


Gemeinsamer Abschlussbericht

Für den Berichtszeitraum vom 01.11.2014 bis 31.10.2017

Für das KF-Projekt

„Textiles Absperrsystem für Suspensionen beim Bergversatz“

 <p>TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ</p>	 <p>KD Stahl- und Maschinenbau GmbH</p>
<p>Technische Universität Chemnitz Professur Fördertechnik Reichenhainer Str. 70 09126 Chemnitz</p> <p>Vertreten durch Dr.-Ing. Jens Sumpf Förderkennzeichen: KF2515371LL4</p>	<p>KD Stahl- und Maschinenbau GmbH OT Bernterode Am Förderturm 3 37339 Breitenworbis</p> <p>Vertreten durch Geschäftsführer Michael Duwe Förderkennzeichen: KF 2290612LL4</p>

	
<p>Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. Annaberger Straße 240 09125 Chemnitz</p> <p>Vertreten durch Geschäftsführenden Direktor Andreas Berthel</p> <p>Förderkennzeichen: KF2034071LL4</p>	<p>K-UTEC AG Salt Technologies Am Petersenschacht 7 D-99706 Sondershausen</p> <p>Vertreten durch Geschäftsführer Dr. Heiner Marx</p> <p>Förderkennzeichen: KF2424607LL4</p>

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangspunkt der Entwicklungen	5
2	Bearbeitung der Arbeitspakete (AP) und Darstellung der Ergebnisse.....	5
2.1	Projektkoordination und Stützstruktur für den textilen Filter (TUC)	5
2.1.1	Arbeitspaket 1 (Anforderungsermittlung).....	5
2.1.2	Arbeitspaket 2 (Modellentwicklung, Umgebung)	6
2.1.3	Arbeitspaket 3 (Laborversuche).....	8
2.1.4	Arbeitspaket 4 (Technikumsversuche)	9
2.1.5	Arbeitspaket 5 (Entwicklung Gesamtsystem für unter Tage Einsatz)	13
2.1.6	Arbeitspaket 6 (Herstellung Funktionsmuster für Insituversuche).....	13
2.1.7	Arbeitspaket 7 (Insitu-Versuche)	14
2.1.8	Arbeitspaket 8 (Evaluierung der Ergebnisse).....	14
2.2	Entwicklung des textilen Filtersystems (STFI).....	18
2.2.1	Arbeitspaket 1 (Materialuntersuchungen).....	18
2.2.2	Arbeitspaket 2 (Erarbeitung von Lösungsprinzipen für ein textiles Stollenfiltersystem).....	19
2.2.3	Arbeitspaket 3 (Laborversuche zur Verifizierung von Lösungsprinzipen textiler Stollenfiltersysteme).....	20
2.2.4	Arbeitspaket 4 (Entwicklung und Herstellung eines textilen Stollenfiltersystems für Technikumsversuche).....	21
2.2.5	Arbeitspaket 5 (Entwicklung eines Funktionsmusters für ein neuartiges, textilen Stollenfiltersystems für Untertageeinsatz)	22
2.2.6	Arbeitspaket 6 (Herstellung eines Funktionsmusters für ein neuartiges, textilen Stollenfiltersystems für Untertageeinsatz)	22
2.2.7	Arbeitspaket 6 (Durchführung von Insituversuchen in großvolumigen Bohrlöchern unter Tage) 23	
2.2.8	Arbeitspaket 7 (Ergebnisevaluierung und Ableitung einer großtechnischen Lösung).....	24
2.3	Errichtung, Befestigung, Abdichtung (KD).....	26
2.3.1	Arbeitspaket 1 (Analyse der Ausgangssituation).....	26
2.3.2	Arbeitspaket 2 (Entwicklung der Befestigungs- und Dichtungstechnologie für die Anbindung eines textilen Dammbauwerkes an das Gebirge).....	29
2.3.3	Arbeitspaket 3 (Entwicklung und Fertigung von spezifischen Teilkomponenten für den Laborversuchstand und technische Betreuung der Versuche)	31

2.3.4	Arbeitspaket 4 (Entwicklung und Fertigung von spezifischen Teilkomponenten für die Versuche im Technikum, technische Betreuung der Versuche)	31
2.3.5	Arbeitspaket 5 (Technologische Vorbereitung von großmaßstäblichen In-Situ-Versuchen)....	32
2.3.6	Arbeitspaket 6 (Technische Vorbereitung von großmaßstäblichen In-Situ-Versuchen)	34
2.3.7	Arbeitspaket 7 (Technische Betreuung der In-Situ-Versuche unter Tage)	36
2.3.8	Arbeitspaket 8 (Analyse der Leistungsfähigkeit des Befestigungs- und Dichtungssystems)...	36
2.3.9	Arbeitspaket 9 (Zusammenfassung und Dokumentation der erzielten Ergebnisse und Erstellung des Abschlussberichtes).....	38
2.4	Geologie, Mineralogie und Verfahrenstechnik (K-UTEC).....	39
2.4.1	Arbeitspaket 1 (Anforderungsermittlung).....	39
2.4.2	Arbeitspaket 2 (Modellentwicklung, Umgebung)	39
2.4.3	Arbeitspaket 3 (Laborversuche).....	40
2.4.4	Arbeitspaket 4 (Technikumsversuche)	41
2.4.5	Arbeitspaket 5 (Entwicklung Gesamtsystem für unter Tage Einsatz)	43
2.4.6	Arbeitspaket 6 (Herstellung Funktionsmuster für Insituversuche).....	44
2.4.7	Arbeitspaket 7 (Insituversuche)	44
2.4.8	Arbeitspaket 8 (Evaluierung der Ergebnisse).....	45
3	Zusammenfassung	47

1 Ausgangspunkt der Entwicklungen

Ziel des Bergversatzes ist es, die im Bergwerk entstanden Hohlräume zu verfüllen und dafür geeignete Abfallstoffe der Industrie zu nutzen. Die Grubenlauge (gesättigte Steinsalzlösung) dient der Herstellung einer Suspension, welche mit feinkörnigen Abfallstoffen (z. B. Gips und Kalkreste aus Rauchgasentschwefelungsanlagen, Filterstäube bzw. Stäube und Aschen aus der Abfallverbrennung) sowie Feststoffen, die der Verfestigung dienen (feinkörniger Sand und Kies) versetzt werden. Die Suspension wird dann über eine Rohrleitung an den Versatzort gepumpt. Durch den Anteil an Abfällen mit abbindenden Eigenschaften (z. B. RGR-Salze, Bypass-Stäube) verfestigt sich die Versatzsuspension im zu verfüllenden Hohlraum.

Das textile Absperrsystem sollte im Projekt als Dammbauwerk und zugleich Filtermittel die beim Bergversatz bisher eingesetzten Dämme (Stahlträger mit Lochblech) ersetzen. Das textile Absperrsystem sollte dabei in der Lage sein, die durch den Gebirgsdruck entstehenden Kräfte aufzunehmen ohne zu deformieren.

Die Entwicklung des Filtermittels als zentrales Element des Absperrsystems war von großer Bedeutung, um durch die Abtrennung der Grubenlauge einen sicheren Versatz des Hohlraums zu gewährleisten.

2 Bearbeitung der Arbeitspakete (AP) und Darstellung der Ergebnisse

2.1 Projektkoordination und Stützstruktur für den textilen Filter (TUC)

2.1.1 Arbeitspaket 1 (Anforderungsermittlung)

Zu Projektbeginn wurde eine Anforderungsliste der Randbedingungen zur Entwicklung des textilen Absperrsystems erstellt. Die Projektpartner listeten die erforderlichen Eingangsgrößen für die Auslegung des textilen Filters und die Abspannvorrichtung auf. Der Bergwerksbetreiber und die K-UTEK (Partner für geologische, chemische, mineralogische, baustoffliche und verfahrenstechnischen Fragestellungen) lieferten die notwendigen Werte, Eigenschaften und Zusammensetzungen.

Die Anforderungsliste war nun als ein umfangreiches Dokument, welches wichtige Kenngrößen des Spülversatzes beinhaltet, genutzt. Diese umfasst: die chemische Zusammensetzung des Wirtsgesteins, die chemische Zusammensetzung der Versatzstoffe, die chemische Zusammensetzung der Versatzlauge, die Lufttemperatur unter Tage, die Temperatur der Versatzsuspension, die Luftfeuchte unter Tage, geometrische Verhältnisse und Partikelgrößenangaben.

Abbildung TUC 42: Anforderungsliste inklusive Anhänge

Auswahl möglicher hochfester Faserwerkstoffe:

Es wurden am Markt etablierte synthetische Faserwerkstoffe (Polyester, Dyneema[®], Technora[®], Vectran[®]) nach ihrer prinzipiellen Eignung für den unter Tage Einsatz ausgewählt. Sie zeichnen sich aus durch: geringe Dichte bei hoher Zugfestigkeit, günstige Handhabung durch geringe Masse und hoher Flexibilität sowie Korrosionsbeständigkeit.

Mit den Beständigkeitsversuchen (AP 3) sollte die Eignung der Werkstoffe für den unter Tage-Einsatz neben den Werkstoffen für das Filtermittel mit untersucht werden.

Recherche zu eingesetzten Befestigungstechnologien im Kalibergbau:

Aufgrund seines einfachen aber wirkungsvollen Aufbaus und der im Vergleich zu anderen Technologien günstigen Anschaffungskosten ist der Spreizhülsenanker (auch Spreizdübel- bzw. Spreizkopfanke genannt) die am weitesten verbreitete Befestigungstechnologie. Er ist in verschiedenen Ausführungen und Abmessungen erhältlich und stellt geringe Anforderungen an die zu seiner Einbringung nötige Ausrüstung (Ankerbohrwagen). Zunächst wird ein Ankerloch im Gebirge gebohrt, in das der Anker eingebracht wird. Beim Anziehen der Anker Mutter zieht die Ankerstange (das Zugglied) einen Konus in Richtung Anker Mutter, der den Spreizkörper/Spreizdübel auf weitet und damit eine Befestigung im Ankerloch ermöglicht.

In Ausnahmefällen wird auf den Klebeanker zurückgegriffen. Bei diesem wird in das vorgebohrte Loch eine Klebepatrone (Zweikomponentenkleber) platziert, die vom speziell geformten Anker beim Einbringen zerstört und durch Drehen des Ankers durchmischt wird.

Bei Befestigungen, die nur geringen Kräften ausgesetzt sind, wird auf gedübelte Verbindungen zurückgegriffen.

2.1.2 Arbeitspaket 2 (Modellentwicklung, Umgebung)

Eine für alle Versatzstandorte gültige Beschreibung des Versatzregimes und eine vorhersagbare Lasteinwirkung auf das Dammbauwerk bzw. das textile Absperrsystem war seitens des Bergwerkbetreibers in der Anfangsphase des Projektes nicht möglich gewesen.

Im regulären Versatzbetrieb werden nur Grubengebäude großer räumlicher Ausdehnung mit geringer Steigung bespült. Die Versatzsuspension härtet schichtweise aus und geht eine Verbindung mit dem Salzgestein der Sohle und der Stöße ein. Am Dammbauwerk kommt entweder bereits sedimentierte und durch die bereits vorhandene Versatzschicht filtrierte Lauge an bzw. die „frisch“ eingespülte Versatzsuspension erreicht das Dammbauwerk und wird dort filtriert. Belastbare Messergebnisse für den Verlauf der Verfestigung der Suspension existieren nicht.

In den im Projekt vorgesehenen Technikums- und unter Tage Versuchen sollte das Versatzverhalten sowie ein möglicher Lastabbau über das textile Absperrsystem untersucht und dokumentiert werden.

Für den Sonderfall, dass das gesamte Dammbauwerk mit einem Querschnitt von beispielsweise 20 m² vollständig mit Versatzsuspension mit einer geodätischen Höhe von 20 m eingestaut würde, müsste über dem Damm ein Schweredruck von 3,5 bar (entsprechend einer Flächenlast von 7000 kN (700 t)) abgetragen werden.

Es wurde berechnet, dass bei einer Befestigung (Abspannung) mit hochfesten synthetischen Faserseilen 40 Faserseile mit einem Außendurchmesser von 35 mm erforderlich wären. Dies ist zum Einen beim Aufbau des Absperrsystems unter Tage nicht handhabbar und zum Anderen ist eine Verbindung zur Kraftübertragung vom textilen Filter auf die Abspannseile textiltechnisch nicht darstellbar und diese würde zusätzlich die Funktion des Filters beeinträchtigen.

Ein Lastübertrag auf umlaufende Gurte auf der Filtratseite wurde ebenfalls geprüft. Um eine Gewichtskraft von 7000 kN mittels handelsüblicher Hebebänder (Gurte) aufzunehmen würden bei einem Stollenquerschnitt von 20 m² 25 Gurtbänder mit einer Breite von 300 mm notwendig. Bei einer Streckenbreite von 7,5 m wäre keine freie Drainagefläche mehr verfügbar.

Dieser Sonderfall konnte aus Sicht der Projektpartner in diesem Projekt keine Umsetzung finden und war zu diesem Zeitpunkt auch noch nicht nachgewiesen worden.

Der Aufbau des textilen Absperrsystems wurde unter der Annahme, dass die Gewichtskraft der Versatzsuspension nicht im vollen Umfang auf den Filter wirkt, wie folgt entwickelt:

Abbildung TUC 1: Streckenprofil

Abbildung TUC 2: Lagenweiser Aufbau

Abbildung TUC 3: Befestigung des textilen Absperrsystems

Das Netz diente als Anlagefläche für den textilen Filter und zur Lastverteilung. Das Gurtbandnetz wurde während der Montage von Spanngurten gehalten und bei Bedarf definiert vorgespannt. Die Spanngurte waren über Anker mit dem Gebirge verbunden. Niederhalter pressten ein Dichtelement auf Filter und Gurtbandnetz.

In den Technikums- bzw. unter Tage Versuchen sollen handelsübliche Gurtbandnetze aus Polyester zum Einsatz kommen: Gurtbandnetz aus Polyesterband 25 mm breit, 2 m x 2 m, Maschenweite (300 x 300) mm, umlaufend mit Schlaufen.

Um die Drainage des textilen Filters zu verbessern bzw. weitere Wege für die Lauge aus dem Versatzkörper zu schaffen, wurde der Einsatz von Dochtseilen erwogen.

Diese sollen am textilen Filter befestigt werden und in den Versatzkörper (=Suspensionsseite) hinein gespannt werden. Eine Eignung dieses technischen Details wurde durch entsprechende Versuche überprüft (siehe 2.1.4 Arbeitspaket 4).

2.1.3 Arbeitspaket 3 (Laborversuche)

Mit den Lastaufnahmemitteln (Faserseile) und den möglichen Filtermaterialien wurden Beständigkeitsversuche in der Versatzsuspension und in Lauge durchgeführt. Die Proben wurden der Lauge bzw. Suspension für 3 Monate, 6 Monate und 12 Monate ausgesetzt und danach die Bruchkraft im Vergleich zur Rückstellprobe bestimmt. Mittels der thermogravimetrische Analyse (TGA) und der „differential scanning calorimetry“ (DSC) Analyse wurde untersucht, ob die Lauge bzw. die Suspension die Polymerstruktur der Lastaufnahmemittel verändert. Es wurde der Werkstoff Dyneema untersucht, weil diese Proben im Zugversuch die größte Abnahme der Bruchkraft zeigten (siehe Abschnitt 2.1.4).

Mit Hilfe der TGA (thermogravimetrische Analyse) werden Materialien auf ihre thermische Stabilität und Zersetzung hin untersucht. Die Änderung der Probenmasse wird als Funktion der Temperatur aufgezeichnet. Jeder Masseverlust verursacht einen Peak der TGA – Kurve. Die Gewichtsänderung und die Temperatur, bei welcher die Gewichtsänderung stattfindet, können spezifisch für eine untersuchte Probe sein. Daraus können Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des Stoffes gezogen werden. Die Auswertung der TGA – Kurven für Dyneema-Seile in Lauge, in Suspension bzw. als Rückstellprobe zeigt einen unveränderten Zersetzungspunkt bei ca. 500°C. Der Gewichtsverlust unterhalb einer Temperatur von 500°C von Dyneema-Seilen in Lauge und Suspension und die nichtzersetzte Masse im Bereich von 500 bis 1000°C entspricht dem Zersetzungsverhalten von reiner Lauge bzw. reiner Suspension in der TGA – Analyse. Folglich ist keine Veränderung des Zersetzungsverhaltens durch Lauge bzw. Suspension innerhalb von 3 Monaten erkennbar.

Abbildung TUC 4: TGA – Kurve: Dyneema Übersicht

In einem DSC (Dynamische Differenzkalorimetrie)-Experiment wird die Differenz des Wärmestroms zwischen Proben- und Referenztiegel gemessen, während bei beiden ein Temperaturprofil vorgegeben wird. Aus den gemessenen Wärmeströmen lassen sich u.a. Informationen zu Glasübergängen, Schmelzen, Kristallisation und Verdampfung gewinnen, die jeweils typisch für ein Material sind.

Abbildung TUC 5: Beispiel DSC – Kurve, Dyneema neu

Abbildung TUC 6: Beispiel DSC – Kurve, Dyneema 3 Monate Lauge

Abbildung TUC 7: Entwicklung der spez. Schmelzenthalpien von Dyneema

Die abnehmenden Schmelzenthalpien bei den in Lauge und Suspension gelagerten Seilen (siehe zweite Aufheizkurve – grün) deuten darauf hin, dass eine chemische

Alterung am Werkstoff Dyneema stattgefunden hat. Bei den suspensionsbelasteten Seilen steigt die Schmelzenthalpie mit zunehmender Einlagerungszeit leicht an. Bei den in Lauge gelagerten Seilen ist sie ungefähr gleich.

Die Kristallisationsenthalpie der in Lauge und Suspension gelagerten Seile hat gegenüber dem unbelasteten Werkstoff ebenfalls abgenommen und deutet ebenfalls auf eine chemische Alterung hin. Diese ist bei den laugenbelasteten Seilen größer als bei den suspensionsbelasteten.

Die in den ersten Aufheizkurven der laugenbelasteten Seile vor und nach dem Schmelzen des Werkstoffes Dyneema auftretenden Auffälligkeiten („Peaks“) stellen Stoffe aus der Lauge dar, die sich zersetzen (in der Abkühlkurve nicht wieder zu finden).

In Bezug zu den Zugversuchen (Daten aus 3-Monatsproben Lauge und Suspension) ergibt sich folgendes Bild:

Seil in Lauge: 17% weniger Bruchkraft

Seil in Suspension: 28% weniger Bruchkraft

Aus der DSC:

Seil in Lauge: 28% weniger Schmelzenthalpie

Seil in Suspension: 21% weniger Schmelzenthalpie

(Hinweis: Alle Werte sind Mittelwerte. Mit größter Schmelzenthalpie bei unbelastetem Dyneema und kleinster Schmelzenthalpie ergibt sich z.B. eine Reduktion um 24,5%.)

2.1.4 Arbeitspaket 4 (Technikumsversuche)

Abbildung TUC 8: Entwicklung Seilbruchkraft Dyneema

Abbildung TUC 9: Entwicklung Seilbruchkraft Technora

Abbildung TUC 10: Entwicklung Seilbruchkraft Vectran

Die Bruchkraft ist eine der wesentlichsten Eigenschaften eines Seiles. Mit einer Zugprüfmaschine wurde die Bruchkraft der in Lauge und Suspension ausgelegten Seile verschiedener Materialien im Vergleich zu den Rückstellproben gemessen. Um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden hierfür eigens Versuchsseile gleicher Machart (Durchmesser 6mm; Flechtformel 12/2/1; TPM 25,8 U/m; Fäden pro Litze 7; Flechtlänge 39mm). Alle Seilproben zeigen eine Abnahme der mittleren Bruchkraft im Vergleich zu den Rückstellproben, die bei Dyneema und Technora über die Dauer der Auslage leicht zunahm. Die höchste Abnahme zeigt sich bei Dyneema in Suspension mit einer Bruchkraftabnahme um 28%, gefolgt von Dyneema in Lauge mit einer Bruchkraftabnahme um 22%. Bei den Werkstoffen Technora (-17,5%) und Vectran (-12,5%) wurde ebenfalls ein Bruchkraftabfall gemessen. Dieser ist im Vergleich zum Werkstoff Dyneema jedoch geringer. Mit einem maximalen Bruchkraftabfall von 28 % sind die

Lastaufnahmemittel bei einem Sicherheitsfaktor von 2 dennoch für technische Anwendungen geeignet.

Ebenso wurde die Bruchkraft an handelsüblichen 50mm-Polyester-Gurten der Firma SpanSet ermittelt.

Abbildung TUC 11: Entwicklung Bruchkraft der Gurte

Auch hier war eine Abnahme zu beobachten, die bei Auslagerung in Suspension (-15%) größer war als bei Auslagerung in Lauge (-7%). Über die Dauer der Auslage blieb sie aber konstant. Für die Gurte gilt gleich wie auch für die Seile, dass sie trotz dieser Verringerung der Bruchkraft für eine entsprechende Anwendung geeignet sind.

Netzprüfung:

Die Netzprüfung ist ein akkreditiertes STFI-internes Prüfverfahren zur Bestimmung des Kraft-Dehnungs-Verhaltens großflächiger netzartiger Strukturen durch das Aufbringen einer Belastung senkrecht zur Ebene mittels geometrisch verschiedener Prüfkörper bis ca. 24 t. Die Polyesternetze (2 x 2) m wurden mit einer 500 mm Halbkugel geprüft.

Abbildung TUC 12: Netzprüfstand

Abbildung TUC 13: Entwicklung Bruchkraft Gurtbandnetze

Die Netze wurden, wie die vorangegangenen Proben auch, für 3, 6 und 12 Monate jeweils in Lauge und Suspension gelagert. Die Auswertung ergab lediglich bei den für 6 und 12 Monate in Suspension ausgelagerten Netzen eine leichte Abnahme der Bruchkraft von 7%. Bei einigen anderen Proben konnte sogar eine leichte Erhöhung festgestellt werden.

Mikroskopie:

Die der Lauge und Suspension ausgesetzten Seile sowie die Vergleichscharge wurden mehrfach mikroskopisch untersucht. Zunächst wurden die neuen und in Lauge bzw. Suspension gelagerten Seile in Harz eingegossen, geschnitten und dann geschliffen.

Abbildung TUC 14: Dyneema neu, 6 Monate und 12 Monate in Suspension

Es ist deutlich zu erkennen, dass Feststoffpartikel bis ins Innere des Seiles eingedrungen sind.

Auch nicht in Harz eingegossene Proben wurden an der Seiloberfläche begutachtet.

Abbildung TUC 15: Dyneema 6 Monate Suspension

Ein Anhaften von zahlreichen Partikeln unterschiedlicher Form und Größe an den Fasern war zu beobachten.

Im Anschluss daran wurden aus den Seilen Einzelfasern extrahiert und ebenfalls unter dem Mikroskop betrachtet. Auch hier sind Partikel sichtbar, die in ihren Abmessungen z.T. den Faserdurchmesser um ein Vielfaches übersteigen.

Abbildung TUC 16: Technora-Faser mit Salzkristallen

Eine weitere mikroskopische Auswertung fand nach dem Zugversuch jeweils an der Bruchstelle statt. In einer Gegenüberstellung der mit Lauge bzw. Suspension behandelten Fasern mit der Vergleichscharge war eine stärkere Schädigung der Fasern in Lauge bzw. Suspension feststellbar. Diese Schädigung wurde zum einen auf die abrasive Wirkung der Salzkristalle und zum anderen auf die durch die Suspension bzw. Lauge bewirkte Degradation (siehe Auswertung der DSC – Analyse) zurückgeführt. Es waren aber auch Querrisse festzustellen, welche durch den Druck der Salzkristalle auf Querfestigkeit der Filamente wirkte.

Abbildung TUC 147: Technorafasern nach Auslage in Lauge (3 Monate) und Zugversuch

Abbildung TUC 248: Technorafasern neu nach Zugversuch

Weiterhin wurden CT-Aufnahmen der Seile durchgeführt, um eine Ansicht des Seilinneren zu erhalten, ohne dieses mechanisch Auftrennen zu müssen.

Abbildung TUC 19: CT-Aufnahmen Technora-Seil, 6 Monate Suspension

Abschließend sind mit Hilfe eines Lasermikroskops weitere Aufnahmen von Einzelfasern erstellt worden. Ziel war es, die o. g. Aufnahmen der Einzelfasern höher aufgelöst darstellen zu können und ein genaueres Verständnis für die Beeinflussung der Fasern durch die Medien zu erlangen.

Abbildung TUC 20: Lasermikroskop-Aufnahme Dyneema neu und 6 Monate Suspension

Abbildung TUC 21: Lasermikroskop-Aufnahme Dyneema 3 Monate Lauge

Es ist deutlich zu sehen, dass sich Teile der Lauge bzw. Suspension an der Einzelfaser anlagern und wie auf Abbildung TUC 21 zu sehen ist, sich auch die auf der Faser befindliche Schlichte ablösen kann. Dies könnte ein Grund für die Veränderung der Schmelzenthalpie (siehe 2.1.3 Arbeitspaket 3) sein. Ebenfalls ersichtlich ist, dass Partikel, die in ihren äußeren Abmessungen deutlich kleiner als der Faserdurchmesser sind, eingebettet in einer Plastifikation aus Faserschlichte, fest an der Faser haften und gerade bei der im Zugversuch auftretenden Relativbewegung zwischen den Fasern zu zusätzlichen Beschädigungen führen können.

Dochtversuche:

In einem Vorversuch wurde mittels einer Vielzahl von unterschiedlichen Seilen der Einfluss von Seilkonstruktion und Seilwerkstoff ermittelt.

Abbildung TUC 22: Dochtvorversuch

Dazu wurden die Proben am oberen Seilende befestigt und das untere Ende in einem mit eingefärbtem Wasser gefüllten Behälter gehangen. Anschließend wurde in einem Intervall von 1h, 4h, 24h, und 48h die vom Wasser erreichte Höhe am Seil abgelesen.

Es zeigt sich, dass die Seile, die eine hohe Anzahl an Filamenten und damit eine hohe innere Oberfläche pro Volumen besitzen (entspricht einer hohen Kapillarität), eine besonders hohe Steighöhe des Wassers ermöglichen. Ob zusätzlich zur Kapillarität (und den Kohäsionskräften im Wasser) noch der von den Pflanzen bekannte Transpirationssog aufgrund des Verdunstens des Wassers am oberen Ende wirkt, kann hier nicht beantwortet werden.

Abbildung TUC 23: Dochtversuch unterschiedliche Litzenanzahl

Wie erwartet, sinkt die Steighöhe mit geringer werdender Anzahl an Litzen. Allerdings scheint erst bei einer Reduktion der Litzen um mehr als 1/3 eine signifikante Verringerung einzutreten. Die geringeren Werte der Versuche mit 11 und 12 Litzen gegenüber dem Versuch mit 10 Litzen sind mit der Schwankung der Messwerte zu erklären.

Abbildung TUC 24: Dochtversuch vertikal - horizontal

Wird das Seil nicht mehr vertikal sondern horizontal positioniert, ist es dem Wasser aufgrund der nun um 90° versetzt wirkenden Schwerkraft möglich, weiter entlang des Seiles zu wandern. Wird nun statt des Wassers zu 100% gesättigte Lauge verwendet, ergibt sich bei voller Litzenanzahl das gleiche Bild wie mit Wasser. Bei verringerter Litzenanzahl ist allerdings ein deutlicherer Rückgang der erreichten Seillänge zu verzeichnen. Die Steighöhe in einer Kapillare ist unter anderem vom Kontaktwinkel, der Oberflächenspannung und der Dichte des aufsteigenden Mediums abhängig. Durch das Einbringen von Salz in das Wasser verändern sich alle diese Parameter sodass ein schon ein geringes Verändern des Verhältnisses aus innerer Oberfläche zu Volumen einen größeren Einfluss haben kann.

Abbildung TUC 25: Wasseraustrag durch Dochtwirkung

In einem weiteren Versuch wurde die über ein Faserseil drainierbare Menge an Salzlauge ermittelt. Hierzu wurde ein offenes Becken mit Salzlauge gefüllt und ein Faserseil (Kern-Mantel-Seil; Durchmesser 6mm; Kern und Mantel aus PES) horizontal so aufgehängt, dass ein Ende in die Salzlauge eintaucht. Da bei einem offenen Becken Flüssigkeit auch durch freie Verdunstung entweicht, wurde zunächst die Menge an Flüssigkeit ermittelt, die rein durch Verdunstung ausgetragen wird (kein Seil eingehängt). Anschließend wurde der Versuch mit Seil wiederholt. Aus der Differenz, gebildet aus dem zweiten minus dem ersten Versuch, lässt sich die durch das Seil ausgetragene Menge ermitteln. Die Versuchsdauer lag bei beiden Versuchen bei einer Woche

2.1.5 Arbeitspaket 5 (Entwicklung Gesamtsystem für unter Tage Einsatz)

Die im Projektverlauf unter Tage gemachten Erfahrungen sowie Gespräche, in denen die aktuellen Erkenntnisse und Vorgaben des Bergwerksbetreibers mit einfließen, zeigten, dass die unter 2.1.2 entwickelte Lösung für das textile Dammbauwerk unter Tage in dieser Form nicht mehr umsetzbar ist. Zum einen wurde die Konfektionierung der textilen Bestandteile unter Tage in der Zwischenzeit als zu anspruchsvoll eingeschätzt, zum anderen ergab sich ein zu großer Montagaaufwand direkt vor Ort. Ebenso erschien unter den zwischenzeitlich gewonnenen Erfahrungen eine Abdichtung zwischen Textil und Gebirge fraglich.

Daher wurde eine über Tage oder an einem geeigneten Hohlraum unter Tage vorkonfektionierbare Lösung erarbeitet, die, nach Möglichkeit als Ganzes, an der entsprechenden Stelle als Dammbauwerk errichtet wird (im folgenden Dammbauwerk in Rahmenbauweise genannt).

Abbildung TUC 26: Dammbauwerk in Rahmenbauweise vor Befestigung

Abbildung TUC 27: Aufbau Dammbauwerk in Rahmenbauweise

Abbildung TUC 28: Aufbau Dammbauwerk in Rahmenbauweise

Abbildung TUC 29: Dammbauwerk in Rahmenbauweise, befestigt

Wichtigstes Kennzeichen dieser Variante ist ein Rahmen, an dem der textile Filter mit seiner Stützstruktur (dem Gurtbandnetz) befestigt wird. Um eine Abdichtung zwischen Rahmen und textilen Filter zu gewährleisten, wurden sogenannte Niederhalterrohe vorgesehen, welche den Filter mittels verschraubbarer Rohrschellen auf den Rahmen pressten. Für eine definierte Vorspannung des Gurtbandnetzes sorgten wiederum Spannröhre, an denen das Netz über D-Ringe ein gehangen wurde. Diese Röhre waren drehbar gelagert und spannen durch eine entsprechende Verdrehung das Netz vor.

Zur Befestigung des Dammbauwerkes im Hohlraum unter Tage musste eine plane Stirnfläche in das Gebirge geätzt werden. An diese Fläche wurde der Rahmen inklusive Filter und Gurtbandnetz mittels Gebirgsanker befestigt.

2.1.6 Arbeitspaket 6 (Herstellung Funktionsmuster für Insituversuche)

In enger Abstimmung mit dem STFI als Lieferanten des textilen Filters und der KD Stahl- und Maschinenbau GmbH, die verantwortlich für den eigentlichen Prüfaufbau waren, wurden die Gurtbandnetze geplant und bei der Manfred Huck GmbH gefertigt.

Die Breite der Gurte von 25mm und die Maschenweite von 200mm x 150mm resultieren zum einen aus der Forderung nach einer genügend großen Drainagefläche am Filter und zum anderen aus den Maschinenparametern beim Hersteller.

Polyester wurde als Material gewählt, da dieses in den Technikumsversuchen sehr gute Ergebnisse erreicht hatte (siehe Punkt Netzprüfung unter 2.1.4 Arbeitspaket 4).

Die Befestigung mit D-Ringen hatte sich ebenfalls in den Technikumsversuchen bewährt und erwies sich bei der Erstellung der Entwürfe als einfach in den Rahmen des Prüfaufbaus integrierbar.

Abbildung TUC 30: Gurtbandnetz ein gehangen

Abbildung TUC 31: Detail D-Ring-Aufnahme

Abbildung TUC 32: Detail Ecke und Gesamtansicht

2.1.7 Arbeitspaket 7 (Insitu-Versuche)

Die Stützstruktur in Form des Gurtbandnetzes hat während des kompletten Versuches die einwirkende Last zuverlässig abgetragen und wies zwar erwartungsgemäß z.T. starke Verschmutzungen auf, konnte aber nach eingehender Untersuchung am Versuchsende als intakt angesehen werden.

Abbildung TUC 33: Detail verschmutztes Gurtbandnetz

Abbildung TUC 34: herausgetrenntes Gurtbandnetz

Abbildung TUC 35: Gesamtansicht Prüfstand unter Tage

Um die Inspektion des Gurtbandnetzes ermöglichen zu können, wurde dieses nach Versuchsende herausgetrennt, an die TU Chemnitz verbracht und dort intensiv begutachtet.

Eine Behinderung der Drainage durch das Netz war ebenso wenig zu beobachten wie ein Versagen der einzelnen Elemente D-Ringe, Gurte, Schlaufen, und Kreuzungspunkte.

Zu Versuchsende war der Versatzkörper nicht vollständig ausgehärtet und beinhaltete noch überschüssige Lauge. Dies lässt auf eine ungenügende Drainage schließen. Dies steht im Gegensatz zu den im Technikum erzielten Ergebnissen, bei denen die Drainage als ausreichend eingestuft werden konnte. Allerdings sind zur Beurteilung dieses Effektes auch die gegenüber dem Technikumsversuchen geänderten Randbedingungen zu beachten (siehe hierzu die ausführlichen Erläuterungen unter 2.3.8).

Daher haben sich die Projektpartner nach Abschluss des Versuches unter Tage darauf verständigt, noch einmal Versuche im Technikum aufzunehmen, bei denen eine Rückspülbarkeit des Filters vorgesehen wurde.

2.1.8 Arbeitspaket 8 (Evaluierung der Ergebnisse)

Die unter 2.1.7 erwähnten nachträglichen Technikums-Versuche zur Rückspülbarkeit führten zu dem Ergebnis, dass eine Rückspülung des Filters möglich war, diese aber

nicht den gewünschten Effekt auf das Drainage-Ergebnis hat. Eine bereits zum Abschluss der Versuche unter Tage aufgestellte Vermutung, die dort aber nicht verifiziert werden konnte, nämlich, dass der Filter sich nicht oder nur in geringem Maße zusetzt, wurde damit bestätigt.

Dies führte aber wiederum zu der Erkenntnis, dass die unvollständige Drainage auf den sich vor dem Filter aufbauenden Versatzkörper zurückzuführen ist. Risse und Rutschereignisse im Versatzkörper können die Drainage positiv beeinflussen, erscheinen aber derzeit als zufällige und nicht von außen steuerbare Ereignisse.

Es wird daher für die Zukunft empfohlen, dass die Bildung und Veränderung des Versatzkörpers über die Zeit, in diesem auftretende Effekte und die Wechselwirkung mit dem Dammbauwerk bzw. dem umgebenden Gebirge näher untersucht werden. Ziel dieser Untersuchungen sollte es sein, Möglichkeiten zu finden, wie über das Gesamtvolumen des Versatzkörpers eine über die Zeit gleichmäßige und ausreichend große Drainage bei gleichzeitiger Beibehaltung der sonstigen relevanten Eigenschaften (Dauer der Aushärtung, zu erzielende Endfestigkeit, Anbindung an das Gebirge etc.) sichergestellt werden kann.

