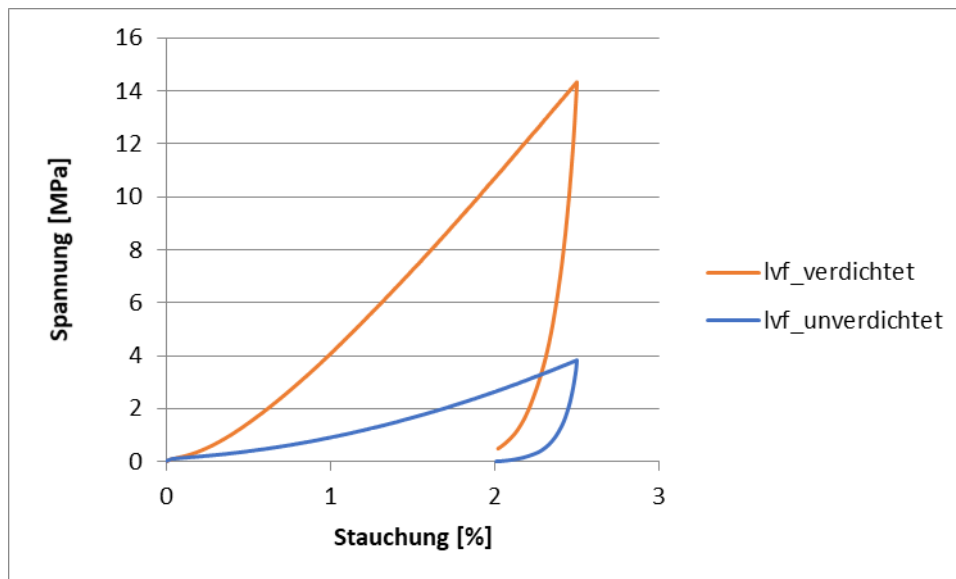


Abbildung 88: Vergleich des Last-Verformungsverhaltens des unverdichteten und des verdichteten hydraulischen Versatzes („lvf“ – Sand:Wasser=3:1)

Auch der bindemittelverfestigte Versatz wurde auf sein Last-Verformungsverhalten untersucht, welches in den Abbildungen 89-99 dargestellt ist. Die Versatzmischungen wurden in geschlitzte zylindrische Formen aus Kunststoff gegossen und nach 24h (Abbildungen 89-91), 48h (Abbildungen 92-94) und 72h Aushärtezeit (Abbildung 95-97) ausgeschalt und unter einaxialem Druck belastet. Die Versatzmischungen wurden einerseits in Lagen kompaktiert (wie bei den Modellfestenversuchen zum Zwecke der Berücksichtigung der natürlichen Kompaktion des Versatzkörpers) sowie nicht kompaktiert untersucht, wobei maximale Festigkeiten von 830kPa (nach 72h kompaktiert) erzielt werden konnten.

Grundsätzlich kann bei allen Versatzuntersuchungen eine gewisse Streuung der Versuchsergebnisse beobachtet werden. Dies dürfte auf die natürliche Entmischung des Versatzmaterials während der Einbringung in die Probenformen zurückzuführen sein. Werden nun die Ergebnisse der Versuche nach 24h Aushärtezeit betrachtet, zeigen sich relativ konstante maximale Festigkeiten mit 150-185kPa bei Stauchungen von 0,2-0,7% der Probenhöhe (Test von 3 Proben der gleichen Mischung, Darstellung in Abbildung 89).

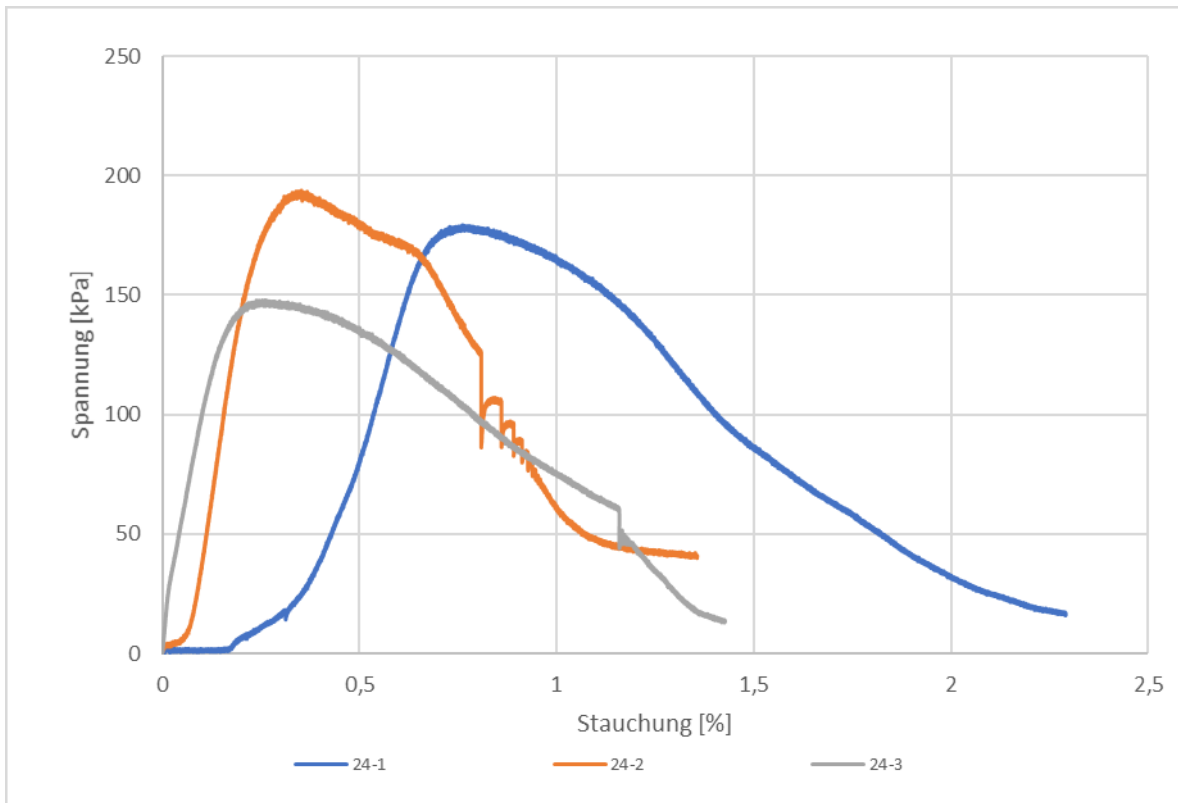


Abbildung 89: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 24 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

Durch die Kompaktion des Versatzes mittels Einrüttelns durch die Vibration auf einem Siebturm (genaue Erläuterung in Kapitel 7.8) konnte nach 24 Stunden Aushärtezeit kein erheblicher Einfluss auf die maximale Festigkeit der Proben sowie auf den E-Modul beobachtet werden. (Test von je 3 Proben, Darstellung in Abbildung 91)

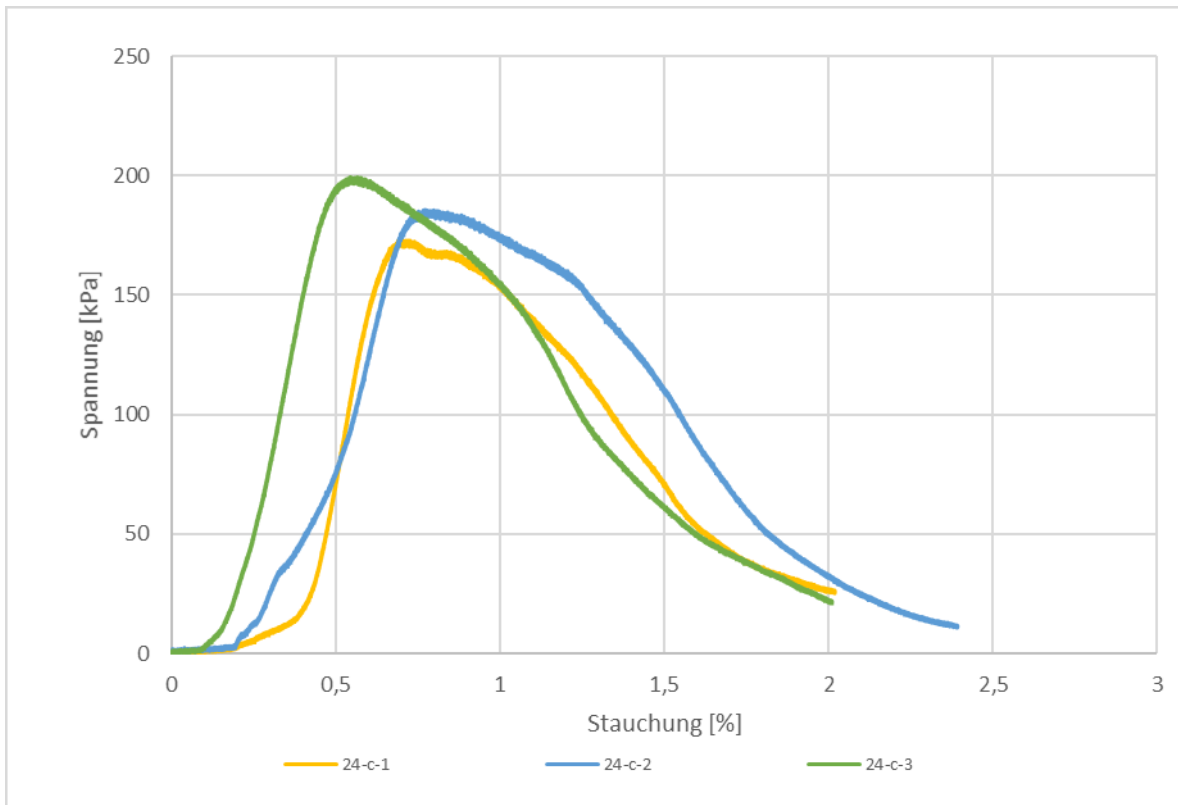


Abbildung 90: Last-Verformungsverhalten des kompaktierten bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 24 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

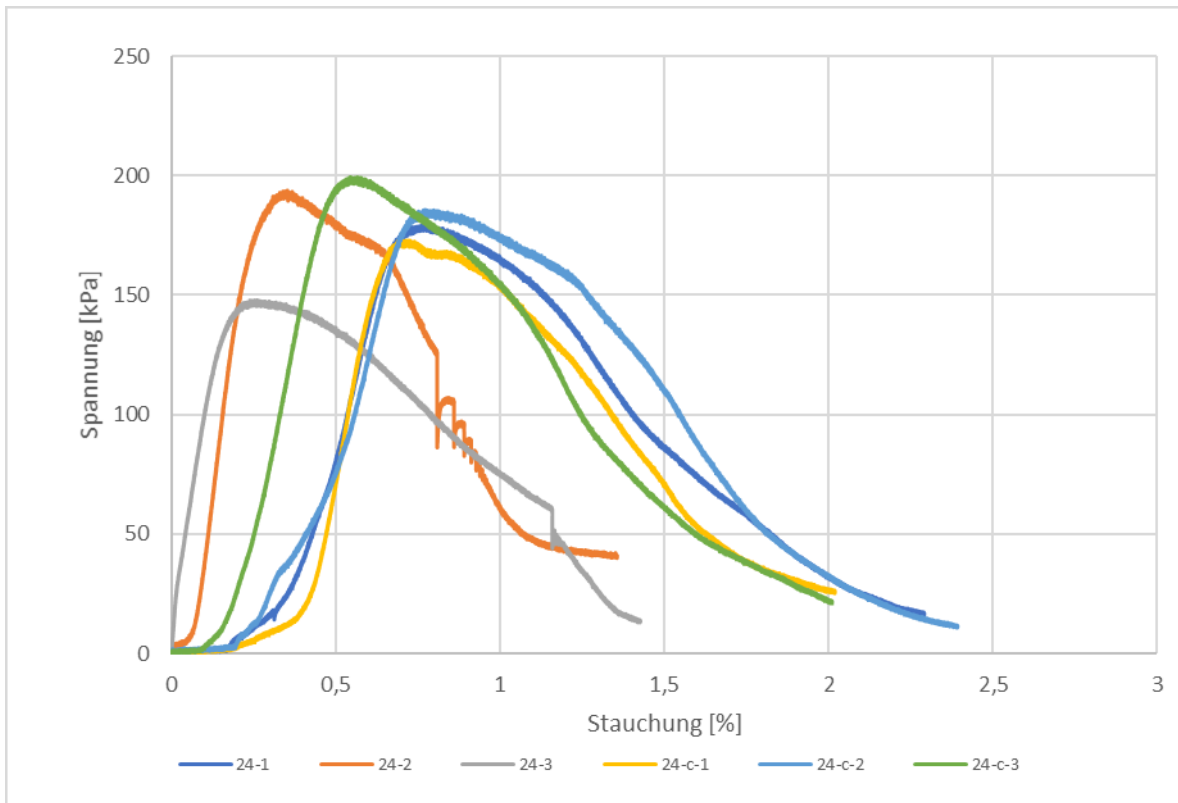


Abbildung 91: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 24 Stunden Aushärtezeit – Vergleich kompaktiert „c“ und nicht kompaktiert (je 3 Proben 24-1 bis 24-3 bzw. 24-c-1 bis 24-c-3, „bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

Das Last-Verformungsverhalten der nach 48h Aushärtezeit getesteten Proben zeigt deutlich höhere maximale Festigkeiten (bis ca. 400kPa beim nicht kompaktierten und bis zu 700kPa beim kompaktierten Versatz) bei Stauchungen von ca. 1% der Probenhöhe beim nicht kompaktierten und 0,25% Stauchung beim kompaktierten Versatz. Hier zeigt sich, dass das Kompaktieren zu höheren maximalen Festigkeiten und zu höheren E-Moduli des Versatzes führt (Test von je 3 Proben kompaktiert und nicht kompaktiert, Vergleich in Abbildung 94).

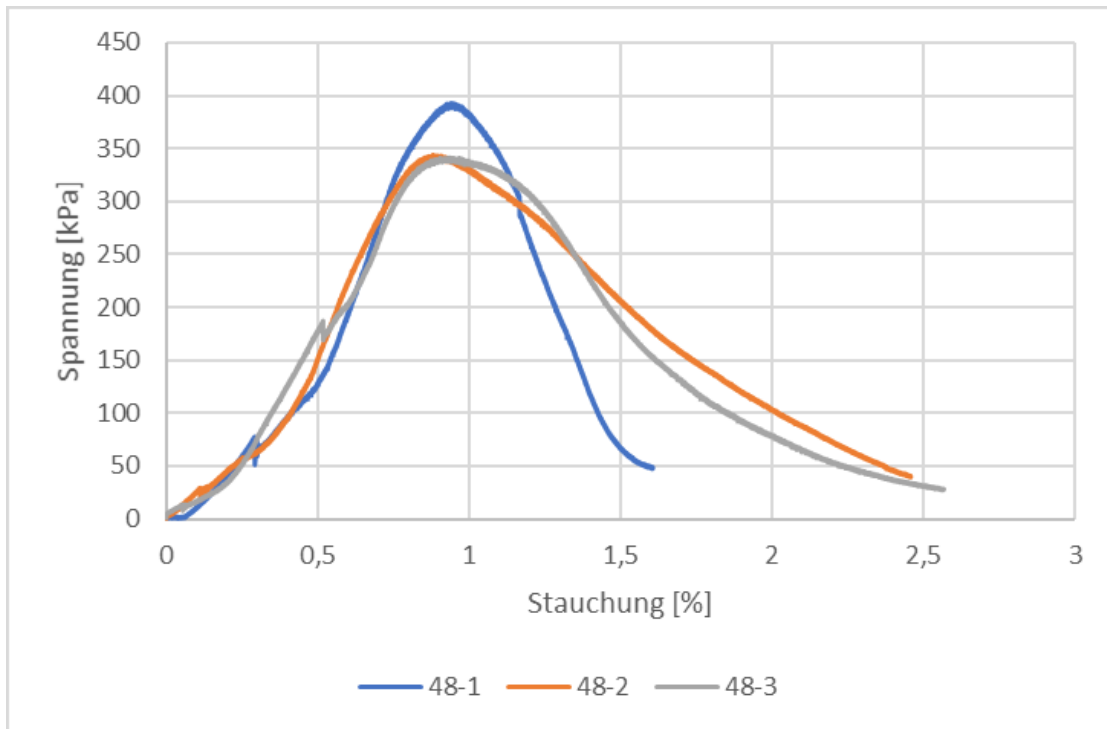


Abbildung 92: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 48 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

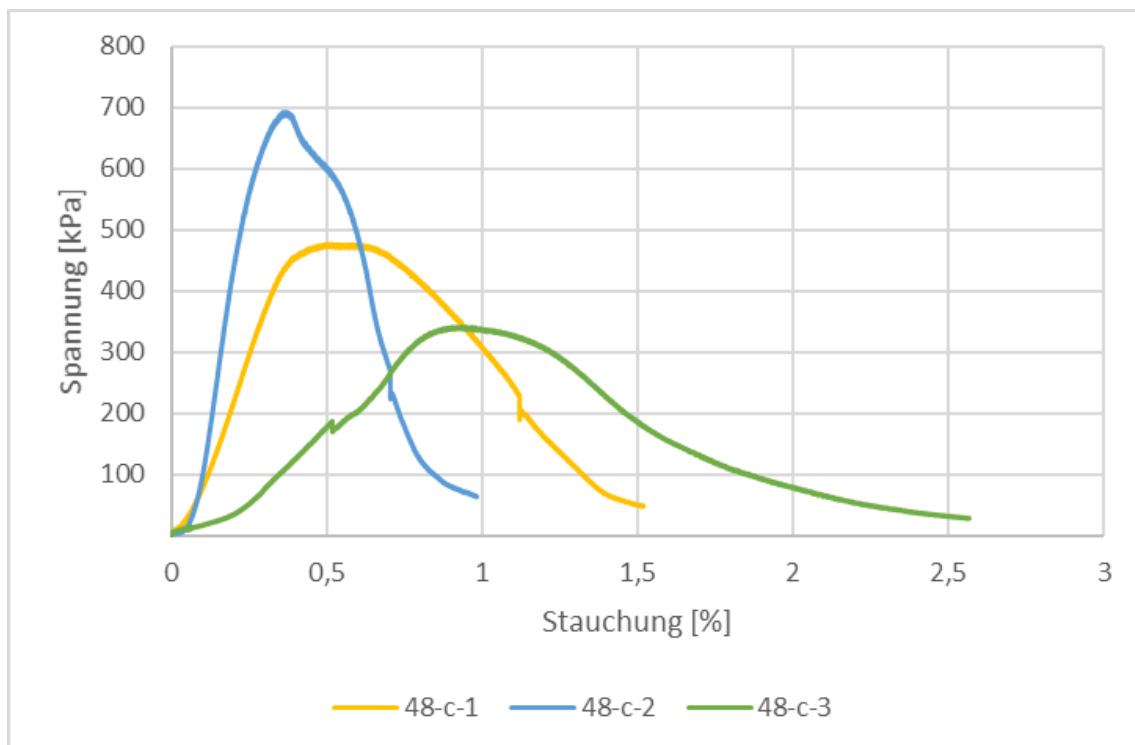


Abbildung 93: Last-Verformungsverhalten des kompaktierten bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 48 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

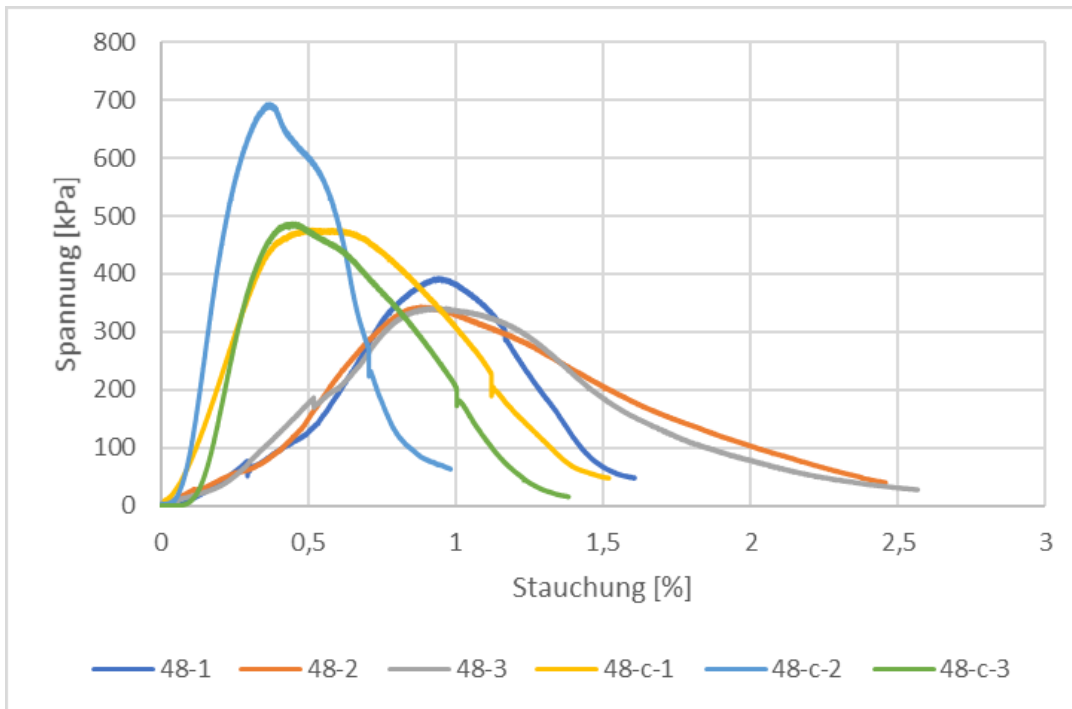


Abbildung 94: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 48 Stunden Aushärtezeit – Vergleich kompaktiert „c“ und nicht kompaktiert (je 3 Proben 48-1 bis 48-3 bzw. 48-c-1 bis 48-c-3, „bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

Der Vergleich der Versatzproben nach 72h Aushärtezeit (kompaktiert und nicht kompaktiert) liefert keine eindeutigen Ergebnisse, da die nicht verdichteten Proben maximale Festigkeiten von 700kPa bei einer Stauchung von ca. 0,5% aufweisen (Ausnahme Probe 72-2), und sich bei den verdichteten Proben zwei Mischungen ähnlich verhalten, wie nicht verdichtete Proben und zwei Mischungen deutlich höhere Festigkeiten aufweisen (800kPa bei einer Stauchung von 0,25%) (Abbildung 97).

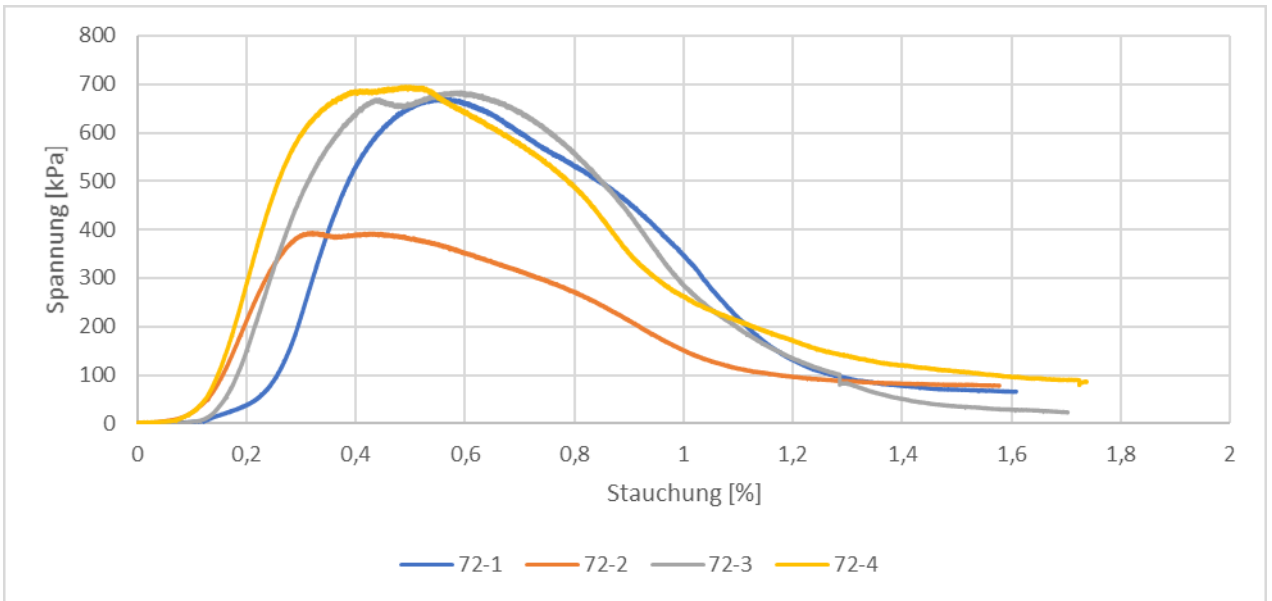


Abbildung 95: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 72 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

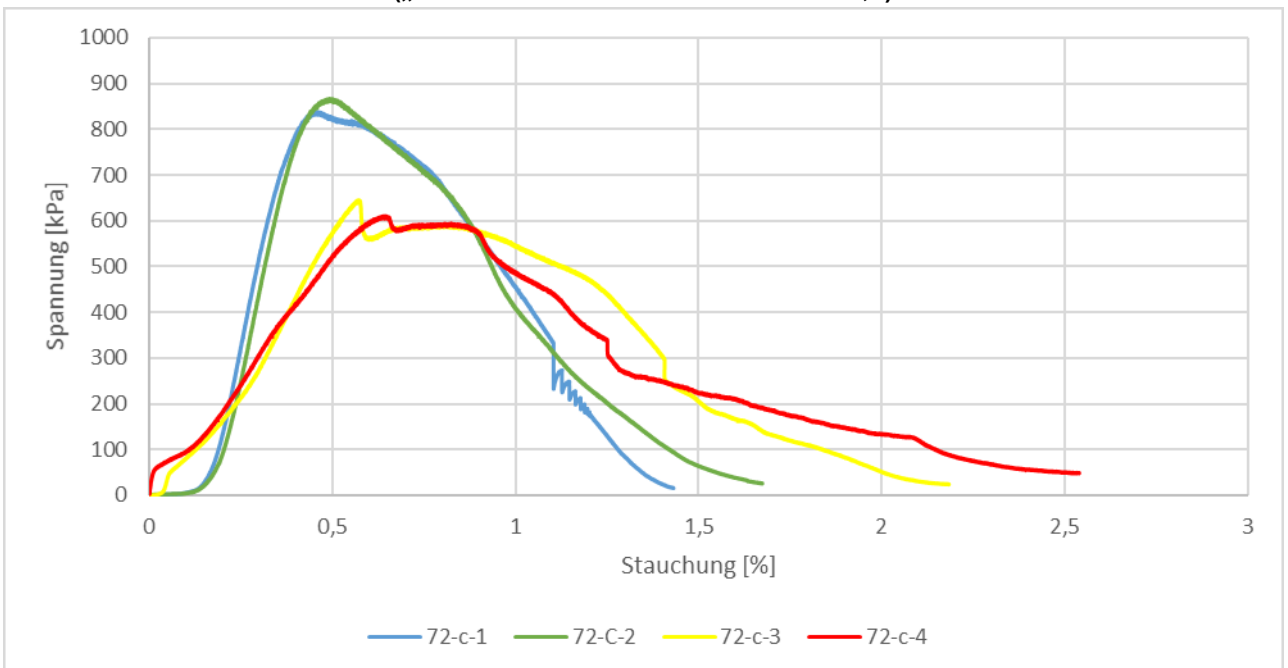


Abbildung 96: Last-Verformungsverhalten des kompaktierten bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 72 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

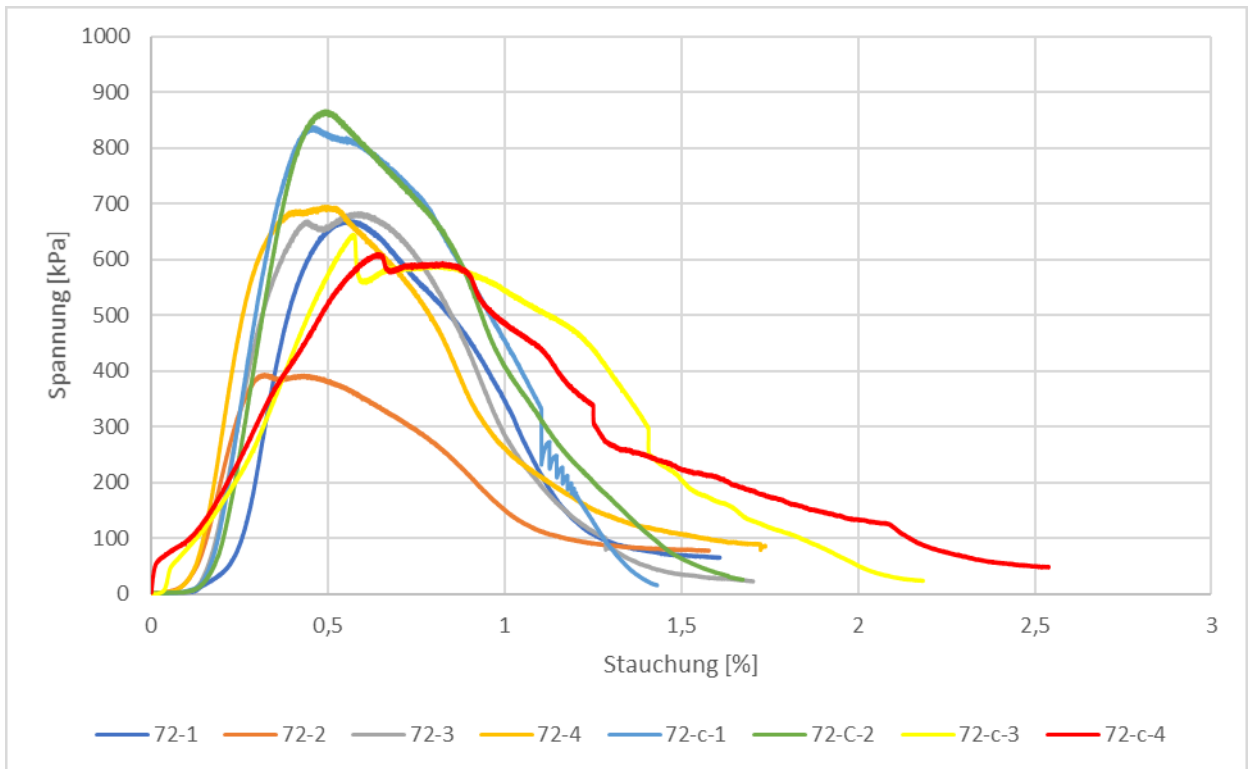


Abbildung 97: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 72 Stunden Aushärtezeit – Vergleich kompaktiert „c“ und nicht kompaktiert (je 4 Proben 72-1 bis 72-4 bzw. 72-c-1 bis 72-c-4, „bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

Bei der Analyse des Einflusses der Aushärtezeit, welche eine bedeutsame Rolle für die Interpretation der Modellfestenversuche spielt, wurden die kompaktierten Versatzproben genauer untersucht, da der Versatz für die Modellversuche ebenfalls verdichtet eingebracht wurde. Ein Vergleich der Proben nach 24, 48 und 72h Aushärtezeit zeigt eine deutliche Zunahme der maximalen Festigkeit der Versatzproben sowie eine Zunahme des E-Moduls. (Abbildung 98). Wird die einaxiale Druckfestigkeit der Versatzmischungen über die Aushärtezeit der Proben aufgetragen, kann im beobachteten Aushärtezeitraum ein linearer Zusammenhang zwischen maximaler Festigkeit und Aushärtezeit beobachtet werden (Abbildung 99).

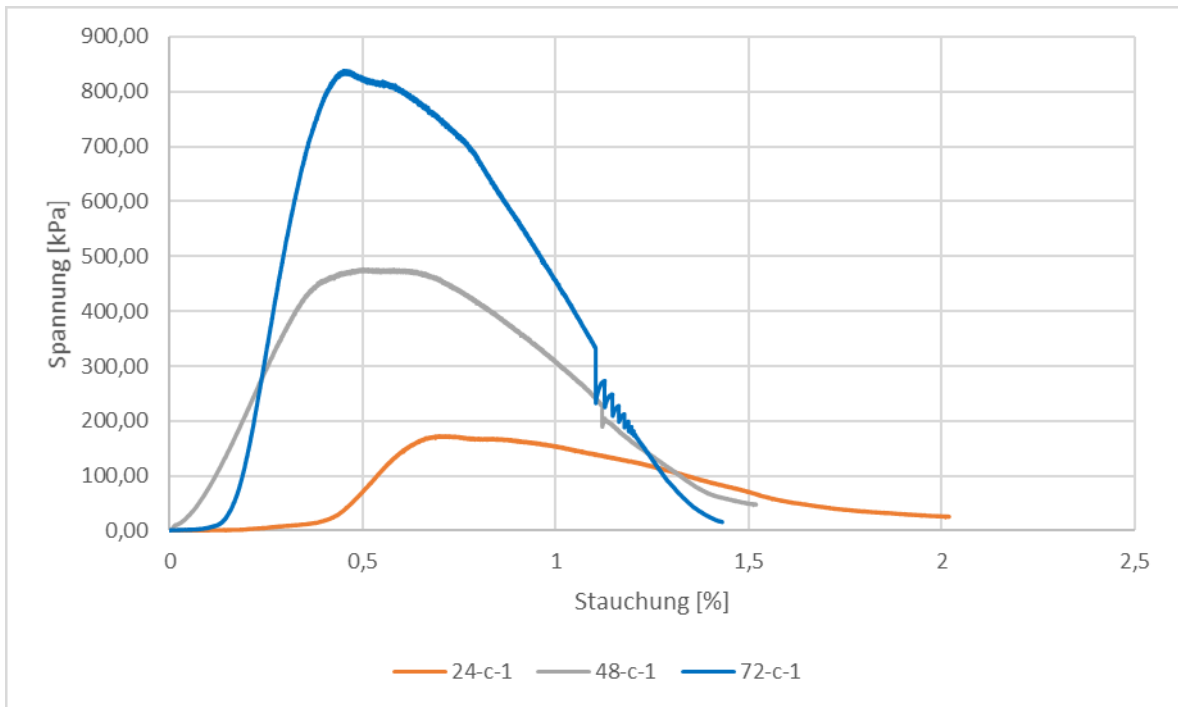


Abbildung 98: Vergleich des Last-Verformungsverhaltens des kompaktierten bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 24, 48 und 72 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)

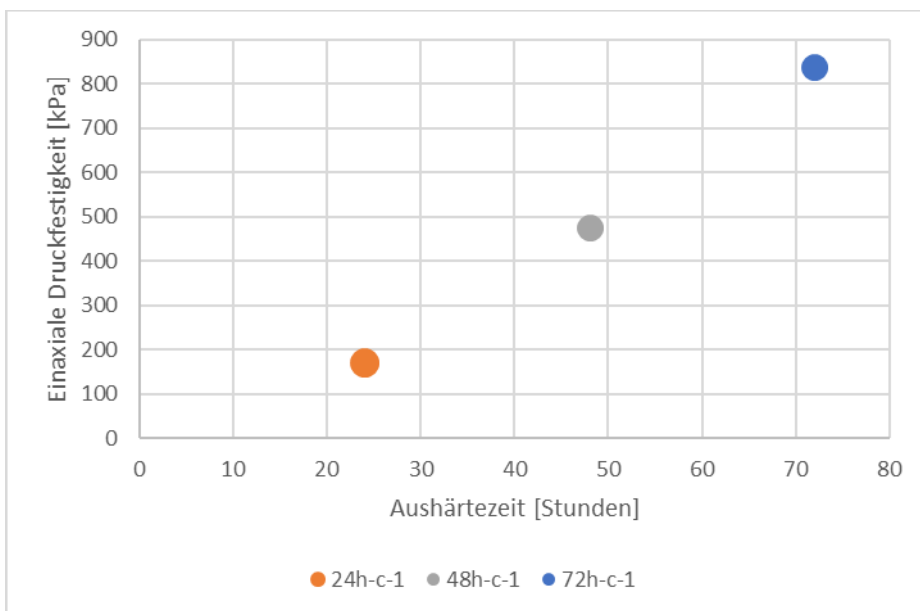


Abbildung 99: Entwicklung der maximalen Festigkeit für den kompaktierten bindemittelverfestigten Versatz mit der Aushärtezeit

Hier ist noch anzumerken, dass es sich bei den durchgeführten Versuchen um einaxiale Druckversuche des bindemittelverfestigten Versatzmaterials handelt. Im Rahmen der Modellfestenversuche wird der Versatzkörper jedoch einem Belastungszustand ausgesetzt, welcher eher einem dreiaxialen

Spannungszustand ähnelt. Somit würden die durchgeführten Versuche des losen und des hydraulischen Versatzmaterials eher dem Belastungszustand des Versatzes im Rahmen der Modellfestenversuche entsprechen. Dieser Versuchsaufbau konnte jedoch mit dem bindemittelverfestigten Versatzmaterial nicht durchgeführt werden, weswegen auf einaxiale Druckversuche zur Bestimmung der Versatzeigenschaften nach unterschiedlichen Aushärtezeiten zurückgegriffen wurde.

