



Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft

Masterarbeit

Erfassung und Auswertung gebirgsmechanischer Daten aus dem Salzbergwerk  
Berchtesgaden



Elisabeth Grossfurtner, BSc

September 2019

## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

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

Datum 07.09.2019



Unterschrift Verfasser/in  
Elisabeth, Grossfurther  
Matrikelnummer: 01435004

---

## Vorwort, Widmung, Danksagung

---

Hiermit möchte ich mich ganz herzlich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung der vorliegenden Diplomarbeit unterstützt haben.

Allen voran gebührt mein Dank meinem Betreuer Herrn Bergrat h.c. em.O.Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. mont. Horst Wagner, der mir stets mit hilfreichen Anregungen und konstruktiver Kritik zur Seite stand. Ein herzliches Dankeschön möchte ich auch Herrn Dipl. Ing. Tobias Ladinig aussprechen, der ebenfalls immer ein offenes Ohr für meine Fragen hatte.

Weiters möchte ich mich bei den Südwestdeutschen Salzwerken bedanken, welche mir die Möglichkeit geboten haben, die vorliegende Diplomarbeit im Salzbergwerk Berchtesgaden zu schreiben. Namentlich erwähnen möchte ich in diesem Zusammenhang den Betriebsleiter des Salzwerkes Berchtesgaden Herrn Dipl. Ing. Raimund Bartl, sowie Herrn Dipl. Ing. Wolfgang Lochner, Herrn Rupert Kurz und Herrn Sebastian Rabenbauer. Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Franz Stocker für seine Geduld und Bereitschaft, stundenlang im Archiv nach Dokumenten für die vorliegende Diplomarbeit zu suchen.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre großzügige Unterstützung ermöglicht haben sowie bei meinen Freunden in Leoben für die schöne gemeinsame Zeit zusammen.

  
Elisabeth Grossfurther

Leoben, am 07.09.2019

---

## Zusammenfassung

---

Der Salzbergbau Berchtesgaden entwickelt sich zunehmend in die Teufe und befindet sich in der Phase der kritischen Beurteilung des längerfristigen Abbausystems für die tieferen Lagerstättenbereiche. Zum Zwecke einer optimalen Lagerstättenausnutzung bei gleichzeitiger Gewährleistung der Standsicherheit wurde im Jahr 2003 eine dreidimensionale geomechanische FLAC-3D Modellrechnung des Grubengebäudes vom Ingenieurbüro Müller & Hereth erstellt. Diese bildete die Grundlage des betrieblichen Ansuchens um die Vergrößerung der Abbauhohlräume beim Bergamt Süd. Im Zuge des Genehmigungsverfahrens wurden von behördlicher Seite geomechanische in situ Messinstallationen zur Überwachung der Abbauhohlräume im Bergwerk vorgeschrieben. Diese Messungen sollen zur Validierung der vorhandenen gebirgsmechanischen FLAC-3D Modellrechnung herangezogen werden und als Grundlage für die Abbauplanung in den tieferen Abbaubereichen dienen.

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der systematischen Erfassung und Auswertung gebirgsmechanisch relevanter Informationen (u.a. historische Berichte von Verbrüchen in alten Sinkwerken, Ergebnisse von Langzeit-Nivellement-Beobachtungen sowie Extensometer- und Gebirgsdruckmessungen), mit dem Ziel, die von Müller & Hereth verwendeten Eingangsparameter für die geomechanische Modellrechnung zu beurteilen und die Ergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen.

Aus historischen Aufzeichnungen über bergmännische Verformungsbeobachtungen (Auftreten von Abschalungen, das Öffnen und Schließen von Klüften etc.) können keine Rückschlüsse über die in situ Spannungssituation gezogen werden. Bruchvorgänge in Werkern sind auf das Annähern des Hohlraums an das ausgelaugte Haselgebirge oder Einlagerungen aus Sandstein bzw. Anhydrit zurückzuführen (Kellerbauer, 1996).

Die Auswertung von Langzeit-Nivellement-Daten in einem alten Einschlagwerk auf einer höher gelegenen Sohle, wo schon seit Jahrzehnten keine Abbautätigkeiten mehr stattfinden, ergibt eine maximale Firstsetzung von 80 mm innerhalb von 25 Jahren im Bereich des nordöstlichen Ulms. Auf Grund der geringen

Überlagerungshöhe und der historischen Kavernengeometrie ist jedoch keine direkte Vergleichbarkeit zu modernen Bohrspülwerkern im Hinblick auf das Gebirgsverhalten gegeben.

Stangenextensometer sowie Bohrlochgeber zur Ermittlung der herrschenden Gebirgsdrücke wurden im Jahr 1997 in der Strecke oberhalb des Bohrspülwerks 13 auf der aktuellen Abbausohle installiert, um das Verhalten des Gebirges während des Aussolungsvorganges und bei der Vergrößerung der Himmelsfläche von  $3.500\text{m}^2$  auf  $4.200\text{m}^2$  zu dokumentieren. Die Extensometerköpfe dienen zusätzlich als Zwischenpunkte bei der Durchführung eines jährlichen Nivellements.

An Hand der Auswertung der Extensometerdaten ist die Ableitung einer Kriechrate im Haselgebirge nicht möglich, da bei den Messergebnissen nicht zwischen reinen Kriecherscheinungen und spannungsinduzierten Verformungen (Konvergenz) unterschieden werden kann. Hierzu liegen auch keine Daten von Labor-Experimenten vor.

Auf Grund der fehlenden Informationen über die in situ Spannungssituation und die Kriechrate ist eine Beurteilung der von Müller & Hereth verwendeten Eingangparameter für die geomechanische Modellrechnung nicht möglich.

Es lassen sich jedoch folgende Aussagen treffen:

Die Einbindepunkte der Extensometer an einem bestimmten Standpunkt (3m/8m/13m/18m/23m unter dem Niveau der Strecke) bewegen sich praktisch um den gleichen Betrag kontinuierlich nach unten. Die gleichmäßige Auslängung der Extensometer kann als Kriechen des Gebirges in den Hohlraum hinein interpretiert werden. Um den Hohlraum herum findet keine Auflockerung statt.

Der Abstand der Einbindepunkte zum Sohl-Nivellement vergrößert sich bei 5 von 6 Extensometern über die Zeit kontinuierlich. Dies kann als Quellen des Haselgebirges unmittelbarer Nähe der Strecke interpretiert werden und ist wahrscheinlich auf den Einfluss von Feuchtekiechen (Hunsche & Schulze, 1994) zurückzuführen. Generell ist anzumerken, dass um den Hohlraum des Bohrspülwerks 13 herum nur sehr geringe Kriechraten auftreten (einige mm/ Jahr). Die Stabilität des Bohrspülwerks ist trotz der Ausweitung der Himmelsfläche von  $3.500\text{m}^2$  auf  $4.200\text{m}^2$  in vollem Umfang gegeben.

Die Messergebnisse der Bohrlochgeber sind teilweise unglaubwürdig und stimmen nicht mit theoretischen gebirgsmechanischen Überlegungen die Spannungsverteilung um den Hohlraum betreffend überein. Zusätzlich wird die Auswertung der Bohrlochgeber-Messungen durch das Fehlen von Bohrloch- und Einbauprotokollen erschwert.

Sowie sich die Kaverne mit fortschreitendem Abbau nach oben hin ausdehnt, kommt es im unteren Bereich des Pfeilers (40-50 m unterhalb des Niveaus der Strecke) zur Ausbildung einer Druckzone.

Der auf einer Tiefe von 45m unterhalb der Strecke eingebaute Bohrlochgeber verzeichnet zwischen den Jahren 2007 und 2015 einen Anstieg der Vertikalspannung von 9,7 MPa. Berechnet man den Spannungsanstieg während desselben Zeitraums über die Verformung der Extensometer in einer Einbautiefe von 40m bzw. 50m, ergeben sich bei Annahme eines E-Moduls von 15 GPa (Kellerbauer, 2018) die Werte von 15,57 MPa (Extensometer E1) bzw. von 12,14 MPa (Extensometer E2). Quantitativ stimmen die Berechnungsergebnisse also mit der tatsächlich gemessenen Spannung überein.

Insgesamt sind im Salzbergwerk Berchtesgaden 4 Bohrspülwerker (BW 2 und BW13 seit dem Jahr 1997, BW 21 und BW 93 seit dem Jahr 2019) mit Messinstallationen zum Zwecke der Überwachung des Gebirgsverhaltens ausgestattet. Da, wie die Messungen aus dem Bohrspülwerk 13 zeigen, die Ausweitung der Himmelsfläche keine negativen Auswirkungen auf die Kavernenstabilität hat und seit der Beginn der Versuche bzgl. der Kavernenerweiterung von 3.500m<sup>2</sup> auf 4.200m<sup>2</sup> im Jahr 2004 keine Stabilitätsprobleme im Grubengebäude (auch im Bereich der darüberliegenden Sohlen) aufgetreten sind, werden die für die Überwachung des Gebirgsverhaltens gegenwärtig vorhandenen Installationen als ausreichend erachtet.

---

## Abstract

---

The underground salt mine of Berchtesgaden is increasingly developing into depth. Currently, the implementation of an appropriate long-term mining system for the deeper deposit areas is under discussion. In order to maximise the extraction ratio while at the same time ensuring long-term stability, a three-dimensional geomechanical FLAC-3D model calculation of the mine workings was prepared in 2003 by the engineering office Müller & Hereth. The company's application for the enlargement of the excavation cavities at the Bavarian mining authorities is based on that calculation. In the course of the approval procedure, the authorities prescribed geomechanical in situ measuring installations to monitor the excavation cavities in the mine. The measurement data gained by these installations will be used to validate the existing rock mechanical FLAC-3D model calculation and serve as a basis for mine planning in the deeper mining areas.

The present diploma thesis deals with the systematic collection and evaluation of information associated with rock mechanics in the salt mine of Berchtesgaden (e. g. historical reports of cave-ins in old caverns, results of long-term levelling observations as well as extensometer and stress monitoring measurements), with the aim of evaluating the input parameters used by Müller & Hereth for the geomechanical FLAC-3D model calculation.

From historical records of visible deformations noted by miners underground (like spalling, opening and closing of fractures) no conclusions about the in situ stress situation can be drawn. Cave-ins in old workings mostly occurred when the cavern approached the layer of leached haselgebirge or inclusions of sandstone and anhydrite (Kellerbauer, 1996).

The evaluation of long-term levelling data in an old mining cavern on an upper level, where no mining activities have taken place for decades, shows a maximum subsidence of the roof by 80 mm within 25 years. Due to the low overburden height and the historical cavern geometry, however, there is no direct comparability with modern caverns in salt mining regarding the rock mechanical behaviour.

Rod extensometers and borehole cells to determine rock stresses were installed in 1997 in the drift above cavern no. 13 at the current extraction level in order to document the behaviour of the surrounding rock mass during the leaching process and the extension of the cavern roof area from 3.500m<sup>2</sup> to 4.200m<sup>2</sup>. The extensometer heads also served as levelling points.

Based on the evaluation of the extensometer data, the derivation of a creep rate of the haselgebirge is not possible because the measurement results do not distinguish between the creeping of saltrock and stress-induced deformations (convergence). There is also no data available from laboratory experiments.

Due to the lack of information about the in situ stress situation and the creep rate, an assessment of the input parameters used by Müller & Hereth for the geomechanical FLAC-3D model calculation is not possible.

However, the following statements can be made:

The extensometer anchor points at a certain position (3m/8m/13m/18m/23m below the level of the drift) show a continuous movement downwards by practically the same amount. The uniform elongation of the extensometers can be interpreted as rock creeping into the cavern. There is no fracture zone around the cavity.

The distance of the anchor points within the rock mass to the levelling points on the floor of the drift increases continuously over time (for 5 out of 6 extensometers). This phenomenon can be interpreted as swelling of the haselgebirge in the immediate vicinity of the drift and occurs probably due to the influence of moisture creeping (Hunsche & Schulze, 1994). In general, it should be noted that only very low creep rates occur around the cavity (in the range of a few mm/year). Despite the extension of the cavern roof area from 3.500m<sup>2</sup> to 4.200m<sup>2</sup>, the stability of the cavern is fully assured.

The measurement results of the borehole cells are partly unreliable and do not correspond with theoretical rock mechanical considerations concerning the stress distribution around the cavity. In addition, the evaluation of the data gained by the borehole cells is made difficult by the lack of borehole and installation protocols.

As mining progresses and the cavern expands upwards, a pressure zone forms in the lower part of the pillar (40-50 m below the level of the drift).

The borehole cell in the pillar, installed at a depth of 45m below the level of the drift, recorded an increase in the vertical stress of 9,7 MPa between 2007 and 2015. If the stress increase during the same period is calculated out of the elongation of the extensometers reaching down to a depth of 40m and 50m, assuming an E-modulus of 15 GPa (Kellerbauer, 2018), the respective values are 15,57 MPa (extensometer E1) and 12,14 MPa (extensometer E2). Thus, the stress measured by the borehole cell and the stresses derived from the extensometer measurements are in the same order of magnitude.

In the salt mine of Berchtesgaden, a total of 4 caverns (cavern no. 2 and cavern no. 13 since 1997, cavern no. 21 and cavern no. 93 since 2019) are equipped with measuring devices for the purpose of monitoring the rock behaviour around the excavation cavities. As the measurements from cavern no. 13 show, the extension of the cavern roof area has no negative effects on the cavern stability. Furthermore, no stability problems have occurred in the mine workings on upper levels. For these reasons, the currently existing installations for the monitoring of the rock behaviour are considered sufficient.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

Eidesstattliche Erklärung .....	II
Vorwort, Widmung, Danksagung .....	III
Zusammenfassung .....	IV
Abstract .....	VII
Inhaltsverzeichnis .....	X
1 Einleitung .....	1
2 Allgemeines über das Salzbergwerk Berchtesgaden .....	3
2.1 Geologie .....	3
2.2 Historische Salzgewinnung .....	4
2.3 Gegenwärtige Salzgewinnungsverfahren .....	7
2.3.1 Bohrspülwerksverfahren .....	7
2.3.2 Bohrlochsondenverfahren .....	8
2.4 Wässerungstechniken – Ober- und Unterwassereinführung .....	9
2.5 Steuerung der Kavernenform .....	10
2.6 Vermessung und geologische Aufnahme der Werker .....	12
3 Hintergrund bzgl. der Kavernenausweitung .....	14
4 Genereller Aufbau des Salzbergwerkes .....	16
5 Gebirgsmechanische Überwachung im Salzbergwerk Berchtesgaden .....	19
5.1 Bergmännische Beobachtungen bzw. durchgeführte Messungen .....	19
5.1.1 Historische Verformungsbeobachtungen .....	19
5.1.2 Nivellement- und Extensometermessungen im Senna I Werk .....	24
5.2 Extensometer- und Gebirgsdruckmessungen in Bohrspülwerk 13 .....	26
5.2.1 Lage und Geologie von Bohrspülwerk 13 .....	26
5.2.2 Durchgeführte Messungen und Messintervalle in BW13 .....	29
5.2.3 Installation der Messeinrichtungen .....	29
6 Auswertung der Messdaten aus BW13 .....	35
6.1 Theoretischer, gebirgsmechanischer Hintergrund .....	35
6.2 Das Kriechverhalten von Salzgestein .....	40
6.3 Gebirgsdruck-Messungen .....	45

6.3.1	Funktionsweise des Bohrlochgebers der Fa. Glözl .....	45
6.3.2	Auswertung Gebirgsdruck-Messungen .....	50
6.3.3	Kritische Anmerkungen zu Gebirgsdrucksmessungen und Schlussfolgerung .....	56
6.4	Extensometer-Messungen und Nivellements .....	58
6.4.1	Funktionsweise eines Stangenextensometers .....	58
6.4.2	Auswertung der Nivellements an der Sohle der Schachtricht .....	62
6.4.3	Bewegung der Nivellement-Punkte über die Zeit .....	65
6.4.4	Absolute Bodenbewegungen im Gebirge oberhalb des BW13 .....	67
6.4.5	Betrachtung der absoluten Bodenbewegungen (E11 – E16) .....	78
6.4.6	Zusammenfassung und kritische Bemerkungen zu den Extensometermessungen .....	86
6.4.7	Verformungen im Pfeiler: .....	88
7	Abschließende Bemerkungen .....	92
8	Zusätzliche Instrumentierung von Werkern .....	94
8.1	Vorhandene Instrumentierung im Bohrspülwerk 2 .....	94
8.2	Geplante Instrumentierung in Bohrspülwerk 13 .....	95
8.3	Geplante Instrumentierung in Bohrspülwerk 21 .....	96
8.4	Geplante Instrumentierung in Bohrspülwerk 93 .....	97
9	Ergänzungen und Sonstiges .....	100
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	103
11	Literaturverzeichnis .....	106
12	Abbildungsverzeichnis .....	108
13	Tabellenverzeichnis .....	112

---

# 1 Einleitung

---

Seit über 500 Jahren wird im Salzbergwerk Berchtesgaden durch Laugung von Kavernen Salz gewonnen. Es ist ein für den Menschen überlebenswichtiger Rohstoff und findet sowohl als Industrie-, Auftau-, Gewerbe- und Speisesalz Verwendung.

Fand die Salzgewinnung um 1500 zunächst noch in primitiven Schöpfwerken nahe der Tagesoberfläche statt, so führte die fortschreitende technische Entwicklung über die Jahrhunderte hinweg zu neuen, effizienteren Abbaumethoden und der Bergbau entwickelte sich zunehmend in größere Teufen.

Eine optimale Lagerstättenausnutzung ist heutzutage nicht nur aus wirtschaftlicher Sicht im Hinblick auf eine Gewinnmaximierung erstrebenswert, sie steht auch im Konsens mit den staatlichen und gesellschaftlichen Interessen einer vorausschauenden und nachhaltigen Rohstoffsicherung.

Die nach den Vorgaben der Bergbehörde Süd adaptierte Version der geomechanische FLAC-3D Modellrechnung des Grubengebäudes, erstellt vom Ingenieurbüro Müller & Hereth (2003), bildet die Grundlage für eine Vergrößerung der Kavernendimensionen im Salzbergwerk Berchtesgaden. Die Ergebnisse der numerischen Simulation sollen an Hand der Auswertung bereits existierender gebirgsmechanischer Informationen bzw. Messdaten überprüft und validiert werden.

Kapitel 2 der vorliegenden Diplomarbeit gibt eine Übersicht über die Geologie der Salzlagerstätte Berchtesgaden, die historische Salzgewinnung sowie die derzeit angewandten Abbauverfahren. Im Anschluss wird kurz auf die Wässerungstechniken, die Steuerung der Kavernenform sowie die Vermessung der Kavernen eingegangen.

Kapitel 3 behandelt den Hintergrund der Erstellung der geomechanischen Modellrechnung durch das Ingenieurbüro Müller & Hereth (2003). Zusätzlich werden die durch das Bergamt Süd geforderten Adaptionen der Modellrechnung, die im Zuge der Kavernenerweiterung vorgeschriebenen messtechnischen Überwachungen und die einzuhaltenden Kavernendimensionen und Geometrie beschrieben.

In Kapitel 4 erfolgt ein Abriss über den Aufbau des Grubengebäudes sowie der Abbau-Anordnung auf der sich derzeit in Betrieb befindlichen der 1.Tiefbausohle, auf welcher die Kavernenerweiterung erfolgen soll.

Kapitel 5 widmet sich den gebirgsmechanischen Überwachungstätigkeiten im Salzbergwerk Berchtesgaden, bestehend aus historischen Verformungsbeobachtungen, Nivellement- und Extensometermessungen im Senna I Werk, sowie Extensometer- und Gebirgsdruckmessungen im Bohrspülwerk 13.

Die Auswertung der Messdaten aus Bohrspülwerk 13 wird in Kapitel 6 behandelt. In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine theoretische Abhandlung über die Spannungsverteilung um einen untertägigen Hohlraum sowie das Kriechverhalten von Salzgestein. Im Anschluss wird auf die Funktionsweise eines Bohrlochgebers eingegangen, gefolgt von der Auswertung der Gebirgsdruckmessungen. Des Weiteren erfolgt eine kurze Beschreibung der Funktionsweise der eingebauten Stangenextensometer, welcher sich die Auswertung der Nivellement- und Extensometermesswerte anschließt. An Kapitel 6 schließt Kapitel 7 mit abschließenden Bemerkungen und einer kritischen Betrachtung der Auswertungsergebnisse.

Im Anschluss folgen in Kapitel 8 ein Überblick über weitere geplante Messinstallationen im Salzbergwerk Berchtesgaden sowie in Kapitel 9 eine kurze Ergänzung über die Wasserhaltung im Grubengebäude.

Kapitel 10 enthält die Zusammenfassung der Ergebnisse sowie die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen.

---

## 2 Allgemeines über das Salzbergwerk Berchtesgaden

---

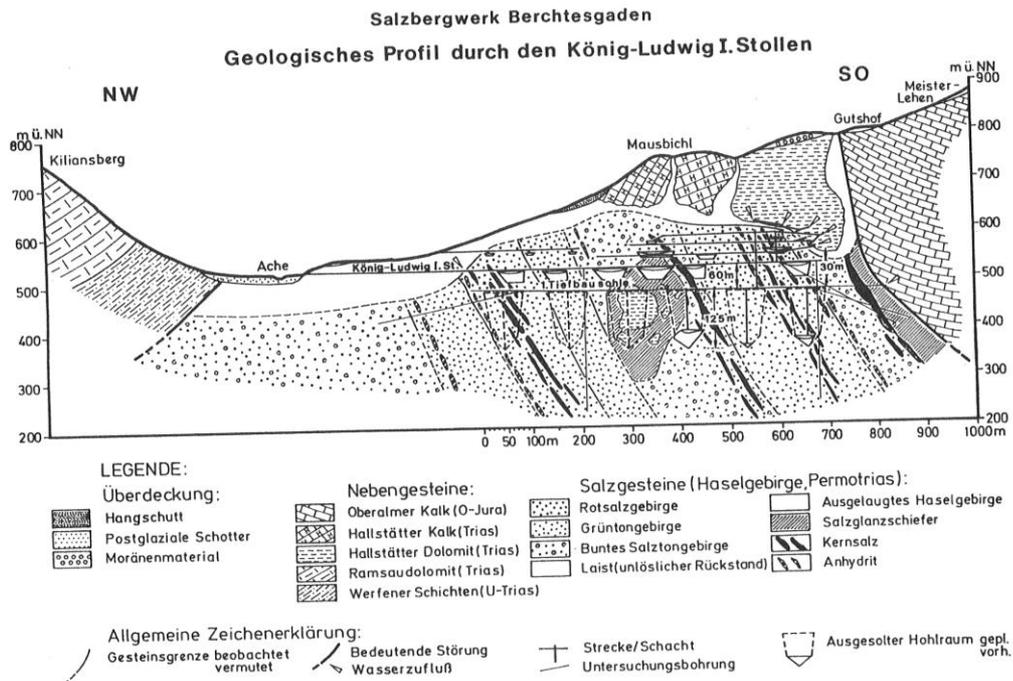
### 2.1 Geologie

---

Die Salzlagerstätte Berchtesgaden ist Teil des ostalpinen Salinars, das sich als Abfolge von Evaporitlagerstätten von Tirol durch die nördlichen Kalkalpen bis gegen Wien erstreckt. Die Entstehung dieser Lagerstätten kann auf das Oberperm bzw. das untere Trias datiert werden. Wie bei allen alpinen Salzlagerstätten handelt es sich auch hier um einen Haselgebirgsstock, also um eine konglomeratische Brekzie bestehend aus diversen Tonen, Anhydrit und Salzlinsen, welche in eine Grundmasse von Salzton eingebettet ist. (Schneider, 1981; Ambatiello, 1982)

Nebengesteine sind Kalke und Dolomite des Mesozoikums, welche als größere Einschlüsse oder innerhalb der Lagerstätte auftreten oder diese begrenzen. Ebenfalls als Nebengestein wird das den Lagerstättenkörper überdeckende ausgelaugte Haselgebirge bezeichnet. Hierbei handelt es sich um den natürlichen Laugungsrückstand des Haselgebirges an bzw. nahe der Tagesoberfläche. Dieser Rückstand, in der Bergmannssprache als Laist bezeichnet, besteht aus wasserunlöslichen Ton-, Schluff- und Sandsteinkomponenten. Die Mächtigkeit des überlagernden ausgelaugten Haselgebirges beträgt zwischen 50 und 80m. (Kellerbauer, 1996)

Abbildung 1 zeigt das geologische Profil der Salzlagerstätte Berchtesgaden durch den König Ludwig I. Stollen.



**Abbildung 1: Geologisches Profil der Salzlagerstätte Berchtesgaden (Kellerbauer, 1996)**

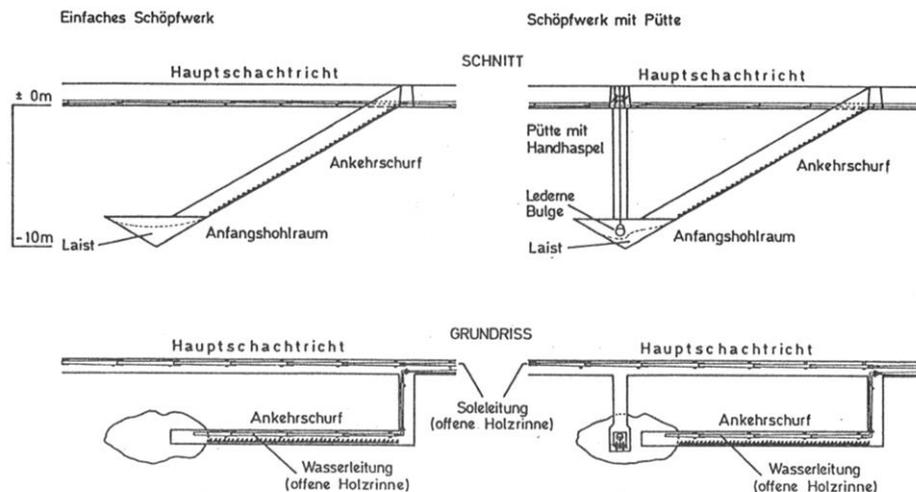
## 2.2 Historische Salzgewinnung

Seit Beginn der Bergbautätigkeiten vor über 500 Jahren wird das Salz im Salzbergwerk Berchtesgaden durch den sogenannten „nassen Abbau“ gewonnen. Dabei werden die salzhaltigen Bestandteile mittels Süßwasser aus dem Gebirgsverband gelöst, während die unlöslichen Rückstände – der Laist – im Abbauhohlraum verbleiben und diesen zum Großteil verfüllen. (Kellerbauer, 1996)

Im Lauf der Jahrhunderte haben sich bedingt durch den technologischen Fortschritt und die zunehmenden Abbautiefe verschiedene Verfahren der Wässerung entwickelt.

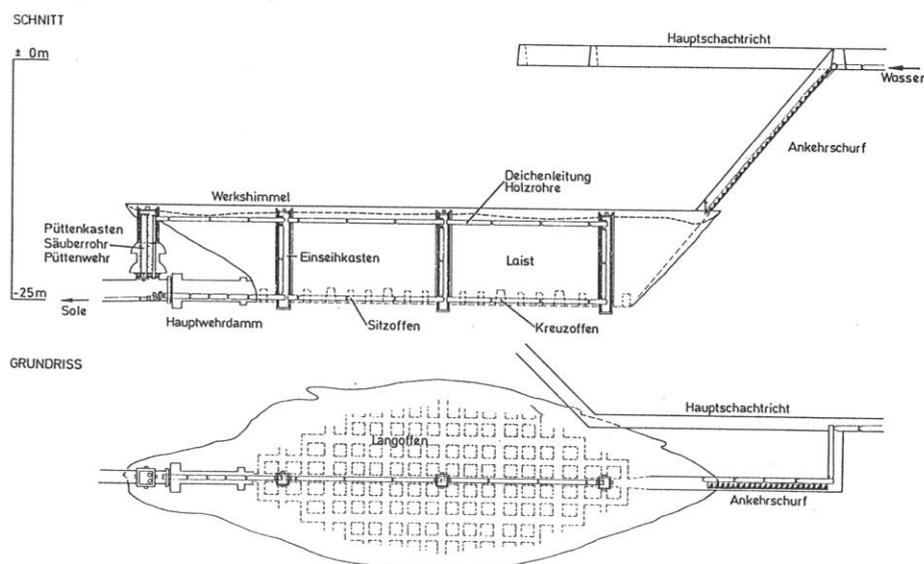
Die einfachste Art der historischen Salzgewinnung stellte ein einfaches Schöpfwerk dar. Hierbei wurden zunächst ein Hauptstollen und davon abzweigend ein Ankehrschurf im Haselgebirge aufgefahren, an dessen Fußpunkt in händischer Arbeit ein Hohlraum ausgebrochen und mit Wasser gefüllt wurde. Der Transport der so gewonnenen Sole erfolgte mittels Eimern über den Ankehrschurf (Abbildung 2, links).

Eine Weiterentwicklung des einfachen Schöpfwerks stellte das Schöpfwerk mit Pütte dar. Bei dieser Abbaumethode wurde ein Schacht (Pütte) abgeteuft und die mit Sole gefüllten Eimer über eine Handwinde heraufgefördert (Abbildung 2, rechts).



**Abbildung 2: Einfaches Schöpfwerk und Schöpfwerk mit Pütte (Ambatiello, 1995)**

Sinkwerke, welche von zwei Sohlen aus betrieben wurden, kamen in der 2.Hälfte des 16. Jahrhunderts auf. Bei dieser Betriebsweise erfolgte der Soleabzug über eine Rohrleitung, welche in die Verdämmung der unteren Sohle (Ablasssohle) eingelassen war (Abbildung 3).



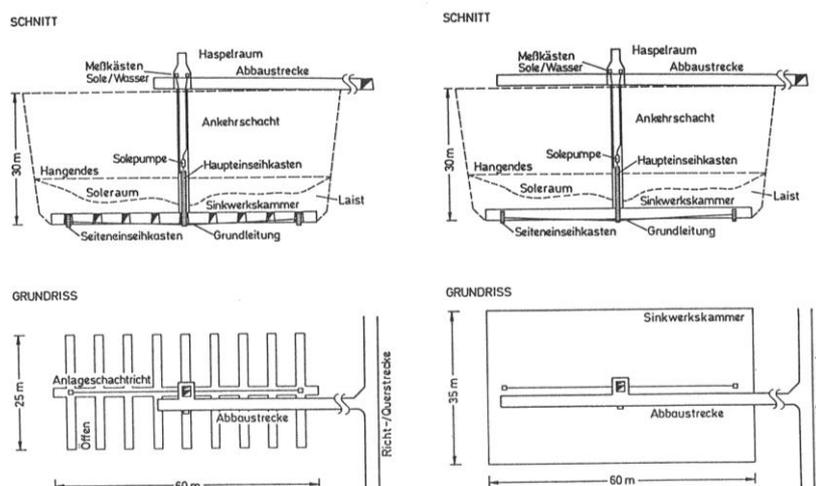
**Abbildung 3: Ablasswerk (Ambatiello, 1995)**

Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgte die Aussolung ausschließlich über die sog. intermittierende Wässerung, d.h. die Werker wurden zur Gänze mit Süßwasser gefüllt, welches sich durch den anschließenden Laugungsvorgang sättigte. Nach der Sättigung wurden die Werker vollständig entleert.

Die intermittierende Wässerung hatte eine starke Ausweitung der Ulmen zu Folge, die bei jeder Wässerung erneut angegriffen wurden, wodurch die Werker sich stark nach der Seite und wenig nach der Höhe hin ausdehnten.

Erst durch die Einführung der kontinuierlichen Wässerung konnte die starke Horizontalentwicklung der Kavernen eingedämmt werden. Hierbei wurde aus dem mit gesättigter Sole gefüllten Hohlraum mit einer Pumpe ständig eine bestimmte Menge an Sole abgepumpt und gleichzeitig eine äquivalente Menge an Süßwasser zugeführt. Die Aussolung war jetzt auf die Himmelsflächen beschränkt, da die gesättigte Sole auf Grund ihrer höheren Dichte ( $1,2 \text{ g/cm}^3$ ) absank und die Ulmen vor weiterem Lösungsangriff geschützt waren.

In den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts erfolgte schließlich die Einführung des Sinkwerksverfahrens im Unterwerksbau. Dazu wurde von einer Abbausohle aus ein Schacht abgeteuft, an dessen Fuße ein Hohlraum bergmännisch (durch Bohren und Sprengen) aufgefahren wurde. Dieser Hohlraum wurde zunächst mittels intermittierender Wässerung auf die gewünschten Maße erweitert, ehe auf das kontinuierliche Wässerungsverfahren umgestellt wurde (Abbildung 4). Die Höhe eines Sinkwerks im Unterwerksbau betrug etwa 30m, seine Lebensdauer etwa 10 Jahre. (Ambatiello, 1995)



**Abbildung 4: Sinkwerk im Unterwerksbau (Ambatiello, 1995)**

---

## 2.3 Gegenwärtige Salzgewinnungsverfahren

---

### 2.3.1 Bohrspülwerksverfahren

---

Beim kombinierten Bohr- und Spülverfahren, wie es derzeit im Salzbergwerk Berchtesgaden angewendet wird, handelt es sich um ein kammerartiges Abbauverfahren. In festgelegten Abbaufeldern werden Bohrspülwerke angelegt, welche durch Bergfesten voneinander getrennt sind. Zur Sicherung der darüberliegenden Sohlen werden Sicherheitsschweben belassen. (Hoscher, 1984)

Die Schwebenmächtigkeit zwischen der sich derzeit in Betrieb befindlichen Tiefbausohle und der darüber liegenden König Ludwig Stollensohle (Seehöhe 532m über NN) beträgt 30m.

Generell erfolgt der Abbau von oben nach unten; die Aussolung der Kavernen geht jedoch in einem geometrisch angeordneten Unterwerksbau von unten nach oben vonstatten.

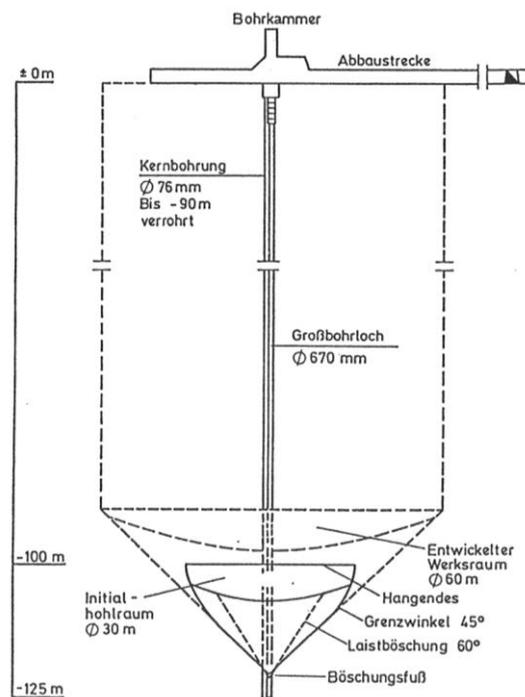
Nach Niederbringen einer Kernbohrung ( $d=76\text{mm}$ ), welche der geologischen Erkundung dient, wird seitlich davon eine Großbohrung ( $d=670\text{mm}$ ) 125m abgeteuft. Über ein eine Verrohrung wird Wasser in den unteren Teil des Bohrlochs eingebracht, um einen Initialhohlraum zuerspülen. Der dabei anfallende Laist wird bis zu einer Hohlraumgröße von  $3.000 - 5.000 \text{ m}^3$  durch ein Lufthebeverfahren ausgefördert, um die horizontale Ausdehnung des Hohlraums zu begünstigen und ein Zusetzen zu verhindern. Durch entsprechende Wässerungsvorgänge erweitert sich das Bohrloch unter einem Winkel von  $45^\circ$  zu einem trichterförmigen Hohlraum. Nach Fertigstellung des Initialhohlraums wird das Bohrloch im Anschluss zu einem Zugangsschacht erweitert. Die somit erstellte Kaverne hat die Form eines Kegelstumpfes mit einem Winkel von  $45^\circ$ .

Die weitere Aussolung erfolgt wie bei einem Sinkwerk im Unterwerksbau. (Ambatiello, 1995; Kellerbauer, 1996)

Durch vollständiges Füllen des Initialhohlraums mit Wasser wird der Kavernenhimmel (die Firste) verlaugt; die gesättigte Sole sinkt auf Grund ihrer höheren Dichte ( $1,2 \text{ g/cm}^3$ ) ab und kann dort abgezogen werden. Die abgezogene Solemenge wird durch Zugabe einer entsprechenden Süßwassermenge ersetzt (kontinuierliche Wässerung). Ziel während der Aussolung ist es, den

Solungskörper möglichst zylindrisch nach oben zu entwickeln. Im Anschluss erfolgt die Verlaugung des Endhimmels zur gebirgsmechanisch günstigen Kuppelform.

Abbildung 5 zeigt den Aufbau eines Bohrspülwerks im Salzbergwerk Berchtesgaden.



**Abbildung 5: Aufbau eines Bohrspülwerks (Ambatiello, 1995)**

### 2.3.2 Bohrlochsondenverfahren

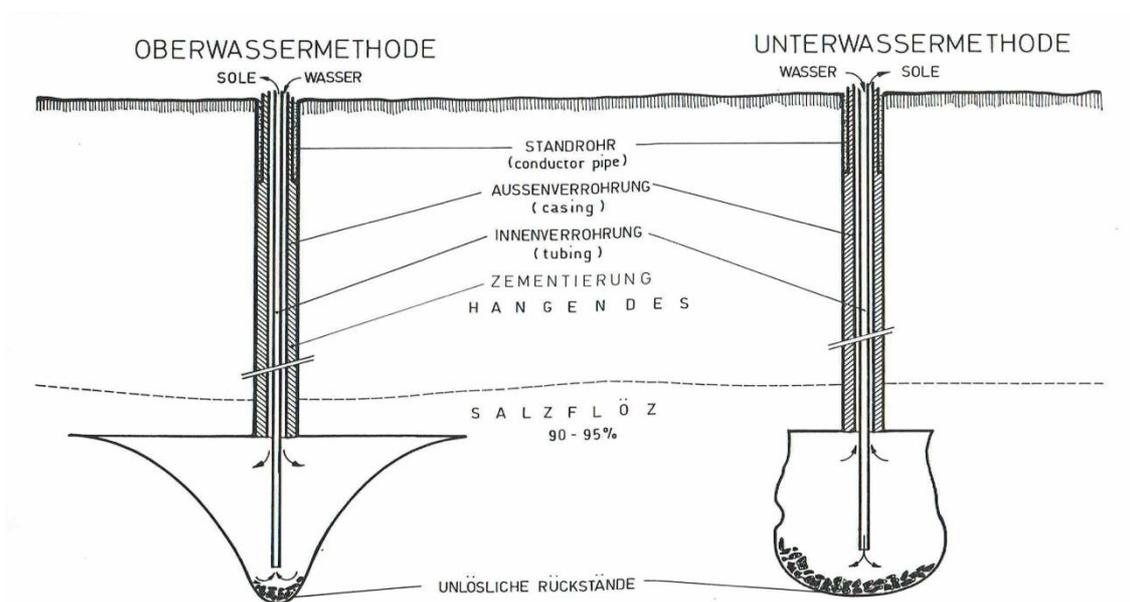
Neben der Anwendung des Bohrspülverfahrens werden im Salzbergwerk Berchtesgaden momentan auch zwei Werker mittels Bohrlochsondenverfahren aufgefahren. Eines davon, Bohrspülwerk 23, befindet sich bereits in Betrieb, für das andere (Bohrspülwerk 83) wird gegenwärtig die Bohrung abgeteuft.