Für das eigentliche Dammbauwerk kann aber festgehalten werden, dass die erarbeitete und im Labor, Technikum wie unter Tage getestete Lösung zeigt, dass die Lauge drainiert wird, in sich dicht ist und den auftretenden Belastungen standhält. Das Abstandsgewirke des textilen Filters setzt sich nicht bzw. nur in geringem Maße zu und die Stützstruktur weist keine kritische Alterung bzw. keine nennenswerte Reduktion der ertragbaren Lasten auf.

Untersuchungen, Erfahrungen und laufende Abstimmungen mit dem Bergwerksbetreiber haben während der Projektlaufzeit zu der Erkenntnis geführt, dass in Einzelfällen als Lastannahme zur Dimensionierung von einer vollständig gefüllten Kammer und damit mit einem entsprechenden geodätischen Druck zu rechnen ist. Eine rechnerische Überprüfung (siehe Kapitel 2.1.2) hatte gezeigt, dass dies mit einem Textil nicht sinnvoll möglich ist.

Während der Projektlaufzeit entwickelte parallel der Bergwerksbetreiber eine eigene, unabhängige Alternative zur bisherigen Praxis, die auch für einen solchen Sonderfall geeignet ist. Diese besteht aus einer Rundbogenmauer, in der eine Öffnung zur Drainage der Lauge ausgespart bleibt. Die Öffnung kann mit einem Schieber versehen werden, um sie komplett verschließen zu können. Hinter der Mauer (Suspensions- bzw. Versatzseite) wird grobes Salz als Vorfilter aufgeschüttet.

Abbildung TUC 36: Rundbogenmauer

Erste Erfahrungen mit dieser Lösung zeigen jedoch, dass die Drainage im Versatzblock vor dem Damm ähnlich ungenügend erfolgt wie bei den bisher eingesetzten Ausführungen in Stahlbauweise. Da die Drainage am eigentlichen textilen Dammbauwerk befriedigende Ergebnisse erzielt hatte, erscheint eine Kombination aus beiden Lösungen sinnvoll.

Abbildung TUC 37: Hybriddammbauwerk

Um den Abfluss der Drainage regeln zu können und um in einem eventuellen Versagensfall die Möglichkeit eines kompletten Verschlusses zu gewährleisten, kann auch hier ein Schieber vorgesetzt werden.

Abbildung TUC 38: Hybriddammbauwerk mit Schieber

Für eine Einschätzung der Marktfähigkeit wurde eine Übersicht der in Deutschland derzeit in Betrieb befindlichen Versatzbergwerke erstellt. Wesentliches Kennzeichen dieser Bergwerke ist das versetzen von bergbaufremden Abfällen zum Zwecke einer Verwertung. Damit grenzen diese sich zunächst von „klassischen“ Bergwerken ab, die der Gewinnung von Rohstoffen dienen. Weiterhin unterscheiden sie sich von Untertagedeponien (UTD), in denen zwar ebenfalls bergbaufremde Abfälle verbracht werden, dies aber zur Beseitigung eben dieser Abfälle dient. Als Beispiele seien hier die UTD der UEV (eine Tochter der Südwestdeutschen Salzwerke) in Heilbronn, die UTD der GSES in Sondershausen und die beiden UTD in Herfa-Neurode bzw. Zielitz der K+S genannt. Hier werden allerdings nur Big Bags, Fässer und Container unter Tage eingestapelt – ein Dammbauwerk ist hierfür nicht nötig.

Verwertung im Versatzbergwerk bedeutet, dass der Versatz einem wirtschaftlichen Zweck dient, nämlich der Sicherung der Hohlräume um Gebirgsschläge und damit Beschädigungen an Bauwerken, Biotopen etc. infolge von Senkungen an der Tagesoberfläche zu verhindern.

Die rechtliche Grundlage zum Betrieb liefert die Versatzverordnung (VersatzV).

Abbildung TUC 39: Versatzbergwerke in Deutschland

Wie aus der Übersicht zu erkennen ist, gibt es mehrere Arten des Versatzes. Die häufigste Methode ist der Stapelversatz, mitunter auch mechanischer Versatz genannt. Hier wird der Abfallstoff in Big Bags, seltener auch in Fässern abgefüllt und in den Hohlräumen eingestapelt. Anschließend erfolgt meist ein verfüllen der Hohlräume zwischen den einzelnen Gebinden und zwischen Gebinden und Firste mit angefeuchtem Salz. Vor dem Abfüllen kann noch eine Aufbereitung der Abfälle und ein Vermischen bzw. injizieren weiterer Zuschlagstoffe, die zum Erreichen einer Mindesthärte des Big Bag-Inhalts führt, erfolgen. Weitere Versatzarten sind der Schüttgutversatz (auch Direktversatz oder offener Einbau genannt), bei dem die losen Abfälle direkt in den Hohlraum (z.B. mittels Lkw/Muldenkipper und Planierdraupe/Radlader) gebracht

werden, der Sturzversatz, bei dem die Abfälle als Versatzmischung lose, in Big Bags oder Säcken verpackt in geeignete Abbaukammern verstürzt und anschließend verdichtet werden und der hydraulische Versatz, der für dieses Projekt von Interesse ist.

In Deutschland wird von zwei Betreibern (GSES Sondershausen und NDH-E) der hydraulische Versatz mit Lauge und Suspension, so wie er in diesem Projekt betrachtet wurde, durchgeführt. In der Übersicht ist noch nicht berücksichtigt, dass die NDH-E durch die Umsetzung eines neuartigen Verfahrens (ZIM-KF 2290601SA9) im Bergwerk Sollstedt eine Erweiterung des hydraulischen Versatzes mit Lauge und Suspension um derzeit 120.000 Tonnen/Jahr realisiert. An zwei weiteren Standorten wird er in Form des Dickstoffversatzes angewandt – hier kann zwar ebenfalls ein Damm erforderlich sein, jedoch muss hier keine Lauge drainiert werden, da die in der Suspension enthaltene Flüssigkeit beim Aushärten vollständig abbindet.

Die Gesamtkapazität der Versatzbergwerke in Deutschland liegt bei ca. 3 Mio. Tonnen Abfall pro Jahr. Die beiden Versatzbergwerke, die mit hydraulischem Versatz in Form von Lauge und Suspension arbeiten, vereinen in sich ca. 600.000 Tonnen Jahreskapazität.

Pro Jahr werden am Standort Bleicherode zwischen 5 bis 10 Dämme (in Ausnahmefällen bis 15) errichtet. Da am Standort Sondershausen die ähnliche jährliche Versatzkapazitäten und vergleichbare geologische Rahmenbedingungen vorliegen, kann hier von einer ähnlichen Anzahl ausgegangen werden.

Als ein weiteres Anwendungsfeld kann der Spülversatz angesehen werden, der mit bergbaueigenem Versatzmaterial (Fabrikrückstand aus der Aufbereitung, Bergematerial etc.) erfolgt. Gründe für diesen Versatz können die Anwendung eines versatzpflichtigen Abbauverfahrens, fehlende übertägige Aufhaltungsmöglichkeiten, oder die Reduzierung von in die Natur (insbesondere Gewässer) eingeleiteten Aufbereitungsrückständen sein. Beispielhaft sei hier der Spülversatz des Grubenbetriebes Unterbreizbach des Werkes Werra der K+S Kali GmbH zur Verringerung der Salzfracht der Flüsse Werra und Ulster genannt.

Abbildung TUC 40: Spülversatzanlage K+S

Auch hier müssen Dammbauwerke zur Verschließung der zu verfüllenden untertägigen Hohlräume (hier Kuppe genannt) errichtet werden.

Hier ist insbesondere der globale Markt interessant, da zum einen die Umweltauflagen bzgl. o.g. eingeleiteter Aufbereitungsrückstände sich stetig verschärfen und zum anderen vorhandene Lagerstätten immer intensiver abgebaut werden müssen. Beides kann nur durch einen entsprechenden Versatz erreicht werden. Im ersten Fall, um Rückstände nach unter Tage zu verbringen, die sonst in die Umwelt gelangen. Im

zweiten Fall, um das Grubengebäude zu stabilisieren, damit bisher nicht hereingewonnenes Material abgebaut werden kann.

Abbildung TUC 41: Kalibergwerke

In Abbildung TUC 41 ist eine Auflistung der von einigen der größten Kaliproduzenten betriebenen Untertage-Bergwerke (Zahlen in Klammern: Steinsalzbergwerke) und ihre jährliche Produktionskapazität dargestellt.

Allein diese hier aufgeführten Unternehmen vereinen in sich eine jährliche Produktionskapazität von ca. 56 Mio. Tonnen Kali pro Jahr. Damit wird ersichtlich, welches Potenzial hinter diesem Anwendungsfeld steht. Die Anzahl der hier in Zukunft zu errichtenden Dämme dürfte die im Bereich der Versatzbergwerke deutlich übersteigen.

Die Tatsache, dass das textile Dammbauwerk in Rahmenbauweise ausgeführt ist, führt zu einer Adaptierbarkeit an unterschiedliche örtliche Gegebenheiten bzw. diverse Ausführungen bereits bestehender Dammbauwerke. Die oben aufgezeigte Kombination aus Rundbogenmauer und textilem Dammbauwerk zu einem Hybriddammbauwerk ist ein Beispiel hierfür. Damit erweitert sich das potenzielle Einsatzspektrum bzw. verringern sich die Barrieren zur Einführung eines solchen Systems.

2.2 Entwicklung des textilen Filtersystems (STFI)

2.2.1 Arbeitspaket 1 (Materialuntersuchungen)

Für die Erfüllung, vor allem der mechanischen Teilfunktionen innerhalb des zu entwickelnden, textilen Filtersystems, war zunächst die Untersuchung verschiedener Materialien erforderlich. Dafür wurden die Materialien Twaron[®], Vectran[®], Dyneema[®], Technora[®] und Polyester herangezogen. Die Untersuchung erfolgte im Hinblick darauf, inwieweit sie zur Herstellung von textilen Flächenstrukturen für die zu entwickelnden Filtertextilien geeignet waren.

Die Materialien wurden folgenden Untersuchungen unterzogen:

- Zugversuche
- Beständigkeitsversuche gegenüber Salzlösungen
- Beständigkeit gegenüber wechselnder Feuchtigkeitseinwirkungen.

Zuerst erfolgte die Herstellung der einzelnen Materialproben. Um die entsprechend erforderlichen Zugprüfungen durchführen zu können, wurden die jeweiligen Materialien in Form von gebündelten Multifilamenten mit einem Durchmesser von 3 Millimetern zusammengefasst. Diese konnten unproblematisch in den entsprechenden Aufnahmevorrichtungen der im STFI vorhandenen Zugprüfgeräte aufgenommen werden. Die Zugversuche erfolgten jeweils an neuen Materialproben. Weitere Proben der einzelnen Materialien wurden im Rahmen der Versuche zur Beständigkeit gegenüber

Salzlösungen sowie gegenüber wechselnder Feuchtigkeitseinwirkung einer sogenannten Bewitterung ausgesetzt. Dafür wurden im STFI labortechnische Geräte zur künstlichen Bewitterung der Firma Weiss Umwelttechnik GmbH eingesetzt. Nach der Materialbewitterung wurden an diesen Proben ebenfalls Zugversuche durchgeführt, so dass die Ergebnisse der Zugprüfung vor und nach der jeweils erfolgten Bewitterung miteinander verglichen werden konnten. Die zumeist üblichen Materialuntersuchungen hinsichtlich der Beeinflussung der maximal ertragbaren Zugkräfte infolge der Einwirkung von UV-Strahlung, konnten im Hinblick auf die Anwendung im Unter-Tage-Bereich entfallen. Durch den Vergleich der jeweiligen Ergebnisse der Zugprüfung vor und nach den Materialbewitterungsversuchen, konnte festgestellt werden, dass die Einwirkung von wechselnden Feuchtigkeitsgraden und die Einwirkung von Salzlösungen keinen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeiten der untersuchten Materialproben hatte. Somit konnten für die einzelnen Materialien, für Verstärkungsstrukturen innerhalb des textilen Filters, folgende Zugfestigkeitswerte für die weiteren Arbeitsschritte im Forschungsvorhaben festgelegt werden (Werte, jeweils abgerundet):

- Twaron® – (gebündelte Multifilamente, Bündeldurchm. 3 mm) 6,0 kN
- Vectran® – (gebündelte Multifilamente, Bündeldurchm. 3 mm) 8,5 kN
- Dyneema® – (gebündelte Multifilamente, Bündeldurchm. 3 mm) 8,0 kN
- Technora® – (gebündelte Multifilamente, Bündeldurchm. 3 mm) 8,5 kN
- Polyester – (gebündelte Multifilamente, Bündeldurchm. 3 mm) 5,5 kN

2.2.2 Arbeitspaket 2 (Erarbeitung von Lösungsprinzipien für ein textiles Stollenfiltersystem)

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde der grundsätzliche Aufbau des textilen Dammbauwerkes entwickelt und festgelegt. Dabei wurden zwei Hauptfunktionen des Dammbauwerkes unterschieden:

- Hauptfunktion zur Kraftaufnahme und Einleitung in den gewachsenen Felsen
- Hauptfunktion zur Filtration der Suspension.

Darauf aufbauend erfolgte im Rahmen des Arbeitspaketes 2.4 (STFI) die Entwicklung von Lösungsprinzipien für die Hauptfunktion zur Filtration der Suspension. Die entsprechenden Entwicklungsarbeiten bezüglich der Kraftaufnahme und Einleitung in den gewachsenen Felsen erfolgten beim Projektpartner „Technische Universität Chemnitz“ (TUC). Die Entwicklungsarbeiten an der TUC hatten zum Ergebnis, die Kraftaufnahme durch ein Gurtnetzsystem zu realisieren, hinter welchem sich die Anordnung des textilen Filtersystems anschließt. Für das Filtersystem war folglich eine Lösung zu spezifizieren, welche im Bereich dieser Maschenöffnungen im Gurtsystem eine hinreichende Biegesteifigkeit aufweist. Dafür wurden folgende Lösungsprinzipie unter

dem Gesichtspunkt der Herstellbarkeit entwickelt und danach im Hinblick auf deren Tauglichkeit bewertet und ausgewählt:

- Spinnvliesstoff mit Verstärkungsstrukturen aus Hochleistungsfasern (Herstellung auf einer Vliesraschelmachine)
- Spinnvliesstoff mit Verstärkungsstrukturen aus Metallitzen (Herstellung auf einer Vliesraschelmachine)
- Flächengewirke mit Verstärkungsstrukturen aus Hochleistungsfasern (Herstellung auf einer Kettenwirkmaschine Jacob Müller - GWM1200)
- Flächengewirke mit Verstärkungsstrukturen aus Metallitzen oder Massivdraht (Herstellung auf einer Kettenwirkmaschine Jacob Müller - GWM1200)
- Abstandsgewirke (3D-Gewirke) ohne Verstärkungsstrukturen in Kombination mit Spinnvliesstoff (Herstellung auf einer Kettenwirkmaschine Jacob Müller - MDK80)
- Abstandsgewirke (3D-Gewirke) mit Verstärkungsstrukturen aus Hochleistungsfasern, Metallitzen oder Massivdraht; Verstärkungsstrukturen in Kombination mit Spinnvliesstoff (Herstellung auf einer Kettenwirkmaschine Jacob Müller - MDK80).

Nach der Herstellung verschiedener Probemuster im Rahmen des Arbeitspaketes „3.4 Laborversuche zur Verifizierung von Lösungsprinzipien textiler Stollenfiltersysteme“, einer entsprechenden Bewertung und nach erfolgten Absprachen mit den Projektpartnern, konnte entschieden werden, das Lösungsprinzip „Abstandsgewirke (3D-Gewirke) ohne Verstärkungsstrukturen in Kombination mit Spinnvliesstoff“ für die weitere Projektbearbeitung zugrunde zu legen. Dabei wurde vor allem berücksichtigt, dass dieses Lösungsprinzip eine Vielzahl an Optionen erlaubt, welche im Bedarfsfall entsprechend genutzt werden können. Wenn sich beispielsweise während der Technikumsversuche zeigt, dass Verstärkungsstrukturen benötigt werden, so können diese noch eingefügt werden. Dies wurde bereits bei der Materialuntersuchungen im Arbeitspaket „1.4 Materialuntersuchungen“ entsprechend berücksichtigt. Auch bietet ein Abstandsgewirke mehrere Möglichkeiten, entsprechende Verstärkungsstrukturen einzubinden, wie beispielsweise in die Grund- beziehungsweise in die Deckfläche, als auch zwischen den sogenannten Polfäden. Darüber hinaus können bei Bedarf ausgewählte Polfäden ebenfalls aus Hochleistungsfasern hergestellt werden. Eine weitere Option stellt der Verzicht des zusätzlichen Layers aus Spinnvliesstoff dar.

2.2.3 Arbeitspaket 3 (Laborversuche zur Verifizierung von Lösungsprinzipien textiler Stollenfiltersysteme)

Nach der Herstellung verschiedener Probemuster entsprechend der im Arbeitspaket „2.4 Erarbeitung von Lösungsprinzipien für ein textiles Stollenfiltersystem“, wurden Laborversuche zur Verifizierung durchgeführt. Dabei wurden zunächst verschiedene

Spinnvliesstoffe bezüglich deren Eignung als Filtermaterialien untersucht. Dabei konnte Polyesterspinnvliesstoff (120 g/m²) mit Phosphatbeschichtung als hinreichend geeignet spezifiziert werden. Einen weiteren Schwerpunkt stellten die Versuche zur Festigkeit von Abstandsgewirken dar. Dafür war es zunächst erforderlich, ein hinreichend repräsentatives Prüfverfahren zu spezifizieren, welches mit dem im STFI vorhandenen Prüfequipment durchgeführt werden kann. Aufgrund des darstellbaren, kreisförmigen Prüfquerschnittes mit einem Durchmesser von bis zu 200 Millimetern, konnte der Stempeldurchdruckversuch (CBR-Versuch) als geeigneter Prüfversuch spezifiziert werden. Wie bereits im Punkt „1 Beschreibung der Abarbeitung der Arbeitspakete sowie Begründung für signifikante, aufwandsmäßig und/oder zeitliche Abweichungen im Vergleich zur ursprünglichen Planung“ zum Arbeitspaket 3.4 beschrieben, wurden 3D-Gewirkeproben beim Projektpartner „K-UTEC AG Salt Technologies“ mit Ersatzsuspension beaufschlagt. Die durchgeführten Verifizierungsversuche mittels Stempeldurchdruckversuch ergaben eine mittlere ertragbare Belastung von 4,8 kN für Abstandsgewirke, mit einer Dicke von 25 Millimetern, aus Polyestergergarn und Polyestermonofilamenten. Signifikante Unterschiede zwischen 3D-Gewirkeproben, welche einer Ersatzsuspension ausgesetzt worden waren und Proben ohne eine solche Beaufschlagung, konnte nicht festgestellt werden.

Abbildung STFI 1: Stempeldurchdruckversuch – Versuchsdurchführung

Abbildung STFI 2: Stempeldurchdruckversuch – Probe nach der Prüfung

2.2.4 Arbeitspaket 4 (Entwicklung und Herstellung eines textilen Stollenfiltersystems für Technikumsversuche)

Den Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes bildete die abschließende Entwicklung sowie die Herstellung eines textilen Stollenfiltersystems für Technikumsversuche. Entsprechend des im Arbeitspaket „2.4: Erarbeitung von Lösungsprinzipen für ein textiles Stollenfiltersystem“ erarbeiteten und favorisierten Lösungsprinzips, wurden Varianten der Lösung „Abstandsgewirke (3D-Gewirke) ohne Verstärkungsstrukturen in Kombination mit Spinnvliesstoff“ umgesetzt. Die Ergebnisse der Versuche haben gezeigt, dass im weiteren Verlauf der Projektbearbeitung auf die Kombination der Abstandsgewirke mit Spinnvliesstoff verzichtet werden konnte. Die Oberflächenstruktur der 3D-Gewirke konnte vielmehr so ausgeführt werden, dass es zu einer hinreichenden Zurückhaltung von Partikeln kam. Die Herstellung der 3D-Gewirke des Probefiltersystems für die Technikumsversuche erfolgte auf einer Kettenwirkmaschine. Da die Oberflächenbeschaffenheit von Abstandsgewirken im Herstellungsprozess auf einer Kettenwirkmaschine direkt beeinflusst werden kann, eröffnete dies die Möglichkeit, die Filterwirkung des jeweiligen 3D-Gewirkes an die entsprechenden Erfordernisse anzupassen.

Abbildung STFI 3: Technikumsversuch mit STFI-Filtertextilien beim Projektpartner K-UTEC AG Salt Technologies

2.2.5 Arbeitspaket 5 (Entwicklung eines Funktionsmusters für ein neuartiges, textilen Stollenfiltersystems für Untertageeinsatz)

Die Entwicklungsarbeiten im Rahmen dieses Arbeitspaketes waren im Wesentlichen durch die Entwicklung verschiedener 3D-Gewirke für die Filterkomponente des textilen Absperrsystems gekennzeichnet. Dabei stand die Umsetzung der Ergebnisse aus den Technikumsversuchen im Mittelpunkt. Es wurden entsprechende textile Bindungen und Legungen erarbeitet, welche weiterführend zur Herstellung folgender Filtertextilien erforderlich waren:

- Abstandsgewirke mit einer Dicke von 25 Millimetern sowie einer Porenöffnung von jeweils 5 Millimetern in der textilen Grund- und Deckfläche
- Abstandsgewirke mit einer Dicke von 25 Millimetern sowie einer Porenöffnung von 5 Millimetern in der textilen Deckfläche und einer Porenöffnung von 10 Millimetern in der textilen Grundfläche
- Abstandsgewirke mit einer Dicke von 25 Millimetern sowie einer Porenöffnung von jeweils 5 Millimetern in der textilen Grund- und Deckfläche und zusätzlich eingearbeiteten Kanälen zur Einbringung von teilweise perforierten Schläuchen zur Filterrückspülung
- Abstandsgewirke mit einer Dicke von 25 Millimetern sowie einer Porenöffnung von 5 Millimetern in der textilen Deckfläche und einer Porenöffnung von 10 Millimetern in der textilen Grundfläche und zusätzlich eingearbeiteten Kanälen zur Einbringung von teilweise perforierten Schläuchen zur Filterrückspülung

Den Abschluss dieses Entwicklungsschrittes bildeten entsprechende Versuche, in denen die Realisierbarkeit der jeweils entwickelten Bindungen und Legungen verifiziert wurde.

2.2.6 Arbeitspaket 6 (Herstellung eines Funktionsmusters für ein neuartiges, textilen Stollenfiltersystems für Untertageeinsatz)

Einerseits wurden während der Projektlaufzeit die Vorgaben für die Durchführung der Insituversuche im Stollensystem unter Tage durch den Bergwerksbetreiber NDH-Entsorgungsbetreiber-gesellschaft mbH (NDH-E) verändert. Andererseits erschienen aufgrund der zwischenzeitlich erlangten Erkenntnisse eine Konfektionierung der textilen Elemente am Einbauort und das Erstellen einer entsprechend hochwertigen gefrästen Anlagefläche für den Filter als fraglich. Daher war eine direkte Fixierung des gesamten textilen Absperrsystems am Gebirge somit im Rahmen der Insituversuche unter Tage nicht mehr möglich (siehe hierzu auch Kapitel 2.1.5). Aus diesem Grund wurde durch den Projektpartner KD Stahl- und Maschinenbau GmbH eine entsprechende Stahlkonstruktion realisiert, welche das zu untersuchende, textile Absperr- und Filtersystem bei der Versuchsdurchführung aufnehmen konnte. Diese Stahlkonstruktion durfte letztlich, zusammen mit den darin eingespannten Textilkomponenten, entsprechend der NDH-E-

Vorgaben unter Tage eingebracht werden. Die zu realisierenden Abmessungen der Filtertextilien wurden somit durch die beschriebene Stahlkonstruktion bestimmt. Die Aufnahmevorrichtung war in folgende zwei Bereiche unterteilt:

- rechteckiger Querschnitt mit den Abmessungen 2700 x 1700 Millimeter
- runder Querschnitt mit dem Durchmesser 1500 Millimeter

Einschließlich der Randbereiche zur Klemmfixierung der Filtertextilien waren zur Bestückung folgende Abmessungen der jeweiligen Abstandsgewirke zu realisieren:

- für den rechteckigen Querschnitt: 3200 x 2200 Millimeter
- für den runden Querschnitt: 2200 x 2200 Millimeter

Nach entsprechender Abstimmung mit den Projektpartnern konnte mit der Herstellung der Funktionsmuster für beide Querschnittsbereiche der Aufnahmevorrichtung begonnen werden. Für die Herstellung der benötigten Abstandsgewirke konnte das STFI die Wirkmaschine eines Industriepartners nutzen, da die im Technikum des STFI zur Verfügung stehende Wirkmaschine vom Typ MDK80 für die benötigten Warenbreiten nicht ausreichend war. Zur Realisierung der benötigten Bindungen und Legungen wurde diese Maschine entsprechend gerüstet und neu justiert. Danach wurden die benötigten Filtertextilien hergestellt.

Abbildung STFI 4: Abstandsgewirke zum Einbau als textiler Filter in das Versuchssystem für die Insituversuche unter Tage

2.2.7 Arbeitspaket 6 (Durchführung von Insituversuchen in großvolumigen Bohrlöchern unter Tage)

Nachdem die erforderlichen Filtertextilien hergestellt worden waren (Arbeitspaket 6) konnte mit dem Einbau des textilen Absperrsystems begonnen werden. Wie bereits im vorherigen Kapitel ausgeführt, musste der Aufbau des textilen Dammbauwerkes verändert werden. Entsprechend der von den Partnern gemeinsam erarbeiteten neuen Lösung wurde durch den Projektpartner KD-Stahl eine Aufnahmevorrichtung aus Stahl realisiert, welche das textile Absperrsystem aufnehmen konnte. Aus diesem Grund konnte die Montage der Abstandsgewirke, welche die Filterkomponente des Absperrsystems bildeten sowie der Gurtbandnetze zur Lastaufnahme, in den Fertigungshallen des Projektpartners KD Stahl- und Maschinenbau GmbH über Tage erfolgen. Dementsprechend waren Mitarbeiter des STFI vor Ort. Nach dem Einbau der Textilkomponenten des versuchstechnischen Funktionsmusters des textilen Absperrsystems in die Aufnahmevorrichtung aus Stahl, wurde diese nach unter Tage verbracht und an einem, durch den Bergwerksbetreiber NDHE vorher festgelegten Standort eingebaut. Nachdem die Versuchseinrichtung bereits eingebaut war, kam es jedoch zu technischen Problemen an einer dahinterliegenden Stelle im Stollensystem. Dies führte leider zu

dem Erfordernis, dass seitens des Bergwerksbetreibers NDHE die Versuchseinrichtung zur Hälfte zurückgebaut werden musste, um eine entsprechende Umfahrung mit schwerem Gerät zu ermöglichen. Aus diesem Grund verblieb nur der Teil der Versuchseinrichtung im Stollen, welcher den runden Querschnitt von 1500 Millimetern aufwies. Danach wurde der verbleibende Versuchsaufbau mit entsprechender Suspension beaufschlagt. Zu Beginn und während der Versuchsdauer erfolgten Probenahmen des Filtrats, welche durch den Projektpartner K-UTEC AG Salt Technologies ausgewertet wurden. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass die gewünschte Filterwirkung bezüglich der Zurückhaltung der entsprechenden Partikel der eingespülten Suspension, erreicht wurde. Die Versuchsergebnisse der Technikumsversuche konnten somit durch die Insituversuche unter Tage bestätigt werden. Nach der Versuchsdauer wurden die textilen Komponenten der Versuchsanordnung, also das Gurtbandnetz sowie das Abstandsgewirke aufgeschnitten. Nach der Öffnung des Versuchsaufbaues konnte festgestellt werden, dass das Abstandsgewirke seine Funktion als textiler Filter erwartungsgemäß erfüllt hat. Ebenfalls konnte jedoch festgestellt werden, dass es nicht zum vollständigen Ausdrainieren der flüssigen Salzlauge aus der Suspension gekommen ist. Dies ist jedoch nicht auf ein Versagen des textilen Filters zurückzuführen. Vielmehr liegt das unvollständige Ausdrainieren der Salzlauge daran, dass es ab einer bestimmten Konsistenz des schlammigen Filterrückstandes zu Hemmeffekten kommt, welche dazu führen, dass die Salzlauge durch den Filterrückstand selbst zurückgehalten wird. Das Abstandsgewirke wurde zwar an der Rückseite stark mit Suspension und einer Salzkruste besetzt, blieb jedoch während der gesamten Versuchsdauer für die Salzlauge durchlässig.

Abbildung STFI 5 bis 8: Einbau der Abstandsgewirke in die Aufnahmevorrichtung

Abbildung STFI 9 und 10: Einbau der Versuchsanordnung unter Tage

Abbildung STFI 11: Versuchsanordnung des textilen Absperrsystems unter Tage

Abbildung STFI 12: Versatzmasse in der Versuchsanordnung unter Tage

2.2.8 Arbeitspaket 7 (Ergebnisevaluierung und Ableitung einer großtechnischen Lösung)

Sowohl durch Technikumsversuche, als auch durch die Insituversuche unter Tage konnte die Wirksamkeit der Abstandsgewirke als Filterkomponente in einem textilen Absperrsystem für den Bergwerksversatz nachgewiesen werden. Anhand der Versuchsergebnisse konnte abgeleitet werden, dass das Abstandsgewirke unabhängig des zu verschließenden Stollenquerschnittes als textile Filterkomponente eingesetzt werden kann. Die erhobenen Versuchsergebnisse und die Beobachtungen während der Versuchsdurchführung sowie beim Öffnen der Versuchsanordnung nach dem Versuchsende, bestätigten die, seitens des Bergwerksbetreibers geschilderten Beobachtungen an den bisher eingesetzten Absperrsystemen. Die bereits beschriebenen

Hemmeffekte, welche sich innerhalb der Versatzmasse ausbilden und die überschüssige Salzlauge auf dem Weg zum Filter am Weiterfließen hindern, wirken unabhängig vom jeweils eingesetzten Filtersystem. Aus diesem Grund wurde durch alle Projektpartner die Durchführung weiterer Technikumsversuche als sinnvoll angesehen. Dabei sollte untersucht werden, inwieweit eine, in den textilen Filter integrierte Rückspüleinrichtung den beschriebenen Hemmeffekten entgegen wirken kann. Dafür wurden im STFI weitere Abstandsgewirke konfektioniert und mit einer entsprechenden Rückspüleinrichtung ausgerüstet. Die Technikumsversuche wurden beim Projektpartner K-UTECH AG Salt Technologies durchgeführt. Leider konnte durch diese Versuche mit Rückspüleinrichtung keine signifikante Verbesserung der Drainage innerhalb des Filterkuchens selbst erreicht werden. Dennoch konnten diese Versuche wiederholt die sehr gute Eignung der Abstandsgewirke als Filtermaterial bestätigen. Gegenwärtig wird durch den Bergwerksbetreiber NDHE ein Absperrsystem favorisiert, welches aus einem gemauerten Rundbogen besteht, in dem eine entsprechende Öffnung zur Drainage der Lauge ausgespart bleibt. Diese Öffnung ist durch eine Stahlkonstruktion verschlossen, an welche eine Rohrleitung zur Abfuhr der anfallenden Lauge angeflanscht ist. Durch einen Schieber kann die Rohrleitung bei Bedarf vollständig verschlossen werden (siehe auch Kapitel 2.1.8). Bei dieser Lösung kommt derzeit kein entsprechender Filter zum Einsatz. Erste Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass die Drainage am Damm ungenügend erfolgt. Da die Drainage unmittelbar an der Filterkomponente des textilen Dammbauwerkes sehr gute Ergebnisse erzielt hat, erscheint eine Kombination aus beiden Lösungen für zukünftige großtechnische Anwendungen als sinnvoll. Ein entsprechender Filter aus Abstandsgewirke kann in die Maueröffnung passgenau eingebaut und bei Bedarf auch gewechselt werden. Die Filterwirkung würde dabei gegenüber einer Maueröffnung ohne Filtertextil signifikant erhöht und die Anforderung einer klaren Lauge als Ablauflösung eher erreicht.

Zur Realisierung von textilen Filtern mittels 3D-Gewirken, auch über Anwendungen als Stollenfiltersystem hinaus, ist eine entsprechende Umrandung der Abstandsgewirke zur Abdichtung gegenüber Flüssigkeiten erforderlich. Diesbezüglich wurden Möglichkeiten zur Realisierung entsprechender Randbereiche untersucht. Mit einem entsprechenden Versuchsstand konnte eine Randabdichtung durch Umkettlung und die Einarbeitung eines Keders erfolgreich verifiziert werden.

Dennoch besteht das bereits beschriebene und vom Filterprinzip unabhängig Problem, dass die überschüssige Lauge nicht hinreichend aus dem Filterrückstand, also aus der Versatzmasse, zum textilen Filter gelangt und somit das vollständige Ausdrainieren der Salzlauge verhindert wird bzw. einen sehr lange Zeitraum in Anspruch nimmt. Um diesem Problem zu begegnen, bestehen gegenwärtig drei Lösungsansätze. So können zur Verbesserung der Drainage innerhalb des Filterkuchens Variationen im Versatzregime vorgenommen werden, wie dies teilweise bereits praktiziert wird. Das

entsprechende Versatzregime ist jedoch maßgeblich von der zeitlichen Anlieferung der jeweiligen Versatzstoffe abhängig. Aus diesem Grund kann das Versatzregime nicht immer hinsichtlich der Drainage optimiert werden. Als ein weiterer Lösungsansatz ist die Aufschüttung von Grobsalz vor dem Dammbauwerk möglich. Vorliegende Erfahrungen zeigten jedoch, dass es auch dabei zur Fließbehinderung überschüssiger Lauge durch die Versatzmasse selbst kommen kann.

Ein drittes Lösungsprinzip wird seitens des STFI in der Anwendung der Elektroosmose gesehen, welche erfolgreich zur Entwässerung von feuchten Mauern in Bauwerken sowie bei der maschinellen Schlammmentwässerung zum Einsatz kommt. Bei der Elektroosmose wird durch die Anordnung von entsprechenden Elektroden, der zu entwässernde Bereich einem elektrischen Feld ausgesetzt. Durch den Dipolcharakter des Wassers wird dieses zu einer Bewegung in Richtung der Kathode angeregt. Die Untersuchung des Elektroosmoseverfahrens hinsichtlich dessen Anwendbarkeit zur besseren Drainage der überschüssigen Lauge aus der Versatzmasse wird als sinnvoll angesehen. Diesbezüglich wäre beispielsweise eine weiterführende Zusammenarbeit mit den Partnern dieses Forschungsprojektes zielführend. Im Rahmen einer solchen Zusammenarbeit könnte auf Ergebnisse und Erfahrungen dieses Projektes unmittelbar aufgebaut werden. Auch die im zurückliegenden Forschungsprojekt realisierte Versuchseinrichtung für die Technikumsversuche könnte bei einschlägigen Versuchen zur Anwendung des Elektroosmoseverfahrens weiterführend genutzt werden.