7.9.3 Einfluss von Versatz auf maximale Festigkeit und Restfestigkeit

Nach der Analyse der mechanischen Eigenschaften der Modellfesten sowie der verwendeten Versatzmaterialien kann nun die Diskussion des Einflusses von Versatz auf das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten erfolgen. Wird Einfluss der Hohlraumverfüllung auf die maximale Festigkeit der Modellfesten beobachtet, müssen während der Belastung unterschiedliche Phasen genauer analysiert werden. Hier handelt es sich einerseits um den Einfluss des Versatzes auf die Belastungsphase, was aus dem Last-Verformungsverhalten der Modellfesten hervorgeht. Ein weiterer Fokus liegt auf den erreichten maximalen Festigkeiten der Modellfesten ohne Versatz im Vergleich zu Modellfesten, welche im Versatz stehen. Das Nachbruchverhalten sowie die Restfestigkeit der Modellfesten stellen ebenfalls ein bedeutsames Kriterium der Beurteilung des Einflusses von Versatz auf das Gebirge dar, da es hier zu ausgeprägter Versatzwirkung kommen kann.

Zu allererst wird das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten vor Erreichen der maximalen Festigkeit genauer untersucht. Hier konnte beobachtet werden, dass die Modellfesten in Versatz „weicher“ versagen (Abbildung 100) als ohne Versatz. Sowohl feuchte als auch trockene Modellfesten weisen einen größeren E-Modul auf als die Modellfesten mit Versatz, wobei dies für alle verwendeten Versatzarten gilt (lv, lvf, bmv). Der E-Modul der Modellfesten ohne Versatz liegt beispielsweise für die dargestellten Modellfesten bei ungefähr 15GPa. Im Vergleich dazu liegt der E-Modul der Modellfeste mit losem Versatz bei 10,77GPa, mit hydraulischem Versatz bei 8,87GPa und mit bindemittelverfestigtem Versatz bei 8,75GPa. Zudem zeigen die Modellfesten in Versatzmischungen, welchen Wasser zugesetzt wurde, eine deutlich verzögerte Spannungsaufnahme (Abbildung 100). Mögliche Gründe für diese Phänomene werden in Kapitel 8.6 „Erkenntnisse aus Laborversuchen“ diskutiert.

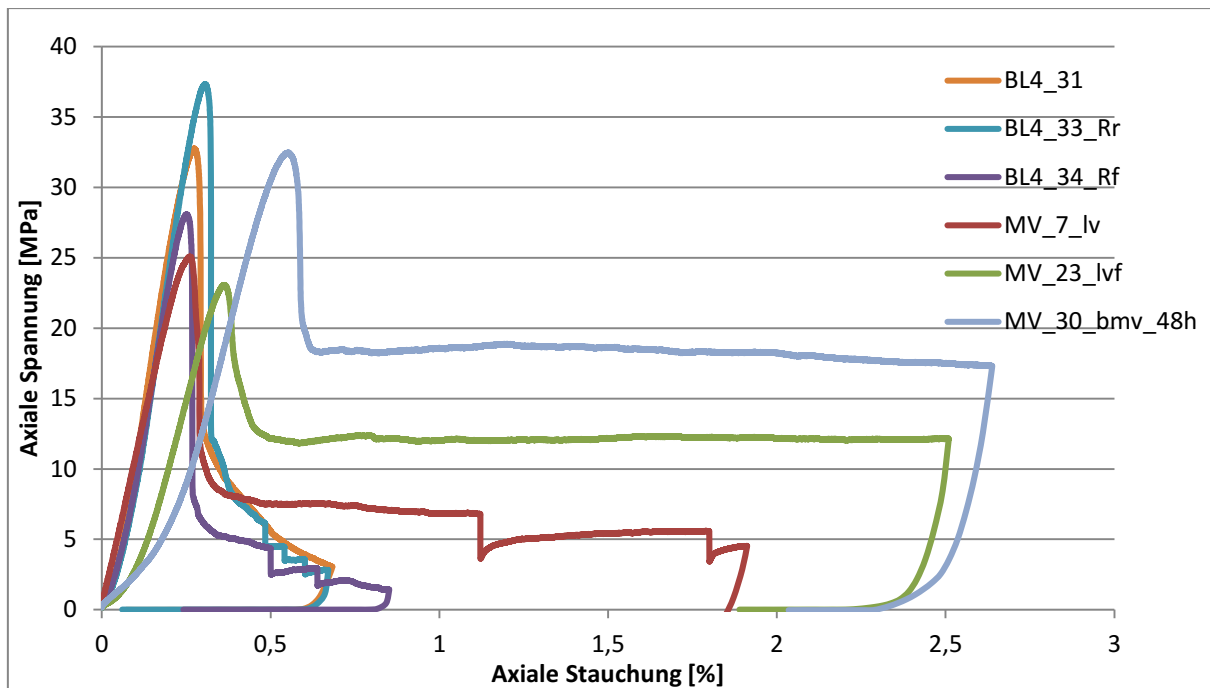


Abbildung 100: Vergleich E-Modul der Modellfesten mit und ohne Versatz

Bei der Betrachtung des Einflusses des Versatzes auf die maximale Festigkeit der Modellfesten werden die durchschnittlichen Festigkeiten aller Modellfesten „ohne Versatz“ und „mit Versatz“ beobachtet, wobei die verschiedenen Versatzarten separat diskutiert werden. Abbildung 101 zeigt den Vergleich der durchschnittlichen einaxialen Druckfestigkeiten der Modellfesten ohne Versatz und mit Quarzsand als Versatz. Hier zeigt sich, dass die Druckfestigkeiten der Modellfesten mit losem Versatz im Durchschnitt sogar niedriger sind als die der trockenen Modellfesten ohne Versatz. Es ist nicht davon auszugehen, dass sich der lose Versatz negativ auf die maximale Festigkeit auswirkt. Der geringere Wert in der maximalen Festigkeit dürfte auf die natürliche Streuung der einaxialen Druckfestigkeiten des Modellfestenmaterials zurückzuführen sein.

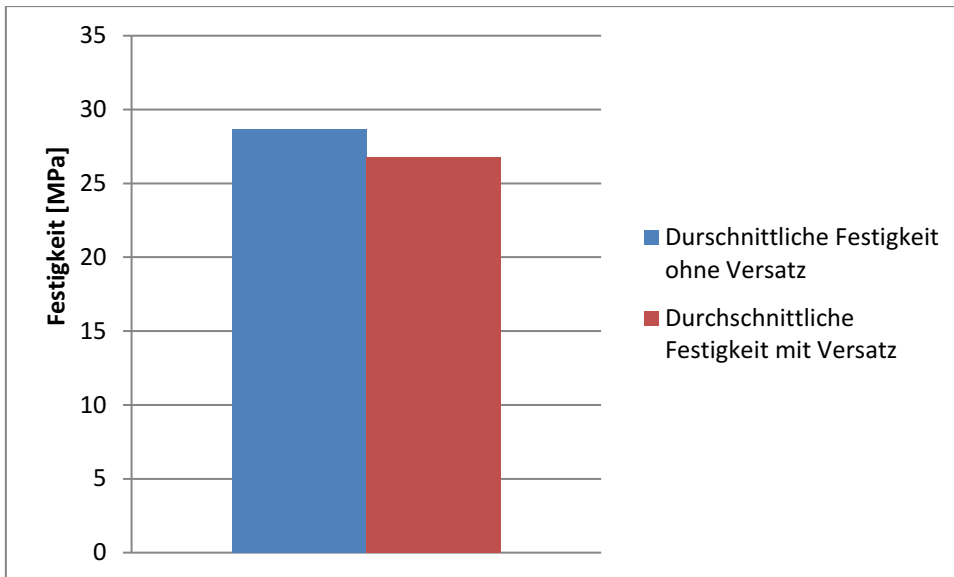


Abbildung 101: Durchschnittliche Festigkeiten der Modellfesten mit und ohne "losem Versatz"

Die durchschnittlichen maximalen Festigkeiten der Modellversuche mit bindemittelverfestigtem Versatz wurden mit den durchschnittlichen maximalen Festigkeiten der Modellfesten verglichen, welche vor der Prüfung 24 Stunden im Wasserbad gelagert wurden.

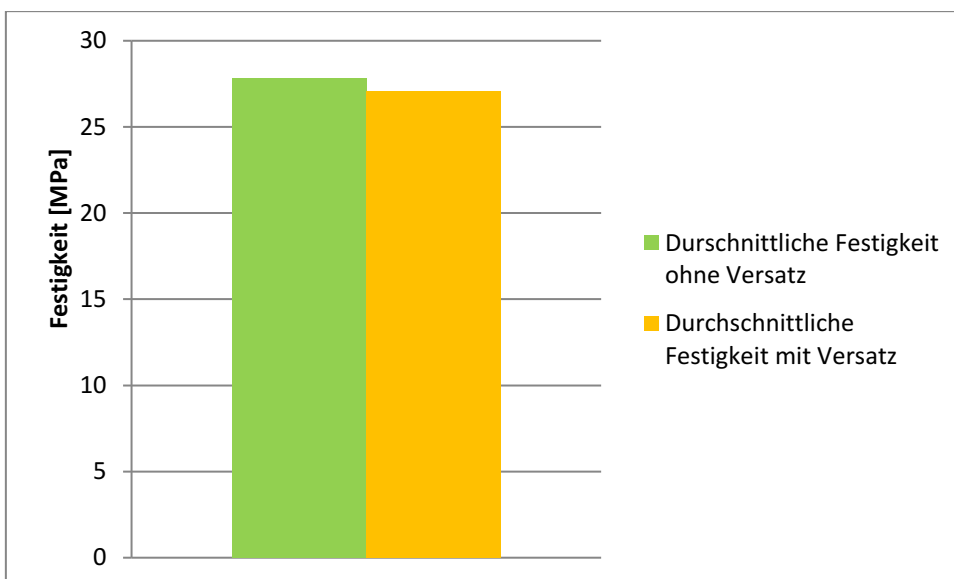


Abbildung 102: Durchschnittliche Festigkeiten der Modellfesten mit und ohne "bindemittelhaltigem Versatz"

Bei der Betrachtung der durchschnittlichen maximalen Festigkeiten der feuchten Modellfesten im Vergleich zu den Modellfesten, welche für unterschiedliche Zeiten in bindemittelverfestigtem Versatz gebettet und anschließend getestet wurden, konnte ebenfalls kein eindeutiger Einfluss des Versatzes auf die maximalen Festigkeiten festgestellt werden (Abbildung 102).

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen stellt die Restfestigkeit den Belastungsabschnitt mit dem größten Einfluss der Verfüllung auf das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten dar. Bei der Analyse der Ergebnisse werden die unterschiedlichen verwendeten Versatzmaterialien separat diskutiert und ihr jeweiliger Einfluss auf die Restfestigkeit erläutert.

Bei der Betrachtung der Nachversagensphase einer freistehenden Modellfeste und einer in losem Versatz eingebetteten Modellfeste (Abbildung 103) ist klar ersichtlich, dass eine derartige Modellfeste in dieser Belastungsphase mehr axiale Verformung bei konstant bleibender Belastung zulässt. Eine freistehende Modellfeste (orange Kurve) versagt bei ca. 0,63% axialer Stauchung vollständig, wobei die Modellfeste in losem Versatz (rote Kurve) nahezu konstant eine axiale Spannung von ca. 7MPa über mehrere % Stauchung der Modellfestenhöhe aufrechterhalten kann, was 20% der erreichten maximalen Festigkeit der Modellfeste darstellt. Der Knick bei 1,38% Stauchung deutet auf einen Bruch in der Modellfeste hin, welcher während des Versuches auch deutlich hörbar war. Durch den Versatz wurde das Abgleiten entlang dieser Bruchfläche jedoch unterbunden, weswegen die Modellfeste in weiterer Folge noch Spannungen aufnehmen konnte. Fehlt in einem solchen Fall die Stabilisierung durch das Versatzmaterial (orange Kurve), kommt es zu vollständigem Lastabfall und zum Versagen der Modellfeste.

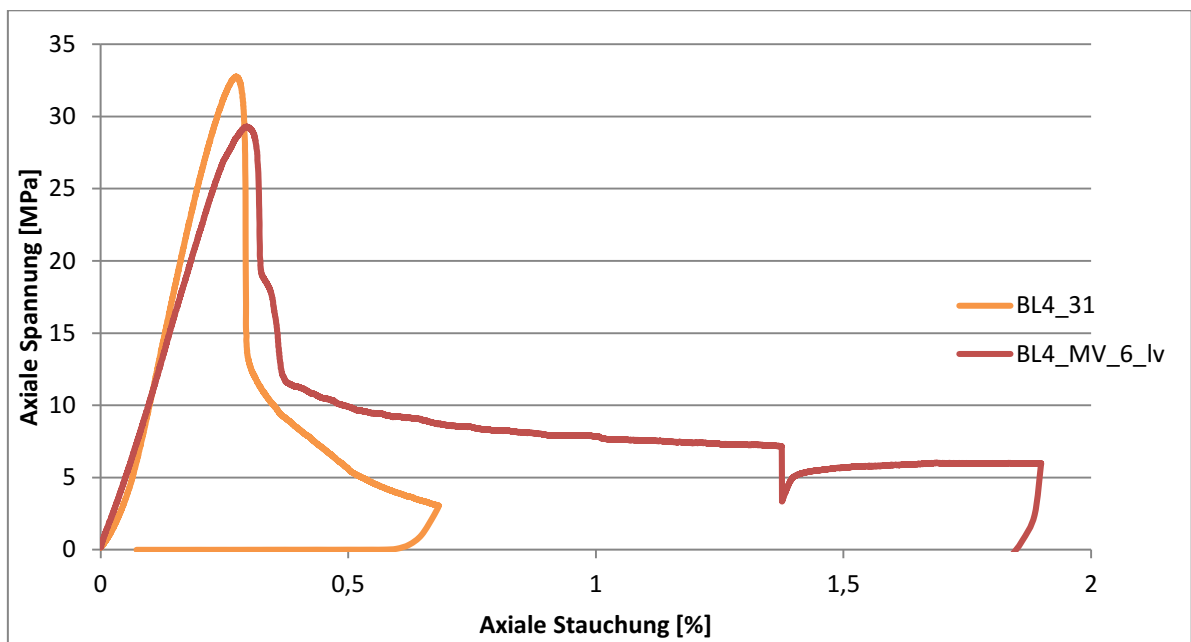


Abbildung 103: Vergleich Modellfeste ohne Versatz mit Modellfeste in losem Versatz

Zieht man nun die Restfestigkeit einer Modellfeste, die von hydraulischem Versatz umgeben ist, heran, ist klar ersichtlich, dass trotz geringerer maximaler Festigkeit, welche in diesem Fall auf das inhomogene Festenmaterial zurückzuführen sein dürfte, die aufrecht erhaltene Restfestigkeit beachtlich ist (Abbildung 104). Die hier dargestellte Last-Verformungskurve der Modellfeste in „lvf“ (rote Kurve) hält im

Nachbruchbereich eine Spannung von 15MPa über 2,5% Stauchung aufrecht, was für diese Feste einer Restfestigkeit von 57% der maximalen Festigkeit entspricht. Im Vergleich dazu versagen die freistehenden Modellfesten bereits bei einer axialen Verformung von 0,2% Stauchung. Hier ist ebenfalls zu erwähnen, dass alle Versuche bei einer axialen Verformung von 2,5% Stauchung der Modellfestenhöhe abgebrochen wurden, und das Aufrechterhalten der Restfestigkeit noch weiter andauern dürfte. Die von hydraulischem Versatz umgebenen Modellfesten („lvf“) zeigen auch keine Knicke im Bereich der Restfestigkeit, da durch das Versatzmaterial das Abrutschen entlang einer Trennfläche augenscheinlich vollständig unterbunden wird.

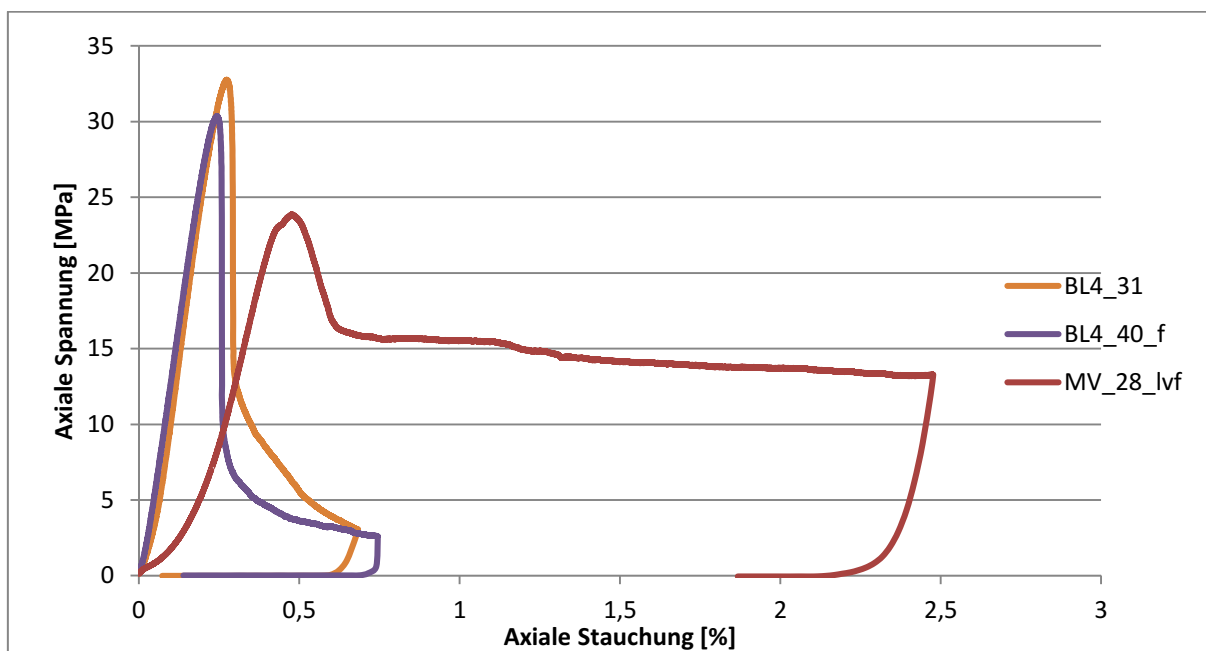


Abbildung 104: Vergleich freistehende Modellfeste, feuchte Feste und Feste mit hydraulischem Versatz

Nachfolgendes Diagramm zeigt nun zwei Modellfesten in bindemittelverfestigtem Versatz im Vergleich mit zwei feuchten Modellfesten ohne Versatz als Referenz. Bei den „bmv“-Modellfesten handelt es sich um einen Versuch mit einer Aushärtedauer von 24 Stunden (grüne Kurve) und einen Versuch mit 48 Stunden Aushärtedauer des Versatzmaterials (blaue Kurve). Das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten in bmv ähnelt jenem von Festen in hydraulischem Versatz. Im Nachbruchbereich wird eine beachtliche Festigkeit aufrechterhalten (nach 24h Aushärtezeit 49% und nach 48h 56% der erreichten Maximalfestigkeit). Auch hier kommt es nicht zum Abgleiten entlang von Bruchflächen innerhalb der Modellfeste.

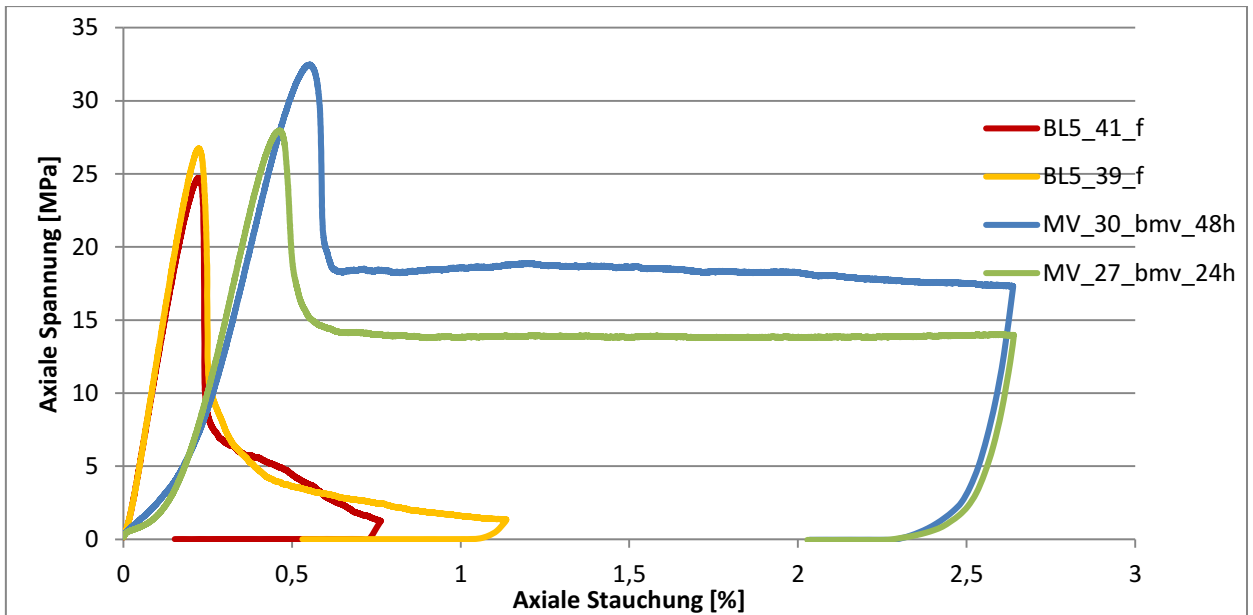


Abbildung 105: Vergleich zweier feuchter Modellfesten ohne Versatz mit Modellfesten mit bindemittelverfestigtem Versatz „bmv“ nach 24h und 48h Aushärtezeit

Für alle getesteten Versuchsaufbaue wurden die durchschnittlichen prozentuellen Restfestigkeiten ermittelt, wobei hier die Modellfesten mit bindemittelverfestigtem Versatz die höchsten Festigkeiten aufweisen (rote, blaue und gelbe Säule). Ähnliche Restfestigkeiten konnten auch mit hydraulischem Versatz erreicht werden (türkise Säule). Die Modellfesten in losem Versatz bzw. in einfach verdichtetem bmv nach 24h Aushärtezeit erreichen die geringsten Restfestigkeiten mit knapp 30% der maximalen Festigkeit (Abbildung 106).

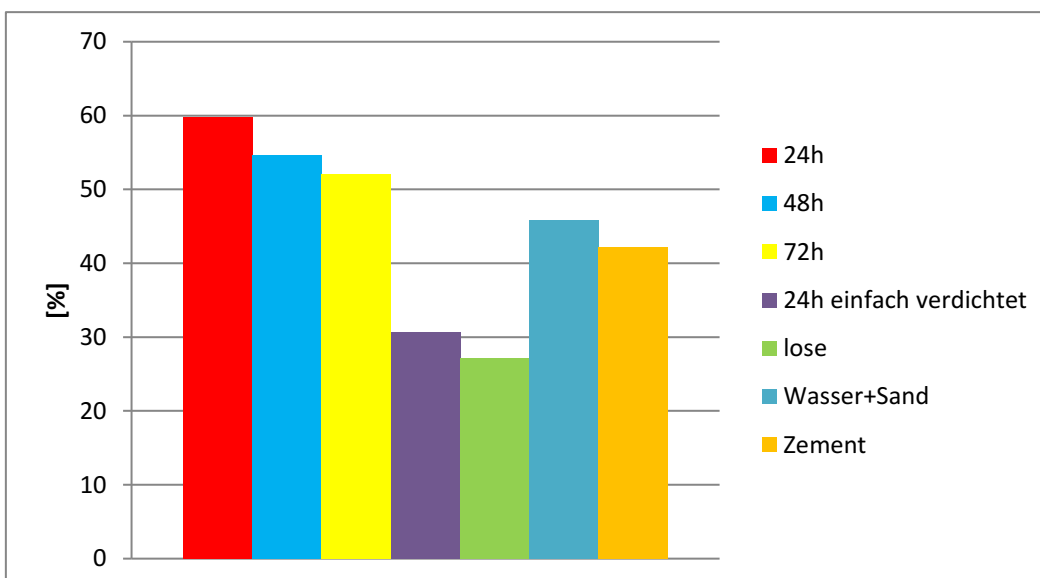


Abbildung 106: Vergleich durchschnittliche anteilmäßige Restfestigkeiten an der maximalen Festigkeit für die gewählten Versuchsaufbaue

7.9.4 Druckaufbau und Reaktionsspannungen im Versatzkörper – Zusammenhang Querverformung und Druckaufbau

Im Rahmen der Versuche lag ein weiteres Augenmerk auf dem Druckaufbau im Versatzkörper. Hier ist zu erwähnen, dass die Beobachtung des Druckaufbaus mittels Druckmessfolien lediglich im losen Versatz erfolgen konnte, da die Folien äußerst sensibel auf Feuchtigkeit reagieren und in feuchtem Umfeld nicht eingesetzt werden können. Abbildung 107 zeigt ein typisches Druckbild eines Versuches in losem Versatz. Die dazugehörige versagte Modellfeste ist in Abbildung 108 dargestellt.

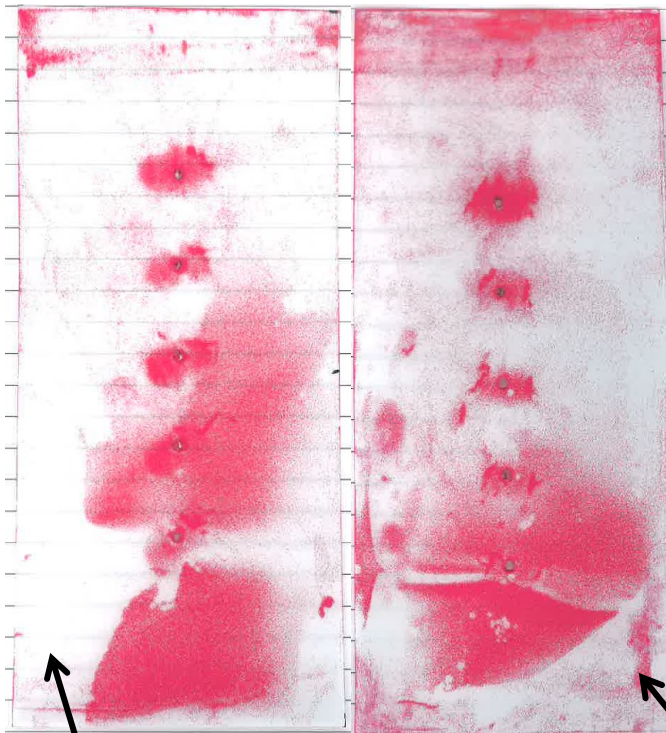


Abbildung 107: Druckbilder eines Versuches



Abbildung 108: Modellfeste in Iv nach Versuch

Nachfolgende Abbildung stellt die im Rahmen des Versuchs mittels Messstiften gemessene maximale Querverformung der Modellfeste über die Festenhöhe dar. Die blaue Linie zeigt die Querverformung auf der linken Modellfestenseite, welche in einem Bereich von maximal 5% der Querverformung der Breite der Modellfeste liegt. Auch auf der rechten Festenseite können ähnlich hohe Verformungen beobachtet werden. Das Druckbild zeigt im Bereich der roten Linie (rechte Seite) in der Höhe der unteren zwei Messpunkte einen Druckaufbau in einer Größenordnung von 0,6MPa. Dies ist für die Modellfeste auf ihrer rechten Seite auch der Bereich der größten Querverformung. Die blaue Linie zeigt trotz gleich großer Querverformung im Bereich des dritten Messstiftes keinen Druckaufbau. Die schwarzen horizontalen Linien zeigen die Bereiche der Verdichtung an. Die doppelte Verdichtung erfolgte bis in eine Höhe ca. 60mm und die einfache Verdichtung bis in eine Höhe von 100mm; dies entspricht 54 bzw. 63% der Höhe der Modellfeste. Der oberste Versatzbereich verblieb unverdichtet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass es während der Versuche lediglich zu einem Druckaufbau im Versatzkörper kommt, wenn der Versatz verdichtet eingebracht wird. Der Druck, welcher durch den Bruch der Modellfeste im Versatzkörper aufgebaut wird, kann lediglich durch den stark verdichteten Versatz im unteren Bereich der Feste auf die Seitenteile des Rahmens, welche mit Messfolien ausgestattet wurden, übertragen werden.

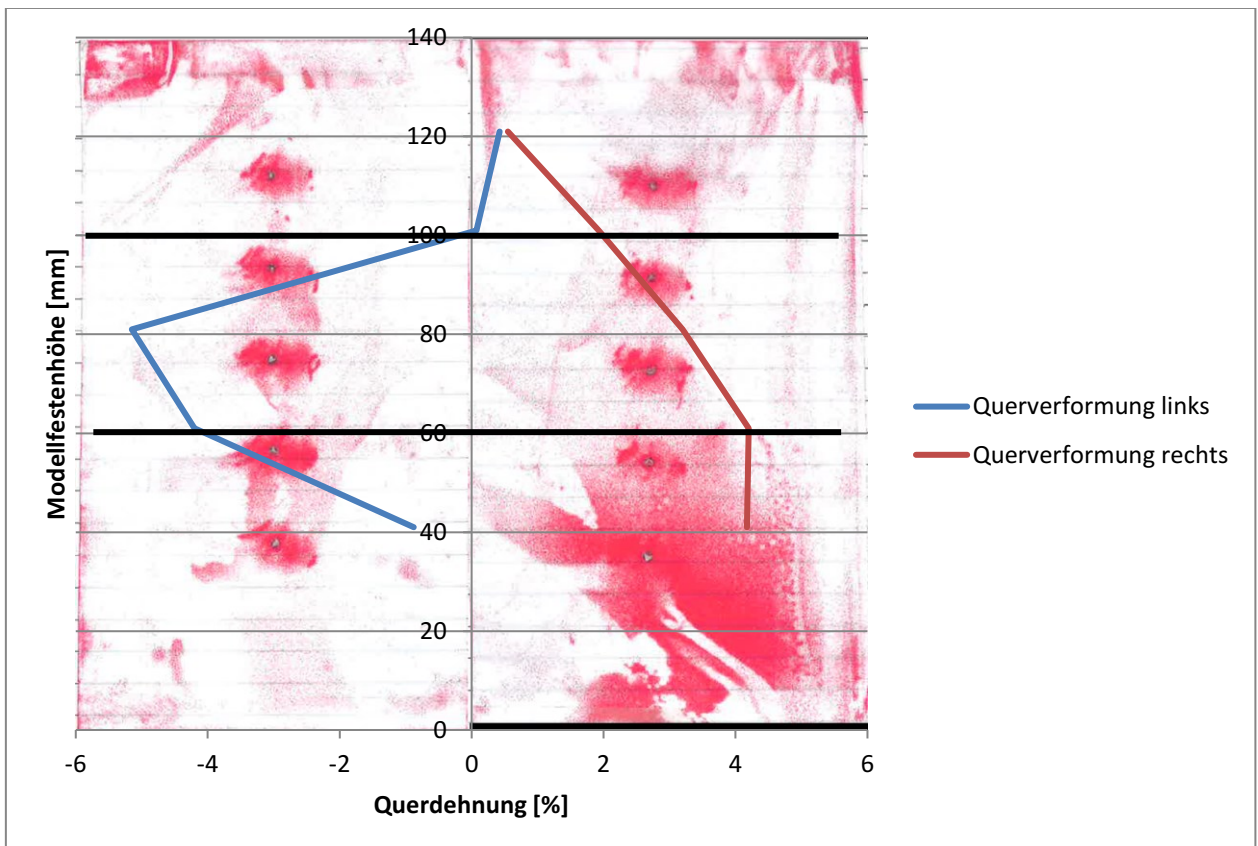


Abbildung 109: Querverformung und Druckbild eines Modellversuchs

7.9.5 Einfluss der Bindemittelzugabe

Im vorliegenden Abschnitt wird der Einfluss der Bindemittelzugabe zum Versatzmaterial diskutiert, wobei hier der Aushärtezeit des bindemittelverfestigten Versatzmaterials ein eigener Abschnitt gewidmet wird. Im Rahmen der Versuche wurde eine bindemittelverfestigte Versatzmischung in einem Verhältnis Sand:Zement:Wasser von 9:1:2,9 mit drei Aushärtezeiten, nämlich 24h, 48h und 72h getestet. Somit konnte der Einfluss einer bindemittelverfestigten Versatzmischung im Vergleich zu losem bzw. hydraulischem Versatz auf das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten untersucht werden.

Wie bereits beschrieben, führt die Bindemittelzugabe im Versatzmaterial bei den durchgeführten Versuchen nicht zu höheren Maximalfestigkeiten der Modellfesten. Wird nun die Querverformung der Modellfesten in losem Versatz (blaue Linie in Abbildung 110), mit den Querverformungen in bindemittelverfestigtem Versatz und in hydraulischem Versatz (gelbe Linie und grüne Linie) verglichen, zeigt sich, dass die Modellfeste in losem Versatz die größte Querverformung aufweist. Diese liegt im Bereich von insgesamt ca. 3mm (oder 7,5% maximaler Querdehnung, wobei im Vergleich dazu die Querverformungen in „bmv“ und „lvf“ im Bereich von 0,5mm oder 1,25% Querdehnung liegen).