Wie das kombinierte Bohr- und Spülverfahren erfordert auch das Bohrlochsondenverfahren das Abteufen einer Kernbohrung zur geologischen Erkundung. Wird die Geologie für das Auffahren einer Kaverne für geeignet befunden, erfolgt die Aufweitung der Kernbohrung. Hierauf wird im oberen Bohrlochabschnitt ein Standrohr einzementiert. Danach erfolgt das Einbringen der Verrohrung, welche aus einer beweglichen Außen- und Innenrohrkolonne besteht.



Rückständen dient. Die Sole wird im Anschluss durch den Ringraum zwischen Innen- und Außenverrohrung nach oben hin abgezogen (Abbildung 7, rechts).

Für die reguläre Auswässerung einer Kaverne in der Vollphase bzw. die Kuppellaugung in der Endphase verwendet man die Oberwassereinführung. Hierbei tritt das Lösungsmittel durch den Ringraum der Vorrohrung direkt unterhalb des Kavernenhimmels aus und „schwimmt“ horizontal über der schwereren, abgesunkenen Sole. Diese wird über die Innenverrohrung nach oben hin abgepumpt (Abbildung 7, links). (Hoscher, 1984)



**Abbildung 7: Schematische Darstellung der Ober- und Unterwassereinführung (Hoscher, 1984)**

## 2.5 Steuerung der Kavernenform

Die Steuerung der Kavernenform erfolgt im Salzbergwerk Berchtesgaden ausschließlich über die Wässerung, das heißt über die Ätzmaßvorgabe und die Spülraten.

Nach Hoscher (1984) ist die Ätzmaßvorgabe definiert als die Mächtigkeit der pro Zeiteinheit zur Aussolung freigegebenen Scheibe des Abbaukörpers.

Die Berechnung erfolgt über die Gleichung in Abbildung 8.

$$\ddot{a}_{th} = \frac{\Delta_{gr} \cdot Q_d \cdot 10^4}{\rho_k \cdot p \cdot A} \quad [\text{cm/d}] \quad \dots\dots\dots (\text{Gl. 13}).$$

Legende:	$\ddot{a}_{th}$ [cm/d]	Ätzmaßverbrauch je Zeiteinheit
	$\Delta_{gr}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Aufsättigung
	$Q_d$ [m <sup>3</sup> /d]	Spülrate
	$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Steinsalzes
		$\rho_k = 2.200 \text{ kg/m}^3 = \text{konst.}$
	$p$ [Vol. %]	Salzgehalt des Haselgebirges
	$A$ [m <sup>2</sup> ]	Laugfläche (Deckenfläche)

**Abbildung 8: Berechnung des Ätzmaßverbrauchs (Hoscher, 1984)**

Bei Oberwassereinführung lässt sich die Kavernenform über das Verhältnis von Ätzmaßvorgabe zu Produktionsrate steuern:

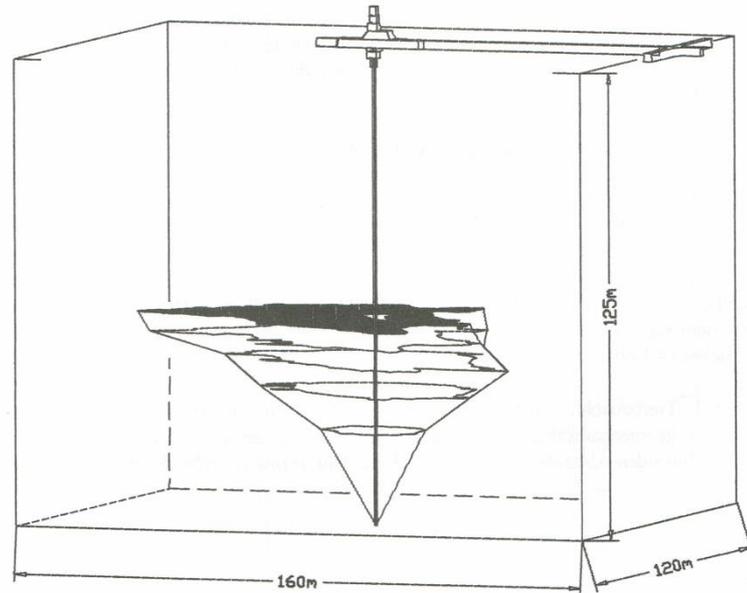
Stimmt man die Ätzmaßvorgabe genau auf die Produktionsrate ab, so wandert die Kavernendecke annähernd gleichmäßig, ohne Horizontalausdehnung nach oben.

Werden im Vergleich zur berechneten Ätzmaßvorgabe geringere Werte gewählt, steht dem Lösungsmittel nicht genug Scheibenmächtigkeit zur Verfügung. Das bedeutet, dass das Salzangebot im Bereich der Himmelsfläche über die Höhe der Ätzmaßvorgabe nicht ausreicht, um eine Vollsättigung des Lösungsmittels zu erreichen. Es findet deshalb eine Verlaugung der Ulmen und dadurch eine Ausweitung der Kaverne nach den Seiten hin statt.

Die gegenteilige Entwicklung, also eine verstärkte Ausdehnung der Kaverne in die Vertikale verbunden mit einer Verkleinerung der Himmelsfläche, erreicht man bei einer Ätzmaßvorgabe, die über dem errechneten Wert liegt. Dem Lösungsmittel steht in diesem Fall über die Scheibenmächtigkeit eine größere Salzmenge zur Verfügung, als für die Vollsättigung benötigt. Aus diesem Grund verlagert sich der Verlaugung immer mehr ins Zentrum der Kavernendecke (wo das Wasser eingeführt wird), was in einer Verkleinerung und einer gewölbeartigen Ausbildung der Himmelsfläche resultiert. (Hoscher, 1984)

Trotz der Wässerungsmaßnahmen kann die eigentliche Form einer Kaverne kaum beeinflusst werden, da sie stark von der Geologie bzw. dem Salzgehalt und dessen Verteilung abhängt. Das eingebrachte Wasser laugt bevorzugt Stellen mit hohem Salzgehalt, da diese gegenüber weniger salzhaltigen Strukturen eine

erhöhte Löslichkeit aufweisen. Aus diesem Grund entstehen unregelmäßige Geometrien. Im Salzbergwerk Berchtesgaden liegen parallel zum Streichen der Lagerstätte abwechselnd ärmere neben reicheren Haselgebirgsarten. Dies spiegelt sich in der Form der Bohrspülwerke wider, welche in Streichrichtung der Lagerstätte ausgelängt sind (Abbildung 9). (Kellerbauer, 1996)



**Abbildung 9: Unregelmäßigkeiten in der Hohlraumgeometrie (Kellerbauer, 1996)**

In der Vergangenheit durchgeführte Versuche, bestimmte Bereiche in den Werkern, welche auf Grund ihrer Geologie bevorzugt verlaugt wurden, zu verdämmen, wurden eingestellt, da die Dämme nach kurzer Zeit vom Wasser ausgespült wurden (Bartl, 2018).

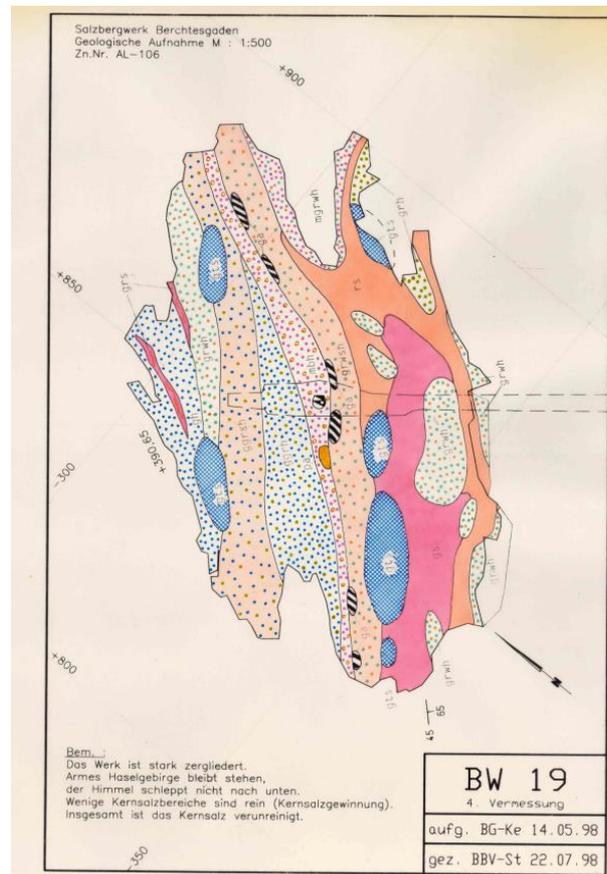
---

## **2.6 Vermessung und geologische Aufnahme der Werker**

---

Die Werker im Salzbergwerk Berchtesgaden sind lt. gesetzlichen Vorgaben jeweils im Abstand von 6m Vertikalabstand zur letzten Messung geodätisch zu überwachen (Bergamt Südbayern, 2016). Bei einem durchschnittlichen Ätzmaß von 1cm/ Tag bedeutet dies, dass eine Kaverne im Schnitt alle 2 Jahre vermessen wird.

Die Vermessung der Bohrspülwerke erfolgt über einen Laserscanner, welcher sukzessive an mehreren Punkten am Kavernenhimmel angebracht wird (Becker, 2013). Im Zuge der Kavernenvermessung wird auch eine geologische Aufnahme (Abbildung 10) der Himmelsflächen durchgeführt (Erstellen einer geologischen Karte der Himmelsfläche durch den Geologen).



**Abbildung 10: Bohrspülwerk 19 – geologischer Aufnahme der Himmelsfläche**

Die mittels des Bohrlochsondenverfahrens aufgefahrenen Werker sind nicht mehr – wie die Bohrspülwerke – über einen Schacht zugänglich. Ihre Vermessung erfolgt über einen Laser-Scanner, der durch das zentrale Bohrloch in die Kaverne abgelassen wird. Das Volumen von „Ausfransungen“ in der Kavernenform, welche durch Sichtschatten nicht eingemessen werden können, wird über das ausgepumpte Solevolumen rückgerechnet. Generell soll dieses Verfahren zu schmalen und hohen Kavernen führen (3.500m<sup>2</sup> Himmelsfläche statt der momentan angestrebten 4.200m<sup>2</sup>).

Die geologische Aufnahme, die im Moment bei jeder Kavernenvermessung ebenfalls durchgeführt wird, entfällt bei diesem Verfahren (Bartl, 2018). Somit bleiben der Salzgehalt und die Streichrichtung der aktuellen Himmelsaufnahme unbekannt. Die Kernbohrung reicht zur Beurteilung nur beschränkt, weil die Schichten meist steil stehen und der Abbauhohlraum teilweise über 50 m vom Bohrloch entfernt ist.

---

### **3 Hintergrund bzgl. der Kavernenausweitung**

---

Im Jahr 2003 wurde das Ingenieurbüro Müller & Hereth von der Südsalz GmbH mit der Erstellung einer geomechanischen Modellrechnung für das Salzbergwerk Berchtesgaden beauftragt. Hintergrund war eine kurzfristige Steigerung der Produktion, verbunden mit einer Vergrößerung der bereits in Aussolung befindlichen Abbauhohlräume, d.h. einer Vergrößerung der Himmelsflächen- von 3.500m<sup>2</sup> auf 4.200m<sup>2</sup>.

Grundlage des Genehmigungsantrags, eingereicht beim Bergamt Südbayern im Juli 2003, bildete die von Müller & Hereth durchgeführte Untersuchung des Tragverhaltens der Abbauhohlräume auf der 1. Tiefbausohle mittels einer numerischen Simulation in FLAC 3D. Weiters flossen die Ergebnisse von Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus dem Salzbergwerk Berchtesgaden (IFG Leipzig, 2003) sowie in situ Messungen aus bereits bestehenden Abbaufeldern in die Untersuchung ein.

Im Zuge des Genehmigungsverfahrens zur Vergrößerung der Abbauhohlräume wurde Herr Univ.-Prof. Dr. Ing habil. Lux, Peine, vom Bergamt Südbayern mit der Erstellung eines Gutachtens bezüglich der vorgelegten Antragsunterlagen beauftragt. Dieses wurde im Oktober 2004 abgeschlossen. Prof. Lux zeigte sich im Abschlussbericht grundsätzlich mit den Ausführungen einverstanden, merkte jedoch an, dass die Berechnungen von statischen Verhältnissen ausgingen und das Kriechverhalten des Haselgebirges dabei nicht berücksichtigt würde (Lux, 2004).

Bezugnehmend auf das Gutachten von Prof. Lux (2004) sowie die von Müller & Hereth erstellte geomechanische Modellrechnung (2003) erging im Jahr 2016 ein Bescheid vom Bergamt Südbayern, welcher u.a. folgendes vorschreibt:

- Die Gesamtverschiebung sowie die Gesamtsetzung im Grubengebäude und insbesondere auf dem Streckennetz der 1. Tiefbausohle sind alle drei Jahre geodätisch zu messen.
- Eine messtechnische Instrumentierung des Zugangsstreckensystems ist durchzuführen. Dieses ist im Hinblick auf kaverneninduzierte Deformation (Firstsetzung, Konvergenzen) sowie Rissbildungen bzw. Abschalungen systematisch zu überwachen.
- Neben den bereits bestehenden Messeinrichtungen im Bohrspülwerk 13 soll ein weiteres Bohrspülwerk mit Messeinrichtungen ausgestattet werden, um Gebirgsverformungen zu dokumentieren. Im Bescheid werden keine weiteren Anforderungen bzgl. der Lage oder Überlagerungshöhe des betreffenden Bohrspülwerks gestellt; es muss lediglich die vorgesehene Größe der Planellipse mit den Achsenlängen von 125m x 65m bereits erreicht haben.
- Die geomechanische Modellrechnung ist anhand der bei diesen Messungen gewonnenen Daten alle 3 Jahre auf Plausibilität zu beurteilen.
- Bis zum 01.03.2020 ist dem Bergamt Südbayern eine aktualisierte Version der geomechanischen Modellrechnung vorzulegen, welche das Kriechverhalten des Haselgebirges berücksichtigt.

Zudem erfolgt im Bescheid eine genaue Vorgabe der Geometrie auf der 1. Tiefbausohle:

Die Abmessungen der ellipsenförmigen Plankavernen (Erweiterungsellipse, Planellipse) mit den Achsenlängen 125m x 65m und einer Teufe von 125m müssen eingehalten werden.

Die Planellipse darf punktuell an zwei Stellen um maximal 5m überschritten werden (Erweiterungsellipse); die außerhalb der Plankaverne liegende Fläche darf dabei nicht mehr als 200m<sup>2</sup> aufweisen. Der geringste Abstand zum tatsächlichen Hohlraum der benachbarten Kaverne muss in jedem Fall mindestens **35m in Längserstreckung und 55m in Quererstreckung** in jedem Punkt des Abbauniveaus betragen.

In der Endphase sind alle Kavernen in Form einer Kuppel mit einem Stich von 15m zu verlaugen.

Der saigere Abstand zwischen dem höchsten Punkt des Kavernenhimmels im Endzustand und der Sohle der überlagernden Sinkwerke auf der König-Ludwig-Stollensohle muss mindestens 30m betragen.

(Bergamt Südbayern, 2016)

---

## 4 Genereller Aufbau des Salzbergwerkes

---

Das Salzbergwerk Berchtesgaden besteht aus 5 Sohlen. Die oberen drei davon stammen aus der Zeit des 16., 17. und 18. Jahrhunderts. Bedingt durch die historischen Abbautechniken beträgt der Vertikalabstand zwischen diesen Sohlen nur wenige Meter. Die vierte Sohle, auch als König Ludwig Stollensohle bezeichnet (532m über NN), war bis Ende des letzten Jahrhunderts in Betrieb. Ihr Vertikalabstand zur darunterliegenden 1.Tiefbausohle (477m über NN) beträgt etwa 55m, die Schwebenmächtigkeit 30m. Alle sich derzeit in Betrieb befindlichen Bohrspülwerke wurden vom Niveau der 1.Tiefbausohle aus aufgefahren.

### Abbau-Anordnung auf der 1.Tiefbausohle:

Zur Gewährleistung der Standsicherheit sind die Werker auf der 1. Tiefbausohle in einem Raster angelegt. Die lange Seite des Abbaublocks wurde dabei in Streichrichtung angelegt und berücksichtigt die bevorzugte Auslängung der Werker in diese Richtung. Die Geometrie dieser Abbaublöcke beträgt 120x160m mit einer Abbauhöhe von 125m.

Mit Ausnahme von Bohrspülwerk 13 (Solespeicher) und Bohrspülwerk 59, wo Schneidberge eingelagert werden, befinden sich derzeit noch alle Werker auf der 1.Tiefbausohle (etwa 40) in Aussolung.

Nach dem Abschluss der Abbautätigkeiten in einem Werk beträgt der Verfüllungsgrad durch Laist etwa 80%. Die restliche, sich noch im Werk befindliche Sole wird ausgepumpt. In die Werker werden im Anschluss (falls nicht wie in Ausnahmefällen als Solespeicher verwendet) Kalkschlammeinlagerungen aus der Salzaufbereitung bzw. Bergeversatz aus dem Streckenvortrieb eingestürzt und somit Großteils verfüllt. Die Zugänglichkeit der Kavernen ist nach Beendigung der Aussolung nicht mehr gegeben.

Im Zuge des Abbaufortschrittes soll der östliche Teil der Lagerstätte aufgeschlossen werden (Abbildung 11). Dieser Bereich befindet sich versetzt zum historischen Abbaufeld, weshalb dort keine darüber liegenden, alten Abbaukammern existieren. Dort sind Kavernen mit Endhöhen von max. 330m geplant. (Bartl, 2018)



---

## 5 Gebirgsmechanische Überwachung im Salzbergwerk Berchtesgaden

---

### 5.1 Bergmännische Beobachtungen bzw. durchgeführte Messungen

---

#### 5.1.1 Historische Verformungsbeobachtungen

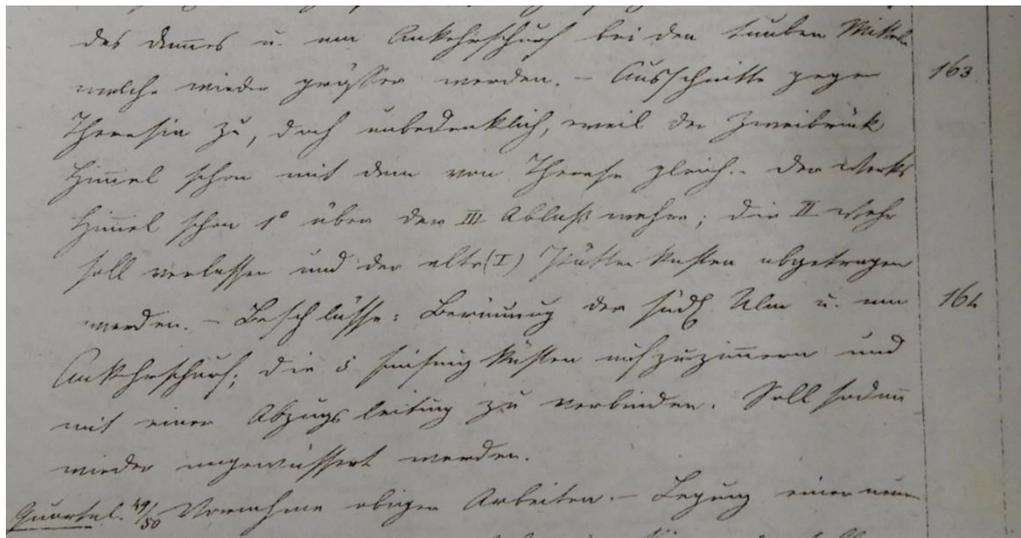
---

Im Archiv des Salzbergwerks Berchtesgaden liegen die handschriftlichen Aufzeichnungen von ca. 30 historischen Sinkwerken, welche zwischen 1600 und 1800 angelegt wurden (Abbildung 12).



**Abbildung 12: Chroniken alter Sinkwerke im Archiv in Berchtesgaden**

Beim Großteil dieser Aufzeichnungen handelt es sich um Auflistungen über Schöpfausträge aus den alten Werkern; es liegt jedoch für jedes einzelne Sinkwerk zudem eine kurze Chronik bestehend aus ca. 20 – 60 handgeschriebenen Seiten vor, welche die Geschichte des Werkes dokumentiert. Hierin finden sich Aufzeichnungen über bergmännische Beobachtungen wie etwa das Auftreten von Abschalungen, das Öffnen und Schließen von Klüften sowie Verbrüche und Wassereinbrüche in den Werkern (Abbildung 13).



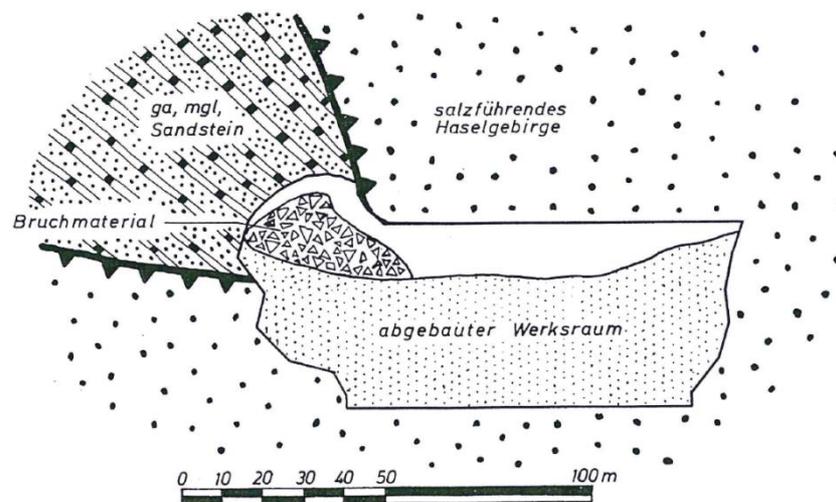
**Abbildung 13: Auszug aus einer Sinkwerks-Chronik**

Einige der in den Sinkwerks-Chroniken erwähnten Verbrüche wurden bereits von Kellerbauer (1996) im Rahmen seiner Dissertation untersucht und lassen sich durch die Nähe dieser Werker zum ausgelaugten Haselgebirge oder zu Einlagerungen aus Sandstein und Anhydrit erklären (Kellerbauer, 1996).

Wird ein Hohlraum entleert, führen die geänderten Innendruckverhältnisse zu einer Vergrößerung der Konvergenzrate sowohl an der Firste als auch an den Ulmen. Da sich die Firste im Zentrum des Hohlrums mit einer höheren Verformungsrate absenkt als an ihren Rändern, können Sekundärklüfte entstehen, welche in der Regel konzentrisch um den in der Mitte gelegenen Zugangsschacht angeordnet sind. Aufzeichnungen über derartige Kluft- und Rissbildungen finden sich häufig in den Sinkwerks-Chroniken.

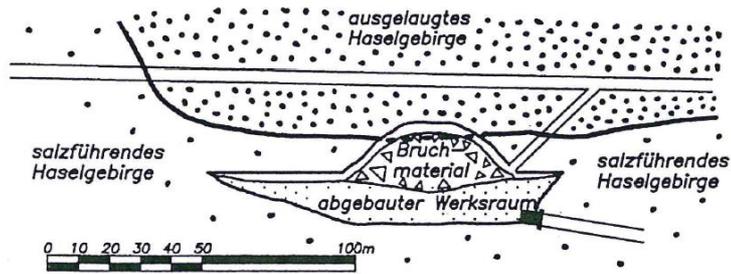
Von derartigen Sekundärklüften abgesehen, verhält sich das Salzgebirge in der Regel jedoch auf Grund seiner Fließeigenschaften plastisch. Das Gebirge nimmt Verformungen in der Regel bruchlos auf; auftretende Spannungen werden kontinuierlich abgebaut. Nähert sich ein Hohlraum jedoch einer Gesteinseinlagerung mit anderen Verformungseigenschaften an, wird dieser Mechanismus des kontinuierlichen Spannungsabbaus gestört. Gesteine solcher Art, wie etwa Anhydrit, Kalk oder Sandstein, weisen ein wesentlich geringere Plastizität als das Haselgebirge auf und zeigen ein sprödes Verhalten.

Um die Einlagerungen, welche anders als das Haselgebirge die auftretenden Spannungen nicht durch plastische Verformung abbauen können, bauen sich bei Annäherung des Hohlraums immer größere lokale Spannungsspitzen auf. Kommt der Werkshimmel der Einlagerung zu nahe, kann dies zu einem Verbruch der Himmelsfläche führen wie dies etwa im Sinkwerk LIX auf der König Ludwig Stollensohle im Ostfeld (Seehöhe 532m über NN) der Fall war (Abbildung 14). (Kellerbauer, 1996)



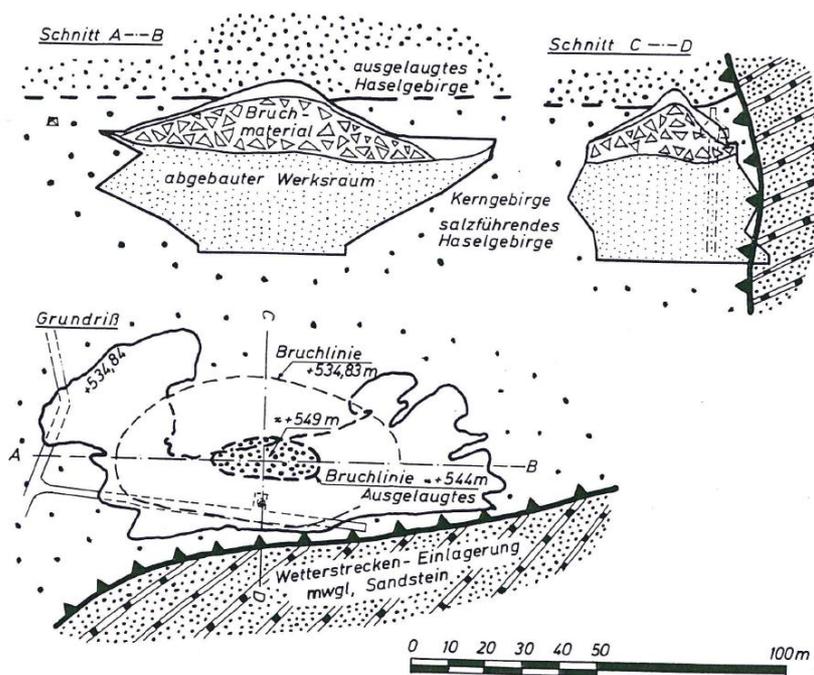
**Abbildung 14: Nachfall aus einer Zone aus Anhydrit und Sandstein im Sinkwerk LIX (Kellerbauer, 1996)**

Ähnliches geschieht, wenn sich ein Werk dem ausgelaugten Haselgebirge annähert. Durch den Wechsel in den Gesteinseigenschaften (ausgelaugtes Haselgebirge besitzt eine geringere Druck- und Zugfestigkeit) wird die Spannungsumlagerung gestört. An der Diskontinuität zwischen dem Haselgebirge und dem ausgelaugten Haselgebirge kommt es zum Verbruch. Ein Beispiel dafür ist der historische Verbruch im Prinz Adalbert Werk, bei dem die Schwebelose versagte (Abbildung 15). (Kellerbauer, 1996)



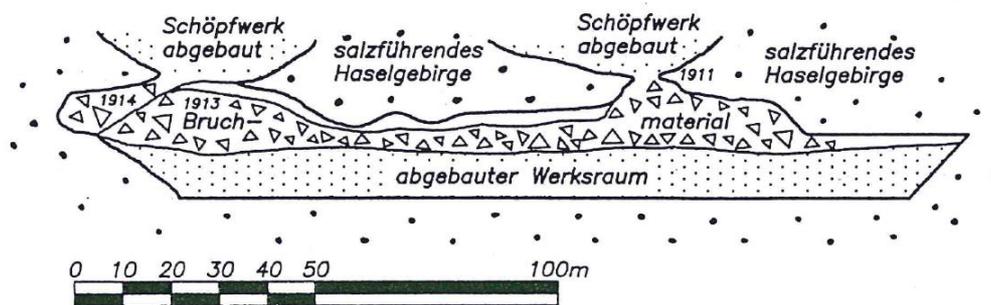
**Abbildung 15: Verbruch im Prinz Adalbert Werk, welches zu nahe an das ausgelaugte Haselgebirge angenähert wurde (Kellerbauer, 1996)**

Ein relativ zeitnahe Verbruch ereignete sich im Jahr 1991 auf der König Ludwig Stollensohle im Südfeld in Sinkwerk LXXI (Abbildung 16). Das Werk war direkt neben einer Einlagerung aus Sandstein und Anhydrit angelegt worden. Bereits zu Beginn des Abbaus sowie nach dessen Stilllegung traten im Werk und in den Zugangsstrecken ungewöhnlich hohe Konvergenzen auf. Schließlich brach die Schweben etwa 12m bis ins ausgelaugte Haselgebirge durch. Ursächlich für den Verbruch waren die ungünstige Spannungssituation infolge der Nähe zur Fremdgesteinseinlagerung sowie die Nähe zum ausgelaugten Haselgebirge. Dieses war auf Grund der Überlagerung von etwa 200m hier nicht vermutet worden, zog sich jedoch, wie spätere Untersuchungen zeigten, an einer wasserführenden Kalkeinlagerung weit nach unten in die Lagerstätte.



**Abbildung 16: Verbruch im Sinkwerk LXXI 1991 (Kellerbauer, 1996)**

Auch innerhalb des Haselgebirges kam es während des historischen Salzabbaus manchmal zu Verbrüchen. Diese traten auf, wenn die erforderliche Mindest-Schwebenmächtigkeit zwischen zwei Sinkwerken nicht eingehalten wurde. Ein Beispiel hierfür ist das historische Churfürst Clement Werk (Abbildung 17), bei welchem die Schweben an zwei Stellen versagte und der Laist aus dem darüber gelegenen Sinkwerk nach unten abfloss.



**Abbildung 17: Durchbruch im Churfürst Clement Werk (Kellerbauer, 1996)**

Informationen über großflächige Verbrüche, welche mehrere im reinen Haselgebirge gelegenen Werker umfassen, finden sich in den Sinkwerks-Chroniken jedoch nicht. Somit können aus den historischen Aufzeichnungen keine klaren Rückschlüsse auf die in situ Spannungssituation gezogen werden.

### 5.1.2 Nivellement- und Extensometermessungen im Senna I Werk

Die ersten gebirgsmechanischen Überwachungstätigkeiten, die nicht auf bloßen Beobachtungen, sondern auf der Installation von Messeinrichtungen beruhten, fanden im Senna I Werk statt.

Das Senna I Werk ist ein ehemaliges Ablasswerk, welches zwischen der Frauenberg und der etwa 15m darunterliegenden Ferdinandberg Stollensohle liegt (Überlagerung etwa 100m).

Abbildung 18 zeigt das einen Plan des Senna I Werkes aus dem Jahr 1847.



**Abbildung 18: Historischer Plan des Senna I Werkes**

Das Werk wurde nach Beendigung der Abbautätigkeiten erst als Einschlagwerk (Sole-Zwischenspeicher) und ab rund 1850 als Gästeeinfahrt für Besucher des Salzbergwerks benützt, welche auf Booten über den unterirdischen See befuhren. Um die Sicherheit der Besucher zu gewährleisten, entschloss man sich in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts, den Himmel der Kaverne messtechnisch zu überwachen. Der Kavernenhimmel ist mit Anker gesichert; zusätzlich sind am nördlichen Ulm Stützkästen eingebaut.

Über die im Himmel eingebrachten Anker und Messbolzen (Anordnung siehe Abbildung 19), wurden in festgelegten zeitlichen Abständen Nivellements und Extensometer-/ Fissurometer-Messungen durchgeführt. Die Messungen ziehen sich über einen Zeitraum von 1965 bis ca. 2000.



---

## 5.2 Extensometer- und Gebirgsdruckmessungen in Bohrspülwerk 13

---

### 5.2.1 Lage und Geologie von Bohrspülwerk 13

---

Bohrspülwerk 13 wurde in den 1980er Jahren von der 1. Tiefbausohle (Seehöhe 477m über NN) aus aufgefahren und liegt in deren Mittelfeld. Das Werk befindet sich zur Gänze im homogenen, salzführenden Haselgebirge mit einem Salzgehalt von etwa 50%.

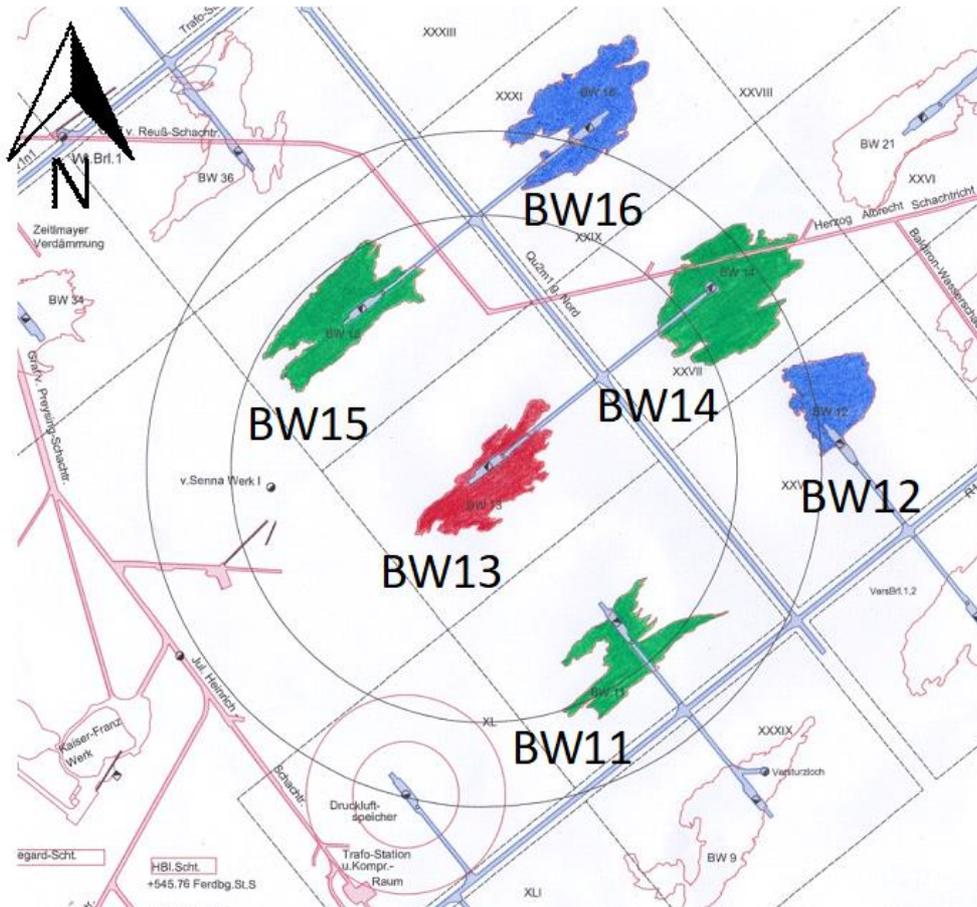
Die Überlagerung beträgt ca. 270m; die Schweben zur darüber liegenden König Ludwig Stollensohle (Seehöhe 532m über NN) ist 30m mächtig. Im Bereich von Bohrspülwerk 13 befinden sich keine Laugungshohlräume auf der darüber liegenden Sohle.

Die Bohrung für das Werk wurde 1981/82 von der Ankehrschachtricht (Strecke) über dem Werk (Seehöhe 477m über NN) aus abgeteuft. Somit liegt der tiefste Punkt von BW13 auf einer Seehöhe von etwa 350m über NN.

Die erste Vermessung des Werkes erfolgte im Jahre 1983 nacherspülung des Initialhohlraums. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Himmelsfläche 2.760m<sup>2</sup>. Bis zum Jahr 2004 wurde Bohrspülwerk 13 mit einer Planfläche von 3.750m<sup>2</sup> betrieben und anschließend beruhend auf der geomechanischen Modellrechnung des Ingenieurbüros Müller & Hereth (2003) sowie des Gutachtens von Prof. Lux (2004) zu Versuchszwecken auf 4.250m<sup>2</sup> erweitert.

Seit 2017 ist Bohrspülwerk 13 fertig ausgesolt und dient als Solespeicher (Solepuffer). Bei einem plötzlichen Anstieg der Nachfrage stehen so Solereserven zur Verfügung, auf welche zurückgegriffen werden kann. Das Werk ist etwa zu 80% mit Laist verfüllt und fasst eine maximale Solemenge von 21.000 m<sup>3</sup>. Je nach Nachfrage variieren die Füllmenge und damit der Solestand im Werk.

Abbildung 20 zeigt die Lage des Bohrspülwerks 13 auf der 1.Tiefbausohle sowie die umliegenden Werker.



**Abbildung 20: Lage von Bohrspülwerk 13 und der umliegenden Werker**

Die farblich gekennzeichneten Werker liegen im Einflussbereich von BW13 (rot). Dies sind im Umkreis von 150m Radius die Werker BW11, BW14 und BW15 (grün) und im Umkreis von 200m Radius BW12 und BW16 (blau).

### Umliegende Werker von BW13

Im Westen und Nordwesten von Bohrspülwerk 13 liegen keine anderen Werker. Im Norden befindet sich das BW15 (aufgefahren 1984), im Nordosten das BW 16 (aufgefahren 1980). Für beide Bohrspülwerke wurde das Großbohrloch von der 1. Tiefbausohle (477m über NN) aus 125m abgeteuft.

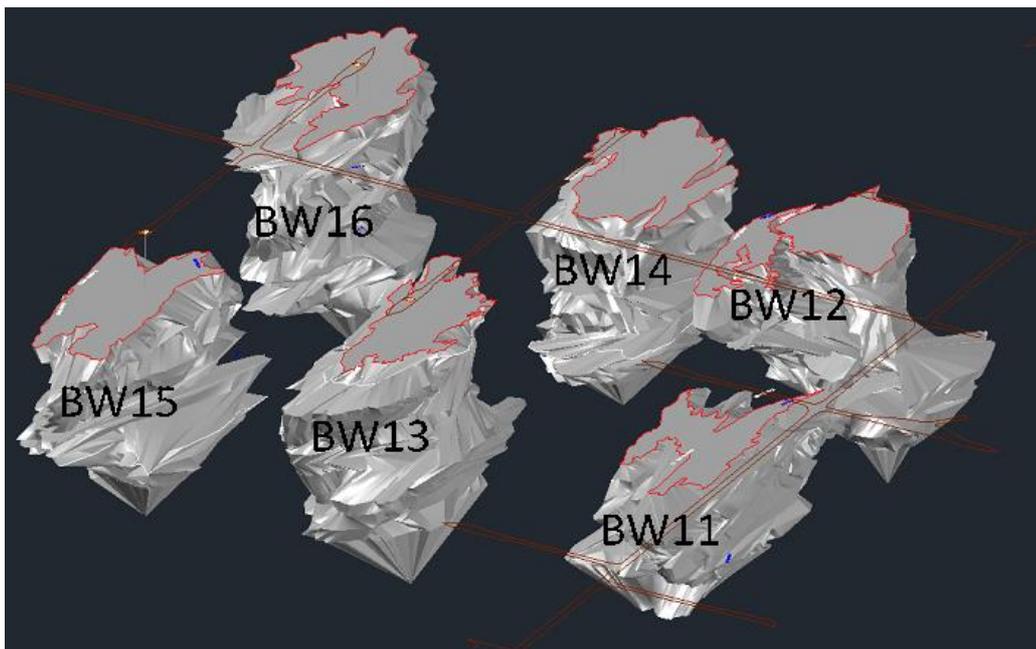
Für das im Osten befindliche BW 14 wurde das Großbohrloch 1973 175,5m von der König Ludwig Stollensohle (532m über NN) aus abgeteuft. Die Sohle des Bohrloches liegt somit 120,5m unter dem Niveau der 1.Tiefbausohle.