Abbildung STFI 13: Filter wurde während der Versuchsdauer nicht von Schlamm durchsetzt

Abbildung STFI 14: Drainagewirkung blieb während der Versuchsdauer erhalten

Abbildung STFI 15: Öffnung des textilen Absperrsystems nach Versuchsende

Abbildung STFI 16: Suspension / Versatzmasse – größtenteils ausdrainiert

Abbildung STFI 17: Nur die Filterinnenseite wurde mit Schlamm benetzt

Abbildung STFI 18: Das Innere des Filters wurde nicht versetzt – Salzlauge konnte abfließen

2.3 Errichtung, Befestigung, Abdichtung (KD)

2.3.1 Arbeitspaket 1 (Analyse der Ausgangssituation)

Technologische Rahmenbedingungen für Dammbauwerke unter Tage:

Die Technologie zum untertägigen Bergversatz von Industriereststoffen wurde gemeinsam mit dem Bergbaubetreiber NDH-E analysiert und strukturiert. Im Wesentlichen kommen drei Verfahren zur Anwendung:

1. Big Bag-Versatz: Anlieferung und Silolagerung der Industriereststoffe sowie Befüllung der Big Bags über Tage; zum Teil werden die Industriereststoffe auch bereits in Big Bags verfüllt angeliefert und in einer Halle zwischengelagert; die befüllten Big Bags werden dann über die Schachtförderanlage nach unter Tage transportiert und mit spezieller Transporttechnik in die zu verfüllenden Hohlräume gestapelt
2. Anlieferung und Silolagerung der Industriereststoffe sowie Herstellung der Suspension über Tage, Versatz der Suspension per Rohrleitung nach unter Tage und Einspülen in die zur Verfüllung vorgesehenen Abbaukammern
3. Anlieferung der Industriereststoffe per Silofahrzeug über Tage, aus dem Fahrzeug werden die Industriereststoffe nach einem neuartigen, im Rahmen eines früheren ZIM-Projektes entwickelten Verfahrens direkt über eine innovative Fallleitung nach unter Tage geführt und in speziellen Silos gelagert; im folgenden Arbeitsschritt erfolgt unter Verwendung von Grubenlauge die Herstellung der Suspension nach vorgeschriebenen Rezepturen sowie das Einspülen per Rohrleitung in die zur Verfüllung vorgesehenen Abbaukammern

Für den Versatz nach Variante 1 werden keine Dammbauwerke benötigt, da die Industriereststoffe trocken eingelagert werden. Für den Versatz nach Varianten 2 und 3 müssen Dammbauwerke immer dann errichtet werden, wenn Bereiche unterhalb der zu verfüllenden Abbaustrecke einfallend verlaufen und aus technologischen Gründen (z.B. Aufrechterhalten von wichtigen Fahrstrecken, Wetterführung) freizuhalten sind. Ein entscheidendes Kriterium für die Funktionalität der Dammbauwerke ist das Drainageverhalten, da die zur Suspensionsherstellung eingesetzte Grubenlauge aus dem Versatzblock ablaufen muss. Diese Notwendigkeit begründet sich vorrangig darin, dass der Versatzblock in vorgegebenen Zeiträumen definierte Festigkeitswerte erreichen muss. Außerdem wird die ausdrainierte Grubenlauge gesammelt und aufbereitet, damit im Laugenmanagement des Bergwerksbetreibers keine übermäßigen Defizite entstehen.

Ursprüngliche Ansätze zur Errichtung der Dammbauwerke, bei denen eine Grundkonstruktion aus aufgestapelten Big Bags, die gegen das Gebirge mit Hilfskonstruktionen und Schaum abgedichtet wurden, mussten aus sicherheitstechnischen Gründen als Dauerlösung verworfen werden (siehe Abbildung KD 6). Die Dammbauwerke werden bisher als Stahlkonstruktion errichtet (siehe auch Abbildung KD 1 bis 5). Dabei wurden die Stahlträger in einer umlaufenden Nut im Gebirge unter Verwendung spezieller Baustoffe ("Sorelbeton") einbetoniert und verankert. Auf dieser Stahlkonstruktion wurden suspensionsseitig feingelochte Stahlbleche befestigt, um das Ausdrainieren der Grubenlauge zu gewährleisten. Da es immer wieder zu massiven Verstopfungen an den Lochblechen gekommen ist, die luftseitig mühsam per Hand beseitigt werden mussten,

gab es verschiedene Evolutionsschritte, um die Drainageleistung zu stabilisieren. Letztendlich behilft man sich derzeit mit einer suspensionsseitig mit hohem Aufwand vor die Lochbleche eingebrachten Schotterpackung, die dabei erzielte Wirkung kann aber allenfalls als mäßig eingestuft werden.

Technische Anforderungen an die Dammbauwerke:

In Abstimmung mit der NDH-E wurden Berechnungsunterlagen von einem Bergbau-Spezialdienstleister (Schachtbau Nordhausen GmbH) beschafft. In diesen Berechnungsunterlagen wurden drei verschiedene Belastungsszenarien für Dammbauwerke in untertägigen Kalibergwerken betrachtet und berechnet. Entsprechend der gegebenen Geheimhaltungsvereinbarungen wird in diesem Bericht auf die Darstellung von Details aus diesen umfangreichen Berechnungen verzichtet. Die Unterlagen wurden gemeinsam mit dem Bergbaubetreiber gesichtet und hinsichtlich der Relevanz für das Forschungsvorhaben ausgewertet. Die Ergebnisse wurden an die Projektpartner weitergegeben. Die Projektpartner haben die Auswirkungen auf die Entwicklung textiler Dammbauwerke kontrovers diskutiert und die Anforderungsspektren sowie die Handlungsspielräume definiert (siehe auch Ausführungen zum Punkt 2.1.2.).

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass hinsichtlich der bisher definierten Anforderungen die Leistungsfähigkeit textiler Elemente ihre Einsatzmöglichkeiten limitiert, da die berechneten maximalen Flächenlasten mit einer praxisgerechten Lösung kaum erreicht werden konnten. Da die tatsächlich an den Dammbauwerken auftretenden Kräfte nach Kenntnisstand der Projektpartner aber bisher messtechnisch nicht nachgewiesen wurden, ergibt sich hier ein Paket ungelöster Fragestellungen, die auch in den Gesprächen mit den Fachleuten der NDH-E nicht abschließend geklärt werden konnten. Unter anderem wurde ein Szenario thematisiert, nach dem eine zunehmende Ableitung der wirkenden Kräfte über den sich nach und nach verfestigenden Versatzblock direkt auf die benetzten Flächen des angrenzenden Gebirges erfolgt. Dabei sind sehr wahrscheinlich alle relevanten Bereiche (Sohle, Stoß und Firste) betroffen, allerdings in Abhängigkeit der jeweiligen standortkonkreten Hohlraumgeometrie in differenziertem Umfang.

Es wäre zu prüfen, ob im Rahmen dieses Projektes bei den unter Tage vorgesehenen Insitu-Versuchen die Möglichkeit besteht, entsprechende Messtechnik suspensionsseitig des Dammbauwerkes zu installieren. So könnten durch zusätzliche gemeinsame Aktivitäten der Projektpartner mit der Gewinnung konkreter Messdaten erste Erkenntnisse zu diesen spezifischen Rahmenbedingungen gewonnen werden. Bei der Bewertung derart gewonnener Daten ist eine umfassende Diskussion aller sicherheitstechnischen Aspekte erforderlich. Nur dann kommt für die textilen Dammbauwerke eine Erweiterung der bisher festgestellten Anwendungsoptionen im Untertagebereich in Frage. Ansonsten sind für den Einsatz textiler Dammbauwerke die

Einsatzgrenzen exakt zu definieren, um sicherheitstechnische Defizite in der Ausführung auszuschließen.

Anbindung der Dammbauwerke an das Gebirge:

Die wesentlichen Aspekte der derzeit praktizierten technischen Lösung in Stahlbauweise sind im Abbildungsverzeichnis dargestellt (**Abbildung KD 1 – KD 5**)

Die derzeit verwendeten Dammbauwerke in Stahlbauweise haben in Bezug auf die geologischen und morphologischen Rahmenbedingungen 2 entscheidende Nachteile:

- die untertägigen Hohlräume haben sehr unterschiedliche Abmessungen und Konturen. Dementsprechend ist am Übergang vom Bauwerk zum Gebirge keine vereinheitlichte Anbindung möglich. Jeder Übergang muss entsprechend der jeweiligen konkreten Standortverhältnisse individuell entwickelt und aufwändig angepasst werden.
- Die Konvergenz des Gebirges erfordert eigentlich über die gesamte Nutzungsdauer eine ausreichende Flexibilität des Bauwerkes entlang der gesamten Außenkontur. In reiner Stahlbauweise ist das praktisch nicht möglich. Die damit derzeit zwangsläufig entstehenden Druckspannungen bergen potentiell die Gefahr des Versagens.

Dieses Szenario ist schon mehrfach aufgetreten, die dadurch hervorgerufenen Schäden waren beträchtlich. Die Ausführung der Dammbauwerke auf Big Bag-Basis (**Abbildung KD 6**) wäre hinsichtlich der Flexibilität gegenüber den Bewegungen des Gebirges weniger kritisch zu bewerten. Diese Variante weist aber andere, sicherheitstechnisch gravierende Mängel auf, die mit vertretbarem Aufwand nicht zu beherrschen sind. Deshalb wird diese Form der Abdichtung für diese Aufgabenstellung nicht angewendet.

Auch unter dem Aspekt der Anforderungen hinsichtlich der Anbindung an das Gebirge bestätigt sich somit der dringende Bedarf für einen neuen Lösungsansatz, der im Rahmen dieses Projekt entwickelt werden soll.

2.3.2 Arbeitspaket 2 (Entwicklung der Befestigungs- und Dichtungstechnologie für die Anbindung eines textilen Dammbauwerkes an das Gebirge)

Die konkrete Ausführung der Anbindung und Abdichtung des textilen Dammbauwerkes an das Gebirge soll nach der im Punkt 2.1.2 beschriebenen und dort in Abbildung TUC 3 detailliert dargestellten, speziell für diese Aufgabenstellung entwickelten Methodik realisiert werden. Zur Befestigung der verschiedenen Bauteile können folgende, durch den Bergbaubetreiber in großem Umfang unter Tage eingesetzte Technologien angewendet werden:

- Spreizhülsenanker für hohe Belastungen
- Mörtelanker, Klebeanker und handelsübliche Dübel für geringere Belastungen

Da diese Befestigungstechnologien im Salzbergbau unter Tage Stand der Technik darstellen, universell an praktisch allen potentiellen Standorten eingesetzt werden können und mit im Bergbaueinsatz bewährten Materialien mit genormten Belastungskennziffern ausgeführt werden, wird an dieser Stelle auf eine weiterführende Beschreibung verzichtet.

Zur Bewertung der Belastungskenndaten der verschiedenen Ausführungen von Spreizhülsenankern wurden Produktdatenblätter zusammengestellt und den Projektpartnern übergeben. Bestandteil dieser Datensammlung waren auch die Leistungsangaben zu einem Ankerbohrwagen vom Typ AB 3-DE der BTZ Dietlas GmbH, mit dem die Befestigung der Spreizhülsenanker in das Gebirge ausgeführt wird. Mit diesen Kenndaten verfügen die Projektpartner über alle Angaben, die diesbezüglich für die Entwicklung, Dimensionierung und Ausführung eines textilen Dammbauwerkes benötigt werden.

Für die Anbindung des textilen Dammbauwerkes an das Gebirge entsprechend der in Punkt 2.1.2 dargestellten Ausführung ist es erforderlich, in der Hohlraumkontur umlaufend eine entsprechend geglättete Kontur einzubringen. Die Herstellung entsprechend ausgeformter und egalisierter Anbindungsflächen kann mit einer Firstenfräse erfolgen. Ein solches Arbeitsgerät ist beim Bergbaubetreiber unter Tage problemlos verfügbar, da es gemeinsam mit einer Beraubemaschine für die Herstellung und Aufrechterhaltung der Firstsicherheit permanent vorgehalten wird.

Im Vergleich zu den extrem tief herauszuarbeitenden umlaufenden Nuten, die für die Aufnahme und Anbindung der Metallträger der aktuell eingesetzten Dammbauwerke hergestellt werden müssen, liegt der Aufwand für die neu entwickelte Variante nur bei einem Bruchteil des bisherigen Leistungsumfanges. Verstärkt wird dieser Effekt noch durch die Tatsache, dass sowohl das Einbetonieren mit Sorelbeton auf der Sohle als auch das Einschäumen der seitlichen Abdichtungsbleche nicht mehr erforderlich sind.

Im Rahmen der Bearbeitung dieses Arbeitspaketes wurde noch eine weitere Option betrachtet, die nach dem Prinzip selbstabdichtendes "Schleppnetz" arbeitet. Eine solche Lösung bringt aber neue komplexe Anforderungen an die Gesamtkonzeption der textilen Dammbauwerke mit sich, da völlig andere Flächenstrukturen mit besonderen, von bisher betrachteten Ausführungsversionen grundsätzlich abweichender Gestaltung benötigt werden würden. Aus diesem Grund wurde diese Variante vorerst zurückgestellt.

Eine weitere Konkretisierung der Abdichtungstechnologie kann erst erfolgen, wenn die genaue Struktur der zu entwickelnden textilen Filter mit allen funktionalen Differenzierungen feststeht.

2.3.3 Arbeitspaket 3 (Entwicklung und Fertigung von spezifischen Teilkomponenten für den Laborversuchstand und technische Betreuung der Versuche)

In Abstimmung mit der K-UTEC und den anderen Projektpartnern wurden die Anforderungen an die technische Ausstattung und die Realisierung der Laborversuche definiert und umgesetzt. Die detaillierte Ausführung ist im Punkt 2.4 beschrieben.

2.3.4 Arbeitspaket 4 (Entwicklung und Fertigung von spezifischen Teilkomponenten für die Versuche im Technikum, technische Betreuung der Versuche)

In intensiver Abstimmung mit der K-UTEC und den anderen Projektpartnern wurde ein Versuchsstand konzipiert, der die in den Laborversuchen gewonnenen Erkenntnisse vollumfänglich berücksichtigt und ein breites Spektrum verschiedener Untersuchungen ermöglicht. Folgende Anforderungen wurden in der Konstruktion und der Fertigung zugrunde gelegt.

- Konstruktion und Fertigung des Versuchsstandes erfolgen bei KS Stahl, Ausführung und Abmessungen sind so zu gestalten, dass einerseits ein unproblematischer Transport in die Technikumsräume der K-UTEC möglich ist und andererseits die Probenvolumina so groß gewählt werden können, dass eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse und Beobachtungen auf die Insitu-Versuche gegeben ist
- der Versuchsstand ist zweizügig zu gestalten, um unterschiedliche Versuchsanordnungen parallel fahren zu können
- die Materialauswahl soll die ungehinderte Betrachtung der Versuchsabläufe ermöglichen
- die Neigung der beiden Rohrabschnitte soll stufenlos und unabhängig voneinander einstellbar sein
- sowohl die Suspension als auch das Filtermaterial sollen unkompliziert gewechselt werden können
- eine weitere Nutzung über die zeitlichen Grenzen des Arbeitspaketes hinaus ist zu gewährleisten, um zusätzliche begleitende Untersuchungen zu den Insitu-Versuchen und zu weiteren Versuchs- und Demonstrationszwecken auch über das Projektende hinaus zu ermöglichen.

Die erfolgreiche Umsetzung dieser Vorgaben wird mit **Abbildungen KD 7 - 9** illustriert:

2.3.5 Arbeitspaket 5 (Technologische Vorbereitung von großmaßstäblichen In-Situ-Versuchen)

Stand der Vorleistungen bis zur Erstellung des Zwischenberichtes:

Die Herstellung und Nutzung von geneigten Rolllöchern für die Versuche erweist sich nach derzeitigem Kenntnisstand als ausgesprochen problematisch: Eine solche Ausführung eines Versuchsfeldes für die In-situ-Versuche muss nach intensiver Diskussion mit dem Bergbaupartner vorerst verworfen werden, da für den Einsatz der Rolllochbohrmaschine im betreffenden Abbaufeld bisher keine geeigneten Standorte gefunden werden konnten. Als Alternative wurde ein ehemaliger Abbaubereich ermittelt, der für die Durchführung der Versuche sowohl in bergbautechnologischer als auch logistischer Hinsicht gute Voraussetzungen bietet. Die Schemata der geplanten In-situ-Versuche muss auf die großformatigeren Bedingungen angepasst werden, nach derzeitigem Stand sollte das ohne größere Konflikte realisierbar sein. Der Bergwerksbetreiber hat seine Zustimmung bereits signalisiert.

Weitere Entwicklung nach Erstellung des Zwischenberichtes:

Während dieser Arbeiten wurde der ausgewählte Abbaubereich durch einen unkontrollierten Laugenzutritt für die Versuchsdurchführung dauerhaft unbrauchbar, der ursprünglich geplante Versuchsstandort im Bergwerksfeld Sollstedt musste komplett verworfen werden. Schnellstmöglich wurde mit dem Bergwerksbetreiber nach alternativen Standorten gesucht. Da die laufenden Versatzarbeiten einerseits durch die Versuche nicht beeinträchtigt werden dürfen und andererseits während der Versuchsdurchführung der dauerhafte Zugriff auf die Suspension in Reichweite des Versuchsstandortes gewährleistet sein musste, gestaltete sich die Suche sehr zeitaufwendig. Nur durch die ausgesprochen konstruktive Zusammenarbeit des Bergwerksbetreibers mit den Projektpartnern war es möglich, im Bergwerksfeld Bleicherode einen Ersatzstandort ausfindig zu machen, der die erforderlichen Voraussetzungen erfüllte.

Die Errichtung und Nutzung von Rolllöchern für die In-situ-Versuche kam auch an diesem Standort nicht in Frage. Deshalb wurde die Versuchskonzeption in Abstimmung mit den Projektpartnern entsprechend modifiziert. Unter Berücksichtigung der Vorgaben des Bergbaubetreibers entwickelte KD eine auf die Rahmenbedingungen am neuen Versuchsstandort zugeschnittene Lösung, die den bergbautechnologischen und sicherheitstechnischen Anforderungen entsprach. Zielstellung auch für diesen technischen Ansatz blieb die grundsätzliche Übertragbarkeit auf die Bandbreite aller in Frage kommenden Anwendungen beim untertägigen Spülversatz von Industriestoffen in ehemaligen Kaligruben. Im Ergebnis entstand für die In-situ-Versuche eine

Kombination aus großformatigem Rohr und offenem Versatzbecken. Mit dieser Ausführung sollten einerseits Analogiebetrachtungen zu den Versuchsergebnissen im Technikum möglich sein und andererseits auch die Auswirkungen der Kontaktflächen zwischen Versatzkörper und Gebirge unmittelbar betrachtet werden können. Diese Konzeption ist in der Anlage KD1 (3D-Zeichnungen zur Gestaltung der Versuchsanlage uT) dargestellt und wurde auch so umgesetzt.

Für diese grundlegend veränderte Versuchskonzeption musste eine neue Befestigungs- und Abdichtungstechnologie entworfen werden. Auch hierbei wurde großer Wert auf die universelle Anwendbarkeit gelegt. Im Ergebnis wurde die unmittelbare Anbindung des Filtertextils und des Gurtbandnetzes an das Gebirge verworfen. Unter Berücksichtigung der parallelen, aber vom ZIM-Projekt völlig unabhängigen Untersuchungen des Bergbaubetreibers zum Einsatz von gemauerten Dammbauwerken (siehe auch Ausführungen im Punkt 2.3.1 wurde von KD ein neuartiges System zum Spannen und Abdichten entwickelt. Basis ist eine vergleichsweise leichte metallrahmenbasierte Konstruktion. Das Einbinden und Abdichten des Filtertextils sowie das Spannen des Gurtbandnetzes erfolgt kombiniert in einem Rohr-Rollen-System (**Siehe Abbildung TUC 26 bis 32**). Eine solche Ausführung bietet mehrere grundlegende Vorteile:

- sie kann mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand an unterschiedliche Systeme angebunden werden, der erste Nachweis dafür liegt bereits im Versuchsaufbau, wo dieses System sowohl im großformatigen Rohr als auch für das offene Becken eingesetzt werden konnte
- die Größe der Konstruktion kann standardisiert und auf die Transportmöglichkeiten unter Tage ausgerichtet werden, was wiederum einen hohen Anteil an (Vor-)Fertigungsleistungen über Tage und somit eine enorme Kostenersparnis ermöglicht
- die Anpassung der Formate des Filtertextils und des Gurtbandnetzes an die willkürlichen Geometrien der zu verfüllenden Abbaustrecken wäre nur mit außerordentlich hohem Aufwand möglich gewesen, mit dem neuentwickelten Lösungsansatz können vordefinierte Größen kostengünstig gefertigt und unkompliziert eingesetzt werden
- die durch den u.U. sehr hohen statischen Druck der eingespülten Suspension gegebene Limitierung der Einsatzmöglichkeiten von Filtertextil und Gurtbandnetz kann im Einzelfall durch geeignete zusätzliche technische Maßnahmen abgemindert werden, hier sind weitere Untersuchungen zu Ausführungsoptionen und mögliche Gefährdungspotentiale erforderlich.

Der Entwurf dieses Systems wurde der TUC und dem STFI vorgetragen. Gemeinsam wurden die Funktionalität und die Machbarkeit hinsichtlich der Einbindung von Filtertextil und Gurtbandnetz geprüft. Im Ergebnis wurde die Entscheidung getroffen, das System so zu entwickeln und umzusetzen. Wesentlicher Bestandteil war die genaue Definition der Schnittstellen. Konstruktion und Fertigung des Stahlbaus wurden von KD eingeleitet, die Auslegung und Ausfertigung für Filtertextil und Gurtbandnetz wurden von der TUC und dem STFI realisiert.

Abbildung KD 30: Übersichtszeichnung

2.3.6 Arbeitspaket 6 (Technische Vorbereitung von großmaßstäblichen In-Situ-Versuchen)

Konstruktion, Fertigung und Vormontage

Bei der Konstruktion der Einzelkomponenten des Versuchsstandes (Rohrteile, Spannrahmen, Träger) war die Größe des Förderkorbes des Bergbautreibers maßgeblich, um einerseits Fertigung, Oberflächenbeschichtung und Vormontage über Tage zu gewährleisten und andererseits den Transport nach unter Tage im vormontierten Zustand zu ermöglichen. Die Vorgabe für die maximale Größe der Einzelkomponenten lag dementsprechend für diesen Bergwerksstandort bei (3 x 2 x 3)m.

Die Konstruktion, die Fertigung der Einzelbaugruppen und die Vormontage erfolgten bei der KD-Stahl und Maschinenbau GmbH in Breitenworbis.

Montage Filtermaterial

Nach der Fertigung der Einzelbaugruppen und der Vormontage erfolgten die Befestigung des Filtermaterials und das Bespannen mit dem Gurtbandnetz.

Diese Arbeitsschritte wurden gemeinsam mit dem STFI und der TUC in den Werkstätten von KD in Bernterode ausgeführt.

Abbildung KD 10: Auflegen Filtermaterial / Gurtbandnetz

Abbildung KD 11: Spannen des Gurtbandnetzes

Um das Gurtbandnetz zu spannen werden die gegenüberliegenden Spannröhre gleichmäßig gedreht und das Gurtbandnetz mit einer Vorspannung versehen. Nach dem Spannen wurden die Röhre in ihrer Position gesichert.

Abbildung KD 12: Anpressen des Filtermaterials

Nach dem Spannen des Gurtbandnetzes wurde das Filtermaterial mit den Pressrohren auf den Grundrahmen gedrückt. Ein Verrutschen des Filtermaterials wird somit unterbunden.

Transport und Montage unter Tage

Der Transport nach unter Tage erfolgt über die Schachtröhre. Hierbei wurden die Einzelkomponenten je nach Größe auf die Bühne des Fördergefäßes gestellt oder unter das Fördergefäß gehangen. Vom Füllort wurden die Bauteile mit geeigneten Transportfahrzeugen an den Standort der Versuchsanlage gebracht. Der Aufbau des Versuchsstandes mit beiden geplanten Versuchsstrecken wurde gemäß der für dieses Vorhaben entwickelten Montagetechnologie und unter Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften realisiert.

Für die Montage im Untertagebereich waren besondere Sicherheitsmaßnahmen nachzuweisen. Jeder Monteur muss eine entsprechende ärztliche Bescheinigung sowie alle notwendigen Einweisungen und Belehrungen zum Arbeiten in der Grube vorweisen können. Da die Montage des Versuchsstandes an einem Spülpunkt erfolgte und es hier zu Ausgasungen nach dem normalen Spülvorgang kommen kann, ist eine Gasfreimessung vor jeder Schicht und 2mal während der Schicht erforderlich gewesen.

Abbildung KD 13: Kompletter Versuchsstand vor der Bespülung (Austragsseite)

Abbildung KD 14: Kompletter Versuchsstand vor der Bespülung (Einspülseite)

Suspensionslogistik

Im laufenden Produktionsprozess bei der NDH-E werden in diesem Bergwerksfeld ca. 200m³ Suspension pro Stunde versetzt. Um den Versuchsstand mit Suspension befüllen zu können war es notwendig, in die vorhandene Spülleitung DN150 einen Bypass mit regelbarem Handschieber zu integrieren. Somit konnten im laufenden Produktionsprozess zeitunabhängig geregelte Mengen an Suspension in den Versuchstand geleitet werden, ohne die Produktion unterbrechen zu müssen. Mit der Umsetzung dieser Maßnahmen waren hinsichtlich der Suspensionslogistik die Voraussetzungen für den geplanten Versuchsablauf geschaffen.

Abbildung KD 15: Suspensionshauptleitung mit Abzweig zum Standort der Versuchsanlage

Abbildung KD 16: Bypassleitung zum Standort der Versuchsanlage

Im Zuge von laufenden Spülversatzarbeiten im weiteren Umfeld der Versuchsanlage kam es zu einem unkontrollierten Ausbruch von Suspension in die ehemaligen Abbaubereiche der darunter liegende Sohle. Um die weitere Ausdehnung des Havariebereiches zu verhindern, musste operativ ein Zugang zu zwei Rollöchern in der Abbaustrecke unterhalb des aufgebauten Versuchsstandes geschaffen werden, der auch für Großgeräte befahrbar war. Es blieb keine andere Möglichkeit als die Versuchsstrecke 2 (Textiler Damm mit offenem Becken) zu demontieren.

Die Situation im Havariebereich machte laufende Kontrollen erforderlich, um weitere unkontrollierte Zutritte zu vermeiden bzw. ggf. kurzfristig geeignete Maßnahmen zur Gefahrenabwehr einleiten zu können. Deshalb war es während der Versuchsdurchführung nicht möglich, das offene Becken wieder herzustellen. Die Durchführung der Versuche war dadurch zwangsläufig auf die Versuchsstrecke 1 im Rohr beschränkt.

Abbildung KD 17: Reduzierter Versuchsstand mit Umfahrung für Großgeräte

2.3.7 Arbeitspaket 7 (Technische Betreuung der In-Situ-Versuche unter Tage)

Nach dem Aufbau der Versuchsanlage erfolgte eine Sicht- und Funktionsprüfung der Einzelkomponenten. Diese Prüfung wurde nach Demontage der Versuchsstrecke 2 und der entsprechenden Maßnahmen zur Sicherung der Standfestigkeit und Funktionalität der Versuchsstrecke 1 wiederholt. Im Anschluss wurde die Versuchsanlage in Abstimmung mit dem Bergwerksbetreiber zur Beseelung freigegeben und ein ordnungsgemäßes und realitätsbezogenes Spülregime festgelegt.

Danach wurde der Versuchsaufbau mit einem Suspensionsmenge von ca. 20m³/h befüllt. Um ein realistisches Szenario zu simulieren, ist die Suspension in mehreren Spülungen in den Versuchsstand eingebracht worden. Der Zuwachs an Füllstandshöhe betrug bei jeder Beseelung ca. 30 cm. Die Intervalle zwischen den einzelnen Spülvorgängen betragen ca. 2-3 Wochen, um der Drainage der Laugenanteile in der Suspension ausreichend Zeit einzuräumen. Diese Versuchsabfolge wurde eingehalten bis das Rohr vollständig gefüllt war.

Abbildung KD 18: Befüllen des Versuchsstandes

Abbildung KD 19: Zwischenfüllstand

Abbildung KD 20: Befüllung des Versuchsstandes I

Zu Beginn einer jeden Befüllung wurden die feinen Feststoffanteile der Suspension nicht komplett gefiltert. Aber bereits nach ca. 5 min hatte sich der Filterkuchen jeweils soweit gebildet und stabilisiert, dass fast keine sichtbaren Schwebstoffe mehr aus dem Filtertuch ausdrainiert sind (siehe auch Analysen K-UTEK).

Abbildung KD 21: Versuchsstand während der Drainage

2.3.8 Arbeitspaket 8 (Analyse der Leistungsfähigkeit des Befestigungs- und Dichtungssystems)

Zum Abschluss der Versuche wurde nach einer Wartezeit von ca. 6 Wochen am Versuchsstand ein großes Feld des Filtermaterials und des Gurtbandnetzes herausgetrennt und dem STFi und der TUC zur weiteren Untersuchung und Auswertung zur

Verfügung gestellt. Für die Untersuchung der Zusammensetzung der im Rohr verbliebenen Suspension wurden für die K-UTEC Proben entnommen.

Die Abbildung **KD 22 Füllstand vor dem Öffnen des Filtertextils** entstand unmittelbar vor dem Öffnen des Filtertextils. Sehr gut zu erkennen ist an der oberen inneren Rohrwölbung der max. Füllstand (entspricht der Höhe der Oberkante des hinteren Verschlussbleches). Im Vergleich zum aktuellen Füllstand auf dem Bild kann das Differenzvolumen visuell gut abgeschätzt werden. Dieses Differenzvolumen entspricht der Menge der ausdrainierten Lauge (mit geringfügigem Feststoffanteil jeweils zu Beginn der Füllung).

Abbildung KD 22: Füllstand vor Öffnen des Filtertextils

Abbildung KD 23: Öffnen des Filtermaterials

Abbildung KD 24: Demontage Gurtbandnetz Filtermaterial

Abbildung KD 25: Versuchsanlage nach der Entnahme Gurtbandnetz und Filtermaterial

Abbildung KD 26: Probenentnahme von Material aus dem Suspensionsblock

Es konnte beobachtet werden, dass der Versatzkörper nicht vollständig ausgehärtet war und noch überschüssige Lauge enthielt. Verantwortlich hierfür ist eine zu geringe Drainage. Im Vergleich zu den im Technikum erzielten Ergebnissen, bei denen die Drainage als ausreichend eingestuft werden konnte, war hierfür das deutlich größere Versatzvolumen verantwortlich. Ein weiterer wesentlicher Aspekt war die im Versuchsaufbau u.T. fehlende Drainage zur Sohle und in die Stöße hinein. Dieser Effekt ließ sich im Stahlrohr nicht simulieren. Der ursprünglich geplante parallele Versuchsaufbau im freien Becken hätte hier weitere Erkenntnisse bringen können. Die unerwartete Havarie im angrenzenden Bergwerksfeld, die den dauerhaften Rückbau noch vor der ersten Befüllung erforderlich machte, verhinderte leider entsprechende Untersuchungen.

Intensive Bemusterungen der Versuchsanlage während und nach der Durchführung der Versuche ergaben keine Auffälligkeiten. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Stahlbaugrundkonstruktion und der Stahlbau des Spannrahmens haben den auftretenden Belastungen problemlos standgehalten
- die Spannvorrichtung hielt das Gurtbandnetz zuverlässig und gleichmäßig unter Spannung, die konstruktiv bedingte Winkelführung der Spannenden des Gurtbandnetzes beeinträchtigte deren Haltbarkeit nicht nachteilig
- Die Pressrohre hielten das Filtertextil zuverlässig in der vorgegebenen Position, die Fixierung war gleichmäßig und änderte sich auch mit zunehmenden Druckaufbau durch den steigenden Suspensionsspiegel nicht; auch die besonders

kritischen Stellen am Filtertextil (z.B. an den durchgestoßenen Gewindestäben für die Befestigung der Pressrohrschellen) wiesen keinerlei Einrisse auf

- dementsprechend war auch die Abdichtung des Filtertextils gegenüber dem Spannrahmen uneingeschränkt gewährleistet, es gab in diesem Bereich während des gesamten Versuchszeitraums keine unkontrollierten Laugen- oder Suspensionsaustritte

Insgesamt hat die konzipierte Versuchsanlage eindrucksvoll ihre Funktionalität und Belastbarkeit nachgewiesen. Für einen kommerziellen Einsatz sind aber weitere Untersuchungen erforderlich, ohne die eine Zulassung für den Einsatz im Versatzbetrieb unter Tage nicht möglich ist. Eine enge Abstimmung mit dem Bergbaubetreiber und dem zuständigen Landesbergamt ist dafür Grundvoraussetzung.

Abbildung KD 27: Bemusterung Stahlbau

Abbildung KD 28: Bemusterung Spannen und Abdichten

Neuerdings erprobt die NDH-E Dammbauwerke, die als gemauerte Wand mit Drainagefenstern errichtet werden. Suspensionsseitig wird dabei zur Vermeidung von Verstopfungen über den gesamten Abbauquerschnitt auf bis zu 50 Metern Länge (!) ein Haufwerk aus groben Steinsalzbrocken aufgeschüttet, die vorher aufwendig gewonnen und aufbereitet werden müssen. Erste Erkenntnisse über Funktionalität und Leistungsfähigkeit einer solchen Konstruktion zeigen nach aktueller Rückfrage beim Bergbaubetreiber, dass Damm und Steinsalzschüttung im Versatzbetrieb stabil sind. Allerdings bleibt die grundsätzliche Problematik bestehen. Der sich bildende Filterkuchen wird oft so stark verdichtet, dass eine ausreichende und stabile Drainage nur an der Oberfläche des Suspensionsblockes erfolgt. Die vollständige Drainage muss auch hier durch manuelles Nacharbeiten unterstützt werden.

Der enorme Aufwand, der auch bei dieser Variante vom Bergbaubetreiber realisiert werden muss und die dabei bzgl. der Drainage ebenso auftretenden Probleme zeigen, dass auch bei dieser Variante noch Handlungsbedarf besteht. Eine mögliche Lösung dieser Probleme und vor allem die Kombination mit dem im Projekt erarbeiteten textilen Dammbauwerk ist in Kapitel 2.1.8 beschrieben.

Abbildung KD 29: Gemauerte Wand mit Drainagefenstern

2.3.9 Arbeitspaket 9 (Zusammenfassung und Dokumentation der erzielten Ergebnisse und Erstellung des Abschlussberichtes)

siehe Punkte 2.1.8 der TUC, 2.2.8 des STFI und 2.4.8 der K-UTEC (Evaluierung der Ergebnisse)

2.4 Geologie, Mineralogie und Verfahrenstechnik (K-UTEC)

2.4.1 Arbeitspaket 1 (Anforderungsermittlung)

Anhand der von der TUC konzipierten Anforderungsliste wurden die versatzrelevanten Standortfaktoren durch den Bergwerksbetreiber und K-UTEC zusammengetragen. In der Liste finden sich Angaben zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit unter Tage sowie zur chemischen Zusammensetzung des Wirtsgesteins im Bergwerksgebiet Sollstedt.

Die Parameter der im Bereich Sollstedt eingesetzten Spülversatzsuspension (chemische Zusammensetzung, Dichte etc.) wurden der aktuellen, von K-UTEC auf Bergbautauglichkeit geprüften Rezeptur entnommen. Die Angaben zum Versatzregime stammen vom Bergwerksbetreiber.

Zum Vergleich wurde hierzu die im Labor der K-UTEC ermittelte Zusammensetzung der Ablaflösung aus der Spülversatzsuspension angegeben. Das tatsächlich anfallende Filtrat an den derzeit eingesetzten Filterbauwerken schwankt nach Angaben des Bergwerksbetreibers in der Qualität, die u. a. vom Versatzregime abhängig ist. Als Vorgabe wurde schließlich ein klares Filtrat in die Anforderungsliste aufgenommen.

Der Insituversuch (AP7) wurde letztendlich im Bergwerksbereich Bleicherode durchgeführt. Für diesen Bereich wurde eine separate Anforderungsliste aufgestellt, um die Messdaten des Insituversuches vergleichen zu können. Darin aufgeführt sind v. a. Daten bezüglich der Suspensionseigenschaften, welche dem von K-UTEC erstellten Gutachten zur aktuellen Spülversatzrezeptur für das Bergwerk Bleicherode entnommen wurden.