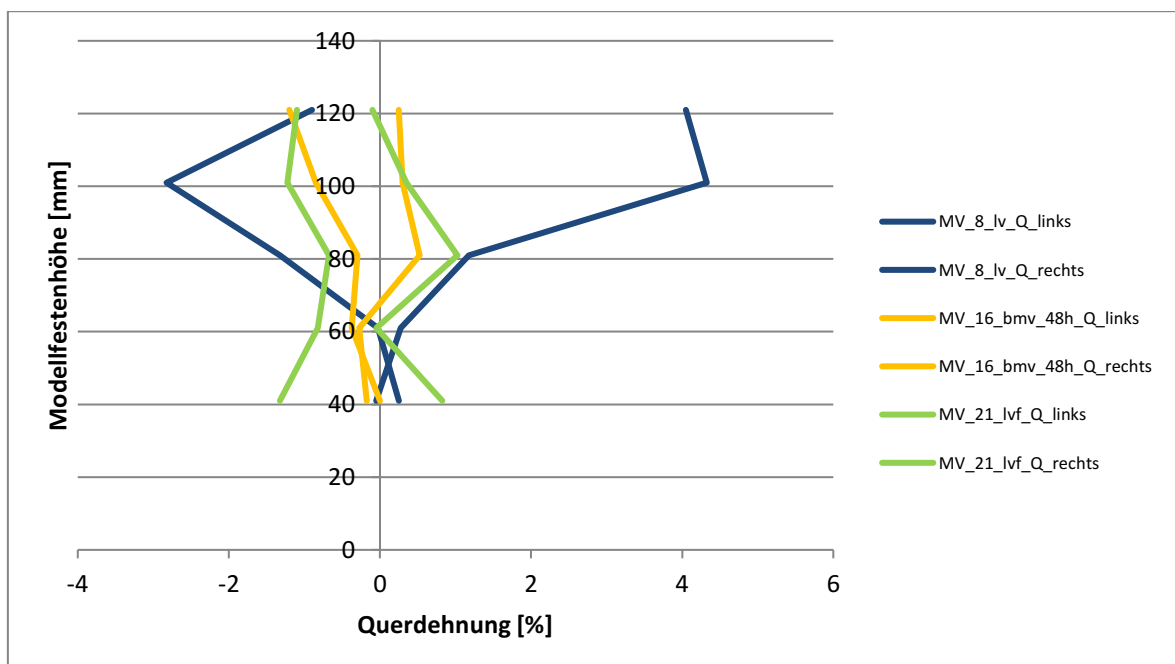


Abbildung 110: Querverformung der Modellfesten in losem Versatz „lv“ (MV_8, blaue Linie), in bindemittelverfestigtem Versatz „bmv“ (MV_16 gelbe Linie) und in hydraulischem Versatz „lvf“ (MV_21, grüne Linie)

Um festzustellen, welchen Einfluss die Bindemittelzugabe bzw. die Versatzfestigkeit auf das Versagen der Modellfesten hat, wurde eine Modellfeste in Zement ($W/Z=0,5$) eingebettet (MV_15_z, orange Linie in Abbildung 111), einer

Aushärtedauer von 24h unterzogen und danach unter einaxialem Druck belastet. Abbildung 111 zeigt, dass die Querverformung einer Modellfeste in Zement nicht geringer ist, als jene der Modellfesten in bmv, welcher einen wesentlich geringeren Bindemittelanteil aufweist.

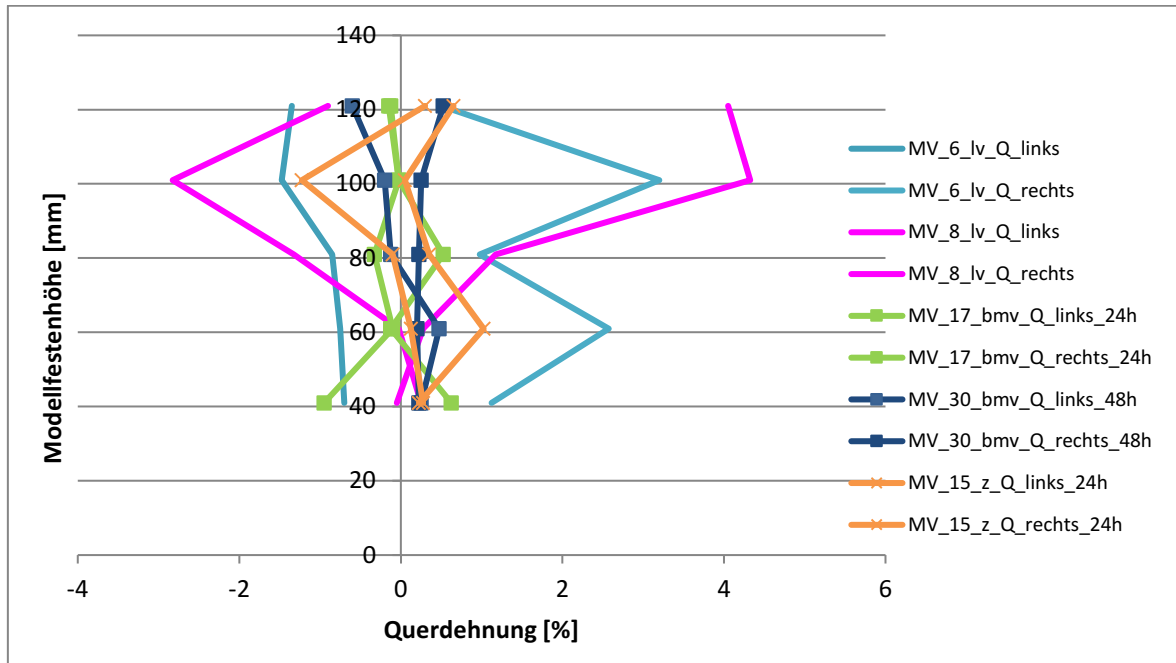


Abbildung 111: Modellfesten in lv (MV_6 und MV_8) im Vergleich mit Modellfesten in bmv (MV_17 und MV_30) und einer Modellfeste in Zement (MV_15)

Abbildung 112 zeigt den Vergleich zweier Modellfesten in losem Versatz mit zwei Modellfesten in bmv (48h Aushärtezeit und 72h Aushärtezeit). Auch diese Ergebnisse zeigen, dass loser Versatz wesentlich größere Querverformungen zulässt, als bindemittelfestigter Versatz.

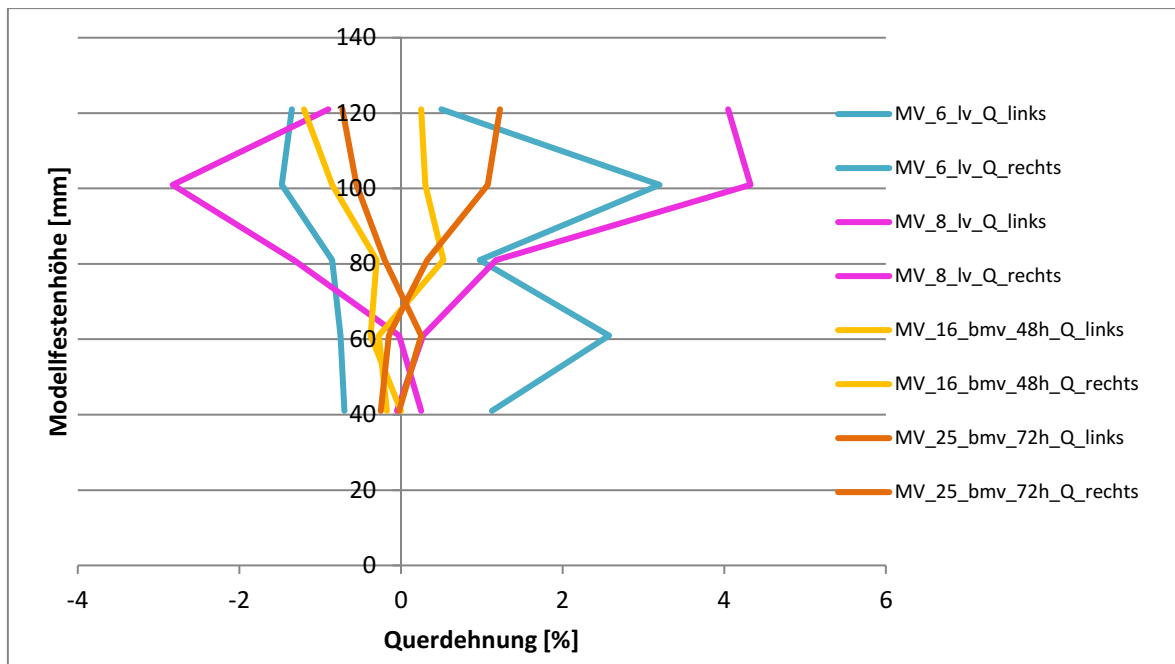


Abbildung 112: Querverformung der Modellfesten in losem Versatz (MV_6 und MV_8, blaue Linien) und in bindemittelverfestigtem Versatz (MV_16 und MV_25, gelbe und orange Kurven)

Die Last-Verformungskurven von 3 Modellfesten in bmv (24h, 48h und 72h Aushärtedauer) im Vergleich zu einer Modellfeste in Zement als Versatz (24h Aushärtedauer) zeigen keine auffallenden Unterschiede im Versagens- sowie im Nachbruchverhalten der Modellfesten. (Abbildung 113)

Dies zeigt, dass eine zusätzliche Menge an Bindemittel, welche der Versatzmischung zugegeben wird, keinen Einfluss auf die Maximalfestigkeit sowie die Restfestigkeit hat.

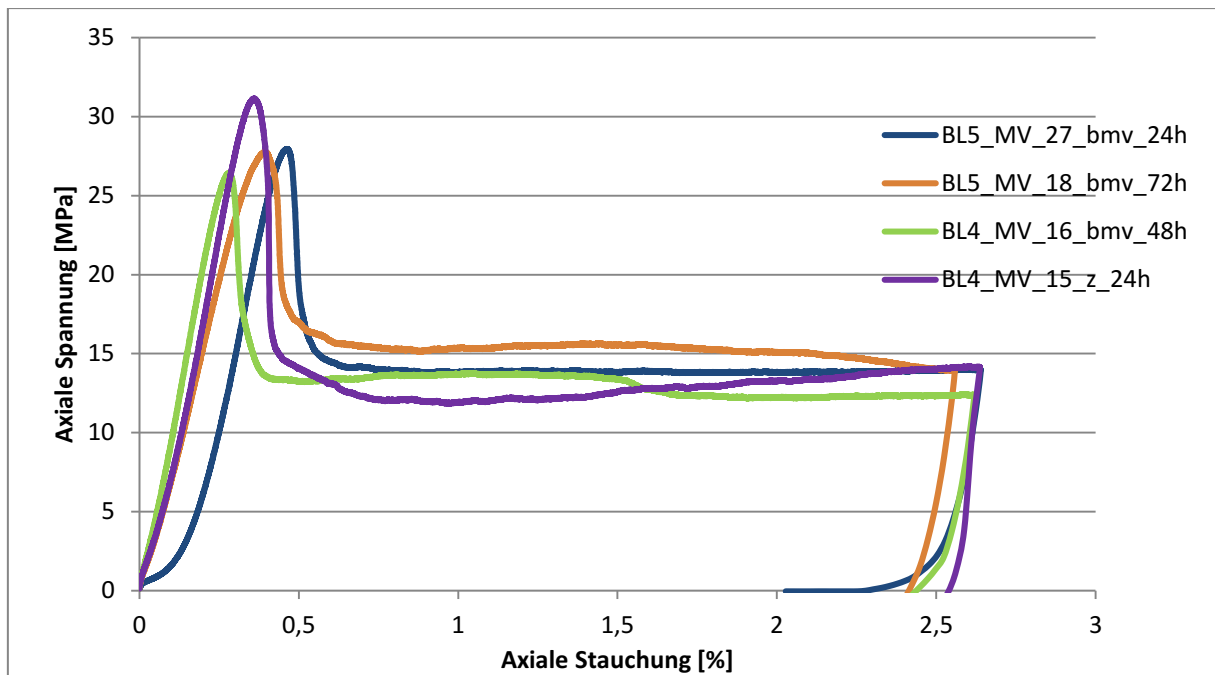


Abbildung 113: Last-Verformungskurven von 3 Modellfesten in bindemittelverfestigtem Versatz nach 24h, 48h und 72h Aushärtezeit sowie einer Modellfeste in Zement nach 24h Aushärtezeit

Weiters zeigen die Modellfesten in bmv im Vergleich mit einer Modellfeste in hydraulischem Versatz keine Unterschiede im Last-Verformungsverhalten. Dies bedeutet, dass eine Modellfeste in Versatz, welchem Bindemittel zugegeben wird, auf dieselbe Art und Weise versagt wie eine Modellfeste in hydraulischem Versatz und somit die Zugabe von Bindemittel laut den vorliegenden Versuchsergebnissen keinen Einfluss auf die Maximal- sowie die Restfestigkeit der Modellfesten hat (Abbildung 114). Auch beim Vergleich der prozentuellen Restfestigkeiten wird deutlich, dass die prozentuelle Restfestigkeit der Modellfesten beim hydraulischen Versatz mit 46% nur knapp unter der prozentuellen Restfestigkeit der Modelversuche mit bindemittelhaltigem Versatz mit ca. 55% (alle Aushärtezeiten gemittelt) im Durchschnitt liegt.

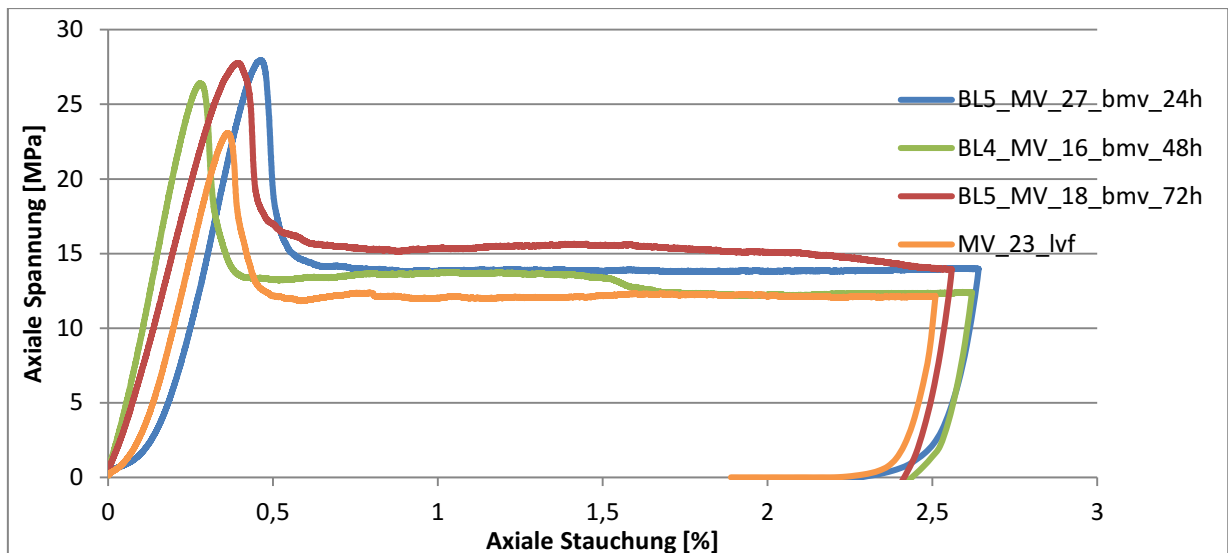


Abbildung 114: Modellversuche in bmv (24h, 48h und 72h Aushärtezeit) im Vergleich mit einem Modellversuch in lvf

Aushärtezeit

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Aushärtezeit der Versatzmischung auf das Last-Verformungsverhalten diskutiert, da sich diese auf die Festigkeitsentwicklung des Versatzkörpers auswirkt. Hier muss jedoch erwähnt werden, dass aus organisatorischen Gründen die Aushärtezeiten von 24 Stunden, 48 Stunden und 72 Stunden gewählt wurden. Die Festigkeitsentwicklung der Versatzmischung verzögert sich aufgrund der großen zugegebenen Wassermengen erheblich, weswegen die gewählten Aushärtezeiten als relativ kurz einzustufen sind. Bei Beobachtung der Versatzmaterialien nach den unterschiedlichen Aushärtezeiten ist jedoch eine deutliche Festigkeitssteigerung festzustellen (wie auch in Kapitel 7.9.2 beschrieben), wobei davon auszugehen ist, dass sich die Festigkeit des bmv nach längerer Aushärtezeit noch erheblich vergrößert.

Die nachfolgenden Diagramme (Abbildungen 115-118) zeigen die Last-Verformungskurven aller Versuche in bmv, nach 24h, 48h und 72h Aushärtezeit des Versatzkörpers. Es ist ersichtlich, dass die gewählten Aushärtezeiten keinen Einfluss auf das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten haben. Dies wird auch deutlich, wenn die anteilmäßigen Restfestigkeiten der Modellfesten verglichen werden (Tabelle 5). Die nach 24h Aushärtezeit geprüften Modellfesten weisen sogar höhere anteilmäßige Restfestigkeiten mit beinahe 60% auf als die Modellfesten in länger ausgehärteten Versatzkörpern. Hier muss jedoch erwähnt werden, dass für alle Aushärtezeiten die prozentuellen Restfestigkeiten in derselben Größenordnung zwischen 52 und 60% liegen. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Aushärtezeit keinen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit der Modellfesten hat, natürlich mit der Limitierung, dass die gewählten Aushärtezeiten als relativ kurz anzusehen sind. Die Aushärtezeit beeinflusst

lediglich die Festigkeitsentwicklung des Versatzkörpers. Aus den Untersuchungen mit Zement und hydraulischem Versatz geht jedoch eindeutig hervor, dass die Festigkeit des Versatzkörpers keine wesentliche Rolle für die maximale Festigkeit und das Nachbruchverhalten der Modellfesten spielt.

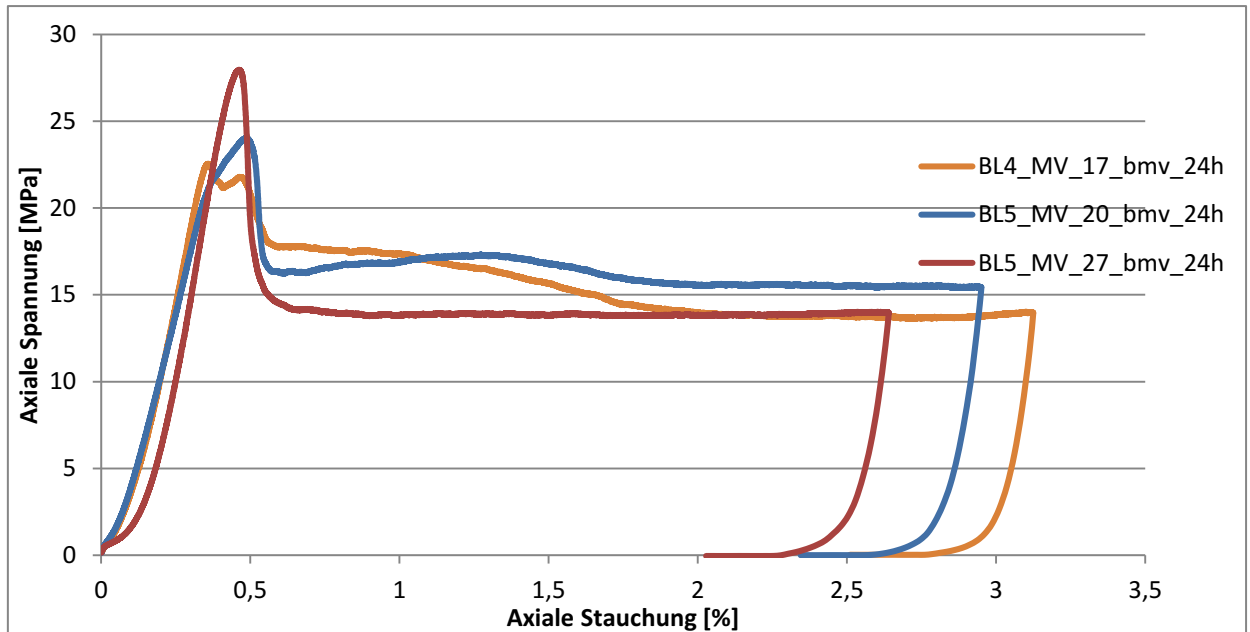


Abbildung 115: Last-Verformungskurven der Modellversuche in bmv nach 24h Aushärtezeit

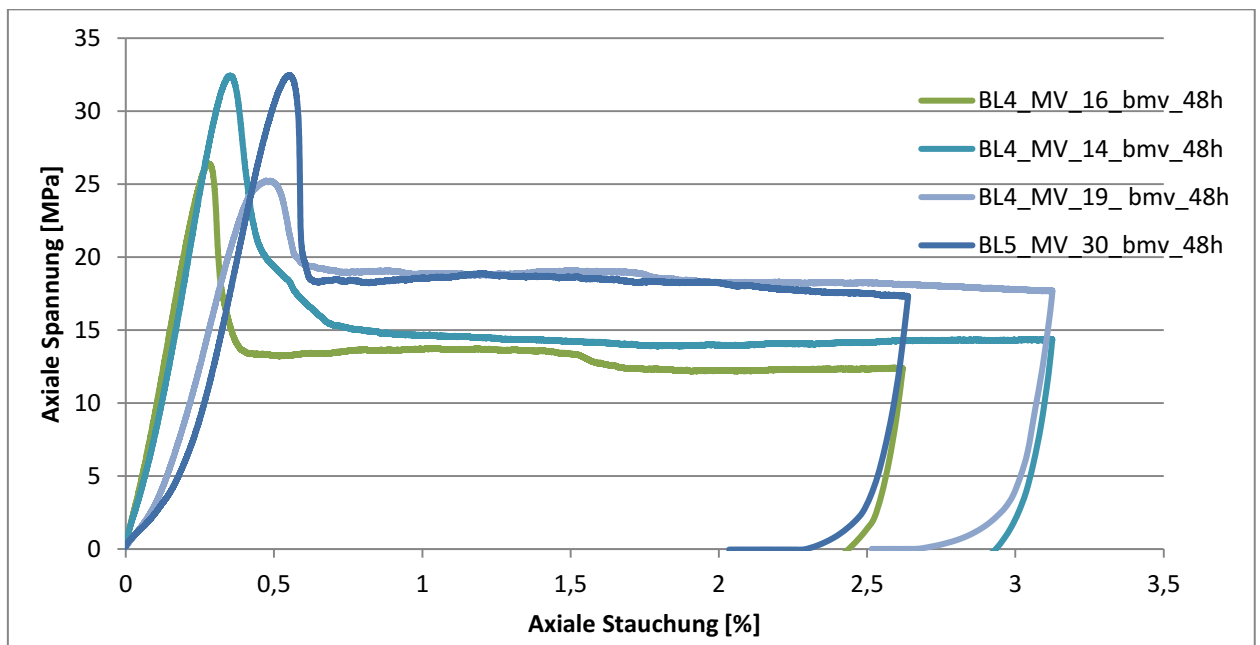


Abbildung 116: Last-Verformungskurven der Modellversuche in bmv nach 48h Aushärtezeit

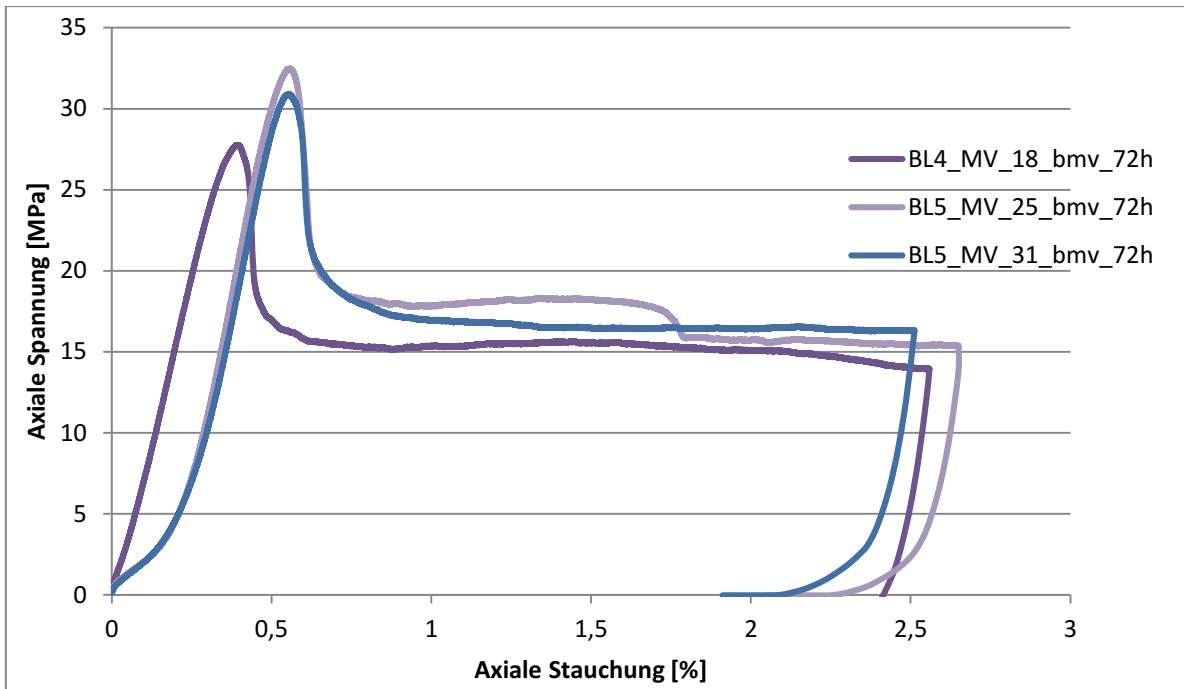


Abbildung 117: Last-Verformungskurven der Modellversuche in bmv nach 72h Aushärtezeit

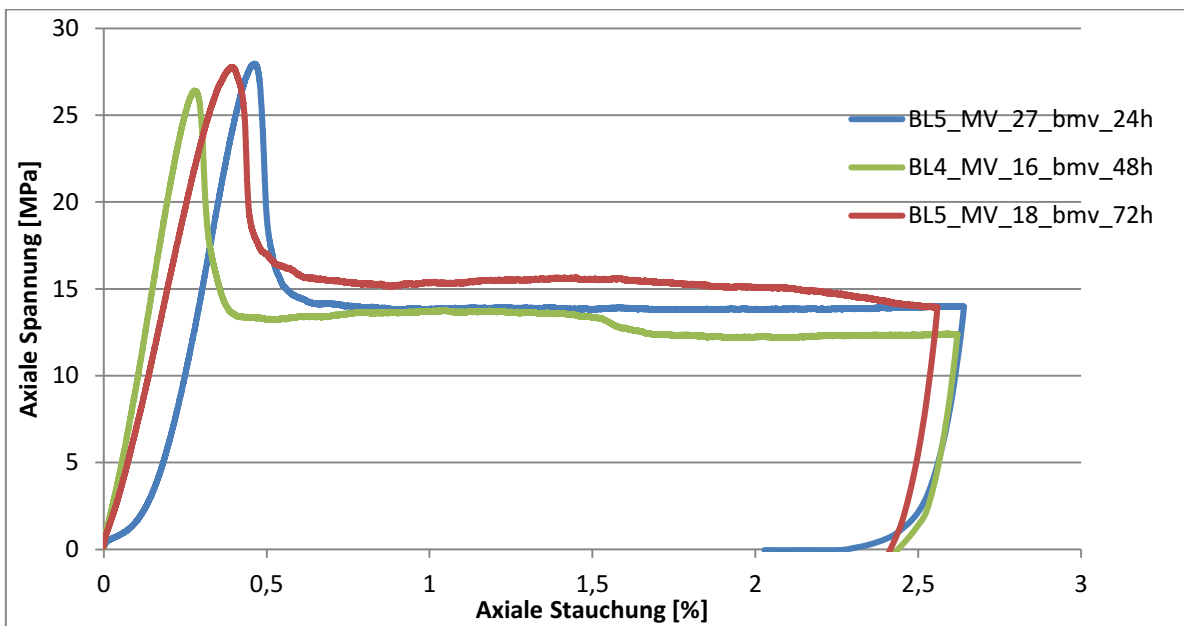


Abbildung 118: Last-Verformungskurven der Modellversuche in bmv nach 24h, 48h und 72h Aushärtezeit

Tabelle 5: Durchschnittliche Restfestigkeiten

Legende	Anzahl	Durchschn. RF-MW
24h	4	0,598465504
48h	4	0,546261805
72h	3	0,520870596

7.9.6 Einfluss der Verdichtung

Auch der Einfluss der Verdichtung des Versatzkörpers steht während der Versuche unter Beobachtung. Die Verdichtung erfolgt in Lagen um die natürliche Kompaktion des Versatzkörpers durch sein Eigengewicht nachzustellen. Um zu testen, ob ein stärker verdichteter Versatzkörper bessere Versatzwirkung erzielt als ein weniger verdichteter, wurde bei einigen Modellversuchen die halbe Verdichtungszeit gewählt. Die übrigen Versuchsparameter blieben jedoch unverändert. Abbildung 119 zeigt den Vergleich zwischen einem einfach verdichteten Versatzkörper (links) und einem doppelt verdichteten Versatzkörper (rechts). Die Aufnahmen wurden nach den Druckversuchen nach Öffnen der Seitenteile des Rahmens durchgeführt. Bei beiden Modellfesten handelt es sich um bindemittelverfestigten Versatz mit einer Aushärtedauer von 24 Stunden. Die Fotos zeigen, dass optisch kein Unterschied zwischen dem einfach und dem doppelt verdichteten Versatzkörper besteht.

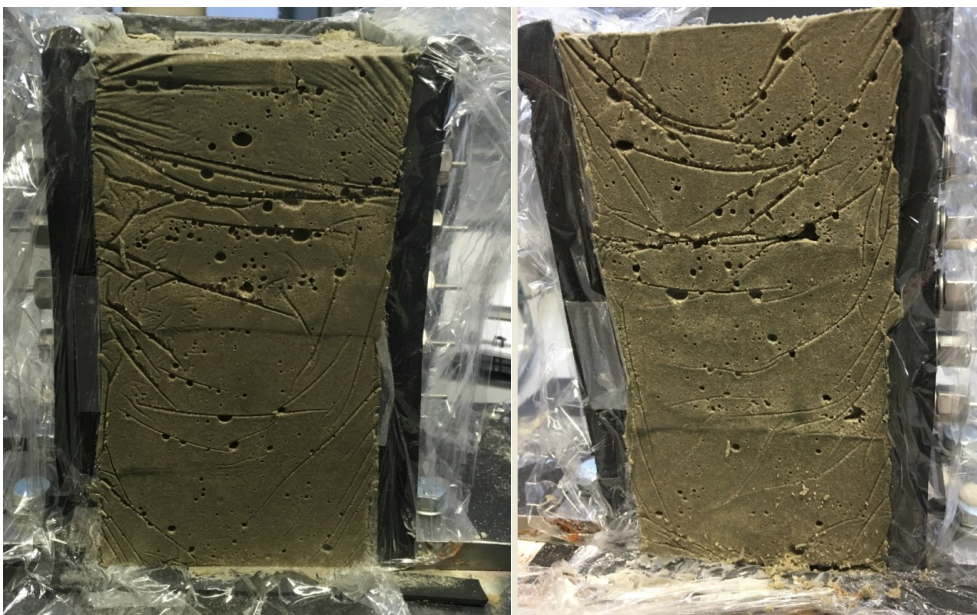


Abbildung 119: Einfach verdichteter Versatzkörper (links) im Vergleich zu doppelt verdichtetem Versatzkörper (rechts)

Die Last-Verformungskurven zeigen jedoch deutlich, dass der doppelt verdichtete Versatzkörper dazu führt, dass die Restfestigkeit um mehr als $\frac{1}{3}$ der maximalen Festigkeit höher liegt als beim einfach verdichteten Versatzkörper (Abbildung 120). Bei allen getesteten Modellfesten mit einfacher Verdichtung des Versatzkörpers (24h Aushärtezeit) konnte durchschnittlich eine prozentuelle Restfestigkeit von 30% festgestellt werden. Im Vergleich dazu wiesen die Versuche mit doppelter Verdichtung eine prozentuelle Restfestigkeit von beinahe 60% auf.

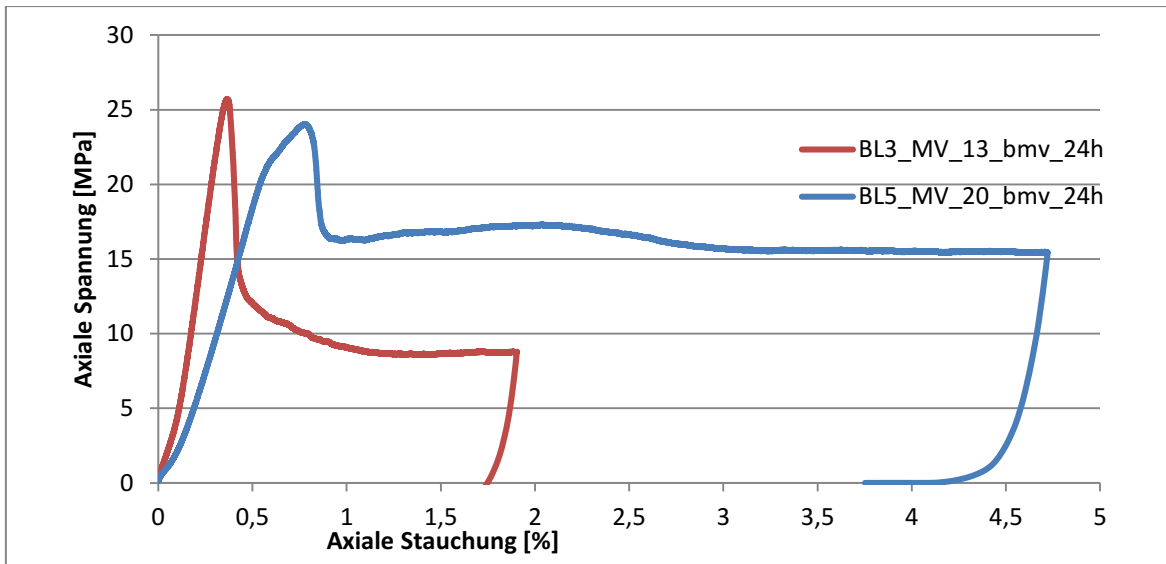


Abbildung 120: Modellfeste mit einfach verdichtetem Versatz (rot) im Vergleich mit Modellfeste mit doppelt verdichtetem Versatz (blau)

Auch die Betrachtung der Querverformungen zeigt, dass die Querverformung im einfach verdichteten Bereich (60-100mm Modellfestenhöhe) um einiges höher ist als im doppelt verdichteten Abschnitt, was sowohl für losen, hydraulischen als auch bindemittelverfestigten Versatz beobachtet werden konnte (Abbildung 121). Abbildung 121 zeigt auch den Vergleich der Querverformung des Versatzes, welcher mit der halben Verdichtungsdauer kompaktiert wurde (rote Linien) mit demselben Versatzmaterial, welches doppelt so lange verdichtet wurde (violette Linien). Auch hier zeigt sich, dass das kürzer verdichtete Versatzmaterial wesentlich größere Querverformungen zulässt (insgesamt 7,5%) als das länger verdichtete Material (<2,5%).