Im Südosten von Bohrspülwerk 13 liegt das BW 12 (aufgefahren 1981), im Süden das BW11 (aufgefahren 1986). Das Großbohrloch für beide Bohrspülwerke wurde jeweils 125m von der 1. Tiefbausohle (477m über NN) abgeteuft).

Weiters befindet sich im Südwesten das BW4. Dieses wurde im Jahr 1976 von der 1. Tiefbausohle aus aufgefahren. Das BW4 dient seit der Erstellung der Anfangskaverne (ca. 15m hoch und einem Inhalt von 5000m<sup>3</sup>) als Druckluftspeicher (seitdem keine weitere Solegewinnung).

Bis auf das Bohrspülwerk 13 und das BW4 befinden sich alle übrigen Werker noch in der Solegewinnungsphase.

Abbildung 21 zeigt ein 3D-Modell von Bohrspülwerk 13 und der umliegenden Werker (Stand Sommer 2018).



**Abbildung 21: 3D-Modell von Bohrspülwerk 13 und der umliegenden Werker**

---

## 5.2.2 Durchgeführte Messungen und Messintervalle in BW13

---

Insgesamt sind im Gebirge über dem Hohlraum von BW13 bzw. im Pfeiler zwischen BW13 und BW14 7 Bohrlochgeber vom Typ BB10/20 K400 (zur Gebirgsdruck-Messung) sowie 16 Glasfaserstangenextensometer vom Typ GKSE 16 der Firma Glötlz eingebaut.

Die Extensometer-Messungen sowie die Gebirgsdruck-Messungen wurden in zweiwöchigen Intervallen durchgeführt. 1x pro Jahr erfolgte zudem die Durchführung eines Feinnivellements in der Ankehrschachtricht (Strecke) über dem Bohrspülwerk 13, wobei die jeweiligen Höhen der Extensometerköpfe ermittelt wurden.

Konvergenzmessungen in der Ankehrschachtricht wurden nicht durchgeführt.

---

## 5.2.3 Installation der Messeinrichtungen

---

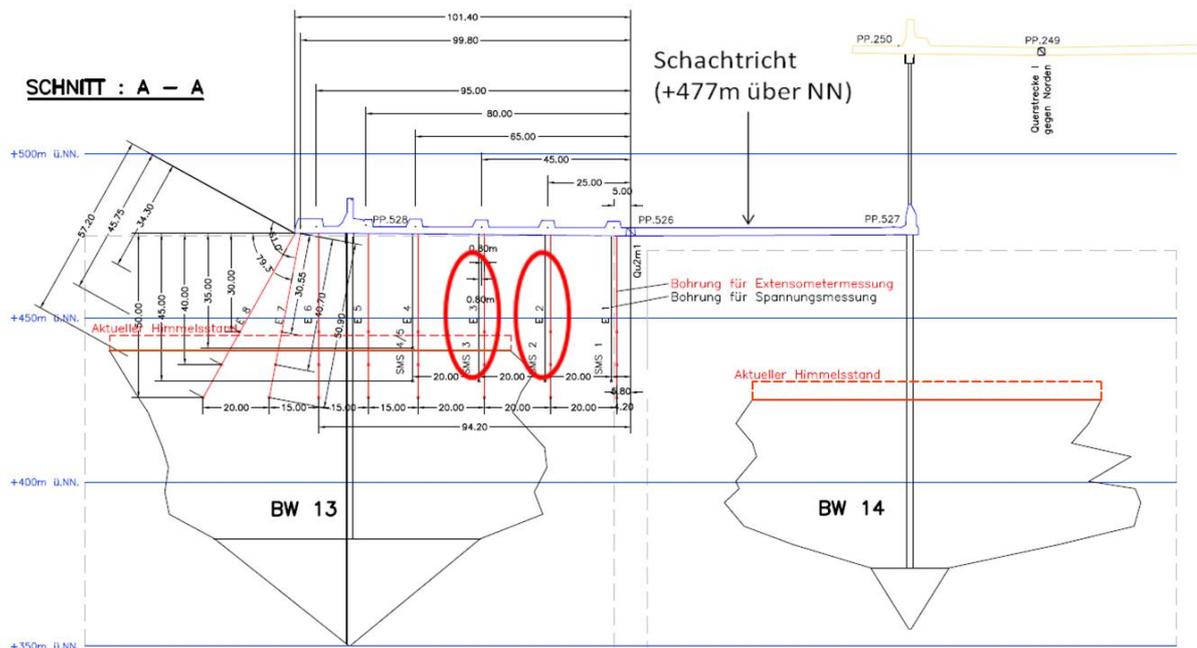
Im Jahr 1997 (damals befand sich das Werk BW 13 noch in Auswässerung), wurden die ersten Extensometer E1 bis E8 sowie die Spannungsmonitoring-Systeme (Bohrlochgeber) SMS1 und SMS2 installiert. Der überwiegende Teil der Messwerte von BW13 wurde also erstellt, während sich das Werk noch in Aussolung befand.

Die Messpunkte liegen allesamt in der Strecke (Ankehrschachtricht), von welcher aus der Hohlraum des BW13 aufgefahren wurde (477m über NN).

Die Dreifachextensometer E1 und E2 befinden sich im Pfeiler zwischen BW13 und BW14, ebenso wie SMS1 und SMS2 (Abbildung 22). Ihre Einbindetiefen (bezogen auf das Niveau der Schachtricht auf 477m über NN) sowie ihr Einbauwinkel finden sich in Tabelle 1.

	Einbindetiefe [m]	Winkel zur Horizontalen [°]
E1/1, E2/1	50 m	90°
E1/2, E2/2	40 m	90°
E1/3, E2/3	30 m	90°
SMS1	45 m	90°
SMS2	45 m	90°

**Tabelle 1: Einbindetiefen und Einbauwinkel von E1, E2, SMS1 und SMS2**



**Abbildung 22: Anordnung von E1, E2, SMS1 und SMS2 (Plan von 2005)**

E3-E8 (ebenfalls Dreifachextensometer) liegen im Bereich der Firste des Abbauhohlraums (Abbildung 23); diese Extensometer wurden auf Grund des fortschreitenden Abbaus mit der Zeit sukzessive freigelaut und verloren ihre Funktion. Abbildung 24 zeigt mehrere freigespülte, aus der Firste in den Hohlraum ragende Betonsäulen, in denen sich die Einbindpunkte der Messgeräte befinden. Die Fotografie wurde im Zuge einer Hohlraumvermessung erstellt.

Die Einbindetiefen von E3-E8 (bezogen auf das Niveau der Schachtricht auf 477m über NN) sowie ihr Einbauwinkel finden sich in Tabelle 2.

	Einbindetiefen [m]	Winkel zur Horizontalen [°]
E3/1, E4/1, E5/1, E6/1	50 m	90°
E3/2, E4/2, E5/2, E6/2	40 m	90°
E3/3, E4/3, E5/3, E6/3	30 m	90°
E7/1	49,1 m	79,3°
E7/2	39,3 m	79,3°
E7/3	29,5 m	79,3°
E8/1	43,7 m	61°
E8/2	35,0 m	61°
E8/3	26,2 m	61°

**Tabelle 2: Einbindetiefen und Einbauwinkel von E3-E8**

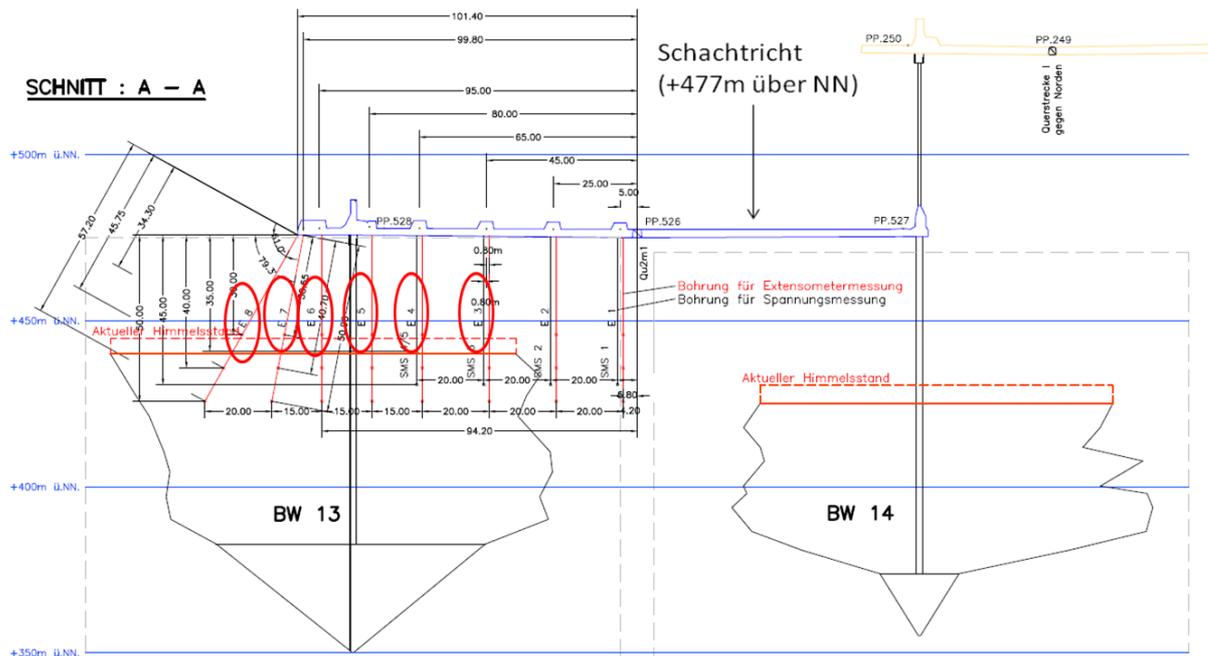


Abbildung 23: Anordnung von E3 bis E8 (Plan von 2005)



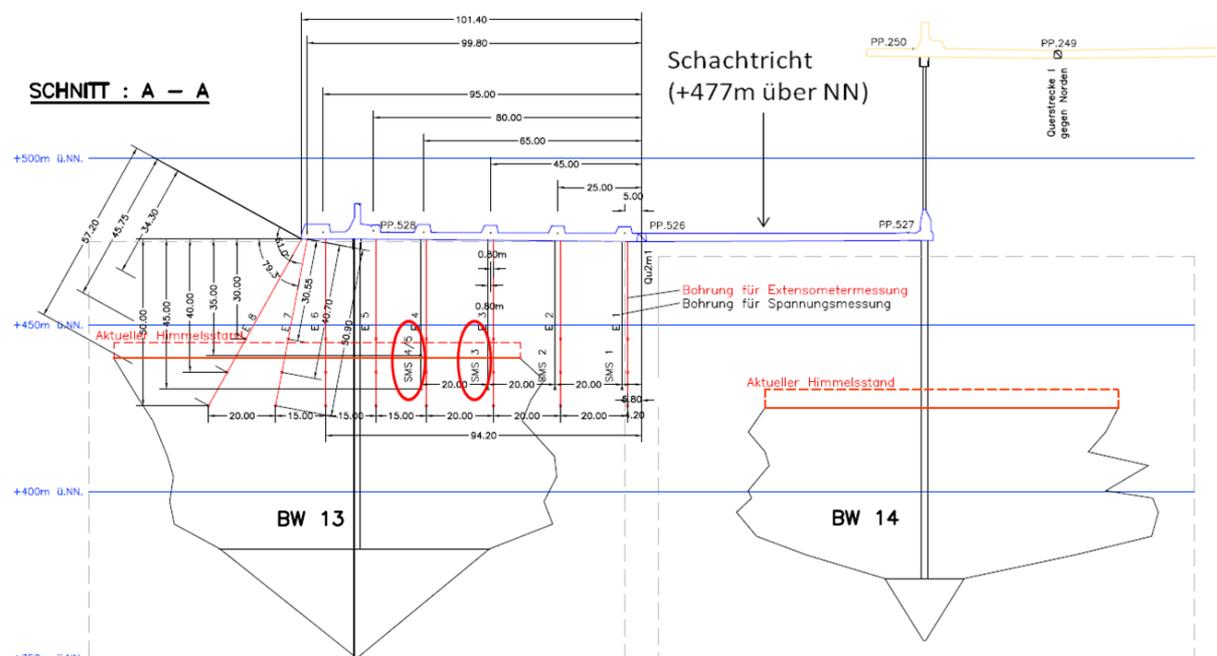
Abbildung 24: Freigelegte Betonsäulen einer Spannungsmessstation und zweier Extensometer

1999 erfolgte die Inbetriebnahme der Spannungsmonitoring-Systeme SMS 3, 4 und 5 (Abbildung 25). Auch sie wurden mit der Zeit freigelaugt.

Ihre Einbindetiefen (bezogen auf das Niveau der Schachtricht auf 477m über NN) sowie ihr Einbauwinkel finden sich in Tabelle 3.

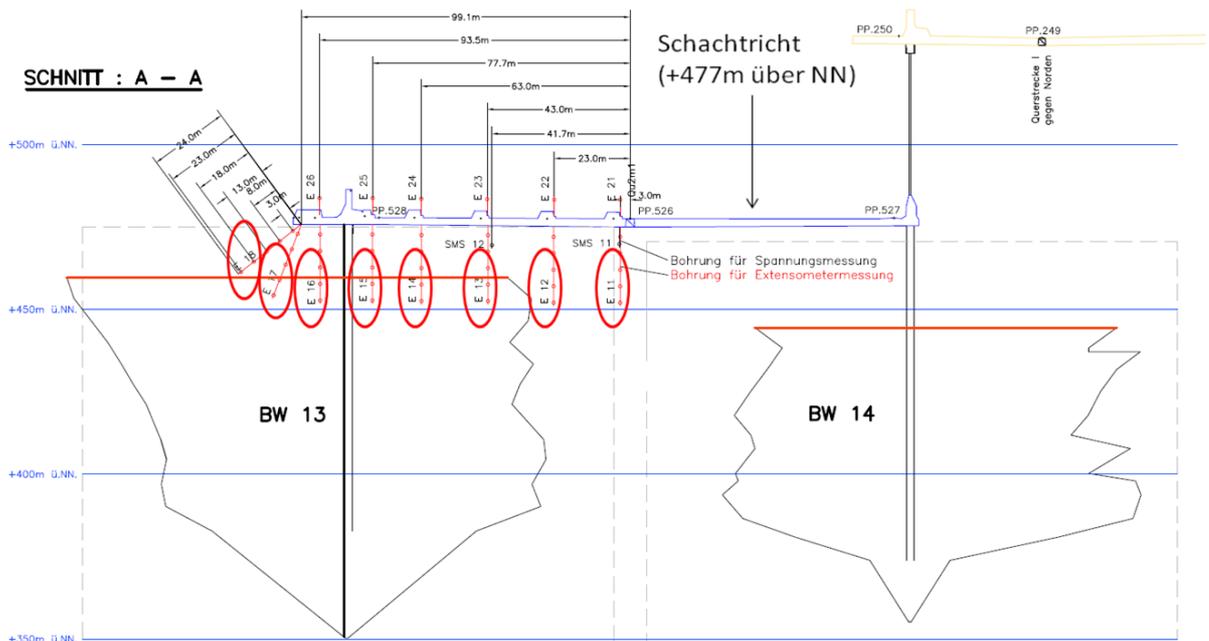
	Einbindetiefen [m]	Winkel zur Horizontalen [°]
SMS3	45 m	90°
SMS4	45 m	90°
SMS5	35 m	90°

**Tabelle 3: Einbindetiefen und Einbauwinkel von SMS3, 4 und 5**



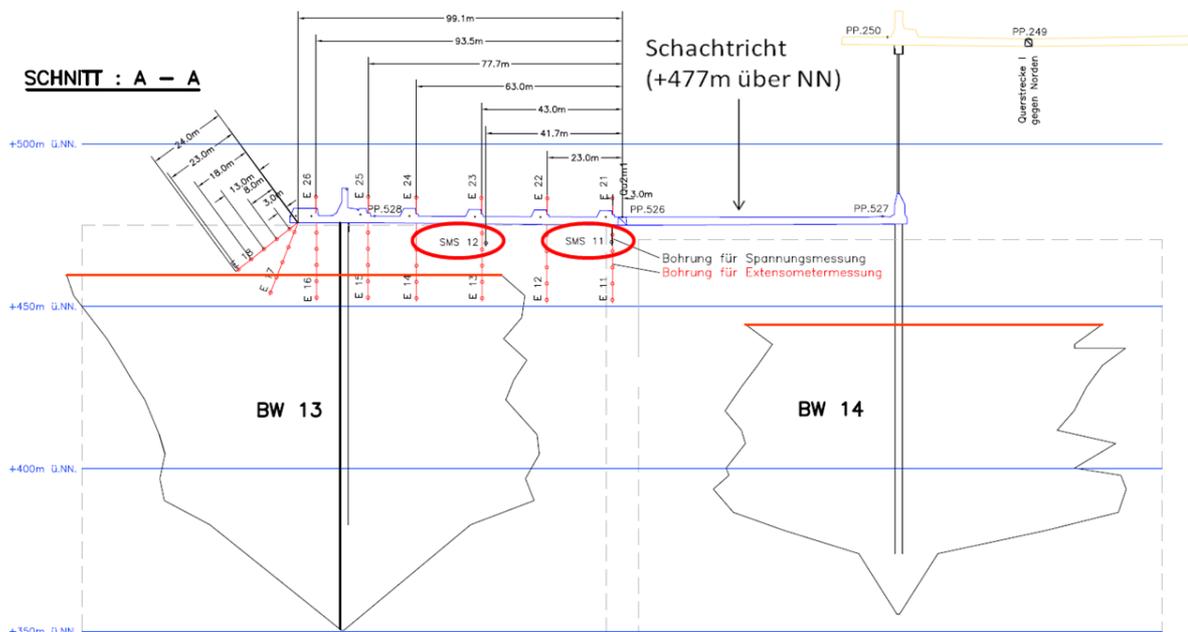
**Abbildung 25: Anordnung von SMS3 bis SMS5 (Plan von 2005)**

Im Jahr 2007 wurden im Bohrspülwerk 13 folgende Neuinstallationen durchgeführt: 1) die Extensometer E11 bis E18 in der Schwebe über dem Abbauhohlraum von BW13 bzw. im Pfeiler zwischen BW13 und BW14 (Abbildung 26). Es handelt sich dabei um Fünffachextensometer.



**Abbildung 26: Anordnung von E11 bis E18 (Plan von 2013)**

2) die Spannungsmonitoring-Systeme SMS 11 im Pfeiler zwischen BW13 und BW14 sowie SMS 12 in der Schweben über dem Abbauhohlraum von BW13 (Abbildung 27).



**Abbildung 27: Anordnung von SMS11 und SMS12 (Plan von 2013)**

Die Einbindetiefen von E11-E18 und SMS1 + 2 (bezogen auf das Niveau der Schachtricht auf 477m über NN) sowie ihr Einbauwinkel finden sich in Tabelle 4.

	Einbautiefe [m]	Winkel zur Horizontalen [°]
E11/1, E12/1	23 m	90°
E11/2, E12/2	18 m	90°
E11/3, E12/3	13 m	90°
E11/4, E12/4	8 m	90°
E11/5, E12/5	3 m	90°
E13/1, E14/1, E15/1, E16/1	23 m	90°
E13/2, E14/2, E15/2, E16/2	18 m	90°
E13/3, E14/3, E15/3, E16/3	13 m	90°
E13/4, E14/4, E15/4, E16/4	8 m	90°
E13/5, E14/5, E15/5, E16/5	3 m	90°
E17/1	21,6 m	70°
E17/2	16,9 m	70°
E17/3	12,2 m	70°
E17/4	7,5 m	70°
E17/5	2,8 m	70°
E18/1	13,9 m	37,3°
E18/2	10,9 m	37,3°
E18/3	7,9 m	37,3°
E18/4	4,9 m	37,3°
E18/5	1,8 m	37,3°
SMS11	6 m	90°
SMS12	6 m	90°

**Tabelle 4: Einbindetiefen und Einbauwinkel von E11-E18 sowie SMS1 und SMS2**

---

## 6 Auswertung der Messdaten aus BW13

---

### 6.1 Theoretischer, gebirgsmechanischer Hintergrund

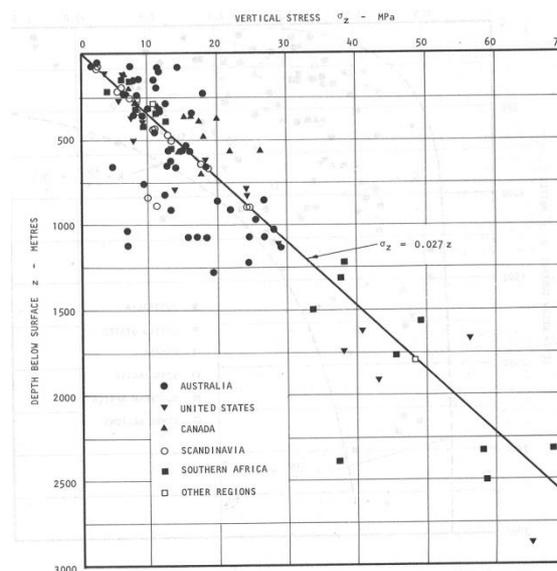
---

#### Spannungsverteilung um einen Hohlraum

Der Spannungszustand im unverritzten Gebirge hängt von der Teufe (Überlagerungshöhe), dem Gewicht der überlagernden Gebirgsmassen und seiner geologisch-tektonischen Vergangenheit ab.

Die im unverritzten Gebirge herrschende Hauptnormalspannung  $\sigma_v$  errechnet sich über  $\sigma_v = \rho \cdot g \cdot H$ , wobei  $\rho$  die Dichte [ $\text{kg/m}^3$ ],  $g$  die Erdbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ] und  $H$  die Teufe [ $\text{m}$ ] darstellt. Die horizontale Hauptnormalspannung  $\sigma_h$  ergibt sich über die Formel  $\sigma_h = k \cdot \sigma_v$ . Hierbei gibt  $k$  das Verhältnis von  $\sigma_h$  zu  $\sigma_v$  an. Im Falle von  $k=1$  herrscht ein hydrostatischer Spannungszustand.

Die Abbildungen 28 und 29 beruhen auf den Aufzeichnungen weltweit durchgeführter in situ Spannungsmessungen. Wie aus der Abbildung 28 ersichtlich, nimmt die vertikale Hauptnormalspannung  $\sigma_v$  linear mit der Teufe zu;  $k$  hingegen hängt nicht von der Teufe ab und variiert in einem Bereich von 0,3 bis etwa 3,5. In geringen Teufen nimmt  $k$  höhere Werte an als in großen Teufen (Abbildung 29). (Hoek & Brown, 1980)



**Abbildung 28: Vertikale Hauptnormalspannungen  $\sigma_v$  als Funktion der Teufe (Hoek & Brown, 1980)**

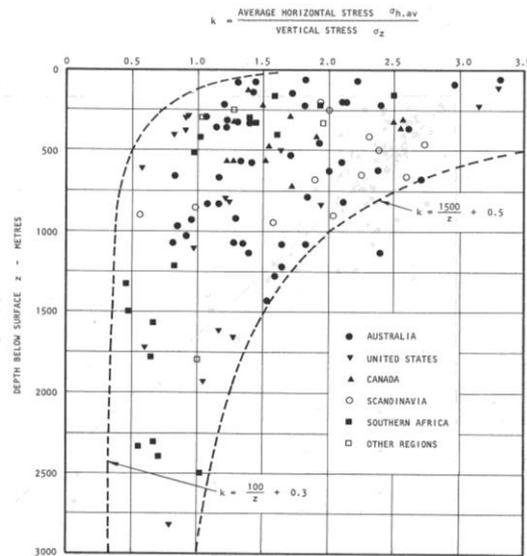


Abbildung 29: Verhältnis von  $\sigma_h / \sigma_v$  über die Tiefe (Hoek & Brown, 1980)

Das Auffahren eines Hohlraums im unverritzten Gebirge stört den ursprünglich vorhandenen Spannungszustand und führt zu Spannungsumlagerungen und Verformungen.

Durch die Spannungsumlagerung ergeben sich erhöhte Druckspannungen an den Umlen und ein druckentlasteter Bereich der Firste und Sohle des Hohlraums. Mit zunehmendem Abstand vom Hohlraum nimmt dessen Einfluss auf das Spannungsfeld ab. Etwa drei Radien vom Zentrum einer einzelnen kreisförmigen Ausnehmung entfernt herrscht ein Spannungszustand, welcher jenem im unverritzten Gebirge entspricht (Abbildung 30).

Die Spannungsverteilung in Abbildung 30 entspricht dem Fall:  $\sigma_h = \sigma_v$ , i. e.  $k = 1$ . Die Tangentialspannungen nehmen mit zunehmendem Abstand vom Hohlraum ab, während die Radialspannungen, welche am Hohlraumrand 0 sind, zunehmen.

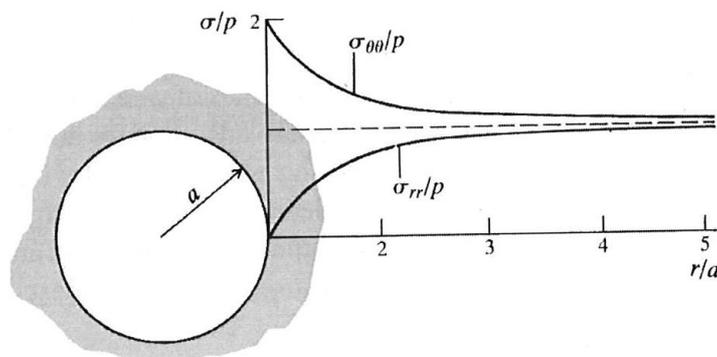


Abbildung 30: Spannungsverteilung um einen kreisförmigen Hohlraum im hydrostatischen Spannungsfeld (Brady & Brown, 2004)

Zur Berechnung der Spannungen (radial, tangential und Scherspannungen) sowie der Verformungen rund um einen kreisförmigen Hohlraum werden die Kirsch-Gleichungen herangezogen. Auch diese Gleichungen setzen das Modell eines sich ideal elastisch verhaltenden Gebirges voraussetzen und vernachlässigen Effekte wie die Rissbildung im Nahbereich hochbelasteter Grubengebäude. (Brady & Brown, 2004)

### Einfluss der Geometrie

Die Geometrie eines Hohlraums hat wesentlichen Einfluss auf die Spannungsverteilung. Dies kann am einfachsten am Beispiel eines Hohlraums mit elliptischen Querschnitt gezeigt werden.

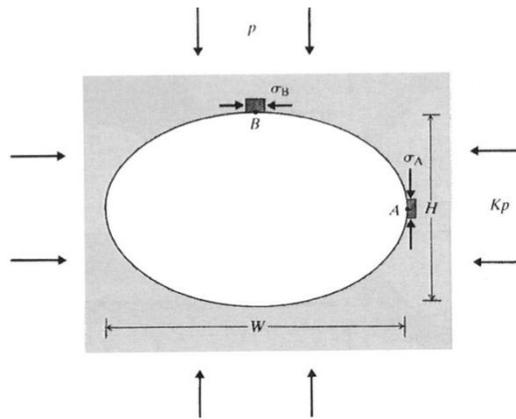
Für einen elliptischen Hohlraum-Querschnitt (Anmerkung: für den betrachteten Fall liegt die Hohlraumlängsachse parallel zur Vertikalspannungsrichtung) (Abbildung 31) hängt die Spannungsverteilung wesentlich von  $q$ , dem Verhältnis von Breite zu Länge der Ellipse, ab. Tabelle 5 zeigt die horizontalen Spannungen in den Ulmen eines elliptischen Tunnelquerschnitts in Abhängigkeit von  $q$  im Falle eines hydrostatischen Spannungszustands ( $k=1$ ). (Brady & Brown, 2004)

	Ulm A	Ulm B
$q=1$	$\sigma_A = 2 * \sigma_H$	$\sigma_B = 2 * \sigma_H$
$q=2$	$\sigma_A = 4 * \sigma_H$	$\sigma_B = 1 * \sigma_H$
$q=3$	$\sigma_A = 10 * \sigma_H$	$\sigma_B = 0,4 * \sigma_H$
$q=4$	$\sigma_A = 20 * \sigma_H$	$\sigma_B = 0,2 * \sigma_H$

**Tabelle 5: Spannungen in der Ulme und der Firste eines Hohlraums mit elliptischem Querschnitt in Abh. von  $q$  (Brady und Brown, 2004)**

Je größer die Verhältniszahl  $q$ , desto größer sind also die horizontalen Spannungen in Richtung der Längserstreckung und desto kleiner sind die horizontalen Spannungen in Richtung der Quererstreckung eines Hohlraums.

Die Gleichungen für Hohlräume mit elliptischem Querschnitt gelten im Wesentlichen nur für Tunnel oder Schächte, d.h. für sehr lange Hohlräume. Sie sind nur begrenzt auf die Bohrspülwerker anwendbar.



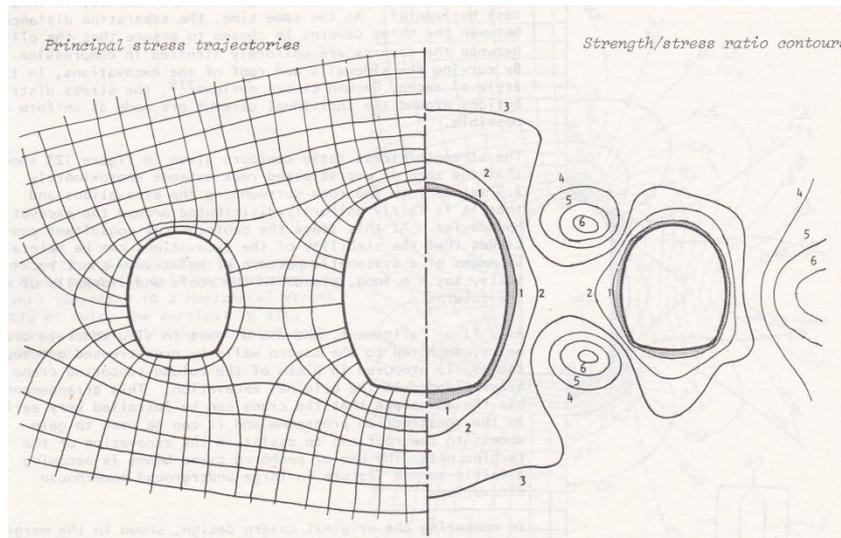
**Abbildung 31: Berechnung der Spannungen am Hohlraumrand eines elliptischen Querschnitts (Brady & Brown, 2004)**

Die Vertikalspannung im Firstbereich eines zylinderförmigen Hohlraums mit Die Vertikalspannung im Firstbereich eines zylinderförmigen Hohlraums mit elliptischer Grundfläche (wie dies der Kavernenform im Salzbergwerk Berchtesgaden entspricht) ist auf Grund der Spannungsumlagerungen ungefähr null. Im Übergangsbereich zwischen Firste und Pfeiler sind hohe vertikale Spannungen zu erwarten (höher als sich rein durch die Überlagerungshöhe ergebend), welche in den Pfeiler abfließen. Diese sind auf Grund der Geometrie des Hohlraums in Längsrichtung der Ellipse (in Streichrichtung der Lagerstätte) quantitativ höher als in deren Querrichtung (quer zum Streichen).

### Excavation Disturbed Zone und deren Überlagerung

Die einen Hohlraum umgebende Zone, in welcher es zur Änderung des Gebirgsspannungszustands im Vergleich zum ursprünglichen Zustand kommt, wird als Excavation Disturbed Zone bezeichnet. Es handelt sich also um jene Zone, welche im Einflussbereich des Hohlraums liegt. (Wiezorek et al., 2011)

Liegen zwei Hohlräume zu nahe aneinander, so überlagern sich deren Einflussbereiche (Abbildung 32).



**Abbildung 32: Drei sich gegenseitig beeinflussende Hohlräume (Hoek & Brown, 1980)**

### Das Gebirge über dem Hohlraum des BW13

Da sich unmittelbar über dem Hohlraum des BW13 auf der König Ludwig Stollensohle kein Hohlraum eines weiteren Werks befindet, ist es falsch, in diesem Bereich von einer Schwebe zu sprechen. Im Weiteren erfolgt die Bezeichnung „das Gebirge über dem BW13“.

Das Gebirge über dem BW13 wurde gegen Ende des Abbaus gewölbeartig verlaugt, um die freie Spannweite zu verringern und so die Stabilität zu erhöhen (Kellerbauer, 1996). In situ Versuche aus Rumänien bzw. Computermodellierungen (Jeremic, 1994) zeigen, dass die Gewölbeform eine wesentlich günstigere Spannungsverteilung zur Folge hat und Verformungs- und Brucherscheinungen reduziert.

## 6.2 Das Kriechverhalten von Salzgestein

Salzgesteine neigen zum Kriechen.

Kriechen bezeichnet die bleibende bruchlose sowie weitgehend rissfreie Formänderung eines Festkörpers. Ursache dafür sind im Falle von Salzgesteinen hauptsächlich transkristalline Versetzungsbewegungen. (Hunsche & Schulze, 1994)

Abbildung 33 zeigt das Verhalten einer Salzgestein-Probe bei einem einaxialen Druckversuch. Die Gesamtverformung  $\varepsilon$  setzt sich aus einem elastischen Verformungsanteil  $\varepsilon_{el}$  und einem visko-plastischen Verformungsanteil  $\varepsilon_{vp}$  zusammen. (Lux, 1984)

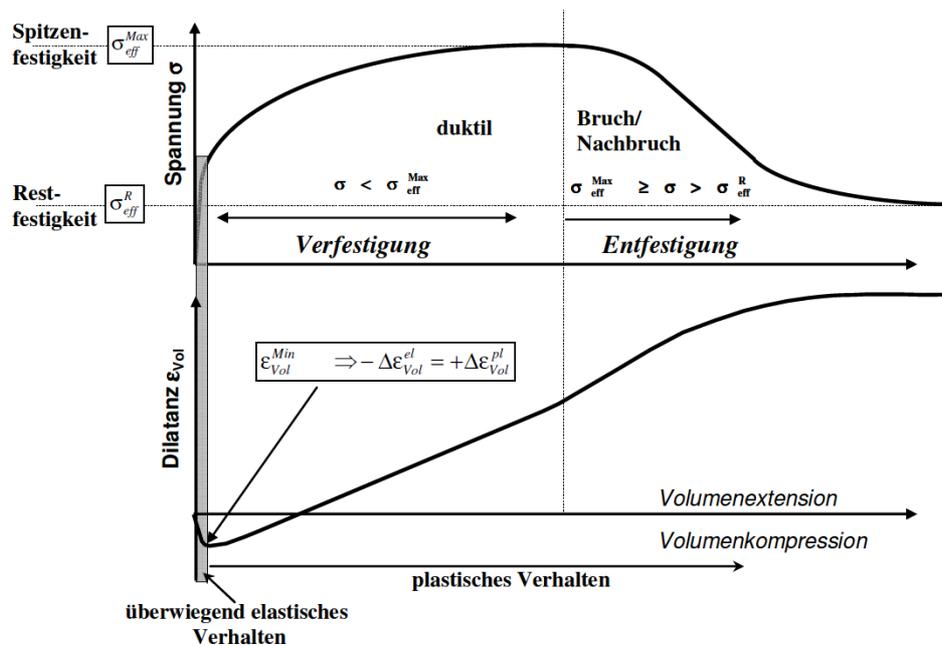


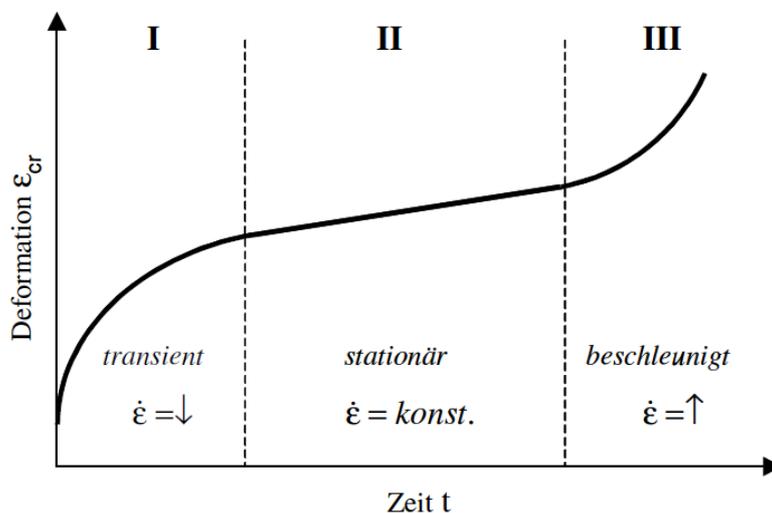
Abbildung 33: Verhalten von Salzgestein bei einaxialem Druckversuch (Günther, 2009)

Im unteren Spannungsbereich herrscht bei schneller Lastaufbringung elastisches Verhalten; mit wachsender Belastung steigt dann der Anteil der plastischen Verformung an der Gesamtverformung. Mit der plastischen Deformation geht auch eine Volumenzunahme (Dilatanz) einher. Jener Punkt, in welchem die plastische Volumenzunahme  $+\Delta\varepsilon_{Vol,pl}$  und die elastische Volumenkompression  $-\Delta\varepsilon_{Vol,el}$  gleich groß sind, kennzeichnet den Beginn des duktilen Bereiches. Im duktilen Bereich kommt es mit zunehmender Verformung zunächst noch zu einem Anwachsen der

Spannung, bevor das Versagen eintritt. Der Grund dafür liegt in der Veränderung der kristallinen Mikrostruktur, welche eine Verfestigung des Materials hervorruft.

Im Nachbruchbereich kommt es zum Aufbrechen der Bindungen zwischen den Körnern. Die plastische Verformung wird zunehmend von Entfestigungsprozessen bestimmt und reduziert sich schließlich auf die Restfestigkeit, die sich aus den Reibungseigenschaften des vollständig entfestigten Materials ergibt. (Günther, 2009)

Abbildung 34 zeigt ein Verformungs-Zeit-Diagramm, welches aus einem Kriechversuch mit konstanten Spannungsbedingungen stammt.



**Abbildung 34: Die drei Phasen des Kriechens (Günther, 2009)**

Das Kriechen kann in drei Phasen unterteilt werden, nämlich

- I primäres Kriechen – auch als transientes (instationäres) bzw. Übergangskriechen bezeichnet,
- II sekundäres bzw. stationäres Kriechen und
- III tertiäres Kriechen bzw. Kriechbruch.

Maßgebend für die Form der Kriechkurve sind zwei innerkristallin ablaufende Vorgänge: Verfestigung und Erholung.

Kennzeichnend für das primäre Kriechen sind große Verformungsraten, die mit fortschreitender Deformation rasch abnehmen. Versetzungen innerhalb des Salzkristalls beginnen sich mit zunehmender Spannung zu bewegen. Ihr Bewegungspotential verringert

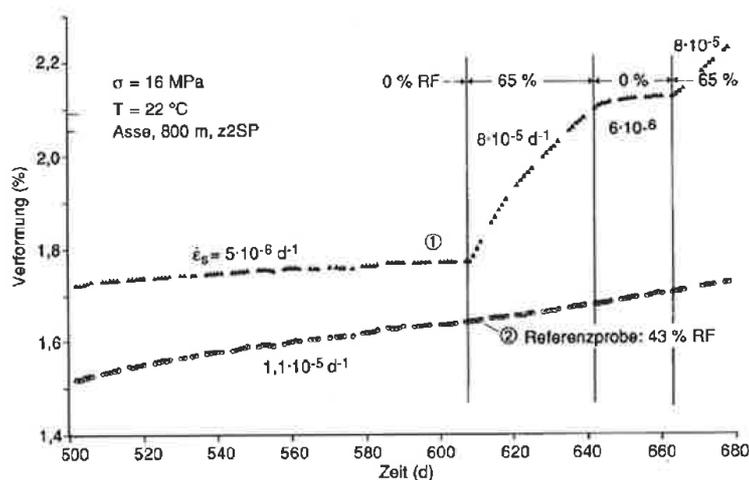
sich mit wachsender Deformation. Nimmt die Deformation weiter zu, entstehen neue Versetzungen im Gitter. Die somit anwachsende Versetzungsdichte erzeugt einen Widerstand gegen die Verformung, sodass die Verformungsrate bei gleich bleibender Belastung absinkt (vgl. Bereich I – transientes Kriechen).

Der wachsenden Verfestigung steht ein Vorgang entgegen, der als Erholung bezeichnet wird und die Eliminierung vorhandener Versetzungen beschreibt. Im Bereich des stationären Kriechens stehen Versetzung und Erholung im Gleichgewicht; die  $\varepsilon$ - $t$ -Kurve wird zu einer geraden Linie (vgl. Bereich II – stationäres Kriechen). (Günther, 2009)

Wenn Schädigungs- und Entfestigungsprozesse, die im Spannungsraum oberhalb der Dilatanzgrenze einsetzen, ein kritisches Maß erreichen, geht das Kriechen in die tertiäre Phase über (beschleunigte Kriechrate) und es kommt zum Kriechbruch. (Hunsche et al., 2003)

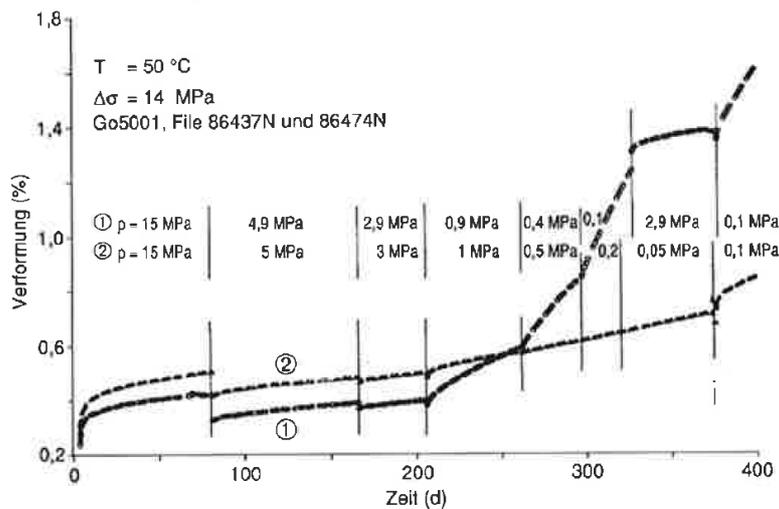
### Einfluss der Feuchte und der Dilatanz

Die Luftfeuchtigkeit sowie der Manteldruck haben einen starken Einfluss auf das Kriechverhalten von Steinsalz. Abbildung 35 zeigt einen einaxialen Kriechversuch mit stufenweise veränderter Luftfeuchte. Die Zu- und Abnahme der Luftfeuchte zwischen 0 und 65% führte zu einer Änderung der stationären Kriechrate um den Faktor 15. Auffällig ist ebenfalls, dass die Reaktion des Gesteins auf die Veränderung der Luftfeuchte ohne zeitliche Verzögerung erfolgt.



**Abbildung 35: Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf das Kriechverhalten (Hunsche & Schulze, 1994)**

Durch Drücke oberhalb von etwa 3 MPa kann der Einfluss des Feuchte kriechens unterbunden werden, d.h. oberhalb dieses Druckes verhält sich Salzgestein wie in trockener Luft (Abbildung 36). (Hunsche & Schulze, 1994)



**Abbildung 36: Einfluss des Manteldrucks auf das Kriechverhalten (Hunsche & Schulze, 1994)**

Für das sog. Feuchtekriechen existiert folgender Erklärungsansatz: Im Bereich oberhalb der Dilatanzgrenze entstehen unter Einfluss des Spannungsdeviators im Material Mikrorisse sowie eine Volumszunahme. An den aufgelockerten Korngrenzen kann der in der Luft vorhandene Wasserdampf in das Salzgestein diffundieren. Er wird durch die Spannungskonzentration am Kontakt zweier Körner adhäsiv gebunden und begünstigt dort lokal die Rekristallisation. Dies bewirkt eine Erholung des verfestigten Materials.

Der im Haselgebirge vorhandene Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) kann ebenfalls Wasser aufnehmen und quillt dadurch auf.

In der Praxis bedeutet dies, dass Feuchtekriechen nur in der näheren Umgebung von Hohlräumen auftritt, nämlich in Pfeilern, Strecken und Kavernen von Bergwerken, wo die mittlere Hauptspannung niedrig genug ist, um Dilatanz zuzulassen. Bei einer Luftfeuchtigkeit von 45% in einer Strecke kann das zu einer fünfmal höheren Kriechrate als unter trockenen Bedingungen bzw. im unverritzten Gebirge führen. (Hunsche & Schulze, 1994)

### Experimentelle Untersuchungen zum Kriechverhalten von Haselgebirge

Experimentelle Untersuchungen zum Kriechverhalten von Salzgesteinen wurden von Pittino (2002) durchgeführt. Aus Langzeitdruckversuchen erfolgte eine Auswertung der

primären Kriechverformung  $\varepsilon_p$ , der primären Kriechrate  $\dot{\varepsilon}_p$  zum Zeitpunkt  $t=0$  und der sekundären Kriechrate  $\dot{\varepsilon}_s$ .

Ergebnisse der Langzeitdruckversuche sind in Abbildung 37 dargestellt:

Probe ALT...	Gestein	Dauer	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\bar{\sigma}$	$\dot{\varepsilon}_s$	$\dot{\varepsilon}_s$	$\dot{\varepsilon}_p (t=0)$	$\varepsilon_p$
		(d)	(MPa)			( $\mu\text{m}/\text{m}/\text{h}$ )	(‰ / a)		(‰)
033	Blättersalz	31	7.55	0	7.55	0.842	7.38	–	–
035	Blättersalz	21	9.1	0	9.1	13.0	114	10700	4.13
036 /1	Blättersalz	41	2	0	2	0.396	3.47	3900	1.02
036 /2	Blättersalz	32	5.8	0	5.8	2.65	18.7	–	–
069	Blättersalz	25	8.9	0	8.9	12.8	112	11600	5.47
150	Kerngebirge	33	16.8	5	11.8	0.877	7.68	1250	1.63
200	Kerngebirge	74	16	0	16	13.7	120	n.a.	n.a.
201	Kerngebirge	41	14	0	14	14.6	128	n.a.	n.a.
202	Kerngebirge	74	9	0	9	1.24	10.9	n.a.	n.a.
203	Kerngebirge	74	8.9	0	8.9	0.945	8.28	4100	7.48
171	Blättersalz	30	4.5	0	4.5	3.05	26.7	n.a.	n.a.
197 /1	Blättersalz	24	3	0	3	2.18	19.1	23200	2.82
197 /2	Blättersalz	29	6.05	0	6.05	2.59	22.7	–	–
190	armes Blätters.	47	14.5	2	12.5	4.54	39.8	59000	7.54
196	Kerngebirge	24	3	0	3	1.13	9.90	n.a.	n.a.
198 /1	Kerngebirge	24	3	0	3	0.611	5.35	827	1.21
198 /2	Kerngebirge	29	6.05	0	6.05	1.18	10.3	–	–
199 /1	Kerngebirge	24	2.6	0	2.6	1.13	9.90	3570	1.89
199 /2	Kerngebirge	29	5.3	0	5.3	1.19	10.4	–	–

Abbildung 37: Ermittelte Kriechraten von Langzeitdruckversuchen (Pittino, 2002)

Wie aus Abbildung 37 ersichtlich betragen die ermittelten sekundären Kriechraten ohne den Effekt des Feuchtekrechens für das Kerngebirge je nach Belastung und zeitlicher Dauer des Versuchs zwischen 5,35 und 128 ‰ (das entspricht mm/m) pro Jahr.

---

## 6.3 Gebirgsdruck-Messungen

---

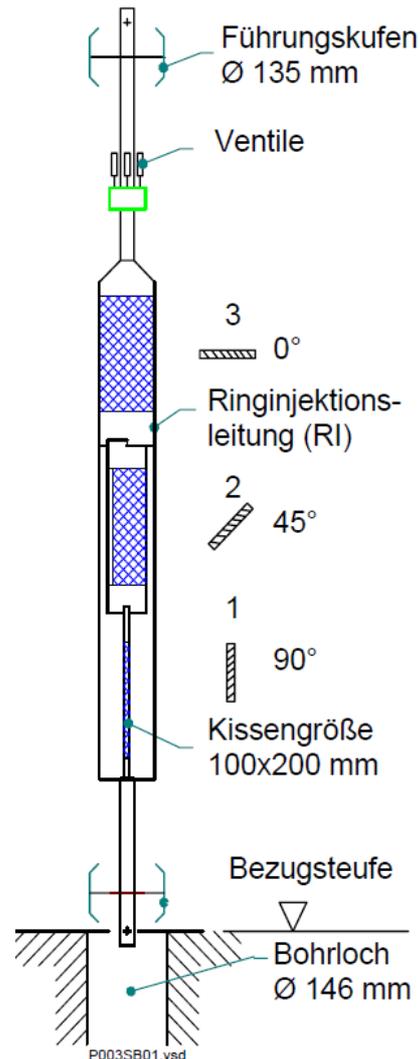
### 6.3.1 Funktionsweise des Bohrlochgebers der Fa. Glötzl

---

Bohrlochgeber oder Stress Monitoring Systems (SMS) der Firma GLÖTZL werden für Primärspannungsmessungen im Gebirge herangezogen. Die Einbringung eines Bohrlochgebers erfolgt über eine Bohrung. Da das Abteufen einer solchen Bohrung eine Spannungsumlagerung im Gebirge bewirkt, wird der Ringraum mit Injektionsmaterial verpresst. Dieses sollte eine höhere Steifigkeit als das umliegende Gebirge besitzen, da dann die somit bewirkte Spannungskonzentration der durch das Abteufen des Bohrlochs verursachten Spannungskonzentration entgegenwirkt. (Fecker, 1997 und Glötzl, 2002)

Als Spannungsaufnehmer dienen flache Druckkissen aus Stahl, welche orientiert in die Messlöcher eingebaut werden. Gemessen wird die Spannungskomponente normal zum Druckkissen. Um einen Kraftschluss zwischen Druckkissen und Gebirge herzustellen, wird das Bohrloch vollständig mit Mörtel verfüllt; nach dessen Abbinden kann zudem eine Vorspannung durch Hochdruckinjektion von Epoxidharzen erfolgen. (Fecker, 1997)

Abbildung 38 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Bohrlochgebers mit drei jeweils um 45° zueinander orientierten, vertikalen Druckkissen.



**Abbildung 38: Aufbau eines Bohrlochgebers mit 3 Zellen, je 45° zueinander verdreht (Glötzl, 2002)**

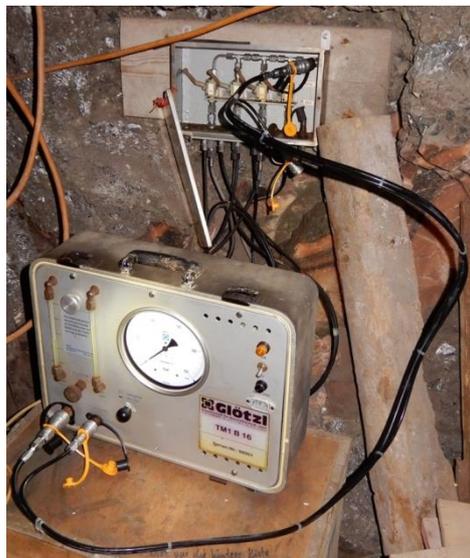
Um die Winkelorientierung zu erfassen, erfolgt der Einbau der Zellen durch ein Richtungsgestänge. Nach dem Verpressen der Spannungszellen kommt es zum Spannungsaufbau, welcher asymptotisch verläuft.

Bestandteile des Bohrlochgebers sind richtungsorientierte Druckkissen mit Ventilgebern, einer die Druckkissen umrandenden Injektionsleitung sowie Injektionsleitungen für die Nachinjektion und Verbindungsleitungen für die Ventilgeber. Die Messung des Drucks erfolgt hydraulisch über Ventilgeber System GLÖTZL. Die dabei im Druckkissen herrschende Spannung wird am Messgerät in bar angezeigt.

### Hydraulische Spannungsmessgeber

Die Messung des Drucks in einem Spannungsgeber erfolgt über eine Handmesspumpe. Der im Druckkissen vorherrschende Druck  $p_1$  wirkt auf eine Metallmembran, welche gegen eine Platte mit zwei Bohrungen gedrückt wird und diese somit verschließt. Durch eine dieser Bohrungen wird ein Gegendruck  $p_2$  gegen die Membran aufgebracht und so lange erhöht, bis diese von der Platte abhebt. Dies ist der Fall, wenn der Gegendruck  $p_2$  gleich groß ist wie der im Druckkissen herrschende Druck  $p_1$ . Die beiden Bohrungen liegen somit frei und das Druckmedium kann über die zweite Bohrung abfließen. Zur Anzeige sind nur geringe Bewegungen der Membran erforderlich. (Fecker, 1997 und Glötzl, 2002)

Abbildung 39 zeigt die Spannungsmessung mittels der Handmesspumpe.



**Abbildung 39: Spannungsmessung mittels Handmesspunkte (Glötzl)**

Die im Salzbergwerk Berchtesgaden verwendeten Bohrlochgeber (Ausführung BB10/20 K400) bestehen aus 4 Druckkissen. 3 davon sind vertikale Druckkissen, welche um jeweils  $120^\circ$  verdreht angeordnet sind; das vierte ist ein horizontales Druckkissen, welches die Spannung in Längsachse der Bohrung misst.

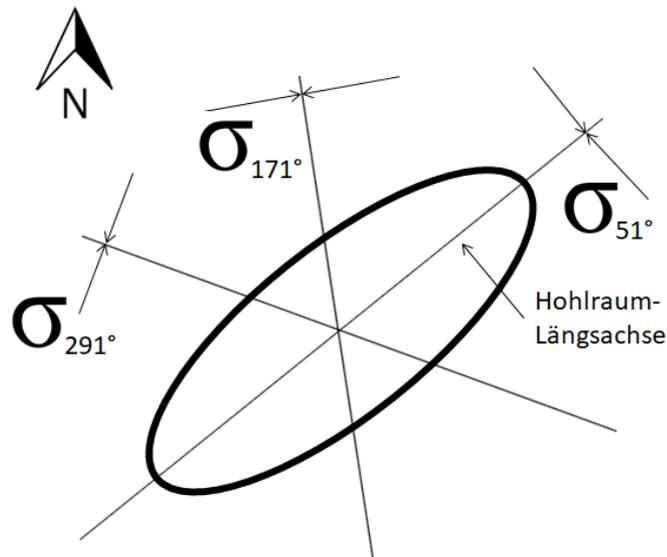
Die Kissen sind richtungsorientiert im Bohrloch installiert (Tabelle 6).

### Nord-Orientierung der Druckkissen

	Kissen 4	Kissen 3	Kissen 2	Kissen 1
SMS1	51°	171°	291°	horizontal
SMS2	51°	171°	291°	horizontal
SMS3	51°	171°	291°	horizontal
SMS4	51°	171°	291°	horizontal
SMS5	51°	171°	291°	horizontal
SMS11	51°	171°	291°	horizontal
SMS12	51°	171°	291°	horizontal

**Tabelle 6: Nordorientierung der Druckkissen**

Mit einem Winkel von 51° zur Nordrichtung liegt Kissen 4 genau parallel zur Längsachse des Werks BW13 (Abbildung 40).



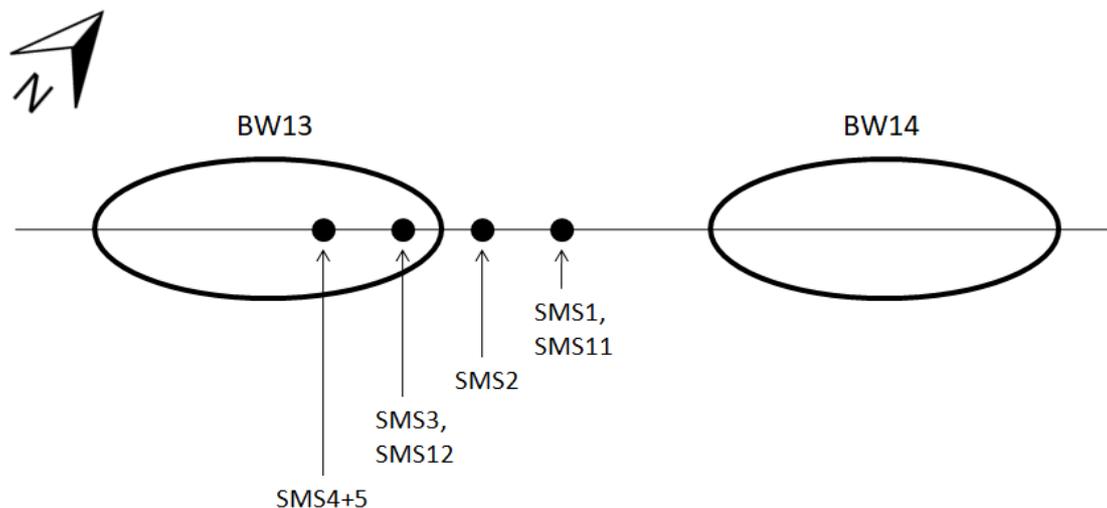
**Abbildung 40: Orientierung der Druckkissen in Bezug auf die Hohlraum-Längsachse**

Die Installation der Bohrlochgeber erfolgt in Bohrlöchern mit einem Durchmesser von  $\varnothing$  146 mm. Die Abmessungen der senkrecht stehenden, rechteckigen Druckkissen betragen 100 x 200mm; das horizontale Druckkissen ist rund und hat einen Durchmesser von  $\varnothing$  100 mm.

Das horizontale Druckkissen ist kleiner als die anderen und hat eine andere Geometrie. Bei diesem Druckkissen besteht die Gefahr, dass sich beim Injizieren des Zements Gas- oder Flüssigkeit unterhalb des Kissens ansammelt und die Anbindung an den Mörtel beeinträchtigt. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, sind die Druckkissen der Serie 2 (eingebaut 2007) an der Unterseite mit einem Betonkeil versehen. (Kellerbauer, 2018)

#### Lage der Spannungsmonitorstationen

In Abbildung 41 ist in einer Prinzip\_Skizze die Draufsicht auf BW13 und BW14 mit den installierten Spannungsmonitor-Stationen dargestellt.



**Abbildung 41: Lage der Spannungsmess-Stationen**

---

### 6.3.2 Auswertung Gebirgsdruck-Messungen

---

#### Spannungsmonitorstation 1

SMS1 liegt im Pfeiler zwischen BW13 und BW14, etwa 25 m vom Hohlraum des BW13 entfernt. Seine Einbautiefe beträgt 45m unter dem Niveau der Schachtricht.

In Abbildung 42 sind die mit SMS1 von 1997 bis 2018 gemessenen Gebirgsdrücke dargestellt.

Die Spannungsspitzen Ende des Jahres 1997 sind durch die Nachinjektion beim Einbau verursacht.

Auf Grund der Lage von SMS1 im Pfeiler und seiner Einbautiefe ist mit dem Fortschreiten des Hohlraums eine zunehmende Vertikalspannung  $\sigma_{\text{vert}}$  zu erwarten. Dies korreliert mit der Messkurve (Abbildung 42). Die Vertikalspannung, gemessen mit SMS1/1, steigt bis zum Jahr 2018 relativ kontinuierlich auf 230 bar (23 MPa) an, d.h. die vertikale Spannung im Pfeiler nimmt mit dem sich nach oben entwickelnden Hohlraum zu. Zum Vergleich: Bei einer Überlagerung von 315m und einer Dichte von  $2,5 \text{ g/cm}^3$  würde der Druck im unverritzten Gebirge etwa 80 bar (8 MPa) betragen.

Auf Grund der ausgelängten Hohlraumform ist zu erwarten, dass die Horizontalspannungen  $\sigma_{51^\circ}$ (SMS1/4) und  $\sigma_{291^\circ}$  (SMS1/2) im Vergleich zu  $\sigma_{171^\circ}$  (SMS 1/3) höher sind. Entgegen dieser Erwartungen zeigt das Druckkissen SMS 1/3 ( $\sigma_{171^\circ}$ ) die höchsten Spannungen an. Der Druck von SMS1/4 ( $\sigma_{51^\circ}$ ) steigt kurzzeitig an, fällt dann allerdings wieder ab und beträgt im Jahr 2016 -15 bar, was auf einen Defekt des Druckkissens schließen lässt.

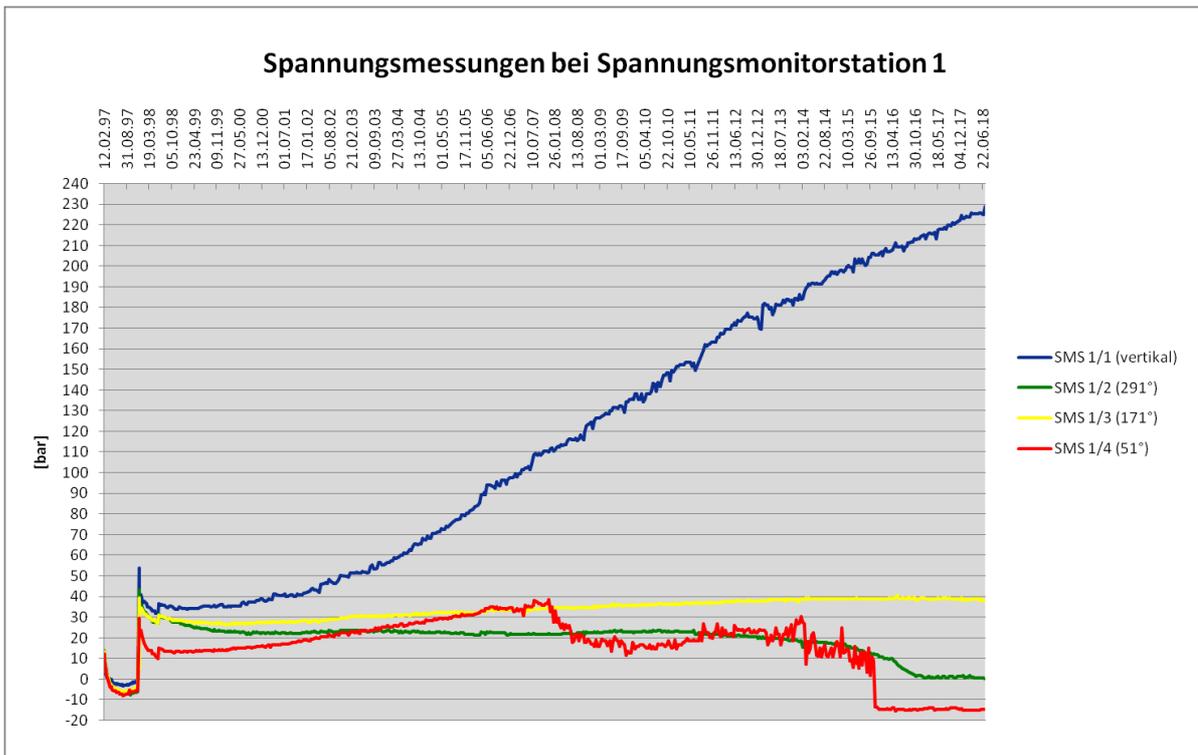


Abbildung 42: Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 1

### Spannungsmonitorstation 2

SMS2 liegt ebenfalls im Pfeiler zwischen BW13 und BW14, etwa 5 m vom Hohlraum des BW13 entfernt. Seine Einbautiefe beträgt 45m unter dem Niveau der Schachtricht.

Bei SMS2 wurden die seit 1997 laufenden Spannungsmessungen am 01.09.2004 eingestellt (Abbildung 43). Da bei der Beaufschlagung mit Öl kein Rückfluss mehr stattfand, wurde von einem Defekt der Leitung ausgegangen.

Auch bei SMS2 wurde eine Nachinjektion durchgeführt, sichtbar an den Druckspitzen Ende 1997.

Wie bei SMS1 sind auch hier eine mit dem Fortschreiten des Hohlraums eine zunehmende Vertikalspannung  $\sigma_{\text{vert}}$  zu erwarten.

Im Februar 2001 kam es zu einem plötzlichen Druckanstieg im Kissen 2/1 (vertikale Spannung). Es ist davon auszugehen, dass der plötzliche Druckanstieg daraus resultiert, dass zuvor keine optimale Anbindung des Druckkissens an den Beton bestanden hat.

Bei Abbruch der Messungen im September 2004 betrug der Druck in Kissen 2/1 66 bar. SMS1/1, welche sich auf der gleichen Höhe versetzt im Pfeiler befindet, lieferte zum selben Zeitpunkt einen Wert von 65 bar. Dies ist plausibel, da auf gleicher Einbautiefe gleich große Spannungen zu erwarten sind.

Die Horizontalspannungen  $\sigma_{51^\circ}$  (SMS2/4) und  $\sigma_{291^\circ}$  (SMS2/2) sollten im Vergleich zu  $\sigma_{171^\circ}$  (SMS 2/3) höher sein. Tatsächlich ist genau das Gegenteil der Fall. Die Messkurve zeigt bis zum Abbruch der Messungen einen Anstieg von  $\sigma_{171^\circ}$  (SMS 2/3), während sich  $\sigma_{51^\circ}$  (SMS2/4) und  $\sigma_{291^\circ}$  (SMS2/2) im Bereich von 0 bar bewegen und quasi keinen Druck anzeigen.

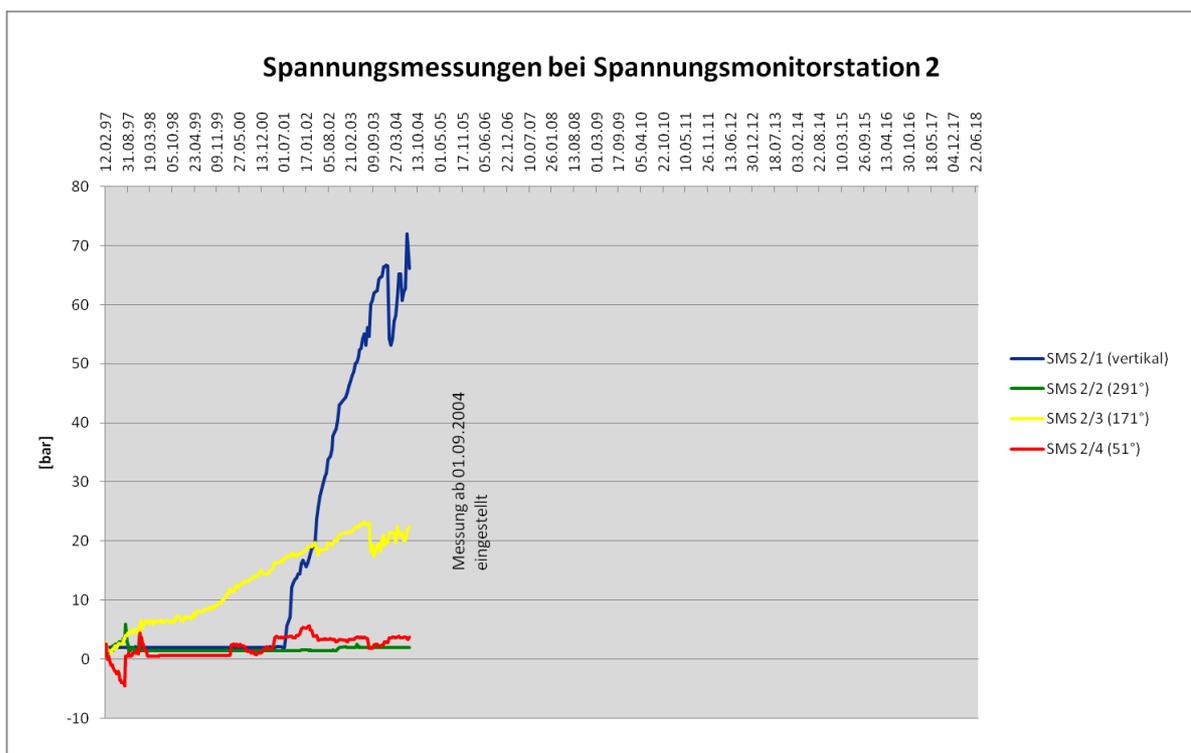


Abbildung 43: Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 2

### Spannungsmonitorstationen 3, 4 und 5

Die Spannungsmonitorstationen 3, 4 und 5 wurden 1999 im Gebirge über dem noch in Aussolung befindlichen Bohrspülwerk BW13 installiert (SMS 3&4 auf 45m, SMS5 auf 35m Einbautiefe) und mit fortschreitendem Abbau freigelaugt (also ausgewaschen). Die ausgespülte Betonsäule der Messstation befand sich erst in der Sole und wurde anschließend von Laist umgeben. Auch nach Freilegen der Messstationen erfolgte noch über die kommenden Jahre hinweg eine genaue Aufzeichnung der Drücke.

Wie bei SMS1 und SMS2 wurde eine Nachinjektion durchgeführt, was sich in den Druckspitzen Ende 1997 äußert.

SMS 3, 4, und 5 (Abbildung 44, 45 und 46) zeigen annähernd gleiche horizontale Drücke, die sich im Bereich zwischen 0 und 20bar (2 MPa) bewegen.

Über dem Hohlraum sind hohe horizontale Spannungen und im Vergleich eine niedrige Vertikalspannung zu erwarten. Bei SMS3 (Abbildung 44) hat die vertikale Spannungskomponente  $\sigma_{\text{vert}}$  (SMS3/1) tatsächlich einen geringeren Wert als die Horizontalspannungen; sie zeigt ebenso wie SMS 5/1 (Abbildung 46) Werte um 0 bar, also quasi keine vertikale Spannung. Bei Spannungsmonitorstation 4 (Abbildung 45) hingegen ist die vertikale Spannung höher als die horizontalen Spannungen, was wenig plausibel ist.

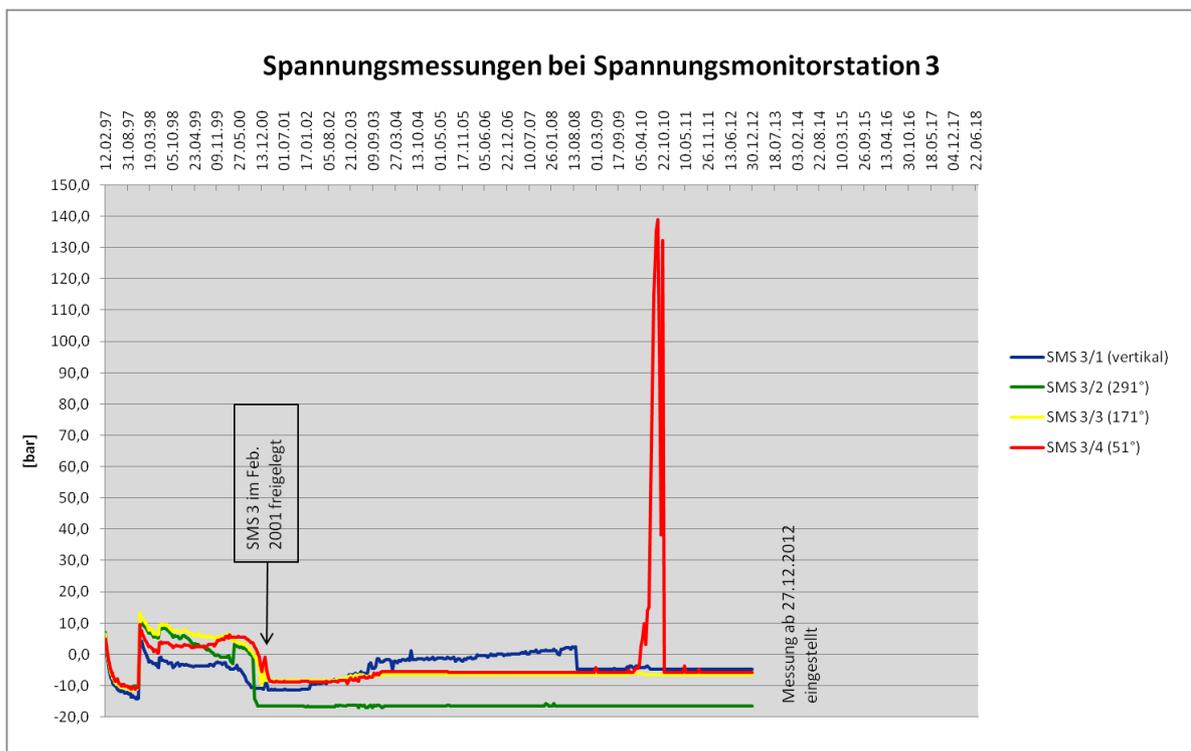


Abbildung 44: Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 3

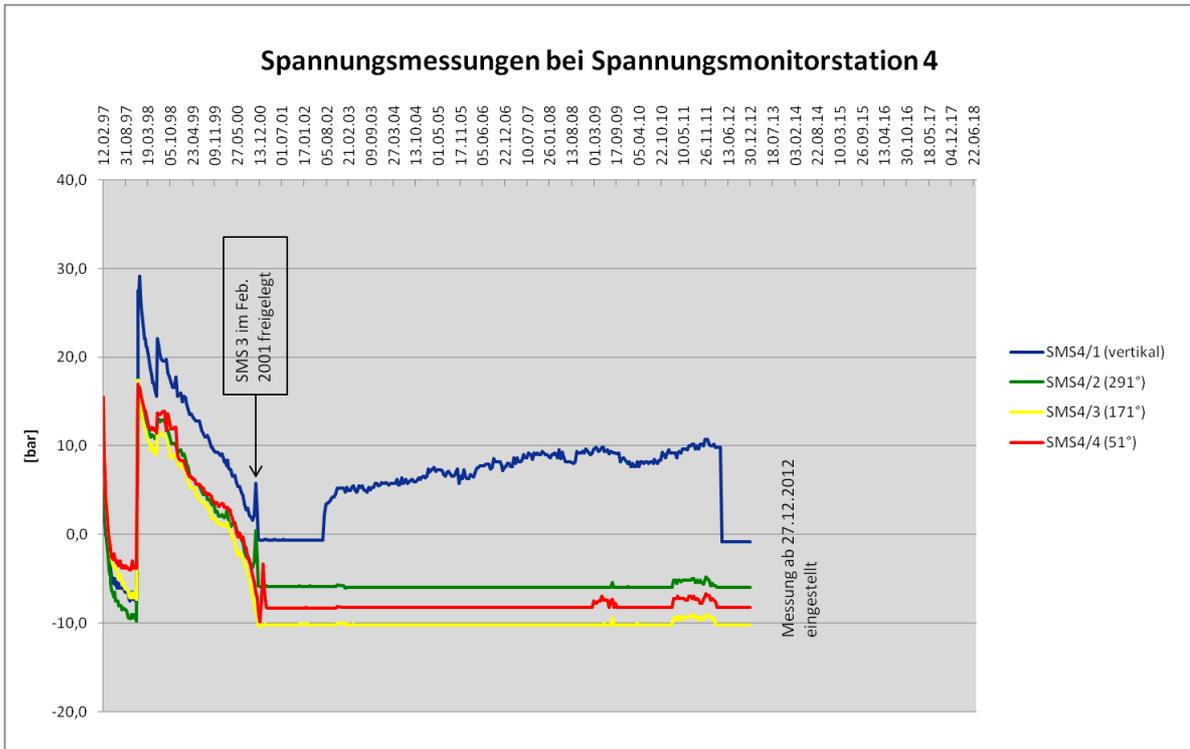


Abbildung 45: Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 4

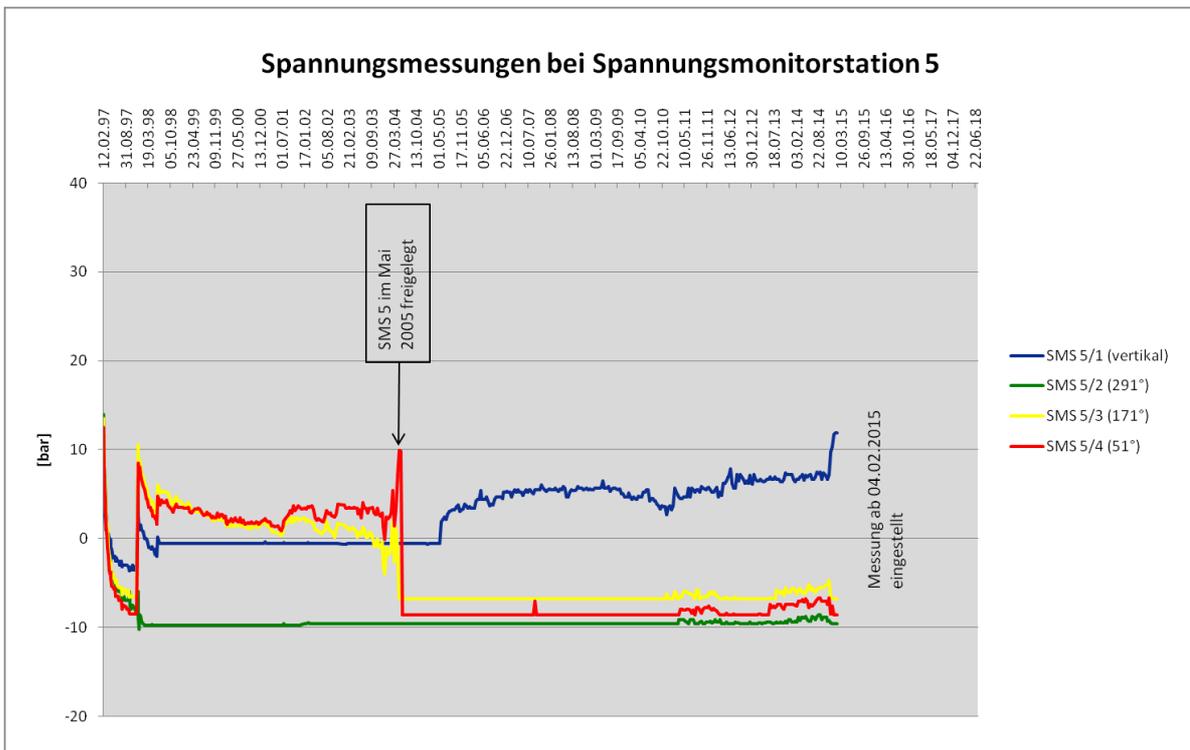
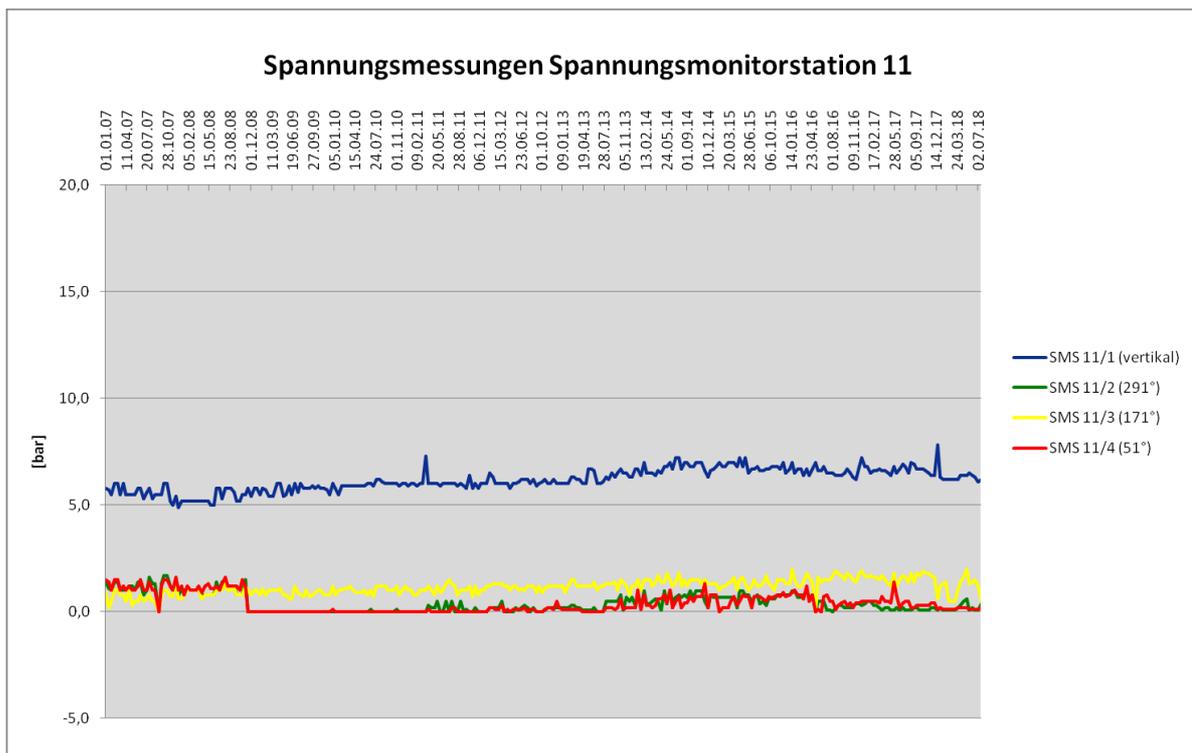


Abbildung 46: Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 5

## Spannungsmonitorstation 11

Bei der Nachinjektion des Bohrlochgebers besteht die Gefahr des Reißens einer Leitung oder der Beschädigung eines Druckkissens auf Grund des plötzlichen Druckanstiegs. Aus diesem Grund wurde bei der zweiten Messkampagne im Jahr 2007 auf eine Nachinjektion verzichtet. Die Spannungsmonitorstationen sollten nach Schwinden des Mörtels langsam im Gebirge einwachsen.

Bei SMS11 fand nach deren Einbau im Jahr 2007 allerdings überhaupt kein Druckaufbau statt. Es ist zu vermuten, dass die Spannungsmonitorstation nicht ordnungsgemäß mit dem Gebirge verwachsen ist. Die mit SMS11 gemessenen Werte können daher als nicht plausibel eingestuft werden (Abbildung 47).



**Abbildung 47: Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 11**

## Spannungsmonitorstation 12

Bei SMS12 zeigt sich ein langsamer, kontinuierlicher Spannungsaufbau, da auch hier keine Nachinjektion durchgeführt wurde (Abbildung 48). Die Spannungsmonitorstation liegt in einer Einbautiefe von 6m in im Gebirge über dem BW13 am Rand des Hohlraums.

Auf Grund der Spannungsumlagerungen durch Fortschreiten des Hohlraums ist zu erwarten, dass sich hohe Horizontalspannungen ( $\sigma_{51^\circ}$  (SMS12/4) und  $\sigma_{291^\circ}$

(SMS12/2) hoch,  $\sigma_{171^\circ}$  (SMS12/3) etwas niedriger) sowie eine ebenfalls relativ hohe Vertikalspannung ergeben.

Die Messwerte zeigen jedoch, dass  $\sigma_{171^\circ}$  (SMS12/3) den höchsten Wert annimmt. Zudem pendelt die vertikale Spannung nur im Bereich zwischen 2 und 5 bar, was ebenfalls nicht plausibel ist.

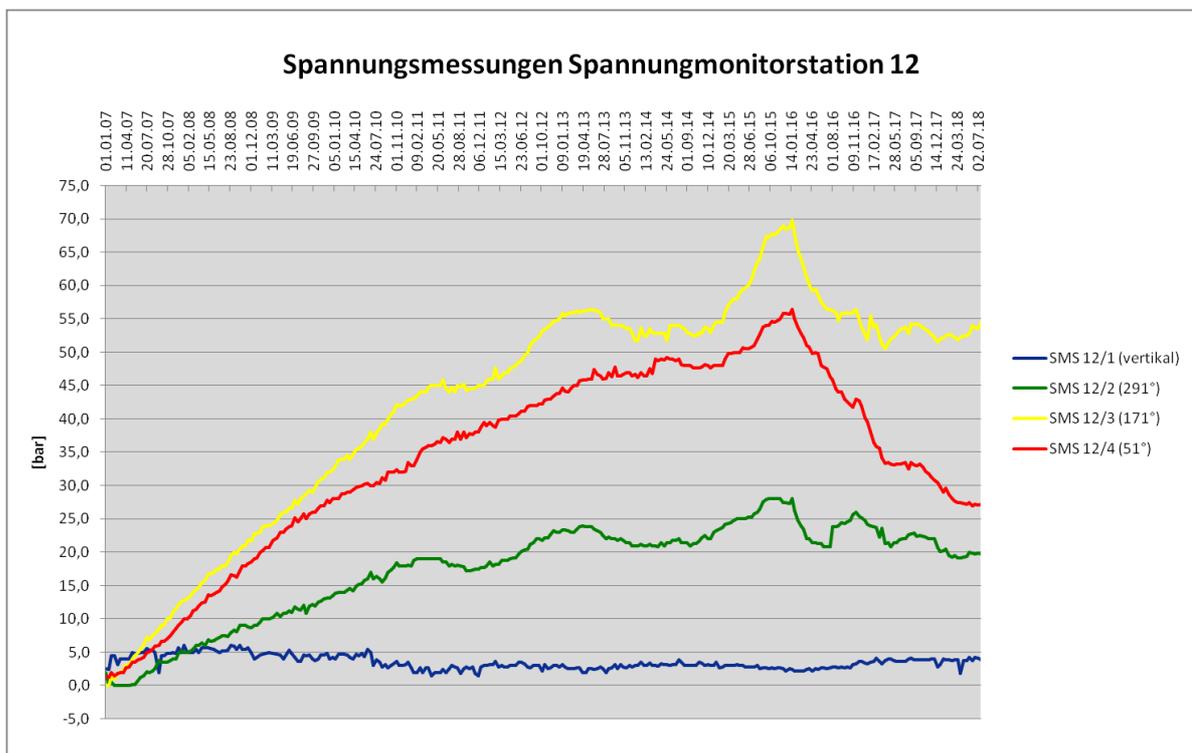


Abbildung 48: Spannungsmessungen bei Spannungmonitorstation 12

### 6.3.3 Kritische Anmerkungen zu Gebirgsdruckmessungen und Schlussfolgerung

Für die Druckdosen liegen weder Bohrloch- noch Einbauprotokolle vor. Somit existieren keine Angaben über Bohrlochabweichungen, Anmerkungen zur Geologie usw. Die einzige Dokumentation bezüglich des Einbaus der Druckkissen besteht in einer handschriftlichen Aufzeichnung, in welcher die Einbaurichtung angegeben ist. Diese enthält jedoch einen Fehler. Die Nordorientierung der Druckkissen wurde für Kissen 4 mit  $51^\circ$ , für Kissen 3 mit  $181^\circ$  und für Kissen 2 mit  $301^\circ$  angegeben. Es muss sich hierbei um eine fehlerhafte Angabe handeln, da

die Kissen um  $120^\circ$  versetzt aufeinander stehen. Beträgt die Nordorientierung von Kissen 4  $51^\circ$ , müssen Kissen 3 und 2 deshalb zwingend mit  $171^\circ$  bzw.  $291^\circ$  angeordnet sein. Überdies ist zu bemerken, dass es sich bei diesem Dokument nur um einen skizzenhaften Einbauplan handelt; tatsächliche Einbauprotokolle der Druckkissen sind nicht vorhanden. Daher ist die tatsächliche Orientierung der Kissen im Bohrloch unbekannt. Für die in dieser Diplomarbeit vorliegende Auswertung wurde angenommen, dass die Bohrlochgeber in der im Plan vorgesehenen Orientierung eingebaut wurden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Spannungsmessungen nur zum Teil nachvollziehbare Ergebnisse liefern. Quantitativ betrachtet jedenfalls sind die hohen vertikalen Spannungen im Pfeiler und die hohen horizontalen Spannungen im Gebirge über dem BW13 als plausibel einzustufen.

---

## 6.4 Extensometer-Messungen und Nivellements

---

### 6.4.1 Funktionsweise eines Stangenextensometers

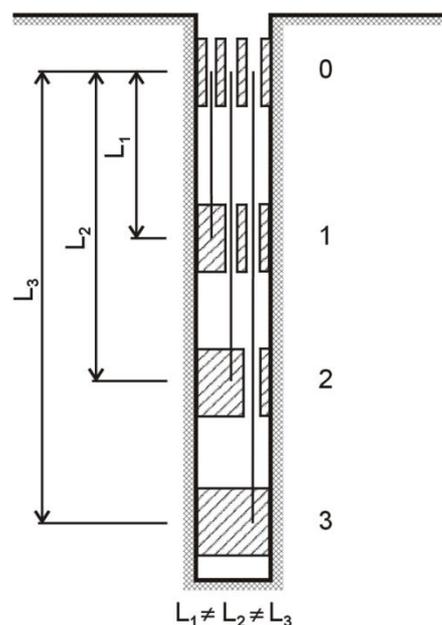
---

Stangenextensometer zählen zu den mechanischen Extensometern und dienen dazu, die Längenänderung (Ausdehnung oder Verkürzung) in der Längsachse des Messgeräts zu messen. Sie werden u.a. für Bewegungsmessungen im Gebirge eingesetzt. Die Bewegungsgröße ergibt sich dabei durch den Vergleich von Anfangs- und Folgemessung; es werden also relative Verschiebungen zwischen Punkten gemessen.

Stangenextensometer sind stationär installierte Messgeräte, bestehend aus dem Messmittel (einer Stange), einem Messkopf und einem Anker. Am Messkopf erfolgt die Ablesung des Messwertes mittels einer mechanischen Messuhr. Die Messgenauigkeit von Stangenextensometern beträgt in der Regel  $1 \times 10^{-6}$  (d.h.  $\pm 0,1 \text{ mm pro } 10 \text{ m}$ ).

Bei Vorhandensein einer einzelnen Messstrecke in einem Bohrloch spricht man von einem Einfachextensometer; sind längs des Bohrlochs mehrere Messpunkte installiert, handelt es sich um eine Mehrfachextensometer.

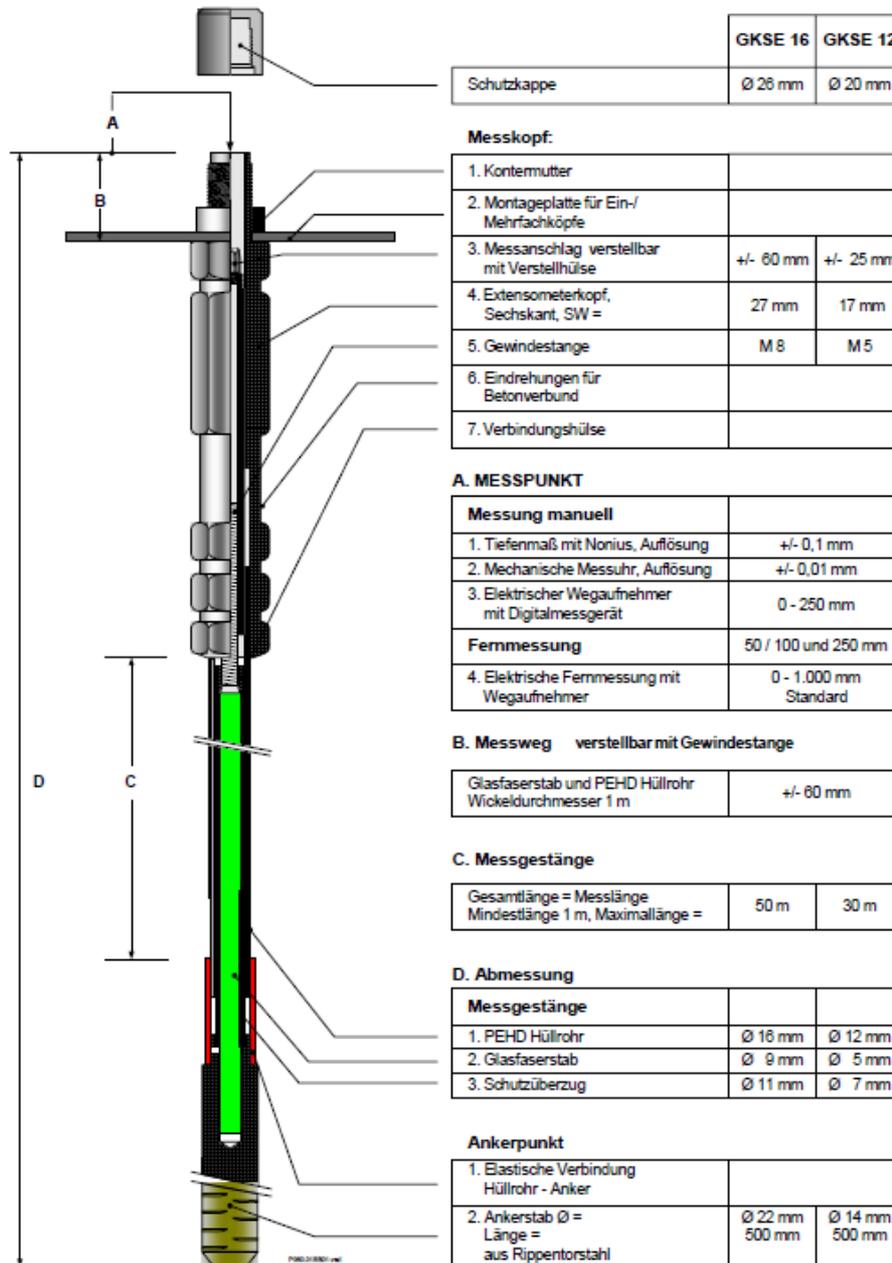
Abbildung 49 zeigt schematisch ein Dreifachextensometer:



**Abbildung 49: Dreifachextensometer (Fecker, 1997)**

Bei den im Salzbergwerk Berchtesgaden verwendeten Geräten handelt es sich um Glasfaserstangenextensometer der Fa. Glötzl (Abbildung 50).

**Aufbau des Kunststoffstangen-Extensometers**



**Abbildung 50: Aufbau des Kunststoffstangen-Extensometers (Glötzl, 2004)**

Diese bestehen aus einer Glasfaser-Seele in einem Kunststoffrohr; ihre Funktion unterscheidet sich jedoch nicht von jener herkömmlicher Stangenextensometer.

Bei den Verankerungspunkten der Extensometer handelt es sich um ca. 1 m lange Standrohre.

## Durchführung der Messung und Auswertung

Nach Abschrauben des Schutzdeckels vom Messkopf wird die verwendete Messuhr auf diesen aufgesetzt und der Fühler bis zum Messanschlag (der Seele des Extensometers) heruntergeschoben. Gemessen wird der Abstand von der Auflage am Messkopf bis zum Messanschlag (Abbildung 51). Die Messuhr liefert ausschließlich positive Messwerte.

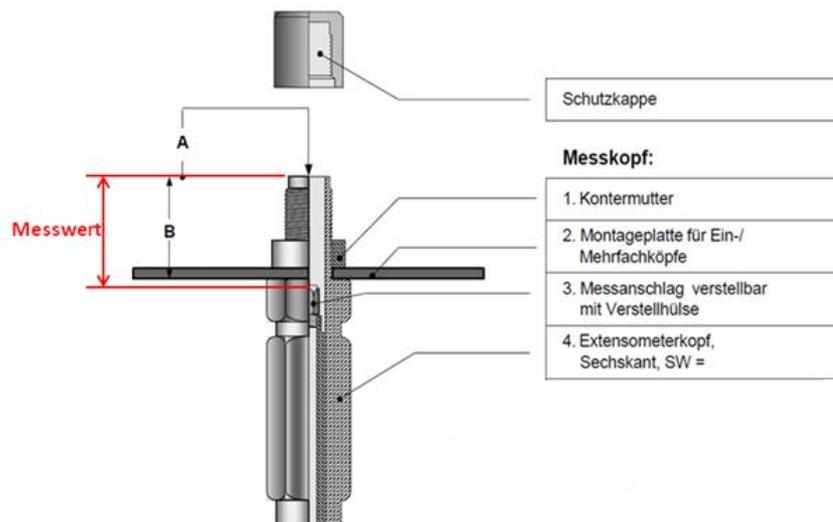


Abbildung 51: Durchführung der Messung am Extensometer (Glötzi, 2004)

Abbildung 52 zeigt die Messung am Extensometer-Kopf.



Abbildung 52: Messung am Extensometer-Kopf

Aus den Messwerten werden im Anschluss die Differenzen zu den jeweils vorhergehenden Messungen gebildet ( $\Delta$ -Werte). Das Aufsummieren der  $\Delta$ -Werte ergibt die Messkurve.

Tabelle 7 zeigt beispielhaft die Auswertung der Daten der Extensometer E1/1, E1/2 und E1/3 aus dem Jahr 1997.

Datum	Messwerte			Messdifferenzen			Messdifferenzen kumuliert		
	E 1	E 2	E 3	$\Delta E 1$	$\Delta E 2$	$\Delta E 3$	E1/1	E1/2	E1/3
26.02.97	15,01	15,00	15,01						
05.03.97	15,02	15,03	15,03	-0,01	-0,03	-0,02	-0,01	-0,03	-0,02
12.03.97	15,03	15,07	15,07	-0,01	-0,04	-0,04	-0,02	-0,07	-0,06
19.03.97	15,03	15,11	15,11	0,00	-0,04	-0,04	-0,02	-0,11	-0,10
26.03.97	15,05	15,12	15,13	-0,02	-0,01	-0,02	-0,04	-0,12	-0,12
02.04.97	15,08	15,19	15,18	-0,03	-0,07	-0,05	-0,07	-0,19	-0,17
09.04.97	15,12	15,23	15,21	-0,04	-0,04	-0,03	-0,11	-0,23	-0,20
16.04.97	15,15	15,23	15,23	-0,03	0,00	-0,02	-0,14	-0,23	-0,22
23.04.97	15,18	15,29	15,26	-0,03	-0,06	-0,03	-0,17	-0,29	-0,25
30.04.97	15,23	15,32	15,31	-0,05	-0,03	-0,05	-0,22	-0,32	-0,30
13.05.97	15,27	15,39	15,37	-0,04	-0,07	-0,06	-0,26	-0,39	-0,36
21.05.97	15,32	15,44	15,41	-0,05	-0,05	-0,04	-0,31	-0,44	-0,40
27.05.97	15,36	15,45	15,44	-0,04	-0,01	-0,03	-0,35	-0,45	-0,43
04.06.97	15,40	15,49	15,48	-0,04	-0,04	-0,04	-0,39	-0,49	-0,47
10.06.97	15,41	15,53	15,52	-0,01	-0,04	-0,04	-0,40	-0,53	-0,51
18.06.97	15,48	15,57	15,55	-0,07	-0,04	-0,03	-0,47	-0,57	-0,54
25.06.97	15,51	15,60	15,57	-0,03	-0,03	-0,02	-0,50	-0,60	-0,56
04.07.97	15,61	15,67	15,66	-0,10	-0,07	-0,09	-0,60	-0,67	-0,65
10.07.97	15,65	15,72	15,68	-0,04	-0,05	-0,02	-0,64	-0,72	-0,67
16.07.97	15,65	15,73	15,70	0,00	-0,01	-0,02	-0,64	-0,73	-0,69
23.07.97	15,65	15,77	15,74	0,00	-0,04	-0,04	-0,64	-0,77	-0,73
30.07.97	15,64	15,77	15,65	0,01	0,00	0,09	-0,63	-0,77	-0,64
06.08.97	15,66	15,76	15,70	-0,02	0,01	-0,05	-0,65	-0,76	-0,69
14.08.97	15,72	15,74	15,80	-0,06	0,02	-0,10	-0,71	-0,74	-0,79
27.08.97	15,79	15,90	15,86	-0,07	-0,16	-0,06	-0,78	-0,90	-0,85
03.09.97	15,80	15,91	15,87	-0,01	-0,01	-0,01	-0,79	-0,91	-0,86
11.09.97	15,83	15,83	15,91	-0,03	0,08	-0,04	-0,82	-0,83	-0,90
24.09.97	15,94	15,94	15,99	-0,11	-0,11	-0,08	-0,93	-0,94	-0,98
02.10.97	15,96	15,96	16,00	-0,02	-0,02	-0,01	-0,95	-0,96	-0,99
09.10.97	15,94	15,94	16,08	0,02	0,02	-0,08	-0,93	-0,94	-1,07
16.10.97	16,02	16,02	16,06	-0,08	-0,08	0,02	-1,01	-1,02	-1,05
23.10.97	16,00	16,00	16,06	0,02	0,02	0,00	-0,99	-1,00	-1,05
30.10.97	16,03	16,03	16,10	-0,03	-0,03	-0,04	-1,02	-1,03	-1,09

06.11.97	16,20	16,20	16,18		-0,17	-0,17	-0,08		-1,19	-1,20	-1,17
12.11.97	16,08	16,08	16,14		0,12	0,12	0,04		-1,07	-1,08	-1,13
19.11.97	16,11	16,11	16,18		-0,03	-0,03	-0,04		-1,10	-1,11	-1,17
26.11.97	16,15	16,15	16,23		-0,04	-0,04	-0,05		-1,14	-1,15	-1,22
03.12.97	16,16	16,16	16,24		-0,01	-0,01	-0,01		-1,15	-1,16	-1,23
10.12.97	16,20	16,20	16,27		-0,04	-0,04	-0,03		-1,19	-1,20	-1,26
24.12.97	16,30	16,40	16,32		-0,10	-0,20	-0,05		-1,29	-1,40	-1,31
30.12.97	16,27	16,38	16,34		0,03	0,02	-0,02		-1,26	-1,38	-1,33
	<b>-1,26</b>	<b>-1,38</b>	<b>-1,33</b>		<b>-1,26</b>	<b>-1,38</b>	<b>-1,33</b>		<b>-1,26</b>	<b>-1,38</b>	<b>-1,33</b>

**Tabelle 7: Auswertung der Extensometerdaten aus dem Jahr 1997 (Extensometer 1)**

#### **6.4.2 Auswertung der Nivellements an der Sohle der Schachtricht**

Die beiden nachfolgenden Diagramme (Abbildung 53 und 54) zeigen die Bewegungen der Sohle der Schachtricht. Als Grundlage für die Auswertung dienen die Daten der Nivellements von 2008 bis 2015. Die beiden schräg eingebauten Extensometer E7 und E8 werden nicht in die Auswertung miteinbezogen.

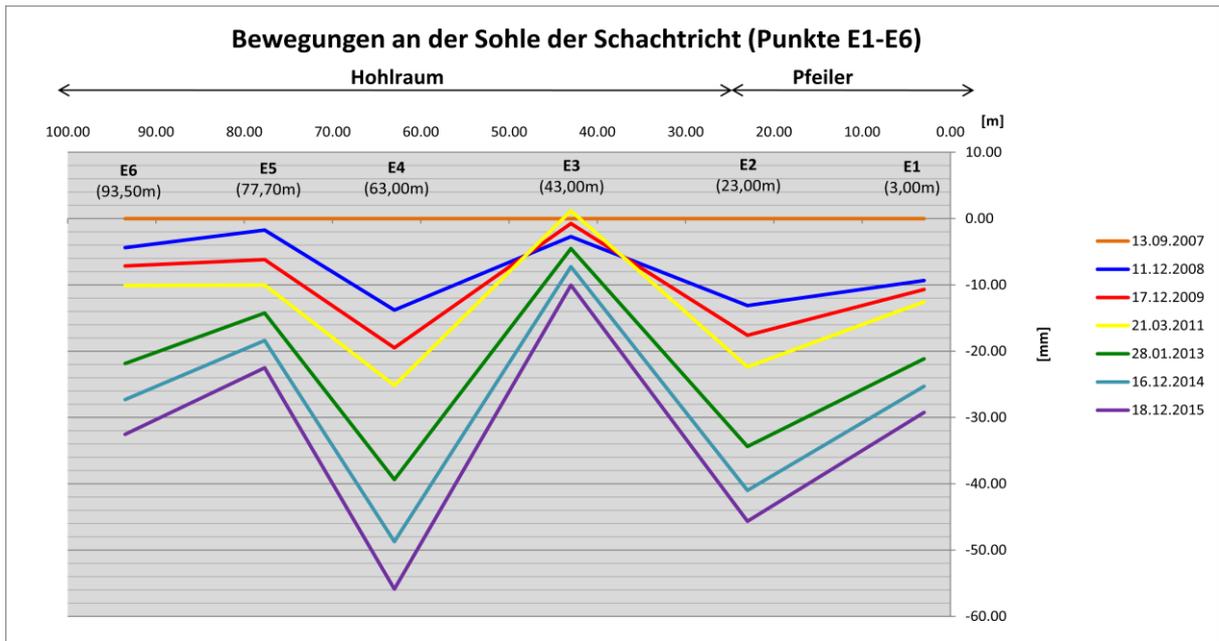
Die Abstände der Punkte im Diagramm sind maßstäblich gezeichnet; ebenso ist der Bereich von Hohlraum und Pfeiler gekennzeichnet. Die Längenangaben auf der x-Achse sind den Einbauplänen entnommen und beziehen sich auf die Mitte des Pfeilers.

Die Tabellen 8 und 9 stellen die für die Diagramme verwendeten Nivellement-Daten in tabellarischer Form dar.

#### **Nivellement-Punkte E1-E6**

	13.09.2007 [mm]	11.12.2008 [mm]	17.12.2009 [mm]	21.03.2011 [mm]	28.01.2013 [mm]	16.12.2014 [mm]	18.12.2015 [mm]
E1	0,00	-9,35	-10,69	-12,56	-21,16	-25,30	-29,25
E2	0,00	-13,11	-17,59	-22,36	-34,36	-41,00	-45,65
E3	0,00	-2,72	-0,74	1,19	-4,51	-7,24	-10,04
E4	0,00	-13,78	-19,49	-25,16	-39,36	-48,73	-55,88
E5	0,00	-1,73	-6,18	-10,00	-14,24	-18,38	-22,51
E6	0,00	-4,39	-7,14	-10,11	-21,86	-27,28	-32,53

**Tabelle 8: Nivellement-Punkte E1-E6 im Zeitraum von 2007 bis 2015**

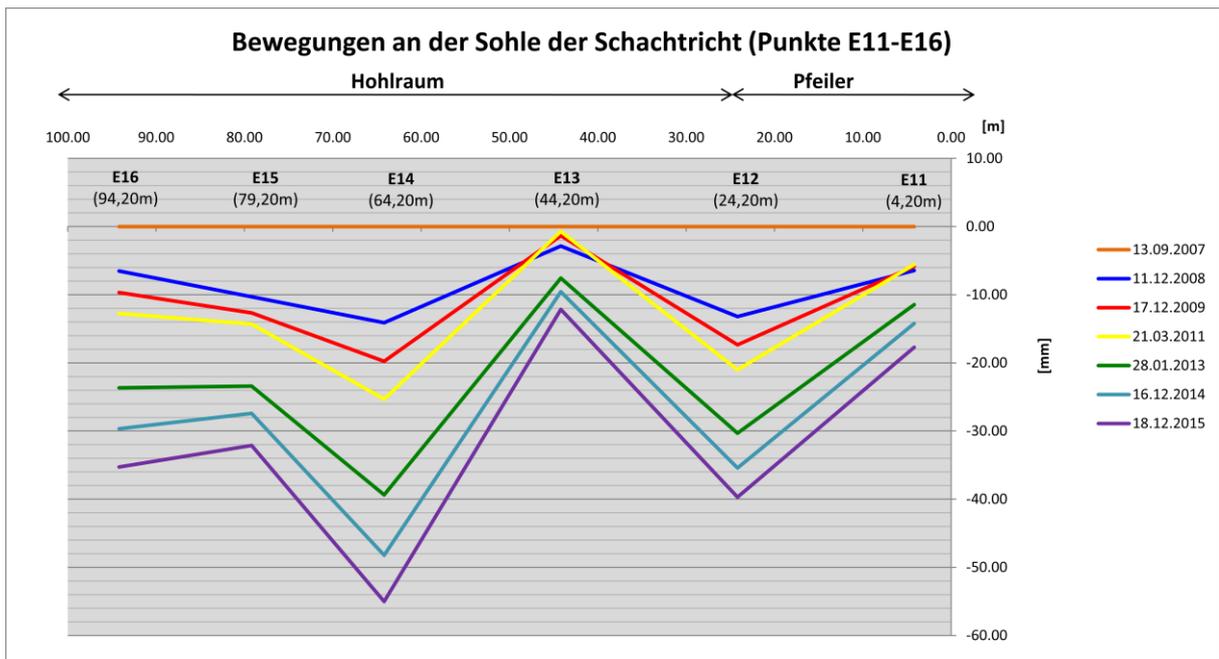


**Abbildung 53: Bewegungen an der Sohle der Schachtricht (Punkte E1-E6)**

**Nivellement-Punkte E11-E16**

	13.09.2007 [mm]	11.12.2008 [mm]	17.12.2009 [mm]	21.03.2011 [mm]	28.01.2013 [mm]	16.12.2014 [mm]	18.12.2015 [mm]
E11	0,00	-6,44	-5,84	-5,56	-11,46	-14,21	-17,71
E12	0,00	-13,20	-17,34	-21,01	-30,31	-35,41	-39,71
E13	0,00	-2,85	-1,33	-0,71	-7,56	-9,56	-12,16
E14	0,00	-14,11	-19,78	-25,31	-39,36	-48,21	-55,01
E15	0,00	-10,31	-12,68	-14,31	-23,41	-27,41	-32,11
E16	0,00	-6,51	-9,67	-12,76	-23,66	-29,66	-35,26

**Tabelle 9: Nivellement-Punkte E11-E16 im Zeitraum von 2007 bis 2015**



**Abbildung 54: Bewegungen an der Sohle der Schachtricht (Punkte E11-E16)**

Die Punkte E1-E6 sind jeweils nur etwa 1-2m von den Punkten E11-E16 entfernt und zeigen daher ähnliches Verhalten.

Bis auf Punkt E13, der in den Jahren 2009 und 2011 eine leichte Hebung erfährt, senkt sich das Gebirge über dem BW13 sowohl im Bereich des Hohlraums als auch im Bereich des Pfeilers ab.

Ungewöhnlich dabei ist, dass sich nicht die Punkte E6/E16, die im Zentrum des Hohlraums liegen, wo die größten Bewegungen zu erwarten sind, am stärksten absenken, sondern die weiter am Hohlraumrand gelegenen Punkt E4/E14. Für die Hebung der Punkte E3/E13 bzw. die Tatsache, dass dieser Punkt vergleichsweise am geringsten absinkt, wurde keine Erklärung gefunden, ebenso wenig wie für das Absinken der Punkte E1/E11 und E2/E12 im Pfeiler.

### 6.4.3 Bewegung der Nivellement-Punkte über die Zeit

Betrachtet man die einzelnen Nivellement-Punkte über die Zeit, so zeigt sich mit Ausnahme von E3 ein kontinuierlich absinkender Trend (Tabelle 10 & 11, Abbildung 55 & 56).

#### E1-E6:

	13.09.2007 [mm]	11.12.2008 [mm]	17.12.2009 [mm]	21.03.2011 [mm]	28.01.2013 [mm]	16.12.2014 [mm]	18.12.2015 [mm]
E1	0,00	-9,35	-10,69	-12,56	-21,16	-25,30	-29,25
E2	0,00	-13,11	-17,59	-22,36	-34,36	-41,00	-45,65
E3	0,00	-2,72	-0,74	1,19	-4,51	-7,24	-10,04
E4	0,00	-13,78	-19,49	-25,16	-39,36	-48,73	-55,88
E5	0,00	-1,73	-6,18	-10,00	-14,24	-18,38	-22,51
E6	0,00	-4,39	-7,14	-10,11	-21,86	-27,28	-32,53

Tabelle 10: Bewegung der Nivellement-Punkte E1-E6 über die Zeit

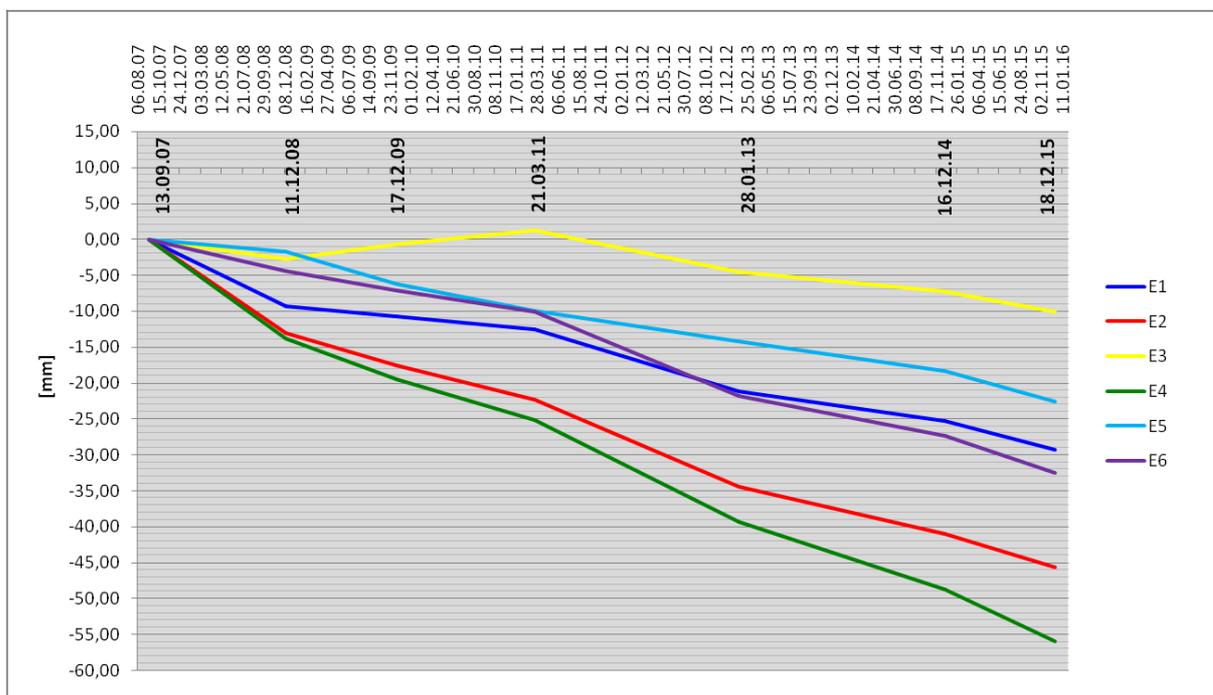


Abbildung 55: Bewegung der Nivellement-Punkte E1-E6 über die Zeit

## E11-E16:

	13.09.2007 [mm]	11.12.2008 [mm]	17.12.2009 [mm]	21.03.2011 [mm]	28.01.2013 [mm]	16.12.2014 [mm]	18.12.2015 [mm]
E11	0,00	-6,44	-5,84	-5,56	-11,46	-14,21	-17,71
E12	0,00	-13,20	-17,34	-21,01	-30,31	-35,41	-39,71
E13	0,00	-2,85	-1,33	-0,71	-7,56	-9,56	-12,16
E14	0,00	-14,11	-19,78	-25,31	-39,36	-48,21	-55,01
E15	0,00	-10,31	-12,68	-14,31	-23,41	-27,41	-32,11
E16	0,00	-6,51	-9,67	-12,76	-23,66	-29,66	-35,26

Tabelle 11: Bewegung der Nivellement-Punkte E11-E16 über die Zeit

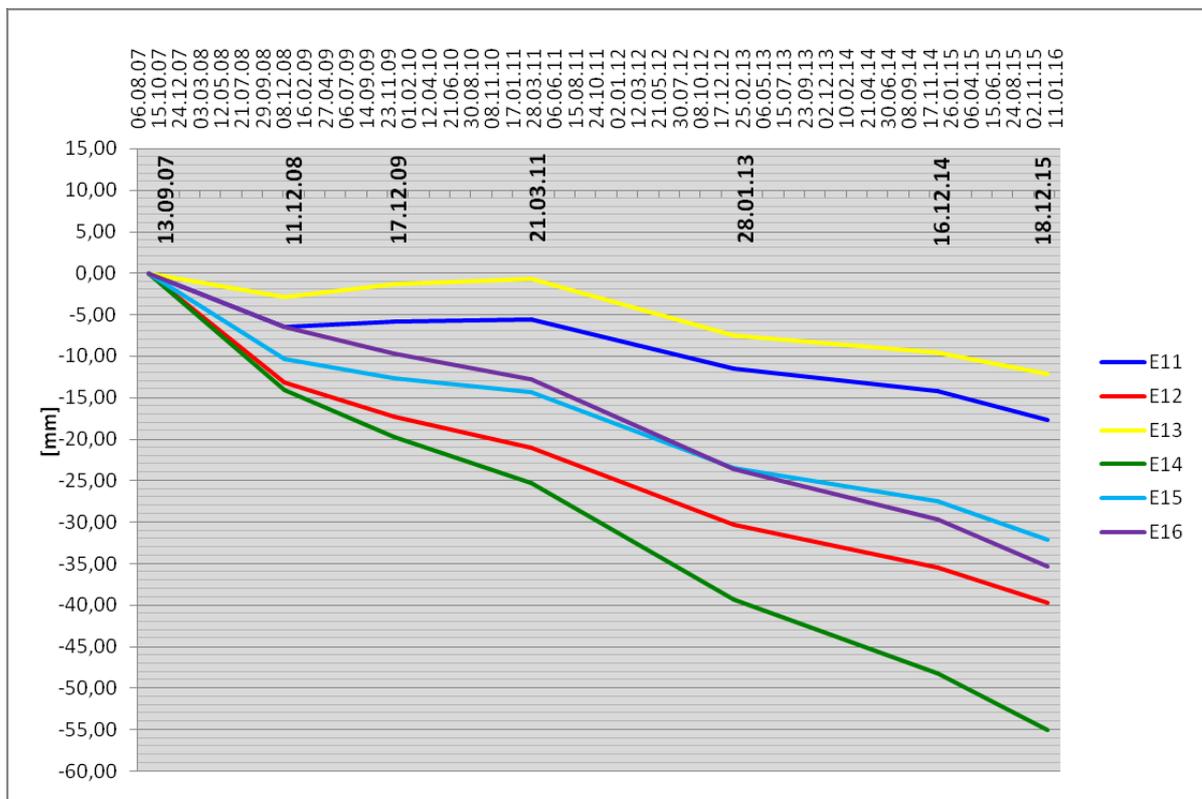


Abbildung 56: Bewegung der Nivellement-Punkte E11-E16 über die Zeit

---

#### 6.4.4 Absolute Bodenbewegungen im Gebirge oberhalb des BW13

---

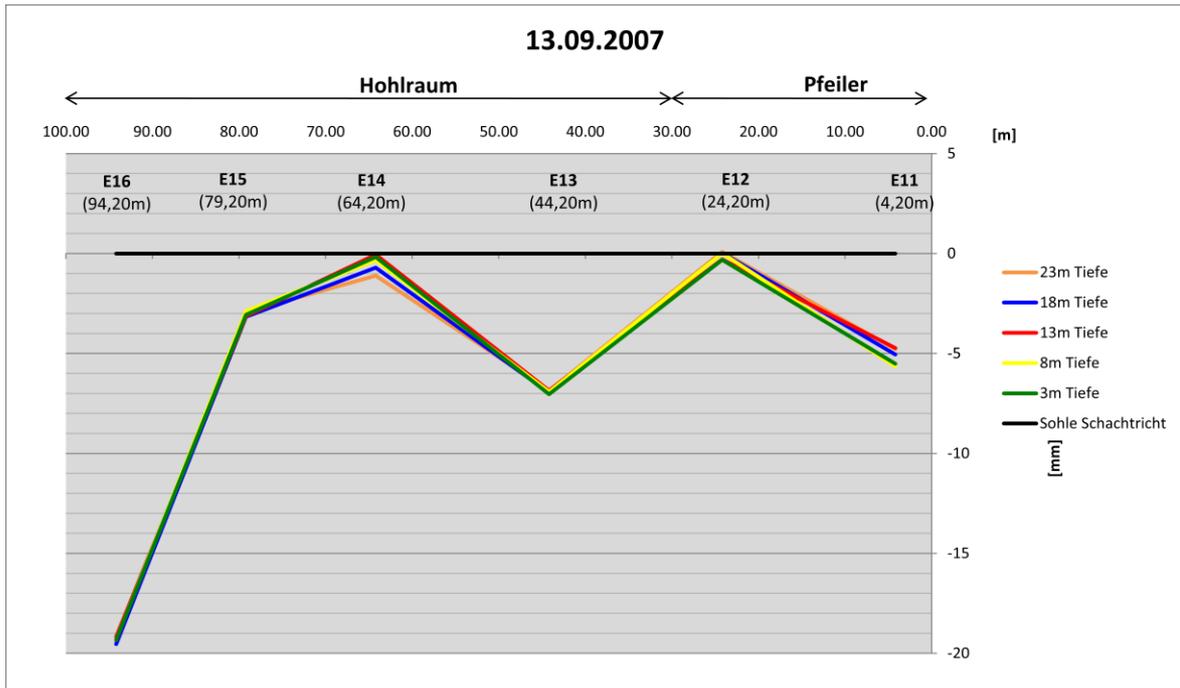
Die nachfolgenden Diagramme zeigen die absoluten Bodenbewegungen im Gebirge oberhalb des BW13 (Kombination aus Nivellement- und Extensometerdaten) für die Jahre 2007-2015. Die absoluten Bodenbewegungen in den jeweiligen Tiefen errechnen sich aus der Summe der durch das Extensometer gemessenen Bewegung und der Bewegung an der Sohle der Schachtricht, welche durch das Nivellement erfasst wird.

Die tiefer liegenden Extensometer (Einbautiefe 23m, 18m bzw. 13m) liefern 2008 noch brauchbare Daten; diese Einbindepunkte wurde durch das Fortschreiten des Hohlraums im Lauf der Zeit allerdings ausgewaschen, weshalb 2015 nur noch Daten für die Einbindepunkte in 8m bzw. 3m Tiefe vorliegen.

Abbildung 57 zeigt die absoluten Bodenbewegungen im Gebirge oberhalb des BW13 an der Sohle der Schachtricht und in den Tiefen von 3m/8m/13m/18m/23m am 13.09.2007.

In Tabelle 12 sind die Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 13.09.2007 dargestellt, die in Tabelle 13 zu den absoluten Bodenbewegungen aufsummiert werden.

Das Nivellement an der Sohle der Schachtricht (schwarz) vom 13.09.2007 wurde als Nullmessung herangezogen.



**Abbildung 57: Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 13.09.2007**

	Messwerte Extensometer [mm]					Nivellement [mm]
	23m Tiefe	18m Tiefe	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
E11	-4,78	-5,05	-4,73	-5,64	-5,51	0,00
E12	0,09	0,03	-0,29	0,02	-0,31	0,00
E13	-6,86	-6,97	-6,86	-6,92	-7,04	0,00
E14	-1,11	-0,71	-0,05	-0,33	-0,17	0,00
E15	-2,92	-3,16	-3,13	-2,88	-3,06	0,00
E16	-19,44	-19,54	-19,18	-19,33	-19,33	0,00

**Tabelle 12: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 13.09.2007**

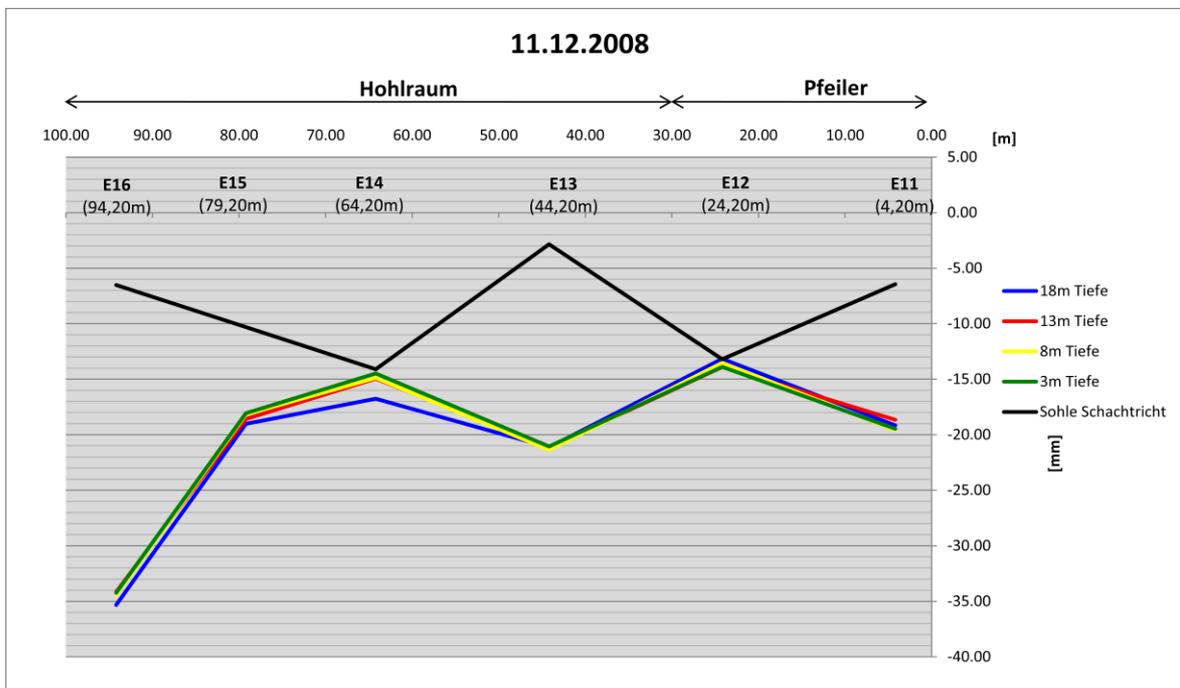
	Absolute Bodenbewegungen [mm]				
	23m Tiefe	18m Tiefe	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe
E11	-4,78	-5,05	-4,73	-5,64	-5,51
E12	0,09	0,03	-0,29	0,02	-0,31
E13	-6,86	-6,97	-6,86	-6,92	-7,04
E14	-1,11	-0,71	-0,05	-0,33	-0,17
E15	-2,92	-3,16	-3,13	-2,88	-3,06
E16	-19,44	-19,54	-19,18	-19,33	-19,33

**Tabelle 13: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 13.09.2007**

Abbildung 58 zeigt die absoluten Bodenbewegungen im Gebirge oberhalb des BW13 an der Sohle der Schachtricht und in den Tiefen von 3m/8m/13m/18m am 11.12.2008. Die Einbindepunkte in 23m Tiefe waren zu diesem Zeitpunkt bereits freigespült und hatten ihre Funktion verloren.

Die Sohle der Schachtricht (schwarz) sinkt in Bezug auf die Nullmessung ab. Die Einbindepunkte der Extensometer bewegen sich mehr oder weniger kontinuierlich um den gleichen Betrag nach unten.

In Tabelle 14 sind die Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 11.12.2008 dargestellt, die in Tabelle 15 zu den absoluten Bodenbewegungen aufsummiert werden.



**Abbildung 58: Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 11.12.2008**

	Messwerte Extensometer [mm]				Nivellement [mm]
	18m Tiefe	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
E11	-12,72	-12,22	-13,16	-13,02	-6,44
E12	0,04	-0,71	-0,32	-0,69	-13,20
E13	-18,28	-18,28	-18,52	-18,21	-2,85
E14	-2,65	-0,84	-0,78	-0,38	-14,11
E15	-8,70	-8,28	-7,86	-7,75	-10,31
E16	-28,81	-27,65	-27,91	-27,73	-6,51

**Tabelle 14: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 11.12.2008**

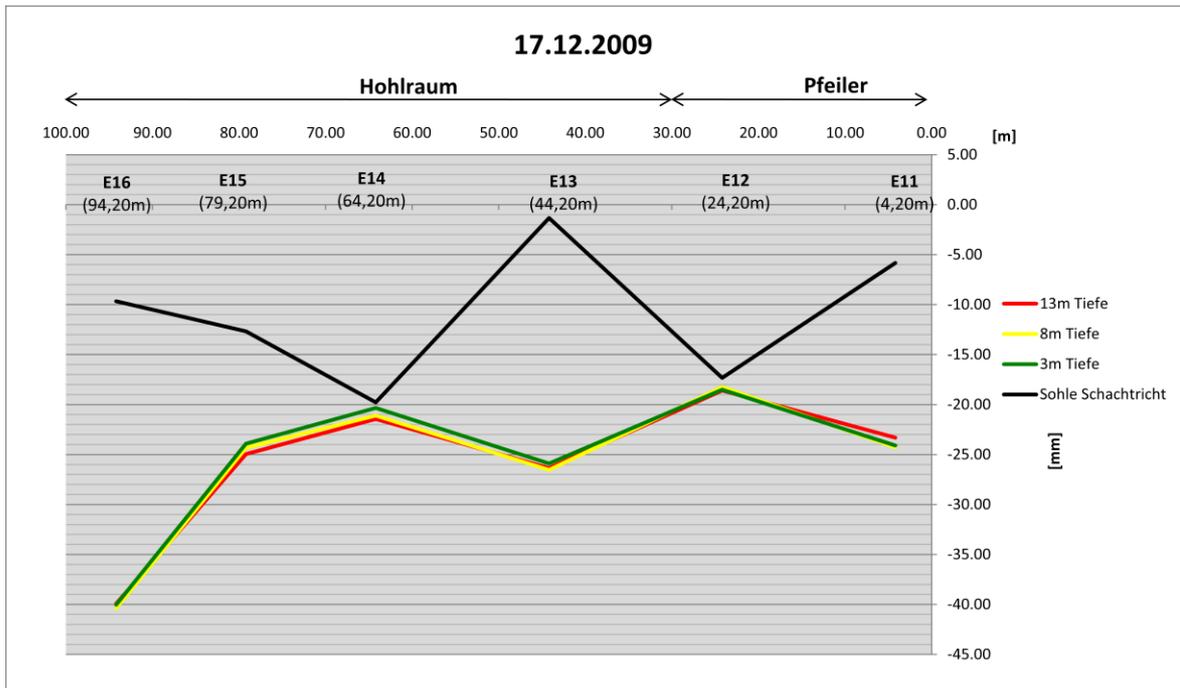
Absolute Bodenbewegungen [mm]				
	18m Tiefe	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe
E11	-19,16	-18,66	-19,60	-19,46
E12	-13,16	-13,91	-13,52	-13,89
E13	-21,13	-21,13	-21,37	-21,06
E14	-16,76	-14,95	-14,89	-14,49
E15	-19,01	-18,59	-18,17	-18,06
E16	-35,32	-34,16	-34,42	-34,24

**Tabelle 15: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 11.12.2008**

Abbildung 59 zeigt die absoluten Bodenbewegungen im Gebirge oberhalb des BW13 an der Sohle der Schachtricht und in den Tiefen von 3m/8m/13m am 17.12.2009. Die Einbindepunkte in 23m und 18m Tiefe waren zu diesem Zeitpunkt bereits freigespült und hatten ihre Funktion verloren.

Die Sohle der Schachtricht (schwarz) sinkt in Bezug auf die Nullmessung ab. Die Einbindepunkte der Extensometer bewegen sich mehr oder weniger kontinuierlich um den gleichen Betrag nach unten.

In Tabelle 16 sind die Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 17.12.2009 dargestellt, die in Tabelle 17 zu den absoluten Bodenbewegungen aufsummiert werden.



**Abbildung 59: Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 17.12.2009**

	Messwerte Extensometer [mm]			Nivellement [mm]
	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
E11	-17,47	-18,44	-18,25	-5,84
E12	-1,26	-0,91	-1,18	-17,34
E13	-25,03	-25,22	-24,56	-1,33
E14	-1,66	-1,32	-0,57	-19,78
E15	-12,27	-11,65	-11,24	-12,68
E16	-30,26	-30,70	-30,36	-9,67

**Tabelle 16: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 17.12.2009**

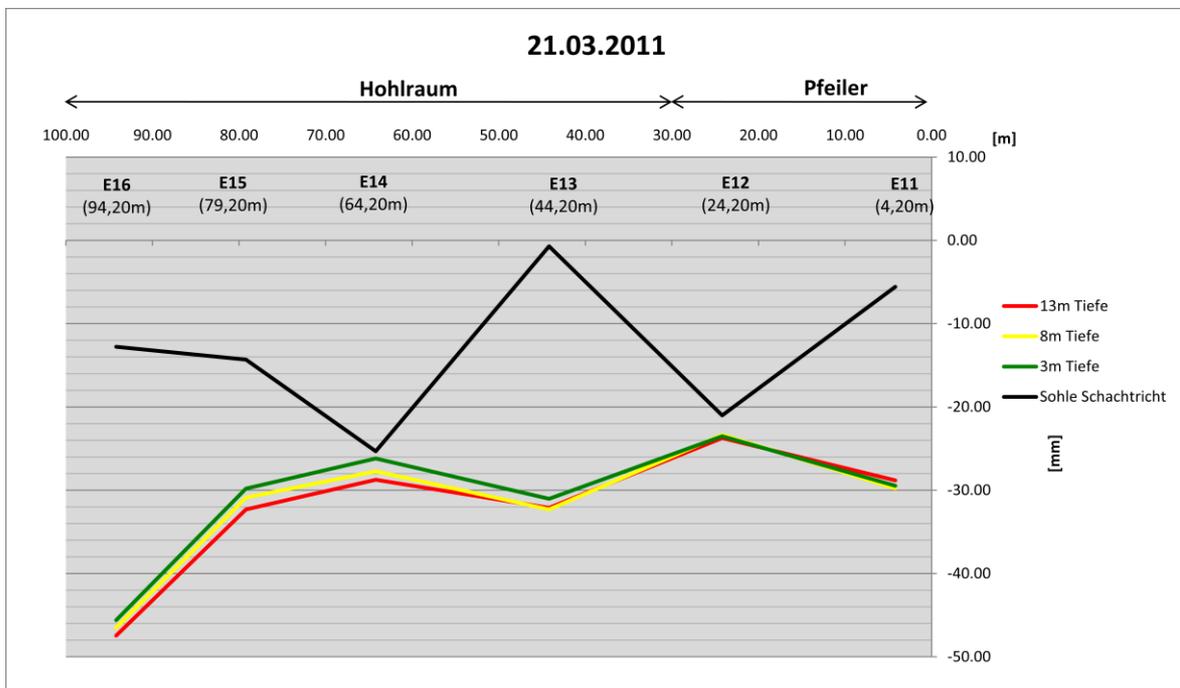
	Absolute Bodenbewegungen [mm]		
	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe
E11	-23,31	-24,28	-24,09
E12	-18,60	-18,25	-18,52
E13	-26,36	-26,55	-25,89
E14	-21,44	-21,10	-20,35
E15	-24,95	-24,33	-23,92
E16	-39,93	-40,37	-40,03

**Tabelle 17: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 17.12.2009**

Abbildung 60 zeigt die absoluten Bodenbewegungen im Gebirge oberhalb des BW13 an der Sohle der Schachtricht und in den Tiefen von 3m/8m/13m am 21.03.2011. Die Einbindepunkte in 23m und 18m Tiefe waren zu diesem Zeitpunkt bereits freigespült und hatten ihre Funktion verloren.

Die Sohle der Schachtricht (schwarz) sinkt in Bezug auf die Nullmessung ab. Die Einbindepunkte der Extensometer bewegen sich mehr oder weniger kontinuierlich um den gleichen Betrag nach unten.

In Tabelle 18 sind die Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 21.03.2011 dargestellt, die in Tabelle 19 zu den absoluten Bodenbewegungen aufsummiert werden.



**Abbildung 60: Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 21.03.2011**

	Messwerte Extensometer [mm]			Nivellement [mm]
	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
E11	-23,25	-24,22	-23,91	-5,56
E12	-2,71	-2,34	-2,50	-21,01
E13	-31,39	-31,58	-30,31	-0,71
E14	-3,42	-2,41	-0,88	-25,31
E15	-17,99	-16,58	-15,49	-14,31
E16	-34,68	-33,73	-32,83	-12,76

**Tabelle 18: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 21.03.2011**



Messwerte Extensometer [mm]			Nivellement [mm]	
	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
E11	-30,02	-31,02	-30,61	-11,46
E12	-5,73	-5,44	-5,42	-30,31
E13	-37,07	-37,76	-35,73	-7,56
E14	-5,56	-3,48	-1,24	-39,36
E15	-25,20	-23,21	-21,53	-23,41
E16	-39,53	-36,91	-35,52	-23,66

**Tabelle 20: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 28.01.2013**

Absolute Bodenbewegungen [mm]			
	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe
E11	-41,48	-42,48	-42,07
E12	-36,04	-35,75	-35,73
E13	-44,63	-45,32	-43,29
E14	-44,92	-42,84	-40,60
E15	-48,61	-46,62	-44,94
E16	-63,19	-60,57	-59,18

**Tabelle 21: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 28.01.2013**

Abbildung 62 zeigt die absoluten Bodenbewegungen im Gebirge oberhalb des BW13 an der Sohle der Schachtricht und in den Tiefen von 3m/8m am 16.12.2014. Die Einbindepunkte in 23m, 18m und 13m Tiefe waren zu diesem Zeitpunkt bereits freigespült und hatten ihre Funktion verloren.

Die Sohle der Schachtricht (schwarz) sinkt in Bezug auf die Nullmessung ab. Die Einbindepunkte der Extensometer bewegen sich mehr oder weniger kontinuierlich um den gleichen Betrag nach unten.

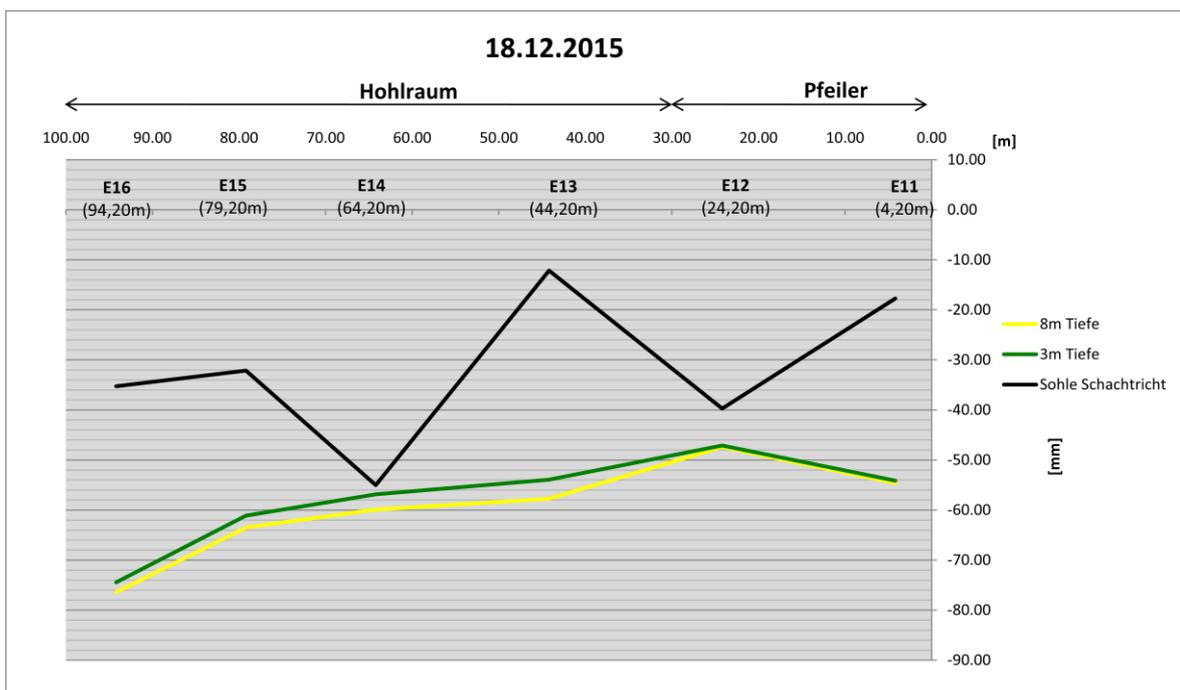
In Tabelle 22 sind die Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 16.12.2014 dargestellt, die in Tabelle 23 zu den absoluten Bodenbewegungen aufsummiert werden.



Abbildung 63 zeigt die absoluten Bodenbewegungen im Gebirge oberhalb des BW13 an der Sohle der Schachtricht und in den Tiefen von 3m/8m am 18.12.2015. Die Einbindepunkte in 23m, 18m und 13m Tiefe waren zu diesem Zeitpunkt bereits freigespült und hatten ihre Funktion verloren.

Die Sohle der Schachtricht (schwarz) sinkt in Bezug auf die Nullmessung ab. Die Einbindepunkte der Extensometer bewegen sich mehr oder weniger kontinuierlich um den gleichen Betrag nach unten.

In Tabelle 24 sind die Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 18.12.2015 dargestellt, die in Tabelle 25 zu den absoluten Bodenbewegungen aufsummiert werden.



**Abbildung 63: Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 18.12.2015**

	Messwerte Extensometer [mm]		Nivellement [mm]
	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
E11	-36,90	-36,40	-17,71
E12	-7,66	-7,37	-39,71
E13	-45,56	-41,76	-12,16
E14	-4,89	-1,84	-55,01
E15	-31,35	-29,01	-32,11
E16	-41,15	-39,19	-35,26

**Tabelle 24: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 18.12.2015**

Absolute Bodenbewegungen [mm]		
13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe
E11	-54,61	-54,11
E12	-47,37	-47,08
E13	-57,72	-53,92
E14	-59,90	-56,85
E15	-63,46	-61,12
E16	-76,41	-74,45

**Tabelle 25: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 18.12.2015**

## 6.4.5 Betrachtung der absoluten Bodenbewegungen (E11 – E16)

### Absolute Bodenbewegungen am Punkt E11

Abbildung 64 zeigt das Verhalten der Sohle der Schachtricht (Nivellement) sowie der Extensometer-Einbindepunkte in der Schwebel (absolute Bodenbewegungen) am Punkt E11 im Zeitraum von 2007 bis 2015.

Die zugehörigen Daten sind in Tabelle 26 und 27 enthalten.

Auffällig ist, dass der Abstand der Sohle der Schachtricht zu den Extensometerpunkten sukzessive um mehr als 25mm zunimmt.

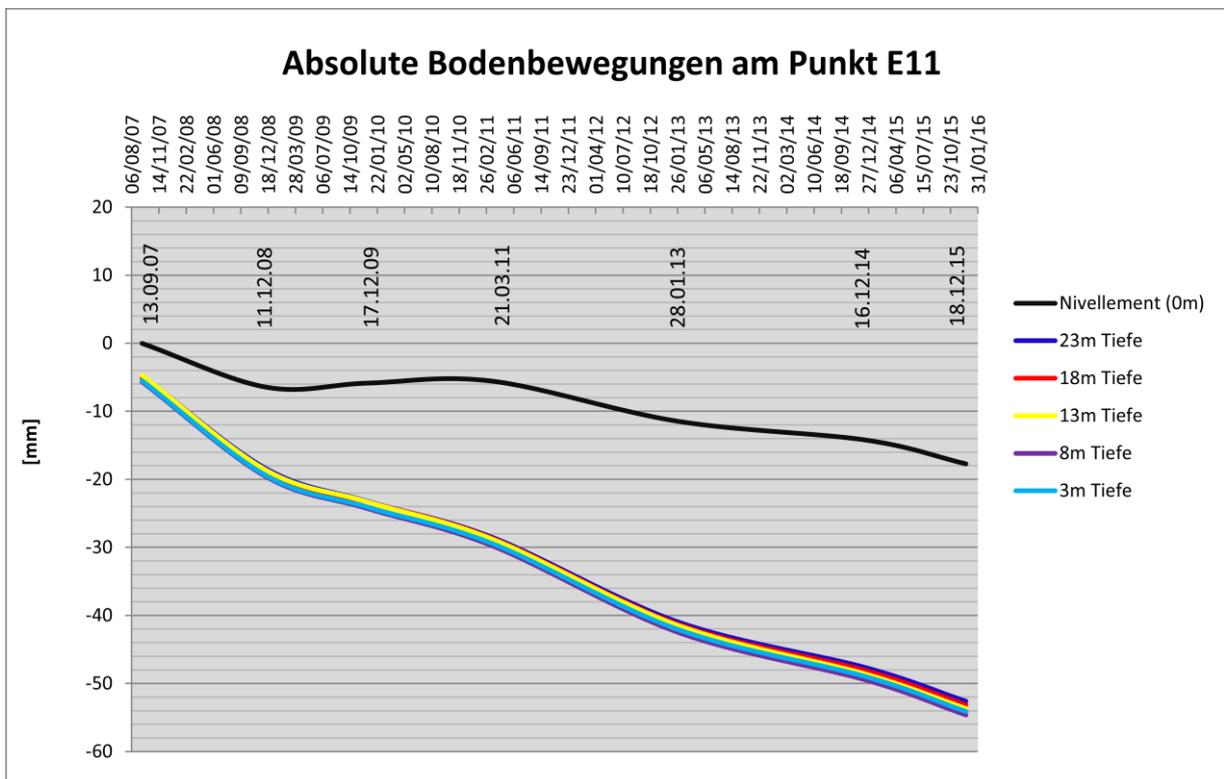


Abbildung 64: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E11

Datum	Messwerte Extensometer [mm]					Nivellement
	23m Tiefe	18m Tiefe	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
13.09.2007	-4,78	-5,05	-4,73	-5,64	-5,51	0,00
11.12.2008	-12,01	-12,72	-12,22	-13,16	-13,02	-6,44
17.12.2009	-17,4	-17,46	-17,47	-18,44	-18,25	-5,84
21.03.2011	-22,99	-23,13	-23,25	-24,22	-23,91	-5,56
28.01.2013	-29,49	-29,83	-30,02	-31,02	-30,61	-11,46
16.12.2014	-33,44	-33,89	-34,42	-35,26	-34,78	-14,21
18.12.2015	-34,88	-35,44	-35,97	-36,9	-36,4	-17,71

Tabelle 26: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E11

Absolute Bodenbewegungen [mm]					
Datum	23m Tiefe	18m Tiefe	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe
13.09.2007	-4,78	-5,05	-4,73	-5,64	-5,51
11.12.2008	-18,45	-19,16	-18,66	-19,60	-19,46
17.12.2009	-23,24	-23,30	-23,31	-24,28	-24,09
21.03.2011	-28,55	-28,69	-28,81	-29,78	-29,47
28.01.2013	-40,95	-41,29	-41,48	-42,48	-42,07
16.12.2014	-47,65	-48,10	-48,63	-49,47	-48,99
18.12.2015	-52,59	-53,15	-53,68	-54,61	-54,11

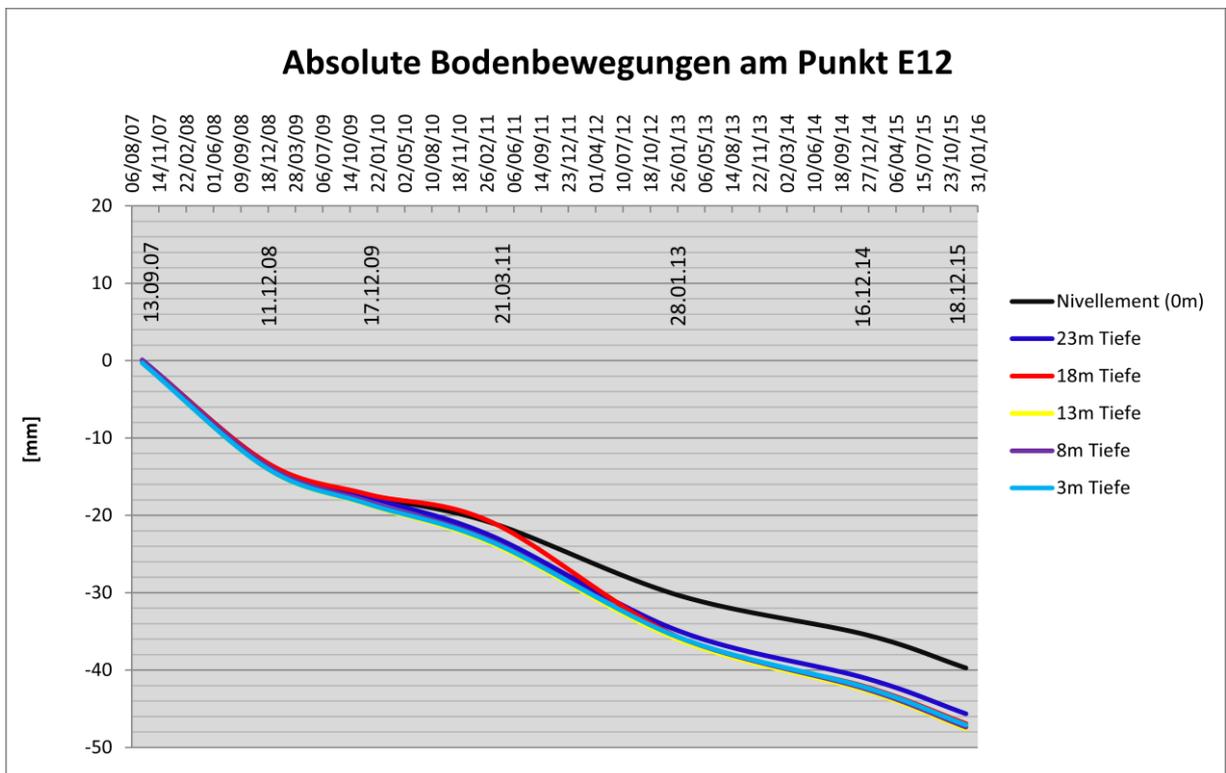
**Tabelle 27: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E11**

### Absolute Bodenbewegungen am Punkt E12

Abbildung 65 zeigt das Verhalten der Sohle der Schachtricht (Nivellement) sowie der Extensometer-Einbindepunkte in der Schwebel (absolute Bodenbewegungen) am Punkt E12 im Zeitraum von 2007 bis 2015.

Die zugehörigen Daten sind in Tabelle 28 und 29 enthalten.

Anfangs sinken die Sohle der Schachtricht sowie sämtliche Extensometerpunkte nahezu gleichmäßig ab; zwischen den Jahren 2011 bis 2015 nimmt der Abstand der Einbindepunkte zur Sohle geringfügig um etwa 8mm zu.



**Abbildung 65: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E12**

Datum	Messwerte Extensometer [mm]					Nivellement
	23m Tiefe	18m Tiefe	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
13.09.2007	0,09	0,03	-0,29	0,02	-0,31	0,00
11.12.2008	0,05	0,04	-0,71	-0,32	-0,69	-13,20
17.12.2009	-0,24	0,07	-1,26	-0,91	-1,18	-17,34
21.03.2011	-1,71	0,06	-2,71	-2,34	-2,5	-21,01
28.01.2013	-4,59	-5,41	-5,73	-5,44	-5,42	-30,31
16.12.2014	-5,63	-6,74	-7,25	-7,03	-6,83	-35,41
18.12.2015	-5,92	-7,21	-7,88	-7,66	-7,37	-39,71

**Tabelle 28: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E12**

Datum	Absolute Bodenbewegungen [mm]				
	23m Tiefe	18m Tiefe	13m Tiefe	8m Tiefe	3m Tiefe
13.09.2007	0,09	0,03	-0,29	0,02	-0,31
11.12.2008	-13,15	-13,16	-13,91	-13,52	-13,89
17.12.2009	-17,58	-17,27	-18,60	-18,25	-18,52
21.03.2011	-22,72	-20,95	-23,72	-23,35	-23,51
28.01.2013	-34,90	-35,72	-36,04	-35,75	-35,73
16.12.2014	-41,04	-42,15	-42,66	-42,44	-42,24
18.12.2015	-45,63	-46,92	-47,59	-47,37	-47,08

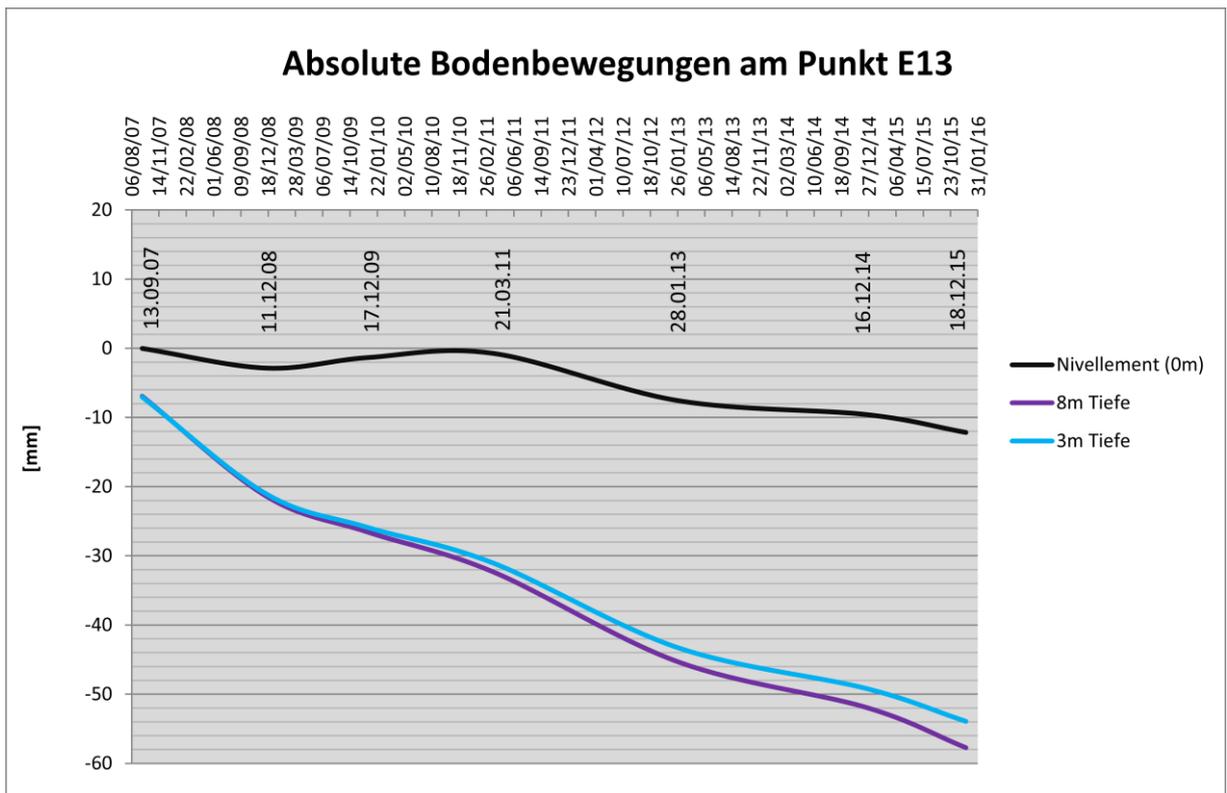
**Tabelle 29: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E12**

### Absolute Bodenbewegungen am Punkt E13

Abbildung 66 zeigt das Verhalten der Sohle der Schachtricht (Nivellement) sowie der Extensometer-Einbindepunkte in der Schwebe (absolute Bodenbewegungen) am Punkt E13 im Zeitraum von 2007 bis 2015.

Die zugehörigen Daten sind in Tabelle 30 und 31 enthalten.

Auffällig ist, dass der Abstand der Sohle der Schachtricht zu den Extensometerpunkten sukzessive um fast 50mm zunimmt.



**Abbildung 66: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E13**

Datum	Messwerte Extensometer [mm]		Nivellement
	8m Tiefe	3m Tiefe	
13.09.2007	-6,92	-7,04	0,00
11.12.2008	-18,52	-18,21	-2,85
17.12.2009	-25,22	-24,56	-1,33
21.03.2011	-31,58	-30,31	-0,71
28.01.2013	-37,76	-35,73	-7,56
16.12.2014	-42,32	-39,59	-9,56
18.12.2015	-45,56	-41,76	-12,16

**Tabelle 30: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E13**

Absolute Bodenbewegungen [mm]		
Datum	8m Tiefe	3m Tiefe
13.09.2007	-6,92	-7,04
11.12.2008	-21,37	-21,06
17.12.2009	-26,55	-25,89
21.03.2011	-32,29	-31,02
28.01.2013	-45,32	-43,29
16.12.2014	-51,88	-49,15
18.12.2015	-57,72	-53,92

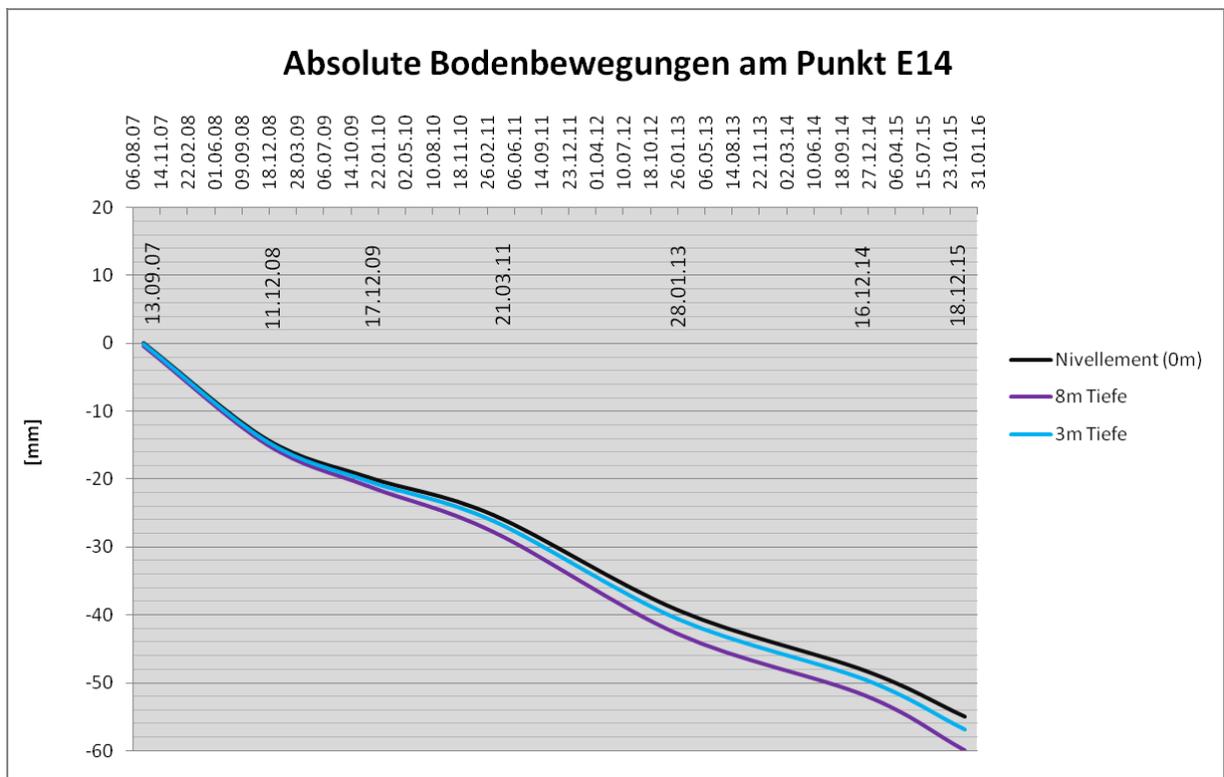
**Tabelle 31: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E13**

## Absolute Bodenbewegungen am Punkt E14

Abbildung 67 zeigt das Verhalten der Sohle der Schachtricht (Nivellement) sowie der Extensometer-Einbindepunkte in der Schwebel (absolute Bodenbewegungen) am Punkt E14 im Zeitraum von 2007 bis 2015.

Die zugehörigen Daten sind in Tabelle 32 und 33 enthalten.

Der Abstand der Sohle der Schachtricht zu den Extensometerpunkten hier über die Zeit nicht zu; die Sohle der Schachtricht und die Einbindepunkte der Extensometer sinken somit um denselben Betrag ab.



**Abbildung 67: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E14**

Datum	Messwerte Extensometer [mm]		Nivellement
	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
13.09.2007	-0,33	-0,17	0,00
11.12.2008	-0,78	-0,38	-14,11
17.12.2009	-1,32	-0,57	-19,78
21.03.2011	-2,41	-0,88	-25,31
28.01.2013	-3,48	-1,24	-39,36
16.12.2014	-3,64	-1,38	-48,21
18.12.2015	-4,89	-1,84	-55,01

**Tabelle 32: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E14**

Absolute Bodenbewegungen [mm]		
Datum	8m Tiefe	3m Tiefe
13.09.2007	-0,33	-0,17
11.12.2008	-14,89	-14,49
17.12.2009	-21,10	-20,35
21.03.2011	-27,72	-26,19
28.01.2013	-42,84	-40,60
16.12.2014	-51,85	-49,59
18.12.2015	-59,90	-56,85

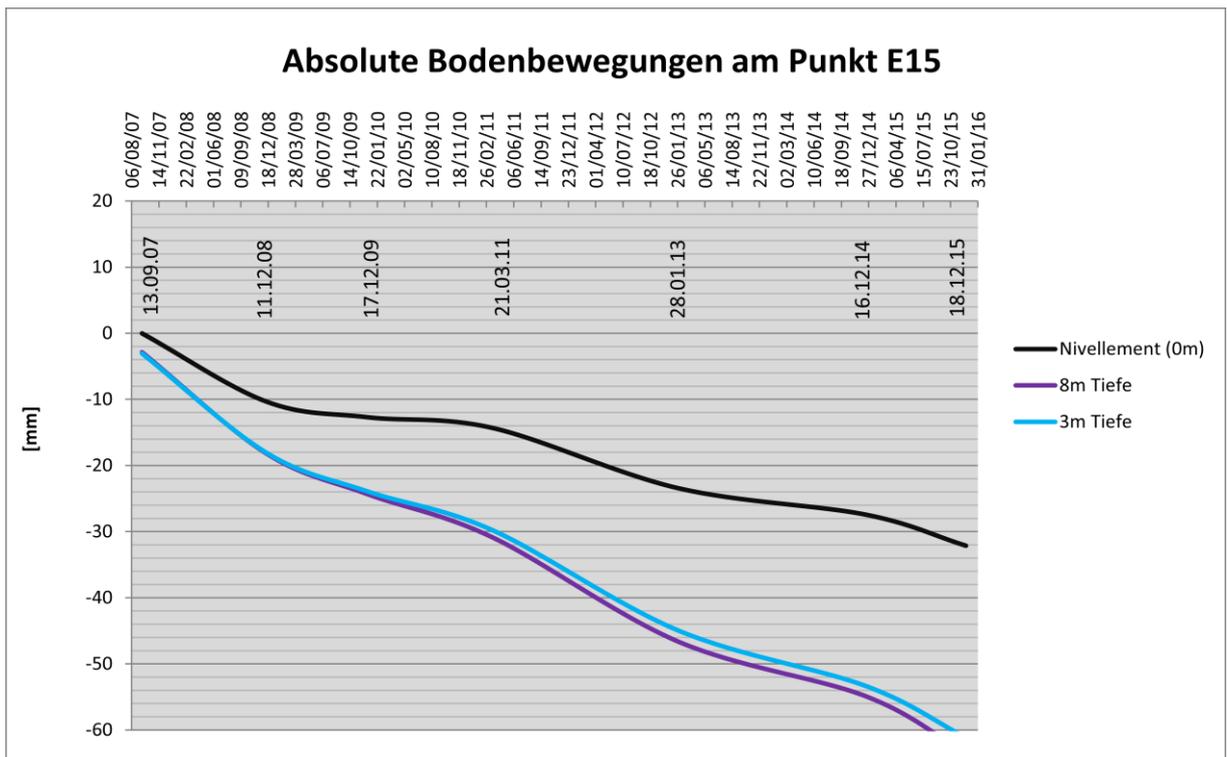
**Tabelle 33: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E14**

#### Absolute Bodenbewegungen am Punkt E15

Abbildung 68 zeigt das Verhalten der Sohle der Schachtricht (Nivellement) sowie der Extensometer-Einbindepunkte in der Schwebe (absolute Bodenbewegungen) am Punkt E15 im Zeitraum von 2007 bis 2015.

Die zugehörigen Daten sind in Tabelle 34 und 35 enthalten.

Der Abstand der Sohle der Schachtricht zu den Exentsometerpunkten nimmt dabei über die Zeit sukzessive um etwa 30mm zu.



**Abbildung 68: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E15**

Datum	Messwerte Extensometer [mm]		Nivellement
	8m Tiefe	3m Tiefe	0m
13.09.2007	-2,88	-3,06	0,00
11.12.2008	-7,86	-7,75	-10,31
17.12.2009	-11,65	-11,24	-12,68
21.03.2011	-16,58	-15,49	-14,31
28.01.2013	-23,21	-21,53	-23,41
16.12.2014	-27,47	-25,92	-27,41
18.12.2015	-31,35	-29,01	-32,11

**Tabelle 34: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E15**

Absolute Bodenbewegungen [mm]		
Datum	8m Tiefe	3m Tiefe
13.09.2007	-2,88	-3,06
11.12.2008	-18,17	-18,06
17.12.2009	-24,33	-23,92
21.03.2011	-30,89	-29,80
28.01.2013	-46,62	-44,94
16.12.2014	-54,88	-53,33
18.12.2015	-63,46	-61,12

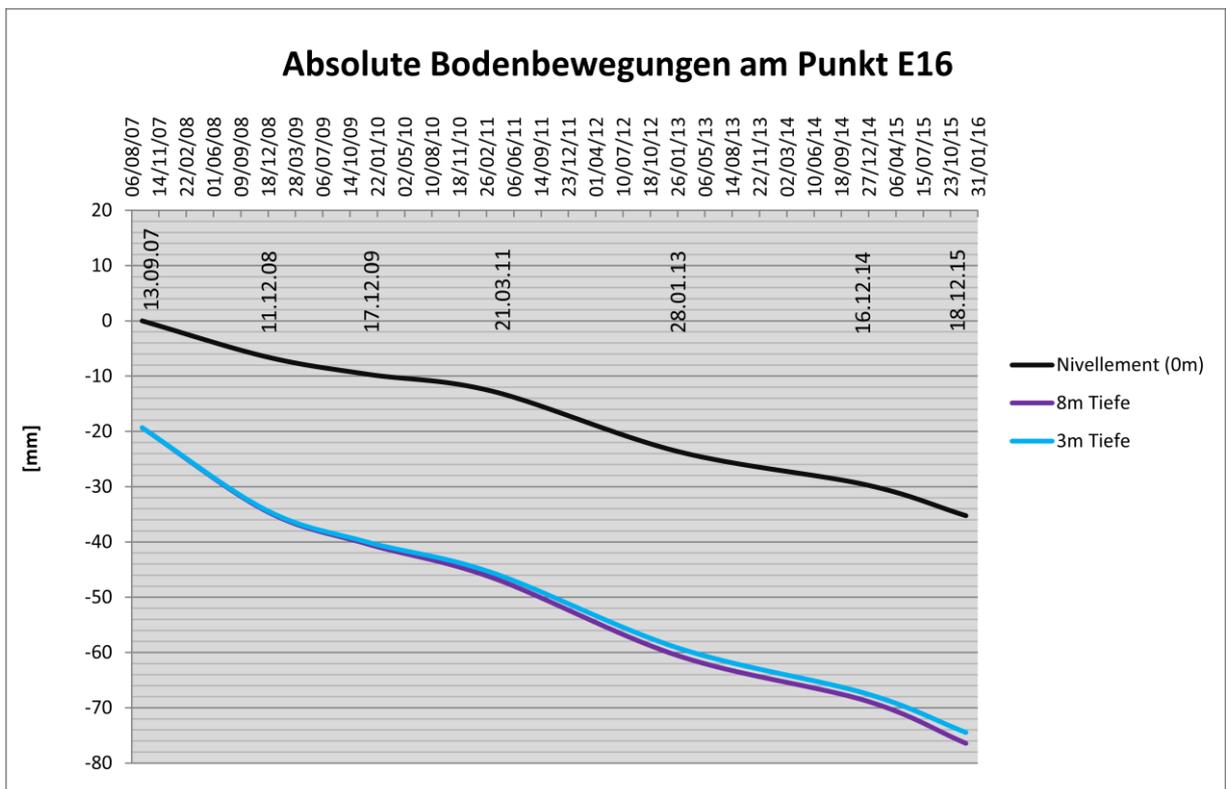
**Tabelle 35: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E15**

## Absolute Bodenbewegungen am Punkt E16

Abbildung 69 zeigt das Verhalten der Sohle der Schachtricht (Nivellement) sowie der Extensometer-Einbindepunkte in der Schwebel (absolute Bodenbewegungen) am Punkt E16 im Zeitraum von 2007 bis 2015.

Die zugehörigen Daten sind in Tabelle 36 und 37 enthalten.

Der Abstand der Sohle der Schachtricht zu den Extensometerpunkten nimmt dabei über die Zeit um etwa 20mm zunimmt.



**Abbildung 69: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E16**

Datum	Messwerte Extensometer [mm]		Nivellement 0m
	8m Tiefe	3m Tiefe	
13.09.2007	-19,33	-19,33	0,00
11.12.2008	-27,91	-27,73	-6,51
17.12.2009	-30,70	-30,36	-9,67
21.03.2011	-33,73	-32,83	-12,76
28.01.2013	-36,91	-35,52	-23,66
16.12.2014	-39,04	-37,73	-29,66
18.12.2015	-41,15	-39,19	-35,26

**Tabelle 36: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E16**

Absolute Bodenbewegungen [mm]		
Datum	8m Tiefe	3m Tiefe
13.09.2007	-19,33	-19,33
11.12.2008	-34,42	-34,24
17.12.2009	-40,37	-40,03
21.03.2011	-46,49	-45,59
28.01.2013	-60,57	-59,18
16.12.2014	-68,70	-67,39
18.12.2015	-76,41	-74,45

**Tabelle 37: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E16**

#### **6.4.6 Zusammenfassung und kritische Bemerkungen zu den Extensometermessungen**

Die Extensometer-Messungen in verschiedenen Tiefen (3m/8m/13m/18m/23m) an einem bestimmten Extensometer-Standpunkt, etwa E11, unterscheiden sich nicht, d.h. alle Extensometer bewegen sich praktisch um den gleichen Betrag nach unten. Die gleichmäßige Auslängung der Extensometer kann als Kriechen des Gebirges in den Hohlraum hinein interpretiert werden. Um den Hohlraum herum findet keine Auflockerung statt – das Gebirge ist intakt (das Öffnen von Klüften würde durch einen plötzlichen Sprung in den Extensometerkurven repräsentiert werden, was nicht zu sehen ist).

Betrachtet man die einzelnen Extensometer-Einbindepunkte relativ zu deren Lage zur Sohle der Schachtricht, so fällt auf, dass sich über die Zeit deren Abstand zum Sohlnivellement (bei allen Extensometern mit Ausnahme von E14) kontinuierlich vergrößert. Die Bewegungen liegen dabei in einem Bereich von etwa 8 bis 50mm im Zeitraum von 2007 bis 2015. Da der oberste Extensometer-Einbindepunkt in einer Tiefe von 3m liegt und die daruntergelegenen Einbindepunkte gleichmäßig um denselben Betrag absinken, muss die Bewegung in den oberen 3m unterhalb der Sohle der Schachtricht stattfinden.

Ursache dafür könnte eine Bewegung (etwa ein kontinuierliches Absinken) des Anschlusspunktes für das Nivellement sein. Ist dies der Fall, d.h. bewegt sich der Anschlusspunkt tatsächlich, erfahren alle Nivellement-Punkte eine Höhenänderung um den gleichen Betrag.

Eine Höhenänderung aller Nivellement-Punkte um den gleichen Betrag ist jedoch nicht feststellbar (vgl. Abbildung 53 und 54 unter Punkt 6.4.2 – Auswertung der Nivellements an der Sohle der Schachtricht).

Im Jahr 2007, kurz nach der Installation der 2. Messkampagne, wurde die Schachtricht nach einem Wassereinbruch in der Nähe des BW13 überflutet. Möglicherweise kam es im Zuge dessen zu einem Aufquellen des Haselgebirges in der Nähe der Schachtricht, was sich in dem sukzessive zunehmenden Abstand zwischen der Schachtricht-Sohle und den Extensometer-Einbindepunkten äußert.

Zudem wird durch die Luftfeuchtigkeit in der Schachtricht ein Feuchtekriechen im Haselgebirge hervorgerufen. Die Tatsache, dass dieses nur in unmittelbarer Nähe des Hohlraumes auftritt, wäre ein Erklärungsansatz dafür, dass die Bewegung ausschließlich im Haselgebirge zwischen der Sohle der Schachtricht und dem ersten Einbindepunkt in 3m Tiefe stattfindet.

### Kritische Bemerkungen

Gleich wie bei den Druckdosen liegen auch bei den Extensometern weder Bohrloch- noch Einbauprotokolle vor. Somit existieren keine Angaben über Bohrlochabweichungen, geologische Informationen usw.

Obwohl laut Aussage der Markscheiderei jedes Jahr durchgehend von 1997 bis 2018 ein Nivellement in der Ankehrschachtricht über dem BW13 durchgeführt wurde, finden sich auch hier keine vollständigen Datensätze. So fehlen etwa die Nivellement-Daten aus den Jahren 2003 bis 2006, sowie ab 2016. Aus diesem Grund erfolgt in der vorliegenden Arbeit die Auswertung der Daten erst ab dem Jahr 2007.

Für das in dieser Arbeit nicht näher behandelte Bohrspülwerk 2 gilt ähnliches. Hier fehlen die Nivellement-Daten zur Gänze.

Die gemessenen Extensometer- bzw. Nivellement-Werte wurden vom Unternehmen zwar ausgewertet und zum Teil für eine gebirgsmechanische Interpretation herangezogen, allerdings erfolgte die Betrachtung der einzelnen Extensometer und des Nivellements stets gesondert. Eine zusammenhängende Betrachtung hat nicht stattgefunden.

## 6.4.7 Verformungen im Pfeiler:

Während die Extensometer in einer Tiefe zwischen 3m und 23m praktisch gleichmäßig absinken, zeigen die Extensometer E1 und E2 im Pfeiler in einer Tiefe von 30m bis 50m ein anderes Verhalten (Abbildung 70 und 71). Für die Auswertung der Messkurve wird der Zeitraum zwischen dem 13.09.2007 und dem 18.12.2015 herangezogen.

Der Himmelsstand des Werks BW13 stieg während dieses Zeitraums von +453m um 14m auf +467m über NN (dies entspricht einer Tiefe von 24m bzw. 10m unter dem Niveau der Schachtricht).

Abbildung 70 zeigt die Bewegungen der drei Extensometer am Punkt 1.

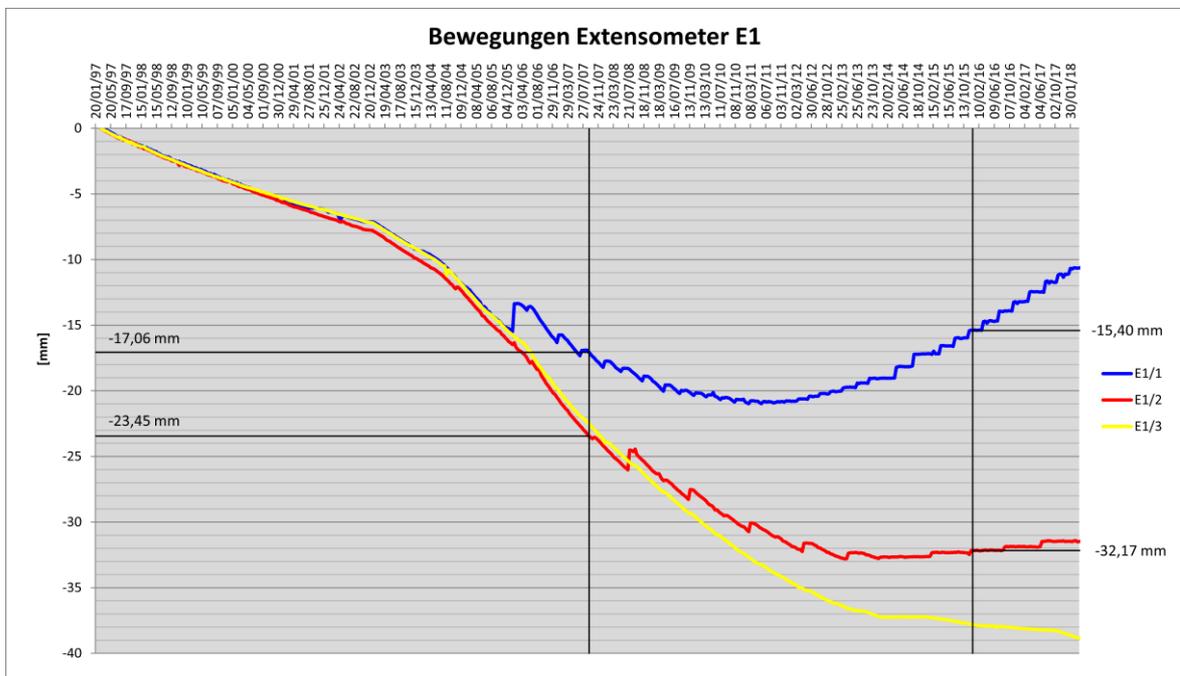


Abbildung 70: Extensometer-Messungen am Punkt 1

Quantitativ betrachtet bewegt sich der Punkt E1/1 im Zeitraum zwischen dem 13.09.2007 und dem 18.12.2015 nach oben, was eine Stauchung des Pfeilers bedeutet. Die Punkte E1/2 und E1/3 bewegen sich hingegen nach unten, was auf eine Dehnung in den Tiefen von 30m bzw. 40m hindeutet. Der obere Teil des Pfeilers sinkt also nach unten, während sich der untere Teil nach oben bewegt, was eine Zusammendrückung verursacht.

Schlussfolgerung: In einer Tiefe von etwa 50m kommt es im Pfeiler durch den Anstieg der vertikalen Spannung zur Ausbildung einer Druckzone.

Über die Betrachtung der Verformung in einer Tiefe zwischen 40m und 50m im Zeitraum zwischen dem 13.09.2007 und dem 18.12.2015 soll im Folgenden die sich daraus ergebende Spannungsänderung berechnet und diese dann mit dem tatsächlich gemessenen Wert von SMS1 in 45m Tiefe verglichen werden.

Der vertikale Abstand zwischen E1/1 (50 m Tiefe) und E1/2 (40 m Tiefe) betrug am 13.09.2007:

$$-17,06 \text{ mm} - (-23,45 \text{ mm}) = \underline{6,39 \text{ mm}} \text{ (vgl. Abb. 70)}$$

Der vertikale Abstand zwischen E1/1 (50 m Tiefe) und E1/2 (40 m Tiefe) betrug am 18.12.2015:

$$-15,40 \text{ mm} - (-32,17 \text{ mm}) = \underline{16,77 \text{ mm}} \text{ (vgl. Abb. 70)}$$

Daraus errechnet sich eine Verformung  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$  im Pfeiler von:

$$\varepsilon = \frac{16,77\text{mm} - 6,39\text{mm}}{10.000\text{mm}} = \underline{10,38 * 10^{-4}}$$

Mit einem E-Modul des Haselgebirges von 15 GPa (Kellerbauer, 2018) ergibt sich somit eine Spannungsdifferenz von

$$10,38 * 10^{-4} * 15.000 \text{ MPa} = \underline{15,57 \text{ MPa}}.$$

Analog erfolgt die Berechnung der Spannungsänderung mit den Messwerten von Extensometer 2, ebenfalls für eine Tiefe zwischen 40m und 50m im Zeitraum zwischen dem 13.09.2007 und dem 18.12.2015 (Abbildung 71).

=

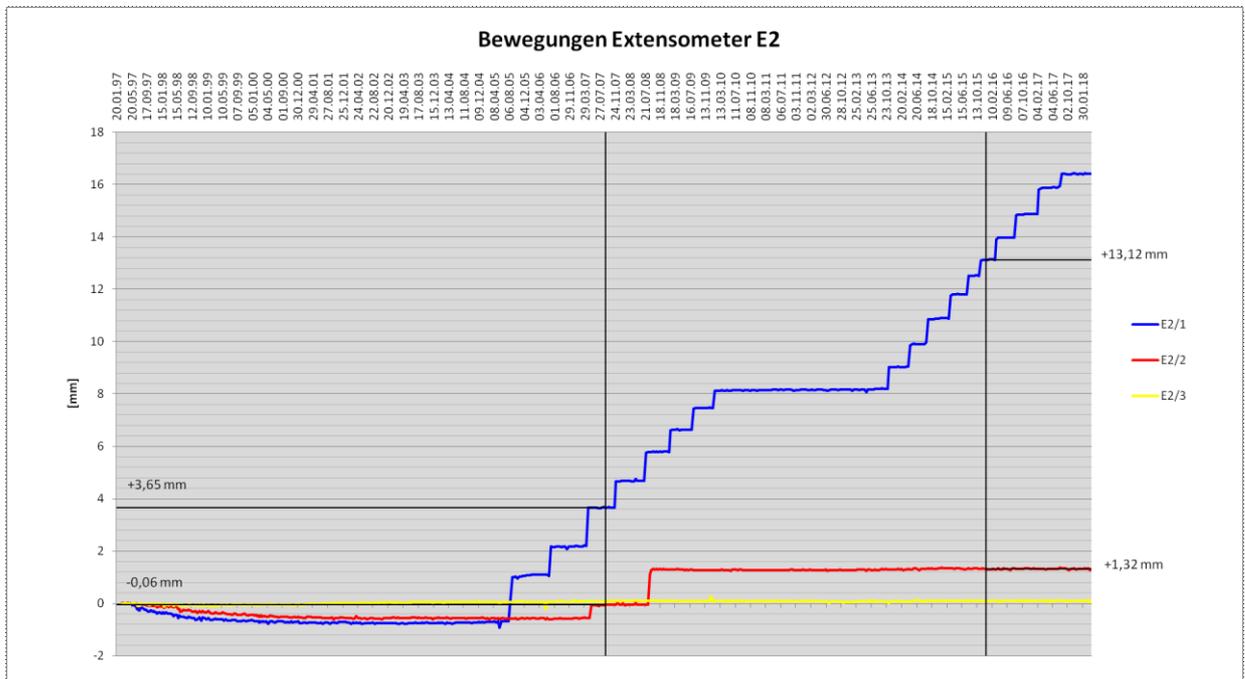


Abbildung 71: Extensometer-Messungen am Punkt 2

Der vertikale Abstand zwischen E2/1 (50 m Tiefe) und E2/2 (40 m Tiefe) betrug am 13.09.2007:

$$+3,65 \text{ mm} - (-0,06 \text{ mm}) = \underline{3,71 \text{ mm}} \text{ (vgl. Abb. 71)}$$

Der vertikale Abstand zwischen E2/1 (50 m Tiefe) und E2/2 (40 m Tiefe) betrug am 18.12.2015:

$$+13,12 \text{ mm} - 1,32 \text{ mm} = \underline{11,80 \text{ mm}} \text{ (vgl. Abb. 71)}$$

Daraus errechnet sich eine Verformung  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$  im Pfeiler von:

$$\varepsilon = \frac{11,80 - 3,71}{10.000} = \underline{8,09 * 10^{-4}}$$

Mit einem E-Modul des Haselgebirges von 15 GPa (Kellerbauer, 2018) ergibt sich somit eine Spannungsdifferenz von

$$8,09 \cdot 10^{-4} \cdot 15.000 \text{ MPa} = \underline{12,14 \text{ MPa}}$$

Die tatsächlich gemessenen Spannungen in einer Tiefe von 45m werden Abbildung 72 entnommen.

=

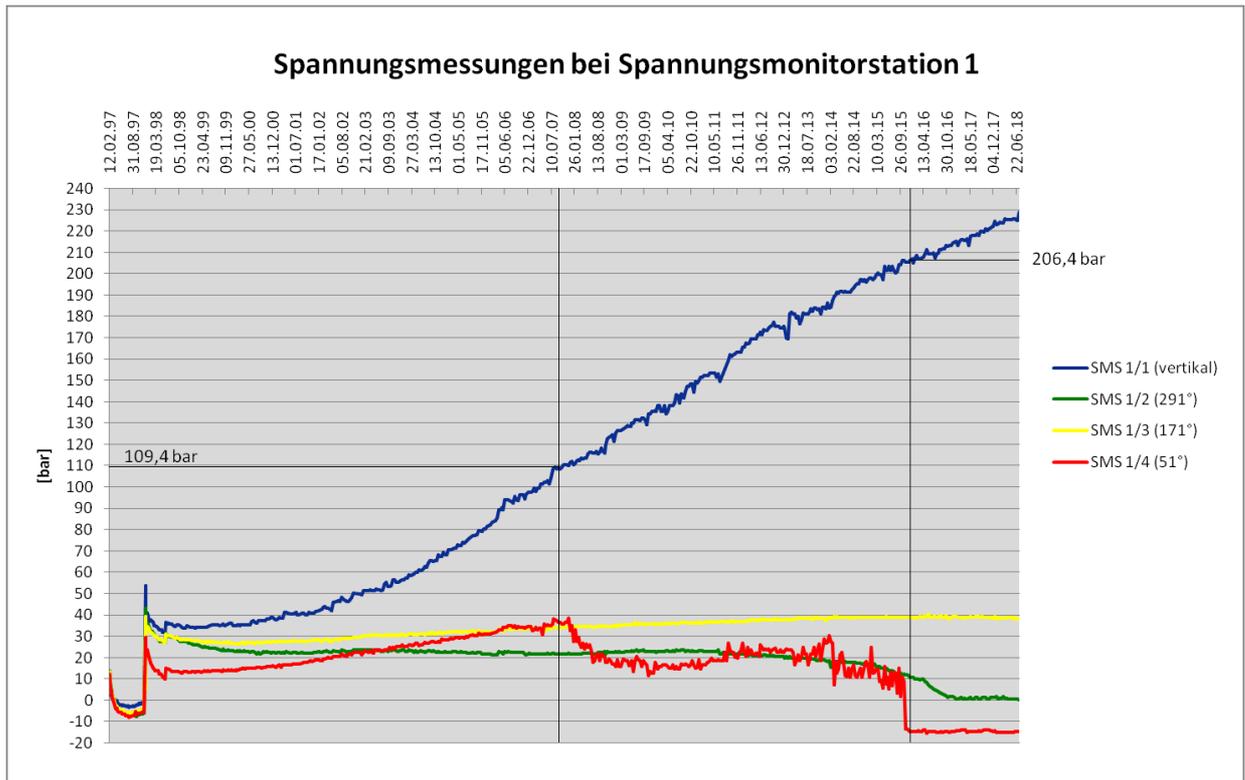


Abbildung 72: Spannungsmessungen bei SMS 1

Die tatsächlich gemessene vertikale Spannung lag am 13.09.2007 bei 109,4 bar und stieg bis zum 22.12.2015 auf 206,4 bar. Die Spannungsdifferenz beträgt also 97 bar oder 9,7 MPa und ist somit etwas niedriger als über die Verformung errechnet.

Es ist möglich, dass es sich bei der Angabe des E-Moduls des Haselgebirges um einen Wert aus einem Kurzzeit-Versuch handelt. Ein Langzeit-Versuch würde niedrigere Werte ergeben und das Berechnungsergebnis aus den Verformungen noch etwas herabsetzen.

Quantitativ stimmen die Berechnungsergebnisse also mit der tatsächlich gemessenen Spannung überein.

---

## 7 Abschließende Bemerkungen

---

Bei den durch die Extensometer erfassten Bewegungen um den Hohlraum handelt es sich nicht nur um reine Kriecherscheinungen, sondern auch spannungsinduzierte Verformungen (Konvergenz).

Zur Ermittlung des Kriechverhaltens des Haselgebirges wurde von Prof. Wagner (2019) vorgeschlagen, die ursprüngliche Modellrechnung (Müller & Hereth, 2003), in welcher das Kriechverhalten keine Berücksichtigung findet, heranzuziehen. Durch das Berechnen von Spannungen bzw. Verformungen zu definierten Zeitpunkten (z.B. im Jahr 2007 und 2017 unter Berücksichtigung der sich nach oben bewegenden Himmelsfläche) sollte dann anhand der tatsächlich gemessenen Werte auf die Kriechrate rückgerechnet werden. Die Kriechrate wäre somit die Differenz zwischen den tatsächlich gemessenen Werten und den in der Modellrechnung postulierten Verformungen.

Dieser Vorschlag kann nicht umgesetzt werden, da die Modellrechnung nur den Endzustand (alle Werker bereits fertig mit Kuppelform verlaugt) abbildet. Eine dynamische Betrachtung des Spannungs- und Verformungsverhaltens bei sich ändernden Himmelsflächen ist daher nicht möglich.

Die Ergebnisse einiger im Salzbergwerk Berchtesgaden im Labor durchgeführten Kriechversuche wurden auf Grund von im Nachhinein festgestellten Unstimmigkeiten (keine konstante Lastaufbringung und zu kurze Versuchsdauer) verworfen. Es liegen also auch keine experimentell ermittelten Kriechraten vor.

Um die Kriechrate des Haselgebirges zu ermitteln, wird die Durchführung von neuen Kriechversuchen empfohlen.

Um eine Aussage über den Einfluss des Feuchtekriechens treffen zu können, sollten in verschiedenen Strecken des Bergwerks Konvergenzmessungen durchgeführt werden. Empfehlenswert wäre eine Strecke in der Nähe des einziehenden Wetterstromes, wo der Einfluss des Feuchtekriechens erwartungsgemäß am größten sein sollte, sowie in einer Strecke, wo ein relativ trockener Wetterstrom vorherrscht. Ebenso wäre der Vergleich einer Konvergenzmessung in der Ankehrschachtricht über einem Hohlraum sowie über einem Pfeiler interessant, um Einflüsse des Hohlraums aufzeigen zu können.

Da über den Zeitraum der letzten 20 Jahre keine sonderlich großen Gebirgsbewegungen mit den Extensometern erfasst wurden (durchschnittliche Bewegungsrate einige mm bis cm pro Jahr), wird es als nicht nötig erachtet, 2-wöchige Messintervalle beizubehalten. 6-wöchige bis 8-wöchige Messintervalle sind dafür ausreichend.

Abschließend ist festzuhalten, dass rund um den Hohlraum des Bohrspülwerks 13 nur sehr geringe plastische Verformungen auftreten, keine Beschleunigung der Verformungsraten über die Zeit beobachtet wurden und die Extensometermessungen auf keine Anzeichen von Gebirgsauflockerung hinweisen. Diese Beobachtungen können als Zeichen eines stabilen Zustands des Gebirges um das Bohrspülwerk 13 gedeutet werden.

## 8 Zusätzliche Instrumentierung von Werkern

Analog zu Bohrspülwerk 13 sind im Salzbergwerk Berchtesgaden weitere Instrumentierungen in anderen Bohrspülwerken geplant oder bereits installiert.

### 8.1 Vorhandene Instrumentierung im Bohrspülwerk 2

Das im Mittelfeld gelegene Bohrspülwerk 2 ist analog zu BW13 mit Messeinrichtungen ausgestattet. Bohrspülwerk 2 wurde Anfang der 1980er Jahre angelegt und war bis August 1993 in Betrieb. Seit seiner Stilllegung wird es als Solespeicher genutzt. Das Werk ist etwa zu 80% mit Laist gefüllt; sein Solespiegel variiert je nach Nachfrage am Markt.

Auf der König Ludwig Stollensohle liegen die Hohlräume zweier Sinkwerke teilweise über BW2. Im Jahr 2002 wurden in BW2 die zwei Spannungsmonitoring-Systeme SMS 1 (im Bereich des Pfeilers) und SMS 2 (liegt über dem Hohlraum von BW2) installiert. Zudem erfolgte die Installation von 8 Fünfach-Extensometern in der Schwebe (Abbildung 73).

Da die Installation dieser Messeinrichtungen erst erfolgte, als das Werk bereits stillgelegt war, wurden diese nicht ausgewaschen und befinden sich nach wie vor in Betrieb.

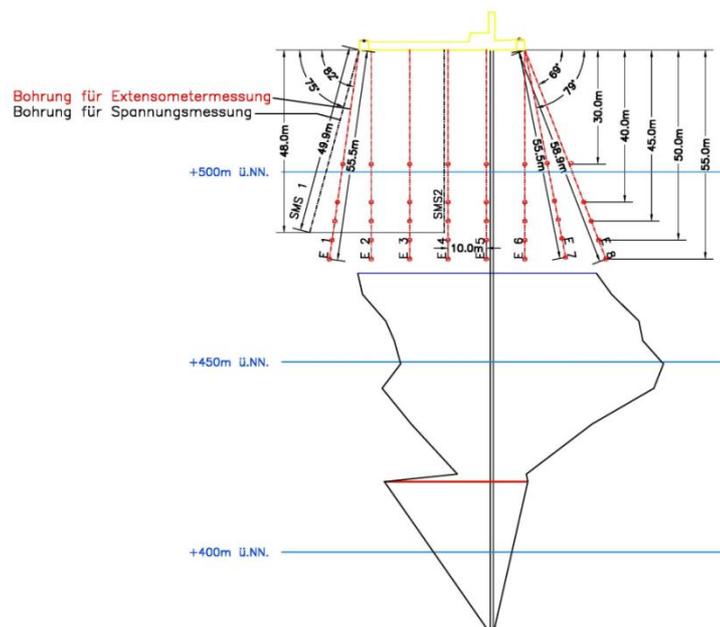


Abbildung 73: Instrumentierung im Bohrspülwerk 2 (Plan von 1999)

## 8.2 Geplante Instrumentierung in Bohrspülwerk 13

Um den Endzustand des BW13 und das Gebirgsverhalten der Nachbarwerke zu überwachen, sollen die Schewe über dem BW13 und der Gebirgspeiler zwischen BW13 und BW14 durch zusätzliche Extensometer überwacht werden.

Geplant sind die Installation von 5 Einfachextensometern in der Firste der Ankehrschachtricht sowie 7 Vierfachextensometern in der Schewe über dem Hohlraum von BW13 (Abbildung 74).

Zusätzlich sind regelmäßige Nivellementmessungen in der Ankehrschachtricht geplant. Für das Nivellement sollen die Extensometerköpfe bzw. die Ankerplatten eingebunden werden.

Zudem wäre es sinnvoll, die Konvergenz im Bereich der Extensometermesspunkte zu erfassen um auf diese Weise zusätzliche Informationen betreffend die Gebirgsauflockerung in der unmittelbaren Umgebung der Schachtricht zu erhalten.

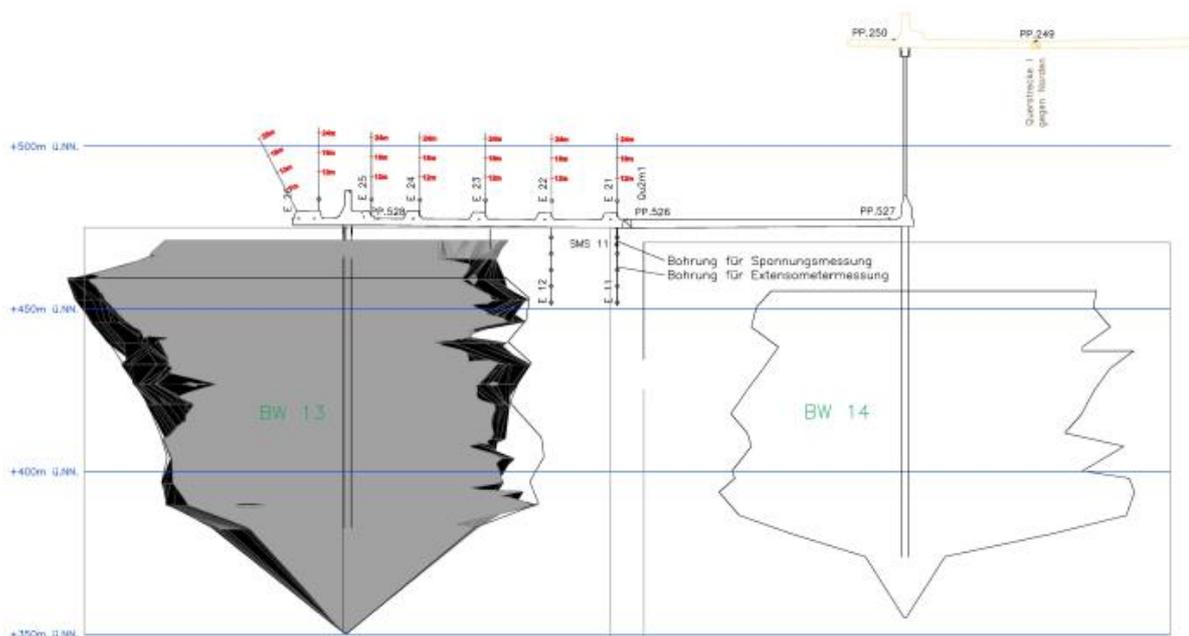


Abbildung 74: Geplante Instrumentierung im Bohrspülwerk 13

### 8.3 Geplante Instrumentierung in Bohrspülwerk 21

Die Instrumentierung von BW 21, welches im Mittelfeld der 1. Tiefbausohle liegt, soll die Überwachung eines Bohrspülwerks in der letzten Phase der Laugung inkl. der Erstellung der Kuppelform ermöglichen. Nach dem Einstellen der Laugung und Abpumpen der restlichen Sole ist im Anschluss die Überwachung des luftgefüllten Hohlraums vorgesehen.

Für die Überwachung der Kuppellaugung ist der Einbau von Vierfachextensometern geplant (Abbildung 75). Diese sollen in gemeinsame Bohrlöcher eingebaut und im Contractor Verfahren schrittweise verfüllt werden. Im Bereich von BW21 sind auf der darüberliegenden König Ludwig Stollensohle regelmäßig angeordnete Abbauhohlräume vorhanden, daher soll die Instrumentierung auch eine Überwachung der Schwebel in diesem Bereich ermöglichen.

Zusätzlich ist die regelmäßige Durchführung von Nivellements in der Ankehrschachtricht vorgesehen. Um zusätzliche Informationen betreffend der Gebirgsauflockerung zu erhalten, wäre es sinnvoll, die Konvergenz im Bereich der Extensometermesspunkte zu erfassen.

Auf den Einbau von Spannungsmonitor-Systemen wird auf Grund der wenig plausiblen Werte in vorangegangenen Messungen (vgl. Bohrspülwerk 13) verzichtet.

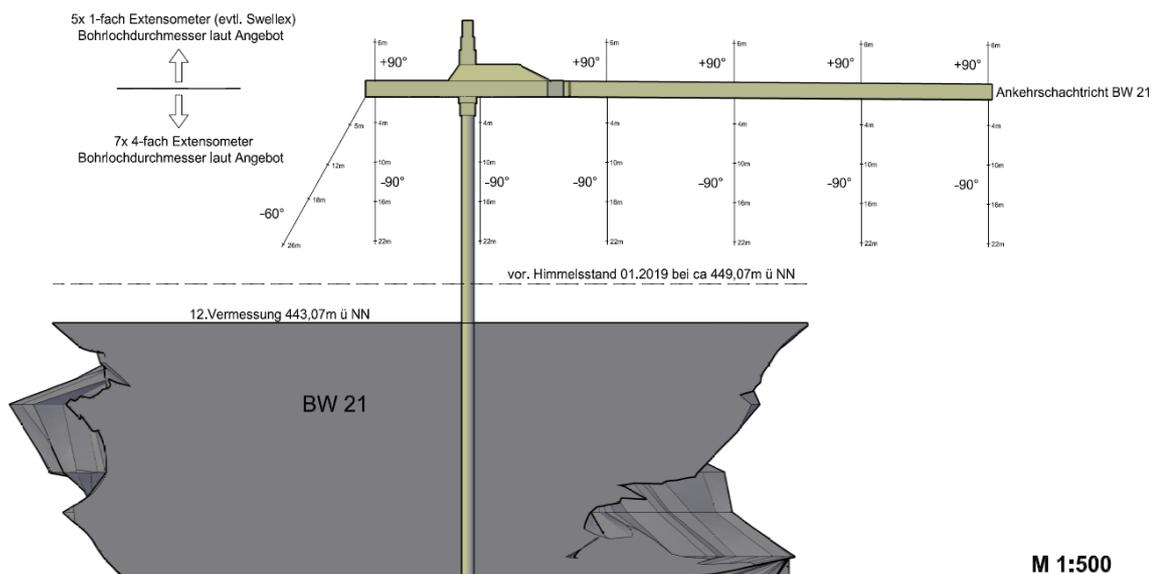


Abbildung 75: Geplante Instrumentierung im Bohrspülwerk 21

---

## 8.4 Geplante Instrumentierung in Bohrspülwerk 93

---

An Hand von BW93 soll der Einfluss eines Bohrspülwerkes auf die Geländeoberfläche untersucht werden. Ziel ist, den Nachweis zu erbringen, dass eventuelle Bewegungen im Umfeld von Bohrspülwerk 93 sich nicht bis an die Geländeoberfläche fortsetzen. Rund um Bohrspülwerk 93 gibt es keine bestehenden Nachbarkavernen und auch keine überlagernde Abbausohle, die etwaige Senkungsbewegungen beeinflussen könnte.

Beim aktuellen Stand des Werkshimmels von 412,079m ü. NN (Stand 20.06.2019) beträgt die Überlagerung etwa 378m. Der Punkt der maximalen Versudhöhe des Werks liegt auf 469,163m ü. NN; die Überlagerung wird nach der Aussolung von Bohrspülwerk 93 also noch etwa 320m betragen.

Hintergrund für die Installation der Messeinrichtungen im Bohrspülwerk 93 ist die Änderung der Einwirkungsbergverordnung in Deutschland im Jahr 2017. Diese schreibt jetzt auch für Salzbergwerke, welche früher von dieser Regelung ausgenommen waren, die Festlegung eines Grenzwinkels vor.

Der Grenzwinkel wird in der Bergschadenkunde zur Definition des Einwirkungsbereichs eines Abbaus herangezogen und ist jener Winkel, welcher zwischen der Lotrechten der Hohlraumkante und jenem Winkelschenkel liegt, der zum Senkungsnullrand an der Tagesoberfläche weist. Der Senkungsnullrand legt die Grenze fest, ab welcher es bergbaubedingt zu Einwirkungen (Senkungen) an der Geländeoberfläche kommt. (Kratsch, 1997)

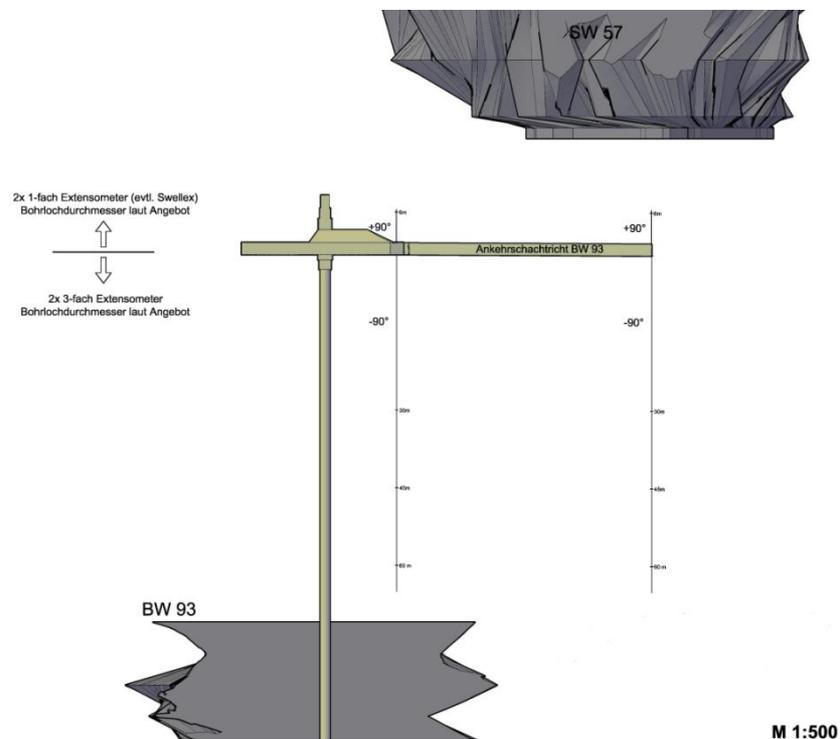
Grenzwinkel bzw. Nullrand sind dabei vom Unternehmen festzulegen. Innerhalb des Nullrandes befindet sich das Unternehmen in der Beweislast, d.h. es muss nachweisen, dass etwaige Massenbewegungen an der Tagesoberfläche nicht durch den Bergbau, sondern anderweitig verursacht worden sind. Das Bohrspülwerk 93 bietet sich für die Durchführung derartiger Messungen an, da über dem Werk an der Tagesoberfläche bereits Nivellement-Linien zum Oberflächenmonitoring verlaufen und hier schon regelmäßig Messungen durchgeführt werden, um etwaige Oberflächenbewegungen (z.B. verursacht durch Lösungserscheinungen im Untergrund) aufzuzeichnen. Es ist vorgesehen, in über dem BW93 liegenden Strecken auf der König Ludwig Stollensohle

Feinnivellements durchzuführen, um zu überprüfen, ob etwaige Bewegungen untertage mit jenen über Tage korrelieren. (Bartl, 2019)

Geplant ist, je ein Dreifachextensometer in das Gebirge über dem aktuellen Abbauhohlraum und in den unverritzten Gebirgsteiler einzubauen. Dies sollen in gemeinsame Bohrlöcher eingebaut und mittels Zementsuspension im Contractor Verfahren schrittweise verfüllt werden. Zusätzlich ist der Einbau zweier kurzer Einzelextensometer in senkrechte Bohrlöcher in der Schweben über dem Hohlraum geplant, deren Installation von der Ankerschachtricht aus erfolgen soll (Abbildung 76).

Analog zu BW13 und BW21 ist auch hier die regelmäßige Durchführung von Nivellements in der Ankerschachtricht vorgesehen. Um zusätzliche Informationen betreffend der Gebirgsauflockerung zu erhalten, wäre es sinnvoll, die Konvergenz im Bereich der Extensometermesspunkte zu erfassen.

Anmerkung: Auf Grund der im Bereich des BW93 recht großen Überlagerung von über 300m ist die Sinnhaftigkeit des Vorhabens, die Einwirkung des Hohlraums auf die Tagesoberfläche erfassen zu wollen, sehr beschränkt und sollte an anderer Stelle mit geringerer Überlagerungshöhe ausgeführt werden.



**Abbildung 76: Geplante Instrumentierung im Bohrspülwerk 93**

Abbildung 77 zeigt die Lage von BW2, BW13, BW21 und BW93 auf der Grubenkarte.

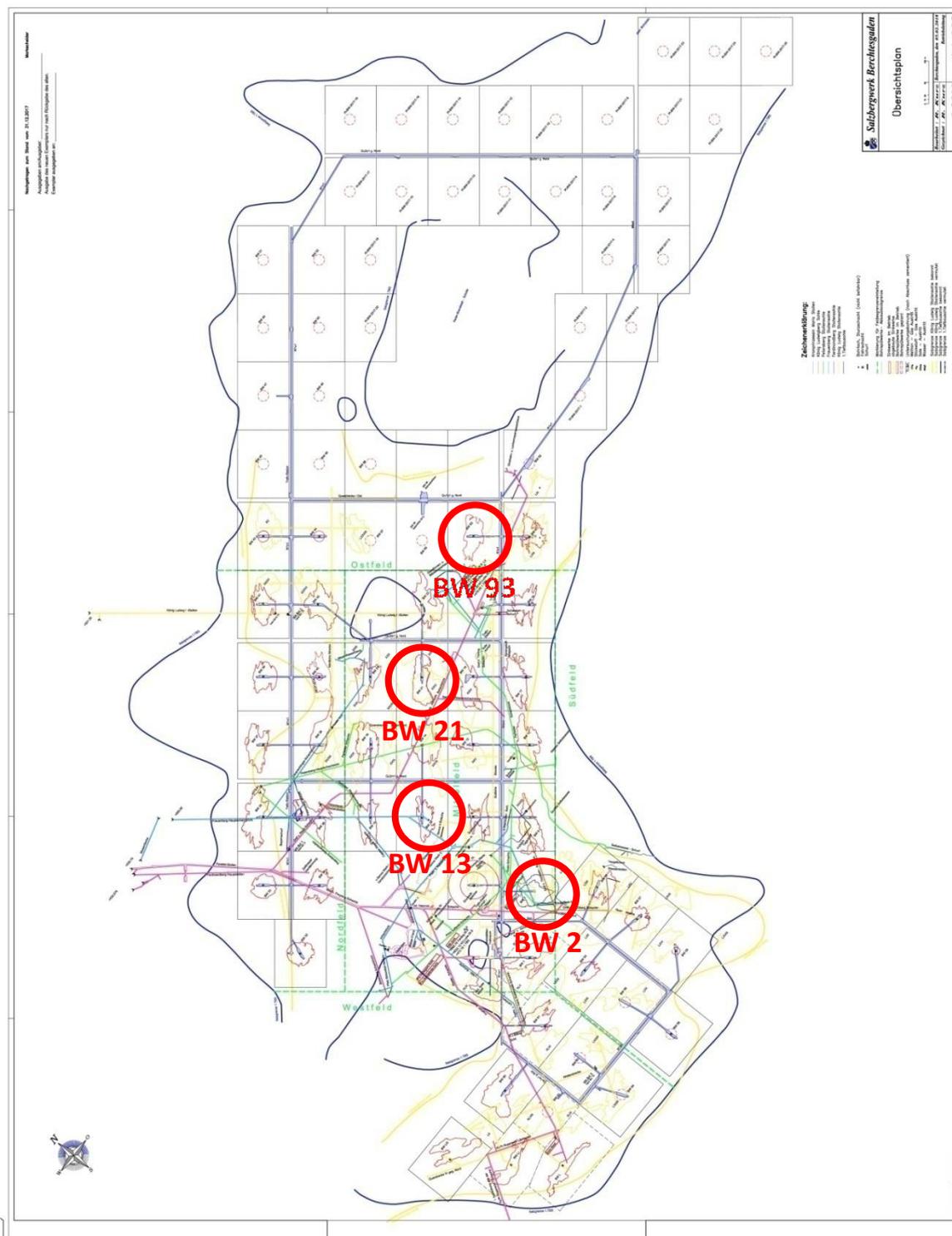


Abbildung 77: Lage der instrumentierten Bohrspülwerker

---

## 9 Ergänzungen und Sonstiges

---

Auf Grund der Beschaffenheit des oberflächennahen ausgelaugten Haselgebirges treten in der Gegend von Hallein, Berchtesgaden und Hallstatt rezente geologische Vorgänge wie etwa Hangbewegungen, Erdfälle oder Dolinenbildung auf. Ebenfalls kommt es immer wieder zur Entstehung von Zerrspalten oder grabenartigen Einbrüchen. Diese Erscheinungen entstehen durch Auslaugung von Gips im Untergrund und stehen nicht im Zusammenhang mit historischen oder gegenwärtigen Bergbautätigkeiten. (Kellerbauer, 1996)

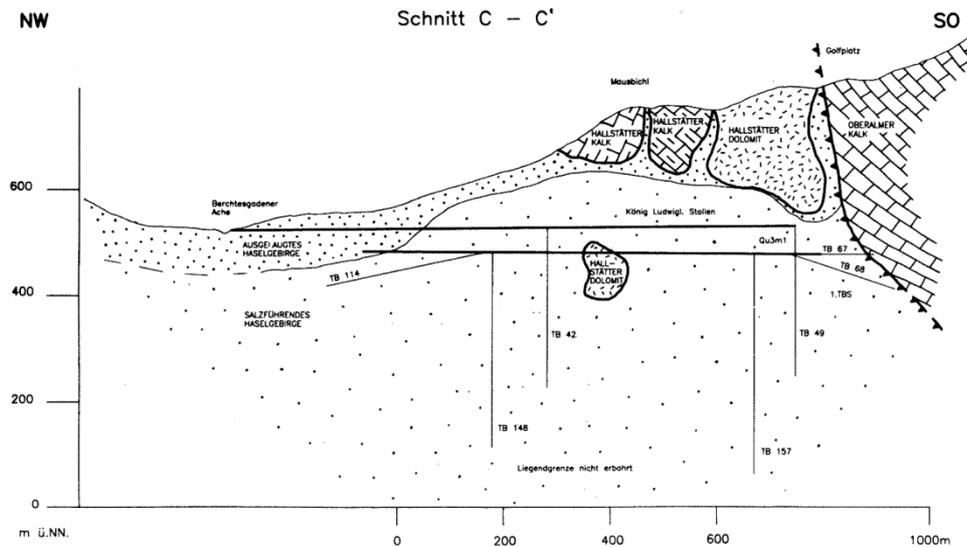
Durch das Vorhandensein historischer Abbauhohlräume nahe der Tagesoberfläche treten im Bereich des Untersbergs immer wieder kleinere Tagbrüche auf. Vor einigen Jahren ereignete sich beispielsweise im historischen Petersberg-Wasserstollen, welcher im ausgelaugten Haselgebirge über der Lagerstätte angelegt worden war, ein Verbruch, der die Ausbildung einer eiförmigen Pinge an der Tagesoberfläche oberhalb der alten Bergbau-Bereich zu Folge hatte. (Bartl, 2019)

Im Mittelfeld der König Ludwig Stollensohle haben sich nach Einstellung der Laugung einige Himmelsbrüche ereignet. Diese sind der flachen Himmelsfläche geschuldet, welche in Bezug auf die Spannungsumlagerung äußerst ungünstig ist. Wenn die Empfehlungen des gebirgsmechanischen Gutachtens – die Kavernengeometrie mit der empfohlenen Ausrundung und der notwendige Schwebenabstand von mindestens 30 m – eingehalten werden, gibt es auch auf der König Ludwig Stollensohle kein Stabilitätsproblem. (Kellerbauer, 2019)

Im Ostfeld der Lagerstätte liegen im Bereich der aktuellen Abbausohle keine größeren Störungszonen bzw. wasserführende Gesteinsschichten. Die Gefahr von Wassereinbrüchen in das Grubengebäude besteht nur, wenn das ausgelaugte Haselgebirge bzw. eine Lagerstättengrenze angefahren wird.

Wasserwegsamkeiten existieren in den Oberalmer Kalken (Abbildung 78, Formation rechts oben), die die Lagerstätte im SE abschneiden. Die stärksten Wasserzuflüsse in das Grubengebäude erfolgen aus diesen Gesteinen. Um das

Wasser schon im Kalk zu fassen und die Gefährdung des Grubengebäudes zu verringern, wurden historisch Wasserbaue angelegt.



**Abbildung 78: Lagerstätte wird im SE durch die wasserführenden Oberalmer Kalk abgeschnitten (Kellerbauer, 1996)**

Ebenfalls erfolgte historisch über Tage die Installation eines Ries-Systems, welches am Untersberg über den alten Abbaufeldern angelegt wurde. Dieses bildet bis heute ein flächendeckendes Drainagenetzwerk, das Oberflächenwasser sofort abführt und den Zutritt von Tagwasser in das Grubengebäude verringert.

Das Ries-System ist nach wie vor voll funktionstüchtig und wird vom Unternehmen in regelmäßigen Abständen kontrolliert und gewartet (Abbildung 79).



**Abbildung 79: Wasserries an der Tagesoberfläche des Untersbergs (Bartl, 2019)**

Tritt bei Erkundungsbohrungen unter Tage unerwarteter Wasserzufluss auf (beispielsweise beim Erbohren der Lagerstättengrenze), werden die Bohrungen umgehend mit Zement versiegelt. Eine ganz andere Problematik stellen Grubengase (Methan, CO<sub>2</sub>, Stickstoff und Schwefelwasserstoff) dar, welche ebenfalls im Zuge von Erkundungsbohrungen immer wieder im Haselgebirge angetroffen werden, jedoch aus gebirgsmechanischer Sicht nicht von Belang sind.

---

## 10 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

---

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war die Auswertung von vorhandenen gebirgsmechanischen Daten, Beobachtungen etc., um die vom Ingenieurbüro Müller & Hereth verwendeten Eingangsparameter für die geomechanische Modellrechnung zur Vergrößerung der Bohrspülwerks-Dimensionen zu beurteilen und die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen auf Plausibilität zu überprüfen. Dieses Ziel wurde nicht erreicht. Die Gründe dafür sind folgende:

Erstens sind keine Rückschlüsse auf die in-situ Spannungssituation in der Salzlagerstätte Berchtesgaden an Hand von historischen Aufzeichnungen möglich, da sich keine Informationen über großflächige, mehrere im reinen Haselgebirge gelegenen Werker in den Sinkwerks-Chroniken finden.

Zweitens sind keine Rückschlüsse auf das Gebirgsverhalten auf der derzeitigen Abbausohle anhand der Auswertung von Messdaten aus Kavernen in höher gelegenen Horizonten möglich, da diese eine andere Überlagerungshöhe und eine andere Geometrie (große Firstfläche bei geringer Höhe) als moderne Bohrspülwerke aufweisen.

Drittens ist aus den in der vorliegenden Arbeit ausgewerteten Messdaten eine Ableitung der Kriechrate im Haselgebirge nicht möglich. Zur Ermittlung einer Kriechrate wird zur Durchführung von Kriechversuchen an Haselgebirgsproben aus dem Salzbergwerk geraten.

An Hand der Auswertung der Messdaten aus dem auf der 1. Tiefbausohle gelegenen Bohrspülwerk 13 ist eine Ausweitung der Kavernen von  $3.500\text{m}^2$  auf  $4.200\text{m}^2$  ohne Auftreten von Stabilitätsproblemen möglich. Es kommt zu keiner Ausbildung einer Auflockerungszone und nur sehr geringen Gebirgsbewegungen (im Bereich einiger mm/Jahr) um die Kaverne. Die Stabilität der Kaverne ist trotz der Erweiterung der Himmelsfläche in vollem Umfang gegeben.

Die Auswertung der Messergebnisse aus der Schachtricht über dem Bohrspülwerk 13 zeigt mit hoher Wahrscheinlichkeit den Einfluss von Feuchtekriechen auf das Haselgebirge in unmittelbarer Umgebung eines Hohlraumes. Um eine Aussage über den Einfluss des Feuchtekriechens treffen und diesen Effekt bei der

Auswertung künftiger Messungen exkludieren zu können, wird zu Vergleichsmessungen der Konvergenzen in Strecken mit hoher Luftfeuchtigkeit (in der Nähe des einziehenden Wetterstroms) sowie in Strecken mit geringer Luftfeuchtigkeit (in der Nähe des ausziehenden Wetterstroms) empfohlen.

Betreffend der Auswertung der Messdaten aus dem Bohrspülwerk 13 ist auf die unzulängliche Dokumentation beim Einbau der Extensometer und Bohrlochspannungsdruckmesskissen (fehlende Einbau- und Bohrlochprotokolle) hinzuweisen, was die Messergebnisse mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, da z.B. die tatsächliche Orientierung der Druckkissen des Bohrlochgebers im Bohrloch unbekannt ist. Zusätzlich wurde die Auswertung durch das teilweise Fehlen von Nivellement-Daten erschwert. Die Funktionsweise eines Bohrlochdruckmessgebers war dem Personal aus der Markscheiderei durchweg unbekannt, was eine weitere Fehlerquelle bei der Auswertung der Messdaten darstellen kann.

Die in Bohrspülwerk 13 gewonnenen Messdaten wurden zwar ausgewertet und zum Teil für eine gebirgsmechanische Interpretation herangezogen, allerdings erfolgte die Betrachtung der einzelnen Extensometer und des Nivellements stets gesondert. Eine zusammenhängende Betrachtung von Extensometer-, Nivellement- und Gebirgsdruckmessungen im Hinblick auf den Abbaufortschritt hat nicht stattgefunden.

Für die Zukunft ist seitens des Salzbergwerkes Berchtesgaden eine zielorientierte und systematische Herangehensweise an die gebirgsmechanischen Messungen nötig. Auf Grund der relativ geringen Gebirgsbewegungen ist eine Ausdehnung der bislang 2-wöchigen Messintervalle auf 6-wöchige Messintervalle sinnvoll. Die Messergebnisse von Extensometern, Nivellements und Bohrlochgebern dürfen nicht mehr getrennt voneinander betrachtet werden, sondern müssen in Zusammenhang untereinander und mit dem Abbaufortschritt gestellt werden. Weiters ist eine systematische Vorgehensweise und ausführliche Dokumentation beim Einbau der neuen Messinstallationen erforderlich (Aufbewahrung von Bohrloch- und Einbauprotokolle, Abspeichern von Nivellement-Daten in einer dafür vorgefertigten Excel-Datei auf dem Server usw.).

Da im Laufe des Jahres 2019 die Bohrspülwerke 21 und 93 ebenfalls mit Extensometern zum Zwecke der Überwachung des Gebirgsverhaltens ausgestattet wurden und außerdem in den Bohrspülwerken 2 und 13 der Einbau zusätzlicher Extensometer erfolgt ist, wird die Instrumentierung weiterer Kavernen nicht empfohlen.

Da, wie die Messungen aus dem Bohrspülwerk 13 zeigen, die Ausweitung der Himmelsfläche keine negativen Auswirkungen auf die Kavernenstabilität hat und seit der Beginn der Versuche bzgl. der Kavernenerweiterung von  $3.500\text{m}^2$  auf  $4.200\text{m}^2$  im Jahr 2004 keine Stabilitätsprobleme im Grubengebäude (auch im Bereich der darüberliegenden Sohlen) aufgetreten sind, werden die für die Überwachung des Gebirgsverhaltens gegenwärtig vorhandenen Installationen als ausreichend erachtet.

Bei den Einbauten 2019 ist die Installation der Extensometer durch Bohrloch- und Einbauprotokolle ausreichend dokumentiert und dadurch eine Wiederholung der früheren Einbaufehler ausgeschlossen.

---

## 11 Literaturverzeichnis

---

- Ambatiello, P. (1982): Lagerstätten und alpiner Salzbergbau in Bayern, In: Geschichte des alpinen Salzwesens: Vorträge, gehalten anlässlich der Tagung des Geschichtsausschusses der Gesellschaft Deutscher Metallhütten- und Bergleute in Berchtesgaden, 16. bis 18. Oktober 1980, VWGÖ, Wien.
- Ambatiello, P. (1995): Die Solegewinnungstechnologie im Salzbergwerk Berchtesgaden. In: Salz Macht Geschichte. Aufsatzband zur Landesausstellung. Augsburg: Haus der Bayrischen Geschichte.
- Bartl, R. (2018): mündliche Kommunikation.
- Becker, F. (2013): Ein Vergleich geeigneter markscheiderischer Messverfahren zur Hohlraumvermessung im Lösungsbergbau am Beispiel der Südsalz GmbH, Salzbergwerk Berchtesgaden, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, Montanuniversität Leoben.
- Brady, B.H.G. und Brown, E.T. (2004): Rock Mechanics for Underground Mining, 3. Auflage, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/ Boston/ London.
- Eberth, S. (2007): Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge, Dissertation, Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften, Technische Universität Clausthal.
- Glötzl Baumesstechnik (2004): Kunststoffstangenextensometer Typ GKSE 12/ Typ GKSE 16; Produkt-Datenblatt ([www.gloetzl.at](http://www.gloetzl.at)).
- Glötzl Baumesstechnik (2002): Bohrlochgeber Typ BB; Produkt-Datenblatt ([www.gloetzl.at](http://www.gloetzl.at))
- Günther, R.M. (2009): Erweiterter Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz: Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens, Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- Hoek, E. und Brown, E.T. (1980): Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoscher, M. (1984): Entwicklung eines Abbaumodells für die Bohrlochsolegewinnung im alpinen Salzbergbau, Dissertation an der Montanuniversität Leoben.
- Hunsche, U. und Schulze, O. (1994): Das Kriechverhalten von Steinsalz. In: Kali und Steinsalz 11(1994) 8/9, S. 238 – 255.
- <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/extensometer/4481>.

IFG – Institut für Gebirgsmechanik (2003): Einaxiale Druckversuche und dreiaxiale Mehrstufenversuche an Steinsalzprüfkörpern aus Bohrkernen aus dem alpinen Haselgebirge des Salzwerkes Berchtesgaden. B IfG 32/2003.

Jeremic, M.L. (1994): Rock Mechanics in Salt Mining, Balkema, Rotterdam.

Kellerbauer, S. (1996): Geologie und Geomechanik der Salzlagerstätte Berchtesgaden, Dissertation an der TU München, Münchner Geologische Hefte Reihe B Heft 2.

Kellerbauer, S. (2018): Mündliche Kommunikation.

Kratzsch, H. (1997): Bergschadenkunde. 6. Auflage, Deutscher Markscheider-Verein, Bochum / Recklinghausen

Lux, K. H. (1984): Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

Lux, K.H. (2004): Begutachtung – Geotechnischer Sicherheitsnachweis/ Gebirgsmechanik, gutachterliche Stellungnahme (unveröffentlicht), Peine, Okt. 2004.

Müller und Hereth/ Ingenieurbüro für Tunnel- und Felsbau GmbH (2003): Salzbergwerk Berchtesgaden/ Geomechanische Modellrechnung für die Vergrößerung der Abbauhohlräume auf der 1. Tiefbausohle, Freilassing, Dezember 2003.

Pittino, G. (2002): Tragverhalten des Gesamtsystems "Alpines Salzgebirge - Grubengebäude - Laugungsrückstand", Dissertation, Institut für Geomechanik, Tunnelbau und Konstruktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben.

Schneider, H.J. (1981): Mineral deposits of the Alps and of the alpine epoch in Europe: proceedings of the IV. ISMIDA, Berchtesgaden, October 4 - 10, 1981.

Wagner, H. (2019): Mündliche Kommunikation

Wieczorek, K., Förster, B. und Rothfuchs, T. (2011): Entwicklung der Auflockerungszone um Endlagerhohlräume im Steinsalz und ihre Behandlung in Sicherheitsanalysen, In: Glückauf 147 (2011), Nr. 4/5, Seite 188-193.

---

## 12 Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Geologisches Profil der Salzlagerstätte Berchtesgaden (Kellerbauer, 1996) .....	4
Abbildung 2: Einfaches Schöpfwerk und Schöpfwerk mit Pütte (Ambatiello, 1995)	5
Abbildung 3: Ablasswerk (Ambatiello, 1995) .....	5
Abbildung 4: Sinkwerk im Unterwerksbau (Ambatiello, 1995) .....	6
Abbildung 5: Aufbau eines Bohrspülwerks (Ambatiello, 1995) .....	8
Abbildung 6: Bohrlochsondenverfahren (Hoscher, 1984) .....	9
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Ober- und Unterwassereinführung..	10
Abbildung 8: Berechnung des Ätzmaßverbrauchs (Hoscher, 1984) .....	11
Abbildung 9: Unregelmäßigkeiten in der Hohlraumgeometrie (Kellerbauer, 1996)	12
Abbildung 10: Bohrspülwerk 19 – geologischer Aufnahme der Himmelsfläche....	13
Abbildung 11: Übersichtsplan Salzbergwerk Berchtesgaden.....	18
Abbildung 12: Chroniken alter Sinkwerke im Archiv in Berchtesgaden .....	19
Abbildung 13: Auszug aus einer Sinkwerks-Chronik.....	20
Abbildung 14: Nachfall aus einer Zone aus Anhydrit und Sandstein im Sinkwerk LIX (Kellerbauer, 1996) .....	21
Abbildung 15: Verbruch im Prinz Adalbert Werk, welches zu nahe an das ausgelaugte Haselgebirge angenähert wurde (Kellerbauer, 1996) .....	22
Abbildung 16: Verbruch im Sinkwerk LXXI 1991 (Kellerbauer, 1996) .....	22
Abbildung 17: Durchbruch im Churfürst Clement Werk (Kellerbauer, 1996) .....	23
Abbildung 18: Historischer Plan des Senna I Werkes .....	24
Abbildung 19: Firstsetzung-Extensometerpunkte Senna I .....	25
Abbildung 20: Lage von Bohrspülwerk 13 und der umliegenden Werker.....	27
Abbildung 21: 3D-Modell von Bohrspülwerk 13 und der umliegenden Werker .	28
Abbildung 22: Anordnung von E1, E2, SMS1 und SMS2 (Plan von 2005) .....	30

Abbildung 23: Anordnung von E3 bis E8 (Plan von 2005) .....	31
Abbildung 24: Freigelegte Betonsäulen einer Spannungsmessstation und zweier Extensometer .....	31
Abbildung 25: Anordnung von SMS3 bis SMS5 (Plan von 2005).....	32
Abbildung 26: Anordnung von E11 bis E18 (Plan von 2013) .....	33
Abbildung 27: Anordnung von SMS11 und SMS12 (Plan von 2013) .....	33
Abbildung 28: Vertikale Hauptnormalspannungen $\sigma_{\text{ov}}$ als Funktion der Teufe (Hoek& Brown, 1980) .....	35
Abbildung 29: Verhältnis von $\sigma_{\text{h}}/ \sigma_{\text{v}}$ über die Teufe (Hoek& Brown, 1980) .....	36
Abbildung 30: Spannungsverteilung um einen kreisförmigen Hohlraum im hydrostatischen Spannungsfeld (Brady & Brown, 2004) .....	36
Abbildung 31: Berechnung der Spannungen am Hohlraumrand eines elliptischen Querschnitts (Brady & Brown, 2004) .....	38
Abbildung 32: Drei sich gegenseitig beeinflussende Hohlräume (Hoek& Brown, 1980) .....	39
Abbildung 33: Verhalten von Salzgestein bei einaxialem Druckversuch (Günther, 2009) .....	40
Abbildung 34: Die drei Phasen des Kriechens (Günther, 2009).....	41
Abbildung 35: Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf das Kriechverhalten (Hunsche & Schulze, 1994) .....	42
Abbildung 36: Einfluss des Manteldrucks auf das Kriechverhalten (Hunsche & Schulze, 1994) .....	43
Abbildung 37: Ermittelte Kriechraten von Langzeitdruckversuchen (Pittino, 2002) .....	44
Abbildung 38: Aufbau eines Bohrlochgebers mit 3 Zellen, je 45° zueinander verdreht .....	46
Abbildung 39: Spannungsmessung mittels Handmesspunkte (Glötzl).....	47
Abbildung 40: Orientierung der Druckkissen in Bezug auf die Hohlraumlängsachse.....	48

Abbildung 41:	Lage der Spannungsmess-Stationen .....	49
Abbildung 42:	Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 1 .....	51
Abbildung 43:	Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 2 .....	52
Abbildung 44:	Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 3 .....	53
Abbildung 45:	Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 4 .....	54
Abbildung 46:	Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 5 .....	54
Abbildung 47:	Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 11 .....	55
Abbildung 48:	Spannungsmessungen bei Spannungsmonitorstation 12 .....	56
Abbildung 49:	Dreifachextensometer (Fecker, 1997).....	58
Abbildung 50:	Aufbau des Kunststoffstangen-Extensometers (Glötzl, 2004) ....	59
Abbildung 51:	Durchführung der Messung am Extensometer (Glötzl, 2004) ....	60
Abbildung 52:	Messung am Extensometer-Kopf.....	60
Abbildung 53:	Bewegungen an der Sohle der Schachtricht (Punkte E1-E6).....	63
Abbildung 54:	Bewegungen an der Sohle der Schachtricht (Punkte E11-E16). 64	
Abbildung 55:	Bewegung der Nivellement-Punkte E1-E6 über die Zeit .....	65
Abbildung 56:	Bewegung der Nivellement-Punkte E11-E16 über die Zeit .....	66
Abbildung 57:	Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 13.09.2007 ....	68
Abbildung 58:	Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 11.12.2008 ....	69
Abbildung 59:	Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 17.12.2009 ....	71
Abbildung 60:	Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 21.03.2011 ....	72
Abbildung 61:	Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 28.01.2013 ....	73
Abbildung 62:	Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 16.12.2014 ....	75
Abbildung 63:	Absolute Bodenbewegungen im Hangenden am 18.12.2015 ....	76
Abbildung 64:	Absolute Bodenbewegungen am Punkt E11 .....	78
Abbildung 65:	Absolute Bodenbewegungen am Punkt E12 .....	79
Abbildung 66:	Absolute Bodenbewegungen am Punkt E13 .....	81

Abbildung 67:	Absolute Bodenbewegungen am Punkt E14 .....	82
Abbildung 68:	Absolute Bodenbewegungen am Punkt E15 .....	84
Abbildung 69:	Absolute Bodenbewegungen am Punkt E16 .....	85
Abbildung 70:	Extensometer-Messungen am Punkt 1 .....	88
Abbildung 71:	Extensometer-Messungen am Punkt 2 .....	90
Abbildung 72:	Spannungsmessungen bei SMS 1 .....	91
Abbildung 73:	Instrumentierung im Bohrspülwerk 2 (Plan von 1999).....	94
Abbildung 74:	Geplante Instrumentierung im Bohrspülwerk 13 .....	95
Abbildung 75:	Geplante Instrumentierung im Bohrspülwerk 21 .....	96
Abbildung 76:	Geplante Instrumentierung im Bohrspülwerk 93 .....	98
Abbildung 77:	Lage der instrumentierten Bohrspülwerker .....	99
Abbildung 78:	Lagerstätte wird im SE durch die wasserführenden Oberalmer Kalk abgeschnitten (Kellerbauer, 1996) .....	101
Abbildung 79:	Wasserries an der Tagesoberfläche des Untersbergs (Bartl, 2019) .....	101

---

## 13 Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Einbindetiefen und Einbauwinkel von E1, E2, SMS1 und SMS2 .....	29
Tabelle 2: Einbindetiefen und Einbauwinkel von E3-E8 .....	30
Tabelle 3: Einbindetiefen und Einbauwinkel von SMS3, 4 und 5 .....	32
Tabelle 4: Einbindetiefen und Einbauwinkel von E11-E18 sowie SMS1 und SMS2 .....	34
Tabelle 5: Spannungen in der Ulme und der Firste eines Hohlraums mit elliptischem Querschnitt in Abh. von $q$ (Brady und Brown, 2004).....	37
Tabelle 6: Nordorientierung der Druckkissen .....	48
Tabelle 7: Auswertung der Extensometerdaten aus dem Jahr 1997 (Extensometer 1).....	62
Tabelle 8: Nivellement-Punkte E1-E6 im Zeitraum von 2007 bis 2015.....	62
Tabelle 9: Nivellement-Punkte E11-E16 im Zeitraum von 2007 bis 2015.....	63
Tabelle 10: Bewegung der Nivellement-Punkte E1-E6 über die Zeit.....	65
Tabelle 11: Bewegung der Nivellement-Punkte E11-E16 über die Zeit.....	66
Tabelle 12: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 13.09.2007 .....	68
Tabelle 13: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 13.09.2007 .....	68
Tabelle 14: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 11.12.2008 .....	69
Tabelle 15: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 11.12.2008 .....	70
Tabelle 16: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 17.12.2009 .....	71
Tabelle 17: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 17.12.2009 .....	71

Tabelle 18: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 21.03.2011 .....	72
Tabelle 19: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 21.03.2011 .....	73
Tabelle 20: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 28.01.2013 .....	74
Tabelle 21: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 28.01.2013 .....	74
Tabelle 22: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 16.12.2014 .....	75
Tabelle 23: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 16.12.2014 .....	75
Tabelle 24: Extensometer- und Nivellement-Messwerte der Punkte E11 bis E16 am 18.12.2015 .....	77
Tabelle 25: Absolute Bodenbewegungen der Punkte E11 bis E16 am 18.12.2015 .....	77
Tabelle 26: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E11 .....	78
Tabelle 27: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E11 .....	79
Tabelle 28: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E12 .....	80
Tabelle 29: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E12 .....	80
Tabelle 30: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E13 .....	81
Tabelle 31: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E13 .....	81
Tabelle 32: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E14 .....	82
Tabelle 33: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E14 .....	83
Tabelle 34: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E15 .....	84
Tabelle 35: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E15 .....	84
Tabelle 36: Messwerte Extensometer und Nivellement am Punkt E16 .....	85
Tabelle 37: Absolute Bodenbewegungen am Punkt E16 .....	86