Anhang Anforderungsliste für den Bergwerksbereich Bleicherode (siehe Ende Kapitel 5 Abbildungen K-UTEC im Abbildungsverzeichnis)

2.4.2 Arbeitspaket 2 (Modellentwicklung, Umgebung)

Nach Literatur- und Internetrecherchen steht eine Vielzahl von Injektionsmedien für Anwendungen im Salzgestein zur Verfügung. Produkte verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Eigenschaften werden seit Jahren erfolgreich z. B. bei der Ertüchtigung von Streckenverschlüssen unter Tage eingesetzt, darunter auch der von K-UTEC entwickelte Injektionsmörtel IM 4.

Bei dem von der TUC aufgestellten Konzept zur Befestigung des textilen Absperrsystems am Gebirge ist der Einsatz von Injektionsmedien nicht vorgesehen. Es wurde von allen Partnern eingeschätzt, dass das textile Absperrsystem für den Einsatz im Salzgestein aus möglichst wenigen unterschiedlichen Materialien aufgebaut sein sollte, um einerseits die Verträglichkeit der Materialien untereinander als auch die möglichst universelle Anwendbarkeit des zu entwickelnden Filtersystems zu gewährleisten.

Aus diesen Gründen wurden zunächst keine Laborversuche mit Injektionsmedien unternommen. Sollte sich im Rahmen der in-situ-Versuche die Notwendigkeit einer Abdichtung des textilen Filters gegen das Gebirge durch Injektionsmedien ergeben, ist der Einsatz von erprobten, wirtsgesteinsspezifischen Produkten auch kurzfristig möglich.

2.4.3 Arbeitspaket 3 (Laborversuche)

Beständigkeitsversuche:

Um die chemische Beständigkeit der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Textilien in Kontakt mit Lauge bzw. Versatzsuspension zu testen, wurden im Labor der K-UTEC entsprechende Versuche durchgeführt. Verschiedene Seile sowie Gurtbänder und -netze der TUC und unterschiedliche Filtertextilien des STFI wurden in Eimer mit Lauge (Zusammensetzung lt. Angaben in der Anforderungsliste, AP1) sowie einer beispielhaften Versatzsuspension nach derzeit gültiger Rezeptur für den Spülversatz im Bergwerk Sollstedt (siehe Anforderungsliste) eingelegt. Nach drei Monaten wurden die ersten Proben entnommen und durch die TUC und das STFI auf qualitative Veränderungen untersucht. Weitere Proben wurden nach sechs bzw. zwölf Monaten Lagerung in den Test-Lösungen entnommen und entsprechend durch die Projektpartner geprüft.

Filterversuche:

Die vom STFI zur Verfügung gestellten Filtertextilien (Filtervlies und Abstandsgewirke unterschiedlicher Qualität) wurden im Labor der K-UTEC auf ihre Filterwirkung gegenüber Lauge und Versatzsuspension getestet. Abbildung K-UTEC 1 zeigt den Laborversuchsstand aus einem faserverstärkten Kunststoffrohr, einem Siebboden als Filterhalterung und einem Eimer zum Auffangen des Filtrates. Es wurde pro Versuch jeweils ein Liter Lauge bzw. Suspension auf den Filter gegeben.

Abbildung K-UTEC 1: Laborversuchsstand für Filterversuche

Die feinporigen Filtervliese haben eine hohe Filterwirkung gezeigt. Allerdings verfügten sie teilweise eine schlechte Benetzbarkeit, was den Durchfluss der Fluide stark hemmt. Außerdem erschien die Haltbarkeit der Filtervliese (auch in den Beständigkeitsversuchen) relativ gering.

Im Folgenden wurden die Filterversuche mit den Abstandsgewirken fortgesetzt. Bei diesen ist die Filterwirkung initial geringer als bei den Filtervliesen, so dass nach Aufgabe von Versatzsuspension auf den Filter zunächst auch Partikel bis ca. 100 µm durchgelassen werden. Es bildet sich jedoch sehr schnell (max. 30 min.) ein Filterkuchen aus, der den weiteren Durchlass sichtbarer Partikel hemmt und das Filtrat somit aus klarer Lauge besteht.

Abbildung K-UTEC 2: gewonnenes Filtrat (links: nach 15 min., rechts nach 30 min.)

Wird der gleiche Filter (nach mechanischem Entfernen des oberflächlichen Filterkuchens) erneut beaufschlagt, so wirken die innerhalb des Abstandsgewirkes verfestigten Partikel der Versatzsuspension weiterhin als Filterkuchen. Ist die innerhalb des Abstandsgewirkes verbliebene Versatzmasse bereits vollständig getrocknet, ist die Filtergeschwindigkeit bei wiederholter Beaufschlagung allerdings deutlich verlangsamt. Durch eine Spülung des Filtergewirkes mit Lauge lässt sich dieser Effekt jedoch wieder mildern. Zudem sind eine vollständige Benetzung des Filters mit Suspension und eine darauffolgende mehrfache Beaufschlagung, wie hier im Versuch durchgeführt, beim Versatz unter Tage nicht gegeben.

Diese dargestellten Ergebnisse bestätigten sich beim Test eines sehr grobmaschigen Abstandsgewirkes, das zunächst fast die gesamte Suspension durchfließen ließ, jedoch ebenfalls sehr schnell durch den entstehenden Filterkuchen abgedichtet wurde und schließlich klares Filtrat abgab.

2.4.4 Arbeitspaket 4 (Technikumsversuche)

Der Technikumsversuchsstand wurde vom Projektpartner KD konzipiert und gebaut und zur Durchführung der Filtertests im Labor der K-UTEC aufgebaut.

Für den ersten Test wurden die beiden parallelen Rohre in unterschiedlichen Winkeln festgestellt, am Ausgang mit einem engmaschigen Abstandsgewirke bespannt und mit Versatzsuspension befüllt (Versuch 1: 15° und ca. 45 l Suspension; Versuch 2: 5° und ca. 18 l Suspension). Auch bei diesen Versuchen zeigte sich ein schneller Aufbau eines Filterkuchens, so dass nach spätestens 30 min. nur noch klare Lauge filtrierte. Die Drainage der eingefüllten Versatzsuspension wurde über vier Wochen beobachtet, beim Versuch mit 5° Neigung und geringerer Befüllung wurde nach einer Woche noch einmal Suspension nachgefüllt. Abbildung K-UTEC 3 zeigt die Menge des aufgefangenen Filtrates über die Zeit des Versuchsverlaufes. Dabei fällt auf, dass die Drainage nach Aufgabe der zweiten Portion Suspension ähnlich der bei der ersten Beaufschlagung ist.

Abbildung K-UTEC 3: zeitlicher Verlauf des Technikumsversuches 2

Die Ergebnisse dieser Versuche unterscheiden sich prinzipiell nicht von den im Labormaßstab ausgeführten Versuchen. Auch hier war zu beobachten, dass in den ersten 30 Minuten nach Aufgabe der Suspension eine geringe Menge sichtbarer Partikel durch den Filter wandern konnten. Danach hatte der sich bildende Filterkuchen offensichtlich bereits die größten Poren des Abstandsgewirkes verstopft, so dass das Filtrat aus klarer Lauge bestand. Auch nach einer weiteren Aufgabe von Suspension bei Ver-

such 2 kam es nur zur Drainage von klarer Lauge. Damit zeigt sich das getestete Abstandsgewirke auch bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen als geeigneter und dauerhafter Filter für Spülversatzsuspensionen. Nachdem im Versuch 1 ein Abstandsgewirke mit feiner Maschenweite zum Einsatz kam, wurde im Versuch 3 ein Gewirke mit mittlerer Maschenweite gewählt. Wie zuvor kam es auch zunächst zu einem starken Durchsatz auch größerer Partikel durch den Filter, der jedoch nach etwa 15 Minuten endete, als sich ein Filterkuchen aufzubauen begann. Anschließend drainierte nur noch klare Lauge aus dem Filter. Bei diesem Versuch 3 war die Filtriergeschwindigkeit (aufgefangenes Filtrat pro Zeiteinheit) initial höher als bei Versuch 1, glich sich jedoch nach rund 40 Stunden weitgehend an. Bei beiden Versuchen kam es nach etwa 24 Stunden Versuchsdauer zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Filtriergeschwindigkeit, die bei Versuch 1 deutlicher ausfiel als bei Versuch 3.

Abbildung K-UTEC 4: Filtrat Technikumsversuch 3 (links: nach 15 min., rechts: nach 30 min.)

Abbildung K-UTEC 5: Technikumsversuch 3 bei Beginn

Abbildung K-UTEC 6: Technikumsversuch 3 nach ca. 5 Stunden

Abbildung K-UTEC 7: Technikumsversuch 3 nach 4 Wochen

Ausgehend von den Erkenntnissen des Großversuches (AP7) wurden bei K-UTEC noch zwei weitere Versuche mit dem Technikumsversuchsstand durchgeführt. Dabei kam ein Abstandsgewirke mit zwei unterschiedlichen Maschenweiten auf Vorder- und Rückseite zum Einsatz (Versuch 4), wie es ursprünglich für den zweiten Teil des Großversuches eingeplant war (siehe AP5). Für den Versuch 5 wurde das gleiche Gewirke mit einem eingearbeiteten, perforierten Schlauch zum Spülen des Filters während des Versuches eingesetzt. Die Versuche wurden wie schon zuvor mit 15° Neigung der Versuchsrohre und einer Befüllung mit rund 45 l Suspension durchgeführt. Die Filtrierwirkung im Versuch 4 (mit zweiseitigem Gewirke) unterschied sich nicht wesentlich von den Ergebnissen der vorherigen Versuche. Nachdem zunächst auch gröbere Partikel die Filter passierten, drainierte nach 30 Minuten Versuchsdauer nur noch klare Lauge. Auch hier kam es offenbar nach rund 24 Stunden Versuchsdauer zu einem Zusammenrutschen bzw. einer Rissbildung innerhalb der Versatzmasse, so dass eine größere Menge Lauge in kurzer Zeit abdrainieren konnte. Danach ging die Filtriergeschwindigkeit wieder deutlich zurück. Beim Versuch 5 wurde der Filter mit den auf Vorder- und Rückseite unterschiedlichen Maschenweiten – nachdem das 24h-Ereignis mit höherer Filtriergeschwindigkeit abgewartet worden war – mittels des eingearbeiteten Spülschlauches mehrmals für je zwei bis fünf Minuten mit Anmischflüssigkeit (Lauge) gespült. Beim ersten Spülen wurden offenbar Schmutzpartikel, die sich am Schlauch oder im Ablaufbereich der Lauge angesammelt hatten, weggeschwemmt

und die Filtergeschwindigkeit dadurch kurzzeitig erhöht. Es gab jedoch keine Anzeichen dafür, dass durch den Spülvorgang der Filter durchlässiger wurde. Die Filtriergeschwindigkeit blieb danach auf konstantem Niveau.

Abbildung K-U TEC 8: Filter nach Beginn des Technikumsversuches 4

Abbildung K-U TEC 9: Filter nach Beginn des Technikumsversuches 5

Abbildung K-U TEC 10: Filtrat Technikumsversuch 4 (links: nach 15 min., rechts: nach 30 min.)

Abbildung K-U TEC 11: zeitlicher Verlauf der Technikumsversuche 1, 3, 4 und 5

Abbildung K-U TEC 12: Filtergeschwindigkeit der Technikumsversuche 1, 3, 4 und 5

Abbildung K-U TEC 13: Filtergeschwindigkeit bei Technikumsversuch 5, markiert sind die Spülvorgänge

Im Nachgang der Technikumsversuche wurde das aufgefangene Filtrat analysiert und mit den Daten in der Anforderungsliste für den Bereich Sollstedt verglichen.

Abbildung K-U TEC 19: Zusammensetzung von Anmischflüssigkeit, Filtraten und Ablaflösung

Die Menge des aufgefangenen Filtrates betrug bei den Versuchen 1, 3, 4 und 5 zwischen 15,9 und 18,4 Litern, das entspricht rund 40 % bis 46 % der eingesetzten Anmischflüssigkeit und liegt damit am unteren Ende des Schwankungsbereiches für den in der Anforderungsliste für den Bereich Sollstedt angeführten Fluidablauf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund des Versuchsaufbaus nicht 100 % der drainierten Lauge aufgefangen werden können und es außerdem zwischen den Ablesungen zu Verdunstung kommt.

2.4.5 Arbeitspaket 5 (Entwicklung Gesamtsystem für unter Tage Einsatz)

Nachdem ein zunächst im Bergwerksbereich Sollstedt ausgewählter Standort für den Großversuch verworfen werden musste, wurde in Zusammenarbeit mit der TUC, KD und dem Bergwerksbetreiber ein neuer Standort im Bereich Bleicherode festgelegt. Dieser erfüllte die nötigen Anforderungen hinsichtlich der Geometrie und konnte vom Bergwerksbetreiber ohne großen zusätzlichen Aufwand mit Versatzsuspension versorgt werden.

Die zu Beginn des Projektes in einer Anforderungsliste zusammengefassten Parameter betrafen den ursprünglich angedachten Versuchsstandort Sollstedt und wurden aufgrund der neuen Planung angepasst. Relevante Parameter sind in der aktualisierten Anforderungsliste im Anhang aufgeführt.

Geplant wurden in Zusammenarbeit aller Projektpartner zwei Versuchsteile für unter Tage und zwar einmal ein Rohr mit vormontiertem Filter am unteren Ausgang (analog zum Technikumsversuchsstand) und ein danebenstehender, in einen Rahmen eingespannter Filter auf dem natürlichen Salzuntergrund. Letzterer musste leider aufgrund unvorhergesehener Ereignisse unter Tage noch vor Versuchsbeginn wieder entfernt werden. Der Großversuch fand also nur in dem Rohr mit Filter statt. Es wurde eingeplant, den Filter mindestens drei Mal im Abstand von ein bis zwei Wochen mit Versatzsuspension zu bespülen und nach Möglichkeit nach jeder Bespülung Proben zu entnehmen und den Drainage-Fortschritt zu beobachten.

Abbildung K-UTEC 14: oberes Rohrende mit Suspensionsschlauch

Abbildung K-UTEC 15: Übersicht Rohr und Filter

Abbildung K-UTEC 16: Detailansicht Filter mit Gurtnetz

Abbildung K-UTEC 17: Detailansicht ausdrainierende klare Lauge

2.4.6 Arbeitspaket 6 (Herstellung Funktionsmuster für Insituversuche)

An der Bearbeitung des Arbeitspaketes 6 hatte K-UTEC – wie vorgesehen – keinen Anteil.

2.4.7 Arbeitspaket 7 (Insituversuche)

Der Untertage-Versuchsstand wurde insgesamt drei Mal mit Suspension beaufschlagt. Nach der zweiten Bespülung wurden durch KD und K-UTEC Proben der Versatzsuspension sowie der abdrainierenden Lauge genommen. Direkt während einer weiteren Bespülung wurden ähnliche Proben durch Mitarbeiter von KD entnommen und an K-UTEC übergeben. Eine Woche später wurde erneut eine Probe der abdrainierenden Lauge genommen und zur Untersuchung übergeben.

Die Proben zeigten ein ähnliches Bild bezüglich der Filtereigenschaften wie die Technikumsversuche. Während der Bespülung mit Suspension dringen auch Partikel durch den noch sauberen Filter. Innerhalb von maximal 30 Minuten bildet sich ein Filterkuchen vor dem Abstandsgewirke aus, der die Filterwirkung verstärkt, so dass im Folgenden nur noch leicht trübe bis völlig klare Lauge aus dem Filter abdrainiert.

Abbildung K-UTEC 18: Filtrat Insituversuch (links: während der Bespülung, rechts: nach ca. 30 min.)

Etwa drei Monate nach Versuchsbeginn wurde der Insituversuch beendet und das Ergebnis im Beisein aller Projektpartner besichtigt. Beim Blick von oben in das Rohr fiel eine Schicht flüssiger Suspension auf, die sich offenbar durch mangelnde Drainage der überschüssigen Lösung noch nicht verfestigen konnte. Beim Entfernen des in den Rahmen eingespannten Filters bewegte sich diese noch flüssige Versatzmasse aus

dem Versuchsrohr und konnte in den weiter bergab liegenden Versatzraum abfließen. Etwa zwei Drittel des Rohrquerschnittes hinter dem Filter war mit verfestigter Versatzmasse gefüllt, die auch nach dem Entfernen des Filtergewirkes stehen blieb. Das Abstandsgewirke selbst zeigte keine Schwachstellen. Es war zwar – wie im Technikumsversuch auch – stark mit Suspension und einer Salzkruste besetzt, jedoch keineswegs verstopft, sondern weiterhin für Lauge durchlässig. Es entstand der Eindruck, dass die Überschussflüssigkeit auf dem Weg zum Filter durch die Versatzmasse am Weiterfließen gehindert wird und bei Erreichen des Filtergewirkes abdrainieren kann. Um diese Tatsache näher zu beleuchten, wurden mit zwei anderen Abstandsgewirken noch Technikumsversuche unternommen (siehe AP4 in Kapitel 2.4.4).

Die Abbildung K-UTEC 20 zeigt den Vergleich der Analysedaten an den gewonnenen Filtratproben mit den Daten der Anforderungsliste für den Bereich Bleicherode. Ein quantitativer Vergleich des Filtrates konnte aufgrund des Versuchsaufbaus unter Tage jedoch nicht erfolgen.

Abbildung K-UTEC 20: Zusammensetzung von Anmischflüssigkeit, Filtraten und Ablaflösung

2.4.8 Arbeitspaket 8 (Evaluierung der Ergebnisse)

Durch die im Labor der K-UTEC durchgeführten Versuche mit den vom Partner STFI zur Verfügung gestellten Abstandsgewirken konnte die prinzipielle Eignung und Haltbarkeit als Filtermedium in Kontakt mit Spülversatzmassen und hochkonzentrierten Salzlösungen gezeigt werden. Die Ergebnisse der Technikumsversuche zeigten, dass sich die Filtrierwirkungen der verschiedenen getesteten Abstandsgewirke nur wenig unterscheiden. Das engmaschige Gewirke hat erwartungsgemäß die geringste Filtergeschwindigkeit und lässt die wenigsten größeren Partikel durch. Das Gewirke mit mittlerer Maschenweite auf einer Seite und grober Maschenweite auf der anderen (Versuch 4) zeigt eine schlechtere Drainagewirkung als das Gewirke mit der mittleren Maschenweite auf beiden Seiten (Versuch 3). Grund hierfür ist möglicherweise das Eindringen von größeren Suspensionspartikeln in das Innere des Gewirkes durch die größeren Maschen auf der Suspensionsseite und Ausbildung eines zweiten Filterkuchens zwischen den Polfäden. Ein völliges Zusetzen des Filtergewirkes scheint jedoch nicht einzutreten, da auch nach zwei bis drei Wochen noch eine konstante Menge Lauge abdrainiert. Das Gewirke mit dem eingearbeiteten Spülschlauch lässt zu Beginn des Versuches eine größere Menge Partikel passieren, was offenbar auf die Aussparungen für den Schlauch innerhalb des Gewirkes zurückzuführen ist. Im weiteren Versuchsverlauf unterscheidet sich die Drainagewirkung nicht wesentlich von der der anderen Testgewirke. Vorteile durch eine Spülung des Gewirkes mit Lauge sind nicht erkennbar, die Filtriergeschwindigkeit erhöht sich dadurch nicht bzw. nicht nachhaltig.

Die beste Drainagewirkung mit der größten Menge an zurückgewonnener Lauge (46 %) zeigte das Abstandsgewirke mit den mittleren Poren auf beiden Seiten, welches auch beim Insituversuch eingesetzt wurde.

Neben der Qualität des eingesetzten Abstandsgewirkes wird die Drainagewirkung auch von der Zusammensetzung und Viskosität der Versatzsuspensionen beeinflusst, die sowohl bei den Technikumsversuchen wie beim Insituversuch variierten. Weiterhin wird die Drainage der Lauge – wie bei den Technikumsversuchen zu beobachten – durch Rutschungen und Rissbildung innerhalb der Versatzmasse verstärkt. Diese Ereignisse treten spontan auf und lassen sich nicht von außen beeinflussen. Dennoch waren solche Ereignisse mit der damit verbundenen erhöhten Filtriergeschwindigkeit bei den Versuchen 1, 3, 4 und 5 jeweils nach rund 22 bis 24 Stunden zu beobachten, bei Versuch 5 nach 42 Stunden noch ein zweites Mal. Die Spülversatzsuspensionen weisen offenbar unabhängig von der genauen chemischen Zusammensetzung und unabhängig von der Drainagewirkung des eingesetzten Gewirkes ein sehr ähnliches Verhalten bezüglich Rheologie und Verfestigung auf. Das Filtergewirke kann seine Drainagewirkung nur entfalten, wenn die überstehende Lauge durch den Filterkuchen (also die vor dem Filter liegende Versatzmasse) hindurchfließen kann. Dem Aufbau dieses Filterkuchens kommt bei der Bewertung der Drainagewirkung demzufolge eine noch größere Bedeutung zu als dem eingesetzten Filtermaterial. Zur Verbesserung der Drainage innerhalb des Filterkuchens sind – wie bereits im Untertageversatz praktiziert – Variationen im Versatzregime sowie z. B. eine Aufschüttung von Grobsalz vor dem Dammbauwerk möglich.

Der Vorteil des textilen Filters liegt in seinem geringen Gewicht, der einfachen Handhabung und den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in Bezug auf Größe (limitiert durch die Kraftaufnahme) und Standzeit der Filterkonstruktion. Die von den Projektpartnern entwickelte Idee zum Einsatz des textilen Filters im „Fenster“ einer als Dammbauwerk eingesetzten Rundbogenmauer (siehe Kapitel 2.1.8) ist daher eine gute Option, um die Stabilität der Mauer mit den flexiblen Möglichkeiten des Filters zu verknüpfen. Dieser kann passgenau in den Rahmen eingebaut und bei Bedarf auch gewechselt werden. Die Filterwirkung würde gegenüber einem Mauerfenster ohne Filtertextil deutlich erhöht und die Anforderung einer klaren Lauge als Ablauflösung eher erreicht.

Perspektivisch können mit Hilfe des bewährten Technikumsversuchsstandes weitere Filtergewirke mit unterschiedlichen Eigenschaften unter Anwendung verschiedener Einspülzenarien getestet und so genau an mögliche Anwendungsfälle angepasst werden. Denkbar ist hier z. B. ebenfalls eine Schüttung Grobsalz vor dem Filter oder auch der Einsatz von in Längsrichtung verlegten Drainageschläuchen zur besseren Fassung der Überschusslauge und damit schnellerem Transport zum Filter.

3 Zusammenfassung


Im Laufe des Projektes konnten von den Projektpartnern wesentliche Erkenntnisse bezüglich des Verhaltens diverser Textilien unter den Einsatzbedingungen eines Versatzbergwerkes im Kali- und Salzbergbau gewonnen werden. Ebenso war es möglich, Prüfverfahren und Prüfanlagen für Untersuchungen auf dem Gebiet der Dammbauwerke im Versatz mittels Lauge und Suspension zu entwickeln und zur Anwendung zu bringen. Ferner ist eine Lösung für einen auf Textilien als Filter und Lastübertragungselement basiertes Dammbauwerk erarbeitet und erfolgreich erprobt worden. Ebenso konnten erste erweiterte Erkenntnisse bezüglich des sich vor dem Dammbauwerk ausbildenden Versatzkörpers erlangt werden. Diese zeigen jedoch deutlich, dass in zukünftigen Arbeiten die dort auftretenden Effekte genauer untersucht werden müssen, da diese, wie im Projekt aufgezeigt, einen wesentlichen Einfluss auf den Betrieb eines Dammbauwerkes haben. Ebenso sollten, im Hinblick auf eine einheitliche, realistische und von einer Behörde genehmigungsfähige Auslegung tatsächlich vorhandene Lasten am Dammbauwerk messtechnisch erfasst werden.

Abbildungsverzeichnis gemeinsamer Abschlussbericht

Für den Berichtszeitraum vom 01.11.2014 bis 31.10.2017

Für das KF-Projekt

„Textiles Absperrsystem für Suspensionen beim Bergversatz“

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ	 KD Stahl- und Maschinenbau GmbH
Technische Universität Chemnitz Professur Fördertechnik Reichenhainer Str. 70 09126 Chemnitz Vertreten durch Dr.-Ing. Jens Sumpf Förderkennzeichen: KF2515371LL4	KD Stahl- und Maschinenbau GmbH OT Bernterode Am Förderturm 3 37339 Breitenworbis Vertreten durch Geschäftsführer Michael Duwe Förderkennzeichen: KF2290612LL4
	
Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. Annaberger Straße 240 09125 Chemnitz Vertreten durch Geschäftsführenden Direktor Andreas Berthel Förderkennzeichen: KF2034071LL4	K-UTEC AG Salt Technologies Am Petersenschacht 7 D-99706 Sondershausen Vertreten durch Geschäftsführer Dr. Heiner Marx Förderkennzeichen: KF2424607LL4

1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung TUC 1: Streckenprofil	6
Abbildung TUC 2: Lagenweiser Aufbau	6
Abbildung TUC 3: Befestigung des textilen Absperrsystems	7
Abbildung TUC 4: TGA-Kurve, Dyneema Übersicht.....	7
Abbildung TUC 5: Beispiel DSC – Kurve, Dyneema neu	8
Abbildung TUC 6: Beispiel DSC – Kurve, Dyneema 3 Monate Lauge.....	8
Abbildung TUC 7: Entwicklung der spez. Schmelzenthalpien von Dyneema	9
Abbildung TUC 8: Entwicklung Seilbruchkraft Dyneema.....	9
Abbildung TUC 9: Entwicklung Seilbruchkraft Technora	10
Abbildung TUC 10: Entwicklung Seilbruchkraft Vectran	10
Abbildung TUC 11: Entwicklung Bruchkraft der Gurte.....	11
Abbildung TUC 12: Netzprüfstand.....	11
Abbildung TUC 13: Entwicklung Bruchkraft Gurtbandnetze	12
Abbildung TUC 14: Dyneema neu, 6 Monate und 12 Monate in Suspension.....	12
Abbildung TUC 15: Dyneema 6 Monate Suspension	12
Abbildung TUC 16: Technora-Faser mit Salzkristallen.....	13
Abbildung TUC 17: Technorafasern nach Auslage in Lauge (3 Monate) und Zugversuch.....	13
Abbildung TUC 18: Technorafasern neu nach Zugversuch.....	14
Abbildung TUC 19: CT-Aufnahmen Technora-Seil, 6 Monate Suspension	14
Abbildung TUC 20: Lasermikroskop-Aufnahme Dyneema neu und 6 Monate Suspension.....	15
Abbildung TUC 21: Lasermikroskop-Aufnahme Dyneema 3 Monate Lauge	15
Abbildung TUC 22: Dochtvorversuch	15
Abbildung TUC 23: Dochtversuch unterschiedliche Litzenanzahl	16
Abbildung TUC 24: Dochtversuch vertikal - horizontal	17
Abbildung TUC 25: Wasseraustrag durch Dochtwirkung	17
Abbildung TUC 26: Dammbauwerk in Rahmenbauweise vor Befestigung	18
Abbildung TUC 27: Aufbau Dammbauwerk in Rahmenbauweise	18
Abbildung TUC 28: Aufbau Dammbauwerk in Rahmenbauweise	19
Abbildung TUC 29: Dammbauwerk in Rahmenbauweise, befestigt	19
Abbildung TUC 30: Gurtbandnetz ein gehangen.....	20
Abbildung TUC 31: Detail D-Ring-Aufnahme	20
Abbildung TUC 32: Detail Ecke und Gesamtansicht	21
Abbildung TUC 33: Detail verschmutztes Gurtbandnetz	21
Abbildung TUC 34: herausgetrenntes Gurtbandnetz.....	22
Abbildung TUC 35: Gesamtansicht Prüfstand unter Tage.....	22
Abbildung TUC 36: Rundbogenmauer	23

Abbildung TUC 37: Hybriddammbauwerk	23
Abbildung TUC 38: Hybriddammbauwerk mit Schieber	24
Abbildung TUC 39: Versatzbergwerke in Deutschland.....	25
Abbildung TUC 40: Spülversatzanlage K+S [Kali und Steinsalz Heft 2/2005]	26
Abbildung TUC 41: Kalibergwerke	26
Abbildung TUC 42: Anforderungsliste inklusive Anhänge	29
Abbildung STFI 1: Stempeldurchdrückversuch – Versuchsdurchführung	30
Abbildung STFI 2: Stempeldurchdrückversuch – Probe nach der Prüfung	30
Abbildung STFI 3: Technikumsversuch mit STFI-Filtertextilien beim Projektpartner K- UTEK AG Salt Technologies	31
Abbildung STFI 4: Abstandsgewirke zum Einbau als textiler Filter in das Versuchssystem für die Insituversuche unter Tage.....	31
Abbildung STFI 5: Einbau der Abstandsgewirke in die Aufnahmevorrichtung.....	32
Abbildung STFI 6: Einbau der Abstandsgewirke in die Aufnahmevorrichtung.....	32
Abbildung STFI 7: Einbau der Abstandsgewirke in die Aufnahmevorrichtung.....	33
Abbildung STFI 8: Einbau der Abstandsgewirke in die Aufnahmevorrichtung.....	33
Abbildung STFI 9: Einbau der Versuchsanordnung unter Tage	34
Abbildung STFI 10: Einbau der Versuchsanordnung unter Tage	34
Abbildung STFI 11: Versuchsanordnung des textilen Absperrsystems unter Tage...35	
Abbildung STFI 12: Versatzmasse in der Versuchsanordnung unter Tage.....	35
Abbildung STFI 13: Filter wurde während der Versuchsdauer nicht von Schlamm durchsetzt.....	36
Abbildung STFI 14: Drainagewirkung blieb während der Versuchsdauer erhalten....	36
Abbildung STFI 15: Öffnung des textilen Absperrsystems nach Versuchsende.....	37
Abbildung STFI 16: Suspension / Versatzmasse – größtenteils ausdrainiert	37
Abbildung STFI 17: Nur die Filterinnenseite wurde mit Schlamm benetzt.....	38
Abbildung STFI 18: Das Innere des Filters wurde nicht versetzt – Salzlauge konnte abfließen.....	38
Abbildung KD 1: Stahlträger des Dammbauwerkes in der eingefrästen Nut auf der Sohle der zu füllenden Abbaukammer	39
Abbildung KD 2: Übergang der eingefrästen Nut von der Sohle in den Stoß	40
Abbildung KD 3: am Stoß eingeschäumtes Seitenblech als Übergang Bauwerk/Gebirge.....	40
Abbildung KD 4: Rohbau Dammbauwerk, Stahlträger auf der Sohle mit Sorelblech vergossen.....	41
Abbildung KD 5: Stahlbau Dammbauwerk mit aufgesetzten Lochblechen.....	41
Abbildung KD 6: Dammbauwerk aus Big Bags aufgetürmt mit Drainageschlauch....	42

Abbildung KD 7: Rohbaufertigung bei KD Stahl	42
Abbildung KD 8: Befüllung mit Versatzsuspension im Labor von K-UTEC.....	43
Abbildung KD 9: Detailansicht.....	43
Abbildung KD 10: Auflegen Filtermaterial / Gurtbandnetz	44
Abbildung KD 11: Spannen des Gurtbandnetzes	44
Abbildung KD 12: Anpressen des Filtermaterials	45
Abbildung KD 13: Kompletter Versuchsstand vor der Bepflügelung (Austragsseite).....	45
Abbildung KD 14: Kompletter Versuchsstand vor der Bepflügelung (Einspülseite).....	46
Abbildung KD 15: Suspensionshauptleitung mit Abzweig zum Standort der Versuchsanlage.....	46
Abbildung KD 16: Bypassleitung zum Standort der Versuchsanlage	47
Abbildung KD 17: Reduzierter Versuchsstand mit Umfahrung für Großgeräte	47
Abbildung KD 18: Befüllen des Versuchsstandes	48
Abbildung KD 19: Zwischenfüllstand	48
Abbildung KD 20: Befüllung des Versuchsstandes I	49
Abbildung KD 21: Versuchsstand während der Drainage	49
Abbildung KD 22: Füllstand vor Öffnen des Filtertextils	50
Abbildung KD 23: Öffnen des Filtermaterials.....	50
Abbildung KD 24: Demontage Gurtbandnetz Filtermaterial.....	51
Abbildung KD 25: Versuchsanlage nach der Entnahme Gurtbandnetz und Filtermaterial.....	51
Abbildung KD 26: Probenentnahme von Material aus dem Suspensionsblock	52
Abbildung KD 27: Bemusterung Stahlbau	53
Abbildung KD 28: Bemusterung Spannen und Abdichten	54
Abbildung KD 29: Gemauerte Wand mit Drainagefenstern	55
Abbildung KD 30: Übersichtszeichnung	56
Abbildung K-UTEC 1: Laborversuchsstand für Filterversuche	57
Abbildung K-UTEC 2: gewonnenes Filtrat (links nach 15 min., rechts nach 30 min.)	58
Abbildung K-UTEC 3: zeitlicher Verlauf des Technikumsversuches 2	58
Abbildung K-UTEC 4: Filtrat Technikumsversuch 3 (links nach 15 min., rechts nach 30 min.)	59
Abbildung K-UTEC 5: Technikumsversuch 3 bei Beginn (vorne)	60
Abbildung K-UTEC 6: Technikumsversuch 3 nach ca. 5 Stunden mit aufstehender Lauge	60
Abbildung K-UTEC 7: Technikumsversuch 3 nach 4 Wochen (vorne)	61
Abbildung K-UTEC 8: Filter nach Beginn des Technikumsversuches 4	61
Abbildung K-UTEC 9: Filter nach Beginn des Technikumsversuches 5	62
Abbildung K-UTEC 10: Filtrat Technikumsversuch 4 (links nach 15 min., rechts nach 30 min.)	63

Abbildung K-U-TEC 11: zeitlicher Verlauf der Technikumsversuche 1, 3, 4 und 5	64
Abbildung K-U-TEC 12: Filtriergeschwindigkeiten der Technikumsversuche 1, 3, 4 und 5	64
Abbildung K-U-TEC 13: Filtriergeschwindigkeit bei Technikumsversuch 5, markiert sind die Spülvorgänge	65
Abbildung K-U-TEC 14: oberes Rohrende mit Suspensionsschlauch	65
Abbildung K-U-TEC 15: Übersicht Rohr und Filter	66
Abbildung K-U-TEC 16: Detailansicht Filter mit Gurtnetz	67
Abbildung K-U-TEC 17: Detailansicht ausdrainierende klare Lauge	68
Abbildung K-U-TEC 18: Filtrat Insituversuch (links: während Bespülung, rechts: nach ca. 30 min.).....	69
Abbildung K-U-TEC 19: Zusammensetzung von Anmischflüssigkeit, Filtraten und Ablauflösung im Technikumsversuch	70
Abbildung K-U-TEC 20: Zusammensetzung von Anmischflüssigkeit, Filtraten und Ablauflösung im In situ-Versuch	70