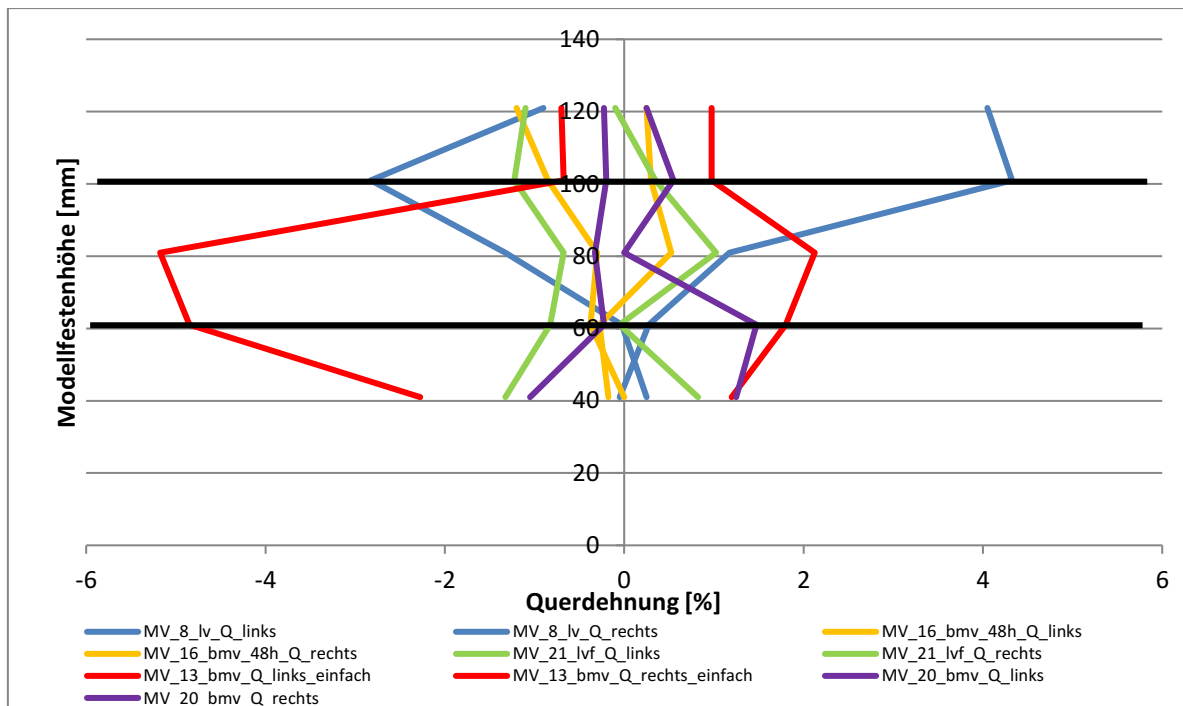


Abbildung 121: Querverformung der Modellfesten in losem Versatz (blau), bindemittelhaltigem Versatz (gelb und violett) und hydraulischem Versatz (grün)

7.10 Zusammenfassung

Im Fokus der Untersuchungen im Labormaßstab stand das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten, welche im dargestellten Versuchsrahmen in unterschiedlichen Versatzmaterialien eingebettet und in weiterer Folge unter einaxialem Druck belastet wurden. Zum Einsatz kamen loser Versatz, hydraulischer Versatz und eine bindemittelverfestigte Versatzmischung mit 3 verschiedenen Aushärtezeiten. Die Versatzkörper wurden in Lagen verdichtet um die natürliche Kompaktion des Versatzkörpers unter seinem Eigengewicht, wie sie in einer realen Abbausituation auftritt, nachzustellen. Der Einfluss des Versatzes auf das Last-Verformungsverhalten der Modellfesten wurde anhand von 3 Phasen, der Anfangs-Belastungsphase, der maximalen Festigkeit sowie der Nachbruchphase bzw. Restfestigkeit untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Verfüllung für den gewählten Versuchsaufbau keinen Einfluss auf die maximale Festigkeit der Modellfesten hat, was für alle verwendeten Versatzmaterialien gilt. Im Bereich der Anfangsbelastung kam es bei den Versatzmaterialien, welche Wasser beinhalten, zu einer verzögerten Spannungszunahme ganz zu Beginn der Belastung und zu geringeren E-Modulen für alle verwendeten Versatzmaterialien.

Bei der genaueren Analyse der Nachbruchphase hat sich ein deutlicher Einfluss der Verfüllung auf das Last-Verformungsverhalten gezeigt. Alle verwendeten

Versatzarten haben zu einem deutlichen Ansteigen der Restfestigkeit geführt, wobei diese Restfestigkeit über mehrere % axiale Stauchung aufrechterhalten werden konnte. Im Vergleich dazu haben Modellfesten ohne Versatz bereits nach 0,2% axialer Stauchung vollständig versagt. Beim hydraulischen Versatz und beim bindemittelhaltigen Versatzmaterial haben sich insbesondere die Parameter Bindemittelzugabe, Aushärtezeit und Verdichtung als besonders interessant für eine eingehende Analyse herauskristallisiert. Beim Vergleich des bindemittelhaltigen Versatzes mit dem hydraulischen Versatz wurde deutlich, dass laut Versuchsergebnissen die Bindemittelzugabe keinen eindeutig positiven Einfluss auf die Restfestigkeit der Modellfesten hat. Der hydraulische Versatz, welcher lediglich aus Sand und Wasser besteht, konnte im Nachbruchbereich eine ähnliche Versatzwirkung erzielen, wie der bindemittelhaltige Versatz. Auch die Aushärtezeit des bindemittelverfestigten Versatzes hat sich nicht als eindeutig positiv auf die Restfestigkeit der Modellfesten ausgewirkt. Alle Aushärtezeiten konnten beinahe dieselben prozentuellen Restfestigkeiten erzielen. Die Verdichtung des Versatzmaterials hat sich als besonders wichtig für die Versatzwirkung herausgestellt. Durch die Verdoppelung der Verdichtungszeit hat sich die prozentuelle Restfestigkeit verdoppelt und auch die Querverformung der Modellfeste wurde auf ein Drittel reduziert. Die Ergebnisse der Versuche sowie die Gründe für die aufgetretenen Phänomene sollen in weiterer Folge im abschließenden Kapitel „Schlussfolgerungen, Ableitungen und Erkenntnisse zur Wechselwirkung von Gebirge und Versatz“ interpretiert und analysiert werden.

8 Schlussfolgerungen, Ableitungen und Erkenntnisse zur Wechselwirkung von Gebirge und Versatz

Im Rahmen der untertägigen Messungen sowie der Laborversuche wurden interessante Beobachtungen gemacht, welche zum Verständnis der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz beitragen. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die Messungen am Gebirge und am Versatzkörper gemeinsam ausgewertet. In einem nächsten Schritt werden einzelne Messungen analysiert und interpretiert. Abschließend werden Modelle zur Erklärung der beobachteten Phänomene besprochen, welche einen Beitrag zum aktuellen Wissenstand bezüglich der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz im alpinen Bergbau leisten sollen. Es werden zudem Empfehlungen für die in-situ Untersuchung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz gegeben, welche im Rahmen der vorliegenden Studie ausgearbeitet wurden.

8.1 Analyse der Beobachtungen bezüglich der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz

In diesem Kapitel wird die Wechselwirkung von Gebirge und Versatz anhand der untertägig gemachten Messungen beschrieben. Zu diesem Zweck wurden Extensometermessungen an ausgewählten Stellen verschiedener Abbaufesten gemacht um die Querverformung der Abbaufesten zu erfassen. Parallel dazu wurden die Drücke im Versatz in der Umgebung dieser Messstellen mit Hilfe von hydraulischen Druckkissen bestimmt und alle im Messzeitraum relevanten bergbaulichen Tätigkeiten dokumentiert. Diese Informationen werden nunmehr zusammengeführt und interpretiert. Die Analyse der Ergebnisse erfolgt in einem ersten Schritt separat für jede untersuchte Abbaufeste, wobei die zur Beschreibung des Verhaltens der Feste relevanten Messdaten (Überblick der Messungen in Abbildung 122) und Bergbauaktivitäten gemeinsam dargestellt werden.

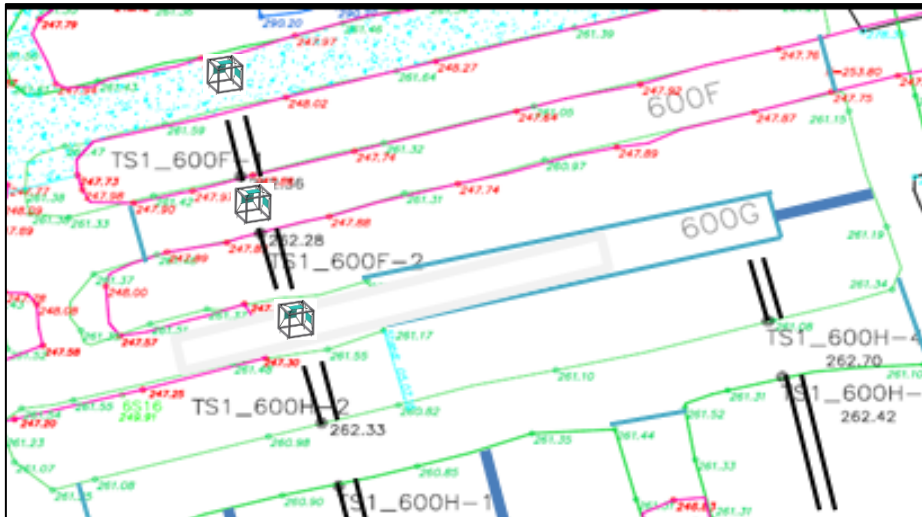


Abbildung 122: Überblick der im Bergbau Breitenau durchgeführten Messungen

In nachfolgenden Diagrammen sind auf der x-Achse die Tage nach Einbringung der Messgeräte, auf der primären y-Achse der Versatzdruck und auf der sekundären y-Achse die Querverformung der Feste dargestellt. Zur Erleichterung bei der Interpretation der Messergebnisse sind in den Diagrammen auch wichtige bergbauliche Aktivitäten angeführt, die einen Einfluss auf die Verformung von Strecken und Festen haben können. Es handelt sich hier einerseits um das Auffahren benachbarter Strecken (Vortriebssprengungen), welche im Westen der Kammern begonnen haben (nahe Extensometer), das abschnittsweise Hereingewinnen der Schweben zwischen den Kopf- und Fußstrecken einer Abbaukammer (Start im Osten der Kammern fern der Extensometermessungen) sowie das Versetzen bereits abgebauter benachbarter Kammern. Die farbkodierten Kreuze kennzeichnen Sprengungen, während die farbigen horizontalen Linien den Zeitraum des Versatzeinbringens markieren.

Im Rahmen der Hereingewinnung der 11m mächtigen Schweben zwischen den Kopf- und Fußstrecken der Abbaukammern geht der Zugang zu den Extensometer-Stationen im Zeitraum zwischen dem Hereinsprengen der Schweben und dem Verfüllen der Abbaukammer bis auf das Fußniveau der Kopfstrecke verloren. Dies ist in den Diagrammen durch die strichlierte Verbindung der Verformungswerte zwischen den beiden Zeitpunkten dargestellt.

8.1.1 Feste E

Die Ergebnisse der Verformungsmessungen und Druckmessungen in der Feste E zeigen einen Anstieg der Querverformung der Feste während der Gewinnungsaktivitäten in der angrenzenden Kammer 600F sowie während des Beginns der Streckenauffahrungen der Kammer 600G, welche ungefähr zeitgleich erfolgten. Die Extensometermessungen erfolgten für alle Festen im Westen der Kammern, von wo aus die Streckenauffahrung der Kammern durchgeführt wurde.

Durch die zwei unterschiedlichen Messlängen der Extensometer kann festgestellt werden, dass die Verformungen relativ gleichmäßig über die gesamte Feste verteilt sind. Ungefähr ab Tag 1150 nach Einbringung stand nur noch der längere Extensometermesskopf zur Verfügung, da die Verankerung des 2. Extensometers beschädigt wurde. Die Druckmessungen in den Druckmesszellen der Kammer 600F zeigen einen starken Anstieg des Versatzdruckes normal auf den Kammerulm. Dieser beläuft sich auf knapp 5MPa, fällt jedoch ca. 1200 Tage nach Einbringung wieder ab.

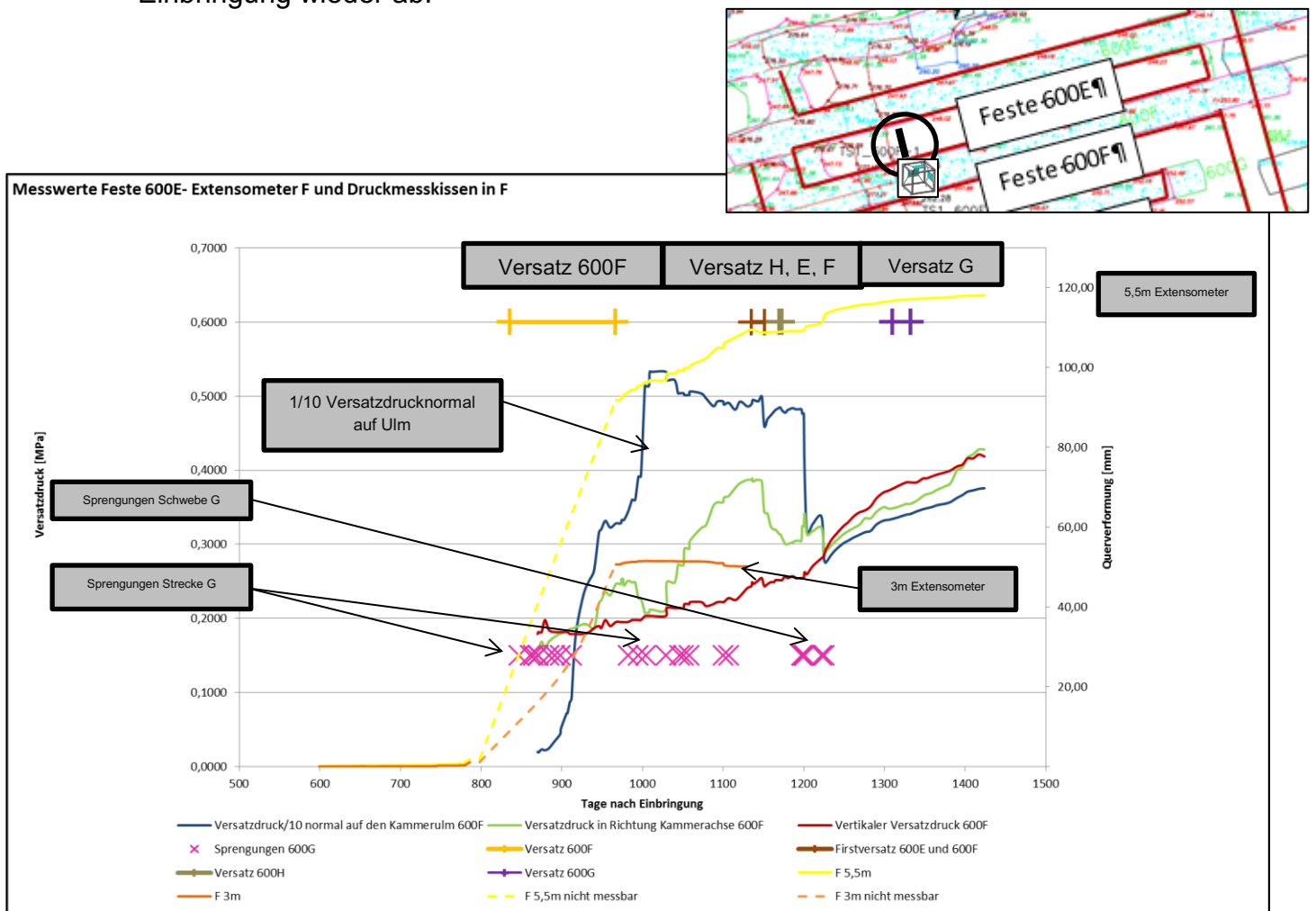


Abbildung 123: Messergebnisse Feste E

8.1.2 Feste F

Insbesondere bei der Bergfeste F (Feste zwischen Kammer F und Kammer G) konnten einige interessante Beobachtungen gemacht werden. Hier werden die Extensometer in der Feste (3m und 5,5m Messköpfe) und die Versatzdruckmessungen in Kammer F gemeinsam betrachtet.

Die Querverformung der Feste F steigt simultan zum Versatzdruck normal auf den Kammerulm an, beläuft sich während des Druckanstieges zunächst auf ca. 50mm. Zum Zeitpunkt des Druckabfalles von 5 MPa auf ca. 2,8 MPa steigen die Querverformungen der Feste bedeutend an und belaufen sich in weiterer Folge auf 90mm. Im Abschnitt 11.3 „Modell zur Wirkung von geringen Versatzdrücken“ wird genauer auf die besprochenen Ergebnisse eingegangen und versucht Erklärungen dafür zu finden.

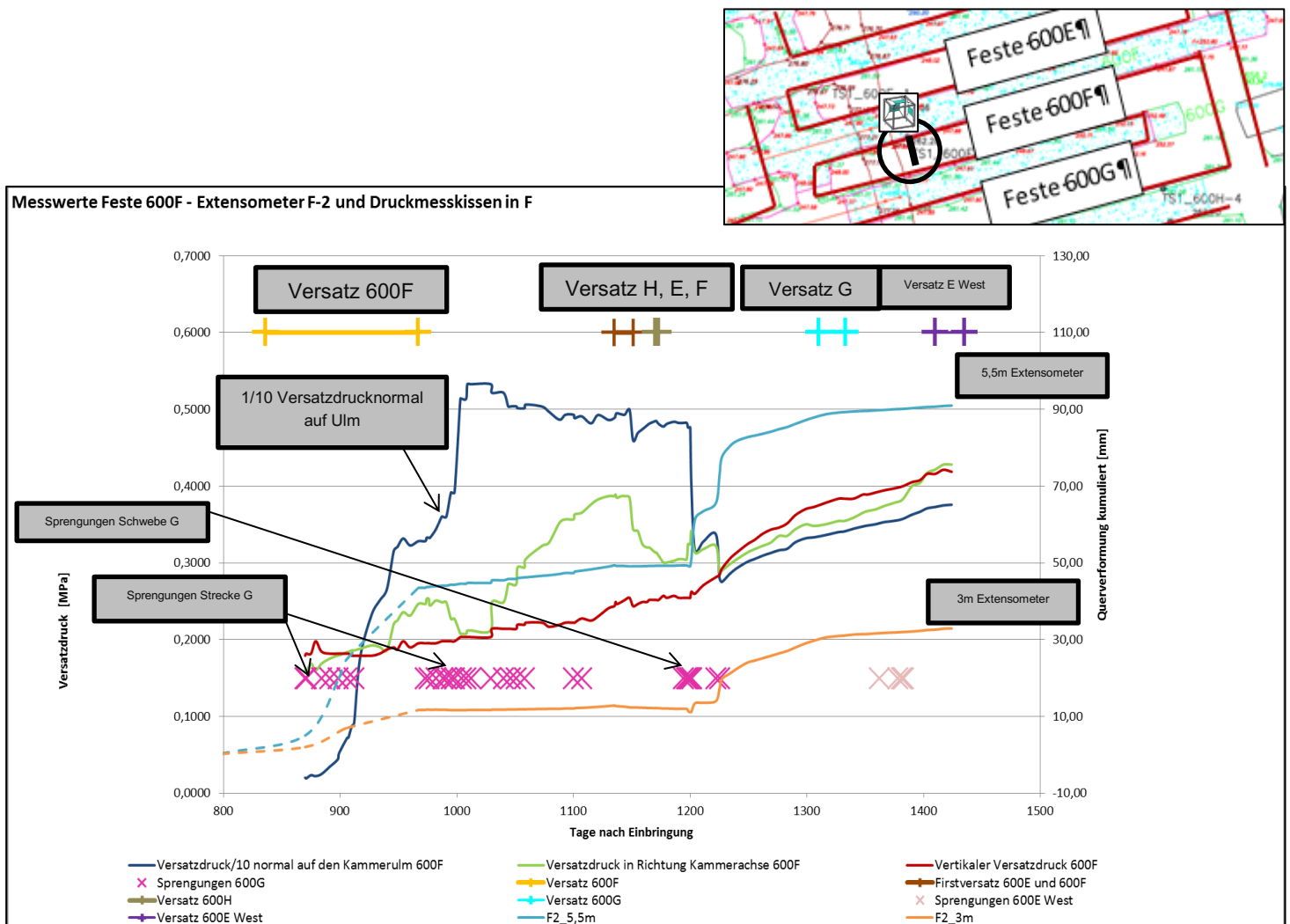


Abbildung 124: Messergebnisse Feste F

8.1.3 Feste G

Werden die Messergebnisse der Versatzdruckmessungen und Extensometermessungen der Feste G (zwischen Kammer G und Strecke 600H) betrachtet, kann festgestellt werden, dass die Querverformungen der Feste nahezu zum Stillstand kommen, sobald die Kammer 600G verfüllt ist. Die Beruhigung der Bewegungen beginnt bereits nach Beginn der Verfülltätigkeiten

und kommt nach Beendigung der Verfüllung (pinke Kreuze in Abbildung 125) zum Stillstand, dh. bereits zu einem Zeitpunkt, wo der Versatz noch keine messbare Festigkeit besitzt, wo jedoch bereits der Versatzdruck wirkt.

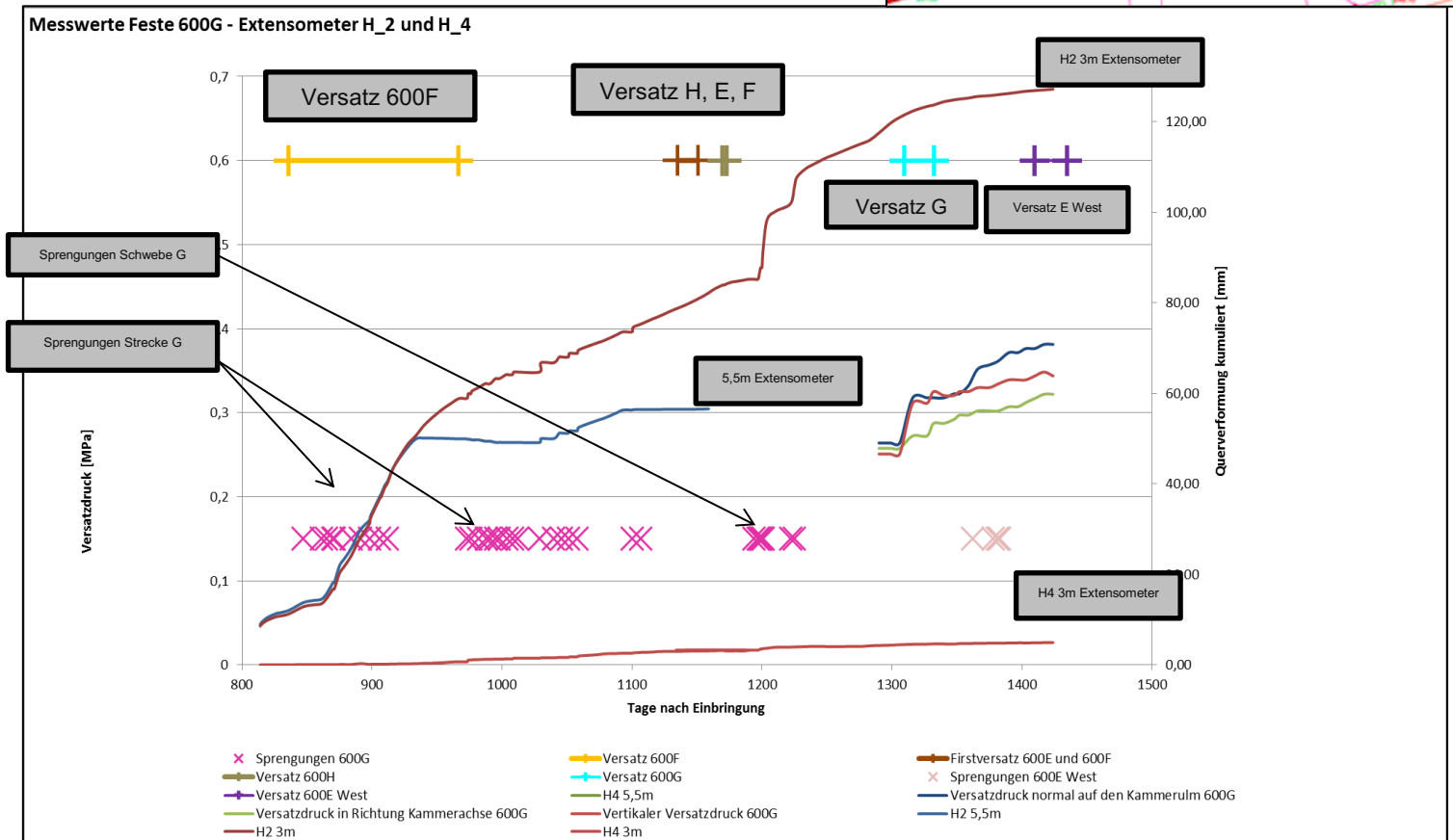


Abbildung 125: Messergebnisse Feste G

8.1.4 Auflagerfeste 600H

Auch die Auflagerfeste 600H zeigt ähnliche Ergebnisse. Die Verformung der Auflagerfeste nimmt als Resultat der Abbautätigkeiten in den benachbarten Kammern zu. Im Vergleich zu den Abbaufesten sind die Verformungen der Auflagerfeste wesentlich niedriger und belaufen sich insgesamt auf ca. 40mm, wobei die Verformungen von beiden Extensometermessköpfen im Bereich des Abbaufeldes (H1_1 blau 9m Messkopf, H1_2 rot 3m Messkopf) aufgenommen werden. Dies bedeutet, dass es sich hier um Verformungen in unmittelbarer Streckenumgebung handelt. Im Laufe der Verfüllung der Kammer 600F (gelbe Kreuze) kommen die Bewegungen jedoch zur Ruhe und nach Verfüllung der Strecke 600H zu einem vollständigen Stillstand. Weitere Abbau- und

Verfülltätigkeiten haben keinen Einfluss mehr auf Brucherscheinungen bzw. Verformungen in der Auflagerfeste. Hier muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Auflagerfeste nicht unmittelbar mit einer Abbaufeste verglichen werden kann, da diese nur zwischen der auf dem Niveau der Kopfstrecke befindlichen Strecke H und der Kammer G gebildet wird und nicht über die gesamte Kammerhöhe von 21 m wie dies bei Abbaufesten der Fall ist.

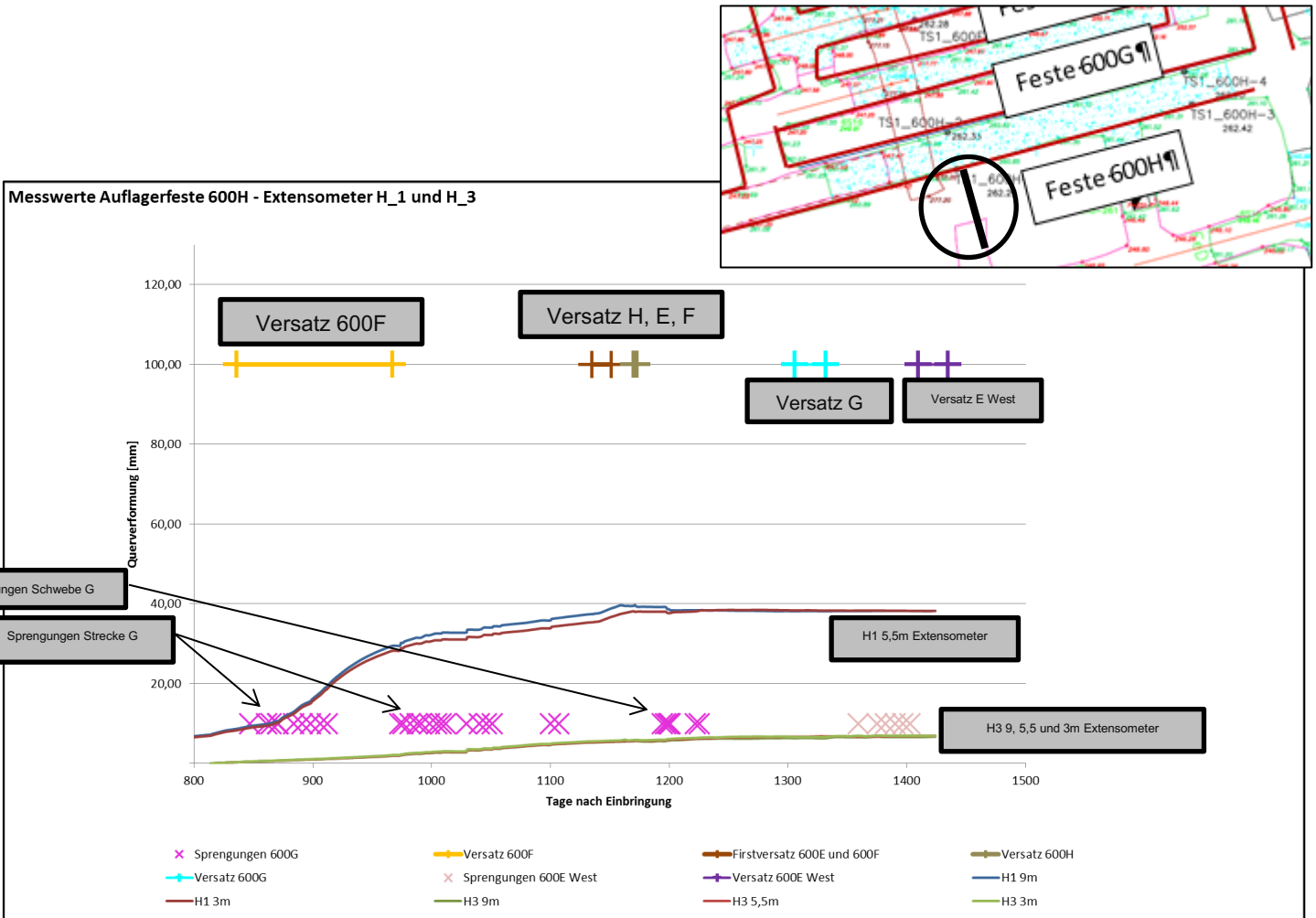


Abbildung 126: Messergebnisse Auflagerfeste H

Die Ergebnisse der gemessenen horizontalen Versatzdrücke können wie das vorhergehende Kapitel gezeigt hat sehr gut mit den Querverformungen der Festen in Verbindung gebracht werden, mit Ausnahme der Versatzdrücke in der Kammer 600F, was in Abschnitt 8.4 genauer behandelt wird. Zusätzlich zu den Horizontaldrücken in den Versatzkörpern müssen jedoch auch die vertikalen Versatzdrücke genauer betrachtet werden, da eine vollständige Diskussion der Ergebnisse notwendig ist um die Wirkungsweise des Versatzkörpers im Gebirgsverband beschreiben zu können.

8.2 Analyse der vertikalen Versatzdrücke

Zur Beurteilung der Wechselwirkung von Gebirge und Versatz muss abgeklärt werden, ob und in welcher Höhe der Versatz Spannungen aus dem Gebirge aufnimmt, abgesehen von seiner Stütz- bzw. Ausbauwirkung. Hier müssen sowohl der horizontale als auch der vertikale Versatzdruck betrachtet werden. Bisher wurde ausschließlich auf den horizontalen Versatzdruck normal und parallel zum Kammerulm eingegangen. Nachfolgend wird nun der gemessene vertikale Versatzdruck besprochen. Grundsätzlich sollte das im Versatzdruckmessrahmen horizontal eingebaute Druckmesskissen mindestens jenen Druck anzeigen, welcher vom Eigengewicht des darüber liegenden Versatzkörpers auf die Zelle ausgeübt wird. Alle Messzellen wurden in einer Höhe von 4,5m über der Sohle der Fußstrecke eingebracht, was zu einer Überlagerungshöhe des Versatzkörpers bei vollständiger Verfüllung von 16,5m führt. Wird von der Messzelle ein höherer Druck gemessen, dürfte dieser in Form einer Reaktionsspannung auf Verformungen des Gebirges aufgebaut werden. Auch wenn horizontale Verschiebungen in den Festen zu einem gewissen Anteil auch vom horizontal angeordneten Druckmesskissen (Vertikalspannungsmesskissen) aufgenommen werden können, wenn z.B. ein Keil auf den Versatzkörper stürzt und dort zusätzliche Auflast verursacht, ist davon auszugehen, dass das horizontal angeordnete Messkissen Reaktionsspannungen in vertikaler Richtung aus dem Versatzkörper aufnimmt. Der Aufbau von Reaktionsspannungen in vertikaler Richtung ist jedoch nur möglich, wenn eine firstbündige Verfüllung der Abbaukammer erfolgt, d.h. ein kraftschlüssiger Kontakt zwischen Gebirge und Versatzkörper besteht. Bei der Analyse der Druckmessungen im Bergbau Breitenau ist klar ersichtlich, dass die vom horizontalen Druckmesskissen gemessenen Spannungen, wenn auch nicht sehr ausgeprägt, deutlich höhere Spannungen anzeigen, als es die reine Totlast des Versatzkörpers verursachen würde. Zusätzlich kann bei den zwei nachträglich firstbündig verfüllten Kammern E und F die zusätzliche Auflast durch das erhöhte Eigengewicht des Versatzes vom Druckmesskissen gemessen wird. Die zusätzliche Auflast wird jedoch nicht unmittelbar auf die Messzelle übertragen, sondern deutet sich durch ein stetiges, geringfügiges Ansteigen des Vertikaldruckes an. In der Kammer E beträgt die Anstiegsrate der Vertikalspannungen nach Beendigung der Verfüllung der Kopfstrecke 0,36kPa/Tag und bei der Kammer F 0,58 kPa/Tag bis zum letzten Messzeitpunkt im April 2018. Ein Unterschied zwischen berechnetem Druck aus dem Eigengewicht des Versatzkörpers und angezeigten Spannungen am Druckmesskissen ist in allen drei Kammern bemerkbar. Folgendes Diagramm zeigt die Unterschiede zwischen Totlast (durch Eigengewicht des Versatzkörpers) und angezeigten Vertikalspannungen für alle drei Kammern im Bergbau Breitenau:

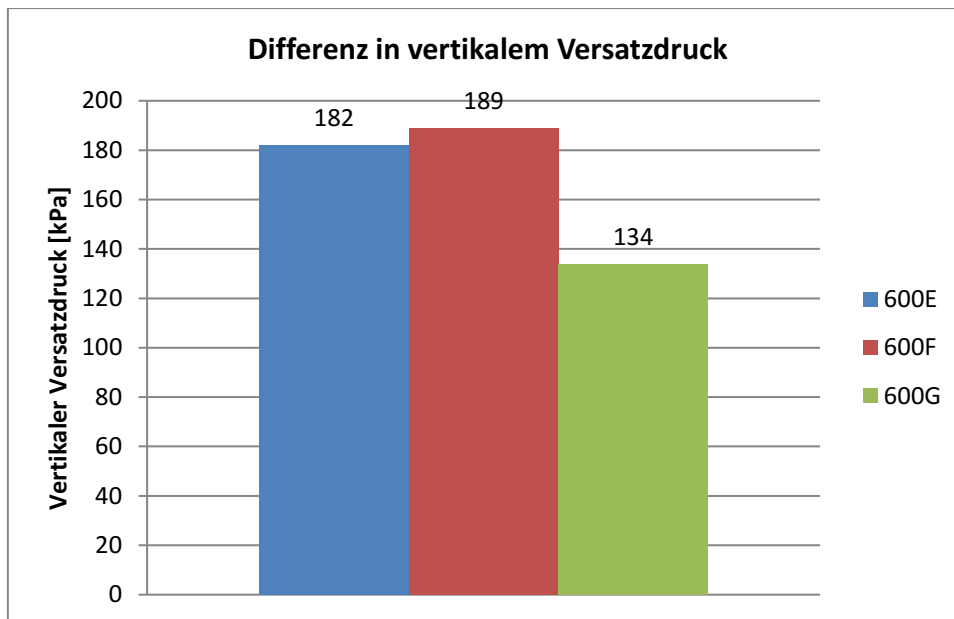


Abbildung 127: Differenz in vertikalem Versatzdruck der Kammern E, F, G im Bergbau Breitenau zwischen Versatztotlast durch Versatz-Eigengewicht und gemessenen vertikalen Versatzspannungen

Aus den durchgeführten Messungen kann geschlossen werden, dass der Versatzkörper in Form eines Spannungsaufbaus auf Verformungen aus dem Gebirge reagiert. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn ein Kontakt zwischen Gebirge und Versatzkörper besteht, d.h. in vertikaler Richtung nur bei firstbündiger Verfüllung. Wenn sich die Feste vertikal zusammendrückt, kann es zudem zu Scherspannungen im Kontaktbereich zwischen Gebirge und Versatz kommen, wodurch zusätzliche Spannungen auf den Versatzkörper übertragen werden können. Dieser Mechanismus dürfte durch verbesserte Versatzeigenschaften verstärkt werden, da das Versatzmaterial mehr Scherwiderstand gegen die vom Gebirge verursachte Verformung aufbringen kann. Dieses Phänomen könnte somit ein weiterer Grund für erhöhte vertikale Versatzdrücke sein. Es ist hier zu erwähnen, dass dies jedoch nicht eindeutig bestätigt werden kann, da die vertikale Zusammendrückung der Festen nicht beobachtet wurde. Insgesamt deuten alle Messergebnisse darauf hin, dass die Reaktionsspannungen mit zunehmendem Aushärtegrad, dh. zunehmender Festigkeit und Steifigkeit des Versatzes ansteigen.

Basierend auf den nunmehr kombinierten und analysierten Ergebnissen der Messungen sollen in den folgenden Abschnitten Modelle zur Wirkungsweise des Versatzes im Gebirgsverband sowie zur Erklärung einiger beobachteter Phänomene diskutiert werden.

8.3 Modell zur Wirkung von geringen Versatzdrücken

Werden die Bewegungsraten aller Festen (Abbaufesten 600E, 600F, 600G und Auflagerfeste 600H) betrachtet (Abbildung 128), kann festgestellt werden, dass jeweils nach Verfüllung der Kammern die Bewegungsraten absinken und auf 0 belaufen. Die negativen Werte in den Bewegungsraten zum Zeitpunkt 1150 (Ende der Verfüllung der Firststrecke in F und der Kammer G) deuten ein Zusammenziehen der Festen an, was sowohl bei der Feste E, der Feste F und im Auflager beobachtet werden kann. Die negativen Bewegungsraten können bei den Festen E und F während der Verfüllung der Kopfstrecken sowie im Auflager H während der Verfüllung der Strecke H gemessen werden. Das gemessene Zusammenziehen der Feste dürfte auf die lokale Stabilisierung von einzelnen Keilen im Extensometerbereich als Folge der Verfüllung zurückzuführen sein.

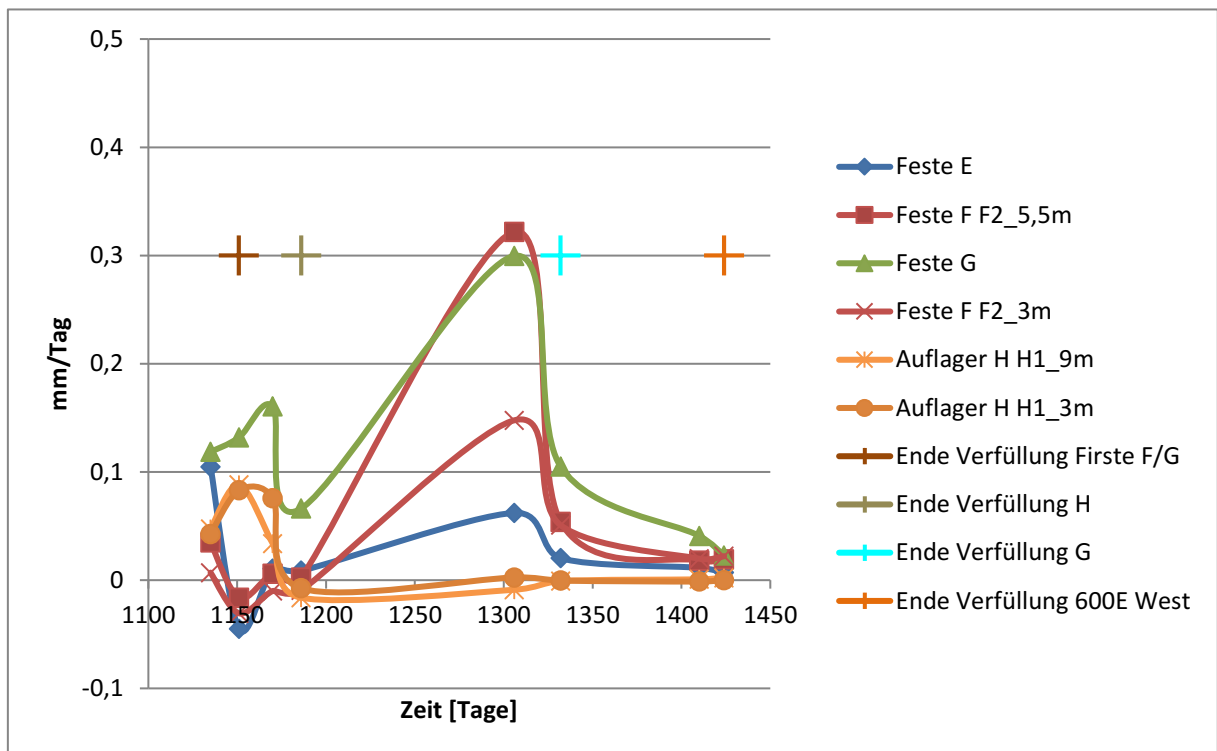


Abbildung 128: Bewegungsraten der Festen im Revier 6

Es stellt sich nun die Frage, was die Gründe für die Beobachtungen sind und warum Versatz bereits unmittelbar nach Einbringung zur lokalen und regionalen Stabilisierung führt, obwohl er noch keine ausgeprägte Festigkeit oder Steifigkeit besitzt. Weiters muss geklärt werden, was die Gründe für den Druckanstieg und darauffolgenden Druckabfall im Versatzdruck parallel zum Kammerulm in der Kammer 600F sind. Im folgenden Abschnitt werden nun unterschiedliche Ansätze zur Erklärung der beobachteten Phänomene vorgestellt.

Bei den Beobachtungen konnte festgestellt werden, dass die Querverformungen in den Festen abnehmen, sobald die Abbaukammern verfüllt werden und in weiterer Folge zum Stillstand kommen. Um Erklärungen für die beobachteten Phänomene zu finden, wurden unterschiedliche, in der Vergangenheit beschriebenen Modelle analysiert und ein Versuch angestellt, diese Modelle auf den vorliegenden Fall umzulegen. Diese Modelle stellen die Grundlage für Erklärung der beobachteten Phänomene dar und sollen das Erstellen von neuen Modellen unterstützen.

Bei den Messungen konnte festgestellt werden, dass das zur Ruhekommen der Verformungen unmittelbar mit der Verfüllung der Kammern einhergeht, d.h. zu einem Zeitpunkt wo der eingebrachte Pumpversatz weder eine Festigkeit noch eine Steifigkeit besitzt. Zu diesem Zeitpunkt ist die einzige Versatzwirkung der passive Versatzdruck bzw. solange der eingebrachte Versatz noch pastös ist der hydraulische Druck der Versatzsäule. Dieser hängt von der Versatzhöhe ab. Wenn sich der Versatz verfestigt hat werden der aktive und der passive Versatzdruck wirksam.

Grundsätzlich wirkt der Versatz laut Theorie auf zwei Arten, und zwar durch den aktiven und passiven Versatzdruck.

$$\sigma_{akt} = \varepsilon_{lat} E_v \quad (34)$$

ε_{lat} ...*Verformung des Versatzes*, $\varepsilon_{lat} = (\Delta w / b)$
 Δw ...*laterale Festenverformung [m]*
 b ...*Hohlraumbreite [m]*
 E_v ...*Verformungsmodul des Versatzes [Pa]*

$$\sigma_{pass} = \rho g h_v K_{OH} \quad (35)$$

ρ ...*Dichte des Versatzmaterials [kg/m³]*
 g ...*Erdbeschleunigung [m/s²]*
 h_v ...*Versatzhöhe [m]*
 $K_{OH} = 1 - \sin(\phi)$... *Erdruhedruckbeiwert*

Der aktive Versatzdruck entspricht der Spannung, welche als Reaktion zur Festenverformung im Versatzkörper aufgebaut wird, wobei die Größe des aktiven Versatzdruckes von der lateralen Festenverformung sowie von den Verformungseigenschaften des Versatzkörpers abhängt. Der passive Versatzdruck wird durch das Eigengewicht des Versatzes verursacht und entspricht dem passiven Erddruck. Der passive Versatzdruck ist wie aus der angeführten Formel hervorgeht abhängig von der Versatzhöhe, der Versatzdichte und dem Winkel der inneren Reibung des Versatzmaterials. Details zur Theorie des aktiven und passiven Versatzdruckes finden sich in Kapitel 3.5. Das Versatzmaterial im Bergbau Breitenau hat eine in-situ Dichte von ungefähr 1700

kg/m³ mit einer Füllhöhe von 21m, wobei der Messrahmen in einer Höhe von 4,5m eingebracht wurde und somit eine Verfüllhöhe von 16,5m herangezogen werden muss. Der Winkel der inneren Reibung konnte nicht gemessen werden, wird in diesem Fall mit 25° angenommen, was einen typischen Wert für bindige Böden darstellt. Aus den angeführten Daten kann der passive Versatzdruck für eine Abbaukammer im Bergbau Breitenau wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{pass} = \rho g h_v K_{OH} = 1700 * 9,81 * 16,5 * (1 - \sin 25) = 160 \text{ kPa}$$

Zusätzlich zum aktiven und passiven Versatzdruck dürften sich an der Kontaktfläche Gebirge/Versatz aufgrund der vertikalen Festenverformung Scherkräfte ausbilden, welche zusätzliche Spannung auf das Gebirge bewirken. Die vertikale Festendeformation wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht genauer untersucht, sollte jedoch erwähnt werden, da sie zu erhöhten Versatzdrücken aufgrund der Scherspannungen führen kann.

Die angestellten Berechnungen des passiven Versatzdruckes liegen mit 160kPa in dem Bereich der gemessenen horizontalen Versatzdrücke, welche sich auf 200-300kPa belaufen. Die Differenz dürfte an dem Schätzwert für die Versatzeigenschaften sowie an zusätzlich auftretenden Spannungen wie den erwähnten Scherspannungen liegen. Die Ausnahme bezüglich der Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Drücke bildet hier der horizontale Versatzdruck in Kammer 600F, wobei hier davon auszugehen ist, dass die gemessenen Drücke ein Resultat aus passivem und aktivem Versatzdruck sind bzw. noch zusätzliche Phänomene zum Tragen kommen, welche in weiterer Folge diskutiert werden.

Es stellt sich hier nun die Frage, warum eine so geringe Spannung auf Basis des passiven Versatzdruckes sowie der Scherspannungen bereits ausreicht um die Verformungen in den Festen aufzuhalten.

Ein Ansatz zur Erklärung dieses Phänomens könnte die Aktivierung von Reibungskräften entlang von Trennflächen sein.

Eine Diskontinuität kann über ihre Eigenschaften Kohäsion und Reibung beschrieben werden, d.h. die Diskontinuitätsparameter c und φ . Die Reibung in der Trennfläche ist abhängig vom Reibungswinkel entlang der Trennfläche φ , wobei der Haftreibungskoeffizient $\mu_H = \tan \varphi$ (Abbildung 129).

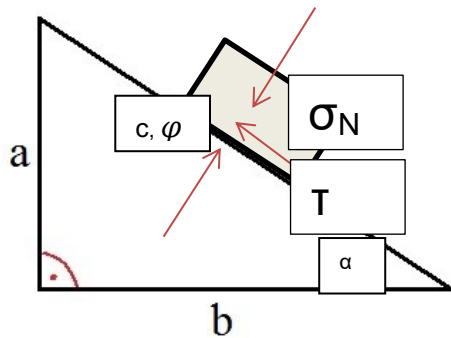


Abbildung 129: Modell zur Beschreibung von Diskontinuitäten im Gebirge

Die Scherfestigkeit der Trennfläche gegen Abrutschen kann über das Mohr-Coulomb Gesetz

$$\tau = c + \sigma_N \tan \varphi \quad (36)$$

beschrieben werden, wobei c die Kohäsion entlang der Trennfläche, $\tan \varphi$ die Reibung entlang der Trennfläche und σ_N die Normalspannung auf die Trennfläche beschreiben.

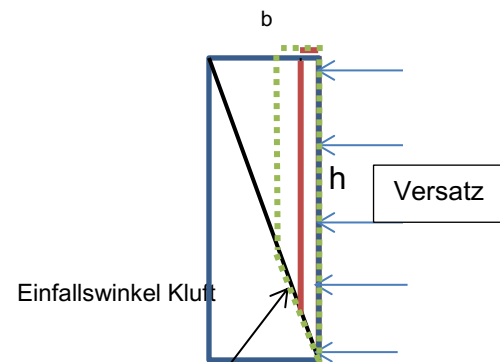
Die Reibungskraft, welche von einer Kraft F überwunden werden muss um eine Bewegung entlang einer geologischen Trennfläche zu verursachen lautet dementsprechend

$$F_R = \mu F_N \quad (37), \text{ wenn } c=0, \text{ wobei } \mu = \tan \varphi$$

Als Resultat von abbauinduzierten Spannungskonzentrationen in den Bergfesten, kommt es zu Bruchvorgängen und dem Lösen von einzelnen Felskeilen aus dem Gebirge. Felskeile können in den Hohlraum abrutschen, wenn die Reibung entlang der Trennfläche durch treibende Kraftkomponenten (Eigengewicht des Blockes, Spannungen aus dem Gebirge) überwunden wird. Durch die Verfüllung des Hohlräumens wirkt der Versatz dem Herausgleiten des Felskeiles entgegen, wobei, wie aus Messungen hervorgeht, bereits geringe Versatzdrücke ausreichen um zusätzliche Reibungskomponenten entlang der Trennflächen zu aktivieren und die Bewegung des Felskeiles aufzuhalten.

Wird nun zur Überprüfung der Versatzwirkung eine Bergfeste betrachtet, an deren Ulm sich Schalen gebildet haben, kann die Stabilisierungswirkung von bereits geringen Versatzdrücken eindeutig gezeigt werden. Die Ulm-parallele Schale wird von einer Diskontinuität durchschnitten, wobei der Winkel der Diskontinuität zwischen 0 und 90 Grad variiert wird um auch den unterschiedlichen Einfluss der Reibung entlang der Trennfläche zu berücksichtigen. Zusätzlich wird das Höhe/Breiten-Verhältnis der Schale zwischen 0,01 und 0,1 variiert. Für die angeführten Fälle wird mit folgenden Gesteins-, Versatz- und Trennflächeneigenschaften die Sicherheit gegen Abgleiten berechnet.

Reibungswinkel Versatz	25°
KOH	0,57738174
Dichte Versatz	1700kg/m ³
c	0
g	9,81m/s ²
Dichte Gestein	2500kg/m ³
Kluffreibung	30°
Reibungskoeffizient	0,57735027



Die folgenden Diagramme zeigen einen Vergleich der Sicherheitsfaktoren für Trennflächen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln mit und ohne Unterstützung durch Versatz. Der Sicherheitsfaktor ergibt sich als Verhältnis aus rückhaltenden zu treibenden Kraftkomponenten der betrachteten Situation. Für eine nicht verfüllte Kammer und eine kohäsionslose Trennfläche setzen sich die treibende Komponente aus dem Eigengewicht des Blockes zusammen und die rückhaltende Komponente aus der Reibung entlang der Trennfläche. Im verfüllten Fall kommt als rückhaltende Komponente noch der Versatzdruck hinzu. Dieser erhöht die Reibungskraft entlang der Trennfläche und wirkt zusätzlich dem Gewicht der Schale, das diese zum Abrutschen bringt, entgegen. Für den Versatzdruck wird der passive Versatzdruck mit der Formel $\sigma_{pass} = \rho g h_v K_{OH}$ berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass der Versatz über die gesamte Blockhöhe wirkt. Die Berechnungen zeigen, dass der Sicherheitsfaktor mit Versatz in allen Fällen mehr als doppelt so hoch ist verglichen zum unverfüllten Zustand. Die größte Versatzwirkung kann bei sehr flachen Keilen beobachtet werden, was an der geringen treibenden Gewichtskraftkomponente bei flachen Keilen und gleichzeitig konstantem Versatzdruck für alle Klufteneinfallswinkel liegt. Beim Vergleich von verschiedenen B/H-Verhältnissen der Blöcke ist klar erkenntlich, dass die Sicherheit gegen Abgleiten umso höher ist, je kleiner das B/H-Verhältnis ist. Dies liegt am verminderten Eigengewicht von schmalen Schalen im Vergleich zu mächtigen Schalen.

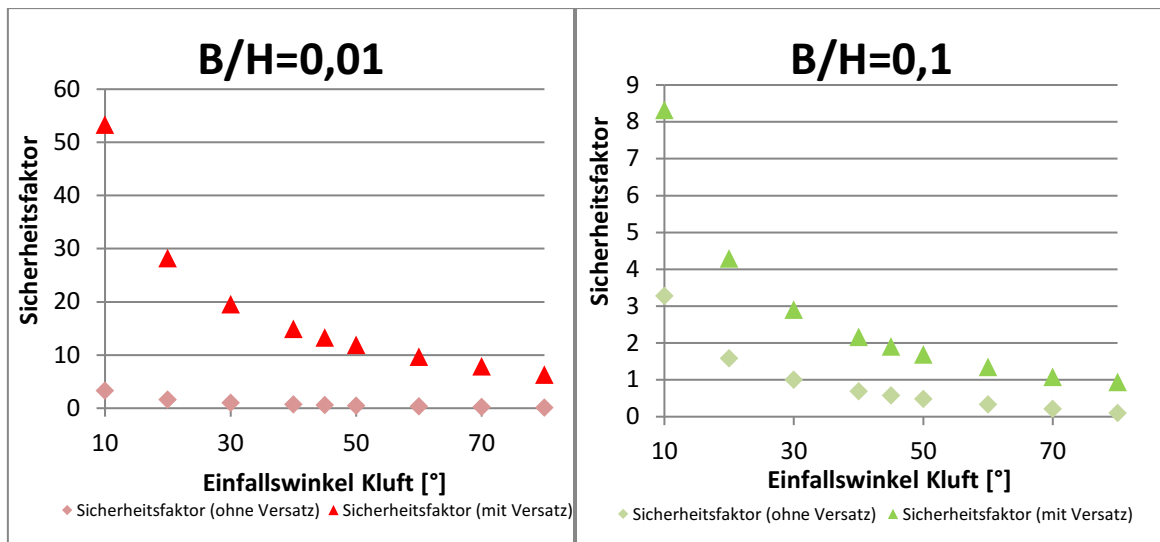


Abbildung 130: Sicherheitsfaktor gegen Abgleiten eines Felskeiles für verschiedene Klufteneinfallswinkel und Breiten/Höhen-Verhältnis von 0,01 (links) und 0,1 (rechts) von Gesteinsschalen

Aus den durchgeführten Berechnungen und Messungen geht hervor, dass bereits Drücke in Höhe des passiven Versatzdruckes ausreichen um einzelne Felskeile zu stabilisieren und das Herausgleiten zu verhindern. Zusätzlich zur Stabilisierung von einzelnen Felskeilen kommt noch der Aufbau von Reaktionsspannungen im Versatzkörper als Folge von Gebirgsverformungen, welche eine zusätzliche stabilisierende Wirkung hervorrufen. Die zusätzlich auftretenden Scherspannungen an den Kontaktflächen führen zu einer weiteren Spannung auf das Gebirge und folglich zu einer größeren Versatzwirkung, was bei den Berechnungen nicht berücksichtigt wurde, die Versatzwirkung jedoch weiter verstärkt.

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, sind keine großen Versatzdrücke notwendig um das Gebirge durch Versatz zu stabilisieren. Bei den untertägigen Versatzdruckmessungen konnten jedoch in einer Abbaukammer erhöhte Versatzdrücke gemessen werden, was nicht unkommentiert bleiben soll. Aus diesem Grund wird im nachfolgenden Abschnitt das Auftreten dieses erhöhten Versatzdruckes analysiert und ein Ansatz zur Erklärung verfasst.

8.4 Erklärung zu erhöhten untertägig gemessenen Versatzdrücken

Für den Druckanstieg im Versatzdruck normal auf den Festenulm in 600F gibt es zur Erklärung mehrere denkbare Möglichkeiten. Ein Grund für den starken Druckanstieg könnte eine Verformung in der Bergfeste 600F in Richtung der Kammer F sein. Diese könnte als Resultat einer Spannungskonzentration innerhalb der Feste erfolgt sein, was zu einer elastischen Verformung der Feste 600F Richtung Kammer F geführt haben könnte (Abbildung 131 links), was den erheblichen Druckaufbau im Versatzkörper in Form einer Reaktionsspannung auf die Festenverformung erklären würde. Auf der anderen Seite könnte der Druckanstieg auch durch einen aus der Feste ausgebrochenen massiven Keil zustande gekommen sein. Jedenfalls handelt es sich bei der Ursache für den Druckanstieg nicht um ein statisches, sondern um ein dynamisches Phänomen, welches in Zusammenhang mit den benachbarten Sprengungen steht. Der Abfall im Druck normal auf den Festenulm findet zum gleichen Zeitpunkt statt wie die letzte Sprengung in der Schwebe der Kammer 600G (Abbildung 132, ca. Tag 1200), wodurch das letzte Element, über welches die zusätzliche Spannung auf die Feste übertragen wird, herausgenommen wird. Demzufolge geht die elastische Verformung der Feste 600F um 5,6mm zurück, was einem Druckabfall in der Feste um 1,6MPa entsprechen würde (Abbildung 131 rechts) und somit den Druckabfall erklären würde. Dies kann auch durch einfache Simulation im elastischen Bereich bestätigt werden, was die hier angeführte Hypothese unterstützt. Das beschriebene Verhalten muss jedoch unabhängig von der mittels Extensometer gemessenen Querverformung der Feste betrachtet werden, welche größtenteils auf Brucherscheinungen in der Feste, insbesondere entlang von Trennflächen, zurückzuführen ist.

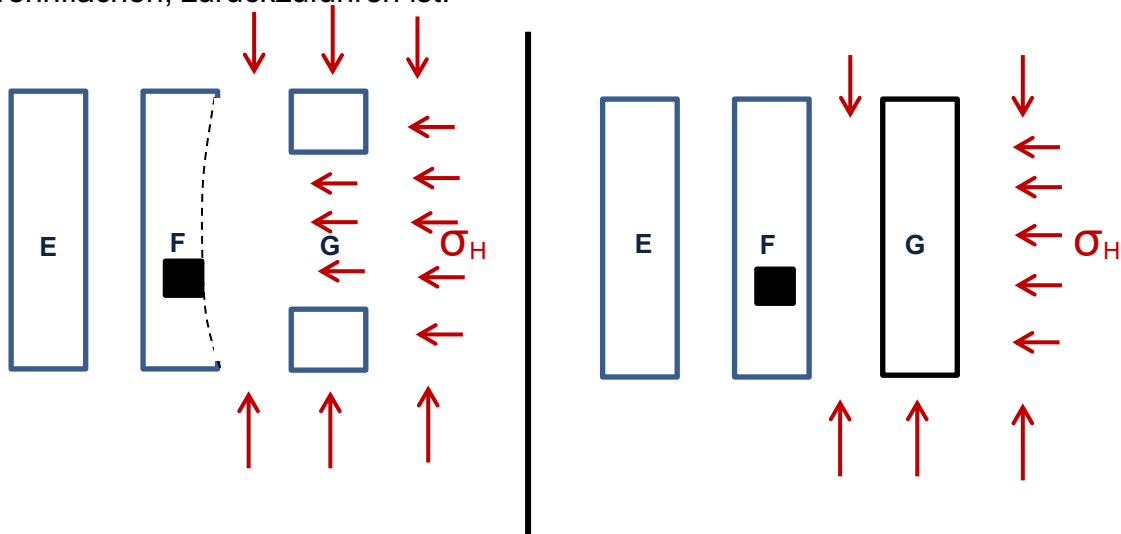


Abbildung 131: Skizze zur Hypothese bezüglich erhöhter Versatzdrücke

Bei den Versatzdruckmessungen kann ein Druckanstieg normal auf den Festenulm der Kammer 600F auf insgesamt 5MPa beobachtet werden. Dieser Druckanstieg erfolgt in 2 Etappen, zuerst auf ca. 3,3MPa und in einem 2. Schritt auf 5,3MPa. Der erste Druckanstieg dürfte auf Bruchverformung in der Feste zurückzuführen sein, wobei hier 10mm der Verformung in der unmittelbaren Umgebung der Kammer 600F beobachtet werden (3m Messkopf) und 35mm in der zweiten Hälfte der Feste (Abbildung 132, ca. Tag 920). Diese Verformungen sind vermutlich auf die Streckenvortriebsarbeiten in der Kammer 600G zurückzuführen. In weiterer Folge stieg der Versatzdruck um weitere 2MPa an, was laut der aufgestellten Hypothese auf Verformungen als Folge der Spannungskonzentration in Feste F zurückzuführen sein dürfte. Beim Versatzdruck normal auf den Kammerulm im Versatzkörper 600F kann in weiterer Folge ein Druckabfall um 2MPa beobachtet werden (Abbildung 132, ca. Tag 1200 nach Einbringung). Laut der aufgestellten Hypothese dürfte dieser Druckabfall auf die Entlastung der Feste als Folge der vollständigen Schwebengewinnung in 600G zurückzuführen sein, wodurch wie erwähnt, das letzte Element, über welches die zusätzliche Spannung übertragen werden konnte, herausgenommen wurde. Somit dürfte die elastische Verformung in der Feste zurückgegangen sein und sich der Versatzdruck reduziert haben.

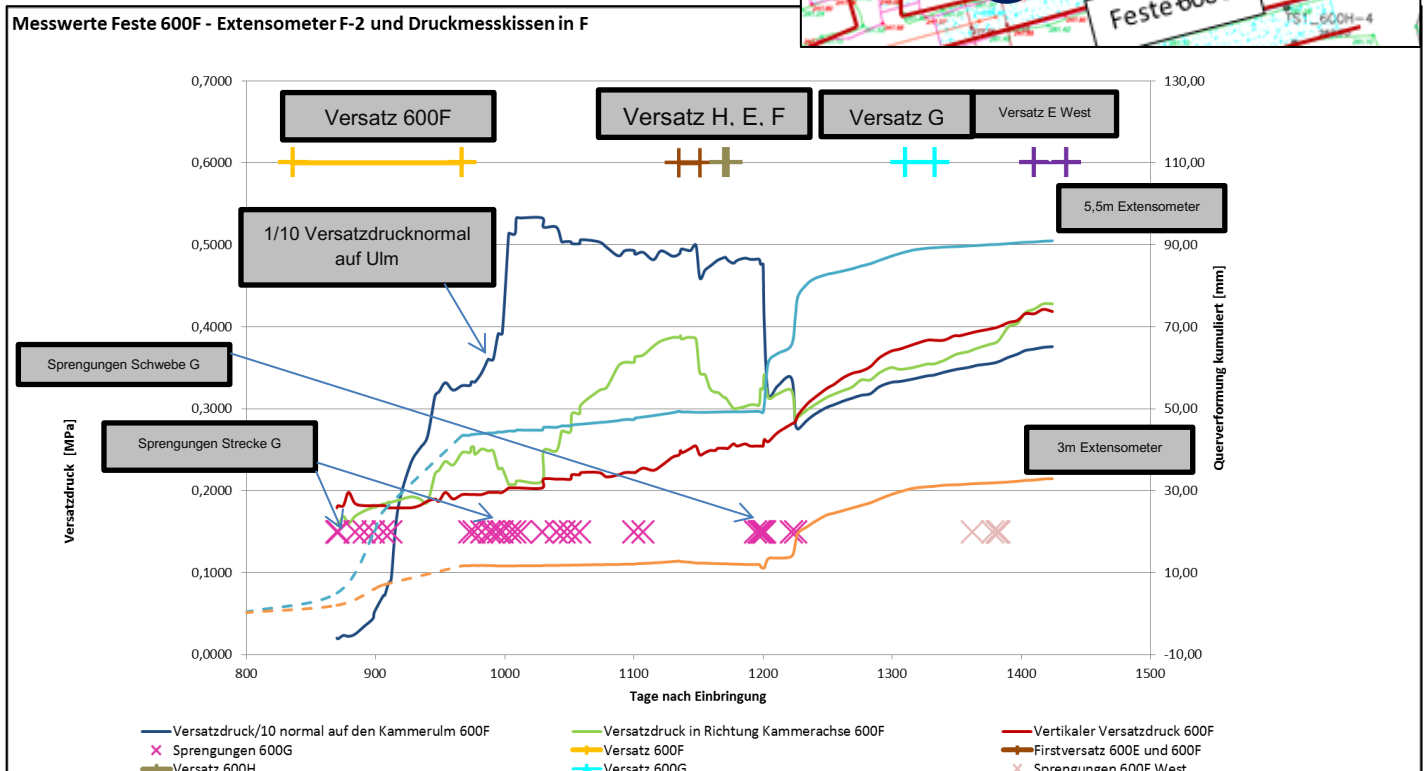


Abbildung 132: Versatzdruck und Extensometermessungen der Feste 600F

Nicht nur erhöhte Versatzdrucke, sondern auch markante Bruchphänomene, wie Schalen um Strecken und Kammern haben die Aufmerksamkeit des Autors erregt, erweisen sie sich wie aus der Literatur hervorgeht von großer Bedeutung für die lokale Stabilität der Hohlräume. Aus diesem Grund wird im Rahmen des nachfolgenden Abschnittes auf die Bildung von Gesteinsschalen um Hohlräume und deren Versagen eingegangen.

8.5 Untertägige Schalenbildung und ihr Versagensmechanismus

Bei den untertägigen Befahrungen konnte die Bildung von Schalen parallel zur Hohlraumwand beobachtet werden. Dieses Phänomen trat insbesondere in der letzten Abbauphase des Abbaufeldes 600G im Bergbau Breitenau auf. Schalenbildung stellt zudem ein bekanntes Phänomen in tiefen Bergbauen dar, wobei dieses Phänomen insbesondere die Festigkeit von schlanken Bergfesten negativ beeinflusst (Esterhuizen, 2006). Mit fortschreitender Teufe gewinnt dieses Bruchphänomen noch an größerer Bedeutung, da sich Schalenbildung maßgeblich auf die lokale Standfestigkeit von Kammern und Strecken auswirkt.

In spröden Gebirgsformationen kommt es aufgrund erhöhter Spannungen um Hohlräume zur Bildung von Rissen parallel zur Hohlraumwand, wobei diese in Richtung der größten Hauptnormalspannung, in diesem Fall der Tangentialspannung um den Hohlraum entstehen. Untersuchungen (Hoek und Martin 2014, Diederichs 2003) zeigen, dass sich derartige Risse bei Spannungen bilden, welche etwa 40-60% der einaxialen Druckfestigkeit des Gesteins entsprechen. Kommt es zu weiterer Belastung erhöht sich die Dichte der Bruchflächen, was zur Abspaltung der gebildeten Schalen führen kann. (Hoek und Martin 2014, Diederichs 2003). Aufgrund ihrer Geometrie können die gebildeten Schalen in Form des Ausknickens versagen, was ein bedeutendes Risiko für die lokale Stabilität der Grubenbaue darstellt. Aus diesem Grund wird das Ausknicken von um den Hohlraum gebildeten Schalen im Folgenden genauer betrachtet. Es wird insbesondere auf das Versagen der Schalen und den Einfluss von Versatz auf das Versagen eingegangen.

Für das Ausknicken von Schalen ist vor allem die Geometrie der gebildeten Schalen entscheidend. Die Last, die benötigt wird um eine Schale zum Ausknicken zu bringen, wird für elastisches Materialverhalten als kritische Knicklast durch folgende Zusammenhänge beschrieben:



$$I_y = \frac{lt^3}{12}$$

$$\lambda = \frac{l}{i}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$\sigma_k = \sigma_1 = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

$$\frac{l}{t} = \pi \sqrt{\frac{E}{12\sigma_1}} \quad (38)$$

l...Länge der Schale [m]

t...Breite der Schale [m]

A...Fläche der Schale ($t \cdot l$) [m²]

I_y...Flächenträgheitsmoment [m⁴]

λ...Schlankheitsgrad der Schale

i...Flächenträgheitsradius [m]

σ_k...Kritische Knickspannung [Pa]

σ₁...Größte Hauptnormalspannung, muss >σ_g (Griffith compressive strength) sein)

E... E-Modul des Gesteins [Pa](muss aufgrund der Brucherscheinungen im Gestein reduziert werden)

In einem ersten Schritt ist in der Praxis zu klären, ob die gebildeten Schalen tatsächlich gefährdet sind durch Knicken zu versagen. Hier kann auf unterschiedliche Knicktheorien zurückgegriffen werden, wobei die Knicktheorie nach Euler Bernoulli die am häufigsten angewandte darstellt. Diese geht von einem elastischen Knicken des Materials aus, wobei unterschiedliche Knickfälle unterschieden werden, welche sich durch unterschiedliche Einspannung des Objektes an den Enden und daraus resultierender unterschiedlicher Knicklängen unterscheiden (Abbildung 133).