2 Abbildungen TUC

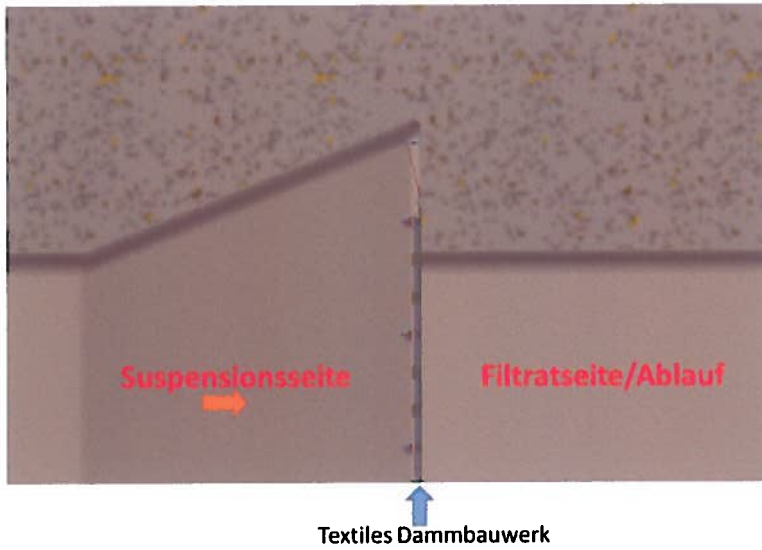


Abbildung TUC 1: Streckenprofil

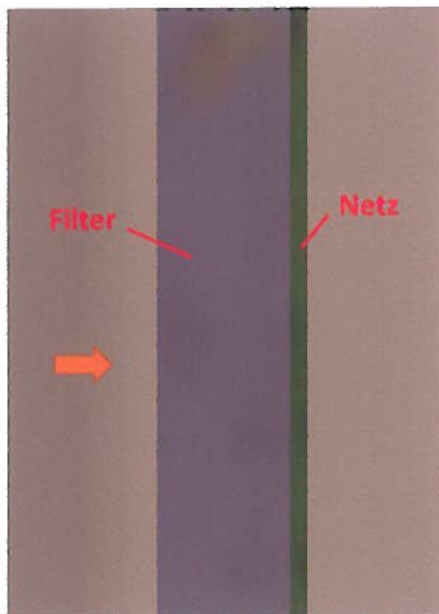


Abbildung TUC 2: Lagenweiser Aufbau

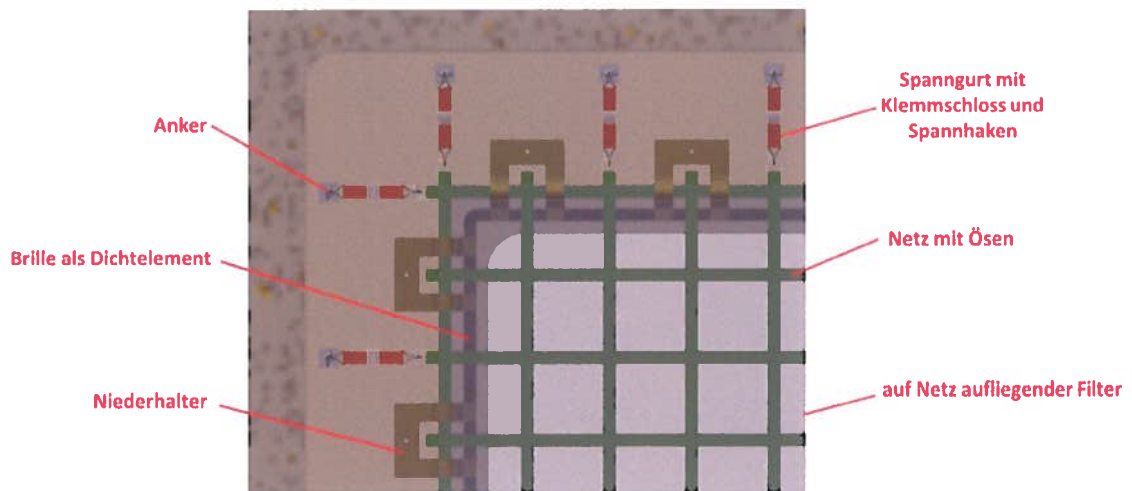


Abbildung TUC 3: Befestigung des textilen Absperrsystems

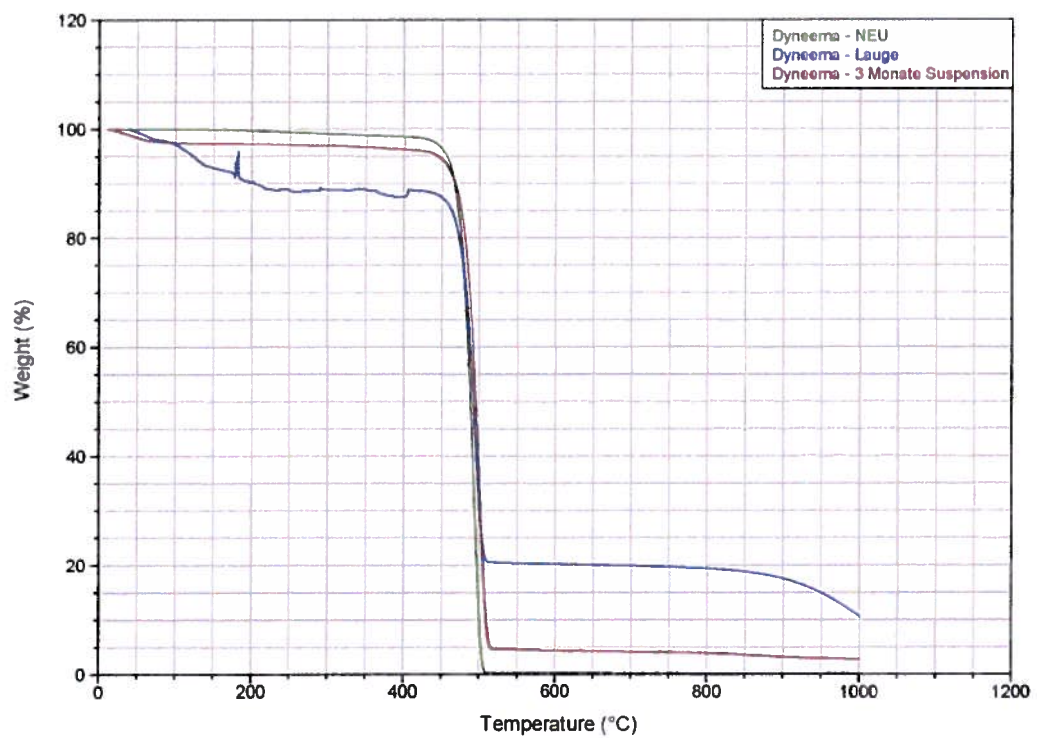


Abbildung TUC 4: TGA-Kurve, Dyneema Übersicht

Sample: Dyneema - NEU
Size: 8.6000 mg

Operator: R Sichel
Run Date: 04-Apr-2016 16:28

Comment: HP gelocht

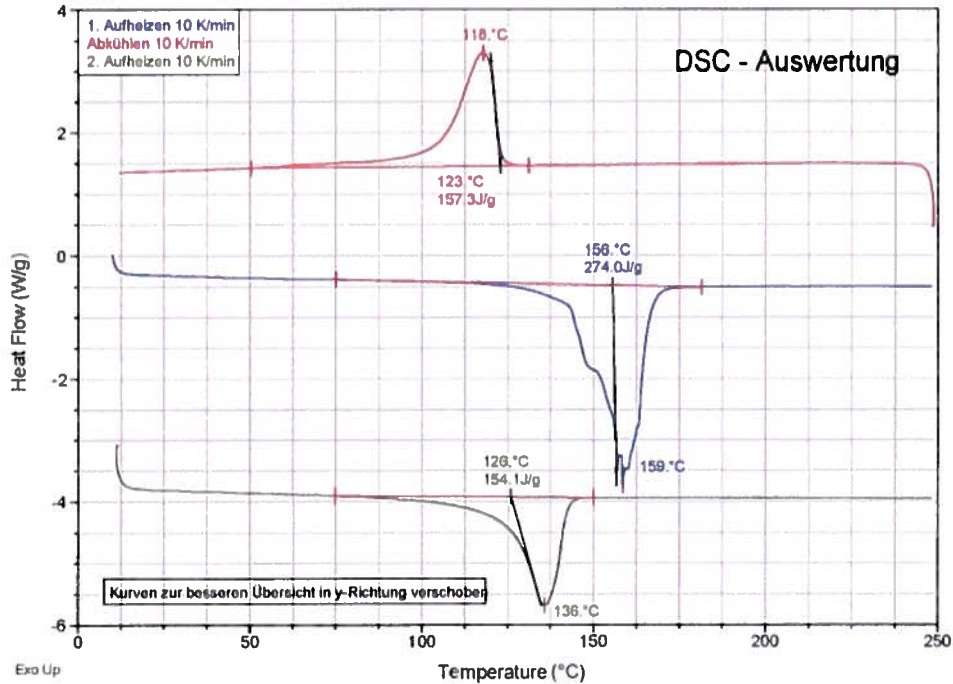


Abbildung TUC 5: Beispiel DSC – Kurve, Dyneema neu

Sample: Dyneema - Lauge
Size: 8.8900 mg

Operator: R Sichel
Run Date: 04-Apr-2016 17:50

Comment: HP gelocht

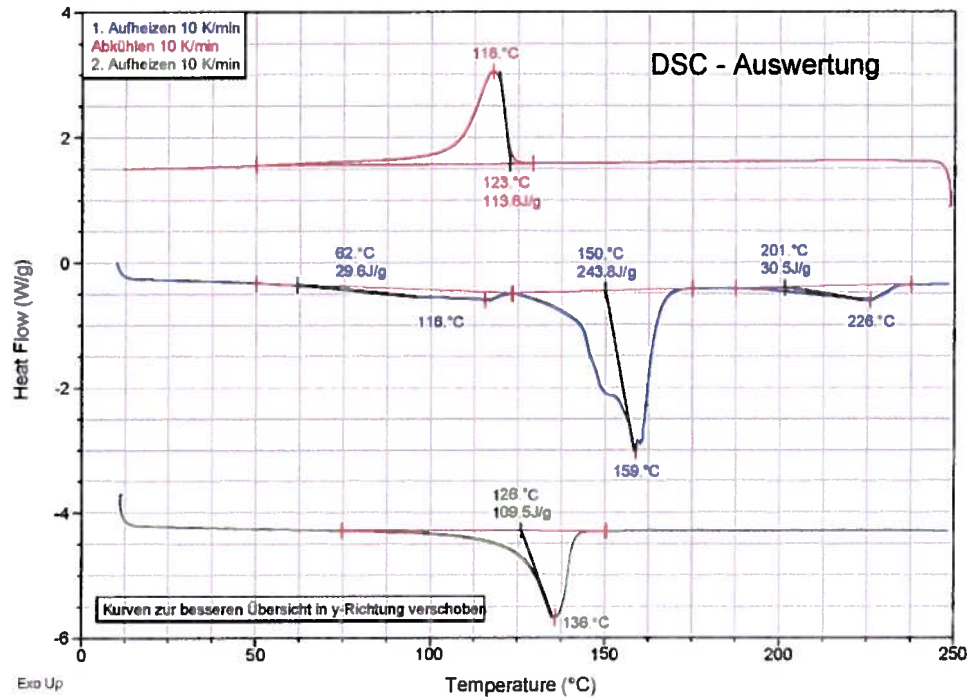


Abbildung TUC 6: Beispiel DSC – Kurve, Dyneema 3 Monate Lauge

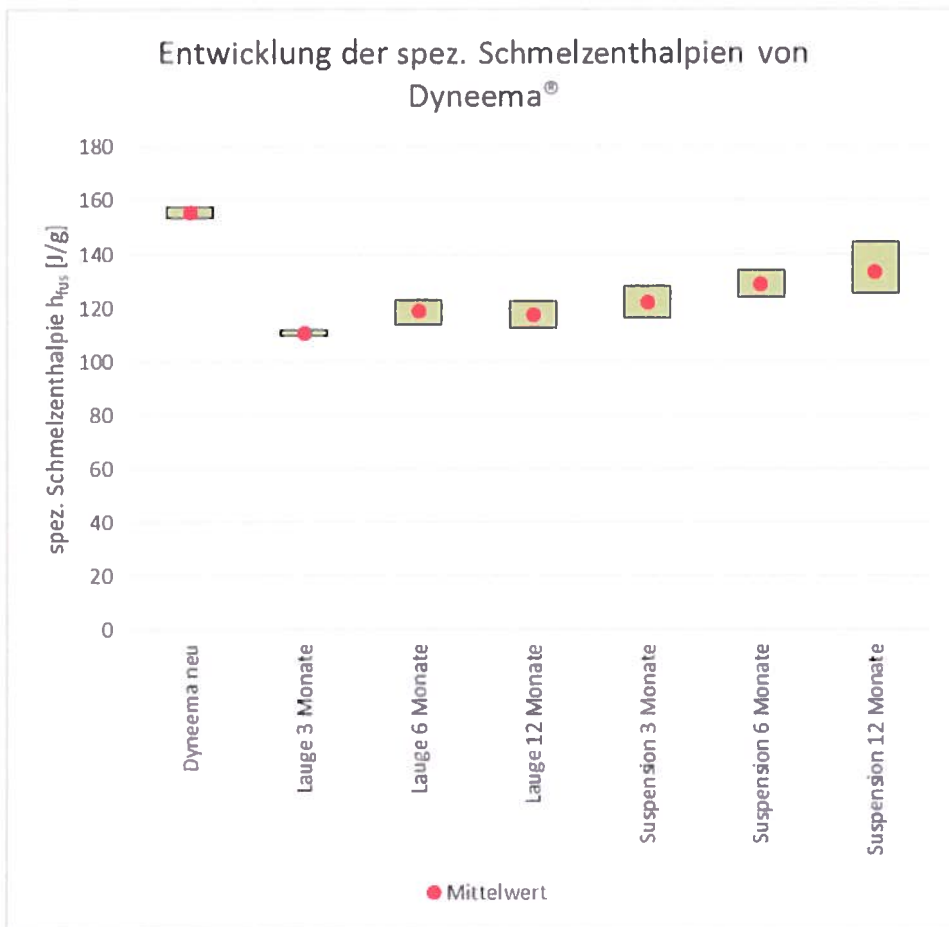


Abbildung TUC 7: Entwicklung der spez. Schmelzenthalpien von Dyneema

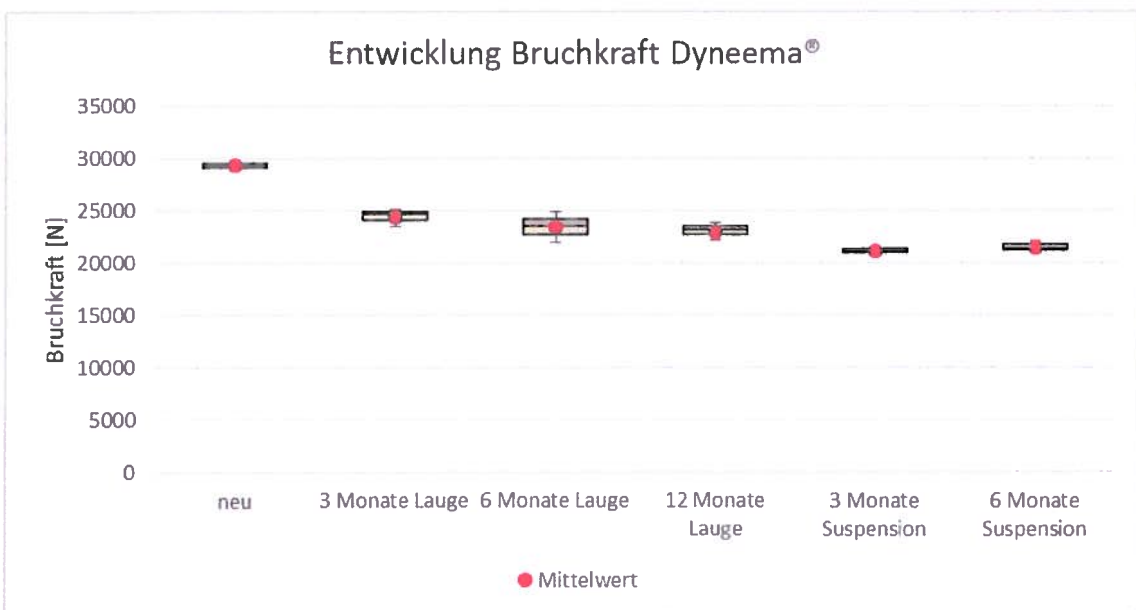


Abbildung TUC 8: Entwicklung Seilbruchkraft Dyneema

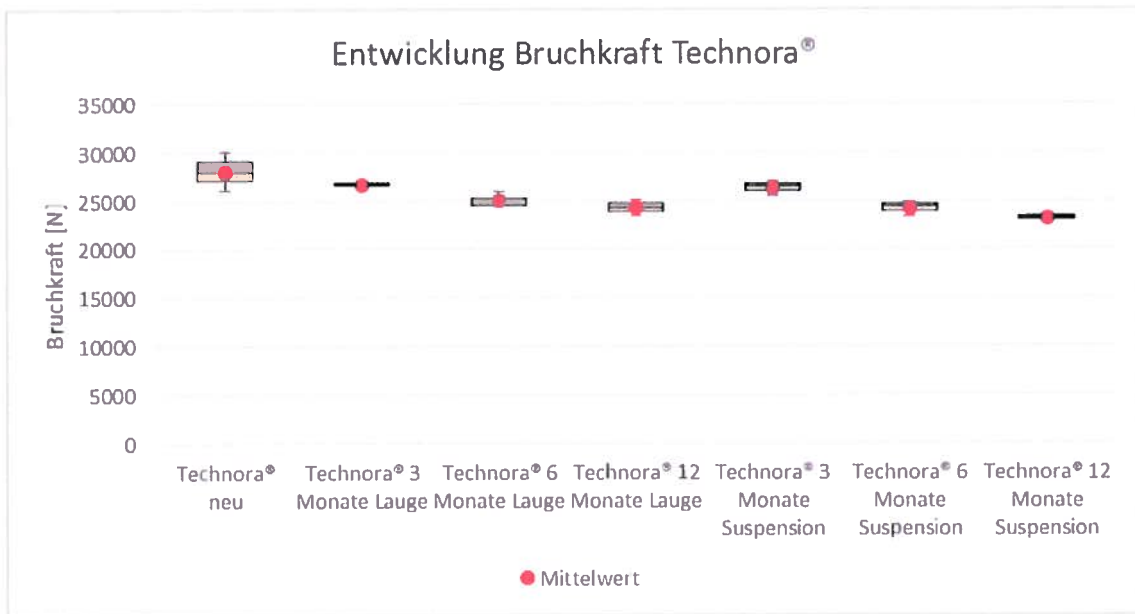


Abbildung TUC 9: Entwicklung Seilbruchkraft Technora

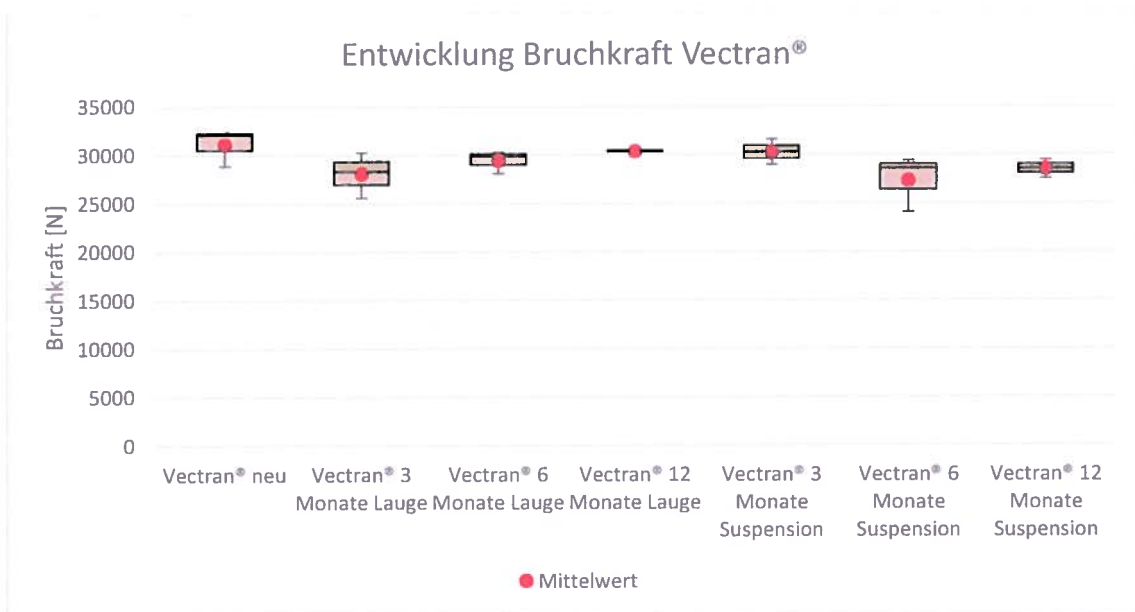


Abbildung TUC 10: Entwicklung Seilbruchkraft Vectran

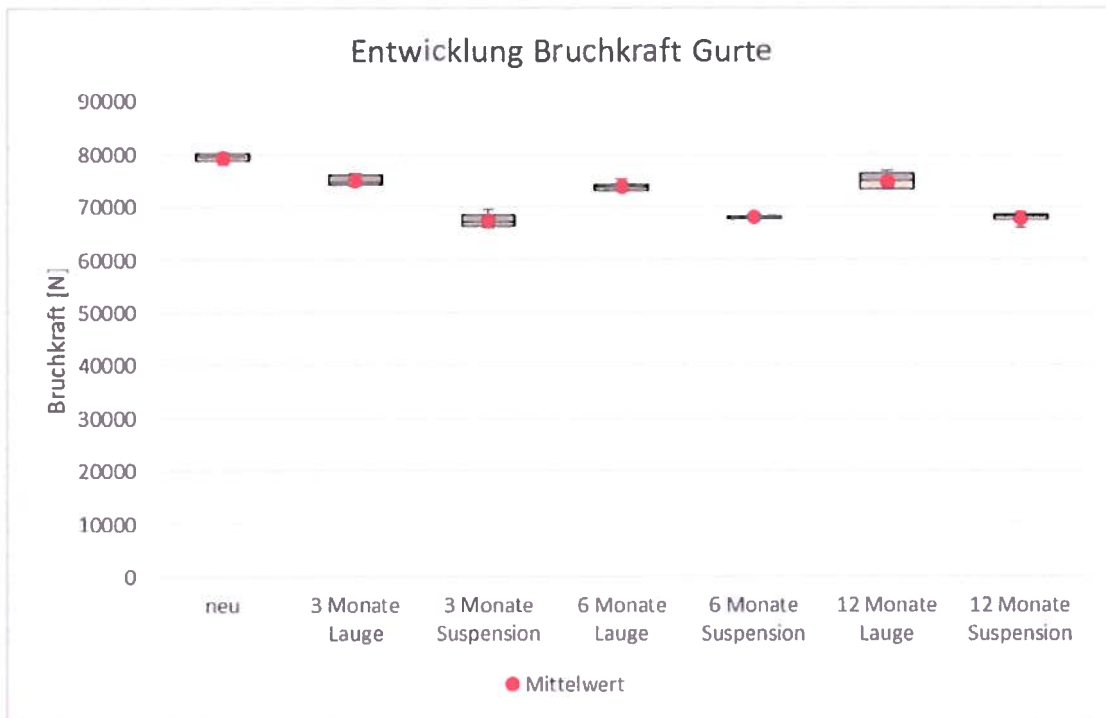


Abbildung TUC 11: Entwicklung Bruchkraft der Gurte

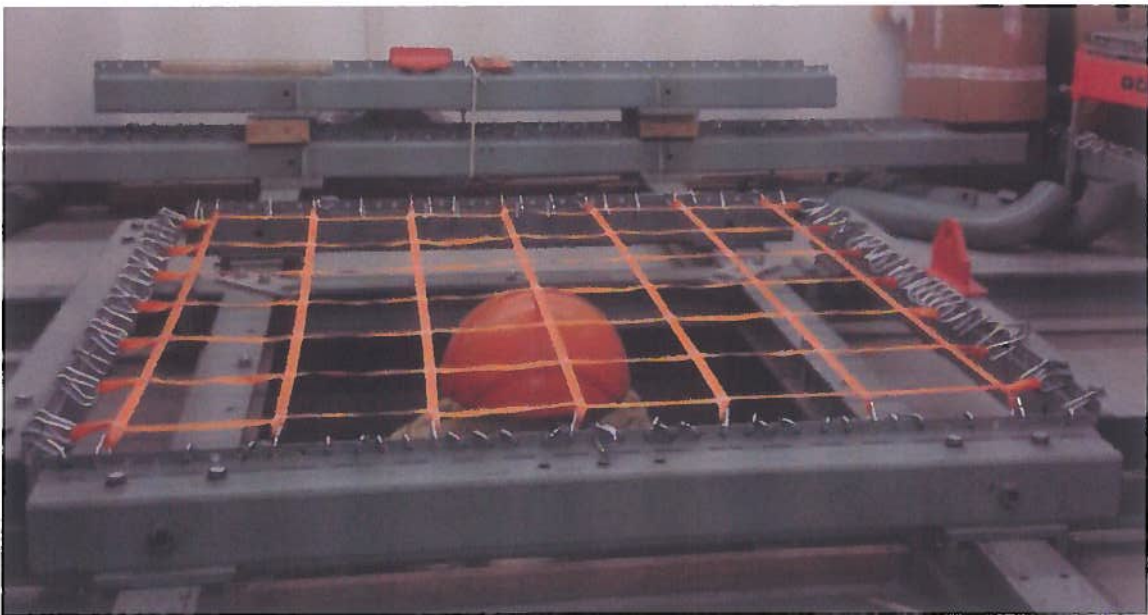


Abbildung TUC 12: Netzprüfstand

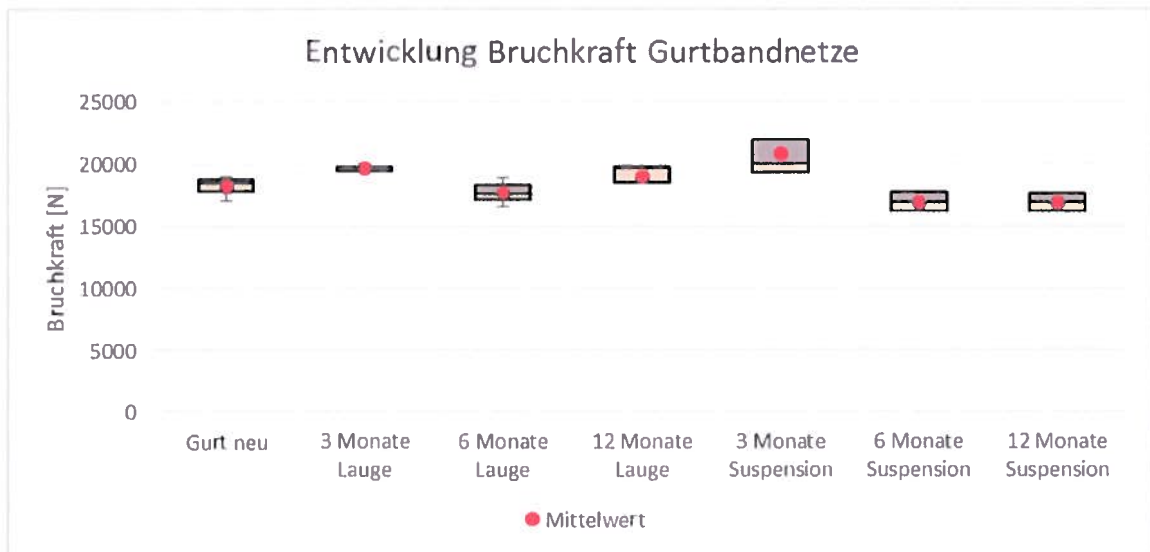


Abbildung TUC 13: Entwicklung Bruchkraft Gurtbandnetze

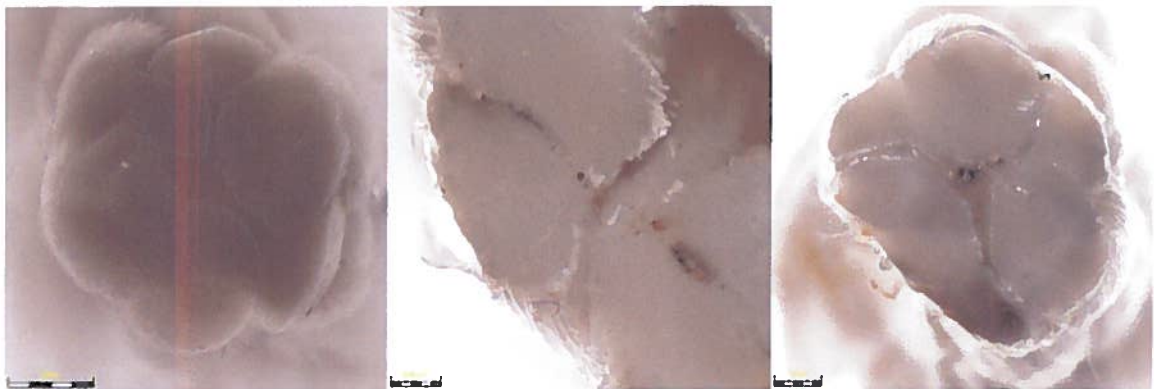


Abbildung TUC 14: Dyneema neu, 6 Monate und 12 Monate in Suspension



Abbildung TUC 15: Dyneema 6 Monate Suspension



Abbildung TUC 16: Technora-Faser mit Salzkristallen

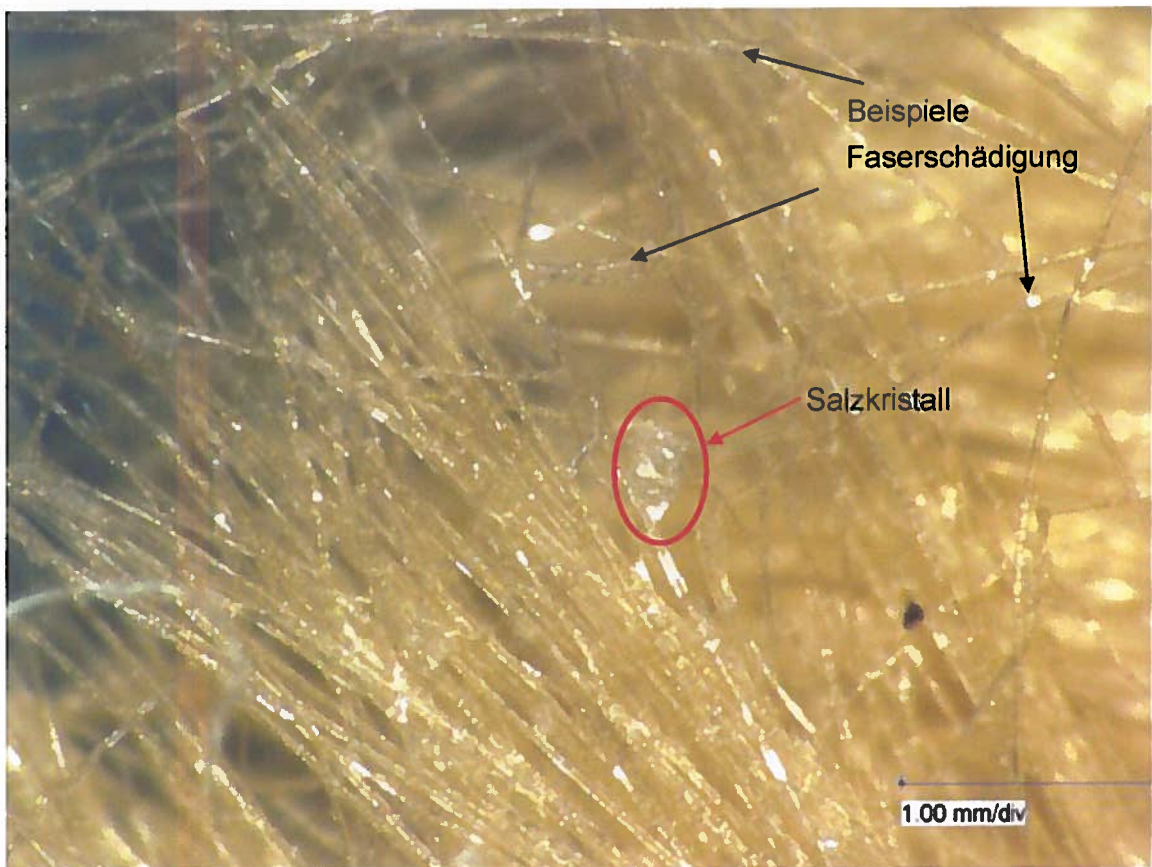


Abbildung TUC 17: Technorafasern nach Auslage in Lauge (3 Monate) und Zugversuch

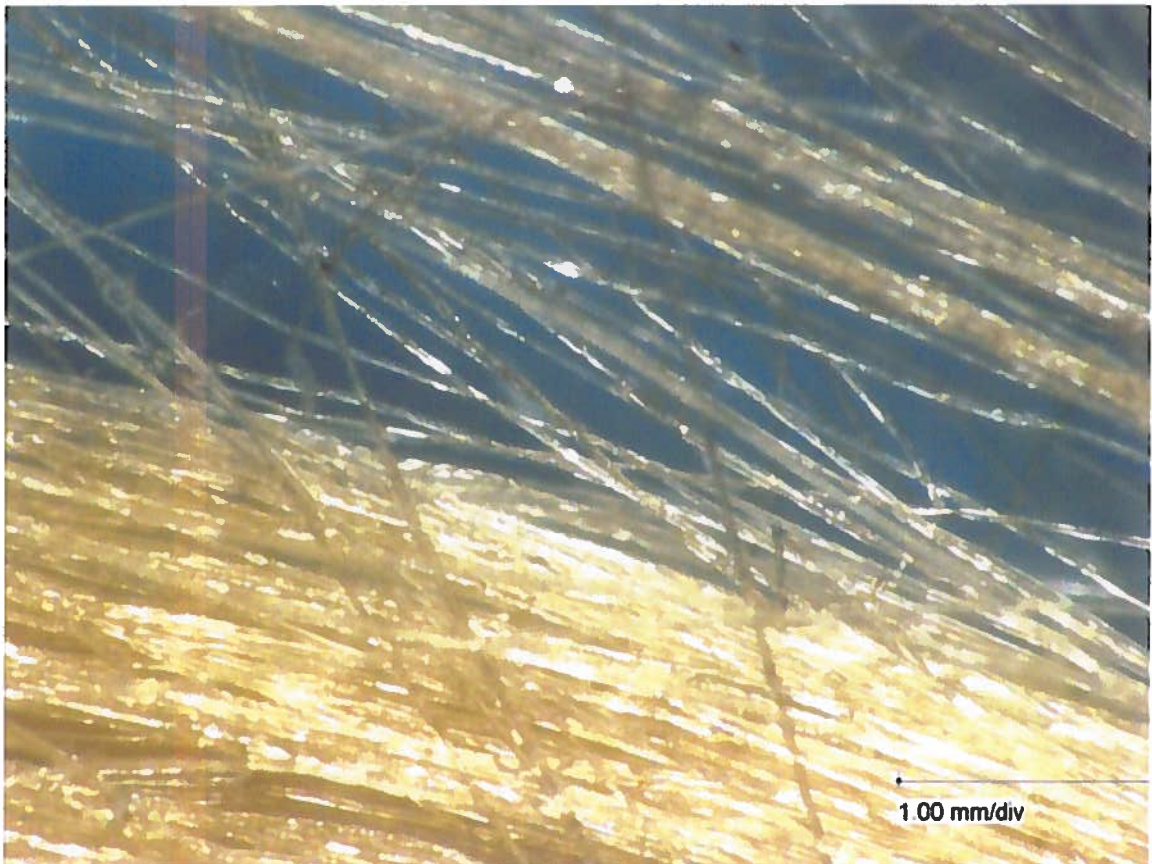


Abbildung TUC 18: Technorafasern neu nach Zugversuch



Abbildung TUC 19: CT-Aufnahmen Technora-Seil, 6 Monate Suspension

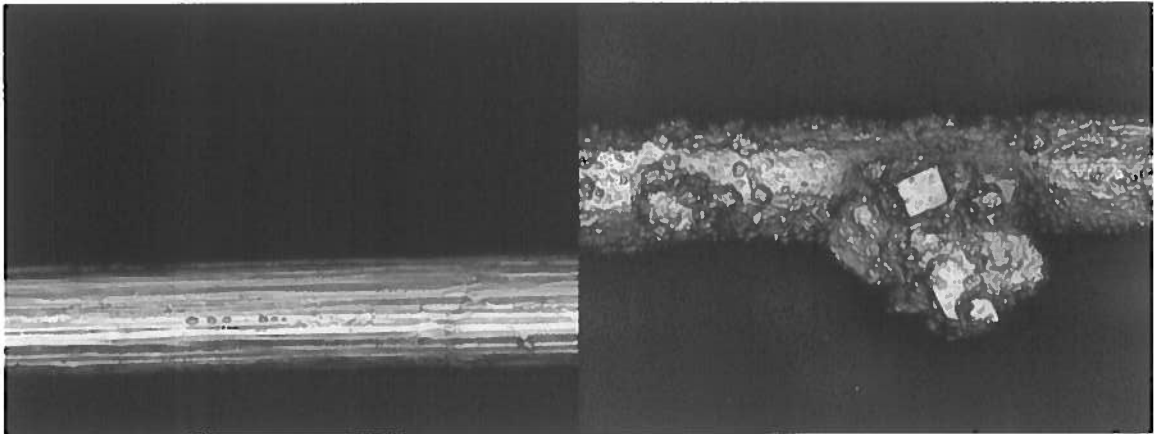


Abbildung TUC 20: Lasermikroskop-Aufnahme Dyneema neu und 6 Monate Suspension



Abbildung TUC 21: Lasermikroskop-Aufnahme Dyneema 3 Monate Lauge

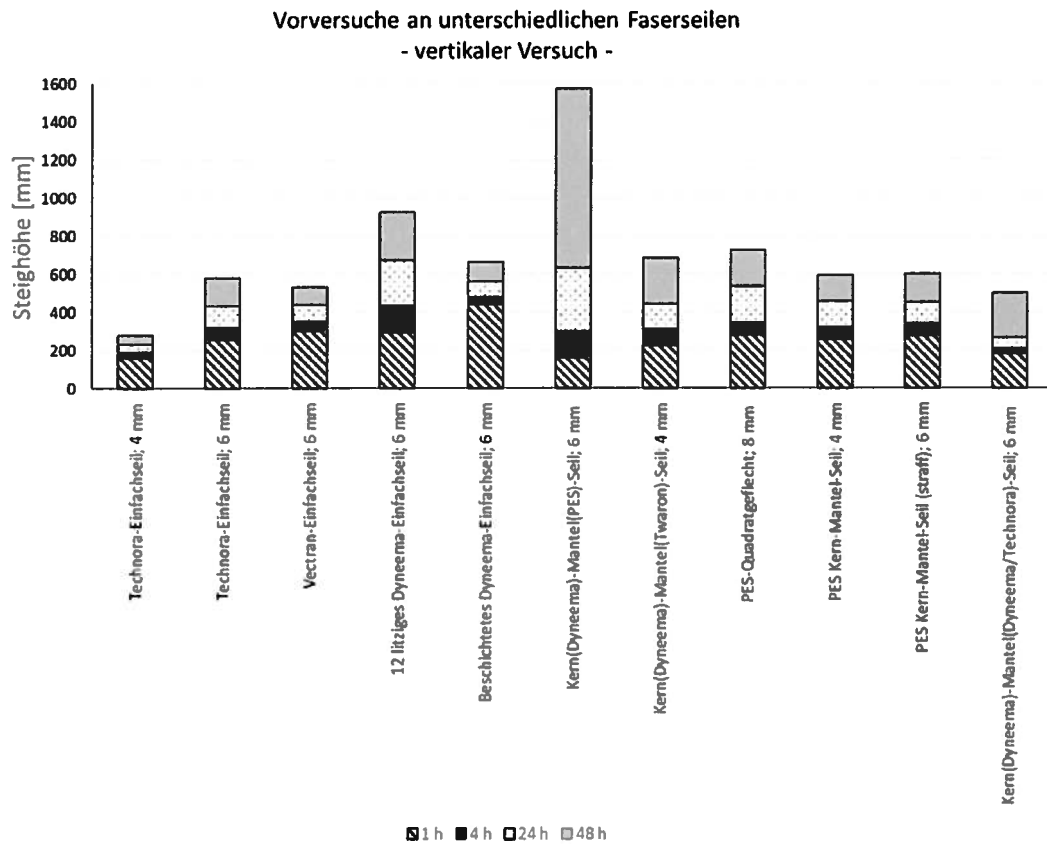


Abbildung TUC 22: Dochtvorversuch

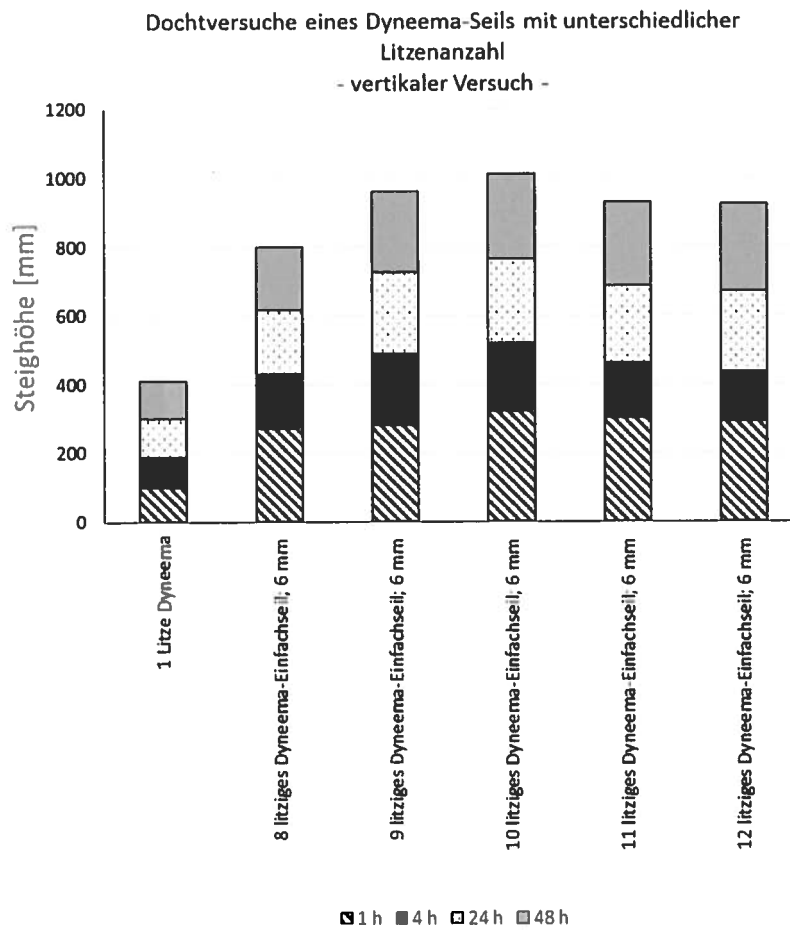


Abbildung TUC 23: Dochtversuch unterschiedliche Litzenanzahl

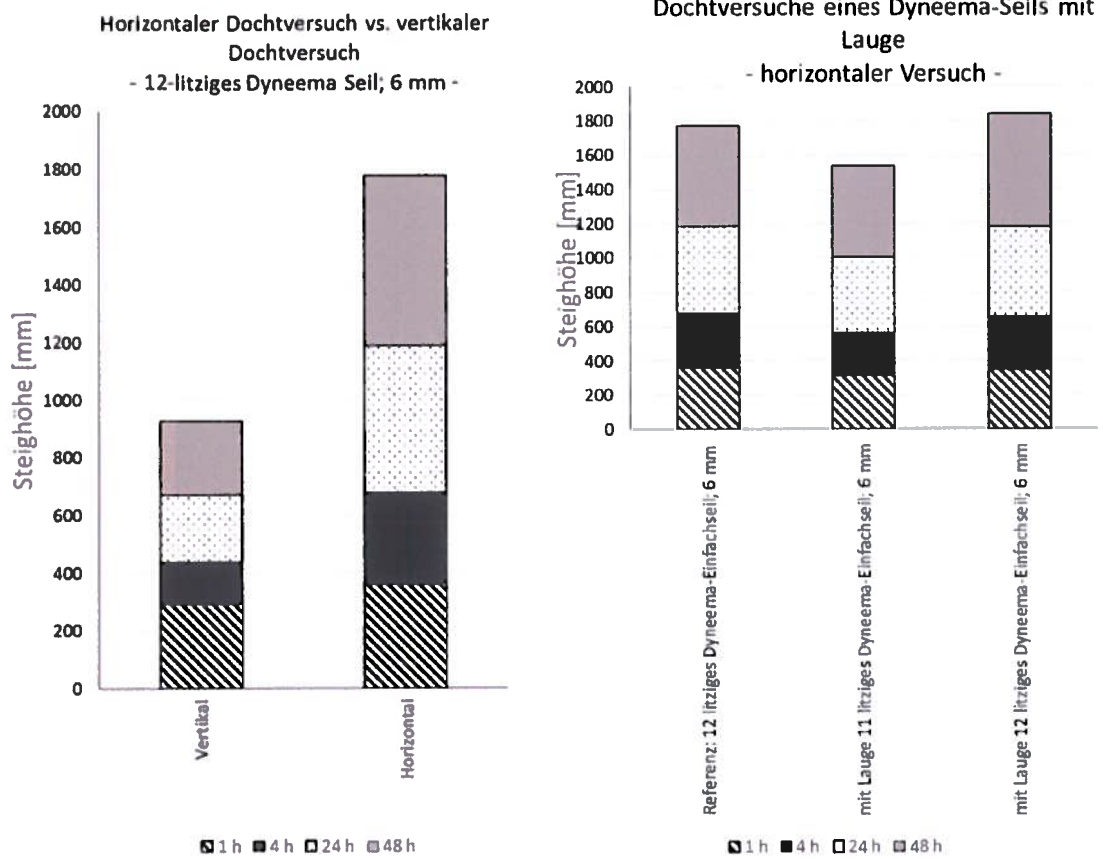


Abbildung TUC 24: Dochtversuch vertikal - horizontal



Abbildung TUC 25: Wasseraustrag durch Dochtwirkung

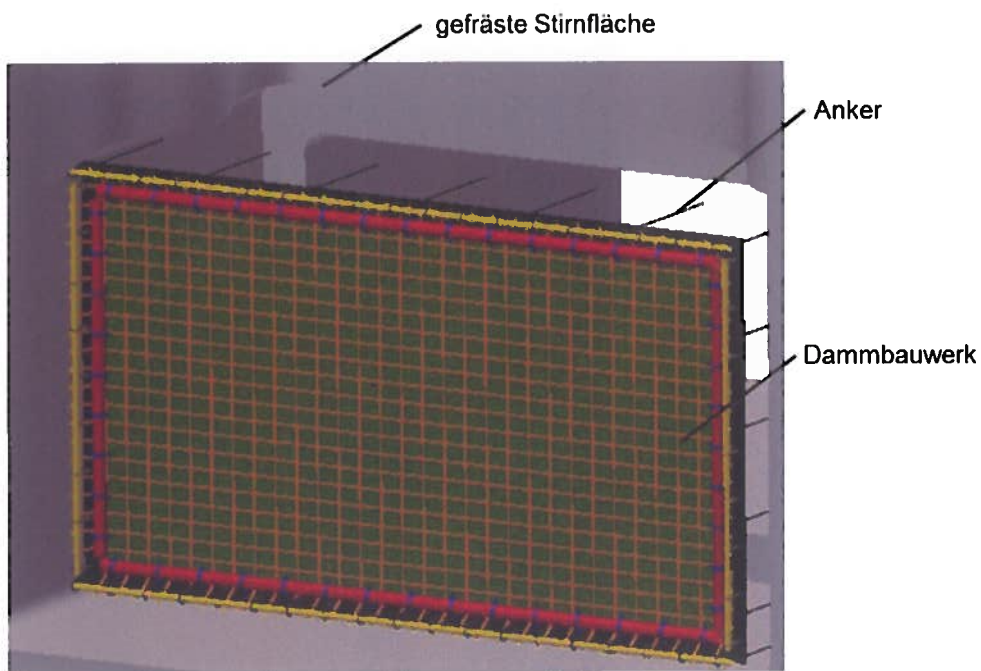


Abbildung TUC 26: Dammbauwerk in Rahmenbauweise vor Befestigung

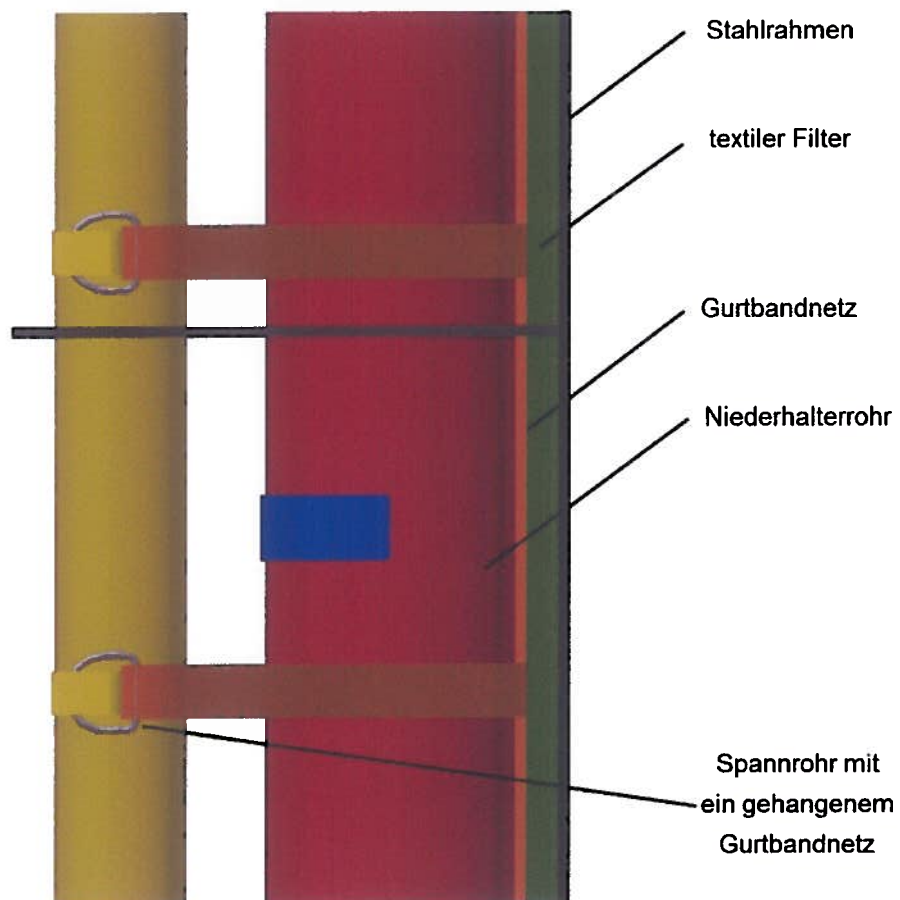


Abbildung TUC 27: Aufbau Dammbauwerk in Rahmenbauweise

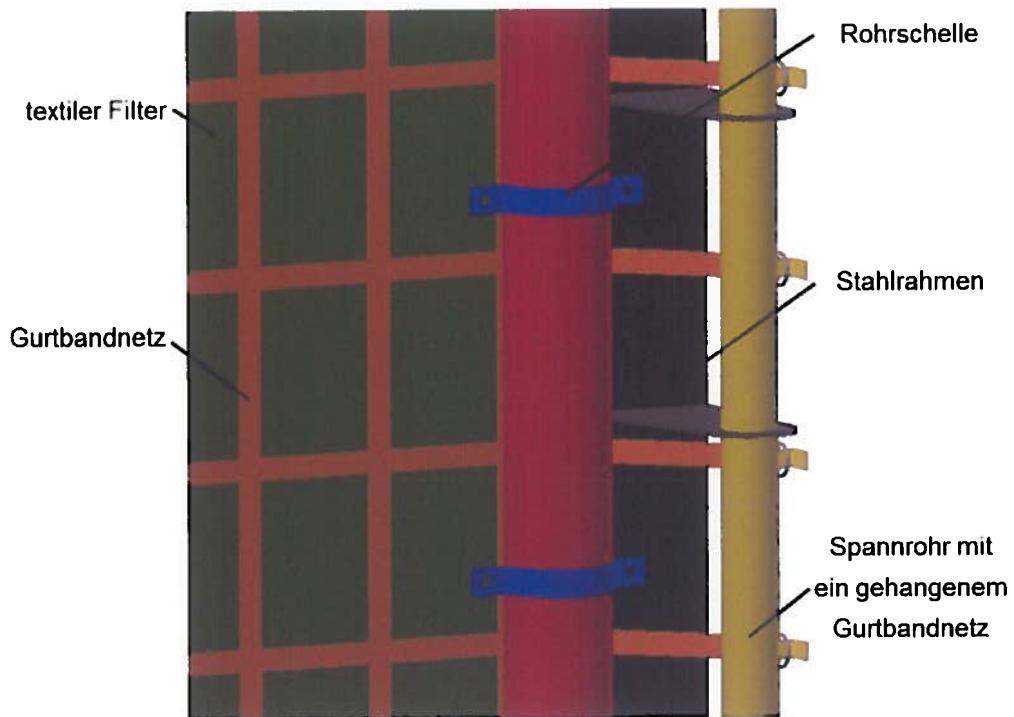


Abbildung TUC 28: Aufbau Dammbauwerk in Rahmenbauweise

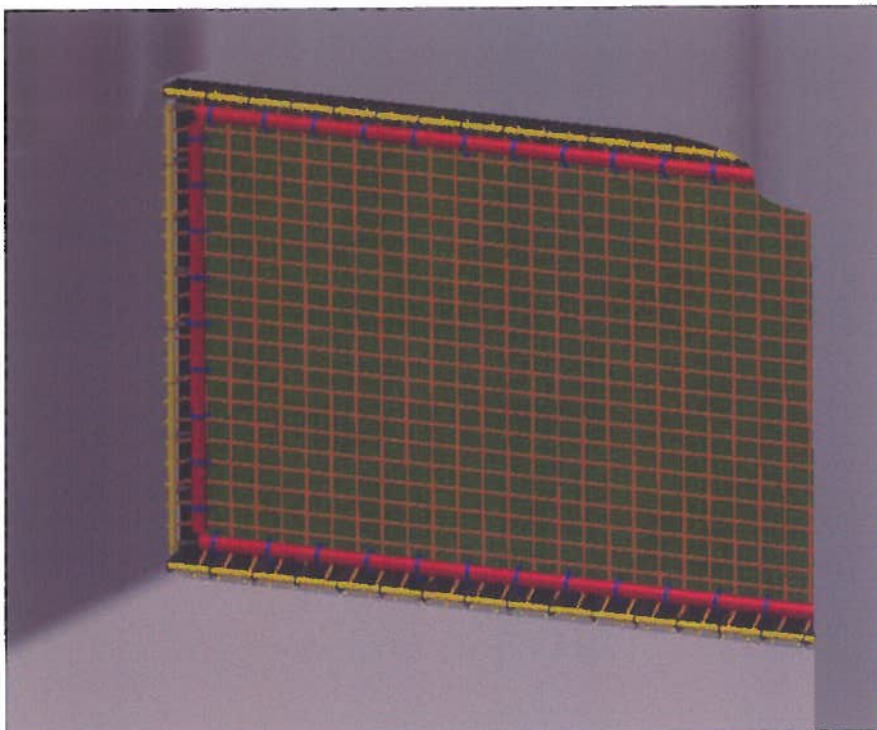


Abbildung TUC 29: Dammbauwerk in Rahmenbauweise, befestigt



Abbildung TUC 30: Gurtbandnetz ein gehangen

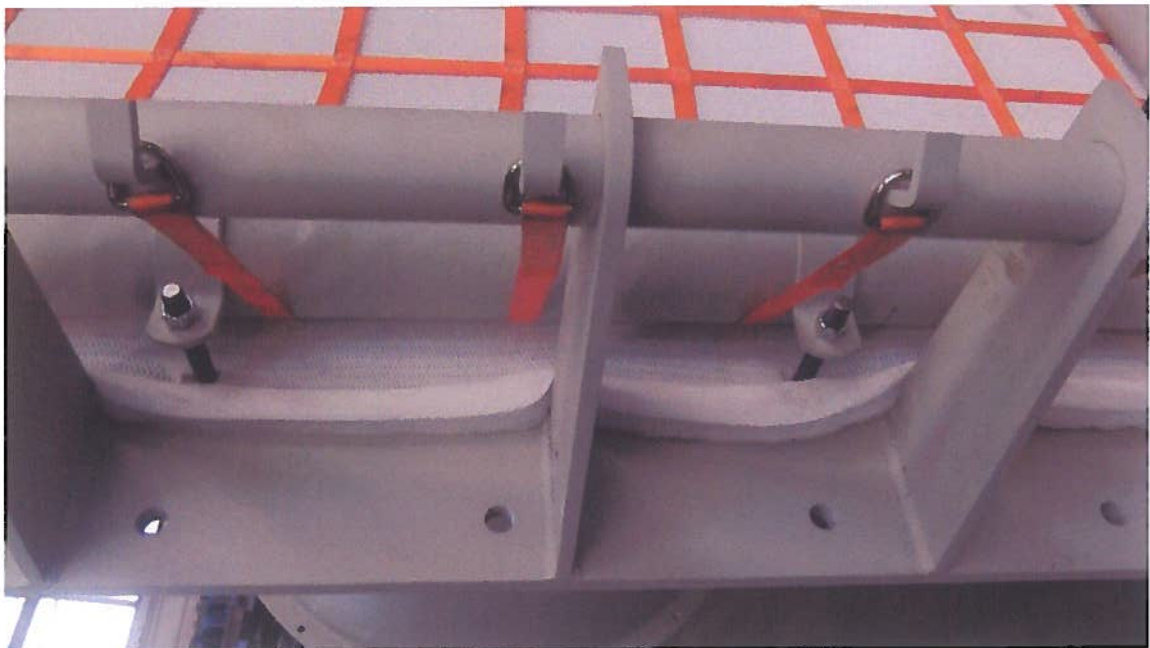


Abbildung TUC 31: Detail D-Ring-Aufnahme



Abbildung TUC 32: Detail Ecke und Gesamtansicht

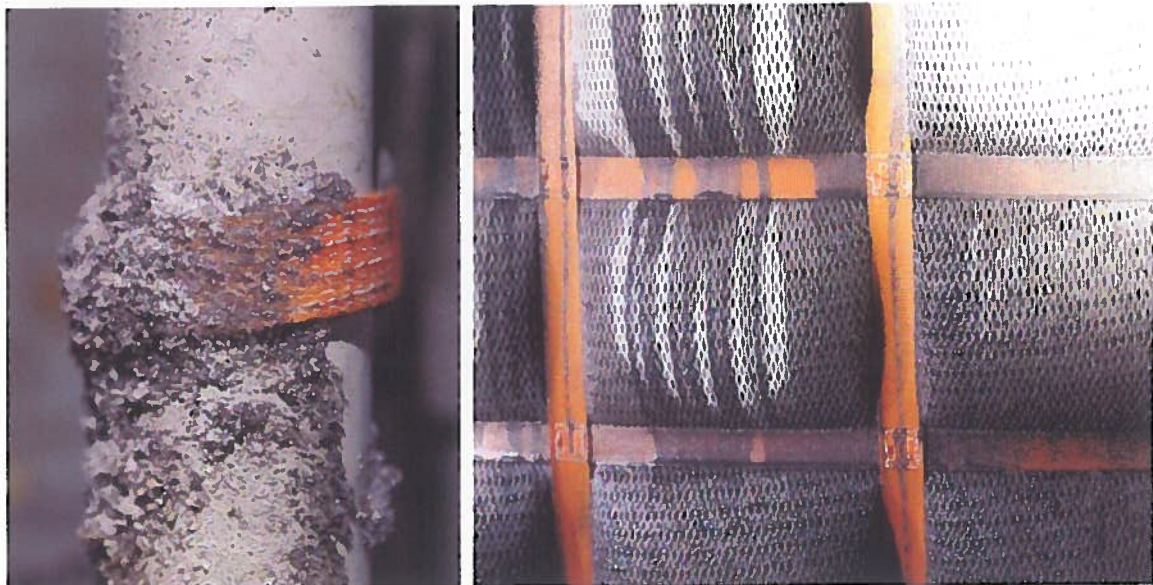


Abbildung TUC 33: Detail verschmutztes Gurtbandnetz

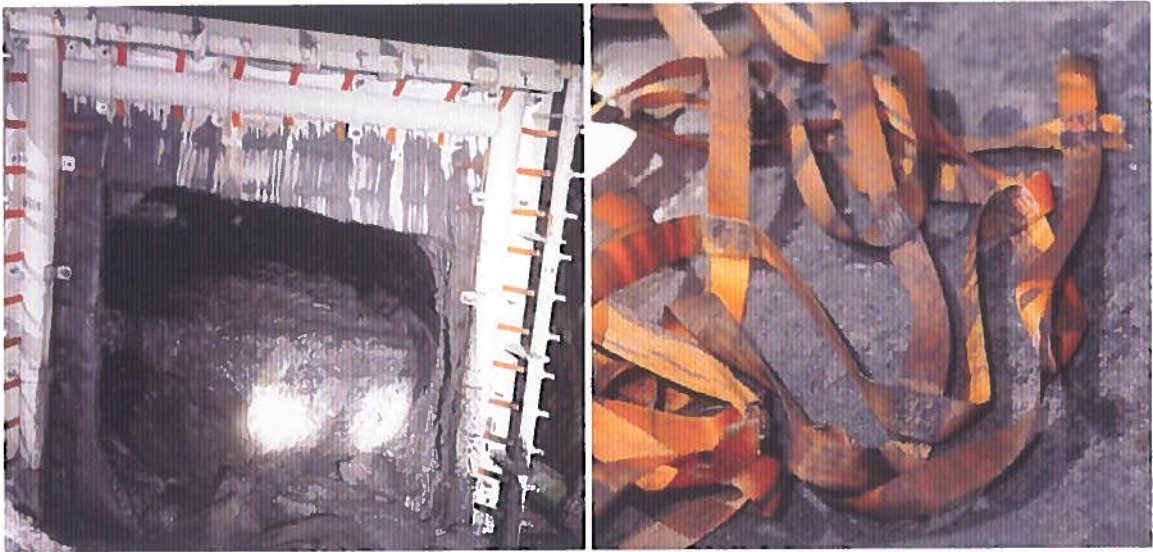


Abbildung TUC 34: herausgetrenntes Gurtbandnetz

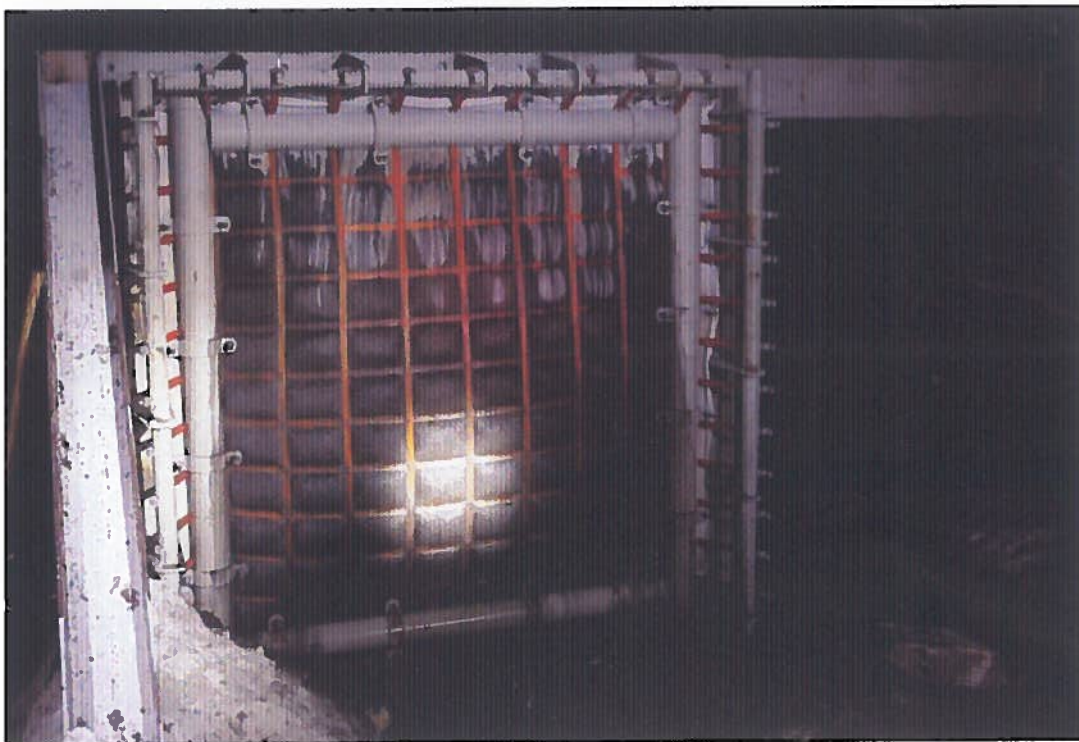


Abbildung TUC 35: Gesamtansicht Prüfstand unter Tage



Abbildung TUC 34: herausgetrenntes Gurtbandnetz

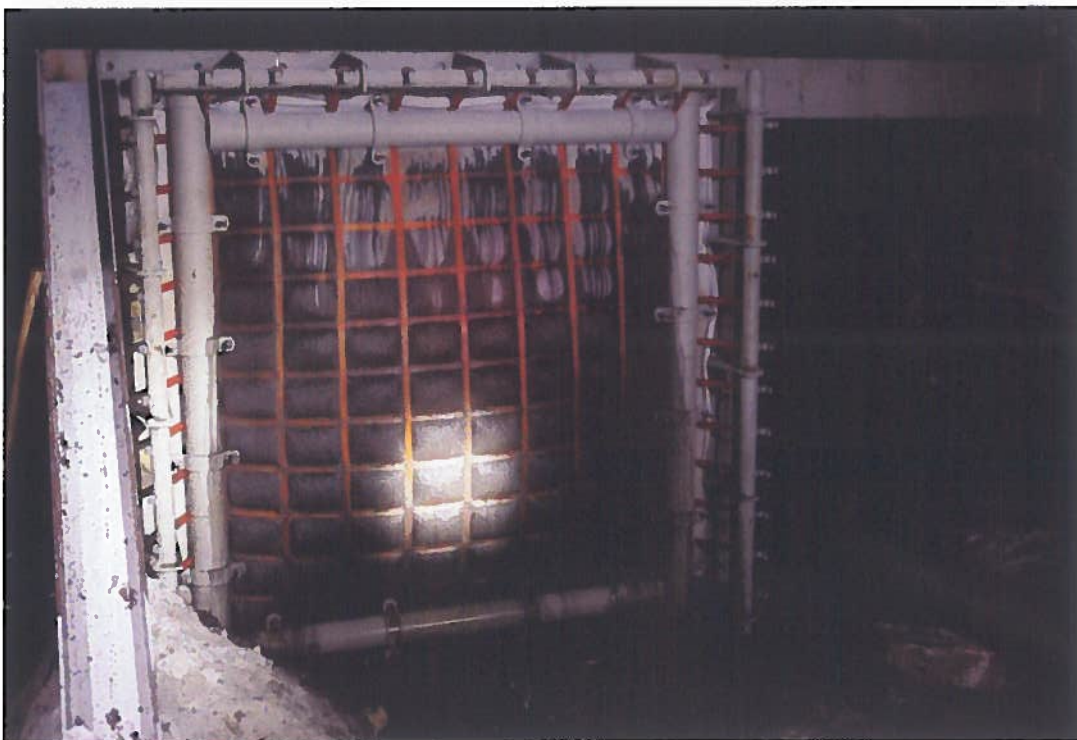


Abbildung TUC 35: Gesamtansicht Prüfstand unter Tage



Abbildung TUC 36: Rundbogenmauer

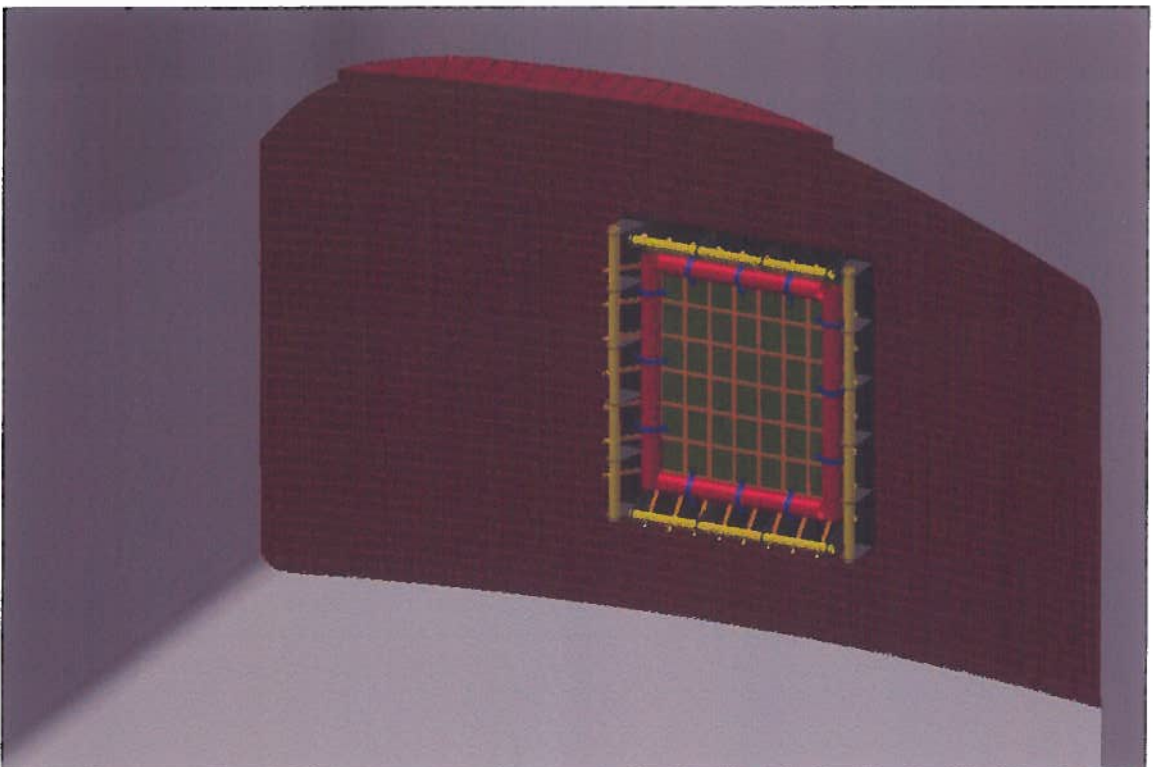


Abbildung TUC 37: Hybriddammbauwerk

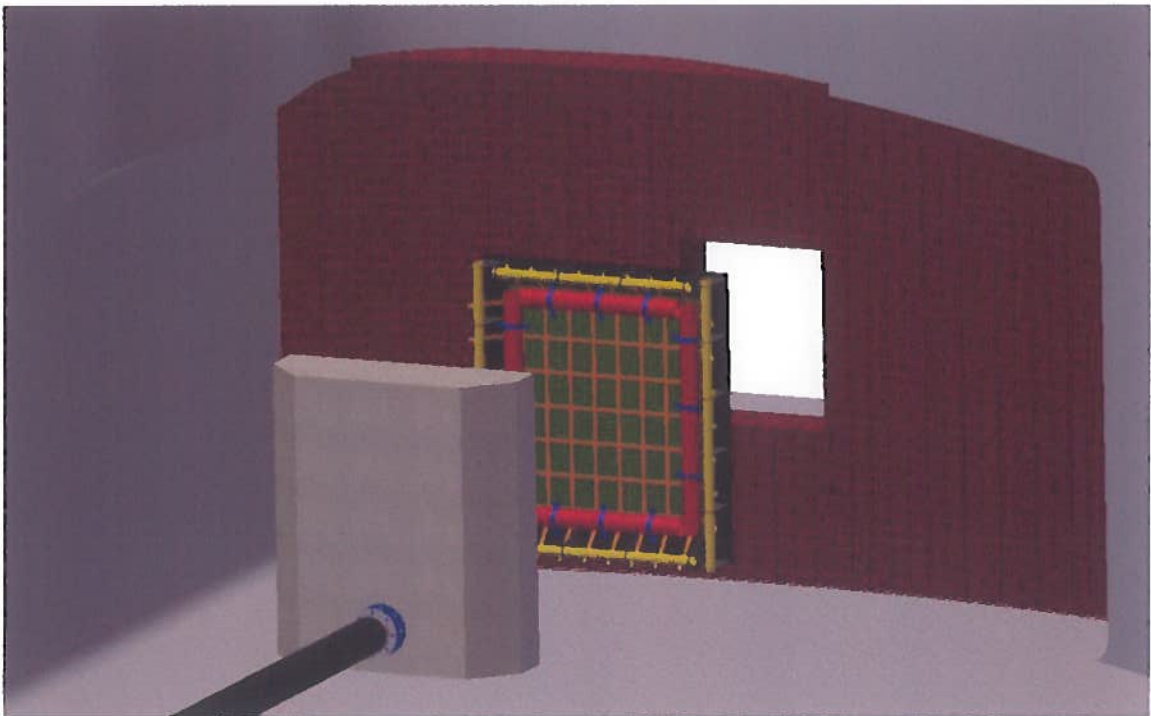


Abbildung TUC 38: Hybriddammbauwerk mit Schieber

Standort	Betreiber	Stapelversatz	Schüttgutversatz	hydraulischer Versatz	Sturzversatz	Entsorgungskapazität [t/a]
Kochendorf	UEV ^{*1}	Big Bags	X	-	-	-
Sondershausen	GSES	Big Bags	X	X ^{*2}	-	300.000
Hattorf	K+S	Big Bags	-	-	-	150.000
Wintershall	K+S	Big Bags	-	-	-	240.000
Unterbreizbach	K+S	-	-	X ^{*3}	-	260.000
Bernburg	K+S	-	-	-	X	250.000
Zielitz	K+S	-	-	-	X	60.000
Bleicherode	NDH-E	-	-	X ^{*2}	-	300.000
Sollstedt	NDH-E	Big Bags	-	-	-	100.000
Teutschenthal	GTS	Big Bags	X	X ^{*3}	-	300.000
Wohlvenwahrt-Nammen	Barbara Erzbergbau	-	X	-	-	-
Stetten	Wacker Chemie	Big Bags, Fässer	X	-	-	40.000
Staßfurt ^{*4}	Minex	-	-	X ^{*3}	-	170.000

^{*1}Tochter der Südwestdeutschen Salzwerke, ^{*2}mit Lauge und Suspension, ^{*3}Dickstoffversatz, ^{*4}Kaverne

Abbildung TUC 39: Versatzbergwerke in Deutschland

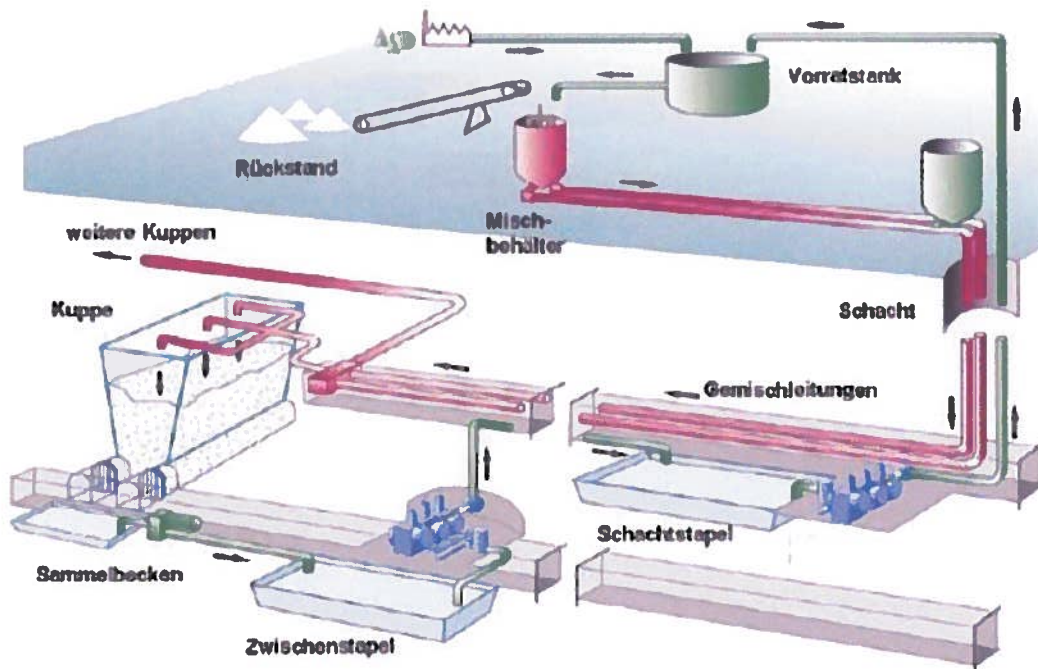


Abbildung TUC 40: Spülversatzanlage K+S [Kali und Steinsalz Heft 2/2005]

Unternehmen	Anzahl der Bergwerke	Produktionskapazität [Mio. t/a]
Canpotex (PotashCorp, Mosaic, Agrium)	10	29 (15+11+3)
Uralkali	5	12
Belaruskali	6	10
K+S	6 (9)	5

Abbildung TUC 41: Kalibergwerke

Nr.	Anforderung	Quantifizierung	FW
		Bearbeiter	A. Felber
		Datum	30.03.2015
		Version	1.1
	Anforderungsliste Bleicherode		
1	Lufttemperatur unter Tage:	24°C	
2	Luftfeuchte im Spülfeld am Damm:	80%	
3	chemische Zusammensetzung Wirtagestein:		
	1. Hartozal		
	anhydritisch (Prozentangaben beziehen sich auf Sollstedt)		
	Halit (NaCl)	50% - 60%	
	Sylvin (KCl)	20% - 30%	
	Anhydrit (CaSO ₄)	10% - 30%	
	kieseritisch		
	Sylvin (KCl)		
	Kieserit (MgSO ₄ · H ₂ O)		
	Halit (NaCl)		
	2. Steinsalz		
	Halit (NaCl)		
	3. Camallit		
	Camallit (KCl · MgCl ₂ · 6H ₂ O)		
	Halit (NaCl)		
4	chemische Zusammensetzung Versatz		
	siehe Anlage 1		
5	chemische Zusammensetzung Lauge		
	siehe Anlage 2		
6	Temperatur Suspension (Lauge + Versatz)	25°C - 55°C	
7	Dauer bis zur vollständigen Aushärtung		
	nicht angebar aber		
	Dauer bis zur Begehbarkeit (Auflast 5,0 N/cm ²)	28d	
8	Gesamteinsatzdauer des Dammbauwerkes		
	bis zum endgültigen Aushärten des Versatzgutes - Damm wird nicht zurückgebaut		
9	Versatzregime:		
	Volumenstrom	(250 - 350)m ³ /h	
	Versatzintervalle/-zyklen	600m ³ /d	
10	geodätische Höhe der Kammer (entspr. stat. Druck)	bis 20m	
11	Filtereigenschaften		
	siehe Anlage 3		
12	Konvergenz	2mm/Monat	
13	Korngrößenverteilung	0-20mm	
	d50-Wert:	5 - 250 µm	
	Größtkorn:	< 30 mm	
	(übertägige Abtrennung)		
14	Querschnitt zu füllende Kammer	ca. 20m ²	
15	maximale Neigung	15%	
16	Kornform	variabel	
17	Dichte Spülversatz (Lauge + Versatzstoffe)	ca. 1,8 kg/dm ³ 1,40-1,50 g/cm ³	

Erklärung: F - Forderung; W - Wunsch

Die folgende Tabelle 1 gibt die Mittelwerte sowie Schwankungsbreiten der Hauptbestandteile und toxikologisch relevanten Parameter der aktuellen Spülversatzrezeptur für die Betriebsstätte Sollstedt an. Der Salzgehalt (siehe Pkt. 3) der mit 70 Ma-% enthaltenen Traglösung wurde mit eingerechnet.

Tabelle 1: Zusammensetzung der aktuellen Spülversatzrezeptur

Parameter	Dimension	Mittelwert	Minimum	Maximum
Ammonium	mg/kg	42	3,1	177
Phosphat	%	0,5	0,1	2,7
CaSO ₄	%	4,6	2,0	7,5
CaCO ₃	%	1,9	0,2	9,1
CaCl ₂	%	6,3	5,1	9,4
CaO	%	5,5	2,6	10,7

Parameter	Dimension	Mittelwert	Minimum	Maximum
MgO	%	0,6	0,3	0,9
MgCl ₂	%	5,7	5,7	5,7
Alkalisalze	%	13,7	11,8	18,1
Al ₂ O ₃	%	1,3	0,5	1,9
Fe ₂ O ₃	%	0,9	0,3	2,6
SiO ₂	%	5,3	2,0	8,8
HCl-Unlösliches	%	1,1	0,4	1,8
TOC (einschl. C _{elementar})	%	0,4	0,1	1,1
Wasser ¹	%	49,4	49,4	49,4
Antimon	mg/kg	210	15	474
Arsen	mg/kg	9,0	3,4	27
Barium	mg/kg	198	40	500
Beryllium	mg/kg	0,2	0,1	0,8
Blei	mg/kg	1.124	223	2.068
Bor	mg/kg	55	29	105
Cadmium	mg/kg	57	7,3	128
Chrom	mg/kg	59	24	155
Chrom(VI) als CrO ₃	mg/kg	2,7	0,1	15
Cobalt	mg/kg	8,2	2,8	14
Kupfer	mg/kg	341	64	1.106
Mangan	mg/kg	265	153	619
Molybdän	mg/kg	7,0	2,1	22
Nickel	mg/kg	32	10	65
Quecksilber	mg/kg	1,2	0,1	3,7
Selen	mg/kg	1,6	0,1	5,3
Thallium	mg/kg	0,4	0,1	0,8
Vanadium	mg/kg	14	6,1	56
Zink	mg/kg	4.347	835	7.989
Zinn	mg/kg	108	44	255
2,3,7,8-TCDD	ng/kg	19	1,0	123
Summe 17 PCDD/F	ng/kg	6.145	129	43.870
I-TE-Wert (NATO)	ng/kg	220	12	1.058
I-TE-Wert (WHO, 2005)	ng/kg	211	12	1.026
SiO ₂ krist. < 125 µm	%	0,3	0,3	0,3

¹ Berechnet auf Grundlage eines H₂O-Gehaltes der Anmischflüssigkeit von 880 g/l bei Vernachlässigung der als Trockenverlust bestimmten Feuchte der Abfälle.

Angabe K-UTEC:

In Tabelle 2 ist die durchschnittliche Zusammensetzung der aktuell verwendeten Anmischflüssigkeit dargestellt.

Tabelle 2 Zusammensetzung der Anmischflüssigkeit

Parameter	Dimension	Anmischflüssigkeit
Dichte	g/cm³	1,258
pH-Wert	-	6,7
CaSO₄	g/l	0,4
CaCl₂	g/l	100
MgSO₄	g/l	< 0,1
MgCl₂	g/l	92
KCl	g/l	62
NaCl	g/l	110
H₂O	g/l	868

Angabe NOME (Messung):

Laugenzusammensetzung

Laugensammensetzungen über Tage (Mittelwerte über 5-Tage)

Parameter	Ein	01.07	02.07	03.07	04.07	05.07	06.07	07.07	08.07	09.07	10.07	11.07	12.07	13.07	14.07	15.07	16.07	17.07	18.07	19.07	20.07	21.07	22.07	23.07	24.07	25.07	
Dichte	g/cm³	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
CaSO₄	g/l	0,00	0,00	0,00	0,14	0,14	0,20	0,27	0,13	0,24	0,30	0,19	0,11	0,20	0,27	0,27	0,16	0,11	0,22	0,24	0,15	0,21	0,23	0,20	0,20	0,20	
CaCl₂	g/l	100,00	116,00	124,00	136,00	147,00	160,00	170,00	176,00	182,00	187,00	192,00	197,00	202,00	207,00	212,00	217,00	222,00	227,00	232,00	237,00	242,00	247,00	252,00	257,00	262,00	267,00
MgSO₄	g/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgCl₂	g/l	220,00	225,00	230,00	235,00	240,00	245,00	250,00	255,00	260,00	265,00	270,00	275,00	280,00	285,00	290,00	295,00	300,00	305,00	310,00	315,00	320,00	325,00	330,00	335,00	340,00	345,00
KCl	g/l	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
NaCl	g/l	100,00	110,00	120,00	130,00	140,00	150,00	160,00	170,00	180,00	190,00	200,00	210,00	220,00	230,00	240,00	250,00	260,00	270,00	280,00	290,00	300,00	310,00	320,00	330,00	340,00	350,00
H₂O	g/l	860,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00	870,00
pH	ppm	10,00	10,10	10,20	10,30	10,40	10,50	10,60	10,70	10,80	10,90	11,00	11,10	11,20	11,30	11,40	11,50	11,60	11,70	11,80	11,90	12,00	12,10	12,20	12,30	12,40	12,50
Ca	ppm	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
pH-Wert	ppm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Angabe K-UTEC:

Die folgende Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Parameter der Ablaflösung bei Einsatz der aktuellen Spülversatzrezeptur.

Tabelle 3 Kennwerte der Ablaflösung

Parameter	Dimension	Mittelwert	Minimum	Maximum
Fluidablauf	%	55,9	41,9	71,0
Dichte	g/cm³	1,278	1,269	1,288
pH-Wert	-	8,3	7,1	10,5

Parameter	Dimension	Mittelwert	Minimum	Maximum
MgCl₂	g/l	29,3	< 0,1	85,8
CaCl₂	g/l	196,2	142,1	226,5
NaCl	g/l	100,6	69,9	132,0
KCl	g/l	84,6	69,4	93,1
H₂O	g/l	867,0	859,9	875,3

Abbildung TUC 42: Anforderungsliste inklusive Anhänge

3 Abbildungen STFI



Abbildung STFI 1: Stempeldurchdrückversuch – Versuchsdurchführung



Abbildung STFI 2: Stempeldurchdrückversuch – Probe nach der Prüfung



Abbildung STFI 3: Technikumsversuch mit STFI-Filtertextilien beim Projektpartner K-UTEC AG Salt Technologies



Abbildung STFI 4: Abstandsgewirke zum Einbau als textiler Filter in das Versuchssystem für die Insituversuche unter Tage

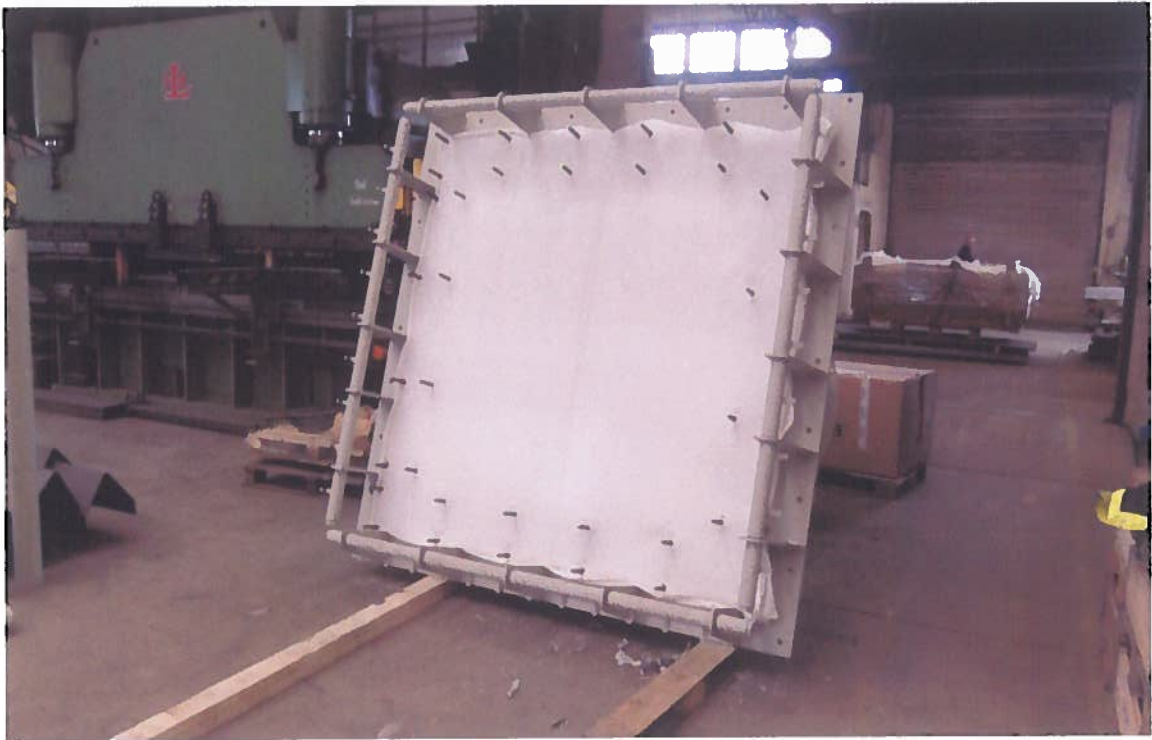


Abbildung STFI 5: Einbau der Abstandsgewirke in die Aufnahmevorrichtung



Abbildung STFI 6: Einbau der Abstandsgewirke in die Aufnahmevorrichtung



Abbildung STFI 7: Einbau der Abstandsgewirke in die Aufnahmevorrichtung



Abbildung STFI 8: Einbau der Abstandsgewirke in die Aufnahmevorrichtung



Abbildung STFI 9: Einbau der Versuchsanordnung unter Tage



Abbildung STFI 10: Einbau der Versuchsanordnung unter Tage

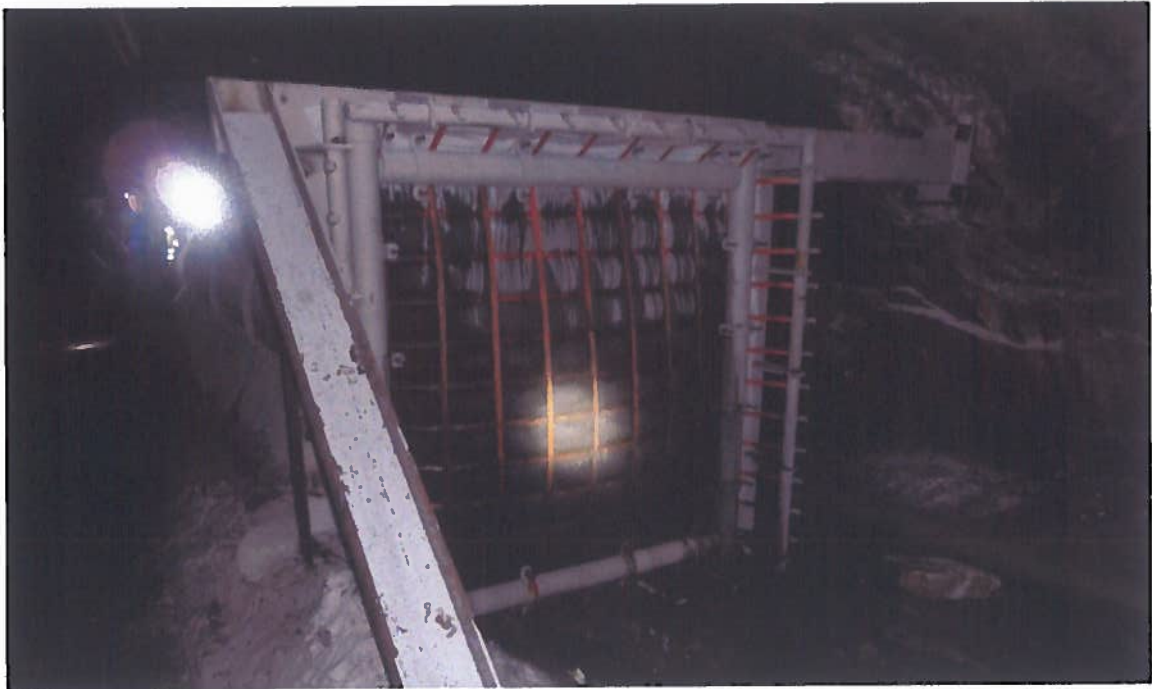


Abbildung STFI 11: Versuchsanordnung des textilen Absperrsystems unter Tage

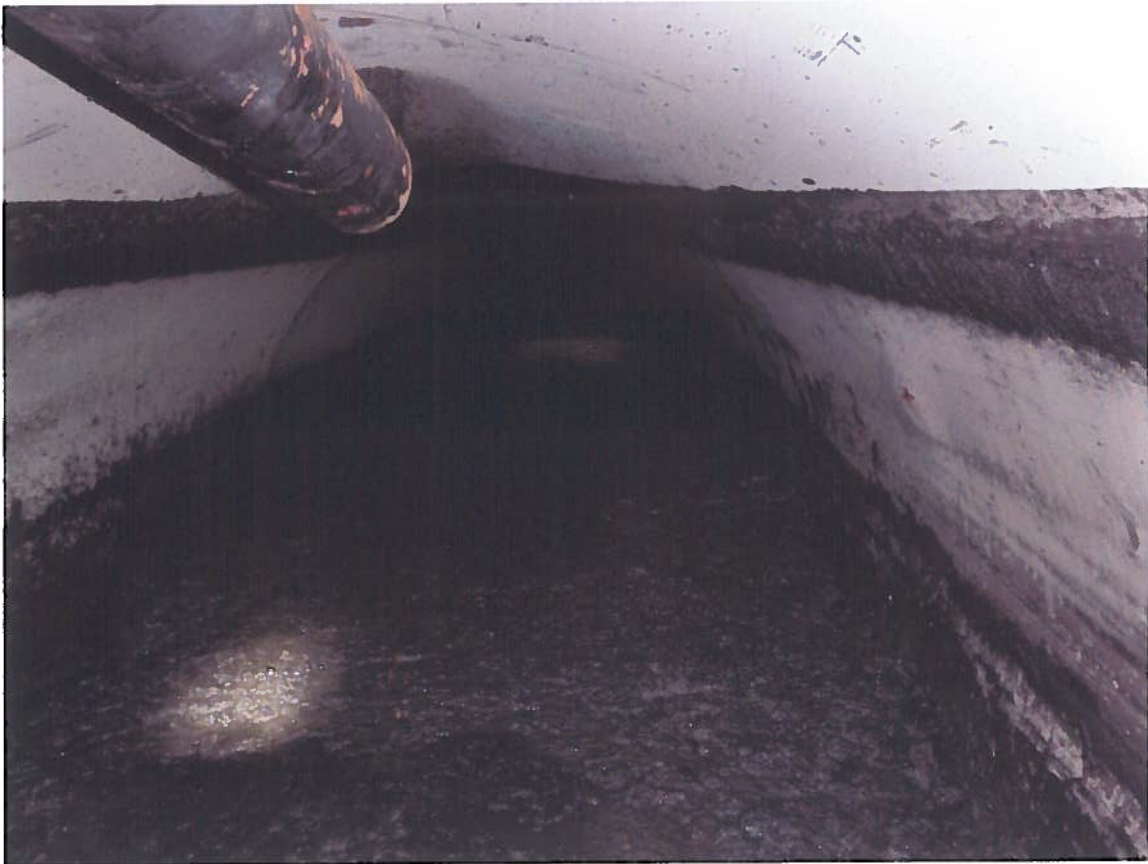


Abbildung STFI 12: Versatzmasse in der Versuchsanordnung unter Tage

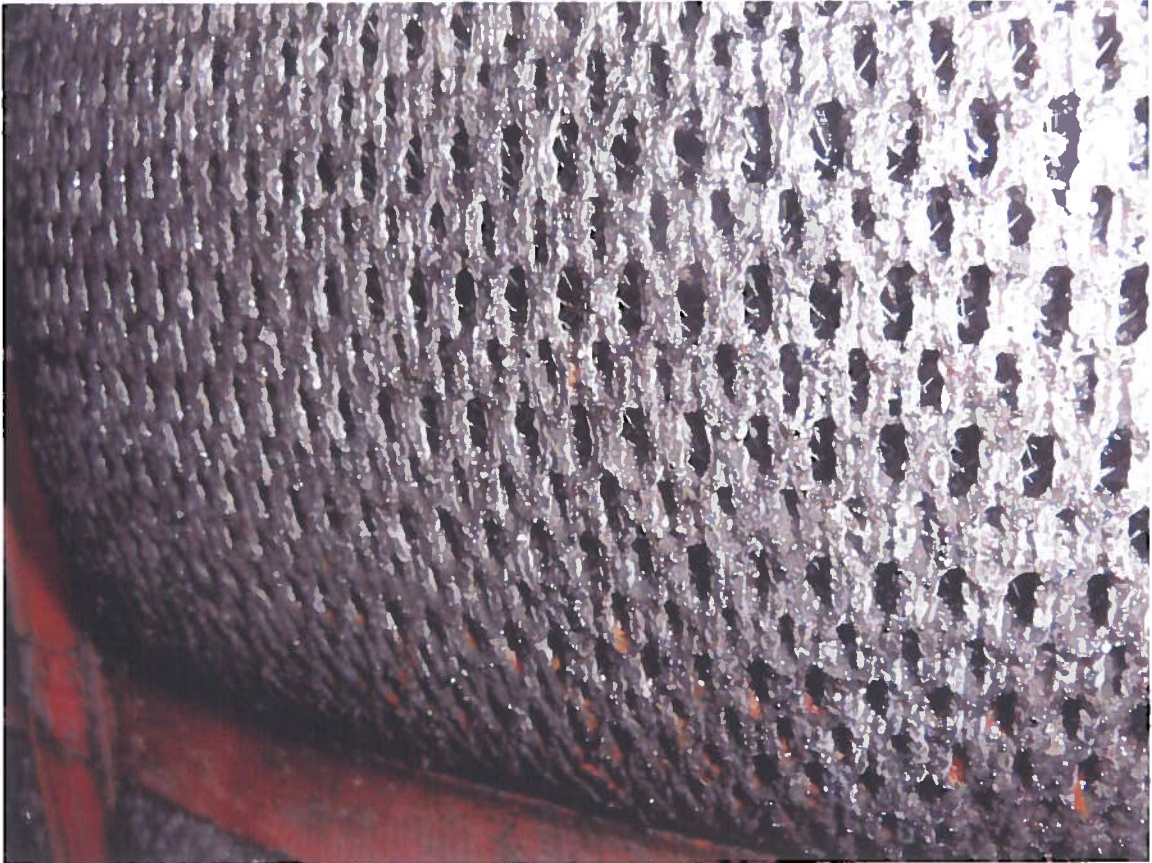


Abbildung STFI 13: Filter wurde während der Versuchsdauer nicht von Schlamm durchsetzt



Abbildung STFI 14: Drainagewirkung blieb während der Versuchsdauer erhalten



Abbildung STFI 15: Öffnung des textilen Absperrsystems nach Versuchsende



Abbildung STFI 16: Suspension / Versatzmasse – größtenteils ausdrainiert

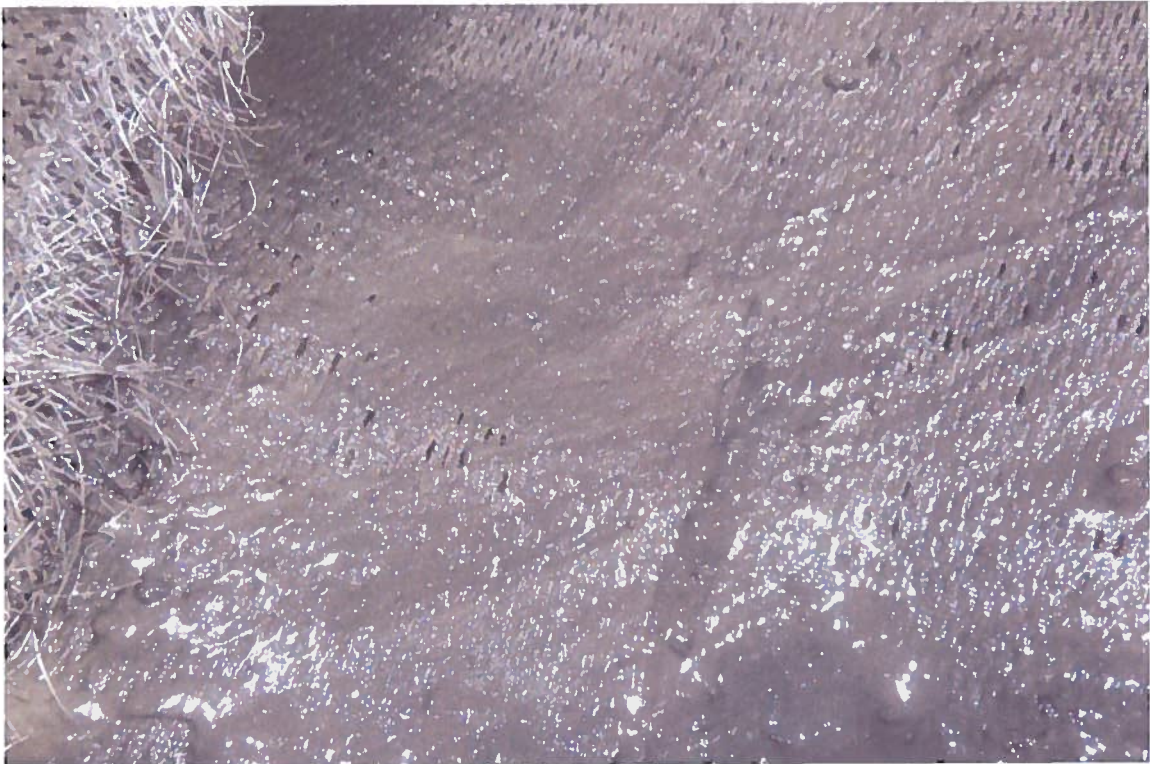


Abbildung STFI 17: Nur die Filterinnenseite wurde mit Schlamm benetzt



Abbildung STFI 18: Das Innere des Filters wurde nicht versetzt – Salzlauge konnte abfließen

4 Abbildungen KD



Abbildung KD 1: Stahlträger des Dammbauwerkes in der eingefräst Nut auf der Sohle der zu füllenden Abbaukammer



Abbildung KD 2: Übergang der eingefrästen Nut von der Sohle in den Stoß



Abbildung KD 3: am Stoß eingeschäumtes Seitenblech als Übergang Bauwerk/Gebirge

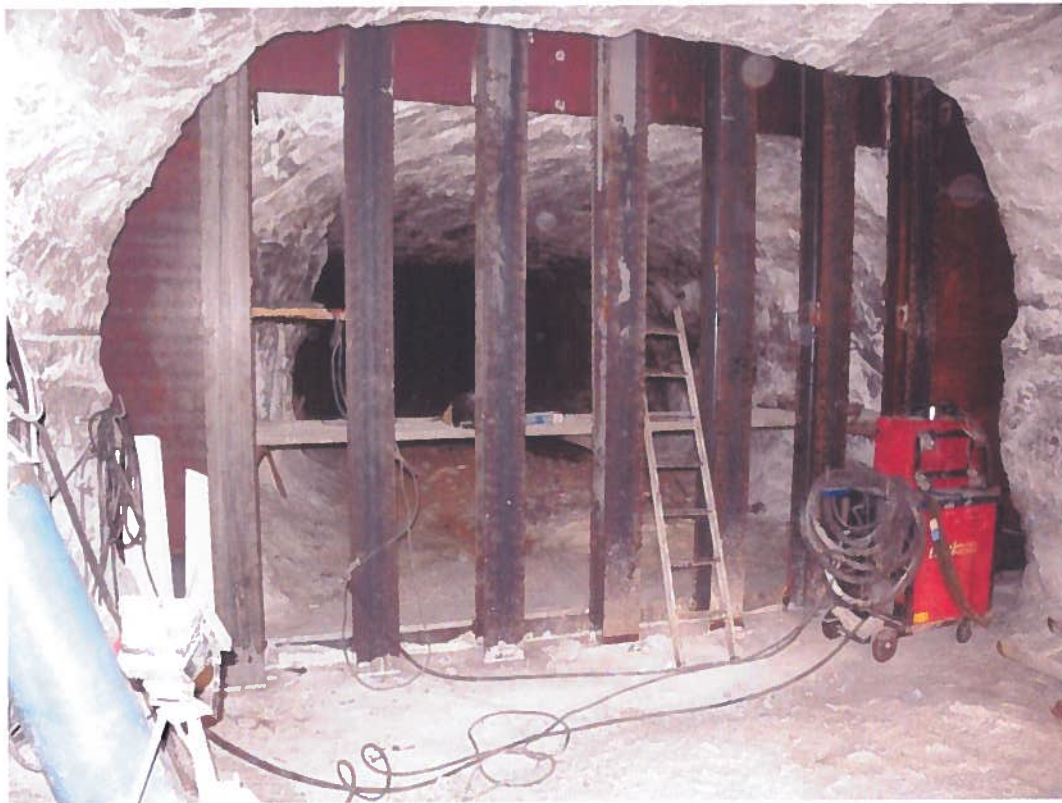


Abbildung KD 4: Rohbau Dammbauwerk, Stahlträger auf der Sohle mit Sorelbeton vergossen



Abbildung KD 5: Stahlbau Dammbauwerk mit aufgesetzten Lochblechen



Abbildung KD 6: Dammbauwerk aus Big Bags aufgetürmt mit Drainageschlauch



Abbildung KD 7: Rohbaufertigung bei KD Stahl



Abbildung KD 8: Befüllung mit Versatzsuspension im Labor von K-UTEC



Abbildung KD 9: Detailansicht

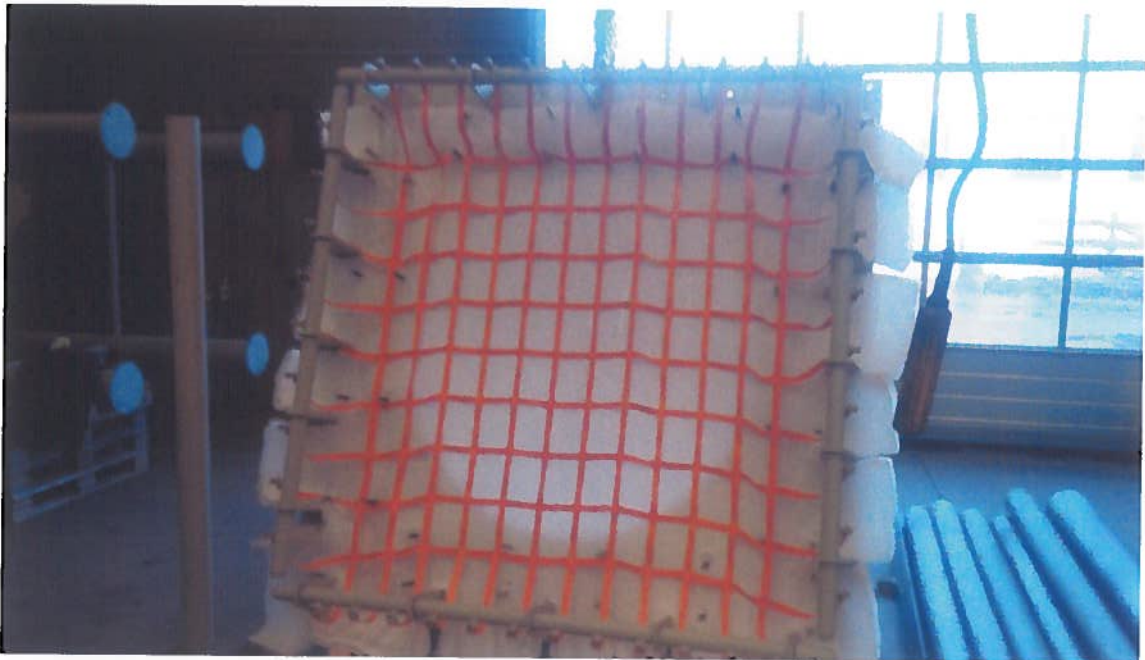


Abbildung KD 10: Auflegen Filtermaterial / Gurtbandnetz

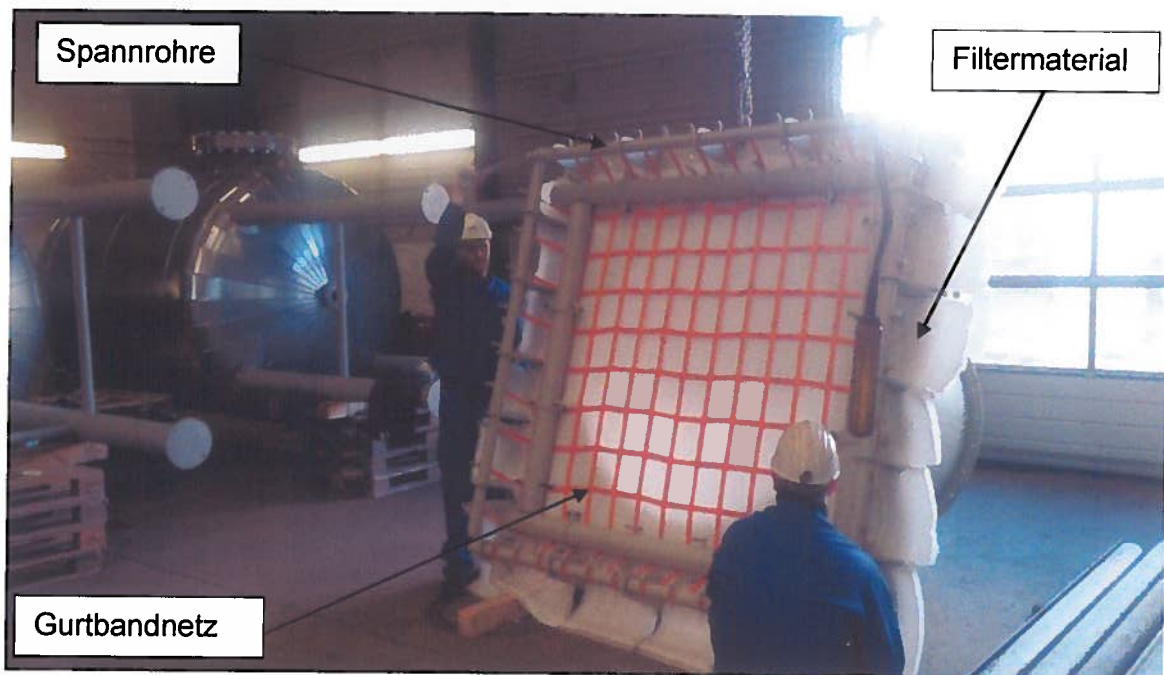


Abbildung KD 11: Spannen des Gurtbandnetzes

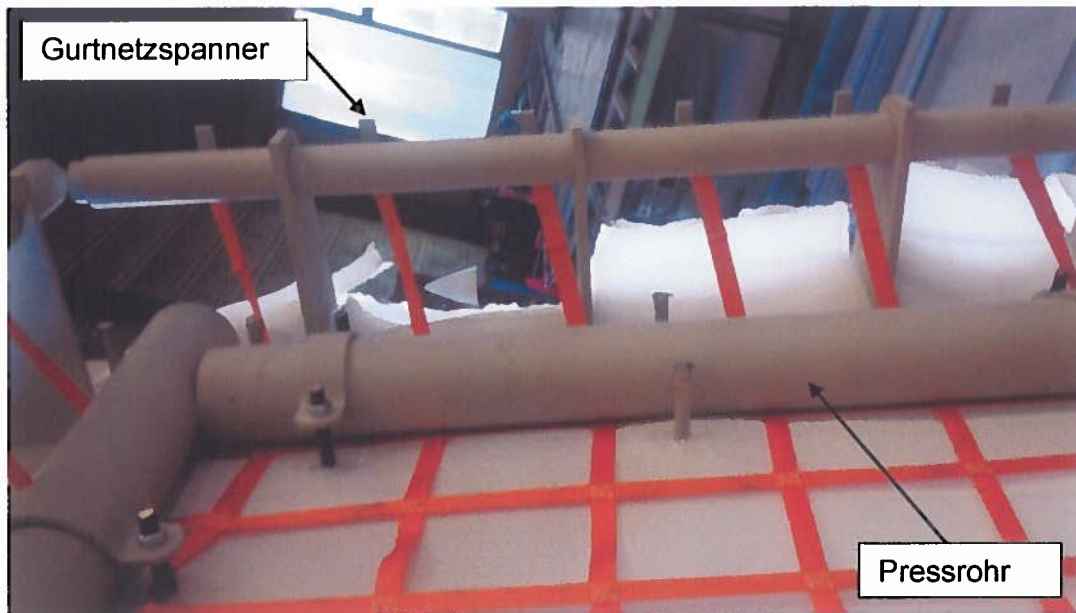


Abbildung KD 12: Anpressen des Filtermaterials



Abbildung KD 13: Kompletter Versuchsstand vor der Bepflüfung (Austragsseite)



Abbildung KD 14: Kompletter Versuchsstand vor der Bepflügelung (Einspülseite)



Abbildung KD 15: Suspensionshauptleitung mit Abzweig zum Standort der Versuchsanlage



Abbildung KD 16: Bypassleitung zum Standort der Versuchsanlage

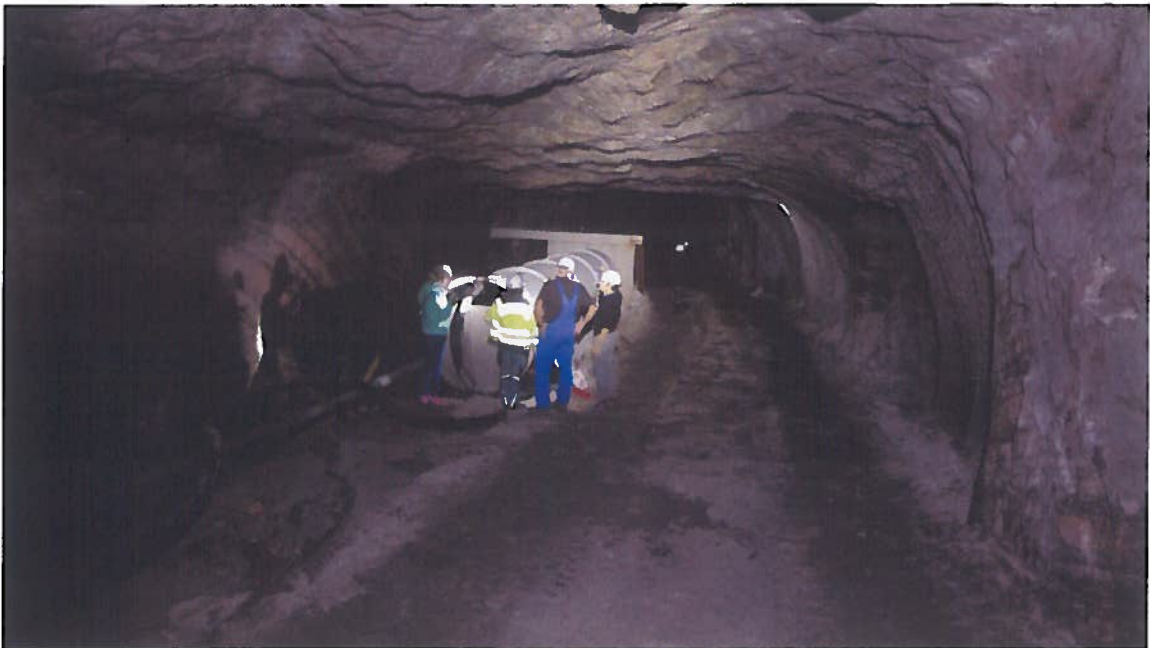


Abbildung KD 17: Reduzierter Versuchsstand mit Umfahrung für Großgeräte



Abbildung KD 18: Befüllen des Versuchsstandes

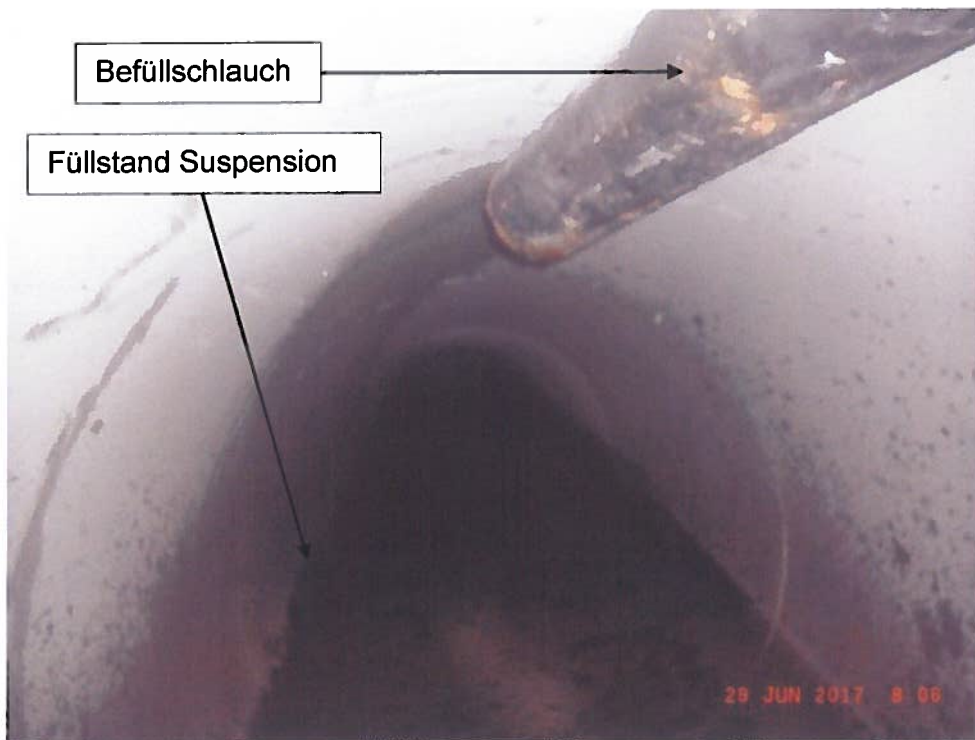


Abbildung KD 19: Zwischenfüllstand



Abbildung KD 20: Befüllung des Versuchsstandes I



Abbildung KD 21: Versuchsstand während der Drainage



Abbildung KD 22: Füllstand vor Öffnen des Filtertextils



Abbildung KD 23: Öffnen des Filtermaterials



Abbildung KD 24: Demontage Gurtbandnetz Filtermaterial



Abbildung KD 25: Versuchsanlage nach der Entnahme Gurtbandnetz und Filtermaterial



Abbildung KD 26: Probenentnahme von Material aus dem Suspensionsblock



Abbildung KD 27: Bemusterung Stahlbau



Abbildung KD 28: Bemusterung Spannen und Abdichten



Abbildung KD 29: Gemauerte Wand mit Drainagefenstern

5 Abbildungen K-UTEC



Abbildung K-UTEC 1: Laborversuchsstand für Filterversuche



Abbildung K-UTEC 2: gewonnenes Filtrat (links nach 15 min., rechts nach 30 min.)

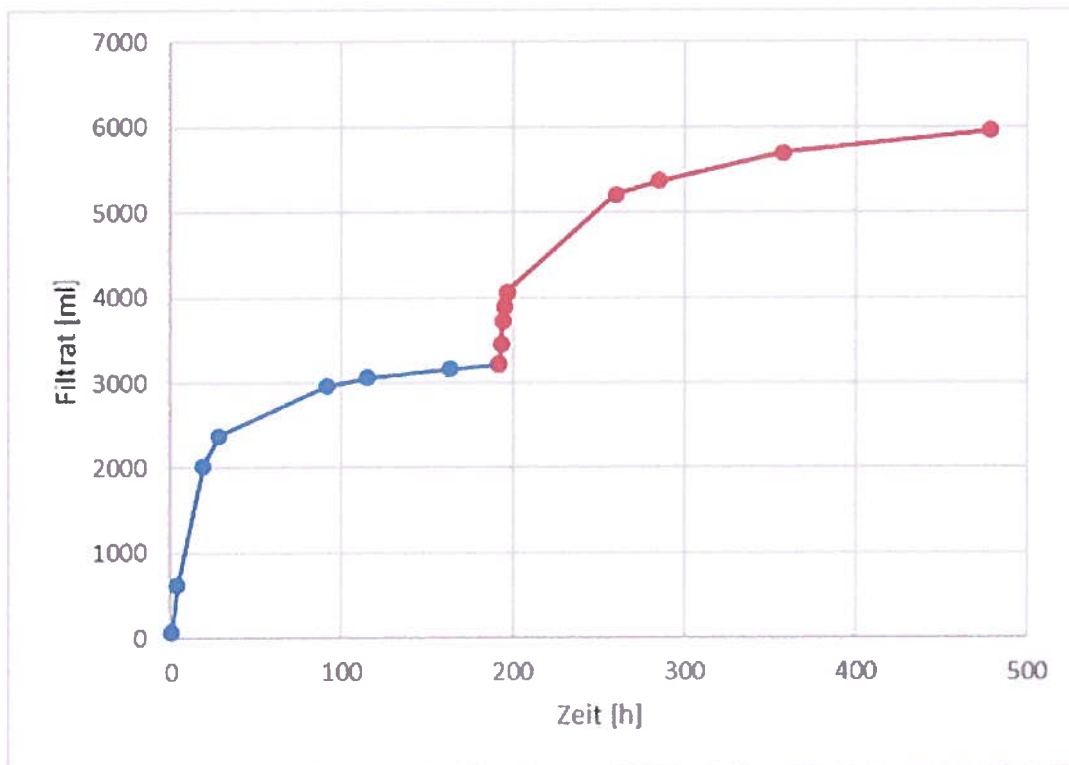


Abbildung K-UTEC 3: zeitlicher Verlauf des Technikumsversuches 2

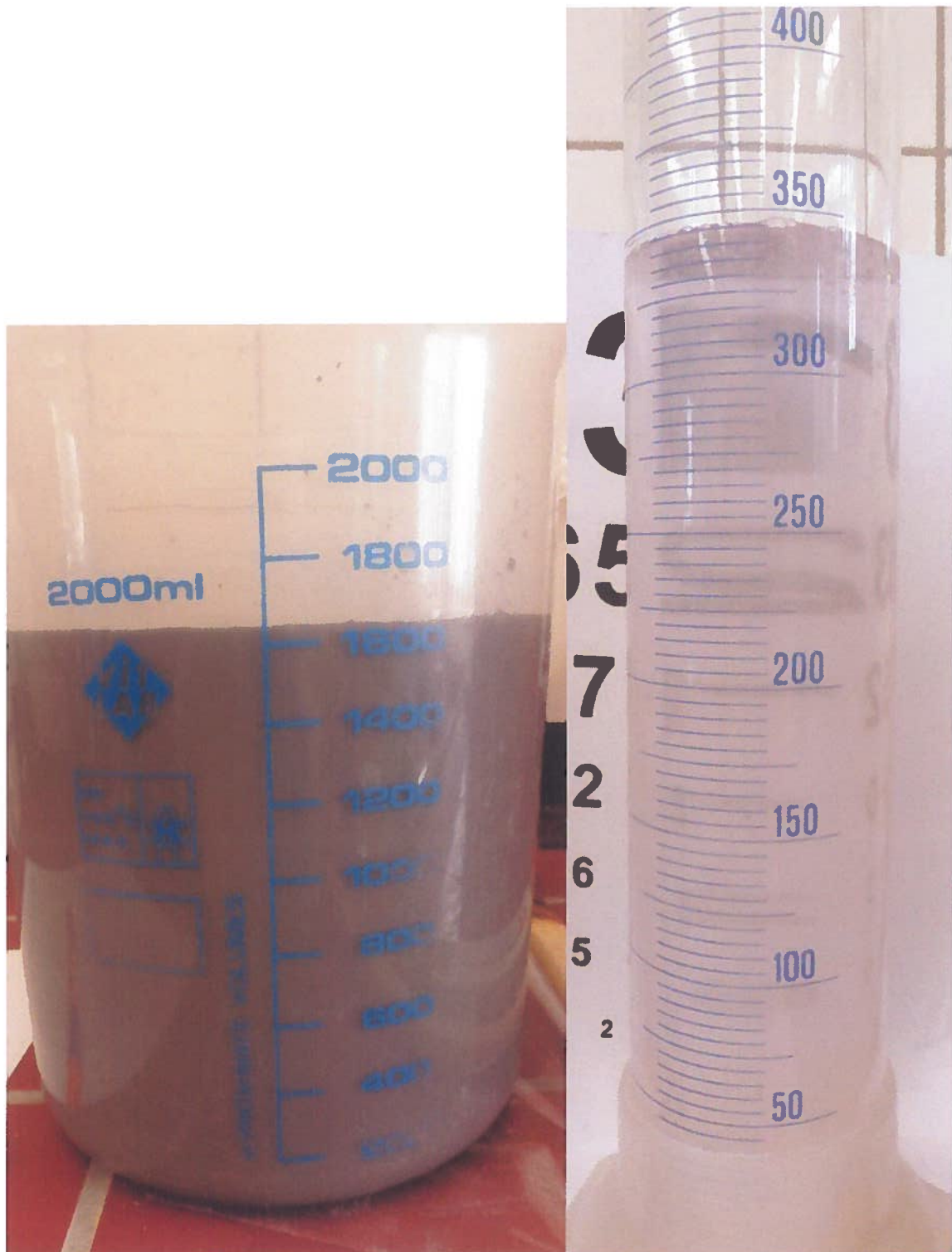


Abbildung K-UTEC 4: Filtrat Technikumsversuch 3 (links nach 15 min., rechts nach 30 min.)



Abbildung K-UTEC 5: Technikumsversuch 3 bei Beginn (vorne)



Abbildung K-UTEC 6: Technikumsversuch 3 nach ca. 5 Stunden mit aufstehender Lauge



Abbildung K-UTEC 7: Technikumsversuch 3 nach 4 Wochen (vorne)



Abbildung K-UTEC 8: Filter nach Beginn des Technikumsversuches 4

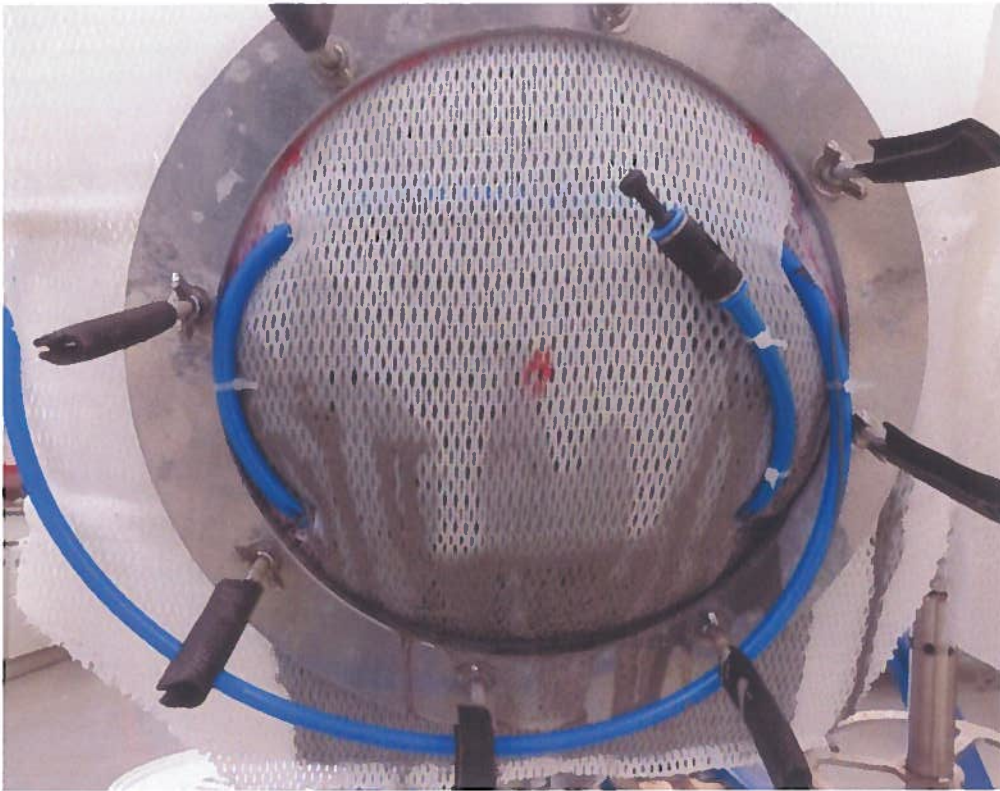


Abbildung K-UTEC 9: Filter nach Beginn des Technikumsversuches 5



Abbildung K-UTEC 10: Filtrat Technikumsversuch 4 (links nach 15 min., rechts nach 30 min.)

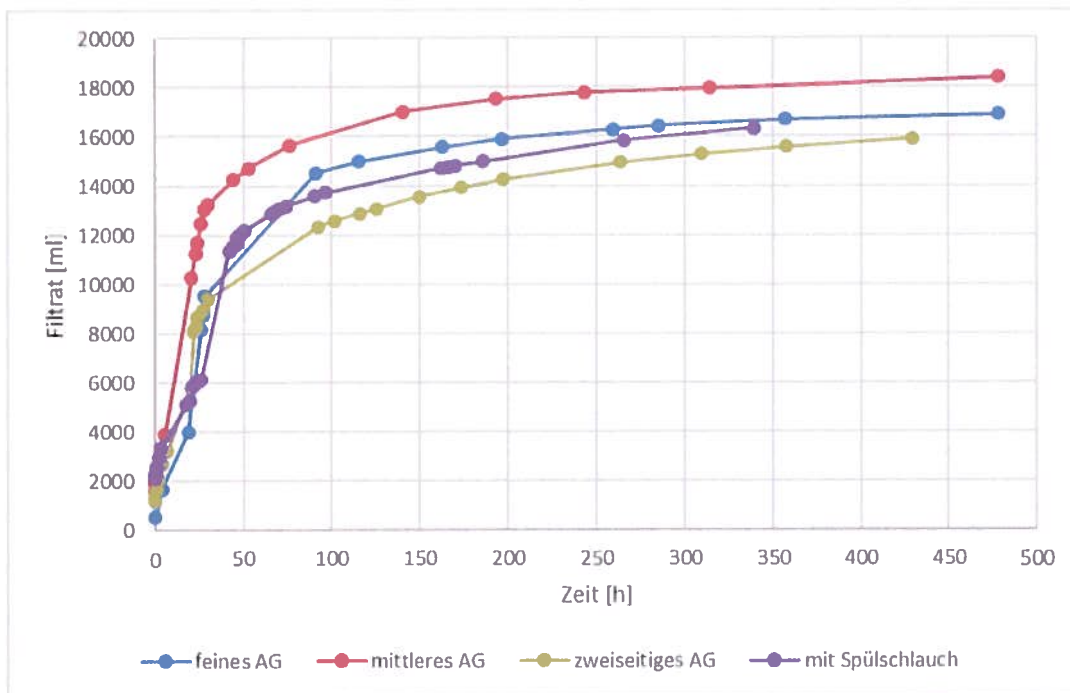


Abbildung K-UTEC 11: zeitlicher Verlauf der Technikumsversuche 1, 3, 4 und 5

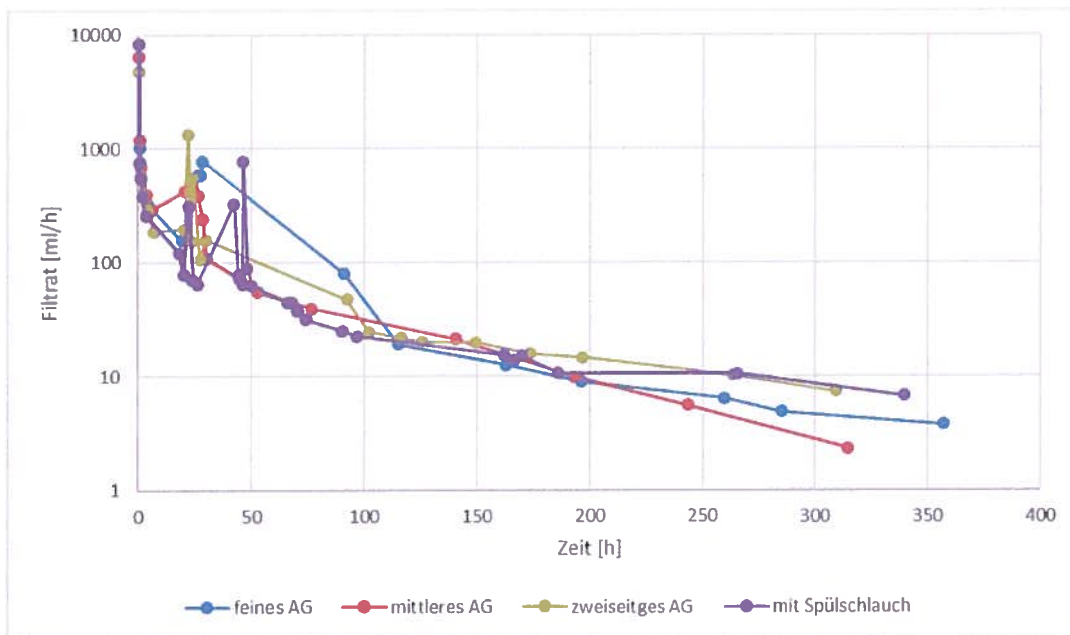


Abbildung K-UTEC 12: Filtriergeschwindigkeiten der Technikumsversuche 1, 3, 4 und 5

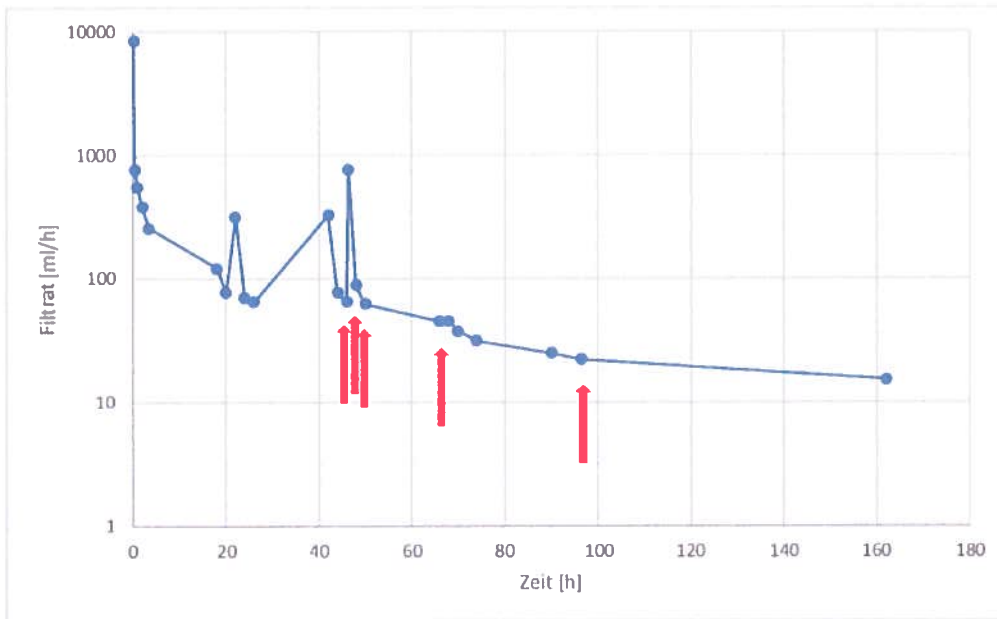


Abbildung K-UTEC 13: Filtriergeschwindigkeit bei Technikumsversuch 5, markiert sind die Spülvorgänge



Abbildung K-UTEC 14: oberes Rohrende mit Suspensionsschlauch



Abbildung K-UTEC 15: Übersicht Rohr und Filter



Abbildung K-UTEC 16: Detailansicht Filter mit Gurtnetz



Abbildung K-UTEC 17: Detailansicht ausdrainierende klare Lauge



Abbildung K-Utec 18: Filtrat Insituversuch (links: während Bepülung, rechts: nach ca. 30 min.)

Parameter	Dimension	Anmischflüssigkeit	Filtrat Versuch 1	Filtrat Versuch 2	Filtrat Versuch 3	Filtrat Versuch 4	Ablauf lösung
Dichte	g/cm ³	1,258	1,305	1,310	1,283	1,280	1,278
pH-Wert	-	6,7	7,5	5,9	6,1	8,0	8,3
CaSO ₄	g/l	0,4	0,23	0,21	0,20	0,23	k. A.
CaCl ₂	g/l	106	252	261	220	190	196,2
MgCl ₂	g/l	92	57,1	43,8	21,0	58,0	29,3
KCl	g/l	82	67,7	70,6	82,8	77,6	84,6
NaCl	g/l	110	66,4	68,8	94,9	87,1	100,6
H ₂ O	g/l	868	862	866	864	867	867

Abbildung K-UTEC 19: Zusammensetzung von Anmischflüssigkeit, Filtraten und Ablauflösung im Technikumsversuch

Parameter	Dimension	Anmischflüssigkeit	Filtrat 26.06.2017	Filtrat 06.07.2017	Filtrat 13.07.2017	Ablauf lösung
Dichte	g/cm ³	1,283	1,278	1,268	1,278	1,320
pH-Wert	-	k. A.	k. A.	7,6	7,7	7,2
CaSO ₄	g/l	k. A.	0,39	0,35	0,23	k. A.
CaCl ₂	g/l	121	152	169	180	257,3
MgCl ₂	g/l	191	140	122	118	120,8
KCl	g/l	50	43,5	45,8	47,2	52,3
NaCl	g/l	42	49,5	54	52,5	31,3
H ₂ O	g/l	879	893	877	880	858,6

Abbildung K-UTEC 20: Zusammensetzung von Anmischflüssigkeit, Filtraten und Ablauflösung im In situ-Versuch

Textiles Absperrsystem für Suspensio- nen beim Bergversatz

Anforderungsliste für den Bergwerksbereich Bleicherode

1 Chemische Zusammensetzung des Wirtsgesteins

Das anstehende Wirtsgestein im Bergwerk Bleicherode besteht aus anhydritischem Hartsalz mit eingeschalteten Bereichen aus Carnallit. Hinsichtlich der Wirtsgesteinsverträglichkeit der beim Spülversatz beteiligten Lösungen wird der Carnallit aufgrund der höheren Löslichkeit als worst case betrachtet.

Carnallit-Zusammensetzung:

- 54,6 % Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- 31,2 % Halit (NaCl)
- 11,2 % Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- 2,2 % Anhydrit (CaSO_4)

2 Chemische Zusammensetzung der Spülversatzrezeptur

Die folgende Tabelle 1 gibt die Mittelwerte sowie Schwankungsbreiten der Hauptbestandteile und toxikologisch relevanten Parameter der aktuellen Spülversatzrezeptur für die Betriebsstätte Bleicherode an. Der Salzgehalt (siehe Pkt. 3) der mit 70 Ma-% enthaltenen Traglösung wurde mit eingerechnet.

Tabelle 1: Zusammensetzung der aktuellen Spülversatzrezeptur

Parameter	Dimension	Mittelwert	Minimum	Maximum
Phosphat	%	0,3	< 0,1	2,5
CaSO ₄	%	3,5	0,3	11,0

Parameter	Dimension	Mittelwert	Minimum	Maximum
CaCO ₃	%	2,0	< 0,1	10,8
CaCl ₂	%	10,4	7,1	13,9
CaO	%	4,0	0,5	10,7
MgO	%	0,4	< 0,1	0,9
MgCl ₂	%	11,2	11,2	11,2
Alkalisalze	%	8,1	5,5	19,4
Al ₂ O ₃	%	0,8	< 0,1	2,7
Fe ₂ O ₃	%	0,6	< 0,1	2,5
SiO ₂	%	3,7	< 0,1	11,8
HCl-Unlösliches	%	0,8	< 0,1	2,6
TOC (einschl. Celemonlar)	%	0,4	< 0,1	2,2
Wasser ¹	%	51,6	51,4	52,2
Ammonium	mg/kg	64	1,4	1.582
Antimon	mg/kg	123	0,7	382
Arsen	mg/kg	15	0,4	250
Barium	mg/kg	129	10	413
Beryllium	mg/kg	0,1	< 0,1	1,3
Blei	mg/kg	832	14	2.231
Bor	mg/kg	43	7,8	115
Cadmium	mg/kg	37	0,2	145
Chrom	mg/kg	39	2,9	131
Chrom(VI) als CrO ₃	mg/kg	1,8	< 0,1	22
Cobalt	mg/kg	5,3	0,5	26
Kupfer	mg/kg	280	17	1.301
Mangan	mg/kg	217	38	1.060
Molybdän	mg/kg	4,6	0,2	26
Nickel	mg/kg	21	1,9	171
Quecksilber	mg/kg	1,7	< 0,1	11
Selen	mg/kg	2,2	< 0,1	19
Thallium	mg/kg	0,4	< 0,1	2,8
Vanadium	mg/kg	7,8	0,7	42
Zink	mg/kg	3.072	29	8.241
Zinn	mg/kg	85	0,6	499
2,3,7,8-TCDD	ng/kg	16	0,2	190
Summe 17 PCDD/F	ng/kg	4.888	18	49.132
I-TE-Wert (NATO)	ng/kg	186	1,1	1.337
I-TE-Wert (WHO, 2005)	ng/kg	183	1,2	1.404
SiO ₂ krist. < 125 µm	%	0,3	0,2	1,4

¹ Berechnet auf Grundlage eines H₂O-Gehaltes der Anmischflüssigkeit von 880 g/l bei Vernachlässigung der als Trockenverlust bestimmten Feuchte der Abfälle.

3 Chemische Zusammensetzung der Lauge

In Tabelle 2 ist die durchschnittliche Zusammensetzung der aktuell verwendeten Anmischflüssigkeit dargestellt.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Anmischflüssigkeit

Parameter	Dimension	Anmischflüssigkeit
Dichte	g/cm ³	1,283
CaCl ₂	g/l	121
MgCl ₂	g/l	191
KCl	g/l	50
NaCl	g/l	42
H ₂ O	g/l	879

4 Temperatur der Spülversatz-Suspension

Die Temperatur der Spülversatz-Suspension beträgt ca. 40 - 55°C.

5 Dauer bis zur Aushärtung

Die Dauer bis zur vollständigen Aushärtung lässt sich nicht angeben. Nach 28 Tagen ist die Begehbarkeit gegeben (Auflast: 5,0 N/cm²). Die Geschwindigkeit der Aushärtung ist abhängig vom Entwässerungsgrad.

6 Filtrateigenschaften

Die folgende Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Parameter der Ablauflösung bei Einsatz der aktuellen Spülversatzrezeptur.

Tabelle 3: Kennwerte der Ablauflösung

Parameter	Dimension	Mittelwert	Minimum	Maximum
Fluidablauf	%	50,5	23,9	81,2
Dichte	g/cm ³	1,320	1,295	1,335
pH-Wert	-	7,2	6,7	7,7
MgCl ₂	g/l	120,8	70,5	179,0
CaCl ₂	g/l	257,3	195,2	324,0
NaCl	g/l	31,3	19,9	40,4
KCl	g/l	52,3	44,6	59,9
H ₂ O	g/l	858,6	848,4	870,9