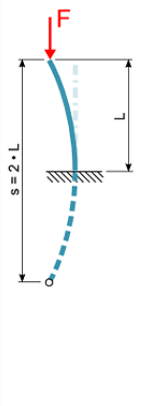
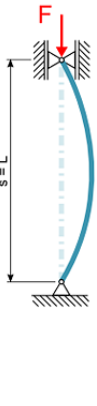
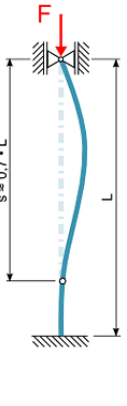
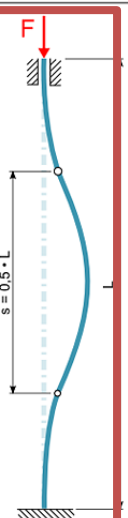
Knickfälle	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
www.maschinenbau-wissen.de				
Knicklängenbeiwert	$\beta = 2$	$\beta = 1$	$\beta = \frac{1}{2} \sqrt{2} \approx 0,7$	$\beta = 0,5$
Knicklänge s $s = \beta \cdot L$	$s = 2 \cdot L$	$s = L$	$s \approx 0,7 \cdot L$	$s = 0,5 \cdot L$
kritische Knicklast	$F_{krit} = \frac{\pi^2}{4L^2} EI$	$F_{krit} = \frac{\pi^2}{L^2} EI$	$F_{krit} = \frac{2\pi^2}{L^2} EI$	$F_{krit} = \frac{4\pi^2}{L^2} EI$

Abbildung 133: Euler-Knickfälle (<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/festigkeitslehre/134-knicken-euler>)

Laut der Knicktheorie von Euler Bernoulli ist die kritische Kraft, welche zum Ausknicken führt, folgendermaßen beschrieben:

$$F_{krit} = \alpha \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (39)$$

Wobei EI die Biegesteifigkeit und l die Höhe des Objektes beschreiben. (Kollbrunner und Meister, 1961).

Laut Theorie (Fairhurst und Cook, 1966) genügt jedoch bereits eine geringfügige Einspannung durch σ_3 um sowohl die Knicklänge als auch die Rissausbreitung zu verhindern. Wie die durchgeführten Versatzdruckmessungen zeigen, wird mindestens eine Einspannung in Höhe des Erdruhedrucks durch den Versatz auf das Gebirge ausgeübt. Zusätzlich kann durch das Aufbringen des Versatzdruckes die freie Knicklänge auf 0 reduziert werden, weswegen es nicht mehr zum Ausknicken der Schalen kommen kann.



Abbildung 134: Schalenbildung im Bergbau Breitenau

Um die theoretischen Ansätze im praktischen Anwendungsfall zu überprüfen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit erste Versuche im Labormaßstab zur Beurteilung des Einflusses von Versatz auf das Knickverhalten von Schalen durchgeführt. Hier muss erwähnt werden, dass das Ziel des Versuchsaufbaus die qualitative Beurteilung des Einflusses von Versatz auf untertägig gebildete Schalen war und es sich bei dem Experiment um einen ersten Versuch der Reproduktion dieser Wechselwirkung im Labormaßstab handelt.

Bei den durchgeführten Versuchen handelt es sich um einaxiale Druckversuche, durchgeführt in der am Lehrstuhl vorhandenen Prüfpresse, wobei hohe, schlanke Granitplatten unter einaxialem Druck belastet wurden. Für die Versuche wurden zwei verschiedene Set-ups verwendet, wobei sich diese durch die Position der Gesteinsschale und die Verfüllung unterscheiden (Abbildung 135). Als Proben wurden Gesteinsplatten einer Höhe von 250mm, einer Breite von 50mm und einer Mächtigkeit von 3mm getestet. Diese Geometrie erfüllt die Voraussetzung des benötigten Schlankheitsgrades (laut Theorie) um ein Versagen durch Ausknicken hervorzurufen. Der verwendete Granit war zudem sehr homogen und ohne Trennflächen. Als Verfüllmaterial wurde Quarzsand verwendet. Die Versuche wurden in einem Rahmen aus Stahl durchgeführt, welcher von allen Seiten abgeschlossen war um eine Verfüllung des Hohlraumes um die Platten zu ermöglichen.

Im ersten Versuchsaufbau wurde die Gesteinsschale am Rand des Rahmens in Kontakt mit der seitlichen Rahmenwand platziert. Die Grundidee dieses Aufbaus war die Reproduktion einer untertägig gebildeten Schale, welche abgespalten ist und noch in Kontakt mit dem Gebirgsverband steht, wobei hier lediglich das Knickverhalten der Schale untersucht wurde und der Hohlraum unverfüllt blieb. Dies erlaubte die Untersuchung des Knickverhaltens einer Schale mit und ohne Versatz. Wie in der untertägigen Situation kann die Schale lediglich in Hohlraumrichtung ausknicken. Im zweiten Versuchsaufbau wurde der Hohlraum

mit Quarzsand befüllt und die Schale wiederum unter Druck belastet (Abbildung 135 rechts und 136).

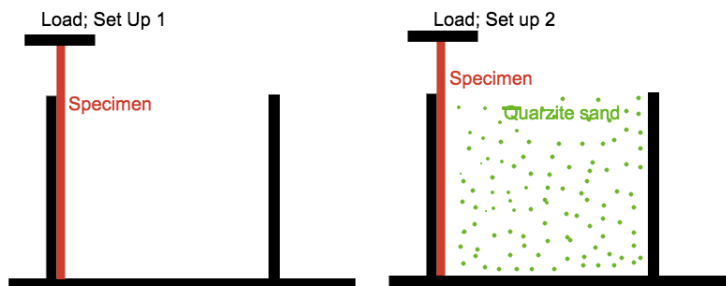


Abbildung 135: Set-ups für Gesteinsplattenversuche



Abbildung 136: Versuchsaufbau einer Gesteinsplatte unter Einfluss der Verfüllung (Set-up 2)

Trotz einiger Einschränkungen konnten aus den durchgeführten Versuchen grundlegende Schlüsse über das Versagensverhalten von Gesteinsschalen mit und ohne Versatz gezogen werden. Diese Einschränkungen beziehen sich auf das verwendete Material (Granit), welches das Versagen der Proben in einem gewissen Ausmaß beeinflusst. Da es sich bei den Proben um sehr schlanke Platten handelt (3mm), wird das Versagen aufgrund der Korngröße der das Gestein aufbauenden Mineralien maßgeblich beeinflusst. Diese Einschränkung tritt jedoch sowohl bei Platten mit und ohne Versatz auf und beeinflusst daher die Aussage über die Wirkung von Versatz auf das grundlegende Versagensverhalten von Gesteinsplatten unter dem Einfluss von Versatz nicht. Im Rahmen der Versuche wurde in weiterer Folge versucht die Knickspannung der Proben ohne Versatz (Abbildung 137 Proben 1-9 und Proben 11 und 17-26) mittels der Euler'schen Knicktheorie vorherzusagen. In Abbildung 137 ist in rot der zu erwartende Bruchbereich der Probe dargestellt und in grün und violett die

tatsächlich gemessenen Bruchspannungen. Bei den Versuchen konnte festgestellt werden, dass Schalen ohne Versatz (Proben 1-9, 11 und 17-26) durch Knicken versagen und Schalen im Versatz (Quarzsand, unverdichtet) durch Strukturversagen unter wesentlich höheren Spannungen versagen.

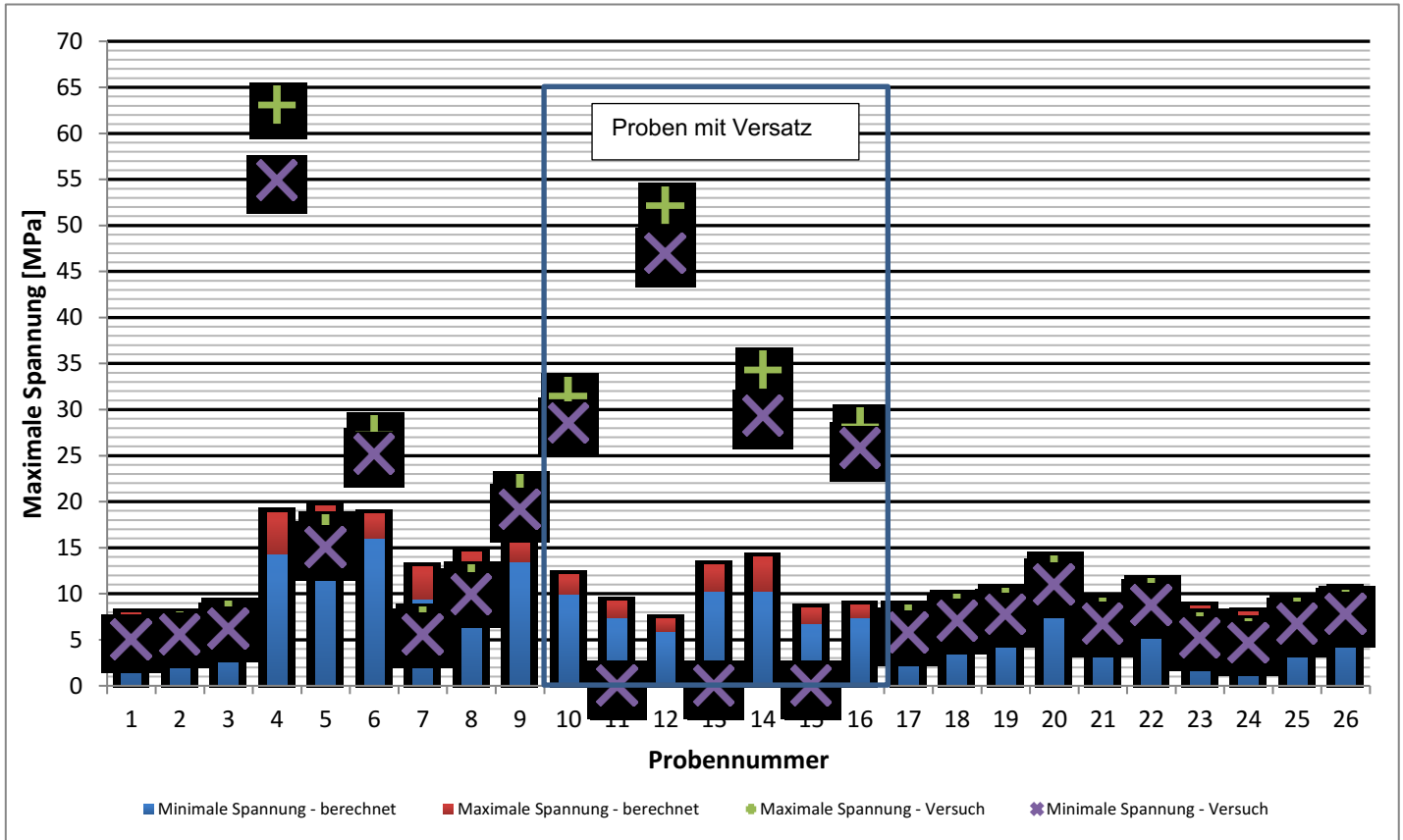


Abbildung 137: Ergebnisse der Knickversuche im Labormaßstab

Da als Versatzmaterial unverdichteter Quarzsand verwendet wurde, ist der Aufbau von hohen Drücken im Versatzkörper nicht zu erwarten. Dies führt wiederum zu dem Schluss, dass bereits kleine Drücke in Höhe des Erdrudruckes ausreichen um auch das Knicken von Schalen zu unterbinden. Hier muss jedoch erneut darauf hingewiesen werden, dass es sich bei dem Versuchsaufbau um die Überprüfung eines grundlegenden Zusammenhanges mit einfachen Mitteln handelt und die Ergebnisse lediglich eine grobe Idee erlauben und eine Anpassung von Versuchsaufbau und Probenmaterial erfordern um genaue Aussagen treffen zu können.

Bezüglich der Wechselwirkung von Bergfesten und Versatz wurde wie in Kapitel 7 beschrieben eine Versuchsreihe im Labormaßstab durchgeführt. Die Erkenntnisse aus dieser Versuchsreihe zur Wechselwirkung von Versatz und Bergfesten werden im folgenden Abschnitt dargestellt, sowie ein Vergleich zwischen Modell und in-situ Verhalten, welche in Kombination Schlüsse über die Versatzwirkung erlauben.

8.6 Erkenntnisse aus Laborversuchen

Wie in Kapitel 7.9 beschrieben, konnte im Rahmen der Laborversuche festgestellt werden, dass die Verfüllung des die Modellfeste umgebenden Hohlraumes deren maximale Festigkeit nicht beeinflusst, unabhängig vom verwendeten Versatzmaterial. Der größte Einfluss der Verfüllung konnte in der Nachbruchphase festgestellt werden. Hier haben sich jedoch einige Unterschiede bezüglich der verwendeten Versatzmischungen gezeigt, welche im nachfolgenden Abschnitt diskutiert werden sollen.

8.7 Analyse und Interpretation der Ergebnisse

Die Analyse der Ergebnisse der Laborversuche erfolgte in 3 Phasen entlang des Belastungsastes während der einaxialen Druckbelastung der Modellfesten: der Belastungsphase vor Erreichen der maximal aufnehmbaren Spannung, im Bereich der maximalen Festigkeit und im Nachbruchbereich.

Anfangsphase der Belastung

In der Anfangs-Belastungsphase konnte insbesondere bei den zwei Versatzmaterialien, welchen Wasser zugesetzt wurde, ein wesentlich flacherer Belastungsverlauf beobachtet werden als bei den Modellfesten ohne Versatz (Abbildung 138). Dieses Belastungsverhalten konnte bei allen Modellfesten mit bindemittelverfestigtem und hydraulischem Versatzmaterial beobachtet werden. Diese anfängliche flachere Spannungszunahme könnte darin begründet sein, dass während des Einrüttelns des Versatzmaterials durch das Wasser feine Sandfragmente unter die Modellfeste gespült werden, welche während der Belastung in einem ersten Schritt zerstört werden, bevor die Modellfeste selbst die Spannung aufnehmen kann. Diese Begründung scheint naheliegend, da es keinen ersichtlichen Grund gibt, warum der anfängliche Spannungsaufbau wesentlich langsamer erfolgt als bei den vergleichbaren Modellfesten ohne Versatz bzw. in losem Versatz (Abbildung 138). Der weitere Belastungsverlauf der Modellfesten in bmv und lvf verhält sich zudem wie jener der Modellfesten in losem Versatz, was die angeführte Erklärung unterstützt. Die Sandpartikel unterhalb der Modellfesten dürften ebenfalls der Grund für die geringeren E-Moduli der Modellfesten in Versatz sein, wobei der E-Modul der Modellfesten in losem Versatz noch deutlich höher ist als bei den Modellfesten in hydraulischem und bindemittelverfestigtem Versatz. Dies dürfte daran liegen, dass durch das fehlende Wasser weniger Partikel unter die Probe gelangen als bei den Versatzmischungen mit Wasser.

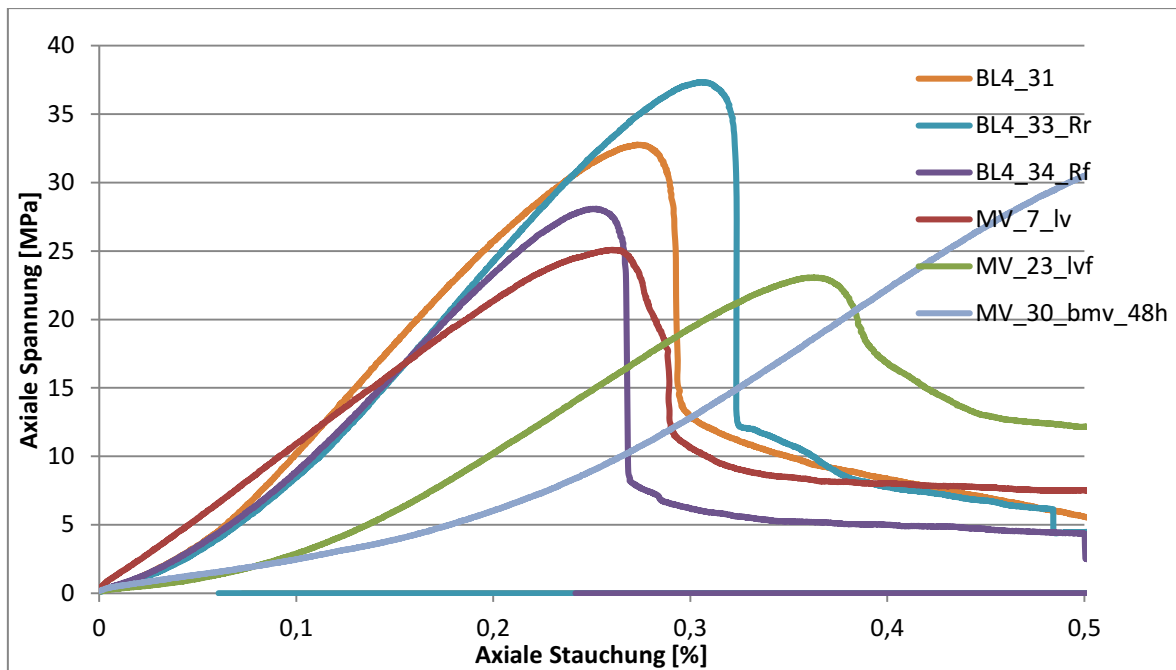


Abbildung 138: Anfangsbelastung der Modellfesten mit und ohne Versatz

Verhalten im Bereich der maximalen Festigkeit der Modellfesten

Bei der Betrachtung der maximalen Widerstände gegen die Verformung konnte festgestellt werden, dass durch die Verfüllung des die Modellfeste umgebenden Hohlräumeres keine Erhöhung der maximal erreichbaren Festigkeit erzielt werden konnte, unabhängig vom verwendeten Versatzmaterial. Dies dürfte darin begründet sein, dass, wie Hasewend (2004) gezeigt hat, bei schlanken Festen ($b:h < 0,5$) der Einfluss des Umschlingungsdruckes auf die maximale Festigkeit sehr gering ist, da im Kern kein 3-axialer Spannungszustand herrscht. Der positive Einfluss des Versatzes auf die maximale Festigkeit sollte somit bei gedrunenen Festen eindeutig erkennbar sein.

Verhalten im Nachbruchbereich der Modellfesten

Im Nachbruchbereich zeigt sich, dass Modellfesten in Versatz deutlich höhere Festigkeiten über mehrere % axiale Stauchung aufrechterhalten können als Modellfesten ohne Versatz. Die Erhöhung der Restfestigkeit zeigt sich für bindemittelverfestigten Versatz am stärksten ausgeprägt, gefolgt von lvf und losem Versatz. Den geringfügig größten festigkeitssteigernden Einfluss zeigt der bindemittelverfestigte Versatz, welcher für 72h aushärten konnte. Abgesehen von der stark erhöhten Restfestigkeit zeigen die Modellfesten in bmv und lvf geringere Querverformungen als Modellfesten in losem Versatz.

Laut Theorie beruht die Stabilisierungswirkung von Versatz auf dem aktiven und passiven Versatzdruck. Der aktive Versatzdruck baut sich als Reaktionsspannung

als Resultat auf Verformungen im Gebirge auf, wodurch es zur Stabilisierung des Gebirges bzw. der Festen kommt. Durch das weiche und lose eingebrachte Versatzmaterial wird auch im Nachbruchbereich im Vergleich zu bmv und lvf größere Querverformung zugelassen und es dürfte somit ungehindert zum Abgleiten der Bruchflächen innerhalb der Modellfeste kommen, bevor der aktive Versatzdruck aufgebaut werden kann. Durch das Abgleiten entlang der Bruchfläche kommt es jedoch in weiterer Folge zu zusätzlicher Querverformung der Modellfeste, was zur Aktivierung des losen Versatzmaterials durch Kompaktion, also zum Aufbau von aktivem Versatzdruck führen dürfte und somit zu einer Stabilisierung der Modellfeste im Nachbruchbereich. Dies zeigt sich auch anhand der Versuchsergebnisse von Modellfesten mit losem Versatz, wo im Nachbruchbereich „Knicke“ zu erkennen sind (Abbildung 139), welche ein Abscheren entlang von Bruchflächen und ein Wiederaufnehmen der Spannung andeuten. Bindemittelverfestigter und hydraulischer Versatz können dichter eingebracht werden und werden durch erhöhte Anfangskohäsion bereits durch geringere Querverformungen aktiviert, wodurch die Gesamtquerverformung der Modellfesten geringer ist und die Stabilisierung im Nachbruchbereich wesentlich früher eintreten kann. Für losen Versatz, welcher um einiges weicher reagiert als hydraulischer Versatz oder bindemittelhaltiger Versatz ist die auftretende maximale Querverformung im Bereich von 7,5% Querdehnung, wobei sie für die anderen Versatzmaterialien im Bereich von 1,25% liegt. Durch die Querverformung von einigen % der Modellfestenbreite wird schlussendlich auch der lose eingebrachte Versatzkörper aktiviert und kann seine Stabilisierungswirkung durch den Aufbau des aktiven Versatzdruckes, wenn auch deutlich verzögert und wesentlich schwächer ausgeprägt, entfalten.

Bezüglich der Höhe der prozentuellen Restfestigkeiten konnte festgestellt werden, dass die höchsten Restfestigkeiten durch bindemittelhaltigen Versatz erzielt werden konnten. Dieses Phänomen dürfte ebenso darin begründet sein, dass durch die Bindemittelzugabe eine ausgeprägte Anfangskohäsion im Versatzmaterial aufgebaut werden kann, was dazu führt, dass die Stabilisierungswirkung beim bmv früher eintritt. Dies geht auch deutlich aus den Versatzuntersuchungen hervor, welche für bmv 0,5-1% Stauchung und für losen Versatz und hydraulischen Versatz 2% Stauchung im Bereich der maximalen Festigkeit, dementsprechend ein wesentlich steiferes Verhalten, zeigen.

Es ist jedoch auffällig, dass auch die Restfestigkeiten der Modellfesten unter der Verwendung einer Versatzmischung aus Sand und Wasser ohne Bindemittel kaum niedriger waren. Im Vergleich zum losen Versatz, welcher rein aus Sand einer Körnung von 0,1-0,3mm besteht, wurden jedoch weit höhere Restfestigkeiten erzielt. Hier stellt sich die Frage, welchen Einfluss somit die Wasserzugabe hat, welche zur Erhöhung der Stützwirkung des Versatzes im Nachbruchbereich führt.

Grundsätzlich werden Sandpartikel durch Adhäsion (Van-der-Waals-Kräfte, Wasserstoffbrücken, elektrostatische Anziehung) oder durch Kittsubstanzen (Ionenbrücken, Ausfällprodukte, Tonminerale oder organische Substanzen) zusammengehalten, was ganz allgemein als „Kohäsion“ bezeichnet wird. Ein bedeutsames „Kittmaterial“ ist Wasser. Durch die Wasserzugabe entsteht um jedes einzelne Korn ein so genanntes „Manschettenwasser“, wobei um Kornkontaktstellen ein kapillarer Unterdruck herrscht. Dieser bewirkt das Zusammenhalten der feuchten Partikel, was als „scheinbare Kohäsion“ bezeichnet wird. Die scheinbare Kohäsion geht sowohl bei Wassersättigung als auch bei Austrocknung verloren. (Gisi, 1997)

Die mechanische Stabilität eines kohäsionslosen Materials, wie dem verwendeten Sand, wird durch seine Zug- und Scherfestigkeit bestimmt. Nachdem dieser keine Kohäsion aufweist, hängt die Scherfestigkeit allein von der inneren Reibung des Sandes ab. Wird nun ein loses Material unter Druck belastet, werden zunächst die luftführenden Poren abgebaut indem sich die Körner gegeneinander verschieben und das Volumen folglich reduziert wird; das Material wird somit verdichtet. Je dichter ein Versatzmaterial demnach eingebracht wird, desto früher kann es seine Stützwirkung entfalten. Aufgrund dieses Verhaltens unter Belastung kann bei der Verwendung von losem Sand als Versatzmaterial nach dem Versagen der Modellfeste eine Verschiebung entlang der entstandenen Bruchflächen stattfinden. Diese mögliche Bewegung führt zu einer geringeren Restfestigkeit und zu den aufgetretenen Knicken in der Nachbruchphase (Abbildung 139).

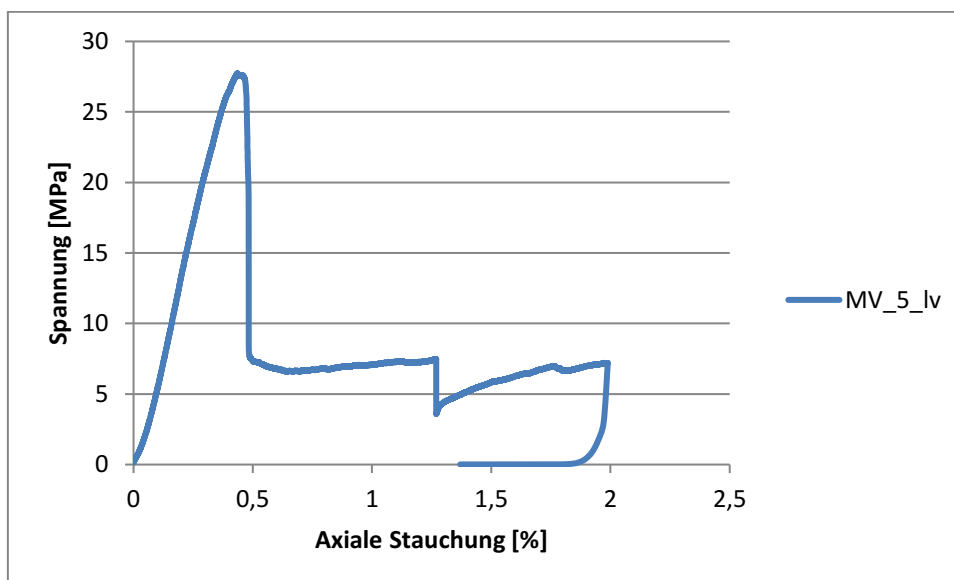


Abbildung 139: Last-Verformungskurve einer Modellfeste in losem Versatz

Die Verdichtung des Materials durch die Querverformung der Modellfeste führt jedoch zu ausreichender Stabilisierung der Bruchkeile, wodurch die Festigkeit wieder aufgenommen und aufrechterhalten werden kann. Dies deutet erneut auf

die Bedeutung eines dicht eingebrachten Versatzkörpers hin. Mittels der eingebrachten Druckmessfolien konnten sehr geringe Drücke im Bereich von 0,2-0,5MPa festgestellt werden, was das untertage beobachtete und mittels einfachen Modells beschriebene Phänomen wiederum bestätigt, dass äußerst geringe Drücke ausreichend sind um das Abrutschen von Keilen aus Festen zu stabilisieren.

Wird der Mischung nun Wasser zugegeben, kommt es durch die Wasserspannung im kapillaren Manschettenwasser zwischen den Körnern zu scheinbarer Kohäsion. Dadurch wird der Druck innerhalb des Materials erhöht und der Reibungswiderstand zwischen den Körnern vergrößert und somit die Kohäsion innerhalb der Körner vergrößert. Bei zu großen Wassergehalten geht diese Wirkung jedoch verloren, was bei der verwendeten Mischung nicht vorkommen kann, da sich der Versatzkörper durch die gewählte Testinfrastruktur geringfügig entwässern kann (wie es im Gebirge durch Trennflächen der Fall ist) und somit Überschusswasser abgebaut werden kann. Dies erklärt, warum der feuchte Sand eine weitaus größere Stabilisierungswirkung im Nachbruchbereich aufweist als der lose Sand. Die durch die Wasserzugabe aufgebaute Kohäsion dürfte ausreichend sein um die durch den Bruch entstandenen Keile derart zu stabilisieren, dass sehr hohe Spannungen im Nachbruchbereich aufrechterhalten werden können.

Wie jedoch bereits erwähnt, geht die durch die Wasserzugabe entstandene Kohäsion unter zu großer Wasserzugabe verloren, weswegen eine ausreichende Entwässerung des Versatzkörpers von Nöten ist. Kann diese nicht gewährleistet werden, sollte der Versatzmischung Bindemittel zugegeben werden um das Überschusswasser zu binden. Die Bindemittelzugabe zur Bindung des Überschusswassers ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Mengen an Überschusswasser gering sind und durch geringe Bindemittelanteile (bis zu 10% der Versatzmischung) gebunden werden können. Die Bindemittelzugabe ist ebenso von Nöten, wenn der Versatzkörper durch den Abbau des anstehenden Gebirges freigelegt wird und es zu einer freistehenden Versatzwand kommen kann.

Bei der Analyse des Einflusses der Bindemittelzugabe geht aus den Ergebnissen der Modellversuche mit bindemittelverfestigtem Versatz im Vergleich zu hydraulischem Versatz ohne Bindemittel hervor, dass die Bindemittelzugabe auch nach längerer Aushärtedauer des Versatzmaterials zu keiner deutlich erhöhten Stabilisierung führt. Dies gilt sowohl für die maximale Festigkeit der Modellfesten sowie für den Nachbruchbereich. Somit wird die These unterstützt, dass die Festigkeit des Versatzkörpers für die Stabilisierung im Nachbruchbereich eine untergeordnete Rolle spielt und die Verformungseigenschaften des Versatzkörpers (höherer E-Modul) von größerer Bedeutung sind. Dies soll jedoch nicht bedeuten, dass die Bindemittelzugabe keinen positiven Effekt auf die Versatzwirkung hat, da sie die Anfangskohäsion zusätzlich erhöht, zu einer

höheren Steifigkeit des Versatzes führt und das Abgleiten von Bruchkeilen frühzeitig verhindert und dementsprechend laut Versuchsergebnissen im Nachbruchbereich die beste Stabilisierungswirkung erzielt werden kann. Hier muss zudem erwähnt werden, dass nur eine bindemittelverfestigte Versatzmischung getestet wurde und die beobachteten Aushärtezeiten für den bindemittelverfestigten Versatz als kurz einzustufen sind und hier keine Aussagen über länger ausgehärtete bindemittelverfestigte Versatzkörper getroffen werden können.

Für die Stabilisierungswirkung im Nachbruchbereich für alle getesteten Versatzmischungen deuten die beobachteten Phänomene folglich darauf hin, dass die Verformungseigenschaften und eine frühe Reaktionsspannung im Versatzkörper zur erhöhten Stabilisierung im Nachbruchbereich erforderlich sind und hier die Festigkeit des Versatzkörpers von geringerer Bedeutung ist als die Verformungseigenschaften.

8.7.1 Zusammenfassung Erkenntnisse aus Laborversuchen

Bei den durchgeführten Laborversuchen konnte beobachtet werden, dass es unter Verwendung der gewählten Versatzmaterialien zu keinem Anstieg der maximalen Festigkeiten der Modellfesten gekommen ist. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Verfüllung einen erheblichen Einfluss im Nachbruchbereich hat. Hier konnte beobachtet werden, dass die beste Stabilisierungswirkung durch hydraulischen Versatz (Sand und Wasser) und bindemittelhaltigen Versatz erzielt werden konnte und es hier nur zu geringfügigen Unterschieden in der Qualität der Stützwirkung gekommen ist. Dies bedeutet, dass für die Stabilisierung der Festen im Nachbruchbereich keine hohen Versatzfestigkeiten von Nöten sind. Einen positiven Einfluss auf die Stützwirkung im Nachbruchbereich haben ein dicht eingebrachter Versatzkörper sowie eine hohe Anfangskohäsion, da dadurch eine frühe Aktivierung des aktiven Versatzdruckes durch geringe Querverformung der Modellfesten und somit die Erhaltung der Integrität der Modellfesten im Nachbruchbereich gewährleistet werden kann. Untersuchungen mit Druckmessfolien haben zudem gezeigt, dass in losem Versatz der Druckaufbau nur im verdichteten Bereich erfolgen kann, und es somit nur im verdichteten Bereich zum Aufbau von Reaktionsspannungen und folglich zur erhöhten Stützwirkung kommen kann, was wiederum die Bedeutung eines dicht eingebrachten Versatzkörpers unterstreicht.

Ob ein hochfestes Versatzmaterial die maximale Festigkeit beispielsweise erhöhen würde, kann anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht bestätigt oder widerlegt werden. Ein hochfester Versatzkörper entspricht jedoch auch nicht

einer realen Abbausituation, da die Festigkeit des Versatzkörpers im Bergbau in den häufigsten Fällen unter 1/10 der Festigkeit des Gebirges liegt.

8.7.2 Offene Fragen aus Laborversuchen

Im Rahmen der Modellversuche konnten einige Fragen bezüglich der Wirkung unterschiedlicher Versatzarten auf das Versagensverhalten von Modellfesten beantwortet bzw. behandelt werden. Die durchgeführten Versuche haben jedoch auch einige Fragen aufgeworfen, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht beantwortet werden konnten, hier jedoch kurz angeführt werden sollen.

Im Nachbruchbereich zeigt sich eine deutliche Stabilisierungswirkung von bindemittelverfestigtem Versatz. Es stellt sich hier jedoch die Frage, warum bindemittelverfestigter Versatz nach einer gewissen axialen Stauchung der Modellfeste nicht zu einem Anstieg in der Restfestigkeit der Modellfeste führt, wie Wagner (2009) festgestellt hat. Im Rahmen der vorliegenden Versuche konnte beobachtet werden, dass die Modellfeste den Versatz in lateraler Richtung um 2,5-7,5% zusammendrückt, was sich eindeutig in einer Festigkeitssteigerung der Modellfesten im Nachbruchbereich widerspiegeln sollte. Durch die Querdehnung der Modellfeste aufgrund der axialen Stauchung wird der Versatzkörper in lateraler Richtung zusammengedrückt, sollte somit Reaktionsspannungen aufbauen können und durch fortlaufende Zusammendrückung der Modellfesten aktiviert werden, was zu einer Festigkeitssteigerung der Modellfesten im Nachbruchbereich führen müsste. Dieses Phänomen konnte jedoch im Rahmen der Modellversuche nicht nachgewiesen werden.

Beim Vergleich von bindemittelverfestigtem Versatz mit hydraulischem Versatz hat sich im Nachbruchbereich beinahe dieselbe Stabilisierungswirkung gezeigt. Diese konnte für hydraulischen Versatz durch eine gewisse Anfangskohäsion aufgrund der Wasserzugabe begründet werden. Es fehlen jedoch die Erklärungen, warum der bindemittelverfestigte Versatz, welcher aufgrund der Bindemittelzugabe eine weitaus höhere Anfangskohäsion aufweist, nicht zu einer ausgeprägteren Stabilisierungswirkung führt als hydraulischer Versatz. Die Untersuchungen des bindemittelverfestigten Versatzes haben eindeutig gezeigt, dass es durch eine längere Aushärtedauer zudem zu einer Festigkeitssteigerung des Versatzes kommt und auch Verformungseigenschaften deutlich positiv beeinflusst wurden, was sich in den Modellversuchen jedoch nicht eindeutig widerspiegelt. Hier ist auch noch anzumerken, dass keine vergleichbaren Festigkeitsuntersuchungen des hydraulischen und des bindemittelverfestigten Versatzes durchgeführt werden konnten und somit der Vergleich dieser zwei Versatzmaterialien einigen Unsicherheiten unterworfen ist.

Die angeführten Fragen beziehen sich auf das grundlegende Phänomen, dass eine höhere Festigkeit des Versatzkörpers laut den durchgeführten Versuchen keine eindeutig positive Wirkung auf die Restfestigkeit der Modellfesten hat. Auch wenn die Stabilisierungswirkung im Nachbruchbereich bei bindemittelverfestigtem Versatz mit einer Aushärtedauer von 72h am stärksten ausgeprägt war, sind die Unterschiede zu den kürzer ausgehärteten Versatzkörpern sowie zum hydraulischen Versatz als sehr gering einzustufen.

Weiterführende Untersuchungen und eine etwaige Anpassung der Testinfrastruktur sind von Nöten, um die aufgeworfenen Fragen zu behandeln.

Nichts desto trotz konnten im Rahmen der Modellversuche einige Phänomene diskutiert und beobachtet werden, was somit zum aktuellen Wissensstand über die Wechselwirkung von Gebirge und Versatz beiträgt. Im nachfolgenden Abschnitt wird nun abschließend ein Vergleich zwischen den Modellversuchen und der realen Abbausituation im Bergbau Breitenau angestellt, um von im Labor beobachteten Phänomenen Rückschlüsse auf eine reale Abbausituation ziehen zu können.

8.7.3 Vergleich Modell und in-situ Verhalten

Abbausituation Bergbau Breitenau

Im Bergbau Breitenau handelt es sich um 21m hohe und 7m mächtige Festen, welche von beiden Seiten in Versatz eingebettet sind, wobei die Versatzmächtigkeit zwischen zwei Festen 6m beträgt. Die im Rahmen der Extensometermessungen festgestellten maximalen Querverformungen belaufen sich auf ca. 120mm und die gemessenen Versatzdrücke lagen im Bereich von 200-300kPa (mit Ausnahme Feste F, Erklärung Abschnitt 8.4). Die maximale Festigkeit der Abbaufesten wird mit 30MPa geschätzt.

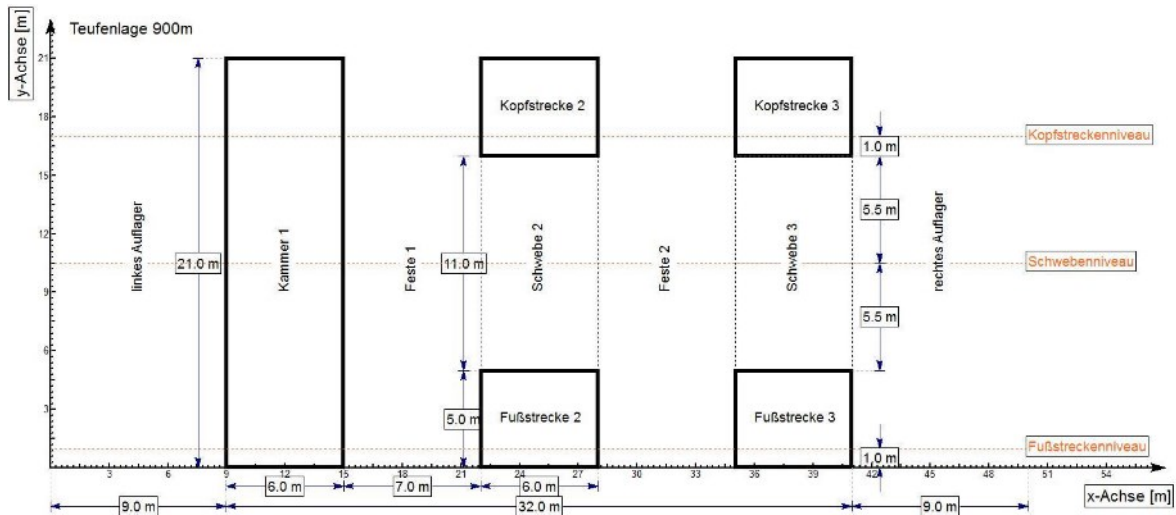


Abbildung 140: Zuschnitt des Abbaufeldes

Laboraufbau

Im Labormaßstab wurde eine Modellfeste der Höhe 160mm mit einer Mächtigkeit von 40mm getestet, welche von allen Seiten in einem Versatzmaterial eingebettet ist. Die Versatzbreite beträgt auf beiden Seiten je 20mm (Abbildung 141). Die gemessenen maximalen Querverformungen lagen im Bereich von 5mm und die mittels Druckmessfolien festgestellten Versatzdrücke belaufen sich auf 0,6MPa. Die maximale Festigkeit der Modellfesten liegt durchschnittlich bei 28MPa. Die Restfestigkeit der Modellfesten beläuft sich auf ca. 55% der Endfestigkeit (bei bindemittelverfestigtem und hydraulischem Versatz).

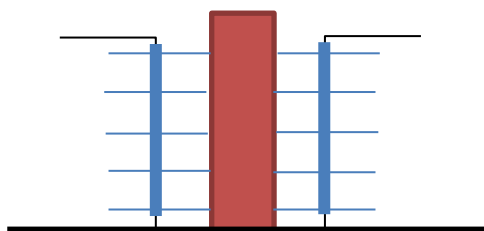


Abbildung 141: Versuchsaufbau

Die in beiden Situationen festgelegten Beobachtungspunkte beziehen sich auf die Querverformung der Feste, den Versatzdruck und die Restfestigkeit. Im Rahmen der Ähnlichkeitsbetrachtung (Kapitel 7.2.1) konnte eine grundlegende mechanische Ähnlichkeit zwischen Modell und realer Abbausituation festgestellt werden. Mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie können nun im Labormaßstab gemessene Größen auf die reale Abbausituation übertragen werden. Das Hauptaugenmerk der Berechnung liegt auf den Beobachtungsparametern: Querverformung der Modellfesten, Versatzdrücken und Restfestigkeit der Modellfesten. Zu diesem Zweck werden die in Abschnitt 7.2.1 präsentierten Zusammenhänge verwendet:

$$\lambda_1 = \frac{l}{l'} \quad (19)$$

$$\lambda_2 = \frac{\sigma}{\sigma'} \quad (20)$$

Wobei:

l...Länge in der Natur [m]

l'... Länge im Modell [m]

σ...Spannung in der Natur [N/m²]

σ'...Spannung im Modell [N/m²]

Sämtliche dimensionslosen Größen wie beispielsweise die Poissonzahl können im Maßstab 1:1 verwendet werden.

Mit einer Breite der Abbaufeste von $b=7m$ und einer Breite der Modellfeste von $b'=0,04m$ kann folgender Wert für λ_1 ermittelt werden:

$$\lambda_1 = \frac{b}{b'} = \frac{7}{0,04} = 175$$

Mit einer abgeschätzten in-situ Spannung von $\sigma = 24MPa$ (Berechnungen siehe Kapiteln 5.2.5) und einer durchschnittlichen Maximalbelastung der Modellfesten von $\sigma' = 28MPa$ kann folgender Wert für λ_2 berechnet werden:

$$\lambda_2 = \frac{\sigma}{\sigma'} = \frac{24}{28} = 0,86$$

Somit kann nun die Umrechnung der Labordaten auf die in-situ Größen erfolgen. In einem ersten Schritt wird die im Labormaßstab gemessene maximale Querverformung ($l_1'=0,5mm$ für bmv und lvf und $l_2'=3mm$ für lv) der Modellfesten auf eine reale Abbausituation umgelegt:

$$l_1 = \lambda_1 * l'_1 = 175 * 0,0005 = 0,0875m$$

$$l_2 = \lambda_1 * l'_2 = 175 * 0,003 = 0,525m$$

Die Ergebnisse zeigen, dass die mittels Messstiften festgestellte Querverformung für bindemittelverfestigten und hydraulischen Versatz in einer realen Abbausituation 87,5mm ergeben würde. Dies liegt nicht fern der untertägig gemachten Messungen von 120mm Querverformung der Abbaufesten. Zudem muss hier erwähnt werden, dass die untertägigen Messungen an einem Punkt der langgestreckten Abbaufeste erfolgen und an anderen Positionen durchaus höher oder niedriger sein könnten. Weiters sind die im Labormaßstab gemessenen Querverformungen jene, welche nach Versagen der Modellfesten aufgenommen

wurden, da mit dem gewählten Versuchsaufbau kein durchgängiges Aufnehmen der Querverformung möglich war. Die Verformungen für losen Versatz liegen weitaus höher, mit einer Querverformung von 525mm für eine reale Abbausituation. Dies deutet darauf hin, dass es bei der Verwendung von losem Versatz im Bergbau Breitenau zu wesentlich höheren Querverformungen der Abbaufesten kommen würde als es bei der momentan eingesetzten Versatzmischung der Fall ist.

Die im Labormaßstab aufgenommenen Versatzdrücke von 0,5-0,6MPa (nur für Iv) werden wie folgt auf die untertägige Abbausituation übertragen:

$$\sigma_1 = \lambda_2 * \sigma'_1 = 0,86 * 0,5 = 0,43MPa$$

$$\sigma_2 = \lambda_2 * \sigma'_2 = 0,86 * 0,6 = 0,52MPa$$

Die im Labor gemessenen Versatzdrücke sind jene, die aufgrund der maximalen Modellfestenverformungen für losen Versatz aufgenommen werden konnten. Auch wenn es in situ zum Einsatz von bindemittelverfestigtem Versatz kommt, liegen die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen im Bereich der untertägig gemessenen Größen. Es ist jedoch zu erwähnen, dass es sich beim betrachteten Modellversatzmaterial um losen Versatz handelt und davon auszugehen ist, dass der Druck in bindemittelverfestigtem Versatz höher ist.

Als Resultat der festgestellten Ähnlichkeit zwischen Modell und Realität können die gemachten Beobachtungen mit gewissen Limitierungen vom Modell auf eine reale Abbausituation umgelegt werden. Wird nun die Restfestigkeit der Modellfesten in Betracht gezogen, kann davon ausgegangen werden, dass die Restfestigkeit der Abbaufesten im Bergbau Breitenau ebenfalls zwischen 50 und 60% ihrer maximalen Festigkeit liegt. Die großen Querverformungen, welche im Bergbau Breitenau aufgenommen wurden, deuten darauf hin, dass die Abbaufesten ihre maximale Festigkeit überschritten haben und sich bereits im Bereich der Restfestigkeit befinden. Hier kommt die ausgezeichnete Wirkung der Verfüllung jedoch zum Tragen, weswegen die Abbaufesten dennoch äußerst stabil sind und eventuell gebildete Keile durch die aufgrund der Verfüllung erhöhte Reibkraft entlang der Trennflächen stabilisiert werden. Dies deutet jedoch wiederum darauf hin, dass davon auszugehen ist, dass auch in situ keine ausgeprägte Versatzfestigkeit von Nöten ist um die Stabilisierung der Festen zu gewährleisten.

9 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Dissertation war es einen Beitrag zum Verständnis über das Verhalten von Versatz im Gebirgsverband zu leisten. Zu diesem Zweck wurden in einem ersten Schritt die zwei Komponenten des Gesamtsystems, nämlich Gebirge und Versatz, separat beschrieben und diskutiert, was die Grundlage für die Erforschung des Verständnisses des Gesamtsystems darstellt. Von besonderer Bedeutung hat sich die Bindemittelzugabe zum Versatzmaterial herausgestellt, welche sowohl einen erheblichen wirtschaftlichen Einfluss aufgrund der Kosten des Bindemittels als auch technologisch einen hohen Stellenwert in der Versatztechnologie einnimmt. Die unterschiedlichen Aufgaben und Gründe für den Einsatz von Versatz im untertägigen Bergbau wurden beleuchtet, wobei im vorliegenden Zusammenhang auf die Versatzwirkung als Stabilisierungselement eingegangen wurde. Versatz bildet nach dem Einbringen einerseits Reaktionsspannungen auf Verformungen im Gebirge aus, was als aktiver Versatzdruck bezeichnet wird. Andererseits übt Versatz aufgrund seines Eigengewichts eine Einspannung auf das Gebirge aus, was unter dem Begriff „passiver Versatzdruck“ bekannt ist. Zudem wirkt Versatz stabilisierend auf im Gebirge gebildete Felskeile, wodurch die Erhaltung der Integrität des Gebirgsverbandes gewährleistet wird. Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit wurde der theoretische Hintergrund als Basis für genauere Untersuchungen herangezogen, um die qualitative Wirkungsweise des Versatzes im Gebirgsverband quantitativ nachweisen zu können. Die beschriebene Problematik wurden in weiterer Folge im Rahmen folgender Fragestellungen erarbeitet:

- Welche Phänomene sind für die Stabilisierungswirkung des Versatzes auf das Gebirge verantwortlich?
- Welche Spannungen entstehen im Versatzkörper in Relation zur auftretenden Gebirgsverformung?
- Welche Versatzeigenschaften sind notwendig um eine stabilisierende Wirkung auf das Gebirge zu erzielen?
- Wie wirken sich unterschiedliche Versatzeigenschaften, insbesondere die Bindemittelzugabe auf die stabilisierende Wirkung von Versatz aus?
- Welche Bedeutung kommt der Verfüllung im alpinen Hartgesteinsbergbau beim Einsatz von Versatz in Kombination mit schlanken Bergfesten zu?

Zu diesem Zweck wurden einerseits untertägige Untersuchungen sowie Modellversuche im Labormaßstab herangezogen. Die in-situ Untersuchungen wurden im Magnesitbergbau Breitenau durchgeführt, ein in den Ostalpen gelegener Untertagebergbau, wo im Untersuchungsbereich Abbau mittels eines Kammer-Festensystems mit hohen, schlanken Bergfesten betrieben wird. Zur Überprüfung der Versatzwirkung wurden Messungen am Gebirge sowie am Versatzkörper durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde das Gebirge sorgfältig

dokumentiert, die Gebirgseigenschaften über indirekte Methoden abgeschätzt und Extensometer eingebaut um die Konvergenzen im Gebirge und in den Abbaufesten beobachten zu können. Vor der Verfüllung der Hohlräume wurden Druckmesszellen auf einem eigens zu diesem Zweck konstruierten Rahmen eingebracht, welche in weiterer Folge den Aufbau von Spannungen im Versatzkörper aufzeichnen sollten. Mittels Kernbohrungen im Versatzkörper wurden auch die in-situ Versatzeigenschaften bestimmt. Die Messungen wurden von einer genauen Dokumentation der Abbau- und Verfülltätigkeiten begleitet, um Gründe an den Änderungen der Messwerte besser identifizieren und zuordnen und somit die Versatzwirkung besser abschätzen zu können.

Die untertägigen Messungen haben gezeigt, dass die durchgeführten Versatzdruckmessungen und Kernbohrungen im Versatzkörper eine gute und einfache Methode zur Feststellung der in-situ Versatzeigenschaften bzw. des in-situ Versatzverhaltens darstellen. Insbesondere der entwickelte Messaufbau aus einem Stahlrahmen und drei Druckmesszellen eignet sich sehr gut um die Wechselwirkung zwischen Versatz und Gebirge zu beobachten. Die Versatzdruckmessungen zeigen, dass horizontal im Versatz ein Druck in Höhe des Erdruhedrucks (passiver Versatzdruck) herrscht und dieser als Reaktion auf Festenverformungen durch eine aufgebaute Reaktionsspannung zunehmen kann. Weiters konnte festgestellt werden, dass bei firstbündiger Verfüllung auch in vertikaler Richtung eine Reaktionsspannung auf Gebirgsauflockerungen im Versatzkörper aufgebaut wird. Diese nimmt mit zunehmendem Verfestigungsgrad des Versatzkörpers zu.

Aus allen untertägigen Messungen ging hervor, dass es zur unmittelbaren Stabilisierung des Gebirges nach Versatzeinbringung kommt, weswegen das Einbringen von Versatz als vorteilhaft für die lokale und regionale Gebirgsstabilität angesehen werden kann. Bei den Versatzeigenschaften konnte anhand der untertägigen Messungen festgestellt werden, dass die einaxiale Druckfestigkeit bei der Gebirgsstabilisierung eine untergeordnete Rolle spielt, da bereits vor Aushärten des Versatzes dessen stabilisierende Wirkung wahrgenommen werden konnte. Somit ist eine der Hauptschlussfolgerungen des in-situ Messprogramms, dass zur grundsätzlichen Stabilisierung keine Mindest-Druckfestigkeit erforderlich ist. Da die stabilisierende Wirkung des Versatzes unmittelbar nach Einbringung erfolgt, sind der Zeitpunkt der Verfüllung sowie die Verfülldauer als wesentlich kritischer anzusehen. Diese sollte zum ehestmöglichen Zeitpunkt erfolgen und rasch abgeschlossen werden, da frühes Einbringen die Auflockerung von Bergfesten nachhaltig vermeiden kann.

Da die Schalenbildung parallel zum Ulm von Bergfesten ein untertägig häufig auftretendes Bruchphänomen darstellt, welches durch Ausknicken der Schalen zu Stabilitätsproblemen führen kann, wurde versucht die Versatzwirkung auf die gebildeten Schalen zu beschreiben. Erste Tastversuche im Labormaßstab haben gezeigt, dass durch die Verfüllung das Ausknicken unterbunden und die Bruchspannung der Schalen wesentlich erhöht werden kann.

Im Labormaßstab wurde in weiterer Folge versucht die Versatzwirkung, welche untertägig beobachtet werden konnte, mittels eines Modellversuches anhand von schlanken Modellfesten nachzustellen. So wurden Modellfesten aus Zementmörtel in einem Rahmen aus Stahl, welcher den Gebirgsverband darstellen soll, umgeben von unterschiedlichen Versatzmaterialien unter einaxialem Druck belastet. Im Rahmen der Laborversuche konnten zudem die Versatzeigenschaften variiert werden um somit den Einfluss wichtiger Versatzeigenschaften wie Festigkeit und Verdichtung genauer untersuchen sowie die Bedeutung der Bindemittelzugabe abschätzen zu können. Aus den Laborversuchen ging hervor, dass der Versatz im Falle von schlanken Modellfesten keinen Einfluss auf die maximale Festigkeit der Modellfesten hat, wobei hier erwähnt werden muss, dass kein stark bindemittelverfestigter Versatz untersucht wurde. Nach Erreichen der maximalen Festigkeit der Modellfesten hat sich jedoch gezeigt, dass der Versatz erheblich zur Erhöhung und Beibehaltung einer gewissen Restfestigkeit von schlanken Bergfesten beiträgt, wobei hier die Versatzqualität eine große Rolle spielt. Hier ist ein stark verdichteter beziehungsweise ein kohäsiver Versatz von Vorteil, welcher ein Abgleiten entlang von Bruchflächen verhindert und die Restfestigkeit somit erhöhen und über mehrere Prozent Stauchung stabil halten kann. Im Gegensatz zu Erkenntnissen von Helms (1988) deutet die vorliegende Arbeit darauf hin, dass der Bindemittelzugabe eine weniger bedeutsame Rolle zukommt als ursprünglich angenommen. Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass nicht unbedingt große Bindemittelmengen bzw. eine hohe Versatzfestigkeit für die Stabilisierung im Nachbruchbereich von Nöten sind und es bereits durch kohäsiven, dicht eingebrachten Versatz zur erheblichen Erhöhung der Restfestigkeit von schlanken Festen kommt. Aus den Versuchen ist hervorgegangen, dass zur Stabilisierung von Bergfesten das Verformungsverhalten des Versatzes wichtiger zu sein scheint als die Festigkeit, was sich mit den Erkenntnissen aus den untertägigen Untersuchungen deckt.

Auf Basis der untertägigen Messungen und der Laboruntersuchungen wurde ein einfaches Modell zur Versatzwirkung erstellt, welches ebenfalls zeigt, dass bereits geringe Versatzdrücke in Höhe des passiven Versatzdruckes ausreichen um das Herausgleiten von Felskeilen aus dem Gebirgsverband zu verhindern. Der Grund dafür liegt an der Aktivierung von Reibungskräften in Trennflächen durch den passiven Versatzdruck, wodurch die Integrität von Bergfesten erhalten und das Abgleiten von Felskeilen verhindert werden kann. Zusätzlich zur Stabilisierung von einzelnen Felskeilen kommt noch der Aufbau von Reaktionsspannungen im Versatzkörper als Folge von Gebirgsverformungen, welche eine zusätzliche stabilisierende Wirkung hervorrufen. Die zusätzlich auftretenden Scherspannungen an den Kontaktflächen führen zu einer weiteren Spannung auf das Gebirge und folglich zu einer größeren Versatzwirkung.

Abschließend muss hier noch erwähnt werden, dass die vorliegenden Untersuchungen anhand von schlanken Bergfesten durchgeführt wurden und ebenfalls Untersuchungen betreffend die Wechselwirkung von Versatz und gedrungenen Bergfesten durchgeführt werden sollten, da in diesem Fall eine Erhöhung der Tragfähigkeit der Bergfesten durch den Versatz durchaus möglich erscheint.

10 Literaturverzeichnis

Askew, J. E.; McCarthy, P. L.; Fitzgerald, D. J. (1978): Backfill Research for Pillar Extraction at ZC/NBHC: Mining with backfill. 12. Canadian Rock Mechanics Symposium, Sudbury, Ontario, May 23 - 25, 1978. Montreal: The Canadian Inst. of Mining and Metallurgy. Special volume, S.100–110.

Adams, D.J., Gürtunca, R.G., Squelch, A.P. (1991): The 3-dimensional in situ behaviour of backfill materials, Proceedings of the 7th international Congress on Rock Mechanics, Witlke (ed.), Balcema, Rotterdam

Beitz, W., Grote, K.-H. (1997): *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, Berlin, Heidelberg: Springer

Belem, T. und Benzaazoua, M. (2004): An overview on the use of paste backfill technology as a ground support method in cut-and-fill mines. *Proceedings of the 5th Int. Symp. on Ground support in Mining and Underground Construction*. S. 637-650.

Benzaazoua, M., Fall, M., Belem, T. (2004): A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill, *Minerals Engineering*, vol. 17, no. 2, S.141–152

Belem, T. und Benzaazoua, M. (2007): Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology. *Geotechnical and Geological Engineering*. S. 147-174.

Blaha, H. (2012): Gebirgsmechanische Aspekte des “ Post - Pillar ” - Abbaufahrens.

Blaha, H., Wagner, H. (2009): Die Wechselwirkung von Versatz und Bergfesten beim „Post-pillar“-Abbaufahren, *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 154. Jg., Heft 2, S. 60-66

Blaha H., H. Hasewend., H. Wagner and M. Siefert (2003): Laboratory tests and numerical simulations to determine the load bearing capacity of pillars. 39. US. Rock Mechanics Symposium, 22.–26. 6. 2003, Cambridge, Massachusetts, USA, 2003. p. 1145–1150

Bomag GmbH (2004): *Handbuch Verdichtung*,
https://www.bomag.com/at/media/pdf/WM9701_0403_rdr.pdf

Brace, M.F.C., Klokow, J.W. (1986): A follow-up paper on the development of the West Driefontein tailings backfill project". Proceedings of a Symposium on Backfill in South Africa Mines, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, November 1986

Brady B.H.G., Brown E.T. (2005): Rock Mechanics for Underground Mining, 3. Auflage,

Close, A.J., Klokow, J.W. (1986): The development of the West Driefontein tailings backfill project, Association of Mine Managers of South Africa, Papers and Discussions, Vol. 3/85, November 1985

Corson, D.R., Wayment (1967): Load-displacement Measurements in a Backfilled slope of a Deep Vein Mine, Report of Investigation 7038, U.S. Bureau of Mines, Washington D.C.

Denkhaus, H.G., Bieniawski, Z.T. (1968): Gebirgsmechanische Modellversuche und Analytik

Diederichs, M.S. (2003): Rock Fracture and Collapse under low Confinement Conditions, Rock Mechanics and Rock Engineering 36 (5), S. 339-381

Engesser, F. (1895): Z. VDI 1889, S. 927., Z. f. Architekten u. Ingenieurwesen (1889) S. 1054. Schweiz. Bauztg. Bd. 26 (1895) S. 24.

Esterhuizen, G.S. (2006): An evaluation of the strength of slender pillars, NIOSH, Pittsburgh, PA, Paper Presented at the SME annual meeting, St. Louis, 7. SME

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L.(2010): Pillar and Roof Span Design in Stone mines, Extracting the Science: A Century of Mining Research. Brune JF, ed., Littleton, CO: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, S.209-224

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L. (2011): Pillar strength in underground stone mines in the United States, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 48(1), S. 42-50

Everling, G. (1964): Model tests concerning the interaction of ground and roof support in gate-roads, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., Vol.1, S. 310-326

Fairhurst, C., Cook, N.G.W. (1966): The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighbourhood of a surface

Fujifilm Europe GmbH (2018):

<https://www.fujifilm.eu/de/produkte/industrieprodukte/prescale/uebersicht>,
08.11.2018 15.00

Gallhofer D. (2010): Lithologische und geochemische Charakterisierung der Magnesitlagerstätte Breitenau (Grazer Paläozoikum/Ostalpen), Masterarbeit, Lehrstuhl für angewandte Geowissenschaften

Galvin, J.M. (1981): The Mining of South African Thick Coal Seams – Rock Mechanics and Mining Considerations, PhD Thesis, Johannesburg

Ganster, M. (2018): Methode der finiten Differenzen, Technische Universität Graz, https://www.math.tugraz.at/~ganster/lv_mathematik_2_bau_ss_2015/09_finite_differenzen.pdf (30.08.2018)

Garber B.(2011): Neue Sprengstoffe – Ein Beitrag zur Sicherheit, Vortrag

Gay, N.C., Jager, A.J., Piper, P.S. (1986): A quantitative evaluation of fill performance in South African gold mines”, Proceedings of a Symposium on Backfill in South African Mines, South African Institute of Mining and Metallurgy, Randburg, June 1986

Geodata Group (2008): Rod Extensometer, Datasheet hardware

Gisi, U. (1997): Bodenökologie, Stuttgart, Thieme

Glötzl Baumesstechnik (2014): Erddruck- und Spannungsaufnehmer, elektrische Ausführung mit hydraulischem Druckkissen und Drucksensor, Datenblatt Version 22.07.2014

Gürtunca, R.G., Jager, A., Adams, D.J., Gonlag, M. (1989): The in situ behaviour of backfill materials and the surrounding rockmass in South African gold mines, 4th international Symposium on Innovations in Mining Backfill Technology, Montreal, Canada

Hasewend, H.(2004): Laborversuche zum Tragverhalten von Festen mit und ohne Versatz, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Bergbaukunde

Hassani, F.P., Mortazavi, A., Shabani, M. (2008): An investigation of mechanisms involved in backfill-rock mass behaviour in narrow vein mining, The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 108

Hassani, F., Ouellet, J., Servant, S. (2001): In Situ Measurements in a Paste Backfill: Backfill and Rock Mass Response in the Context of Rockburst, 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET2001, S. 165-175

Helms, W. (1988) Eigenschaften, Anwendung und gebirgsmechanische Auswirkungen des bindemittelverfestigten Versatzes. 188.

Hoek, E., Martin, C.D. (2014): Fracture initiation and propagation in intact rock – A review, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6, S. 287-300

Hohl, W. & Frömmer, T. (2013) Die Versatzrichtlinie des BVÖ: ein Leitfaden für die zeitgemäße Planung eines Versatzsystems. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 158, 410–423 .

Hunt, W.G. (1990): The Use Of Consolidated Backfill For Pillar Recovery IN Room And Pillar Mining: An Integrated Design Rationale, McGill University, Montreal, Quebec

ISRM (1974): Suggested Methods for Determining Compressive Strength and Deformability of Rock Materials

ITASCA Consulting Group Inc.: FLAC 8 Basics,
<https://www.itascacg.com/sites/itascacg.com/files/software/FLAC/FLAC8Basics.pdf>
(30.08.2018)

Jacobi O., Everling G., Irresberger H. (1964): Ausbrüche aus dem Strebhangenden unter Tage und im Modell und Folgerungen für den schreitenden Ausbau, Glück Auf 100, H.24, 1413-1424

Jager, A.J., Piper, P.S., Gay, N.C. (1987): Rock mechanics aspects of backfill in deep South African gold mines, Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics, Montreal, Canada

Junker, M., et al. (2004): Gebirgsbeherrschung von Flözstrecken, Verlag Glückauf GmbH, Essen

Kármán, T. von (1910): Die Knickfestigkeit gerader Stäbe. Phys. Z. Bd. 9 (1908) S. 136; und: Untersuchungen über Knickfestigkeit „Mitteilungen über Forschungsarbeiten“, herausgegeben vom VDI (1910). Heft 81.

Kollbrunner, C.F., Meister, M. (1961): *Knicken, Biegedrillknicken, Kippen*; 2.Aufl., Springer-Verlag 1961 Berlin/ Göttingen/ Heidelberg

Koupouli, N.J.F., Belem, T., Rivard, P., Effenguet, H. (2016): Direct shear tests on cemented paste backfill-rock wall and cemented paste backfill-backfill

interfaces, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 8, S. 472-479

Kuznecov, G.N., Menzel, W. (1968): Gebirgsmechanische Modellversuche und Analytik – Generalreport zum Thema

Li, L., Aubertin, M. (2014): An improved method to assess the required strength of cemented backfill in underground stopes with an open face, International Journal of Mining Science and Technology, Volume 24, S.549-558

Lunder, P.J. (1994): Hard rock pillar strength estimation an applied approach, M.S. thesis, University of British Columbia, Vancouver, B.C.

Lutze, D., Vom Berg, W., Benschmidt, N. (2008): Eds, Handbuch Flugasche im Beton, Grundlagen der Herstellung und Verwendung, 2, Düsseldorf, Verl. Bau und Technik

Martin, C.D., Maybee, W.G. (2000): The strength of Hard Rock Pillars, Int. J. Rock Mechanics and Min. Sci. 37:1,239-1,246

McNay, Corson (1961): Hydraulic sandfill in deep metal mines, Bureau of mines, Spokane, Washington

Mitchell, R.J., Olsen, R.S., Smith, J.D. (1982): Model studies on cemented tailings used in mine backfill, Can. Geotech J., Volume 19, S.14-28

Moser, A. (2014): State of the art of backfill technology in underground mining excavations, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft

Murawski H., Meyer W.(2012): Geologisches Wörterbuch, 12. Auflage

Pirapakaran, K., Nagaratnam, S., Rankine, R. (2007): Investigations into strength of Cannington paste fill mixed with blended cements, James Cook University, Townsville

PLAXIS (2018): <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-2d-manuals/> (25.10.2018, 15.30)

Quesnel, Q.J.F., De Ruiter, H. and Pervik, A. (1989): The assessment of cemented rockfill for regional and local support in a rockburst environment", Proceedings of the 4th International Symposium on Mining with Backfill, Montreal, October 1989, S.217-224.

- Reuther, Ernst U. (1989): *Lehrbuch der Bergbaukunde: mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlebergbaus*. Glück Auf, Bd. 11. Auflage.
- Ryder, J.A., Wagner, H. (1978): 2D analysis of backfill as a means of reducing energy release rates at depth, Chamber of Mines Res. Report: No 47/78
- Salamon, M.D.G., Galvin, J.M., Hocking, G., Anderson, I. (1996): Coal Pillar Strength from Back-Calculation, Sydney: University of New South Wales
- Schenkl, M. (2014): Technische und wirtschaftliche Prüfung eines zweiten Tagaufschlusses der Reviere V & VI (VII) des Bergbaues Breitenau, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Vol. 159 (8), S.350-354
- Schinagl, S. (2017): Geotechnische Charakterisierung des Reviers 6 des Magnesitbergbaus Breitenau, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft
- Secieru, E., Butler, M. und Mechtcherine, V. (2014). Prüfen der Pumpbarkeit von Beton – Vom Labor in die Praxis. *Bautechnik Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau*. S. 797-811.
- Shanley, F.R. (1939): Engineering Aspects of Buckling: The Buckling of Simple Columns and Flat Plates Simply Explained for the Engineer", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 11 Issue: 1, S.13-20, <https://doi.org/10.1108/eb030421>
- Sheshpari, M. (2015): A Review on Influential Parameters on the Strength of Cemented Paste Backfill (CPB)-Part I. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering Vol. 20*. S. 12443-12465.
- Sobhi, M.A., Li, L. (2017): Numerical investigation of the stresses in backfilled stopes overlying a sill mat, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 9, S. 490-501
- Squelch, A.P., Milev, A.M., Acheampong, E., Dlokweni, T., Janse van Rensburg, A., Watson, B.P. (2001): Influence of regional support systems (pillars and backfill) on local areas and internal support requirements adjacent to that regional support, CSIR Mining Technology, Safety in Mines Research Advisory Committee, Final Project Report, Project number: GAP 615, Report Number: 2001-0181
- Stacey, T.R. (1981): A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock; *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.& Geomech. Abstr.* Vol. 18, S. 469- 474
- Sun, Q., Zhang, J., Zhou, N. (2018): Study and discussion of short-strip coal pillar recovery with cemented paste backfill, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 104, April 2018, S.147-155
- Tesarik, D.R., Seymour, J.B., Yanske, T.R. (2009): Long-term stability of a backfilled room-and-pillar test section at the Buick Mine, Missouri, USA, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 46, 7; S.1182-1196

- Tetmajer, L. von (1907): Die Gesetze der Knickungs- und zusammengesetzten Festigkeit der technisch wichtigsten Baustoffe. Leipzig und Wien
- Thibodeau, D. (1989): In situ determination of high density alluvial sand fill, Innovations in mining backfill technology: 4th international symposium, Montreal
- Wagner, H. (1974): Determination of the complete load-deformation characteristics of coal pillars, Proceedings of the Congress of the International Society for Rock Mechanics, Volume 3
- Wagner, H. (1981): Use of backfill to improve strata control in deep gold mines, constraint formulation, Mining operations laboratory, Chamber of Mines Research Organisation, South Africa
- Wagner, H. (1992): Pillar design in South African collieries, in: Coal Pillar Design Workshop, 33rd US Rock Mechanics Symposium, 7 June 1992, Santa Fe, New Mexico
- Wagner, H. (2004): Gebirgsmechanische Besonderheiten im alpinen Altbergbau, 4. Altbergbau-Kolloquium Leoben, Kolloquiumsschrift, S.129-138
- Wagner, H. (2009): Die Rolle von Versatz im Bergbau. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 154, 52–59.
- Wagner, H., Sanak-Oberndorfer, A. (1996): Grenzen und Möglichkeiten des Einsatzes von betriebsfremden Stoffen im österreichischen Bergbau, Abfallbehandlung, Deponietechnik und Altlastenproblematik
- Walkner, M. (2017): Analyse und Optimierung der Versatzeigenschaften im Scheelit-Bergbau Mittersill, Masterarbeit, Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde, Montanuniversität Leoben
- Wilson, A.H., Ashwin, D.P. (1972): Research into the Determination of Pillar Size, Part 1: An Hypothesis concerning Pillar Stability, Part 2: Measurements of Stress in Two Pillars at Lea Hall Colliery, *The Mining Engineer* incorporating the Transactions of the Institution of Mining Engineers, Volume 131, Part 9, Number 141, S. 409-417
- Wu, D., Fall, M. und Cai, S.J. (2013): Coupling temperature, cement hydration and rheological behaviour of fresh cemented paste backfill. *Minerals Engineering Vol. 42*. S. 76-83.
- Yin, W.; Li, M.; Gao, R.; Zhong, S.; Quan, K. (2017): Stability analysis of surrounding rock and pillar design in roadway backfill mining method, *Mining Technology* 126 (2017), Nr. 3, S. 177–184
- Zhao, K., Bonini, M., Debernardi, D., Janutolo, M., Barla, G.: (2015): Computational modelling of the mechanised excavation of deep tunnels in weak rock, *Computers and Geotechnics*, Volume 66, S.158-171

Zhao, T., Zhang, Z., Yin, Y., Tan, Y., Liu, X. (2018): Ground control in mining steeply dipping coal seams by backfilling with waste rock, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 118, p.15-26

Zur, K.J., Apel, D. (2004): Use of Cemented Rock Fill for Enhanced Pillar Recovery in Area 1 of the Doe Run Company, Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri University of Science and Technology

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen einaxialer Druckfestigkeit und Zementgehalt für bindemittelverfestigten Versatz aus Aufbereitungsabgängen (Helms 1988, S.59)	11
Abbildung 2: Verhalten nicht bindemittelverfestigter und bindemittelverfestigter Versatzmaterialien unter Kompression (Wagner et Sanak-Oberndorfer 1996, S. 192)	17
Abbildung 3: Wechselwirkung zwischen Versatz und Bergfesten (Blaha und Wagner 2009, S. 63)	23
Abbildung 4: Last-Verformungsverhalten zweier Versatzmaterialien mit unterschiedlicher Steifigkeit (Blaha 2012, S. 56)	24
Abbildung 5: Darstellung der Auswirkung des Versatzes in Form eines dreiaxialen Spannungszustands (Blaha 2012, S.57)	25
Abbildung 6: Qualitative Darstellung des Einflusses von Versatz auf das Last-Verformungsverhalten von Bergfesten (Wagner, 2009)	26
Abbildung 7: Einfluss eines bindemittelhaltigen Versatzes auf das Last-Verformungsverhalten von Bergfesten (Wagner und Sanak-Oberndorfer, 1996).	26
Abbildung 8: Schematische Darstellung eines FLAC Modells (Itasca Consulting Group, 2018)	30
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Vertikalspannungen eines Versatzkörpers (Adams et al, 1991)	32
Abbildung 10: Simulierte Abbausequenz für die Untersuchungen der Spannungssituation im Versatzkörper nach Sobhi und Li (2017)	33
Abbildung 11: FLAC-Modell zu Untersuchungen von Hassani et al. (2008).....	33
Abbildung 12: Darstellung eines „Post-pillar“ Abbauverfahrens (Blaha und Wagner, 2009)	35
Abbildung 13: Statisch unbestimmtes Belastungssystem für Bergfesten (Blaha und Wagner, 2009).....	36
Abbildung 14: Qualitative Darstellung der Wechselwirkung zwischen Versatz und Bergfesten (Blaha und Wagner, 2009)	37
Abbildung 15: Schema zur Beschreibung der Versatz-Gebirge Wechselwirkung (nach Koupouli et al. (2016))	38

Abbildung 16: Einfluss des Versatzes auf die Festigkeit von Bergfesten mit unterschiedlichen Breiten: Höhen Verhältnissen (Wagner und Sanak-Oberndorfer, 1996)	39
Abbildung 17: Skizze des Abbaus in einer Ganglagerstätte im Coeur d'Alene district.....	40
Abbildung 18: Einfluss der Verfüllhöhe auf die Festigkeit von Bergfesten (Wagner 2009, S.56).....	45
Abbildung 19: Lagerstättenquerschnitt (Schenkl 2012, S. 350).....	56
Abbildung 20: Modell der Magnesitlagerstätte (Garber 2011, S.14).....	57
Abbildung 21: Grubenplan Bergbau Breitenau mit Referenzbereichen (rot markiert)	58
Abbildung 22: Referenzbereich im Revier 6 des Bergbau Breitenau.....	60
Abbildung 23: Übersicht der Reviere im Bergbau Breitenau (rhi-ag.com, 25.06.2010)	60
Abbildung 24: Zuschnitt des Abbaufeldes	61
Abbildung 25: Hereingewinnen der Schwebe (Schinagl 2017, S.45)	61
Abbildung 26: Abbaufortschritt (Schinagl 2017, S.45)	61
Abbildung 27: Pumpversatzeinbringung (Schinagl 2017, S.46).....	62
Abbildung 28: Versetzen bis auf Höhe des Sohlenniveaus der Kopfstrecke (Schinagl 2017, S.46).....	62
Abbildung 29: Benützung der alten Kopfstrecke als neue Fußstrecke (Schinagl 2017, S.47).....	63
Abbildung 30: Position des Profils (Schinagl 2017, S.48).....	66
Abbildung 31: Topografisches Profil des Revier 6 mit den berechneten Spannungen (Schinagl 2017, S.49).....	66
Abbildung 32: Fotodokumentation eines Abschnitts mit Andeutung der Haupt-Trennflächen	68
Abbildung 33: Handskizze des dazugehörigen Abschnitts (i...spannungsinduzierter Riss, g...geologisch bedingter Riss)	68
Abbildung 34: Übersicht über Kernbohrungen im Revier 6 Bergbau Breitenau....	69
Abbildung 35: Kernbohrgerät Sandvik DE110	70
Abbildung 36: In der hydraulischen Prüfpresse eingespannte Probe	70
Abbildung 37: Bohrkern aus der Strecke F – Bohrloch F-2 (Feste F).....	72
Abbildung 38: Ausgefüllte Vorlage zur Bohrkernokumentation.....	72

Abbildung 39: Verlauf RQD-Wert in Bohrloch F-2	73
Abbildung 40: Messprinzip der verwendeten Stangenextensometer (links) und exemplarische Darstellung eines Stangenextensometers (rechts) (Geodata Group, 2008)	74
Abbildung 41: Extensometermessungen in Kammer 600A und 600B (nördlich des definierten Referenzbereiches)	75
Abbildung 42: Überblick über Extensometermessungen und Kernbohrungen (Schematische Darstellung)	75
Abbildung 43: Anordnung der Extensometer um den Streckenquerschnitt 600H (links) und Position dieser Extensometer im Revier 6 (rechts)	75
Abbildung 44: Lage der Kernbohrungen im Versatzkörper.....	77
Abbildung 45: Bohrkern aus Kammer 600C, Rezeptur 3.....	79
Abbildung 46: Kerne aus der Kammer C	79
Abbildung 47: Probe 347-6 vor und nach dem Zuschnitt (Kammer C)	79
Abbildung 48: Grenze zwischen Filterkuchen und Versatz	80
Abbildung 49: Versatzprofil anhand der Bohrung, Vergleich der Festigkeiten und E-Modul (Kammer C links, Kammer E rechts).....	81
Abbildung 50: Versatzdruckmessrahmen	83
Abbildung 51: Position der eingebrachten Druckmessrahmen im Abbaufeld (links) und eingebrachter Rahmen (rechts).....	84
Abbildung 52: Grubenplan Bergbau Breitenau inklusive durchgeführter Kernbohrungen und Extensometermessungen	86
Abbildung 53: Extensometermessung Feste 600E.....	87
Abbildung 54: Bohrlochkameraaufnahmen Feste 600E	88
Abbildung 55: Extensometermessungen Feste 600F	89
Abbildung 56: Bohrlochkameraaufnahmen Feste 600F	90
Abbildung 57: Extensometermessungen Feste 600G	91
Abbildung 58: Bohrlochkameraaufnahmen 600G (links – Bohrloch H6 bei 4,5m von der Strecke 600H ausgehend, rechts – Bohrloch H9 bei 2,6m von der Strecke 600H ausgehend).....	92
Abbildung 59: Bohrloch H9 bei 5,5m (links) bzw. bei 5,7m (rechts) Abstand der Strecke 600H.....	92
Abbildung 60: Extensometermessungen Auflagerfeste 600H	93

Abbildung 61: Bohrloch bei 0,2m Abstand der Strecke 600H (links) und bei 1,4m Abstand der Strecke 600H (rechts)	94
Abbildung 62: Bohrloch bei 0,6m Abstand der Strecke 600H (links) bzw. bei 2,45m (rechts)	94
Abbildung 63: Bohrloch bei 5,2m Abstand der Strecke 600H (links) bzw. bei 6,1m (rechts)	95
Abbildung 64: Bohrkern aus Bohrloch H10	95
Abbildung 65: Übersicht über Druckmessrahmen Revier 6 Bergbau Breitenau ...	96
Abbildung 66: Versatzdruckmessung Kammer 600E	97
Abbildung 67: Versatzdruckmessung Kammer 600F	98
Abbildung 68: Versatzdruckmessung Kammer 600G	98
Abbildung 69: Festigkeitsentwicklung Versatz Bergbau Breitenau	99
Abbildung 70: Abbausystem Revier 6 Bergbau Breitenau	112
Abbildung 71: Ergebnisse von Fallstudien über Bergfestenfestigkeit in Abhängigkeit ihres Breiten/Höhen-Verhältnisses (Esterhuizen 2006, S. 2)	113
Abbildung 72: Skizze des Versuchsaufbaus	117
Abbildung 73: Einlagige Druckmessfolie (links) und zweilagige Druckmessfolie (rechts) (https://www.fujifilm.eu/de/produkte/industrieprodukte/prescale/uebersicht,2018)	118
Abbildung 74: Messprinzipaufbau	119
Abbildung 75: Modellfeste aus Fertigmörtel	119
Abbildung 76: Modellfeste in Stahlrahmen	119
Abbildung 77: Modellfeste in Stahlrahmen mit Positionierschablone	120
Abbildung 78: Siebmaschine zum Verdichten des Versatzmaterials	121
Abbildung 79: Rahmen in der Prüfpresse während des Versuchs	122
Abbildung 80: Modellfestenmaterial	125
Abbildung 81: Last-Verformungsverhalten der Modellfesten ohne Versatz	125
Abbildung 82: Vergleich gerüttelte “_Rr“ und nicht gerüttelte Modellfeste	126
Abbildung 83: Vergleich feuchte Modellfesten „_f“ mit trockenen Modellfesten .	126
Abbildung 84: Einaxiale Druckfestigkeiten aller getesteten trockenen Modellfesten ohne Versatz	127
Abbildung 85: Einaxiale Druckfestigkeiten aller getesteten feuchten Modellfesten ohne Versatz	128

Abbildung 86: Last-Verformungsverhalten des unverdichteten Sandes	129
Abbildung 87: Vergleich des Last-Verformungsverhaltens des unverdichteten und des in Lagen verdichteten Sandes	129
Abbildung 88: Vergleich des Last-Verformungsverhaltens des unverdichteten und des verdichteten hydraulischen Versatzes („lvf“ – Sand:Wasser=3:1)	130
Abbildung 89: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 24 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	131
Abbildung 90: Last-Verformungsverhalten des kompaktierten bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 24 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	132
Abbildung 91: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 24 Stunden Aushärtezeit – Vergleich kompaktiert „c“ und nicht kompaktiert (je 3 Proben 24-1 bis 24-3 bzw. 24-c-1 bis 24-c-3, „bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	133
Abbildung 92: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 48 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	134
Abbildung 93: Last-Verformungsverhalten des kompaktierten bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 48 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	134
Abbildung 94: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 48 Stunden Aushärtezeit – Vergleich kompaktiert „c“ und nicht kompaktiert (je 3 Proben 48-1 bis 48-3 bzw. 48-c-1 bis 48-c-3, „bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	135
Abbildung 95: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 72 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	136
Abbildung 96: Last-Verformungsverhalten des kompaktierten bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 72 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	136
Abbildung 97: Last-Verformungsverhalten des bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 72 Stunden Aushärtezeit – Vergleich kompaktiert „c“ und nicht kompaktiert (je 4 Proben 72-1 bis 72-4 bzw. 72-c-1 bis 72-c-4, „bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	137
Abbildung 98: Vergleich des Last-Verformungsverhaltens des kompaktierten bindemittelverfestigten Versatzmaterials nach 24, 48 und 72 Stunden Aushärtezeit („bmv“ – Sand:Zement:Wasser=9:1:2,9)	138

Abbildung 99: Entwicklung der maximalen Festigkeit für den kompaktierten bindemittelverfestigten Versatz mit der Aushärtezeit.....	138
Abbildung 100: Vergleich E-Modul der Modellfesten mit und ohne Versatz	140
Abbildung 101: Durchschnittliche Festigkeiten der Modellfesten mit und ohne "losem Versatz"	141
Abbildung 102: Durchschnittliche Festigkeiten der Modellfesten mit und ohne "bindemittelhaltigem Versatz"	141
Abbildung 103: Vergleich Modellfeste ohne Versatz mit Modellfeste in loseem Versatz	142
Abbildung 104: Vergleich freistehende Modellfeste, feuchte Feste und Feste mit hydraulischem Versatz	143
Abbildung 105: Vergleich zweier feuchter Modellfesten ohne Versatz mit Modellfesten mit bindemittelverfestigtem Versatz „bmv“ nach 24h und 48h Aushärtezeit	144
Abbildung 106: Vergleich durchschnittliche anteilmäßige Restfestigkeiten an der maximalen Festigkeit für die gewählten Versuchsaufbaue.....	144
Abbildung 107: Druckbilder eines Versuches	145
Abbildung 108: Modellfeste in lv nach Versuch	145
Abbildung 109: Querverformung und Druckbild eines Modellversuchs	146
Abbildung 110: Querverformung der Modellfesten in loseem Versatz „lv“ (MV_8, blaue Linie), in bindemittelverfestigtem Versatz „bmv“ (MV_16 gelbe Linie) und in hydraulischem Versatz „lvf“ (MV_21, grüne Linie).....	147
Abbildung 111: Modellfesten in lv (MV_6 und MV_8) im Vergleich mit Modellfesten in bmv (MV_17 und MV_30) und einer Modellfeste in Zement (MV_15)	148
Abbildung 112: Querverformung der Modellfesten in loseem Versatz (MV_6 und MV_8, blaue Linien) und in bindemittelverfestigtem Versatz (MV_16 und MV_25, gelbe und orange Kurven).....	149
Abbildung 113: Last-Verformungskurven von 3 Modellfesten in bindemittelverfestigtem Versatz nach 24h, 48h und 72h Aushärtezeit sowie einer Modellfeste in Zement nach 24h Aushärtezeit.....	150
Abbildung 114: Modellversuche in bmv (24h, 48h und 72h Aushärtezeit) im Vergleich mit einem Modellversuch in lvf	151
Abbildung 115: Last-Verformungskurven der Modellversuche in bmv nach 24h Aushärtezeit	152
Abbildung 116: Last-Verformungskurven der Modellversuche in bmv nach 48h Aushärtezeit	152

Abbildung 117: Last-Verformungskurven der Modellversuche in bmv nach 72h Aushärtezeit	153
Abbildung 118: Last-Verformungskurven der Modellversuche in bmv nach 24h, 48h und 72h Aushärtezeit	153
Abbildung 119: Einfach verdichteter Versatzkörper (links) im Vergleich zu doppelt verdichtetem Versatzkörper (rechts)	154
Abbildung 120: Modellfeste mit einfach verdichtetem Versatz (rot) im Vergleich mit Modellfeste mit doppelt verdichtetem Versatz (blau).....	155
Abbildung 121: Querverformung der Modellfesten in losem Versatz (blau), bindemittelhaltigem Versatz (gelb und violett) und hydraulischem Versatz (grün)	156
Abbildung 122: Überblick der im Bergbau Breitenau durchgeführten Messungen	159
Abbildung 123: Messergebnisse Feste E	160
Abbildung 124: Messergebnisse Feste F	161
Abbildung 125: Messergebnisse Feste G.....	162
Abbildung 126: Messergebnisse Auflagerfeste H.....	163
Abbildung 127: Differenz in vertikalem Versatzdruck der Kammern E, F, G im Bergbau Breitenau zwischen Versatztotlast durch Versatz-Eigengewicht und gemessenen vertikalen Versatzspannungen.....	165
Abbildung 128: Bewegungsraten der Festen im Revier 6	166
Abbildung 129: Modell zur Beschreibung von Diskontinuitäten im Gebirge	169
Abbildung 130: Sicherheitsfaktor gegen Abgleiten eines Felskeiles für verschiedene Klufteneinfallswinkel und Breiten/Höhen-Verhältnis von 0,01 (links) und 0,1 (rechts) von Gesteinsschalen.....	171
Abbildung 131: Skizze zur Hypothese bezüglich erhöhter Versatzdrücke.....	172
Abbildung 132: Versatzdruck und Extensometermessungen der Feste 600F	173
Abbildung 133: Euler-Knickfälle (http://www.maschinenbauwissen.de/skript3/mechanik/festigkeitslehre/134-knicken-euler)	176
Abbildung 134: Schalenbildung im Bergbau Breitenau	177
Abbildung 135: Set-ups für Gesteinsplattenversuche.....	178
Abbildung 136: Versuchsaufbau einer Gesteinsplatte unter Einfluss der Verfüllung (Set-up 2)	178
Abbildung 137: Ergebnisse der Knickversuche im Labormaßstab	179

Abbildung 138: Anfangsbelastung der Modellfesten mit und ohne Versatz.....	181
Abbildung 139: Last-Verformungskurve einer Modellfeste in losem Versatz.....	183
Abbildung 140: Zuschnitt des Abbaufeldes	188
Abbildung 141: Versuchsaufbau.....	188

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lithologie der relevanten Formationen (Schenkl 2012, S.350)	57
Tabelle 2: Parameter zur Ermittlung der statischen Ähnlichkeit	107
Tabelle 3: Werte für den LBR Faktor in Abhängigkeit des Breiten-zu-Höhen Verhältnisses einer Feste	108
Tabelle 4: Überblick über alle durchgeführten Versuche	123
Tabelle 5: Durchschnittliche Restfestigkeiten	153
Tabelle 6: Permeabilitäten unterschiedlicher Versatzmaterialien (Hinde 1981, S.3)	VI

Anhang - Inhaltsverzeichnis

1	Auslegung von Versatzsystemen	II
---	-------------------------------------	----

1 Auslegung von Versatzsystemen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten zusätzlich zu den theoretischen Erkenntnissen auch bezüglich der Auslegung und Untersuchung von Versatzsystemen im untertägigen Bergbau noch einige Fragestellungen geklärt werden. Im nachfolgenden Kapitel werden nun einige Erkenntnisse präsentiert, welche zukünftige Versatztätigkeiten und Forschungsarbeiten im Bereich der Versatztechnologie erleichtern sollen.

Für die Auslegung von Versatzsystemen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine einfache Vorgehensweise erarbeitet. Diese Empfehlung lehnt sich an die BVÖ-Versatzrichtlinie an, welche eine detaillierte Vorgehensweise bei der Planung von Versatzsystemen vorgibt. (Hohl und Frömmer, 2013) Weiters werden Empfehlungen für einfache Methoden zur Untersuchung der Versatzeigenschaften während der Versatzherstellung sowie des in-situ Versatzkörpers gegeben. Die Anwendung dieser Vorgehensweise wird anhand des Beispiels Bergbau Breitenau, welcher als Untersuchungsbetrieb für diese Arbeit dient, gezeigt.

Der Ausgangspunkt für die Auslegung eines geeigneten Versatzsystems ist die gesamtheitliche Betrachtung des Systems Umwelt-Gebirge-Versatz. Die Parameter, welche dieses System beeinflussen sind (Hohl und Frömmer, 2013):

- Die Gebirgs- und Nebengesteinseigenschaften
- Das geplante bzw. derzeitige Abbauverfahren
- Der geplante bzw. derzeitige Abbauzuschnitt
- Die Abbaumenge
- Die Teufenlage
- Die Verfügbarkeit möglicher Versatzstoffe
- Die Nutzung bzw. die geplante Nachnutzung der Tagesoberfläche
- Das Vorhandensein von bestehenden Versatzanlagen

Auf Basis der betriebsinternen Aufgaben an das Versatzsystem können in weiterer Folge die Anforderungen und somit die benötigten Eigenschaften des Versatzes festgelegt werden. In einem nächsten Schritt müssen die für das Versatzprodukt zur Verfügung stehenden Stoffe evaluiert werden. Es muss hier sichergestellt werden,

dass die verwendeten Stoffe in ausreichender Menge und wenn möglich in definierter Qualität zur Verfügung stehen. (Hohl und Frömmer, 2013) Dann kann ein Versatzprodukt designt werden, welches mit den zur Verfügung stehenden Stoffen die definierten Eigenschaften erfüllen kann. Hier muss auch die bestehende betriebliche Infrastruktur, wie Rohrleitungssysteme, Versatzmischanlagen oder ähnliches berücksichtigt werden. Zudem müssen die definierten Eigenschaften während der Versatzproduktproduktion sowie die Eigenschaften des Versatzkörpers vor Ort regelmäßig überprüft werden. Somit ergeben sich folgende Schritte bei der Auslegung eines Versatzsystems:

- **Festlegen der betriebsspezifischen Anforderungen an das Versatzsystem**
- **Überprüfung der Eigenschaften des Versatzproduktes um die betriebsspezifischen Anforderungen zu erfüllen**
- **Überprüfung der in-situ Eigenschaften des Versatzkörpers**

Die betrieblichen und technologischen Rahmenbedingungen eines Bergbaus stellen die Grundlage für die Definition der betriebsspezifischen Anforderungen an das jeweilige Versatzsystem dar. Wie bereits beschrieben, setzen Bergbaubetriebe Versatz aus unterschiedlichen Gründen ein. Auch die verwendete Versatzart bestimmt, welche Versatzeigenschaften im Betriebsgeschehen laufend überprüft werden müssen um eine konstante Qualität des Versatzes gewährleisten zu können.

Im Folgenden wird anhand des Bergbaus Breitenau, welcher für die untertägigen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stand, der Ablauf bei der Auslegung eines Versatzsystems beschrieben. Die Überprüfung der in-situ Eigenschaften des Versatzkörpers wurde im Rahmen des Kapitels „In-situ Untersuchungen an Gebirge und Versatz“ behandelt.

- **Festlegen der betriebsspezifischen Anforderungen an das Versatzsystem**

Die betrieblichen Rahmenbedingungen im Bergbau Breitenau (Referenzbereich) sind folgende:

- Abbauverfahren: Kammerfestenbau
- Teufe (Vertikalabstand zur Tagesoberfläche): 950 m
- Abgeschätzte in-situ Vertikalspannungen: 25 MPa
- Oberflächenzustand: unbebaut
- Zur Verfügung stehende Zuschlagstoffe: Ankercolor (Produkt der Tochtergesellschaft) und im Tagebau gewonnener Schiefer (Körnung 0/22)

- Vorhandene Mischanlage und existentes Rohrleitungssystem zur Herstellung und Einbringung von Pumpversatz
- Transportinfrastruktur: 2,5km Rohrleitungssystem, Rohrdurchmesser 125mm, Wandstärke 8,8mm, 2 Pumpen: elektrisch stationär für den Regelbetrieb und eine dieselbetriebene Standbypumpe für Stopferbeseitigung
- Von Behördenseite empfohlene Einaxiale Druckfestigkeit des Versatzes: 2 MPa nach 28 Tagen (Erfordernis zu überprüfen)
- Wetter unter Tage: 23 C, 100 % rel. Luftfeuchte,

Aus den betrieblichen Rahmenbedingungen können nun die Anforderungen an das Versatzsystem bestimmt werden. Das Abbauverfahren im gewählten Referenzbereich im Bergbau Breitenau ist ein Kammerfestenbau. Dieses Abbauverfahren erfordert aus zweierlei Hinsicht das Einbringen von Versatz. Einerseits ist die Verfüllung der Hohlräume erforderlich um eine Arbeitsplattform zu schaffen, wenn die über dem Abbaublock liegende Teilsohle ohne Zwischenschwebe abgebaut werden soll. Andererseits trägt die Verfüllung der Hohlräume zur Erhöhung der Stabilität der Bergfesten bei, sodass Abbauhohlräume höher und Bergfesten schlanker ausgeführt werden können. Zusätzlich können Abbaufeldbreiten und somit das Ausbringen des Abbauverfahrens erhöht werden. In der vorliegenden Teufe stellt der Einfluss auf die Tagesoberfläche keinen kritischen Faktor dar, jedoch der Einfluss auf benachbarte Bergbauaktivitäten, welcher durch die Verfüllung der Hohlräume erheblich eingeschränkt wird. Der große Vertikalabstand zur Tagesoberfläche bringt jedoch Herausforderungen in Bezug auf den Versatzprodukttransport mit sich. Aufgrund der Schwierigkeit Sturzversatz von der Tagesoberfläche bis in die tiefsten Reviere des Bergbaus zu transportieren, muss auf pumpfähigen Versatz zurückgegriffen werden. Die für ein Versatzprodukt zur Verfügung stehenden Materialien, Ankercolor, ein feinkörniges Produkt der Tochtergesellschaft Magnifin und im Tagebau gewonnener Schiefer legen die Verwendung von Pumpversatz nahe. Die verwendeten Zuschlagstoffe und der Pumpvorgang nach Untertage erfordern die Verwendung von Bindemittel, was zu den aktuellen Versatzrezepturen geführt hat. Hier wurden drei verschiedene Rezepturen gewählt, da das Produkt der Tochtergesellschaft nur in unregelmäßigen Intervallen zur Verfügung steht und somit ein alternatives Versatzmaterial vorhanden sein sollte. Bei geringen vorhandenen Mengen an Ankercolor wird eine Mischung der Zuschlagstoffe Ankercolor und Schiefer verwendet. Die Bindemittelmengen und Wassermengen werden an die Mengen und Arten an Zuschlagstoffen angepasst um die erforderlichen Festigkeiten und Fließeigenschaften zu erreichen.

Im nachfolgenden Abschnitt wird auf die betriebsrelevanten Eigenschaften des Versatzes sowie deren Bestimmung im Labor bzw. im betrieblichen Maßstab eingegangen.

- **Überprüfung der definierten Eigenschaften**

Da es zu den Anforderungen an das Versatzprodukt keine eindeutige rechtliche Grundlage gibt, lehnen sich die Prüfungen der Eigenschaften an den Normen aus unterschiedlichen Fachgebieten, wie Boden- und Felsmechanik, Beton- und Bindemitteltechnik und Strömungslehre an (Hohl und Frömmer, 2013)

Infolge der fehlenden Normen für die Prüfung eines Versatzproduktes und dessen Eigenschaften, bezieht man sich auf Prüfungsmethoden und Normen aus anderen Fachgebieten. Diese sind:

- Bodenmechanik
- Felsmechanik
- Mineralogie
- Beton- und Bindemitteltechnik
- Strömungslehre

Im Rahmen dieser Arbeit konnten mittels einer sorgfältigen Analyse des Versatzsystems im Betrieb Bergbau Breitenau und anhand der am Versatzprodukt und Versatzkörper gemachten Untersuchungen Empfehlungen für die Überprüfung der Versatzeigenschaften bei der Auslegung des Versatzproduktes und im laufenden Produktionsbetrieb ausgearbeitet werden. Zudem wurden zur Bestimmung der Versatzkörpereigenschaften Kernbohrungen gemacht, welche, wenn im Versatzkörper durchgeführt, einige besondere Herausforderungen mit sich bringen. Auch erfordert die Untersuchung der Versatzproben im Labor eine besondere Herangehensweise bei der Probenbehandlung. Die ausgearbeiteten Empfehlungen sind in folgendem Abschnitt angeführt.

Empfehlungen bezüglich der Überprüfung der Versatzprodukteigenschaften im Labormaßstab und während des Mischvorgangs

Auslegung des Versatzproduktes

Soll der Versatzkörper eine definierte Festigkeit aufweisen, ist in erster Linie festzulegen, wann diese Festigkeit erreicht werden soll. Bei der Auslegung des Versatzes wird eine Rezeptur erstellt, welche diese erforderliche Festigkeit zu einem definierten Zeitpunkt erreicht und gleichzeitig geeignete Pumpeigenschaften aufweist. Hier handelt es sich meist um die einaxiale Druckfestigkeit, welche mit einer Standardprüfpresse an zylindrischen Proben laut ISRM Norm durchgeführt werden sollte. Im Falle von nicht bindemittelverfestigtem Versatz sollten Versuche aus der Bodenmechanik herangezogen werden. Hier eignet sich ein einaxialer Kompressionsversuch in einer Oedometerzelle (z.B. nach DIN 18 135) um die Steifigkeit des Versatzproduktes und somit seine Eignung zum Aufbau von Reaktionsspannungen festzustellen. Bei bindemittelverfestigtem Versatz sollte auch der Erstarrungszeitpunkt berücksichtigt werden, der nicht vor dem Eintreffen des Versatzes an seinem Einsatzort erfolgen sollte. Dieser kann im Labormaßstab mittels Vicat-Gerät festgestellt werden. Das zusammengestellte Versatzprodukt sollte in

weiterer Folge als Referenz für die im laufenden Betrieb zu überwachenden Eigenschaften herangezogen werden. Bei der Auslegung des Versatzproduktes sollte zudem jene elektrische Leistung von der Versatzmischanlage gemessen werden, welche notwendig ist um ein Versatzprodukt mit geeigneter Pumpbarkeit und Endfestigkeit zu mischen. Diese elektrische Leistung kann dann in weiterer Folge als Referenzleistung für die notwendige Wasserzugabe zum Versatzprodukt herangezogen werden und kann im laufenden Betrieb einfach überwacht werden. Bei nicht bindemittelverfestigtem (hydraulischem) Versatz sollte zudem noch der Durchlässigkeitsbeiwert bestimmt werden, da dieser die Entwässerungseigenschaften des Versatzkörpers beschreibt. Der Durchlässigkeitsbeiwert k kann im Labormaßstab nach DIN 18 130 bestimmt oder aus der Korngrößenverteilung des Versatzproduktes abgeleitet werden. Zur zuverlässigen Entwässerung sollte der Versatz einen k -Wert zwischen 10^{-4} - 10^{-2} m/s (durchlässig) bis $>10^{-2}$ m/s haben. Wagner (2009) empfiehlt zusätzlich die Überwachung der Perkulationsrate für hydraulischen Versatz, welche wenigstens 30mm/h betragen sollte. Für eine problemlose Entwässerung des Versatzkörpers empfiehlt Hinde (1981) folgende Permeabilitäten:

Tabelle 6: Permeabilitäten unterschiedlicher Versatzmaterialien (Hinde 1981, S.3)

Material	Permeabilität
Schotter: +2mm	>10 mm/s
Sand: 60 μ m-2mm	$1-10^{-2}$ mm/s
Feine Sande bis grober Schluff: 20-200 μ m	$10^{-2}-10^{-4}$ mm/s
Schluff: 2 μ m-60 μ m	$10^{-4}-10^{-6}$ mm/s
Ton: 2 μ m	10^{-6} mm/s

Laufender Betrieb

Zum Zwecke eines geeigneten Pumpverhaltens und zur Vermeidung von verstopften Rohrleitungen im laufenden Betrieb sollte für jede Rezeptur bei jeder Versatzkampagne die elektrische Leistung während des Mischvorgangs überwacht werden, welche sich im Bereich der für das Referenzprodukt benötigten Mischleistung befinden sollte. Für die Überwachung der Festigkeit sollten von jeder Rezeptur in jeder Versatzkampagne 9 zylindrische Proben genommen werden (Abfüllen des Versatzproduktes in geschlitzte Polokalrohre) und diese nach 28 Tagen, nach 90 Tagen und 365 Tagen auf ihre einaxiale Druckfestigkeit untersucht werden. Die Lagerung der Proben sollte möglichst zu Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen stattfinden, wie diese am jeweiligen Einsatzort

vorherrschen. Im Bergbau Breitenau wären dies 100% Luftfeuchtigkeit und 23°C. Somit können auch Aussagen über die Langzeit-Festigkeitsentwicklung getroffen werden und etwaige Anpassungen in den Versatzrezepturen getroffen werden. Im Falle von nichtbindemittelverfestigtem hydraulischem Versatz muss vor allem auf die zuverlässige Entwässerung des Versatzkörpers Wert gelegt werden. Diese lässt sich über die Mengen an abgepumptem Überschussswasser bzw. anhand der Zunahme der Grubenwassermenge abschätzen. Weiters sollten mittels Schaufel Proben vom Versatzkörper genommen werden und auf ihre Feuchtigkeit überprüft werden, was ganz einfach durch Wiegen und Trocknen der bis zur Gewichtskonstanz erfolgen kann. So kann in regelmäßigen Abständen überprüft werden, ob der Versatzkörper nicht zu große Mengen an Überschussswasser speichert und sich im Laufe der Zeit entwässert.

Wie bereits angeführt, stellen Kernbohrungen im Versatzkörper eine ausgezeichnete Möglichkeit der Überprüfung der in-situ Versatzkörper Eigenschaften dar, was jedoch in erster Linie zu Forschungszwecken durchgeführt wird. Kernbohrungen im Versatzkörper sind jedoch äußerst schwierig durchzuführen, da das Bohrequipment nicht für diesen Zweck ausgelegt ist. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes Empfehlungen für die Durchführung von Kernbohrungen im Versatzkörper und in weiterer Folge die Untersuchung der Bohrkerne im Labormaßstab ausgearbeitet.

Empfehlungen für die in-situ Untersuchung der Versatzkörpereigenschaften mittels Kernbohrungen Laboruntersuchungen

Kernbohrungen im Versatzkörper ermöglichen die Feststellung der in-situ Versatzeigenschaften sowie die Überprüfung der Festigkeitsentwicklung des Versatzes. Aufgrund der Beschaffenheit des Versatzkörpers treten während der Bohrarbeit einige Besonderheiten bzw. Herausforderungen auf, welche im Folgenden erläutert werden:

- Verankerung
 - Eine Verankerung der Kernbohrmaschine im Versatzkörper ist wie bei Bohrungen im Gebirge erforderlich um den nötigen Anpressdruck aufbringen zu können.
 - Wenn die Verankerung im Versatzkörper aufgrund der Beschaffenheit nicht möglich ist, muss Abhilfe durch Fixierung der Kernbohrmaschine an alternativen Stellen geschaffen werden, wie z.B. Fixieren am Trägergerät oder Verspannen im Gebirge.
- Doppelkernbohreinrichtung
 - Zum Ziehen der Versatzkerne ist eine Doppelkernbohreinrichtung erforderlich.

- Bohrspülung
 - Wasser als Spülmedium gestaltet sich als problematisch, da durch das Spülwasser einerseits Fragmente des Versatzes ausgespült werden können sowie dessen Eigenschaften beeinflusst werden.
 - Zusätzlich sammelt sich bei Vertikalbohrungen das Wasser im Bohrloch, welches in Kombination mit dem Versatzkörper während des Bohrens zu einem Ansaugen der Bohrkronen führen kann, welche nur unter großer Anstrengung wieder aus dem Bohrloch gezogen werden kann.
- Lagerung
 - Nachdem die Kerne ausgebohrt worden sind, werden sie bis zur Dokumentation und Probenahme im Labor in verschließbaren Plastikrohren gelagert um möglichst die in-situ Eigenschaften zu erhalten und ein Austrocknen der Proben zu verhindern.
- Probenahme
 - Standardmäßiges Fotografieren der Bohrkernkerne und Erfassen der Bohrkernlängen.
 - Auswahl von einer Probe pro Bohrmeter (Ausbringen abhängig von Versatzkörperbeschaffenheit) zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wie einaxiale Druckfestigkeit und Verformungseigenschaften, Probenlänge: 2,5 Mal Durchmesser
 - Planparalleles Fräsen der Endflächen gestaltet sich schwierig und kann zu Ausbrüchen an den Kanten der Endflächen führen.
 - Kürzen auf 2 Mal Durchmesser
 - Wassergehaltsbestimmung erfolgt durch Wiegen und anschließender Lagerung im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz.