

---

**Bericht Nr. 2720047.6**

---

**Schweizer Salinen AG**

**Generelles Überwachungs- und Nach-  
sorgekonzept für die Solfelder der  
Schweizer Salinen AG im Kanton Basel-  
Landschaft**

Münchenstein, 31.05. 2021

GEOTEST AG  
FREILAGER-PLATZ 3  
CH-4142 MÜNCHENSTEIN  
T + 41 (0)61 205 87 50  
F + 41 (0)61 205 87 51  
basel@geotest.ch  
www.geotest.ch

Autor(en)	Bearbeitete Themen / Fachbereiche
GEOTEST AG: Florentin Ladner	Gesamtbericht
DEEP.KBB GmbH: Dr. Dirk Zander-Schiebenhöfer Dr. Sven Wille	Verwahrung von Salzkavernen – Stand der Technik. Bericht vom 12.01.2021
Supervision	visierte Inhalte
GEOTEST AG: Felix Bussmann	Gesamtbericht
DEEP.KBB GmbH: Reinhard Steenken	Korreferat Verwahrung von Salzkavernen – Stand der Technik. Bericht vom 12.01.2021
Hinweise	
<p>DEEP.KBB GmbH lieferte eine Studie, in der das grundsätzliche Vorgehen zur Verwahrung von Salzkavernen (Stand der Technik) und die mögliche Anwendung des Vorgehens auf die Solegewinnungskavernen der Schweizer Salinen AG erläutert wurde. Die Inhalte dieser Studie wurden von der GEOTEST AG in das vorliegende Überwachungs- und Nachsorgekonzept integriert.</p>	

GEOTEST AG

Felix Bussmann

Florentin Ladner

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	5
1.1	Auftrag und Zielsetzung .....	5
1.2	Rechtliche Grundlagen .....	6
1.3	Verwendete Unterlagen .....	6
2.	Nachsorgekonzepte bei Deponien .....	8
3.	Nachsorgekonzepte zur Verwahrung von Salzkavernen .....	10
3.1	Ziele der Kavernenverwahrung .....	10
3.2	Wissenschaftlicher Stand der Forschung .....	10
3.2.1	Forschungsarbeiten durch das Solution Mining Research Institute (SMRI) .....	10
3.2.2	Weiterführende Forschungsarbeiten.....	13
3.3	Allgemeinverständnis der Prozesse in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne .....	14
3.4	Druckentwicklung in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne .....	19
4.	Technisches Konzept und Ablauf der Massnahmen (Generelles Verwahrungskonzept) .....	20
4.1	Planungs- und Erkundungsphase.....	20
4.1.1	Geologische Erkundung.....	20
4.1.1.1	Erkundungsmethoden .....	21
4.1.1.2	Grundwasserüberwachung .....	21
4.1.2	Massnahmen zur Verwahrung während der Planungsphase .....	21
4.2	Bauphase .....	22
4.2.1	Bohrplatz .....	22
4.2.2	Bohrung.....	22
4.2.2.1	Bohrlochabschluss (Bohrlochkopf und -schacht).....	25
4.2.3	Dokumentation und Messprogramme .....	25
4.2.4	Grundwasserüberwachung .....	26
4.2.5	Massnahmen zur Verwahrung während der Bauphase.....	26
4.3	Betriebsphase .....	27
4.3.1	Soletechnik.....	27
4.3.1.1	Soletechnik (bis ca. 1986).....	27
4.3.1.2	Solung nach heutigem Stand der Technik .....	28
4.3.2	Überwachung / Kontrolle.....	30
4.3.3	Grundwasserüberwachung .....	32
4.3.4	Massnahmen zur Verwahrung während der Betriebsphase .....	32

4.4	Nachsorgephase .....	33
4.4.1	Wartephase (Standby) .....	33
4.4.1.1	Vorbereitende Arbeiten .....	33
4.4.1.2	Vollständige Flutung der Kaverne .....	34
4.4.1.3	Messungen und In-situ-Tests .....	34
4.4.1.4	Druck- und Temperaturüberwachung .....	35
4.4.1.5	Grundwasserüberwachung .....	35
4.4.1.6	Geotechnischer Nachweis und Senkungsprognose .....	35
4.4.1.7	Wartezeit für den notwendigen Temperatenausgleich .....	36
4.4.1.8	Verschluss der Zugangsbohrung .....	36
4.4.2	Nachsorge (Überwachung bzw. Monitoring) .....	39
4.4.2.1	Grundwasserüberwachung .....	39
4.4.3	Berücksichtigung lokationsspezifischer Aspekte .....	39

## 1. Einleitung

### 1.1 Auftrag und Zielsetzung

Die GEOTEST AG wurde im Mai 2021 mit der Ausarbeitung eines generellen Überwachungs- und Nachsorgekonzeptes (UNK) für die Solfelder im Kanton Basel-Landschaft beauftragt. Als fachliche Unterstützung hat die GEOTEST die Firma DEPP.KBB GmbH mit Sitz in Bad Zwischenahn und Hannover (Deutschland) beigezogen. Die DEPP.KBB ist spezialisiert auf ingenieur- und geowissenschaftliche Dienstleistungen betreffend Beratung, Planung, Bau und Betrieb von untertägigen Energiespeichern sowie für die Sole- und Salzgewinnung.

Mit dem vorliegenden Überwachungs- und Nachsorgekonzept werden die generellen Konzepte und Massnahmen zur Verwahrung während eines Lebenszyklus einer Salzkaverne aufgezeigt. Das Dokument steht im Zusammenhang mit der Konzeptionsverlängerung im Kanton Basel-Landschaft und konkretisiert die im Konzeptionsvertrag erwähnten Überwachungs- und Nachsorgeverpflichtungen. Es zeigt den Stand der Technik für die Verwahrung von Salzkavernen auf und dient unter anderem als Grundlage für zukünftige Baubewilligungsverfahren.

Das vorliegende Überwachungs- und Nachsorgekonzept ist vorbehältlich der Zustimmung der zuständigen Behörden bindend für die Schweizer Salinen AG und den Kanton Basel-Landschaft und wird alle 5 Jahre überprüft und im Bedarfsfall nachgeführt. Zudem wird dem Kanton Basel-Landschaft jährlich über den Status der Solfelder Bericht erstattet und Zugang zu Fachliteratur und Expertisen gewährt, die Grundlage für das Konzept und dessen Überarbeitung bilden.

Das vorliegende generelle ÜNK ist folgendermassen aufgebaut:

- Die **Kapitel 1 bis 3** führen in die Thematik der Nachsorge ein. Dafür wird im Kapitel 2 das in der Schweiz bekannte und praktizierte Nachsorgekonzept für Deponien beschrieben, um daraus – soweit sinnvoll – Analogieschlüsse für das Nachsorgekonzept für Salzkavernen zu ziehen. In Kapitel 3 wird der Stand der wissenschaftlichen Forschung für die Verwahrung von Salzkavernen zusammengefasst.
- Im **Kapitel 4** werden die wissenschaftlichen Erkenntnisse in ein generelles Verwahrungskonzept überführt, das technische Konzepte und Massnahmen zur Verwahrung während eines Lebenszyklus einer Kaverne aufzeigt. Der Lebenszyklus einer Kaverne umfasst die (1) Erkundungs- und Planungsphase, (2) die Bauphase, (3) die Betriebsphase und (4) die Nachsorgephase.

## 1.2 Rechtliche Grundlagen

Als übergeordnete Gesetzesgrundlage kommen im vorliegenden Fall das Umweltschutzgesetz (USG) und das Gewässerschutzgesetz (GschG) zur Anwendung. In der Schweiz existieren keine spezifischen gesetzlichen Bestimmungen, Vorgaben, Richtlinien oder Empfehlungen, welche die Verwahrung von Salzkavernen regeln.

## 1.3 Verwendete Unterlagen

### Behördendokumente:

- [1] Konzept über die Deponienachsorge. Amt für Umweltschutz Kanton Luzern.
- [2] Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA vom 4. Dezember 2015 (Stand am 1. Januar 2019).

### Fachliteratur:

- [3] Verwahrung von Salzkavernen – Stand der Technik und mögliche Anwendung. Bericht der DEEP.KBB, 12.01.2021.
- [4] Bannach, A., Klafki, M. (2009). Strassfurt Shallow Cavern Abandonment Field Test, Solution Mining Research Report, RR209-01, 2009.
- [5] Brouard, B., Bérest, R., Rokahr, R., Staudtmeister, K., Zander-Schiebnerhöfer, D., Fourmaintraux, D., de Lageguerie, P., You, T. (2006) Salt Cavern Abandonment Field Test in Carresse, Solution Mining Research Report, RR2006-01, 2006.
- [6] Brückner, D., Lindert, A., Wiedemann, M. (2003) The Bernburg Test Cavern. A Model Study of Cavern Abandonment, Meeting Paper, SMRI, 2003.
- [7] Crotagino, F., Kepplinger, J., (2006) Cavern Well Abandonment Techniques Guidelines Manual. KBB Underground Technologies/SMRI, Hannover, 2006.
- [8] Duquesnoy, A. (2011) Synthesis of SMRI Sponsored Shallow Cavern Abandonment Tests, Research Report RR2011-02, SMRI, 2011.
- [9] Ratigan, J. L., (2003) The Solution Mining Research Institute - Cavern Sealing and Abandonment Program 1996 Through 2002. Houston TX, USA: Meeting Paper, SMRI, 2003.
- [10] Rokahr, R., Staudtmeister, K., Zander-Schiebnerhöfer, D. (2003) High Pressure Cavern Analysis. Solution Mining Research Institute, Spring 2003 Technical Meeting, Houston TX, USA: Meeting Paper, SMRI, 2003.

**Gutachten / Expertisen:**

- [11] Überwachungs- und Nachsorgekonzept für die Solfelder der Schweizer Salinen AG im Kanton Aargau (Konzessionsgebiet Bezirk Rheinfelden).  
Bericht der GEOTEST AG vom 16. April 2021.

**Weitere Dokumente:**

- [12] Konzessionsverlängerungen Kantone Aargau und Basel-Landschaft per 01.01.2026. Konzept zu den finanziellen Sicherheiten für den Kanton Basel-Landschaft. Version 1.0 vom 31. April 2021. Schweizer Salinen AG.

## 2. Nachsorgekonzepte bei Deponien

In der Schweiz fehlen Richtlinien für die Nachsorge von Salzkavernen. Die Frage nach der Nachsorge stellt sich allerdings für Deponien (Abbildung 1).



Abbildung 1: Phasen im Deponiebau [1].

Für Deponien gilt, dass sie nach Betriebsschluss weiter unterhalten werden. Dabei sind die vorgeschriebenen Anlagen und Installationen solange zu betreiben, respektive das Grundwasser, das Abwasser und die Deponiegase so lange zu kontrollieren, bis stabile Verhältnisse eintreten. Die zeitliche Dauer der Nachsorgephase ist dabei abhängig vom Deponietyp und des Gefahrenpotenzials ([1] & [2]):

- **Reaktordeponien (Typ E):**  
Aufgrund der eingelagerten Abfälle beinhalten die Reaktordeponien das grösste Gefährdungspotential. Die eingelagerten Abfälle benötigen eine sehr lange Zeit, bis sie Endlagerqualität erreicht haben. Aus praktikablen Gründen ist für Reaktordeponien eine erste Nachsorgephase von über 50 Jahren vorzusehen. Je nach eingelagertem Material kann sich allerdings die Nachsorgephase auf mindestens 15 Jahre verkürzen.
- **Reststoffdeponien (Typ C):**  
In Reststoffdeponien sind die eingelagerten Materialien grösstenteils inert und die Schadstoffe weitgehend immobil. Die Belastung der Abwässer ist hauptsächlich auf die verbliebenen Salzfrachten zurückzuführen. Die Nachsorgephase beträgt mindestens 15 Jahre.
- **Inertstoffdeponien (Typ B):**  
Das Schadstoffpotential der in Inertstoffdeponien eingelagerten Abfälle ist klein. Die Nachsorgephase nach Deponieabschluss beträgt mindestens 5 Jahre.

Generell gliedert sich die Nachsorgephase in die «ordentliche Nachsorge» und die gleichzeitig beginnende «Störfall-Nachsorge» (Abbildung 1).



Die ordentliche Nachsorge umfasst:

- Kontrolle, Betrieb, Unterhalt und Ersatz von baulichen Einrichtungen
- Behandlung von Deponie-Emissionen
- Monitoring
- Massnahmen zur Störfallvorsorge

Die Störfall-Nachsorge umfasst:

- Massnahmen zur Verhinderung von Störfällen
- Beseitigung der durch Störfälle hervorgerufenen Schäden
- Störfallbedingte Massnahmen
- Organisation und Überwachung der Störfallbehebung

In der Schweiz hat sich der Stand des Wissens bei der Nachsorge von Deponien über die Zeit erhöht. Entsprechend wurden auch die Nachsorgekonzepte weiterentwickelt. Für die Verwahrung von Salzkavernen ist von einer vergleichbaren Entwicklung auszugehen. Generell sind folgende Grundsätze auf Salzkavernen übertragbar:

- Die Nachsorgephase ist zeitlich beschränkt und dauert so lange, bis stabile Verhältnisse eintreten.
- Es ist zwischen einer ordentlichen Nachsorge und einer Störfall-Nachsorge zu unterscheiden.

### **3. Nachsorgekonzepte zur Verwahrung von Salzkavernen**

#### **3.1 Ziele der Kavernenverwahrung**

Die wichtigsten Ziele der Verwahrung von Salzkavernen sind:

- Die Gewährleistung der Langzeitstandsicherheit (Vermeidung der Entwicklung von Konturbrüchen, Tagbrüchen, Gebirgsschlägen usw.).
- Die Reduzierung der Konvergenz<sup>1</sup> und dadurch induzierter Oberflächen-senkungen, Begrenzung der Oberflächensenkungen auf marginale, bergschadenkundlich nicht relevante Werte auch unter Berücksichtigung grosser Zeiträume.
- Der Schutz des Grundwassers in Verbindung mit der Fragestellung, ob Sole aus der Salzformation austreten wird und – wenn ja – wo, wann, in welcher Menge und mit welcher Rate.
- Die Reduzierung von Nachsorgeaufwendungen.
- Und schlussendlich das Erreichen einer behördlichen Zustimmung, die Überwachung einstellen zu dürfen und als Betreiber aus der bergrechtlichen Verantwortung entlassen werden zu können.

Darüber hinaus müssen auch die technische Machbarkeit sowie die Wirtschaftlichkeit der Massnahmen gegeben sein.

Dabei ist grundsätzlich zu berücksichtigen bzw. zu klären, welcher Betrachtungszeitraum bei einer Bewertung von möglichen Folgeerscheinungen angemessen ist, da die Prozesse in einer verwahrten Kaverne über sehr lange Zeiträume (im Bereich von mehreren hundert bis mehreren tausend Jahren) ablaufen.

#### **3.2 Wissenschaftlicher Stand der Forschung**

##### **3.2.1 Forschungsarbeiten durch das Solution Mining Research Institute (SMRI)**

Der heutige Stand der Technik zur Verwahrung von Salzkavernen baut wesentlich auf Ergebnissen von Forschungsarbeiten aus den letzten 25 Jahren auf, die durch

---

<sup>1</sup> Als Folge der Hohlraumschaffung ändert sich der Gebirgsspannungszustand. Diese Zustandsänderung führt zum Kriechen des umgebenden Salzes, infolgedessen das Hohlraumvolumen der Kaverne allmählich abnimmt. Dieser Prozess wird als Konvergenz bezeichnet. Die Konvergenz induziert Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche.

das Solution Mining Research Institute (SMRI) im Rahmen seines „Cavern Sealing and Abandonment“-Programms durchgeführt wurden.

Das SMRI ist eine internationale Organisation zur Forschung und Entwicklung im Bereich des Lösungsbergbaus. Die Organisation wird von mehr als 150 Mitgliedern aus Industrie, Behörden und Forschungseinrichtungen aus der ganzen Welt unterstützt.

Im Rahmen des SMRI-Programms wurde eine Vielzahl von grundlegenden wissenschaftlichen Untersuchungen zur **Verwahrung von Kavernen mittels Soleverfüllung und Verschluss der Zugangsbohrung** durchgeführt. Zu diesen gehörten unter anderem

- Simulationen des langzeitigen Druckaufbaus in einer verschlossenen Kaverne und der damit verbundenen Prozesse.
- Laboruntersuchungen zum Infiltrationsprozess von Sole ins Salzgebirge unter verwahrungsrelevanten Spannungsbedingungen.
- Labortests zur Untersuchung der langzeitigen Dichtheit am Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour (LZRT).
- Die Erarbeitung technischer Konzepte zum Bohrlochverschluss.
- In-situ-Versuche zur Verifizierung zugrunde gelegter Annahmen, insbesondere zum Druckaufbau in einer verschlossenen Kaverne.

Um das Langzeitverhalten einer verschlossenen und solegefüllten Salzkaverne sowie des umgebenden Gebirgsraums prognostizieren zu können, müssen die folgenden Prozesse berücksichtigt werden, die in Kapitel 3.3 näher erläutert sind:

- Nachlösungs- bzw. Nachsoleffekte.
- Thermische Ausdehnung der Sole infolge Erwärmung (Wärmeübertragung).
- Kriechen des Salzgesteins (Konvergenz).
- Eindringen von Sole in das Salzgebirge (Infiltration).
- Mögliche Undichtigkeit entlang der Zugangsbohrung(en) zur Kaverne (Leckage).

Im Hinblick auf diese Prozesse lassen sich die wichtigsten Ergebnisse des SMRI-Untersuchungsprogramms in den folgenden Punkten zusammenfassen (Ratigan et al, 2003 [9]):

- Die Anwendbarkeit des Verwahrungskonzeptes ist für jede einzelne Lokation bzw. Kaverne zu prüfen (lokationsspezifisches Verwahrungskonzept).

- Vor dem Verschluss ist die Integrität der Bohrung durch einen geeigneten Dichtheitstest am Rohrschuh der Bohrung nachzuweisen.
- Die Sole in der Kaverne sollte zum Zeitpunkt des Verschlusses eine Temperatur aufweisen, die der ungestörten Gebirgstemperatur möglichst nahe ist (Begrenzung des Druckaufbaus infolge von Wärmeübertragung bzw. -ausdehnung).
- Ist kein bedeutsamer Einfluss durch eine Wärmeausdehnung der Sole mehr zu erwarten, können Salzkavernen verschlossen und langfristig verwahrt werden, ohne dass Risse im umgebenden Salzgestein auftreten, die zu möglichen Wegsamkeiten für einen signifikanten Austritt von Sole aus der Kaverne führen würden.
- Der Innendruck in einer verschlossenen, solegefüllten Kaverne wird sich dem Gebirgsdruck annähern. Ab einem gewissen Kaverneninnendruck ist mit einem Einsetzen einer langsamen Soleinfiltration in das Salzgebirge zu rechnen. Dieses Einsetzen der Soleinfiltration wurde in verschiedenen Labor- und In-situ-Versuchen beobachtet und wird darauf zurückgeführt, dass sich im ursprünglich impermeablen (undurchlässigen) Salz eine Sekundärpermeabilität (Mikrorisse durch druckgetriebene Perkolation) ausbildet.

Mit den verwahrungsbezogenen Forschungsarbeiten des SMRI wurde ein grundlegendes Konzept für die langzeitsichere Verwahrung solegefüllter Salzkavernen geschaffen, welches sowohl in der Kavernenindustrie als auch seitens z. B. der Bergbehörden in Deutschland akzeptiert ist.

Wesentliche Grundlage für die Modellszenarien, auf deren Basis das SMRI-Konzept entwickelt wurde, war eine zylindrische Referenzkaverne mit einer Höhe von 300 m und einer Kavernendachteufe bei 1.000 m (Ratigan, 2003 [9]; Rokahr et al., 2003 [10]).

Im Vergleich dazu weisen Salzkavernen mit geringerer Höhe sowie in geringerer Teufe in der Regel günstigere Bedingungen für die Verwahrung auf, da die oben genannten Prozesse Wärmeübertragung, Konvergenz und Infiltration geringer ausgeprägt sind. Ebenfalls begünstigend wirkt eine vorherige Nutzung ausschliesslich zur Solegewinnung.

Die grundsätzliche Eignung des SMRI-Konzeptes wurde inzwischen durch mehrere In-situ-Versuche aufgezeigt (z. B. Bannach et al., 2009 [4]; Brouard et al., 2006 [5]; Brückner et al., 2003 [6]).

Anhand der Forschungsergebnisse der Versuche zur Vorbereitung der Verwahrung von Salzkavernen in Teufen von 300 m - 965 m an drei verschiedenen Standorten liess sich bestätigen, dass das SMRI-Konzept eine solide Grundlage für die Entwicklung von lokationsspezifischen Verwahrungskonzepten darstellt, hier insbesondere auch für Salzkavernen in geringen Teufen (Duquesnoy, 2011 [8]).

### **3.2.2 Weiterführende Forschungsarbeiten**

Auf dem SMRI-Konzept aufbauende und teils dieses Konzept weiterentwickelnde Forschungsarbeiten sind im deutschsprachigen Raum schwerpunktmässig:

- am Institut für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig,
- am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC),
- in der Abteilung Unterirdisches Bauen des Instituts für Geotechnik (IGtH) der Leibniz Universität Hannover,
- sowie auch in Frankreich in der Abteilung für Mechanik der Polytechnischen Hochschule in Paris (Département de Mécanique, École Polytechnique) durchgeführt worden.

Ausgehend davon, dass Nachlösungs- bzw. Nachsoleffekte nur für eine kurze Zeit eine Rolle spielen und mögliche Undichtigkeiten an der Bohrung technisch behoben bzw. ausgeschlossen werden, bleiben folgende drei Prozesse als wesentlich zu berücksichtigen: Die Soleerwärmung, das Salzkriechen und das druckgetriebene Eindringen der Sole in das Salzgebirge (Infiltration) als Folge der beiden vorgenannten Prozesse.

Da die Mechanismen der Zunahme des Solevolumens durch die Erwärmung der Sole und der Kriechverformung von Salzgestein gut verstanden sind, wurden durch das IfG und die TUC verstärkt Forschungen zum Prozess des Eindringens von Sole in das Salzgebirge angestellt.

Das wesentliche, übergeordnete Ziel dieser weiterführenden Forschungen war und ist die Verbesserung der Zuverlässigkeit der Vorhersagen bezüglich des Verhaltens der Salzkaverne im Verwahrungszustand über ausreichend lange Zeiträume, die sowohl im Sinne verlässlicher Prognosen als auch hinsichtlich langzeitlicher Bewertungen akzeptabel sind. Zu diesem Zweck wurde die Weiterentwicklung thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Simulationsprogramme vorangetrieben, mit denen Prognosen und Bewertungen des Druckaufbaus in der verschlossenen Kaverne aber auch der daraus resultierenden räumlichen und zeitlichen Ausbreitung der Sole-Eindringfront (Infiltrationsfront) möglich sind.

### 3.3 Allgemeinverständnis der Prozesse in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne

Basierend auf den Forschungsarbeiten des SMRI und den weiterführenden Forschungsarbeiten herrscht das im Folgenden beschriebene Allgemeinverständnis der Prozesse in einer verschlossenen und solegefüllten Kaverne im Salzgestein vor: Nach dem Verschluss einer solegefüllten Salzkaverne laufen im Kavernenhohlraum und im umgebenden Gebirge unterschiedliche, zum Teil langfristige Prozesse ab. Neben der Kavernenform und dem Kavernenvolumen sind in ihrer langfristigen Entwicklung, Bedeutung und Wechselwirkung der Temperaturzustand in der Kaverne und im Gebirge, der Kaverneninnendruck, der Spannungszustand im Gebirge und die Dichtheit des Gebirges bzw. das Eindringverhalten von Sole ins Salzgebirge (Infiltration) vorrangig zu berücksichtigen.

Tabelle 1 enthält eine Kurzübersicht über die angesprochenen Prozesse und ihre Auswirkungen auf den Innendruck in einer verschlossenen und mit Sole gefüllten Kaverne im Salzgestein. Anschliessend werden diese Prozesse näher beschrieben und die damit verbundene Druckentwicklung in einer Salzkaverne erläutert.

Tabelle 1: Prozesse in einer verschlossenen solegefüllten Salzkaverne und deren Einfluss auf die Entwicklung des Kaverneninnendrucks

Prozess	Einfluss auf den Fluiddruck	Zeitskala
<b>Nachlösung bzw. Nachsolung</b> von Salz infolge anfänglicher nicht vollständiger Sättigung der Flüssigkeit in der Kaverne	Erhöht das Kavernenvolumen und reduziert die Flüssigkeitstemperatur, wodurch eine <b>Abnahme</b> des Fluiddrucks in der Kaverne bewirkt wird.	Der Grossteil des Druckabfalls tritt innerhalb von wenigen Wochen oder Monaten nach dem Kavernenverschluss auf.

Prozess	Einfluss auf den Fluiddruck	Zeitskala
<p><b>Wärmeübertragung</b>            zwischen Flüssigkeit in der Kaverne und dem umliegenden Salzgestein</p>	<p>Die Erwärmung der Flüssigkeit in der Kaverne bewirkt die Ausdehnung der Flüssigkeit und <b>erhöht</b> den Fluiddruck in der Kaverne bei zeitlich abnehmender Rate.</p>	<p>Der Druckanstieg hängt wesentlich von den anfänglichen In-situ-Temperaturen ab. Signifikante Druckänderungen erfolgen je nach In-situ-Temperaturen in den ersten Wochen oder Monaten bis Jahren nach Betriebsende. Der vollständige Temperatúrausgleich kann sich jedoch über mehrere Jahrzehnte hinziehen.</p>
<p><b>Konvergenz</b>            Verringerung des Hohlraumvolumens infolge des Kriechens des Salzgesteins</p>	<p><b>Ansteigender</b> Fluiddruck in der Kaverne bei zeitlich abnehmender Rate.</p>	<p>Der wesentliche Teil des Druckanstiegs tritt in den ersten Jahren nach dem Kavernenverschluss auf.</p>
<p><b>Infiltration</b>            Eindringen von Flüssigkeit aus der Kaverne in die Formation</p>	<p>Führt zur <b>Abnahme</b> des Fluiddrucks in der Kaverne.</p>	<p>Die Infiltration setzt bei Überschreiten eines Schwellenwertes des Fluiddruckes ein, der in Beziehung zum Gebirgsdruck steht; sie kann sich über unbestimmte Zeit fortsetzen.</p>
<p><b>Leckage</b>            Transport von Flüssigkeit aus der Kaverne entlang der Bohrung bei mangelhafter Zementation</p> <p><i>Die Verwahrung setzt voraus, dass eine Leckage durch technische Massnahmen verhindert wird.</i></p>	<p>Würde zur <b>Abnahme</b> des Fluiddrucks in der Kaverne führen.</p>	<p>Die Leckage könnte sich über unbestimmte Zeit fortsetzen.</p>

### **Nachlösung bzw. Nachsolung – Aufsättigung der Sole**

Das Fluten von Salzkavernen mit Wasser führt zu Lösungsvorgängen an der Kavernenwand und bewirkt eine Volumenvergrößerung des Hohlraums um ca. 10-15 %, die in einer verschlossenen Kaverne wiederum mit einer Druckminderung einhergeht. Dieser Prozess endet aber nach einer verhältnismässig kurzen Zeit (im Bereich mehrerer Wochen bis Monate) mit dem Erreichen der Sättigungskonzentration. Bei Solegewinnungskavernen ist dieser Effekt vergleichsweise gering, weil sich zum Betriebsende bereits weitestgehend gesättigte Sole in der Kaverne befindet.

### **Wärmeübertragung – Erwärmung der eingeschlossenen Sole**

Infolge der normalerweise über mehrere Jahre aktiven soltechnischen Gewinnung von Salz kommt es zu einer Absenkung der Temperatur im umgebenden Salzgestein durch die Wärmeabführung über die produzierte Sole. Ein möglicher anschliessender Betrieb als Speicherkaverne wirkt sich weiter temperaturabsenkend aus. Sobald die Kaverne nicht mehr betrieben wird, wird sich in der umgebenden Formation allmählich wieder die primäre (natürliche, ungestörte) Gebirgstemperatur einstellen und die Sole in der Kaverne wird mit der Zeit die Gebirgstemperatur annehmen. Mit dieser Erwärmung ist eine Ausdehnung der Sole verbunden, die in einer verschlossenen Kaverne einen Druckaufbau verursacht. Der Erwärmungsprozess der Sole verläuft insgesamt vergleichsweise langsam, insbesondere da mit zunehmender Annäherung der Soletemperatur an die primäre Gebirgstemperatur die Geschwindigkeit abnimmt, mit der sich die Temperatur der Sole weiter erhöht. Zu Beginn dieses Prozesses bei noch grossen Temperaturunterschieden ist die Änderungsgeschwindigkeit und der damit verbundene Druckaufbau aber möglicherweise so hoch, dass Risse im umgebenden Salzgestein auftreten können. Mit zunehmender Temperaturangleichung und Verringerung der Änderungsgeschwindigkeit ist dies nicht mehr zu erwarten.

Um Rissbildung auszuschliessen, ist daher ein ausreichender Zeitraum zur Temperaturannäherung zu berücksichtigen, bis eine Kaverne verschlossen werden kann. Abhängig von der Grösse des Hohlraumes, der primären Gebirgstemperatur des umgebenden Gesteins sowie den vorherigen Betriebsbedingungen und den daraus resultierenden tatsächlichen Temperaturen (In-situ Temperaturen), ist von einer ausreichenden Annäherung an das Temperaturgleichgewicht zwischen Gebirge und Sole erst nach längerer Zeit (im Bereich von mehreren Monaten bis mehreren Jahren, gegebenenfalls sogar Jahrzehnten) auszugehen.



Bei Solegewinnungskavernen in geringer Teufe ist die erforderliche Wartezeit vor dem Verschluss kleiner (im Bereich mehrerer Wochen bis Monate) oder es ist gegebenenfalls sogar keine Wartezeit erforderlich, weil bereits direkt bei Betriebsende so geringe Temperaturunterschiede vorliegen, dass Risse im umgebenden Salzgestein nicht auftreten können.

### **Konvergenz – Kriechen des umgebenden Salzgebirges**

Im Vergleich zu anderen Gesteinen weist Steinsalz die Besonderheit auf, dass es auf mechanische Beanspruchung mit Kriechverformung («visko-elasto-plastische Materialeigenschaften») reagiert. Solange der Kaverneninnendruck nach dem Verschluss der Kaverne unterhalb des umgebenden Gebirgsdrucks liegt, verringert sich das Kavernenvolumen infolge von Kriechverformungen im Salzgebirge. Diese Konvergenz genannte Verkleinerung von Hohlräumen im Salzgebirge führt in einer verschlossenen Kaverne zum Ansteigen des Innendrucks. Mit steigendem Innendruck der Kaverne reduziert sich die Rate der Kriechverformung (Konvergenzrate).

Da Sole eine deutlich geringere Dichte als das umgebende Salzgestein aufweist, tritt nach entsprechender Zeit ein Zustand ein, bei dem im Kavernendach der Soledruck den Gebirgsdruck erreicht, während er im unteren Abschnitt der Kaverne immer noch unterhalb des Gebirgsdruckes liegt. Während die Konvergenz im Bereich des Kavernendaches damit quasi zum Erliegen kommt, schreitet diese im unteren Teil, wenn auch sehr langsam, fort. Damit einher geht auch ein sich fortsetzender Druckaufbau in der ganzen Kaverne.

Diese sich fortsetzende Druckerhöhung infolge Konvergenz ist umso grösser, je höher die Kaverne ist. Dies liegt darin begründet, dass die Druckdifferenz zwischen Soledruck und Gebirgsdruck infolge des Dichteunterschiedes mit zunehmender Teufe zunimmt (siehe auch Kapitel 3.4, Abbildung 2).

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Konvergenz und die daraus folgende Druckerhöhung bei Kavernen mit geringer Höhe vergleichsweise gering ausfallen.

### **Infiltration – Eindringen von Sole in das Salzgebirge**

Baut sich in der verschlossenen Kaverne der Innendruck allmählich so weit auf, dass er lokal die minimale Hauptspannung im umgebenden Salzgestein überschreitet, wird im Gestein eine sekundär induzierte Permeabilität über eine Vernetzung von Korngrenzen im Gesteinsgefüge («druckgetriebene Perkolation») hervorgerufen. Beginnend an der Kavernenkontur im Dachbereich, kommt es

daher zu einem Eindringen von Sole in das Salzgestein, der sogenannten Infiltration (siehe auch Kapitel 3.4, Abbildung 2).

Die damit verbundene Verringerung an Solevolumen in der Kaverne bewirkt ein Druckabnahme. Entsprechend wirkt dieser Prozess dem Druckaufbau infolge von Konvergenz und infolge der Soleerwärmung entgegen. Erreicht die Eindringfront der Sole die Grenzen des Salzlagers, kann Sole in die angrenzenden Formationen (Deck- oder Nebengebirge) übertreten, sofern diese eine hydraulische Durchlässigkeit für Sole aufweisen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen und Berechnungen zur Soleinfiltration haben gezeigt, dass mit wenigen Kubikmetern pro Jahr relativ geringe Solevolumina zu erwarten sind, die aus der Kaverne in das umgebende Salzgestein eindringen können. Sobald die Eindringfront der Sole die Grenze der Salzlagstätte erreicht, können daher auch nur diese Volumina mit diesen Raten austreten. Ob und – wenn ja – in welchem Zeitraum, die infiltrierte Sole die Salzformation verlassen kann, hängt von den lokationsspezifischen Bedingungen ab, die wesentlich beeinflusst werden durch die Mächtigkeit der Salzscheiben, die Teufenlage der Kaverne und ihre Höhe.

Bei Salzkavernen mit geringer Höhe und in geringer Teufe ist aber grundsätzlich von vergleichsweise kleinen Raten auszugehen.

Ob möglicherweise aus der Salzformation austretende Sole mit den darüber liegenden Grundwasserleitern in Kontakt kommen kann, ist dann im Einzelfall durch hydrogeologische Untersuchungen zu prüfen.

### **Leckage – Undichtigkeit entlang der Bohrung**

Undichtigkeiten entlang verschlossener Zugangsbohrungen stellen mögliche Wegsamkeiten für einen Aufstieg der Sole aus der Kaverne in höher gelegene Formationen dar. Im Zuge der Planung und der technischen Durchführung des Verschlusses der Bohrung sind mögliche Leckagen daher zu beseitigen bzw. auszuschliessen.

### 3.4 Druckentwicklung in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne

Die Druckentwicklung in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne infolge der in Kapitel 3.3 erläuterten Prozesse ist in Abbildung 2 schematisch illustriert. Die schwarze Linie stellt den Druckverlauf im umgebenden Gestein dar, die blaue Linie den Kaverneninnendruck bzw. Soledruck.

In der zunächst unverschlossenen solegefüllten Kaverne liegt der Kaverneninnendruck deutlich unter dem Gebirgsdruck (Zustand 1 in Abbildung 2).

Nach dem Verschluss führen die Erwärmung der Sole und die Konvergenz der Kaverne zu einem Anstieg des Kaverneninnendrucks, bis schliesslich am Kavernendach nahezu ein Druckgleichgewicht erreicht wird, während im unteren Teil der Kaverne weiterhin eine Druckdifferenz besteht, die dort die Konvergenz lokal begrenzt fortschreiten lässt (Zustand 2 in Abbildung 2).

Letzteres führt zu einem anhaltenden Anstieg des Kaverneninnendrucks bis zum Erreichen oder Überschreiten des Gebirgsdrucks am Kavernendach, wodurch dort die Sole in das umgebende Salzgestein eindringen kann. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein (Zustand 3 in Abbildung 2), bei dem sich die Druckeffekte der Konvergenz und der Soleinfiltration ausgleichen.

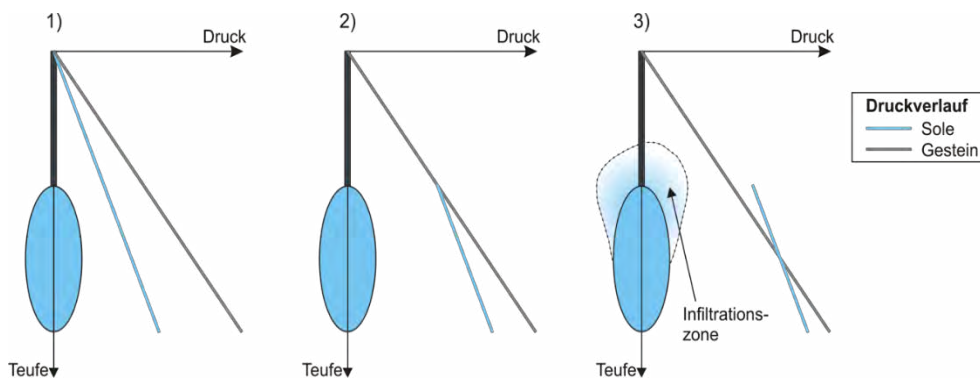


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Druckentwicklung in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne.

#### **4. Technisches Konzept und Ablauf der Massnahmen (Generelles Verwahrungskonzept)**

Ausgehend von den Ergebnissen der im Kapitel 3.2 dargestellten Forschungsarbeiten und dem sich daraus ergebenden Allgemeinverständnis der Prozesse in einer verschlossenen solegefüllten Kavernen, ist ein technisches Konzept abgeleitet worden, das Massnahmen zur Verwahrung in der (1) Planungs- und Erkundungsphase, in der (2) Bauphase, in der (3) Betriebsphase und in der (4) Nachsorgephase umfasst.

Das technische Konzept zur Durchführung der Verwahrung hat zu beachten, dass die Druckentwicklung infolge der oben beschriebenen Prozesse im Gleichgewicht verbleibt, ohne dass sicherheitsrelevante Ereignisse auftreten.

##### **4.1 Planungs- und Erkundungsphase**

###### **4.1.1 Geologische Erkundung**

Im Rahmen der geologischen Erkundung werden im Wesentlichen die Geometrie der am Standort vertretenen Schichtabfolgen, ihre Teufenlage und Mächtigkeit, ihre unterschiedlichen lithologischen und geochemischen Ausprägungen, sowie ihre petrophysikalischen und geomechanischen Eigenschaften ermittelt. Im Falle des Salzlösungsbergbaus stehen besonders Aspekte im Fokus:

- Struktureller und stofflicher Aufbau des Deckgebirges, einschliesslich der gebirgsmechanisch wirksamen Tragelemente und der integritätsrelevanten Horizonte (potenziell permeable Schichten).
- Struktureller und stofflicher Aufbau des Salzkörpers (einschliesslich der nicht- und leichtlöslichen Zwischenschichten, die nicht aus (Stein-)Salz bestehen) und der integritätsrelevanter Horizonte (potenziell permeable Schichten).
- Geometrie des Salzkörpers, seiner Top- und Basisfläche sowie seiner Begrenzung zu den Seiten (Strukturrand, begrenzende Störungen, Auskeilen des Salzlagers).
- Daten / Informationen zu den in Nutzung stehenden und/oder potenziell nutzbaren Grundwasserleitern.

#### **4.1.1.1 Erkundungsmethoden**

Zuerst werden die verfügbare Literatur, die öffentlich zugänglichen Daten, sowie die Primärdaten aus vorangegangenen Erkundungskampagnen ausgewertet, um daraus eine Modellvorstellung inklusive lokalspezifischer Prognoseprofile zu erstellen. Auf Basis dieser Modellvorstellung werden Wissenslücken identifiziert und ergänzende Erkundungsmethoden evaluiert. Als Erkundungsmethoden in Frage kommen in erster Linie:

- Sondierbohrungen.
- Geophysikalische Messungen (z. B. Bohrlochgeophysik und Seismik).

#### **4.1.1.2 Grundwasserüberwachung**

Im Rahmen der Planungs- und Erkundungsphase wird ein Grundwasserüberwachungskonzept bestehend aus Messstellen im Zu- und Abstrombereich je Solfeld erstellt und dem Kanton zur Prüfung vorgelegt. Dieses Konzept dient der Unterscheidung von natürlichen Prozessen der Salzlösung von Auswirkungen des Lösungsbergbaus und umfasst Massnahmen zur Eindämmung allfälliger Auswirkungen.

#### **4.1.2 Massnahmen zur Verwahrung während der Planungsphase**

Bereits bei der Planung und Auslegung von Kavernen ist ihre spätere Verwahrung zu berücksichtigen. Eine Voraussetzung dafür ist eine geologische Erkundung und die Entwicklung einer Modellvorstellung des Untergrundes (geologisches Modell in 3D). Basierend auf dem geologischen Modell ist in den gebirgsmechanischen Auslegungen der einzelnen Kavernen bereits frühzeitig Vorsorge zu treffen, dass beispielsweise ausreichend dimensionierte Salzfesten (Pfeiler und Schweben) vorgesehen werden, welche eine Umsetzung des geplanten Verwahrungskonzeptes ermöglichen. Im Zuge der Planungen ist zudem mindestens ein generisches Solkonzept zu erstellen, aus dem hervorgeht, wie sich die Kavernen innerhalb des gebirgsmechanischen Rahmens voraussichtlich entwickeln werden. Ferner sind erste analytische Berechnungen und Prognosen zum Temperaturverlauf und Druckaufbau in der verschlossenen Kaverne anzustellen, welche nach Möglichkeit eine Abschätzung der Soleinfiltration bzw. -ausbreitung zulassen. Eine solche Abschätzung kann bereits grobe Anhaltspunkte dazu liefern, ob die Sole binnen eines bestimmten Zeitraumes in der Salzlagerstätte verbleibt bzw. ab welchem Zeitpunkt mit einem Übertritt der Sole aus dem Salzgestein in angrenzende Formationen (Deck- oder Nebengebirge) zu rechnen ist.

## 4.2 Bauphase

### 4.2.1 Bohrplatz

Beim Bohrplatz handelt es sich um eine ebene, befestigte Fläche, auf der während der Bauphase die eigentliche Zugangsbohrung mittels Bohrgerät erstellt wird. Während der Betriebsphase wird der Bohrplatz ca. zwei Mal pro Jahr für Service- und Unterhaltsarbeiten während ca. einer Woche benötigt. Der Platzbedarf eines Bohrplatzes unterscheidet sich während der Bauphase (ca. 1 Jahr) und der Betriebsphase (ca. 15 Jahre).

### 4.2.2 Bohrung

Eine Bohrung wird aufgrund der geologischen Verhältnisse sowie zur Vermeidung von Umweltrisiken in verschiedenen Etappen abgeteuft. Ein Enddurchmesser von 9 5/8" (Verrohrung LZRT) muss für den weiteren Ausbau (Produktionsstränge) erreicht werden (Abbildung 3).

- (1) **Sektion Standrohr im Bereich der quartären Lockergesteine:** Vorbohrung trocken mittels Greifbohrgerät

Die Lockersedimente des Quartärs (Löss: Silt; Terrassenschotter: Kies, Sand) sind nicht standfest. Aus diesem Grund wird dort eine Vorbohrung mit einem Greifbohrgerät durchgeführt und mit Stahl-Standrohren ausgebaut. Eine Fusszementation dient als Abdichtung zum liegenden Gipskeuper und Muschelkalkaquifer.

- (2) **Sektion im Bereich Gipskeuper:** Meisselbohrung nach dem Lufthebeverfahren mit Wasserspülung

Die Tonminerale und der Anhydrit des Gipskeupers sind potenziell quellfähig. Obschon aufgrund der oberflächennahen Lage bereits eine Hydratisierung stattgefunden hat, wird aus Sicherheitsgründen nach dem Durchteufen des Gipskeupers (Erreichen des Asp-Members / Lettenkohle) das Bohrloch verrohrt und zementiert.

- (3) **Sektion bis zur Oberen Sulfatzone inkl. Muschelkalk-Aquifer:** Meisselbohrung mit Wasserspülung

Die Schinznach-Fm. (Trigonodusdolomit, Hauptmuschelkalk) und die Zeglingen-Fm. (Dolomitzone) sind teilweise stark verkarstet und grundwasserführend. Das Bohrloch wird deshalb nach dem Erreichen der Sulfate der Oberen Sulfatzone verrohrt und zementiert (möglichst bis zu Tage). So wird eine Verbindung von Salzlager und Aquifer vermieden.

- (4) **Sektion Salzlager bis Bohrende:** Kernbohrung mit Solespülung (gesättigt)

Gemäss heutiger Planung wird lediglich das untere Salzlager abgebaut. Infolgedessen wird die letzte zementierte Rohrtour mit dem Erreichen des unteren Salzlagers gesetzt.

- (5) **Sektion Salzlager bis Bohrende:** Aufbohren als Meisselbohrung nach dem Lufthebeverfahren mit Solespülung (gesättigt).

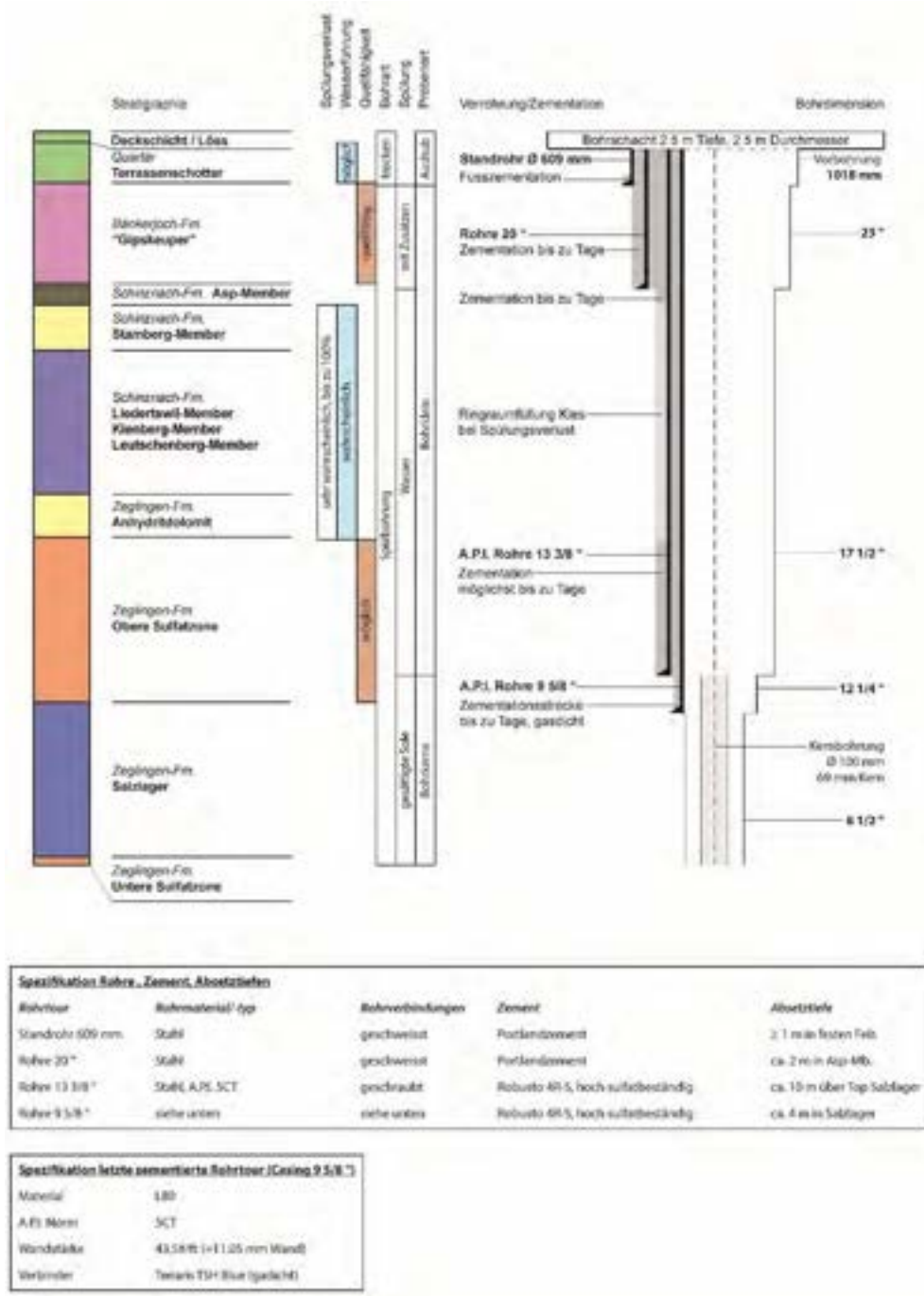


Abbildung 3: Geplante Bohretappen und Bohrschema.

Die eingesetzten Rohre der 13 3/8" und der 9 5/8" Verrohrungen entsprechen der A.P.I. Norm. Für die letzte zementierte Rohrtour werden gasdichte Rohr-Verbinder eingesetzt.



**4.2.2.1 Bohrlochabschluss (Bohrlochkopf und -schacht)**

Sämtliche Anschlüsse (Sole, Wasser und Stickstoff) am Bohrlochkopf werden unterirdisch im Bohrschacht installiert (Abbildung 4). Oberflächlich sind auf dem Bohrplatz zwei Schachtdeckel sowie ein Elektrokasten (Frischluftzufuhr, Stickstoffsteuerung, Probenahme Sole) vorhanden.

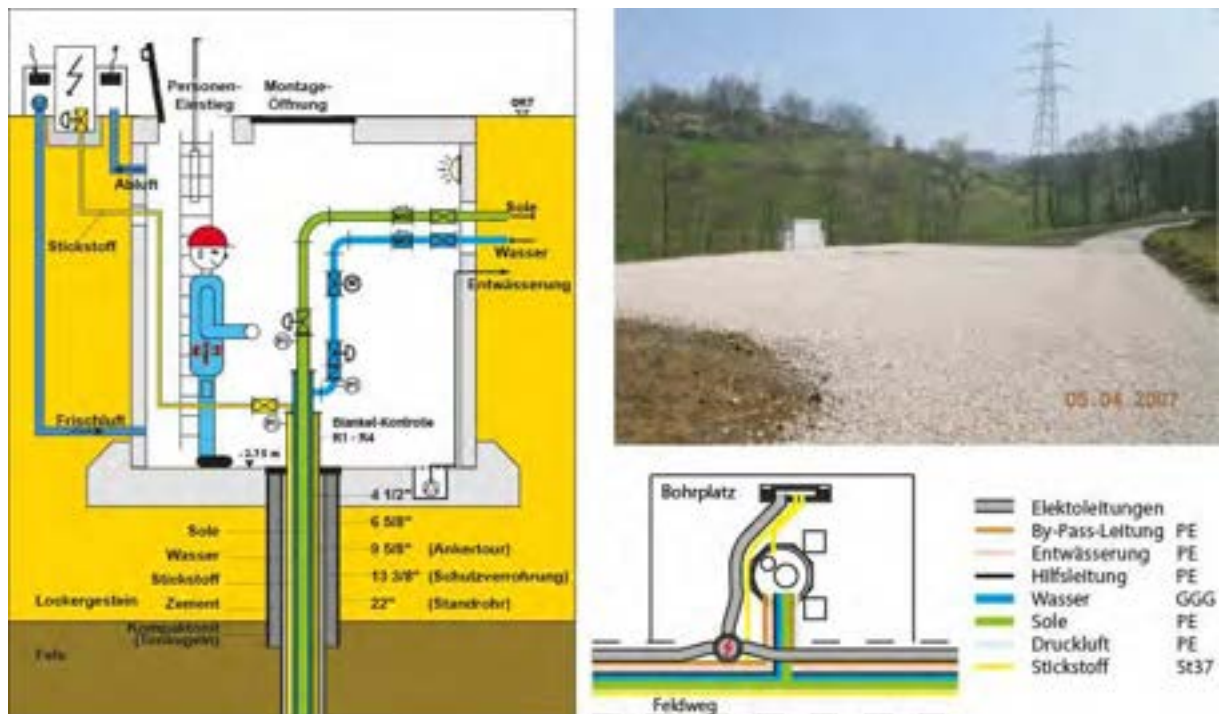


Abbildung 4: Bohrplatz und Bohrschacht mit Bohrlochkopf und Anschlüssen.

**4.2.3 Dokumentation und Messprogramme**

Zu jeder Produktionsbohrung wird eine Dokumentation mit folgendem Inhalt erstellt:

- Geologischer Bericht mit Profilen und Isoliniendarstellungen.
- Bestimmung der Salzreinheiten.
- Bohrjournal / Tagesbericht.
- Bohrlochvermessung (Verlauf / Neigung).

- Bohrlochgeophysikalische Messungen im offenen Bohrloch zwecks Charakterisierung des geologischen Untergrundes und der Bohrlochgeometrie:
  - Gamma-Log.
  - Optischer und akustischer Televiwer.
  - Kaliber-Log.
  - Full Waveform Sonic-Log (FWS).
- Bohrlochgeophysikalische Messungen im verrohrten Bohrloch zwecks Überprüfung der Zementanbindung:
  - CBL (Cement Bond Log) oder Ultrasonic Radial Imaging.
- Punktuelle Gebirgsspannungsmessungen für die Erfassung des primären Gebirgszustandes.
- Dichtheitstest der zementierten Bohrung:
  - Nach dem Abteufen der Bohrung (Produktionsbohrung) und vor dem Beginn der Solung ist die Gas-Dichtheit der letzten zementierten Rohrtour einschliesslich des Rohrschuhs, d.h. des Übergangs Rohrtour-Zementation-Salz, mit einem Test nachzuweisen, um sicherzustellen, dass die in der Bohrung zirkulierenden Medien (Frischwasser, Sole und das Blanketmedium) nicht in das Gebirge entweichen können.

#### **4.2.4 Grundwasserüberwachung**

Das im Rahmen der Planungs- und Erkundungsphase erstellte und vom Kanton bewilligte Grundwasserüberwachungskonzept ist umzusetzen und vor Beginn der Solung in Betrieb zu nehmen. Damit wird sichergestellt, dass der Referenzzustand erfasst wird.

#### **4.2.5 Massnahmen zur Verwahrung während der Bauphase**

Die nachfolgenden Massnahmen während der Bauphase (Produktionsbohrung und Solkompletterung), mit denen eine planungs- und anforderungsgemässe Entwicklung der Bohrungen und Kavernen sichergestellt werden, sind:

- Anwendung und Einhaltung von Prozeduren nach dem Stand der Technik während der Bau- bzw. Bohrphase (Bohr- und Spülungsprogramm, Verrohrungsschema, Zementationsprogramm, Test- und Logging-Prozeduren. → siehe vorangegangenes Kapitel 4.2.2.)
- Fortlaufende Ergänzung und Aktualisierung des geologischen Modells, gestützt auf Daten weiterer Bohrungen im Zuge der Feldentwicklung.

### 4.3 Betriebsphase

#### 4.3.1 Soletechnik

Der Salzabbau erfolgt durch Solung/Laugung. Dabei wird mittels Bohrung ein Zugang zum Salzlager geschaffen und durch Beigabe von Frischwasser das Salz aufgelöst. Diese Methode wird seit bald 180 Jahren in der Schweiz angewendet und hat über diesen Zeitraum eine stetige Weiterentwicklung und Verfeinerung erfahren.

##### 4.3.1.1 Soletechnik (bis ca. 1986)

Früher kamen zur Solegewinnung die **Saugende Laugung** resp. die **Drucklaugung ohne Blanket** zur Anwendung (Abbildung 5).

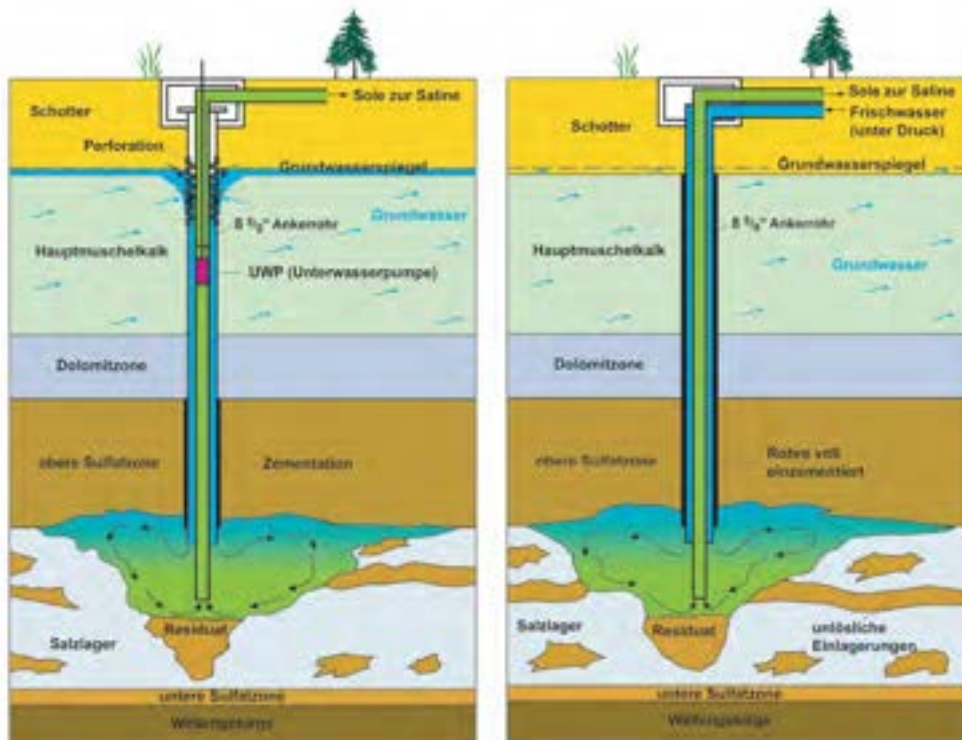


Abbildung 5: Herkömmliche, heute nicht mehr zur Anwendung kommende, Laugungsarten: Saugende Laugung (links) und Drucklaugung ohne Blanket (rechts).

Generell wurden dabei in einer Salzbohrung zwei Rohre (äusseres und inneres Rohr) verwendet. Bei der Saugenden Laugung wurde das äussere Rohr im Bereich von grundwasserführenden Gesteinsschichten perforiert, um Zugang zu Frischwasser zu erhalten. Bei der Drucklaugung ohne Blanket wurde die Frischwasserzufuhr

über Wasserleitungen hergestellt (ohne Perforation). Das innere Rohr, das tiefer reichend installiert wurde, diente bei beiden Laugungsarten zur Förderung der gesättigten Sole. Diese beiden Verfahren weisen aus heutiger Sicht grosse Nachteile auf:

- Bei der Saugenden Laugung muss über dem Salzlager ein natürlicher Grundwasserträger vorhanden sein.
- Bei der Saugenden Laugung wird der Grundwasserträger im Hangenden mit dem Salzlager hydraulisch kurzgeschlossen.
- Bei beiden Laugungsart kann die Solung (Kavernengeometrie) nur ungenügend kontrolliert werden. Der Hohlraum entwickelt sich anfänglich praktisch nur in vertikaler Richtung entlang der Bohrung. Folglich resultiert eine vergleichsweise grossflächige Auslaugung im Bereich des Salzdaches, welche neben der Gefahr von Einstürzen auch eine äusserst schlechte Ausnutzung der Ressourcen mit sich bringt.

#### **4.3.1.2 Solung nach heutigem Stand der Technik**

Im heutigen Verfahren wird eine **Drucklaugung mit Stickstoff-Blanket (Sperrmedium)** angewendet (Abbildung 6). Dabei wird Frischwasser mit Druck ins Bohrloch gepresst. Der angewendete Druck ist hoch genug, um in einer inneren, tieferen Rohrtour die gesättigte Sole wieder an die Oberfläche zu bringen. Zusätzlich wird über die letzte zementierte Rohrtour eine dünne Schicht gasförmigen Stickstoffs eingebracht. Dieses sogenannte Blanket befindet sich am Kavernendach und trennt das Frischwasser vom Salz wodurch eine Laugung nach oben verhindert wird. Demzufolge wird zur Seite gelaugt. Nach dem Erreichen einer bestimmten Menge und dem damit verbundenen Kavernen-Volumen wird das Blanket nach oben verschoben, womit zuerst nach oben bis zum Blanket und dann erneut in die Breite gelaugt wird. Dieses Verfahren ermöglicht eine kontrollierte Hohlraumbildung und erlaubt mit verschiedenen Laugungsschritten eine bestmögliche Ausbeute innerhalb der gebirgsmechanischen Vorgaben.

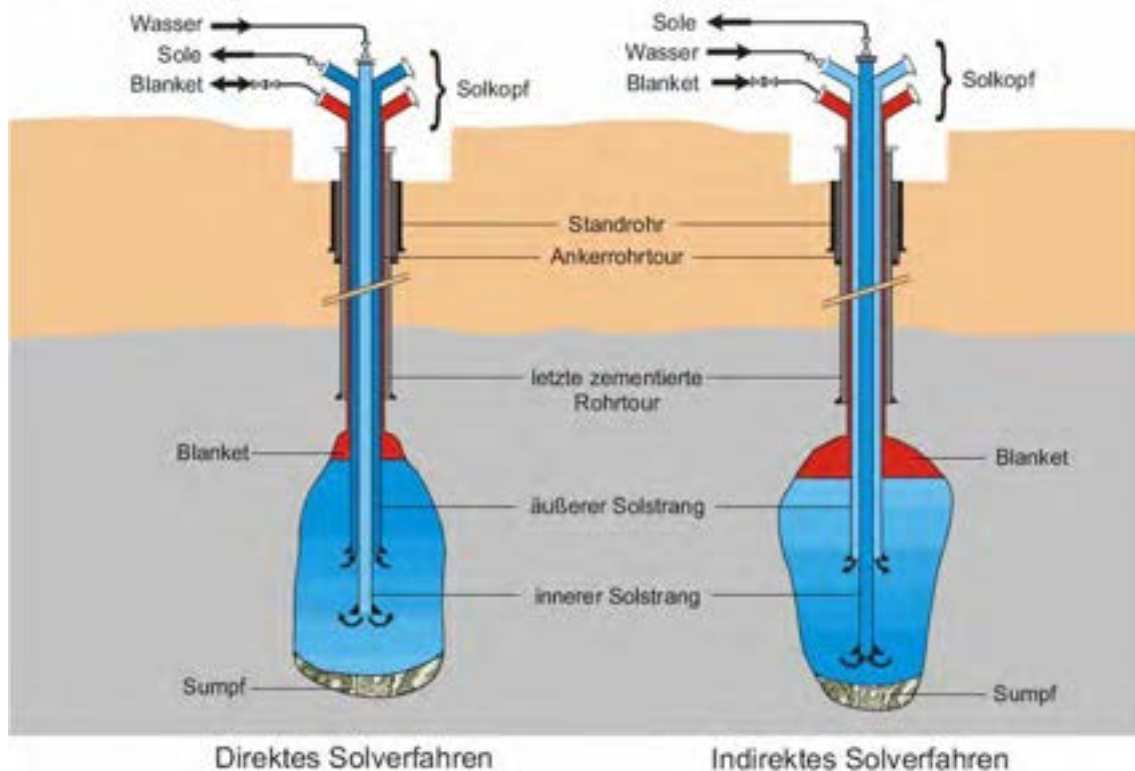


Abbildung 6: Kavernenlaugung mit Stickstoff-Blanket (Stand der Technik). Dargestellt ist die dafür erforderliche Solkomplettierung mit den beiden Solsträngen) sowie die beiden damit möglichen Solverfahren (direktes vs. indirektes Solverfahren).

Das Verfahren zur Soleproduktion der Schweizer Salinen AG wird im Dokument «Laugungstechnik-, Laugungs-/Solbetrieb» von 2003 grundlegend beschrieben. In dem Dokument wird die Laugung mit Blanket beschrieben, welche dem Stand der Technik entspricht und bei den geplanten Solfeldern zum Einsatz kommen wird.

Die Solung beginnt mit der Sumpfsolphase («Anlagephase») mittels direktem Solbetrieb (Wasserinjektion durch inneren Solstrang) mit geringer Rate (Abbildung 6). Nach Erreichen eines bestimmten Volumens wird der Solbetrieb auf indirektes Solen umgestellt; der Blanketspiegel und die Rohrstände schrittweise angehoben und die Kaverne in Etappen von unten nach oben entwickelt.

Um die Salzproduktion innerhalb der gebirgsmechanischen Aussolgrenzen zu optimieren, wurde das Solkonzept der Schweizer Salinen AG im Jahre 2016 durch DEEP.KBB modifiziert. Dazu wurde ein generisches Solkonzept, gestützt auf Computersimulationen, entwickelt. Dieses Solkonzept ist in Abbildung 7 dargestellt.

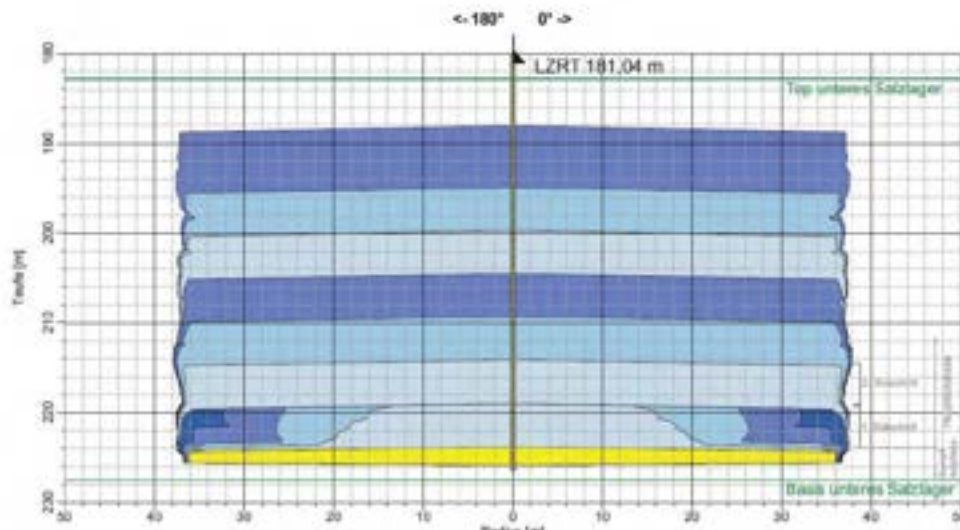


Abbildung 7: Solkonzept – Simulierte Entwicklung der Kavernenform.

Die unterschiedlichen Farbabstufungen des Kavernenhohlraumes stellen die einzelnen Solsteps dar, die durch unterschiedliche Positionen (Abhängeteufen) der Solstränge und unterschiedliche Teufen des Blanketspiegels erreicht werden. Dieses generische Solkonzept ist dann unter Berücksichtigung unterschiedlicher lokationsspezifischer, geologischer Bedingungen anzupassen.

#### 4.3.2 Überwachung / Kontrolle

Während des Betriebs werden Kavernen sowohl mit kontinuierlichen als auch diskontinuierlichen Methoden überwacht.

Zu den kontinuierlichen Überwachungen zählen die Aufzeichnungen des Drucks, der Temperatur und des Durchflusses von Wasser und Sole am Kavernenkopf. Der Druck des Blanketmediums wird ebenfalls kontinuierlich überwacht.

Die Kontrolle des gesolten Volumens erfolgt über eine Massenbilanzberechnung auf der Grundlage der Dichte und damit der Salzsättigung von Proben der geförderten Sole in Zusammenhang mit den kontinuierlich gemessenen Durchflussmengen und Temperaturen. Die Probenahmen für die Sole erfolgt diskontinuierlich in definierten Abständen. Das über die Massenbilanz bestimmte Kavernenvolumen wird zu festgelegten Zeitpunkten während der Kavernenentwicklung durch Hohlraum- bzw. Sonarmessungen überprüft. Aus den Massenbilanzberechnungen und

den Ergebnissen der Hohlraumvermessungen lässt sich die Einhaltung der geplanten Rahmenbedingungen kontrollieren.

Die Konvergenz führt wiederum zur Ausbildung einer Senkungsmulde an der Oberfläche. Die Entwicklung der Bodensenkung wird in regelmässigen Abständen durch geeignete Verfahren beobachtet. Üblicherweise erfolgt dies durch ein wiederholtes Oberflächennivellement. Durch eine Nullmessung vor Beginn der Bohrungs- und Soltätigkeiten wird der Ausgangszustand dokumentiert.

Zusätzlich werden in regelmässigen Abständen (mindesten monatlich) Soleproben chemisch analysiert. Daraus lassen sich weitere geologische Erkenntnisse zum Salzlager ableiten, die zur Steuerung/Überwachung des Solprozesses genutzt werden können.

Zur Umsetzung des Solkonzeptes ist die Einstellung des Blanketspiegels erforderlich. Der Blanketspiegel kann entweder über die Installation von Blanket-Röhrchen (diskontinuierliche Methode) oder mithilfe von installierten und kontinuierlich messenden Sonden überwacht werden.

Folgende Abbildung zeigt schematisch die Überwachungselemente sowie den zeitlichen Ablauf der Überwachung auf:



Abbildung 8: Schematischer Zeitplan zur Kavernenüberwachung.

#### **4.3.3 Grundwasserüberwachung**

Die Grundwasserüberwachung gemäss bewilligtem Konzept wird während der gesamten Betriebsphase fortgeführt. Die Ergebnisse der Grundwasserüberwachung werden jährlich dem Kanton rapportiert.

#### **4.3.4 Massnahmen zur Verwahrung während der Betriebsphase**

Die nachfolgenden Massnahmen während der Betriebsphase, mit denen eine planungs- und anforderungsgemässe Entwicklung der Bohrungen und Kavernen sichergestellt werden, sind:

- Kontinuierliche Aufzeichnung und Überwachung der Kopfdrücke von Wasser, Sole und Sperrmedium (Blanket).
- Kontinuierliche Messung der produzierten Solevolumina und regelmässige Kontrolle der Soledichte bzw. Solezusammensetzung.
- Hohlraumvermessungen sowie idealerweise Bilanzierung/Abgleich der Vermessungsergebnisse mit Solevolumina und Soledichte bzw. Solezusammensetzung.
- Regelmässige Kontrolle bzw. Einstellung des Spiegels des Sperrmediums.
- Auf Messdaten basierende Bewertungen der Integrität von Kaverne und Zugangsbohrung (zum Ende der Betriebsphase).
- Regelmässige Oberflächennivellements zur Überwachung von Senkungsprozessen.
- Fortlaufende Ergänzung und Aktualisierung des geologischen Modells, gestützt auf Daten aus der Betriebsphase.



#### 4.4 Nachsorgephase

Die Nachsorgephase bei Salzkavernen umfasst zuerst eine Wartephase (Standby), in der die Zugangsbohrung und die Kaverne mit Sole gefüllt verbleiben. Diese Phase dient der Beobachtung und es werden verschiedene Massnahmen zur Durchführung der eigentlichen Verwahrung ausgeführt. Die Wartephase dauert so lang bis nahezu stabile Verhältnisse respektive geringe und vorhersehbare Änderungen vorliegen. Erst dann wird die Zugangsbohrung dauerhaft verschlossen. Danach ist die Kaverne endgültig verwahrt und die Nachsorge beginnt.

Die Nachsorge endet, wenn stabile Verhältnisse vorliegen. Die Definition der zugehörigen Kriterien erfolgt im Rahmen des lokationsspezifischen Überwachungs- und Nachsorgekonzeptes, das dem Kanton zur Prüfung und Genehmigung vorgelegt wird.

Auf der Grundlage von [11] und in Anlehnung an [12] wird von folgende Zeiträumen für die verschiedenen Phasen ausgegangen:

Planungs- und Erkundungsphase	Bauphase	Betriebsphase	Nachsorgephase	
			Ordentliche Nachsorge	Störfall-Nachsorge
			Wartephase / Standby	Nachsorge
variabel	variabel	variabel	ca. 5 Jahre	ca. 10 Jahre
Planung & Erkundung	Produktionsbohrungen	Solbetrieb	Beobachtung	Beobachtung
			Verschluss	Abnahme
			Störfall-Nachsorge	

- Entspricht der Verlauf der Prozesse den Erwartungen (ordentliche Nachsorge), dauert die Nachsorgephase ca. 15 Jahre (ca. 5 Jahre Wartephase und ca. 10 Jahre Nachsorge).
- Verlaufen die Prozesse abweichend von den Erwartungen (Störfall-Nachsorge) ist die Dauer der Nachsorge anzupassen.

##### 4.4.1 Wartephase (Standby)

###### 4.4.1.1 Vorbereitende Arbeiten

Die vorbereitenden Arbeiten beinhalten eine Zusammenstellung aller relevanten Kavernendaten, gegebenenfalls vorläufige Simulationen der bei der Verwahrung

erwarteten thermisch-mechanisch-hydraulischen Vorgänge in der Kaverne und im umgebenden Gebirge, sowie gegebenenfalls hydrogeologische Untersuchungen zur Beweissicherung, sowie die Aufstellung eines Zeitplans für die gesamte Massnahme.

#### **4.4.1.2 Vollständige Flutung der Kaverne**

Für Speicherkavernen ist die Entnahme bzw. das Verdrängen des Speicherproduktes durch eine Flutung mit Frischwasser oder Sole erforderlich. Diese Massnahme ist für Solegewinnungskavernen nicht notwendig, weil sich zum Betriebsende bereits gesättigte Sole in der Kaverne befindet. Unabhängig davon ist sicherzustellen, dass gegebenenfalls in der Kaverne vorhandene Volumina des bei der Gewinnung verwendeten Sperrmediums (Blanket) möglichst vollständig aus der Kaverne entfernt werden.

#### **4.4.1.3 Messungen und In-situ-Tests**

Durch geeignete Messungen und In-situ-Tests an der zu verwahrenden Kaverne werden weitere lokationsspezifische Daten erfasst. Hierzu sind in jedem Fall abschliessend die Hohlraumgeometrie und die Kavernentemperatur zu ermitteln. Die messtechnische Feststellung der Dichtheit von Verrohrung und Zementstrecken der Kavernenbohrung oder eine genauere Charakterisierung von möglichen Undichtigkeiten liefern Planungsgrössen für die Auswahl einer geeigneten Verschlusskonstruktion. Zu diesen Messungen gehören übliche Casing-Inspektionen wie akustisch geophysikalische Logs (Cement-Bond-Log (CBL) bzw. Variable-Density-Log (VDL), Ultrasonic Radial Imaging usw.) oder auch Kaliber-Messungen mittels Multifinger sowie Dichtheitstests auf die Verrohrung und den Rohrschuh.

Je nach Situation und Bedarf können auch Messungen zur Entwicklung von Druck und Temperatur während eines temporären Kaverneneinschlusses über einen Zeitraum von mehreren Wochen bis Monaten sinnvoll sein sowie eine Erfassung des Auslaufvolumens von Sole nach Beendigung dieses temporären Einschlusses. Durch einen solchen In-situ-Test lassen sich Daten zur Ermittlung der Kompressibilität des Gesamtsystems aus Bohrung, Solefüllung und Kaverne (Gebirge) gewinnen, die als Grundlage für die Berechnungen und Simulationen zum geotechnischen Nachweis dienen. Die Daten lassen sich mittels eines repräsentativen Testes für mehrere Kavernen bzw. ein Kavernenfeld ermitteln. Gegebenenfalls können

auch mehrere In-situ-Tests sinnvoll sein. Darüber hinaus lässt sich die Aufzeichnung dieser Daten im Normalfall ohne grösseren technischen Aufwand bewerkstelligen.

#### **4.4.1.4 Druck- und Temperaturüberwachung**

Bei ausgewählten Bohrungen und Kavernen im Standby wird eine kontinuierliche Druck- und Temperaturüberwachung eingerichtet. Damit werden wichtige Parameter erhoben, welche dem Prozessverständnis und der Festlegung der Dauer (Abbruchkriterien) der Nachsorgephase dienen. Das entsprechende Konzept wird im Rahmen eines lokationsspezifischen Überwachungs- und Verwahrungskonzeptes entweder als separates Dokument oder im Rahmen eines Baubewilligungsverfahrens den kantonalen Bewilligungsbehörden zur Prüfung und Genehmigung vorgelegt.

#### **4.4.1.5 Grundwasserüberwachung**

Die Grundwasserüberwachung wird während der Wartephase fortgeführt. Die Ergebnisse der Grundwasserüberwachung werden jährlich dem Kanton rapportiert.

#### **4.4.1.6 Geotechnischer Nachweis und Senkungsprognose**

Mit der Gesamtheit der zusammengestellten und zusätzlich ermittelten Daten sind lokationsspezifisch Berechnungen und Simulationen zum geotechnischen Nachweis der Standsicherheit und zu thermisch-mechanisch-hydraulischen Vorgängen anzustellen bzw. zu aktualisieren. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf Vorhersagen zum zeitlichen Ablauf der Konvergenz, des sich daraus ableitenden Senkungsgeschehens an der Oberfläche und des Eindringens von Sole in das Salzgebirge (Infiltrationsrate und -ausbreitung) gelegt.

Hinsichtlich des Senkungsgeschehens sind neben den absoluten Senkungen auch die zeitlichen Änderungen (Senkungsraten) zu betrachten. Mit Hilfe von Senkungsrechnungen lassen sich auch weitere Parameter (Schieflagen sowie Zerrungen und Pressungen) ableiten.

Bezüglich der Soleinfiltration ist insbesondere zu klären, ob und in welchem Zeitraum die Solefront die Grenze der Salzlagerstätte erreicht und mit welcher Rate Sole anschliessend in angrenzende Formationen gelangen kann.

In der Regel ist eine lokationsspezifische Betrachtung für jede einzelne Kaverne erforderlich. Gegebenenfalls kann statt einer lokationsspezifischen Betrachtung auch eine Betrachtung erfolgen, die Gültigkeit für mehrere zu verwahrende Kavernen hat, sofern die Kavernen ausreichend gleichartig und/oder die Bedingungen ausreichend günstig sind. Die Möglichkeit einer gemeinsamen Betrachtung für mehrere Kavernen ist auf Basis einer vorherigen Prüfung der Einzelfälle anhand der vorgenannten Kriterien zu beurteilen.

#### **4.4.1.7 Wartezeit für den notwendigen Temperatenausgleich**

Eine Wartezeit für den notwendigen Temperatenausgleich ist insbesondere für geflutete Speicherkavernen einzuplanen. Für Kavernen, die ausschliesslich der Solegewinnung dienen, ist in der Regel von günstigeren Temperaturbedingungen auszugehen. Grundsätzlich ist aus der zuletzt gemessenen Kavernentemperatur und deren Differenz zur ungestörten, natürlichen Gebirgstemperatur abzuleiten, ob eine bzw. welche Wartezeit vor dem Verschluss erforderlich ist, um eine ausreichende Temperaturangleichung zwischen Sole und umgebenden Gebirge zu erreichen.

Vor dem eigentlichen Verschluss sollte dann eine Messung der Kavernentemperatur erfolgen, um nachzuweisen, dass die notwendige Temperaturangleichung erfolgt ist.

#### **4.4.1.8 Verschluss der Zugangsbohrung**

Der permanente Verschluss der Zugangsbohrung erfolgt für jede einzelne Bohrung und Kaverne unter Zustimmung des Kantons.

Für den dauerhaften Verschluss der Zugangsbohrung kommen im Wesentlichen drei grundlegende Optionen in Frage, welche schematisch in Abbildung 9 dargestellt und anschliessend näher erläutert sind.

Ist die technische Dichtheit der Zugangsbohrung nachgewiesen und als beständig gegeben anzunehmen, ist ein Verschluss in der letzten zementierten Rohrtour ausreichend (Option I in Abbildung 9). Trifft die vorgenannte Bedingung nur eingeschränkt zu, eignet sich entweder eine Verschlusskonstruktion im Kavernenhals bzw. im offenen Bohrloch (Option II in Abbildung 9) oder eine Verschlusskonstruktion in einem bis ins Gebirge gefrästen Fenster in der letzten zementierten Rohrtour (Option III in Abbildung 9).

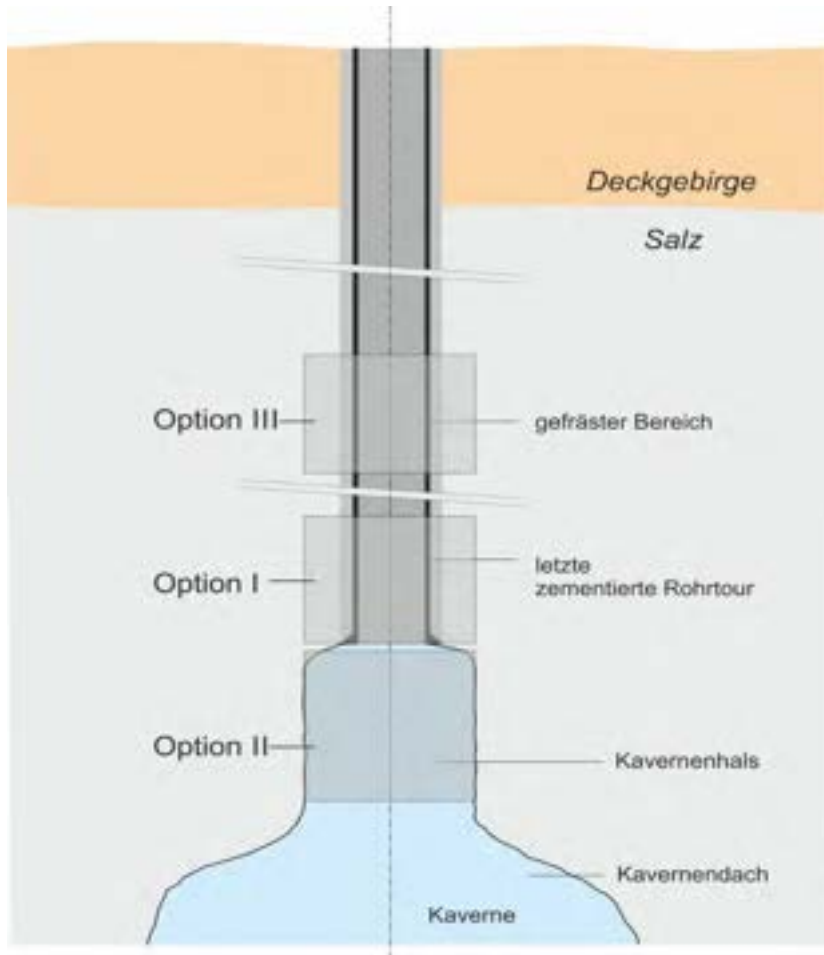


Abbildung 9: Drei Optionen des Kavernenverschlusses, gemäss SMRI-Handbuch (Crotono & Kepplinger, 2006 [7]).

Der oberhalb der Verschlusskonstruktion befindliche Bohrungsabschnitt wird dann weiter nach dem Stand der Technik sowie unter Beachtung der Vorgaben der zuständigen Behörden verfüllt bzw. zementiert. Unterhalb der Ackersohle ist eine Fundamentplatte zu setzen, die Hinweise auf die verschlossene Bohrung gibt.

Ziel der technischen Massnahmen zur Durchführung des Bohrungsverschlusses ist es auszuschliessen, dass Sole entlang von Wegsamkeiten aus der Kaverne in höher gelegene Formationen aufsteigen kann.

### **Option I – Verschluss der letzten zementierten Rohrtour**

Mit einem Stopfen wird zunächst ein erster mechanischer Verschluss im Bereich des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour installiert. Daran anschliessend wird die gesamte Rohrtour bis zutage mit Zement verfüllt. Diese Verschlussvariante ist die technisch einfachste Lösung, für die aber die dauerhafte Dichtheit der Verrohrung sowie der Zementanbindung gegeben sein muss.

### **Option II – Verschluss des Kavernenhalses**

Im Kavernenhalsbereich wird unterhalb des zementierten Rohrschuhs eine Absperrung (z. B. ein Gebirgspacker, Inflatable-Packer oder Spider-Plug) als Basis für eine Zementbrücke gesetzt. Anschliessend wird der Bereich darüber bis zutage zementiert. Grundvoraussetzung für dieses Verfahren ist eine geeignete Kavernenhalsgeometrie, d. h. eine ausreichende Länge des Halses bei geringem Durchmesser. Der dauerhafte Verschluss hängt hierbei nicht von der Dichtheit der letzten zementierten Rohrtour ab, da eine neue unmittelbare Abdichtung zur Salzformation erzielt wird.

### **Option III – Verschluss im ausgefrästen Fenster der letzten zementierten Rohrtour**

Oberhalb des Rohrschuhs wird aus der letzten zementierten Rohrtour ein Bereich herausgefräst und bis in das Salzgebirge unterschritten. Nach dem Fräsen wird die Bohrung im Bereich des Fensters zementiert und das gesamte Rohr bis zutage mit Zement verfüllt.

Durch das Fräsen der Rohrtour und das anschliessende Unterschneiden wird wie bei Option II erreicht, dass der neue Zement eine unmittelbare Verbindung mit der Salzformation ohne dazwischenliegende Verrohrung oder Altzementation eingeht und der Verschluss somit unabhängig von der letzten zementierten Rohrtour ist. Im Vergleich zur Option II ist diese Option technisch aufwändiger und verursacht höhere Kosten, ist allerdings anwendbar, wenn Option II aufgrund eines ungeeigneten Kavernenhalses nicht umgesetzt werden kann.

#### **4.4.2 Nachsorge (Überwachung bzw. Monitoring)**

Wie bereits in Kapitel 3.4 ausgeführt, nimmt in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne der Kaverneninnendruck immer weiter zu, bis dieser im Kavernendachbereich den Gebirgsdruck erreicht. Daraus ergibt sich ein geringer und asymptotisch abklingender Einfluss durch das Salzkriechen (Konvergenz), welcher sich in einem Abklingen der beobachtbaren Bodensenkungen an der Tagesoberfläche widerspiegelt.

Nach der Verwahrung ist die Geländeoberfläche weiterhin mit regelmässigen Oberflächennivellements zu überwachen. Die gemessenen Werte sind mit den prognostizierten Senkungswerten abzugleichen. Bestätigen die Messwerte die Ergebnisse der Senkungsprognose über einen angemessenen Zeitraum (mehrere Jahre), ist davon auszugehen, dass mit der Senkungsprognose die langzeitlichen Senkungserscheinungen korrekt prognostiziert sind, so dass dann eine weitere Überwachung der Tagesoberfläche mittels Nivellementmessungen nicht mehr erforderlich ist. Gleichzeitig bestätigt das Abklingen des Senkungsgeschehens entsprechend der Prognose indirekt die erfolgreiche Verwahrung der Kaverne.

##### **4.4.2.1 Grundwasserüberwachung**

Als weitere Massnahme, den beständig wirksamen Verschluss einer Kaverne und ihrer Zugangsbohrung aufzuzeigen, und gleichzeitig eine Verunreinigung von Grundwasservorkommen mit Sole auszuschliessen, wird die bestehende Grundwasserüberwachung weitergeführt. Die Ergebnisse der Grundwasserüberwachung werden jährlich dem Kanton rapportiert bis Ende der Nachsorge, die nur unter Zustimmung des Kantons erfolgen wird.

#### **4.4.3 Berücksichtigung lokationsspezifischer Aspekte**

Wie zuvor ausgeführt, müssen für die Planung und fachgerechte Umsetzung einer langzeitsicheren Verwahrung von Salzkavernen für jede einzelne Kaverne lokationsspezifische Verhältnisse umfänglich berücksichtigt werden. Dies beinhalten eine möglichst genaue Betrachtung der geologisch-hydrogeologischen Situation, eine umfangreiche Erhebung, Auswertung und Bewertung gebirgsmechanischer Daten, Kenntnisse zum Temperaturverhalten der Sole, Daten zur Geometrie und Teufenlage des Kavernenhohlraums, Kenntnis der Nutzungsgeschichte und eine auf durchgeführten Messungen und Testen beruhende Erfassung des technischen Zustandes der Bohrung und Kaverne. Auf Basis dieser Daten werden im Rahmen eines lokationsspezifischen Überwachungs- und Verwahrungskonzept Kriterien

festgelegt, um eine erwartete Entwicklung oder einen Zustand von einer Abweichung unterscheiden zu können.

Die lokationsspezifische Umsetzung des generellen Überwachungs- und Verwahrungskonzeptes kann entweder als separates Dokument oder im Rahmen des Baubewilligungsverfahrens den kantonalen Bewilligungsbehörden zur Prüfung und Genehmigung vorgelegt werden.



## Aktennotiz

<b>Betreff:</b>	Grosszinggibrunn, Sulz: Undichtigkeiten und Verbindungen zwischen Kavernen – aktueller Kenntnisstand
<b>Verfasser, Datum:</b>	Johannes Pietsch, 10.03.2020
<b>Beilagen:</b>	1) Situationsplan Bohrfelder Sulz, Grosszinggibrunn 2) Plan Sulz, Grosszinggibrunn: Verbindungen Bohrlöcher 3) Pegel in stillstehenden Bohrlöchern Sulz und Grosszinggibrunn 4) Messbericht Packertest S141, S142 (Solexperts AG)

---

### Historie Bohrfeld Sulz

Das Bohrfeld wurde in vier Etappen zwischen 1981 und 1999 erstellt (Beilage 1). Etappe 1 wurde zunächst unter Druck, noch ohne Blanket, gelaugt. Mit Etappe 2 wurde die Laugung mit einem Stickstoff-Blanket eingeführt. Ab Etappe 2 wurden zunächst alle Bohrlöcher mit einem Stickstoff-Blanket betrieben. Im Laufe der Betriebsphase wurden zwischen mehreren Bohrlöchern Verbindungen festgestellt. Die früheren Kavernen der Etappen 1 bis 3 wurden daraufhin oft quergelaugt, z.T. unter Aufgabe einer Laugung mit Blanket. Später wurde versucht, die verbundenen Löcher soweit möglich getrennt zu betreiben.

Eine Übersicht der Verbindungen findet sich in Beilage 2, die Historie wird im Folgenden kurz umrissen:

#### Sulz 1

Im November 1988 wurde eine Verbindung zwischen den drei Bohrlöchern S82, S83 und S84 festgestellt. 1989 wurden die beiden Löcher S80 und S81 perforiert und fortan saugend betrieben. Die verbundenen Kavernen S82 bis S84 wurden quergelaugt, aber weiterhin mit Blanket betrieben. Bei der Laugung war regelmässig mit Schlamm an der Unterwasserpumpe (UWP) zu kämpfen, weswegen Wassereintritt und Soleaustritt regelmässig gewechselt wurden. 2001 wurde S83 perforiert, die beiden anderen wurden seither nicht mehr betrieben. Nach 2003 fand auch in S83 keine Produktion mehr statt.

Die drei Löcher S80, S81 und S83 wurden 2001 verfüllt.

Verbindungen zu Kavernen anderer Etappen wurden keine festgestellt.

#### Sulz 2

Im September 1988 wurde eine Verbindung zwischen den Löchern S85, S86 und S89 festgestellt. Die Löcher wurden daraufhin quergelaugt, weiterhin mit Blanket. 1998 wurde auf Laugung mit UWP umgestellt. 1999 wurde eine Verbindung zu S90 festgestellt, was daraufhin zusammen mit der Reihe quergelaugt wurde.

Die Löcher S87 und S88 wurden seit 1990 mit Blanket quergelaugt, nachdem eine Verbindung zwischen den beiden Löchern festgestellt worden war. 2001 wurde eine Verbindung dieser beiden Löcher mit der Vierergruppe [S85, S86, S89, S90] festgestellt. Die Löcher S89 und S90 wurden seither nicht mehr betrieben. Der Rest wurde auf saugende Laugung umgestellt und bis 2005 (S85) bzw. 2009 (S86, S87, S88) weiter betrieben.

In den Löchern S91 und S92 war 1997 eine Verbindung zum Grundwasser festgestellt worden, woraufhin die Produktion eingestellt wurde (S91 in 1997, S92 in 1998). Die Bohrlöcher hatten bis dahin keine Verbindung untereinander oder zu anderen Löchern des Bohrfelds gezeigt.

### Sulz 3

Zwischen den drei Kavernen S109, S110 und S111 wurde 1992, drei Jahre nach Produktionsbeginn eine Verbindung festgestellt. Die Löcher wurden danach mit Blanket quergelaugt. 1999 wurde eine Verbindung der Dreiergruppe zu S112 festgestellt. Das Loch wurde jedoch nicht in die Querlaugung miteinbezogen, sondern soweit möglich bis 2015 einzeln weiter betrieben. Die Produktion in der Dreiergruppe wurde sukzessive zwischen 2003 und 2012 eingestellt.

Für die beiden Löcher S108 und S113 wurden bis Produktionsende 2014 (S108) bzw. 2017 (S113) keine Verbindungen zu anderen Bohrlöchern festgestellt.

### Sulz 4

Mutmasslich in den Jahren 2003 und 2004 wurden Verbindungen zwischen S114 (Etappe 3) und S125 sowie zwischen S127 und S126 festgestellt. Die Löcher wurden soweit möglich separat mit Blanket weiterbetrieben. Die Produktion aus den vier Bohrlöchern wurde im Zeitraum zwischen 2011 und 2019 eingestellt. Die beiden Löcher S128 und S129 zeigten bis Produktionsende 2014 resp. 2007 keine Verbindung untereinander oder zu anderen Bohrlöchern.

## **Historie Bohrfeld Grosszinggibrunn**

Grosszinggibrunn stellt das derzeit neuste Bohrfeld der Saline Schweizerhalle dar. Es wurde in zwei Etappen 2005 und 2012 erstellt. Seit 2006 wird Sole produziert. In den letzten Jahren kam es auch hier vermehrt zu Verbindungen zwischen Kavernen.

### Grosszinggibrunn 1, Bohrloch S136

Im Bohrloch S136 war es von Beginn der Produktion im Jahr 2007 an schwierig, den Stickstoffspiegel zu halten. Eine Hohlraumvermessung 2010 zeigte ein wesentlich zu schmale, dafür viel zu hohe Kaverne, die bereits bis zum Rohrschuh reichte. Der Dichtheitstest nach Erstellung der Bohrung hatte einen Abfall von 10.0 bar auf 8.7 bar innert 23 h gezeigt, was einem Druckabfall unterhalb des als maximal zulässigen angesehenen Druckverlusts von  $0.1 \text{ bar h}^{-1}$  entsprach. Im Nachhinein kann das Resultat in S136 als eine Undichtheit entlang der Rohre interpretiert werden da die anderen Bohrungen der Etappe geringere bis keine Druckverluste während der Dichtheitstests aufwiesen. Auch das frühe Auftreten der Stickstoffverluste im Bohrloch spricht für diese These.

Da die Kaverne bereits mit einem Durchmesser von 4 m bis zum Rohrschuh reicht, kann ein Packertest zur Ermittlung der Dichtheit der Zementation um den Rohrschuh nicht durchgeführt werden. Eine andere Lösung zur Ermittlung allfälliger Undichtheiten entlang der Verrohrung zu finden wäre aufgrund der geringen bisher entnommenen Menge an Salz jedoch lohnend.

#### Grosszinggibrunn 1, restliche Bohrungen

Die Etappe Grosszinggibrunn 1 wurde 2004/ 2005 gebohrt; zwischen 2006 und 2008 wurde mit der Produktion begonnen.

Ungefähr im Jahr 2014 wurde eine Verbindung zwischen den beiden Kavernen S132 und S133 festgestellt. Im Februar 2019 wurde eine Verbindung zwischen S137 und den Löchern S143, S144 und S145 der zweiten Etappe festgestellt. Eine Verbindung dieser Gruppe mit S135 sowie S146 ist seit Oktober 2019 nachgewiesen.

#### Grosszinggibrunn 2

Die zweite Etappe des Felds Grosszinggibrunn wurde 2011/ 2012 gebohrt; zwischen 2015 und 2016 wurde mit der Produktion begonnen.

Im Juni 2017 wurde ein Druckverlust in S141 festgestellt, im Oktober 2017 in S142. Die Produktion musste daraufhin eingestellt werden. In diesen beiden Bohrlöchern wurde im Frühjahr 2019 ein Packertest durchgeführt, um das undichte Intervall (Verrohrung, Rohrschuh, unverrohrtes Bohrloch und Kaverne) zu detektieren. Dabei wurde festgestellt, dass Undichtigkeiten im Bereich der offenen Bohrlöcher und/ oder der Kavernen bestehen (s.u.). Ausserdem wurde dabei eine Verbindung zwischen S141 und S91 festgestellt. Verbindungen untereinander oder zu anderen Kavernen der beiden Etappen Grosszinggibrunns scheinen nicht zu bestehen.

Im Juni 2018 wurde in S147 ein Druckverlust festgestellt. Auch in diesem Bohrloch musste die Produktion daraufhin eingestellt werden. Eine Verbindung zu anderen Bohrlöchern im Grosszinggibrunn konnte nicht festgestellt werden, eine Verbindung zum Bohrfeld Sulz kann hingegen nach derzeitigem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen werden.

Im Juli 2018 wurde eine Verbindung zwischen S143 und S144 festgestellt. Im Februar 2019 auch zu den Kavernen S137 und S145. Seit Oktober 2019 steht fest, dass die sechs Kavernen [S135, S137, S143, S144, S145, S146] miteinander in Verbindung stehen. Die Verbindungen scheinen unter dem Solespiegel zu bestehen.

Zwischen den drei Kavernen S148, S149 und S150 wurden 2018/ 2019 ebenfalls Verbindungen festgestellt. Zwischen S149 und S150 scheint primär das Stickstoff-Blanket miteinander in Verbindung zu stehen. Da die Verbindung mit allerhöchster Wahrscheinlichkeit durch die Laugung entstanden ist, ist davon auszugehen, dass ebenjene nahe des durch das Blanket kontrollierte Solespiegels liegt. Da das genaue Datum und damit auch der exakte Blanketspiegel zum Zeitpunkt der ersten festgestellten Verbindung nicht bekannt sind, kann die Tiefe der Verbindung jedoch nicht eingegrenzt werden.

## **Geologischer Kenntnisstand**

Die beiden Bohrfelder Sulz und Grosszinggibrunn liegen im Bereich des Adlerhofgewölbes. Für die Bohrungen des Bohrfelds Sulz liegen Kernbeschriebe des Salzlagers und teilweise der Oberen Sulfatzone vor. Die Salzkerne der Bohrung S84 wurden von Dr. U. Pfirter (damals Universität Basel) strukturgeologisch ausgewertet. Die Bohrungen der Etappe Grosszinggibrunn 1 wurden im Salzlager und im unteren Teil der Oberen Sulfatzone ebenfalls gekernt. Geophysikalische Logs (z.B. Gammalogs) liegen für diese Bohrungen nicht vor. Die Etappe Grosszinggibrunn 2 schliesslich wurde hauptsächlich gemeisselt, da durch die Etappe 1 und umliegende Sondierbohrungen vermeintlich genügend Informationen über das Salzlager vorlagen.

Daraus resultiert, dass drei verschiedene geologische Datensatzqualitäten für das Gebiet vorliegen, die eine genaue Korrelation der einzelnen erbohrten Horizonte erschwert bis teilweise verunmöglicht. Gleichwohl können gerade im unteren Teil des Salzlager einzelne Mergel-/Anhydrit-Horizonte ausgemacht werden, die wohl über mehrere Bohrungen hinweg verfolgbar sind. Auch einige Gammalogs sind im unteren Bereich des Salzlagers einigermassen gut korrelierbar.

Die strukturgeologische Auswertung des Kernmaterials aus S86 zeigt im Scharnierbereich des Adlerhofgewölbes einzelne steil einfallende Lagen mit Verunreinigungen, die auf eine tektonische Beanspruchung des Salzlagers hinweisen. Ebenfalls steil einfallende Anhydrithäutchen könnten auch primären Ursprungs sein und deuten nicht zwingend auf eine tektonische Beanspruchung hin. Lagen mit Verunreinigungen wiesen Anzeichen einer Sprödeformation aus. Die meisten so entstandenen Klüfte und Risse waren mit Salz gefüllt.

Die Korrelierbarkeit einzelner Bohrungen im flachen Nordschenkel des Gewölbes (Grosszinggibrunn) lässt den Schluss zu, dass dieser Teil nur wenig tektonisch überprägt ist. Dass der obere Bereich des Salzlagers weniger gut korrelierbar ist, dürfte vor allem an den bekanntermassen äusserst heterogenen Bildungsbedingungen dieses stratigraphischen Abschnitts liegen.

## **Packertest in S141 und S142**

Zwischen dem 20.05.2019 und dem 06.06.2019 wurden hydraulische Packertests in den beiden Löchern S141 und S142 durchgeführt. Der Messbericht findet sich in Beilage 4.

### Resultate Packertest

S142:

- Die Verrohrung ist dicht.
- Der Rohrschuh ist dicht.
- Der Bereich des offenen Bohrlochs und der Kaverne ist undicht.
- Eine hydraulische Verbindung zu S141 oder S91 konnte nicht festgestellt werden. Andere Bohrlöcher wurden nicht kontrolliert.

S141:

- Der Bereich des offenen Bohrlochs und der Kaverne (unterhalb 314.0 m) ist undicht mit Umläufigkeiten über das Gebirge um den Packer.
- Das Intervall im offenen Bohrloch unter dem Rohrschuh (307.0 – 312.6 m) ist dicht mit Umläufigkeiten über das Gebirge um den oberen Packer.
- Nach dem 2. Intervall wurde der Test abgebrochen aufgrund defekter Packermanschetten.
- Es konnte keine hydraulische Verbindung zu S142 festgestellt werden.
- Eine hydraulische Verbindung zu S91 konnte festgestellt werden.

Die Tests in den Löcher S141 und S142 deuten klar darauf hin, dass die in den beiden Bohrungen festgestellten Undichtheiten nicht entlang des verrohrten Bohrlochs bestehen, sondern innerhalb des offenen Salzlagers. Zwischen S141 und der nächstgelegenen Bohrung S91 besteht eine hydraulische Verbindung. Da die zu S142 nächstgelegenen Löcher im Sulz (S92, S113 und S114) nicht mit Drucksensoren ausgestattet worden waren, kann keine Aussage über eine mögliche Verbindung zwischen S142 und diesen Kavernen gemacht werden.

### **Pegel und Leitfähigkeitsmessungen Sulz, Grosszinggibrunn**

Im Oktober 2019 sowie im Februar 2020 wurden die Pegel und Leitfähigkeiten in stillstehenden Bohrlöchern der Bohrfelder Sulz und Grosszinggibrunn sowie in der Grundwassermessstelle S138 durchgeführt. Die Ergebnisse der Pegelmessungen finden sich in Beilage 3.

Ziel der Pegelmessungen war es, Verbindungen zwischen einzelnen Kavernen und möglicherweise auch dem Grundwasser zu detektieren und eine Planungsgrundlage für weitere, präzisere Untersuchungen zu schaffen. Es ist davon auszugehen, dass in Bohrlöchern miteinander verbundener Kavernen die Pegel ein System kommunizierender Röhren abbilden. Dabei sind die Dichtunterschiede zwischen Löchern mit Süswasserlinsen auf der Sole und denjenigen ohne zu berücksichtigen.

Eine Auswertung der gemessenen Pegel ergibt folgendes Bild:

- In fünf Bohrungen wurde kein Pegel gemessen, da die Löcher unter Druck standen und daher als dicht angesehen werden können. Interessanterweise befinden sich darunter einzelne Löcher, für die Verbindungen zu anderen Kavernen bekannt sind.
- Die meisten Pegel liegen um 250 m ü. M. Dies entspricht ungefähr dem Karst-Grundwasserstand in der nächstgelegenen Grundwassermessstelle S138 (252.15 m ü. M., 25.02.2020) sowie verschiedenen Grundwasserständen, wie sie während der Bohrarbeiten gelotet worden waren.
- In einzelnen Bohrungen wurden Pegel über 270 m ü. M. gemessen (S85, S87, S108, S112, S147): Für S85 und S87 liegen Leitfähigkeitsmessungen bis zum Rohrschuh vor. Diese zeigen Süswasser bis zur Kaverne. Die beiden Bohrlöcher sind also mit einem wesentlich leichteren Medium gefüllt. Ähnliches ist für S147 anzunehmen, welches für einen ersten Test auf mögliche Verbindungen zu Bohrungen des Feldes Sulz mit Süswasser aufgefüllt wurde. Für S108 und S112 liegen keine Leitfähigkeitsmessungen vor. Zumindest für S112 ist eine Verbindung zu anderen Kavernen bekannt; der vergleichsweise hohe Pegel könnte also auf

eine ausgedehnte Süsswasserlinse hindeuten. Ob der hohe Pegel in S108 ebenfalls auf eine Süsswasserlinse hindeutet ist unklar.

- Ohne genaue Dichteprofile lassen sich die einzelnen Pegelunterschiede zwischen den Bohrungen nicht definitiv auf Dichteunterschiede zurückführen. Der derzeitige Kenntnisstand deutet jedoch stark darauf hin, dass fast sämtliche Bohrungen, die in Beilage 4 einen Pegel aufweisen miteinander kommunizieren und eine Verbindung zum Grundwasser aufweisen. Eine Ausnahme könnten S83 und S84 bilden. Hierbei verwundert der abweichende Pegel jedoch aufgrund der Tatsache, dass S83 seinerzeit perforiert wurde und daher eine Verbindung zum Grundwasser aufweist. Diese Messungen sollten ggf. verifiziert werden.

## **Arbeitshypothese**

### Mechanismus der Verbindungen

Wie sich Verbindungen zwischen einzelnen Kavernen bilden, ist derzeit unklar. Da auch bei vergleichsweise jungen Kavernen Verbindungen festgestellt wurden, die eine kontrollierte Form aufweisen und zu klein sind, um sich gegenseitig berühren zu können, scheint es sich um diskrete, kleinräumige Verbindungen zu handeln.

Ein denkbare Szenario wäre die Laugung entlang der Unterseite von unlöslichen Zwischenlagen sobald der Blanketspiegel über solche Zwischenlagen gezogen wird. Bevor die Zwischenlagen instabil werden und nachbrechen könnte entlang deren Unterseite kleinräumig Salz auch über den eigentlichen Kavernenrand hinaus gelaugt werden. Sollte eine solche Zone schliesslich auf eine andere Kaverne treffen, würde so eine zunächst deutlich begrenzte Verbindung bestehen.

In früheren Etappen des Bohrfelds Sulz wurde nach der Feststellung von Verbindungen zumeist auf Querlaugung umgestellt. Die Verbindungen wurden so also aktiv vergrössert. Die Ausrüstung der Bohrungen im Feld Grosszinggibrunn mit entsprechenden Reglern des Wasserzuflusses und Soleabflusses dürften eine solche Entwicklung effektiv verhindern.

Solchermassen entstandene Verbindungen würden kein gebirgsmechanisches Problem darstellen, da sie für Auswirkungen auf die Gesamtstatik mutmasslich zu klein wären. Hierfür spricht, dass in Hohlraumvermessungen keine Wegsamkeiten über den eigentlichen Kavernenrand hinaus detektiert wurden.

Für das Zweiersystem S132 – S133 kann aufgrund der vorliegenden Informationen davon ausgegangen werden, dass das Auftreten der Verbindung zeitlich mit dem Erreichen der untersten erfassten unlöslichen Zwischenlage in den beiden Kavernen zusammenhängt. Für andere Systeme kann dies aufgrund der unzureichenden geologischen Datenqualität nicht gezeigt werden.

### Ausdehnung der Verbindungen

Derzeit kann folgende Situation vermutet werden: Die meisten Kavernen im Bohrfeld Sulz stehen untereinander in Verbindung und zumindest über die Löcher S91 und S92 auch in Verbindung zum Grundwasser. Die Verbindungen zwischen den quergelaugten Kavernen sind teilweise gross genug,

um mit Hohlraumvermessungen detektiert werden zu können. Es könnten zudem weitere, heute noch unbekannte, Verbindungen bestehen.

Sollte der Grossteil der Kavernen untereinander verbunden sein, d.h. das System [S85, S86, S89, S90] – [S87, S88] auch mit dem System [S109, S110, S111] – S112, den Löchern S91 und S92 und möglicherweise sogar mit den Löchern der Etappe 4 verbunden sein, würden die Kavernen ein entsprechend grosses Reservoir bilden, das eine hydraulische Verbindung zum Grundwasser aufweisen würde. Verbindungen anderer Kavernen zu diesem Reservoir würden aufgrund der Grösse des Systems und der wahrscheinlichen Verbindung zum Grundwasser als nach aussen undicht erscheinen (im Gegensatz zu Einzelkavernen, die im kleineren Massstab untereinander verbunden sind, wie z.B. S132 – 133).

Eine Verbindung zwischen S141 und S91 konnte bereits festgestellt werden. Für dieses Loch ist eine nicht weiter dokumentierte Verbindung zum Grundwasser bekannt. Verbindungen zwischen S142 oder S147 und benachbarten Sulz-Löchern sind noch nicht nachgewiesen, scheinen aber aufgrund der allgemeinen Entwicklung wahrscheinlich.

Sollten solche Verbindungen tatsächlich bestehen, würde das mutmassliche Reservoir Sulz bereits in das Bohrfeld Grosszinggibrunn reichen. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Grosszinggibrunn-Löchern sind an sich nicht als Problem zu betrachten, solange sie mit den eingebauten Reglern innerhalb der gebirgsmechanischen Vorgaben gelaugt werden können. Sollte sich jedoch eine Verbindung zwischen der Sechsergruppe [S135, S137, S143, S144, S145, S146] und der Kaverne S141 und damit mutmasslich zu einem Reservoir Sulz bilden, dürften diese Bohrungen nicht mehr weiter mit Drucklaugung betreibbar sein. Das Gleiche gilt für die Dreiergruppe [S148, S149, S150]. Bei Ausfall dieser beiden Gruppen, wären nur noch vier Kavernen des Bohrfelds in betriebsfähigem Zustand.

### **Weiteres Vorgehen**

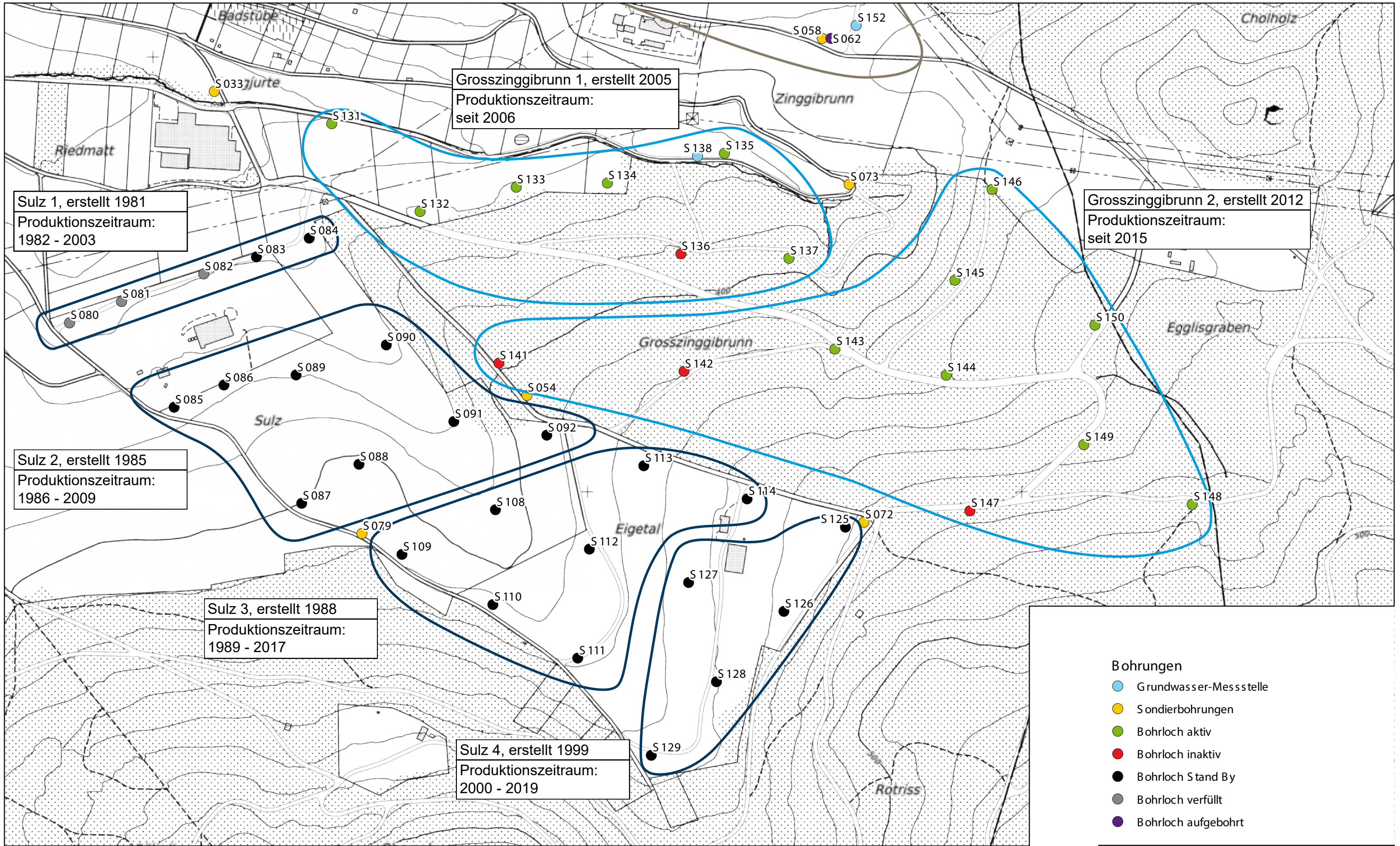
Das weitere Vorgehen müsste aus heutiger Sicht vorgängig folgende Punkte klären:


Besteht eine Verbindung zwischen S142 und einem oder mehreren der Löcher S92, S113 oder S114?


Besteht eine Verbindung zwischen S147 und S125?


Sind mit dem sich ändernden Grundwasserstand in S138 korrelierbare Pegeländerungen in Kavernen feststellbar? Dies gilt insbesondere für Löcher für die bereits Verbindungen zum Grundwasser bekannt sind (S83, S91 und S92).

Sind Signale, die in Einzelkavernen oder bekannte Systeme mehrerer Kavernen gegeben werden, auch in anderen messbar (z.B. Druckerhöhung, Tracer o.a.)?



 Etappen des Bohrfelds Sulz  
(mit Erstellungsdatum und Produktionszeitraum)

 Bohrfeld Zinggibrunn

 Etappen des Bohrfelds Grosszinggibrunn  
(mit Erstellungsdatum und Produktionszeitraum)

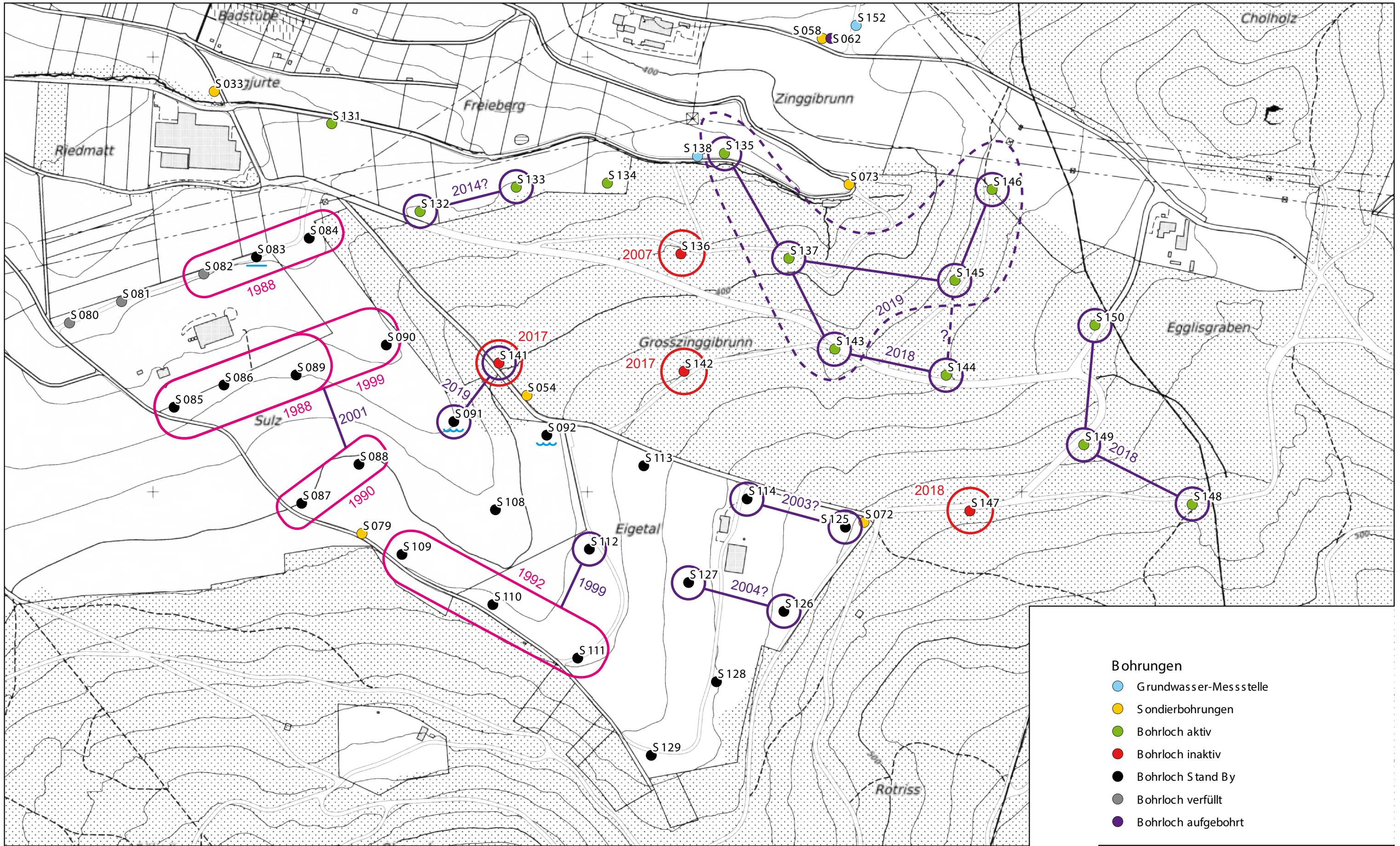
- Bohrungen**
-  Grundwasser-Messstelle
  -  Sondierbohrungen
  -  Bohrloch aktiv
  -  Bohrloch inaktiv
  -  Bohrloch Stand By
  -  Bohrloch verfüllt
  -  Bohrloch aufgebohrt

Sulz, Grosszinggibrunn  
Bohrfelder, Etappen



Massstab 1:4000	Format 42.0 x 29.7 cm	Datum 26.02.2020	Gez. PietschJ
--------------------	--------------------------	---------------------	------------------





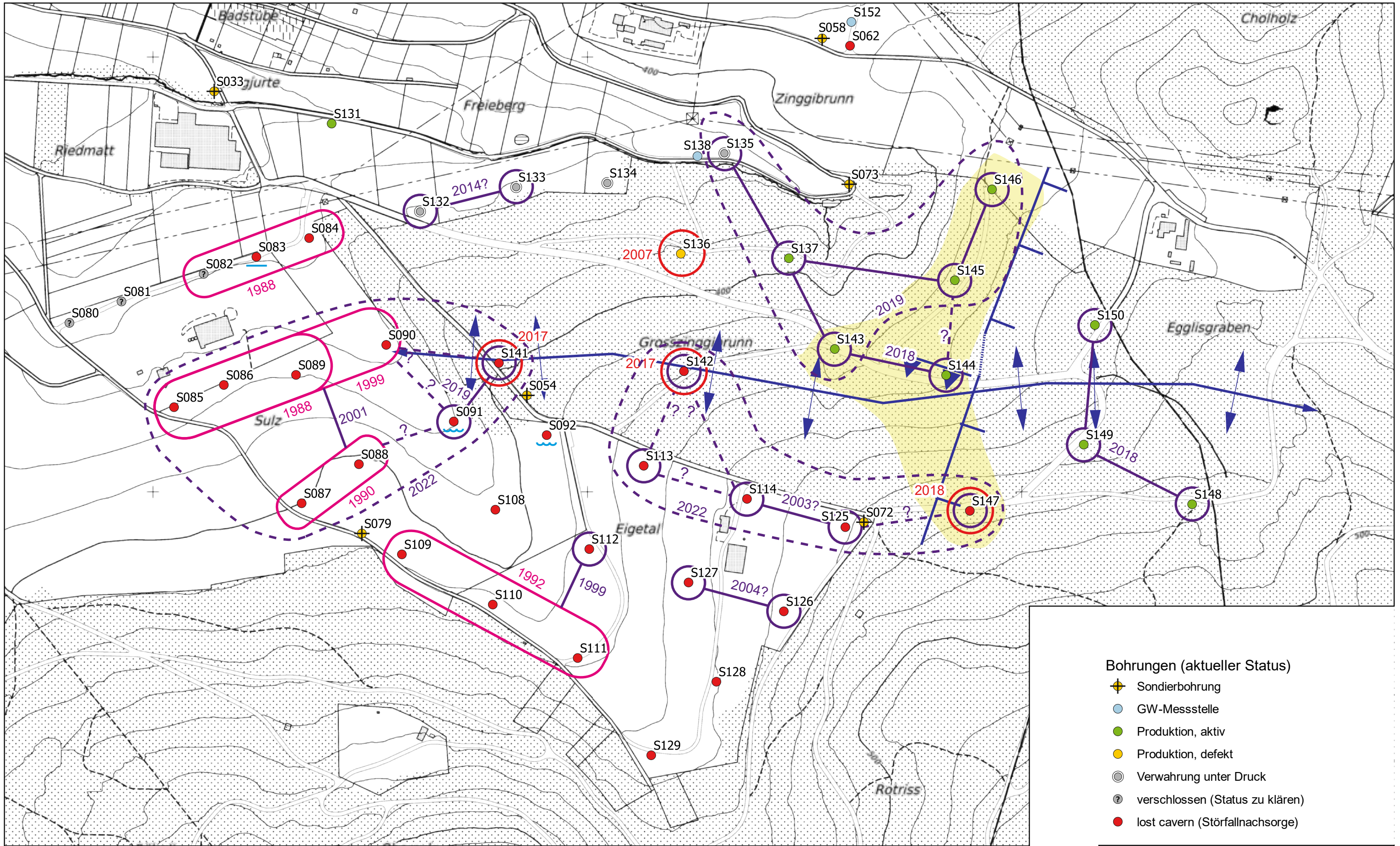
- Bohrungen**
- Grundwasser-Messstelle
  - Sondierbohrungen
  - Bohrloch aktiv
  - Bohrloch inaktiv
  - Bohrloch Stand By
  - Bohrloch verfüllt
  - Bohrloch aufgebohrt

- Bohrlöcher verbunden, quergelaugt (mit Angabe wann Verbindung festgestellt wurde)
- Bohrlöcher verbunden, ohne aktive Querlaugung (mit Angabe wann Verbindung festgestellt wurde)
- Bohrloch undicht, Verbindung noch nicht zweifelsfrei geklärt
- Rohre perforiert, Verbindung zum Grundwasser
- ~ Verbindung zum Grundwasser (keine Perforation)

Sulz, Grosszinggibrunn  
Verbindungen Bohrlöcher

**SCHWEIZER  
SALINEN  
SALINES  
SUISSES**

Massstab 1:4000	Format 42.0 x 29.7 cm	Datum 26.02.2020	Gez. PietschJ
--------------------	--------------------------	---------------------	------------------



**Bohrungen (aktueller Status)**

- Sondierbohrung
- GW-Messstelle
- Produktion, aktiv
- Produktion, defekt
- Verwahrung unter Druck
- verschlossen (Status zu klären)
- lost cavern (Störfallnachsorge)

Bohrlöcher verbunden, quergelaugt  
(mit Angabe wann Verbindung festgestellt wurde)

Bohrlöcher undicht,  
Verbindung noch nicht zweifelsfrei geklärt


Erhöhte Störungsdichte  
(Strukturgeol. wireline log Aufnahme)

Bohrlöcher verbunden, ohne aktive Querlaugung  
(mit Angabe wann Verbindung festgestellt wurde)

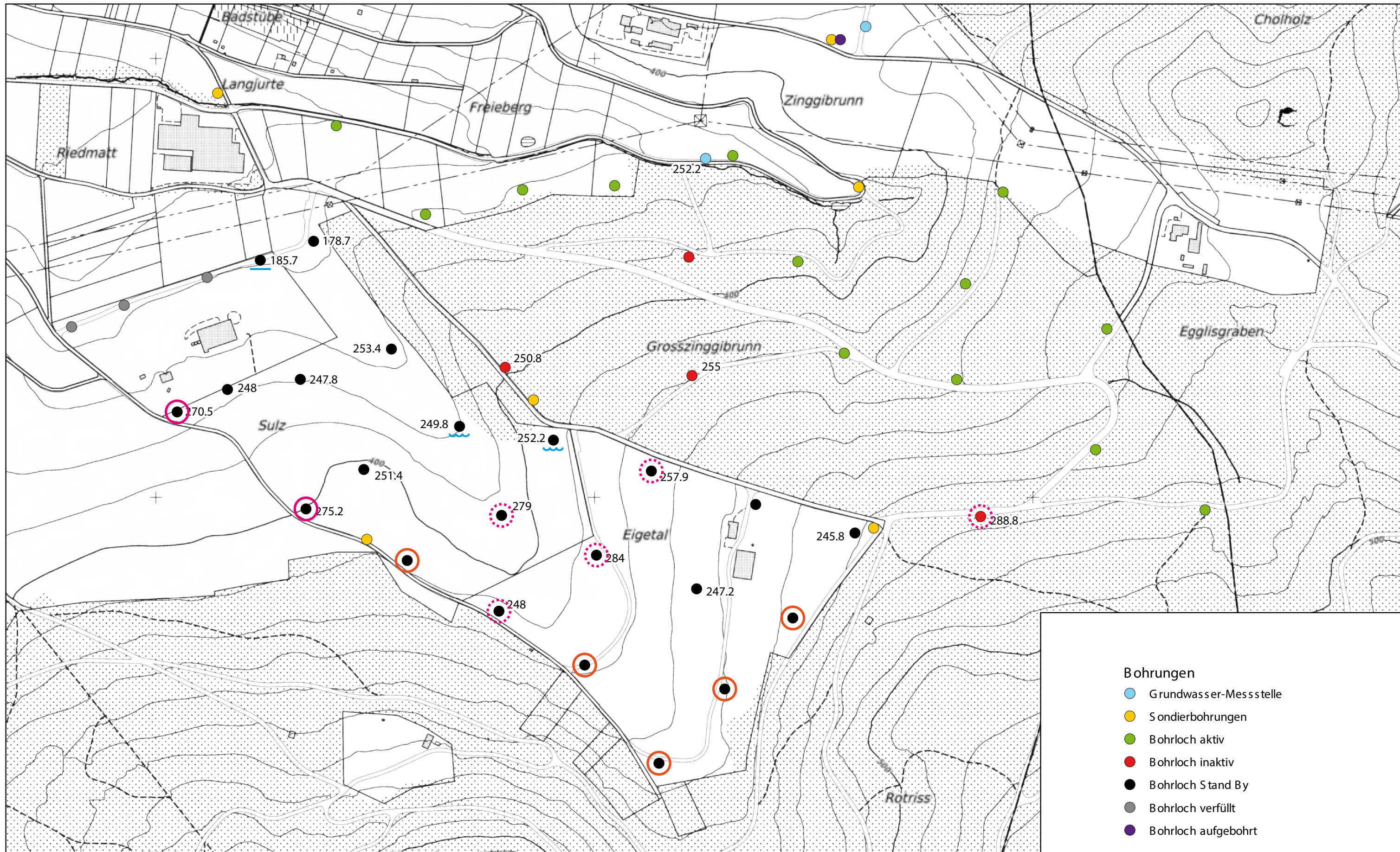
Rohre perforiert, Verbindung zum Grundwasser  
 Verbindung zum Grundwasser (keine Perforation)

Scharnier Adlerhof-Antiklinale

Sulz, Grosszinggibrunn  
Verbindungen Bohrlöcher



Massstab 1:4000	Format 42.0 x 29.7 cm	Datum 19.09.2022	Gez. PietschJ
--------------------	--------------------------	---------------------	------------------



- Bohrungen**
- Grundwasser-Messstelle
  - Sondierbohrungen
  - Bohrloch aktiv
  - Bohrloch inaktiv
  - Bohrloch Stand By
  - Bohrloch verfüllt
  - Bohrloch aufgebohrt

- Bohrloch bis Rohrschuh mit Süswasser gefüllt
- keine durchgehende Leitfähigkeitsmessung, potentiell mit Süswasser gefüllt
- keine Pegelmessung durchgeführt (Loch steht unter Druck)
- Rohre perforiert, Verbindung zum Grundwasser
- Verbindung zum Grundwasser (keine Perforation)

Sulz, Grosszinggibrunn  
 Pegelstände [m ü. M.]:  
 Grundwasser bzw. Sole

**SCHWEIZER  
 SALINEN  
 SALINES  
 SUISSES**

Massstab 1:4000	Format 42.0 x 29.7 cm	Datum 26.02.2020	Gez. PietschJ
--------------------	--------------------------	---------------------	------------------

## **Schweizer Salinen**

# **Hydraulische Versuche zur Überprüfung von Undichtigkeiten**

## **Bohrlöcher S141 und S142**

Ergebnisse der hydraulischen Versuche

Bericht

A-2711

Juni 2019

---

**Solexperts AG**

Mettlenbachstrasse 25

Postfach 81

CH-8617 Mönchaltorf

(Switzerland)

Tel. ++41 (0)44 806 29 29

Fax ++41 (0)44 806 29 30

info@solexperts.com

## Inhalt

1.	LISTE DER ABKÜRZUNGEN.....	3
2.	EINFÜHRUNG.....	4
3.	ÜBERSICHT UND ERGEBNISSE DER HYDRAULISCHEN VERSUCHE .....	5
3.1.	Testmethodik .....	5
3.2.	Testprogramm.....	5
3.3.	Durchlässigkeitswerte .....	5
4.	ZUSAMMENFASSUNG .....	6
5.	WEITERES VORGEHEN .....	8
6.	DOKUMENTATION UND AUSWERTUNG DER HYDRAULISCHEN VERSUCHE .....	10
6.1.	S142 Intervall i1 (318.0 – 324.4 m).....	10
6.2.	S142 Intervall i2 (318.0 – 385.0 m).....	13
6.3.	S141 Intervall i1 (314.0 – 361.0 m).....	17
6.4.	S141 Intervall i2 (307.0 – 312.6 m).....	21
7.	DOKUMENTATION DER FELDARBEITEN .....	24

## 1. LISTE DER ABKÜRZUNGEN

<b>Bezeichnung von Testphasen</b>	
INF	Expansion der Packer (Inflation)
INF1	Expansion des unteren Packers (INF2 = Expansion des oberen Packers)
DEF	Entspannung der Packer (Deflation)
PSR	Statische Druckerholung (Shut-In)
SI	Slug Injektionstest
SIS	Druckerholung nach Slug Injektionstest (Shut-In)
SW	Slug Entnahmetest
SWS	Druckerholung nach Slug Entnahmetest (Shut-In)
PI	Pulse Injektionstest
PW	Pulse Entnahmetest
HI	Constant Head Injektionstest (konstante Druckdifferenz)
HIS	Druckerholung nach Constant Head Injektionstest (Shut-In)
HW	Auslaufversuch mit konstantem Druck
HWS	Druckerholung nach Auslaufversuch mit konstantem Druck (Shut-In)
MR	Multirate Test: Test mit variabler Flussrate
MRS	Druckerholung nach Test mit variabler Flussrate
RW	Pumpversuch mit konstanter Flussrate
RWR	Druckerholung nach Pumpversuch mit konstanter Flussrate (ohne Shut-In-Ventil)
RWS	Druckerholung nach Pumpversuch mit konstanter Flussrate (Shut-In)
RI	Injektionstest mit konstanter Flussrate
RIS	Druckerholung nach Injektionstest mit konstanter Flussrate (Shut-In)
SAET	Aufsättigen der Testzone mit Wasser
WAP	Wasserabpressversuch (Lugeon-Test)
DST	Drill Stem Test
<b>Allgemein:</b>	
GWL	Grundwasserleiter
IARF	“Infinite Acting Radial Flow“: Fließphase, die dem Theis-Modell entspricht
GOK	Geländeoberkante
OK	Oberkante
PV	Pumpversuch
UK	Unterkante
WSP	Wasserspiegel

## 2. EINFÜHRUNG

Im März 2019 wurde die Solexperts AG mit der Durchführung von hydraulischen Packertests mit dem Heavy-Duty Double-Packer System (HDDP) im Rahmen der Überprüfung von Undichtigkeiten in zwei Bohrungen beauftragt. Die Beauftragung erfolgte durch die Firma Schweizer Salinen und die Durchführung der Versuche fand zwischen dem 20. Mai und dem 06. Juni 2019 statt. Dieser Bericht fasst die Ergebnisse der hydraulischen Packertests zusammen.

In Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 sind ein Überblick zum Auftrag, die Bohrlochspezifikationen und die Messergebnisse der hydraulischen Versuche zusammengefasst. In Kapitel 3 werden die Versuche im Einzelnen beschrieben, Kapitel 4 gibt eine Zusammenfassung und Kapitel 5 ein Ausblick auf das weitere Vorgehen. In Kapitel 6 werden die Testergebnisse intervallweise detailliert dargestellt. Ein tabellarisches Protokoll der Feldarbeiten ist in Kapitel 7 zu finden.

Tabelle 2.1: Übersicht zu Auftrag und Testarbeiten

<b>Auftraggeber:</b>	<b>Schweizer Salinen AG</b>	
	Schweizerhalle Rheinstrasse 52 4133 Pratteln	
<b>Zuständiger Geologe:</b>	Gabor Fuchs Leiter Geologie	
<b>Feldarbeiten:</b>		
<b>Untersuchte Bohrungen:</b>	<b>S142</b>	<b>S141</b>
OKT	419 m ü. M.	399 m ü. M.
Tiefe:	385 m	298 m
Neigung:	Vertikal	Vertikal
Bohrlochdurchmesser im Testbereich:	250 mm	250 mm
Verrohrung:	320 m	361 m
Wasserspiegel	164 m	144 m
<b>Einsatzdaten:</b>	20. – 23.05.2019	03. – 06.06.2019
<b>Testingenieure (Solexperts AG):</b>	Pierrick Altwegg, Karam Kontar, Leo Schwab	
<b>Techniker (Solexperts AG):</b>	Areomar Costa, Noel Jnglin	
<b>Solexperts Projekt-Nr:</b>	2711	

Tabelle 2.2: Übersicht zu den Ergebnissen

Testergebnisse									
Bohrloch	Intervall #	Tiefe <sup>1)</sup> [m]	Pos. <sub>3)</sub>	Testart	Länge [m]	Testphase <sup>2)</sup>	T-Wert [m <sup>2</sup> /s]	K-Wert [m/s]	Bemerkungen / Undichtigkeiten
S 142	i1	318.0 – 324.4	1	DP	6.4	PI	<b>3.0E-08</b>	<b>4.6E-09</b>	Keine Undichtigkeiten um Rohrschuh
S142	i2	318.0 – 385.0	1/2	EP	67.0	RI	<b>4.3E-04</b>	<b>6.5E-06</b>	Hohe Flussraten keine Undichtigkeiten um Rohrschuh
S141	i1	314.0 – 361.0	3/2	EP	47.0	RI	<b>8.5E-06</b>	<b>1.8E-07</b>	Druckreaktion im Ringraum (P3), Umläufigkeit über Gebirge
S91		Crosshole		--	--	RIS	<b>6.0E-03</b>	--	S = 1.5E-03 [-]
S141	i2	307.0 – 312.6	3	DP	5.6	SI	<b>8.0E-08</b>	<b>1.4E-08</b>	Druckreaktion im Ringraum (P3), Umläufigkeit über Gebirge

<sup>1)</sup>entlang Bohrlochachse; <sup>2)</sup>Name der Testphase, die zur Auswertung verwendet wird, EP: Einzelpacker-Test; DP: Doppelpacker-Test.

<sup>3)</sup>Position: 1 Packer 2 im 9 5/8" Rohr, Rohrschuh bei 320 m Tiefe  
2 Bis Bohrlochende  
3 Offener Bohrlochabschnitt, Packer 2 unterhalb Rohrschuh (ist bei 298 m Tiefe)

### 3. ÜBERSICHT UND ERGEBNISSE DER HYDRAULISCHEN VERSUCHE

#### 3.1. Testmethodik

Die Ermittlung der Undichtigkeiten und die Bestimmung der hydraulischen Parameter erfolgten über einen mehrphasigen Testablauf. Nach Einschliessen des Intervalls (Spannen des unteren Packers, Spannen des oberen Packers und Schliessen des Bohrloch-Ventils) wurden Injektionsversuche (Pulse- und Slugtests oder Tests mit konstanter Flussrate) durchgeführt.

#### 3.2. Testprogramm

Die Anzahl hydraulischer Versuche sowie die Festlegung der Tiefenstufen und Längen der Intervalle erfolgten in Absprache mit den zuständigen Geologen.

#### 3.3. Durchlässigkeitswerte

Die aufgezeichneten Druck- und Flussdaten der hydraulischen Versuche sowie deren Auswertung sind in Kapitel 4 dargestellt. Eine Zusammenfassung der Resultate ist in Tabelle 3.1 gegeben.

Zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeiten kamen die entsprechenden Testmethoden und Auswerteverfahren zur Anwendung. In der unten stehenden Tabelle sind die zuverlässigsten Resultate **fett** hervorgehoben.



Tabelle 3.1.: Resultate der hydraulischen Versuche

Bohrloch	Intervall #	Tiefe <sup>1)</sup> [m]	Länge [m]	Test-phase <sup>2)</sup>	Fluss [l/min]	T-Wert [m <sup>2</sup> /s]	K-Wert [m/s]	Bemerkungen <sup>3)</sup>
S 142	i1	318.0 – 324.4	6.4	PI	--	<b>3.0E-08</b>	<b>4.6E-09</b>	Typkurvenverfahren
				SI	--	8.2E-08	1.3E-09	Typkurvenverfahren
S142	i2	318.0 – 385.0	67.0	RI1	171	4.1E-04	6.1E-06	SSA
				RI3	248	<b>4.3E-04</b>	<b>6.5E-06</b>	SLA
				RI3	248	4.3E-04	6.5E-06	SSA
S141	i1	314.0 – 361.0	47.0	RI	100	<b>8.5E-06</b>	<b>1.8E-07</b>	SLA
S91		Crosshole		RIS	100	<b>6.0E-03</b>	--	RSLA mit r= 50 m <b>S = 1.5E-03 [-]</b>
S141	i2	307.0 – 312.6	5.6	RI	50	--	--	--
				SI	--	<b>8.0E-08</b>	<b>1.4E-08</b>	Typkurvenverfahren

<sup>1)</sup>entlang Bohrlachse

<sup>2)</sup>Name der Testphase, die zur Auswertung verwendet wird

<sup>3)</sup> Typkurven für Pulse Tests nach Bredehoeft-Papadopolos(1980), für Slug Tests nach Cooper et al. (1967);

SLA: Geradensteigungsverfahren nach Cooper & Jacob (1946)

SSA: Steady-state Annäherung nach Zeigler (1976)

RSLA: Auswertung der Druckerholung nach Agarwal (1980)

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Die Versuche in der Bohrung S142 wurden mit dem Packersitz in der 9 5/8" Rohrtour durchgeführt. Beide Tests zeigten keine Undichtigkeiten, sowohl über dem oberen Packer 2 im Rohr als auch am Rohrschuh. Der Versuch mit 6.4 m Intervalllänge ergab eine Transmissivität von 3.0E-08 m<sup>2</sup>/s. Der Versuch über die gesamte offene Bohrlachstrecke bis Bohrlachende (Intervall i2) erfolgte mit einer hohen Flussrate von 248 l/min und ergab eine erhöhte Transmissivität von 4.3E-04 m<sup>2</sup>/s.

Die Versuche in der Bohrung S141 ergaben Transmissivitäten von 8.0E-08 m<sup>2</sup>/s für Intervall i2 und von 8.5E-06 m<sup>2</sup>/s für Intervall i1. Bei diesen Versuchen wurde eine erhöhte Umläufigkeit über das Gebirge um den oberen Packer festgestellt. Zur Druckbeobachtung wurde je ein Drucksensor in den Bohrungen S142 und S91 installiert. Während dem Versuch im Intervall i1 (314.0 – 361.0 m) konnte eine Druckreaktion von etwa 2.3 kPa (23 cm) in der Bohrung S91 beobachtet werden, die auf eine hydraulische Verbindung zwischen den beiden Bohrungen hinweist (mit einem Speicherkoeffizienten von S = 1.5E-03 [-]).

Die Durchführung hydraulischen Versuche mit der Doppelpackergarnitur waren in beiden Bohrungen in den offenen Bohrlachabschnitten sehr risikobehaftet und nur bedingt möglich, da die Bohrung nicht masshaltig war und sich der Bohrlachdurchmesser an den Packersitzen, vermutlich durch Lösungserscheinungen während der Versuchsdurchführung, vergrösserte. Dadurch wurden die Packerelemente überdehnt und die Manschetten zerstört (siehe Abbildung 3.3.1). Die hydraulischen Tests mussten danach abgebrochen werden (siehe Logbuch vom 05.06.2019). Ein anderes Packerelement zeigte sehr schwere Beschädigung der Manschette durch eine scharfkantige Bohrlachwand (siehe Abbildung 3.3.2). Beide Manschetten konnten aufgrund der starken Beschädigungen nicht mehr eingesetzt werden und wurden folglich entsorgt.



Abbildung 3.3.1: Überdehnung der Packermanschette führte zur vollständigen Zerstörung



Abbildung 3.3.2: Sehr schwere Beschädigung der Packermanschette aufgrund scharfkantiger Bohrlochwand

## 5. WEITERES VORGEHEN

Die Versuche in den kurzen Intervallen ergaben relativ niedrige Durchlässigkeiten. Bei den Versuchen in den gesamten offenen Bohrlochstrecken war die Injektionszeit für die Versuche mit konstanter Fließrate recht kurz, wegen der hohen Flussraten und dem beschränkten Wasservolumen ( $4 \text{ m}^3$ ). Die Tests ergaben deswegen keine Hinweise auf mögliche Fließpfade oder auf Begrenzungen in der Formation. Die crosshole Reaktion in der Bohrung S91 zeigt eine gewisse Verbindung zwischen S141 und S91. In der Bohrung S142 konnte jedoch keine Reaktion beobachtet werden. Diese kann entweder darauf beruhen, dass keine Verbindung vorhanden ist oder aber darauf, dass die Testzeit zu kurz war, um eine solche zu erkennen.

Weitere hydraulische Packertests in den offenen Bohrlochabschnitten sind nicht zu empfehlen, da diese ebenfalls zu Schäden an den Packermanschetten führen würden (siehe Kapitel 4).

Folgende Fragen bezüglich des hydraulischen Modells konnten durch die durchgeführten Versuche nicht beantwortet werden:

- Randbedingungen: Wohin fliesst das Wasser, das in die Bohrungen über die gesamte offene Bohrlochstrecke injiziert wurde?
- Vertikale Gliederung des Grundwasserleiters: Auf welchem Niveau befinden sich diese wasserleitenden Horizonte?
- Kluftweite/-volumen: Wie gross ist das Volumen der Verbindungen zwischen den einzelnen Bohrlöchern?

Folgende Methoden und Messungen könnten die oben aufgelisteten Fragen beantworten:

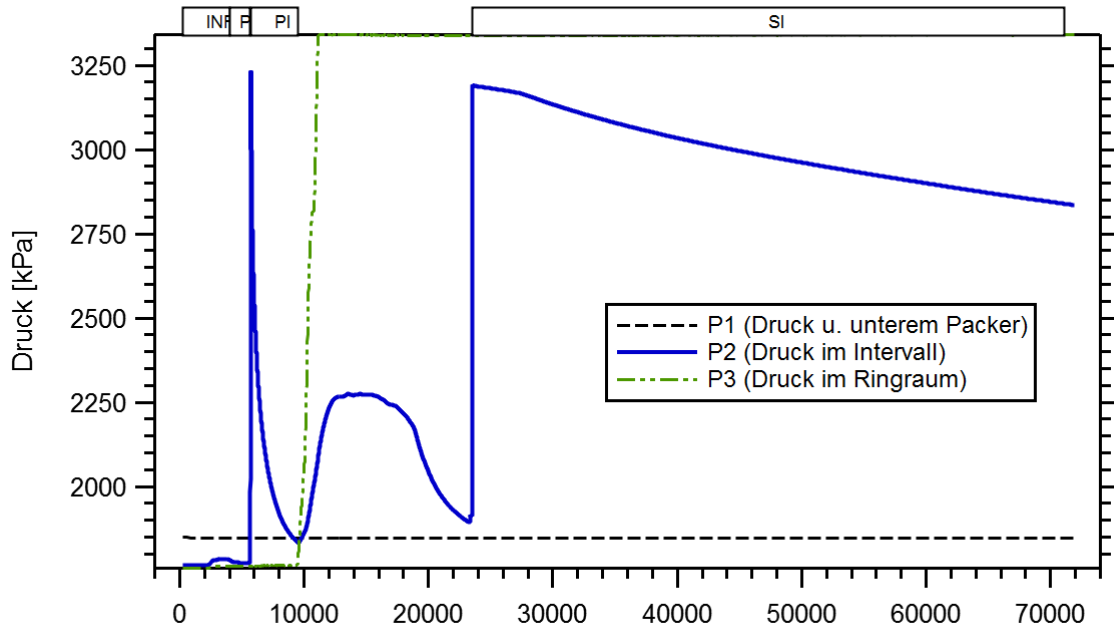
- Markierungsversuche mit Farbtracer im Injektionswasser zur Bestimmung von Fliesspfaden, Kluftweiten und Kluftvolumen
- Alternativ: Versuche mit Temperaturgradienten als Tracer. Da die natürlichen Gradienten zu klein sind, kann mit aufgeheiztem oder gekühltem Wasser/Sole injiziert werden. Die Temperaturdifferenzen im Testbohrloch sowie in den Beobachtungsbohrlöchern könnten mittels Temperaturmessung entlang eines Glasfaserkabels orts aufgelöst gemessen werden, was eine Bestimmung der einzelnen permeablen Horizonte erlaubt.

Die Fragen zu den Randbedingungen können nur durch Langzeitversuche beantwortet werden. Allenfalls ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit, Langzeitbeobachtungen mit normalen, operativ bedingten Pumpphasen zu kombinieren.

Wir schlagen deshalb vor, in einem ersten Schritt die unterschiedlichen Messverfahren und Versuchsvarianten mit dem Kunden zu diskutieren und so gemeinsam das optimale, an die Problemstellung angepasste weitere Vorgehen zu ermitteln.

## 6. DOKUMENTATION UND AUSWERTUNG DER HYDRAULISCHEN VERSUCHE

### 6.1. S142 Intervall i1 (318.0 – 324.4 m)



Zero of x-axis: Di, 21.05.2019, 11:20:37

Abbildung 6.1.1: Darstellung des Testverlaufs in der Bohrung S142 Intervall i1

Bohrung/Testintervall	Bemerkungen
<b>S142</b> Intervall i1 (318.0 – 324.4 m) $K = 4.6 \cdot 10^{-09} \text{ m/s}$	Packer 2 mit Sitz im Rohr oberhalb Rohrschuh. PI: Eine Anpassung der Typkurve an die Druckdaten ist sehr gut möglich SI: Eine Anpassung der Typkurve an die Druckdaten ist sehr gut möglich Das Ergebnis des SI Tests ist etwa 2.5 Mal kleiner als dasjenige des PI Tests, es sind keine Undichtigkeiten erkennbar

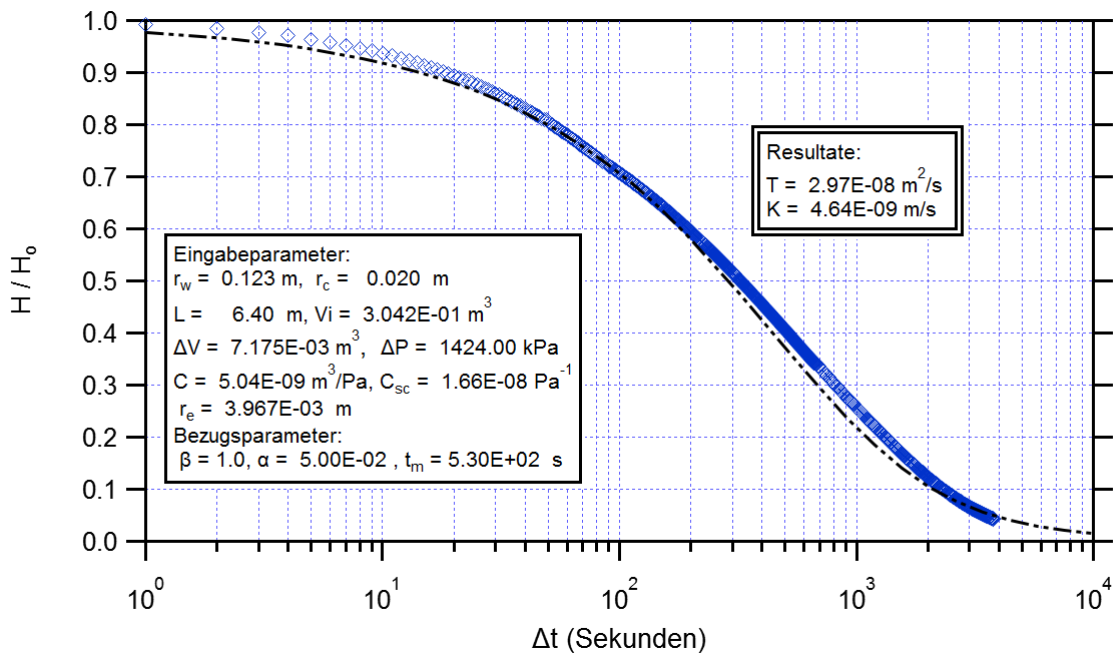


Abbildung 6.1.2: Auswertung des Pulse-Injektionstests PI in der Bohrung S142 Intervall i1

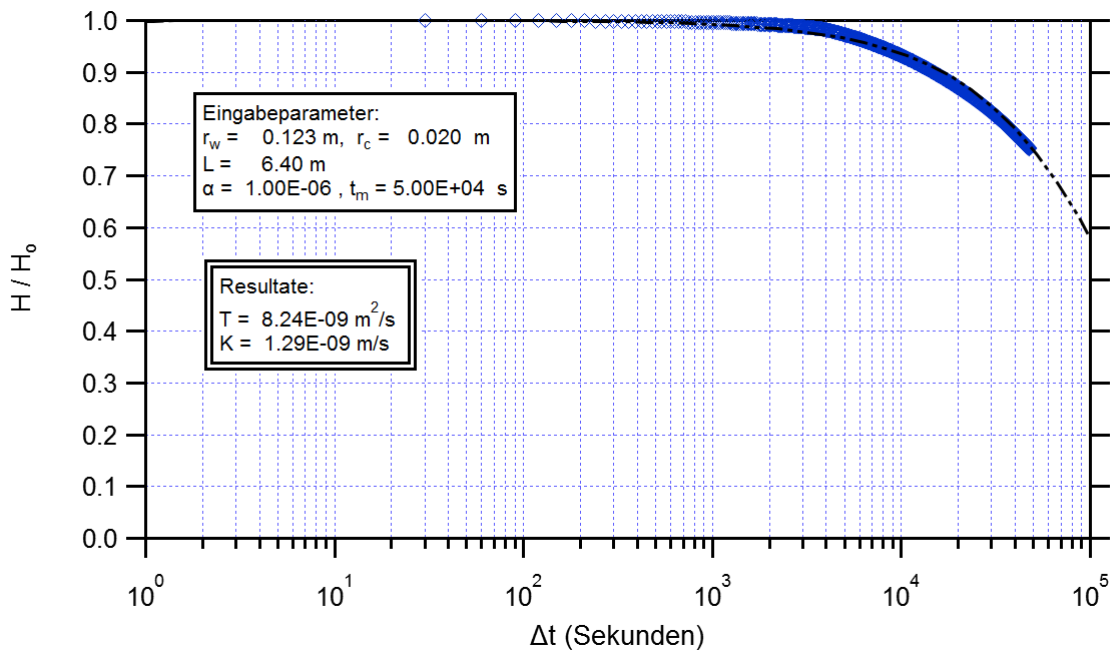


Abbildung 6.1.3: Auswertung des Slug-Injektionstests SI in der Bohrung S142 Intervall i1

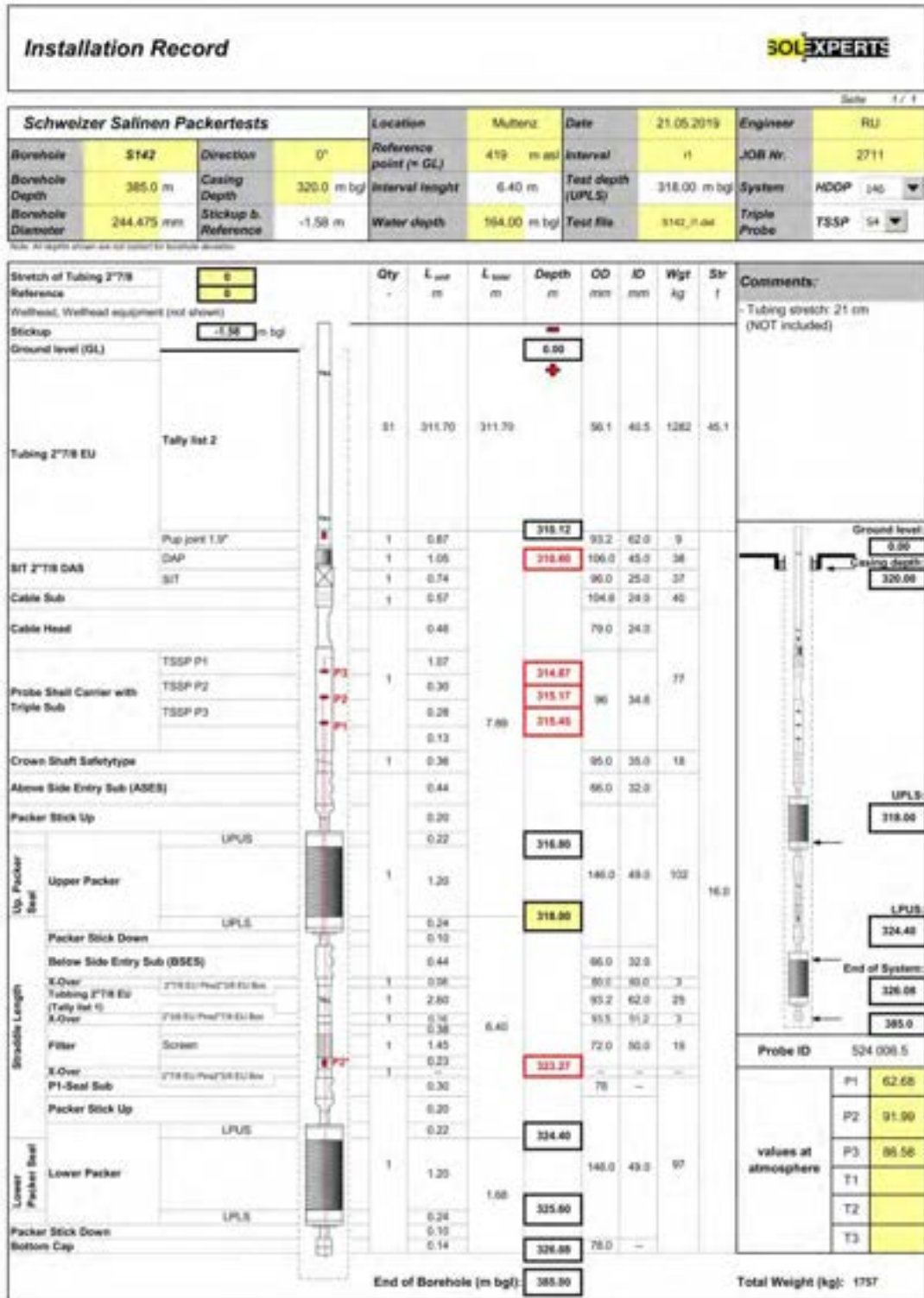
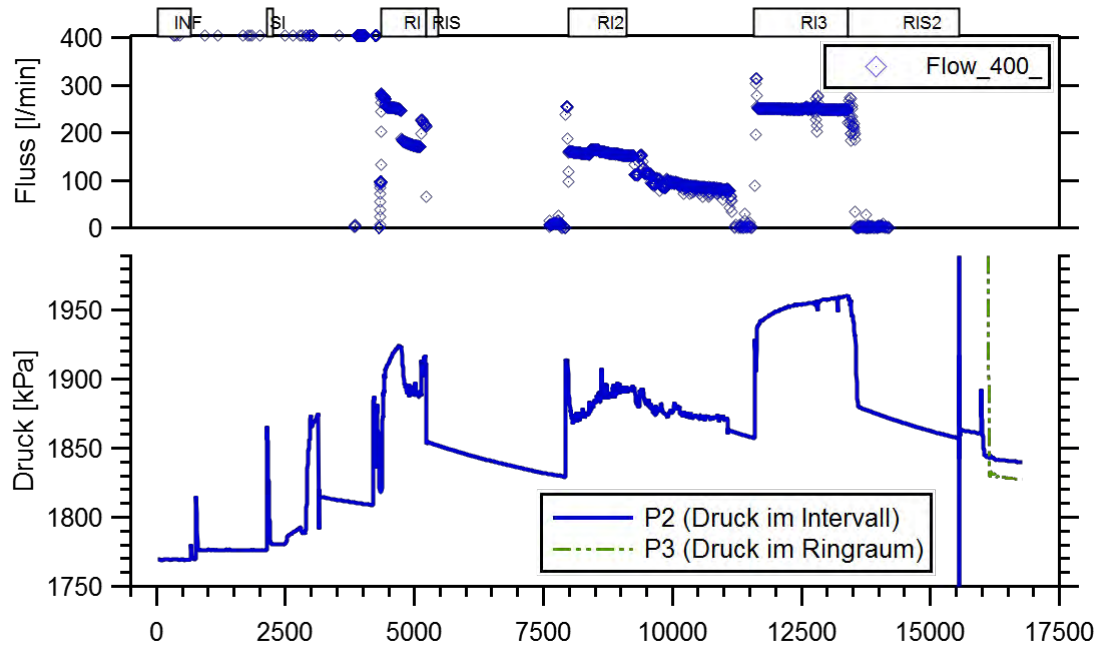


Abbildung 6.1.4: Einbauprotokoll zu S142 Intervall i1

6.2. S142 Intervall i2 (318.0 – 385.0 m)



Zero of x-axis: Mi, 22.05.2019, 07:49:30

Abbildung 6.2.1: Darstellung des Testverlaufs in der Bohrung S142 Intervall i2

Bohrung/Testintervall	Bemerkungen
<p><b>S142</b> Intervall i2 (318.0 – 385.0 m) <b>K = 6.5 · 10<sup>-6</sup> m/s</b></p>	<p>Test wie Intervall i1, aber mit entspanntem unterem Packer (Packer 1) RI/RI3: Hohe Flussraten bis 250 l/min, Transmissivität T von 4.3E-04 m<sup>2</sup>/s für alle Auswertemethoden. Druckerholung mit schnellem anfänglichem Druckabfall Keine Undichtigkeit zum Ringraum (P3)</p>



Steady-state Annäherung für RI		
Eingabeparameter:	RI1	RI3
Pini	1819 [kPa]	1858 [kPa]
P	1889 [kPa]	1960 [kPa]
Fluss	171 [l/min]	248.0 [l/min]
Intervalllänge	67.0 [m]	67.0 [m]
Bohrlochradius	0.122 [m]	0.122 [m]
Zeit, wenn steady state	800 [s]	1820 [s]
Ss	2.00 E-06 [1/m]	2.00 E-06 [1/m]
Resultate:		
Transmissivität (T)	4.1E-04 [m/s <sup>2</sup> ]	4.3E-04 [m/s <sup>2</sup> ]
Durchlässigkeit (K)	6.0E-06 [m/s]	6.5E-06 [m/s]
Radius Einflussbereich	73.7 [m]	115.1 [m]

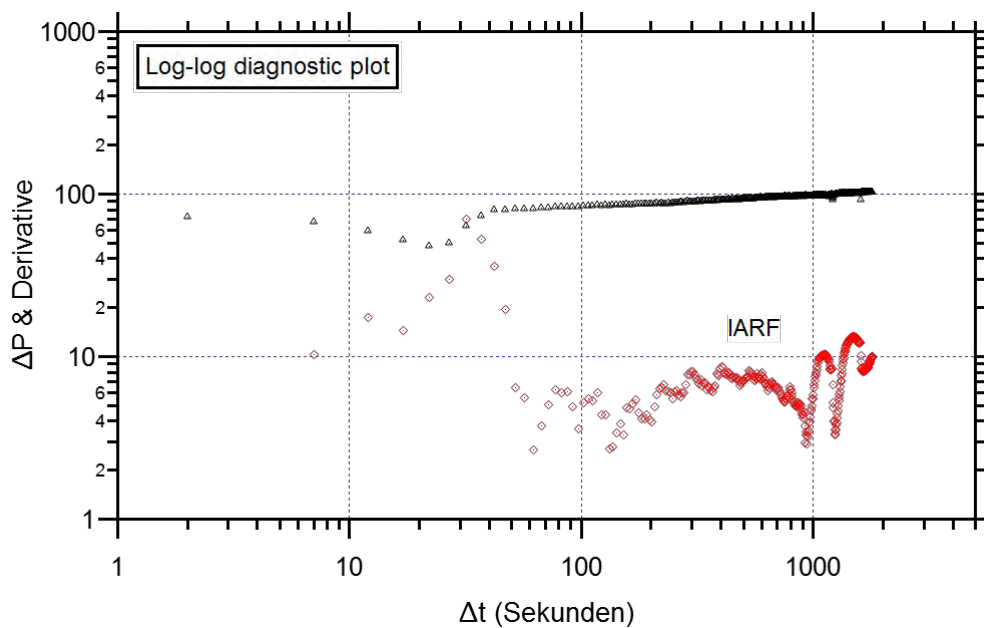


Abbildung 6.2.2: Diagnostischer Plot des Tests RI3 in der Bohrung S142 Intervall i2

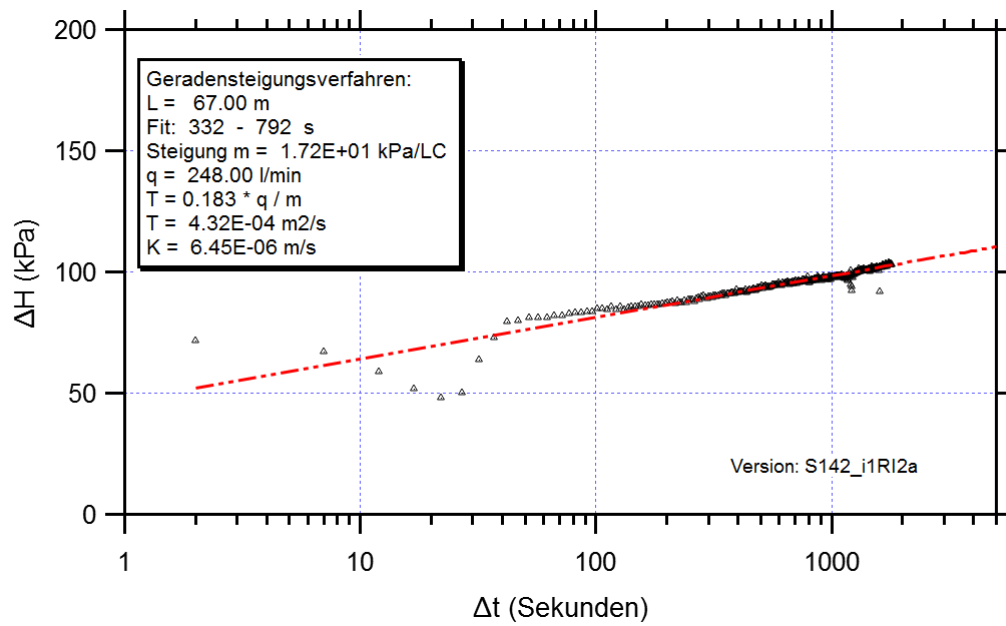


Abbildung 6.2.3: Semilog Plot des Tests RI3 in der Bohrung S142 Intervall i2

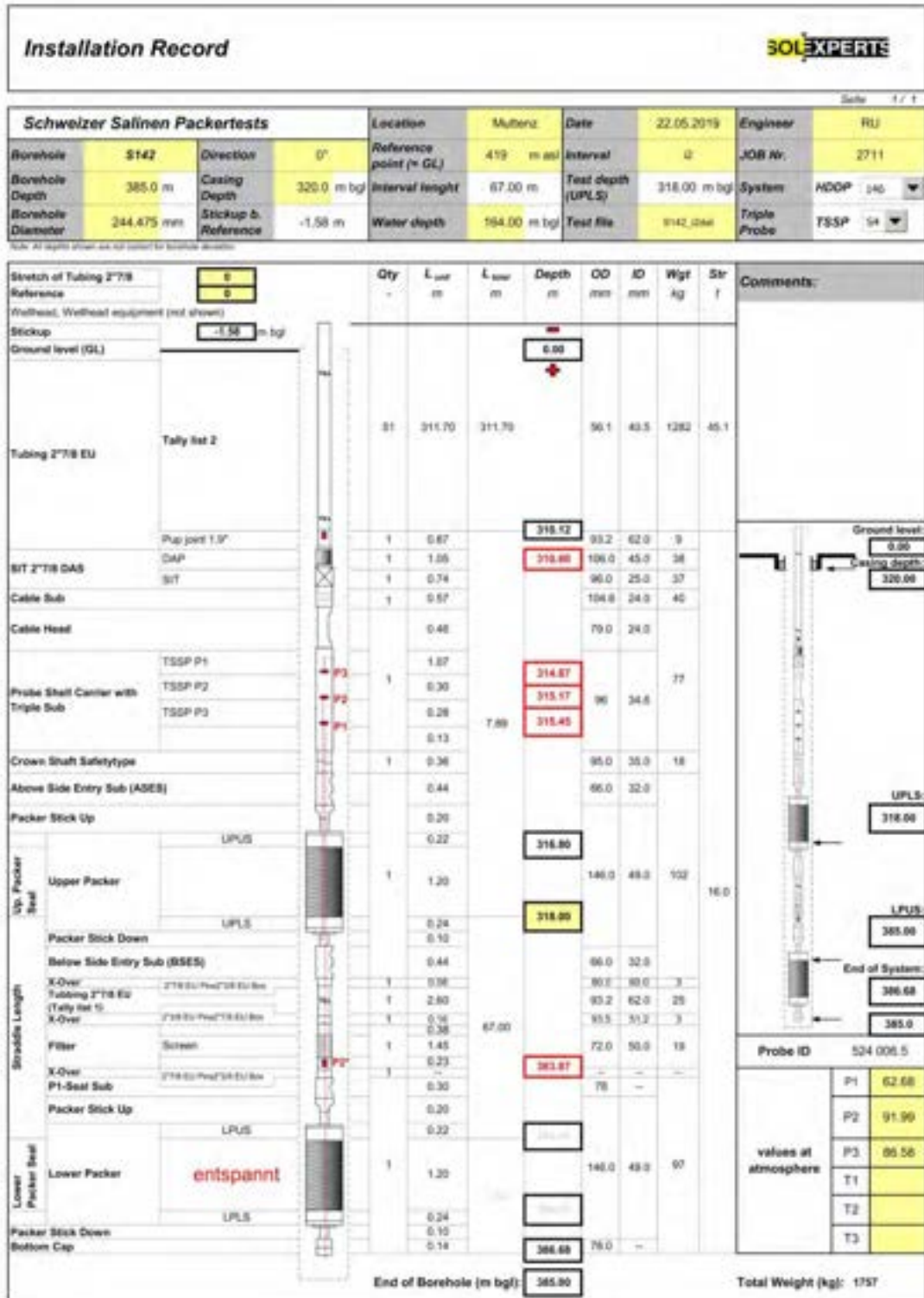


Abbildung 6.2.4: Einbauprotokoll zu S142 Intervall i2

6.3. S141 Intervall i1 (314.0 – 361.0 m)

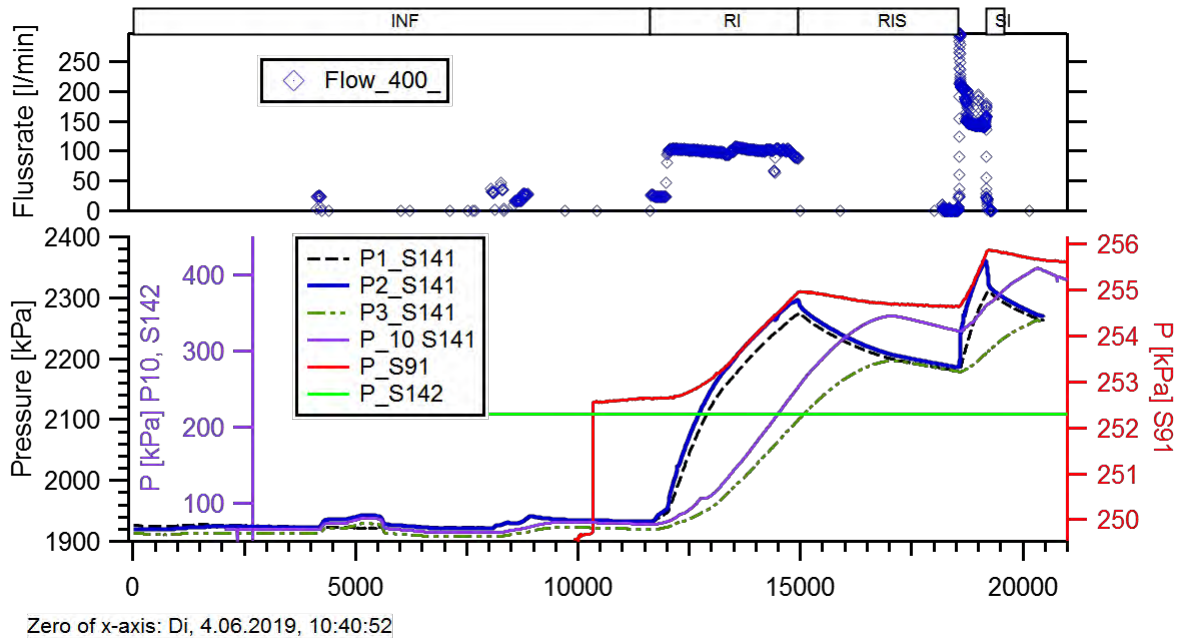


Abbildung 6.3.1: Darstellung des Testverlaufs im in der Bohrung S141 Intervall i1

Bohrung/Testintervall	Bemerkungen
<p><b>S141</b> Intervall i1 (314.0 – 361.0 m) <b>K = 1.8 · 10<sup>-7</sup> m/s</b></p>	<p>RI: Injektion mit 100 l/min im Intervall, verzögerter Druckanstieg im Ringraum (P3 und P10) wegen Umläufigkeit über Gebirge um oberen Packer. Im diagnostischen Plot ist eine mögliche IARF Phase am Ende des Tests erkennbar</p> <p>RIS: keine Auswertung möglich</p> <p>Druckbeobachtung in S91: Leichter Druckanstieg in S91 beobachtbar (2.3 kPa = 23 cm). Auswertung von RIS für die Distanz von etwa 50 m ergibt hohen Speicherkoeffizienten von 1.5E-03 [-] und T von 6E-03 [m<sup>2</sup>/s]</p> <p>Druckbeobachtung in S142: Keine Reaktion beobachtbar.</p>

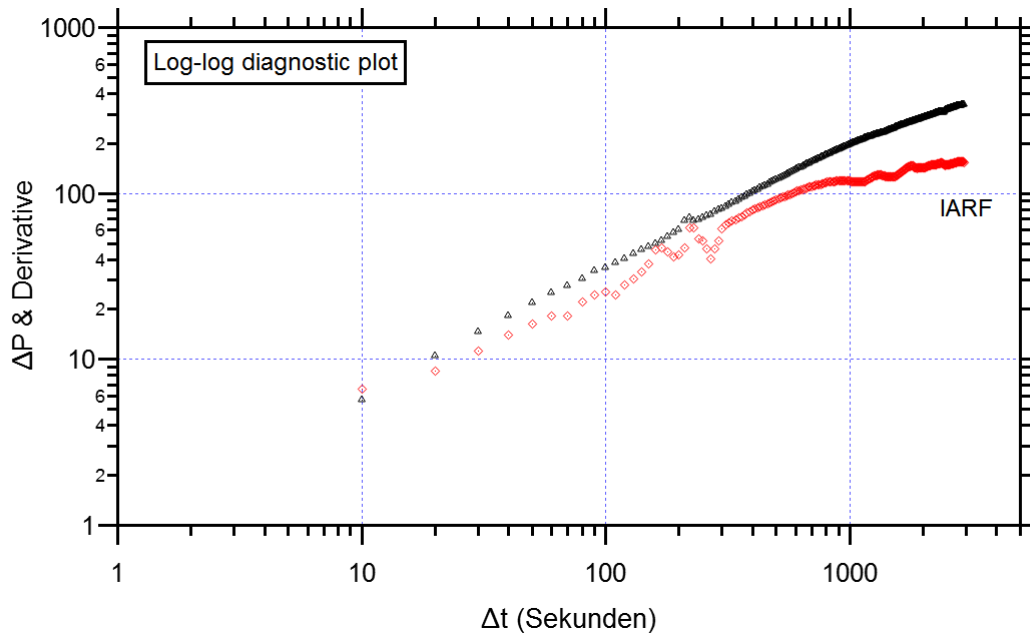


Abbildung 6.3.2: Diagnostischer Plot des Tests RI in der Bohrung S141 Intervall i1

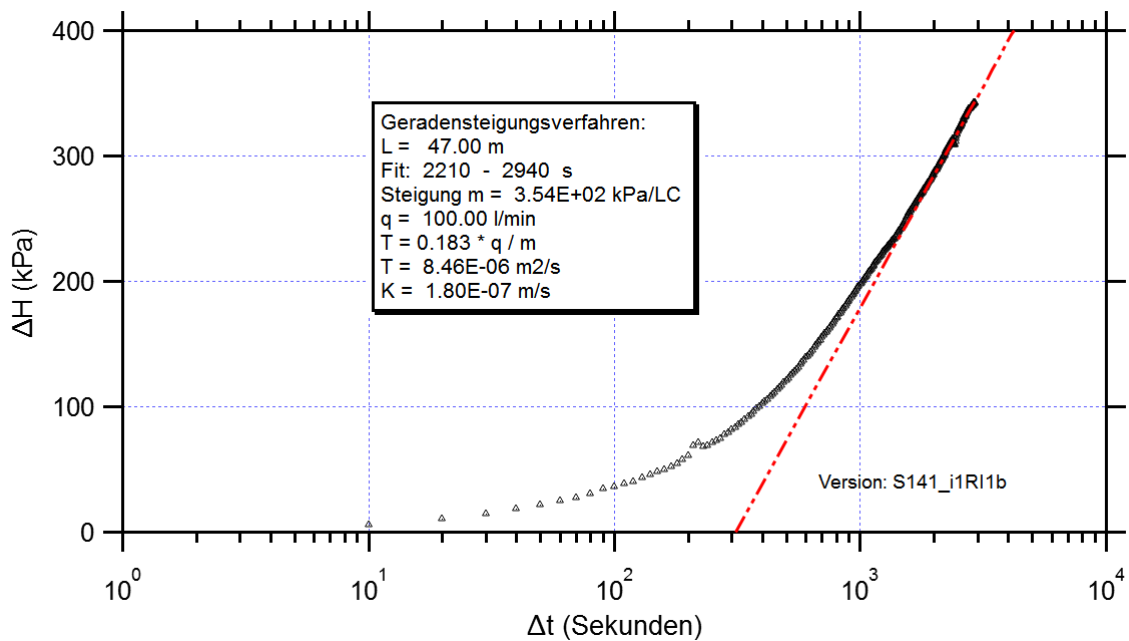


Abbildung 6.3.3: Semilog Plot des Tests RI in der Bohrung S141Intervall i1

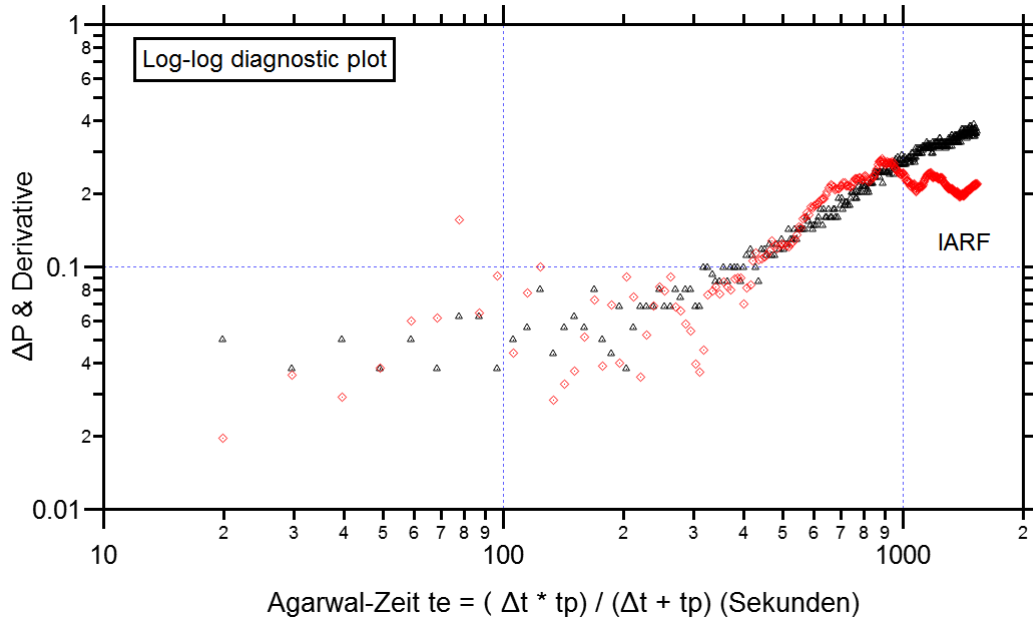


Abbildung 6.3.4: Diagnostischer Plot des Tests RIS in der Bohrung S91 (crosshole)

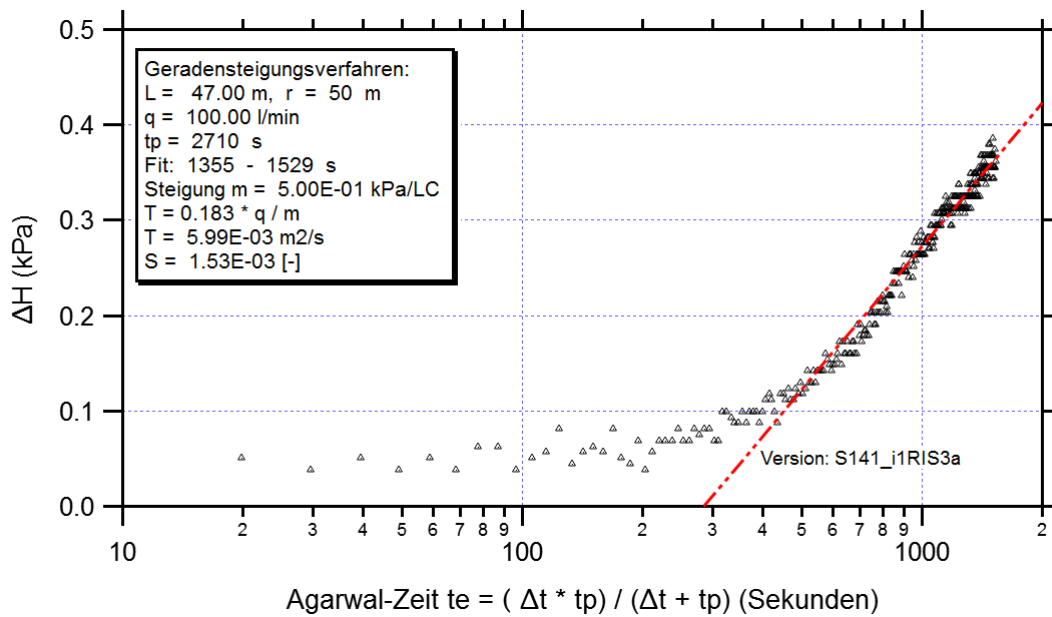


Abbildung 6.3.5: Semilog Plot des Tests RIS in der Bohrung S91 (crosshole)

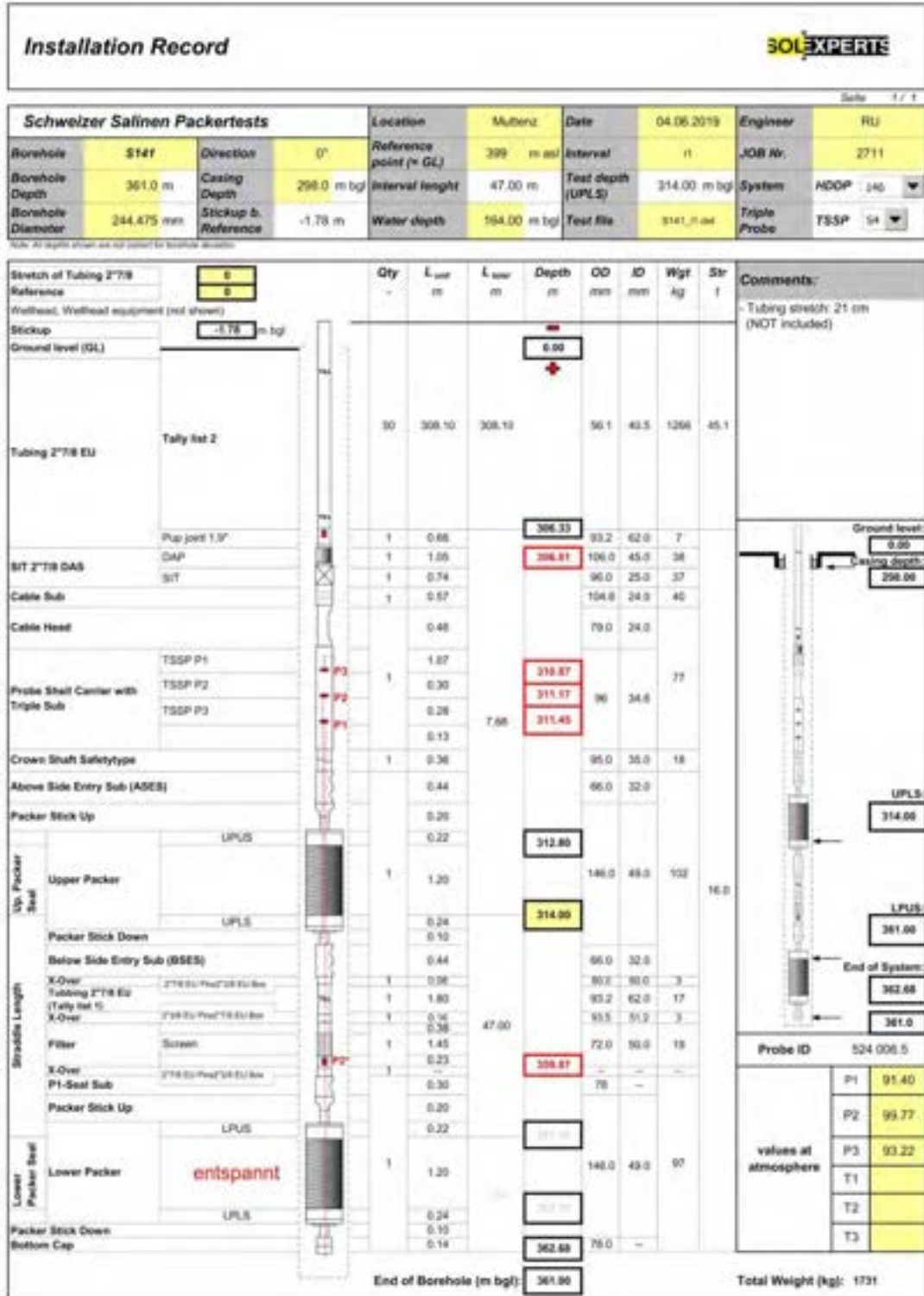


Abbildung 6.3.6: Einbauprotokoll zu S141 Intervall i1

6.4. S141 Intervall i2 (307.0 – 312.6 m)

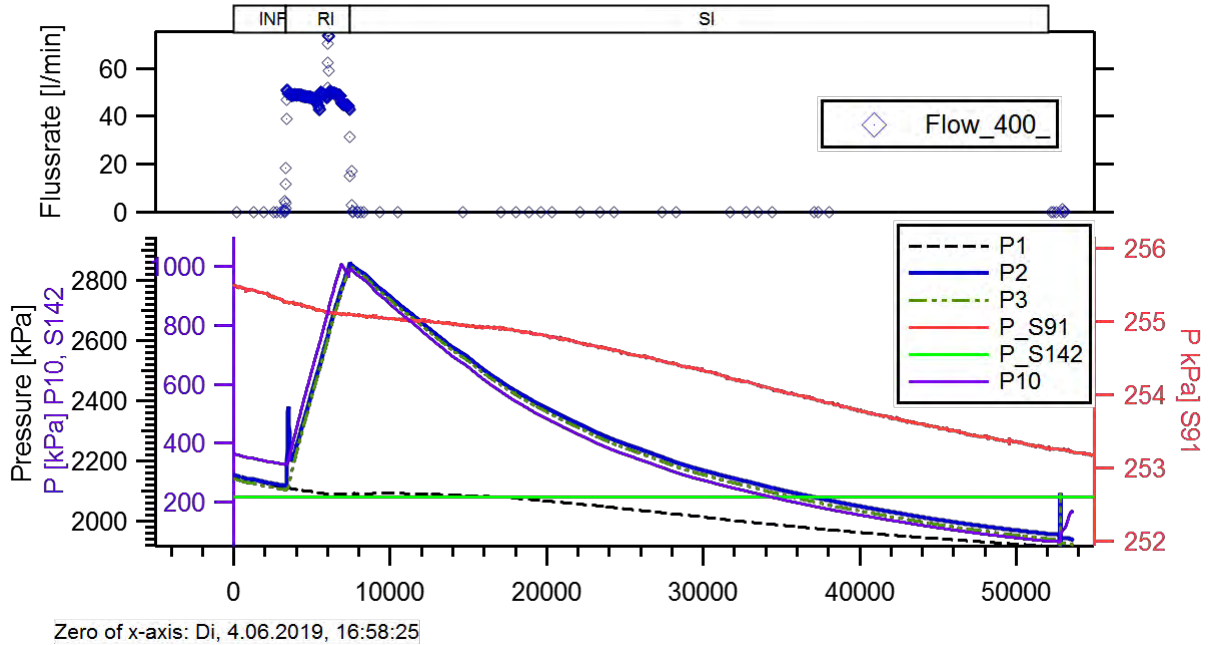


Abbildung 6.4.1: Darstellung des Testverlaufs in der Bohrung S141 Intervall i2

Bohrung/Testintervall	Bemerkungen
<p><b>S141</b> Intervall i2 (307.0 – 312.6 m) <b>K = 1.4 · 10<sup>-8</sup> m/s</b></p>	<p>RI: Auffüllen des Testrohres: sofortige Reaktion im Ringraum (P3), was auf Umläufigkeit im Gebirge hinweist. SI: Auswertung der Druckerholung als SI. Eine Anpassung der Typkurven ist gut möglich. Druckbeobachtung in S142 und S91: Keine Reaktion erkennbar</p>



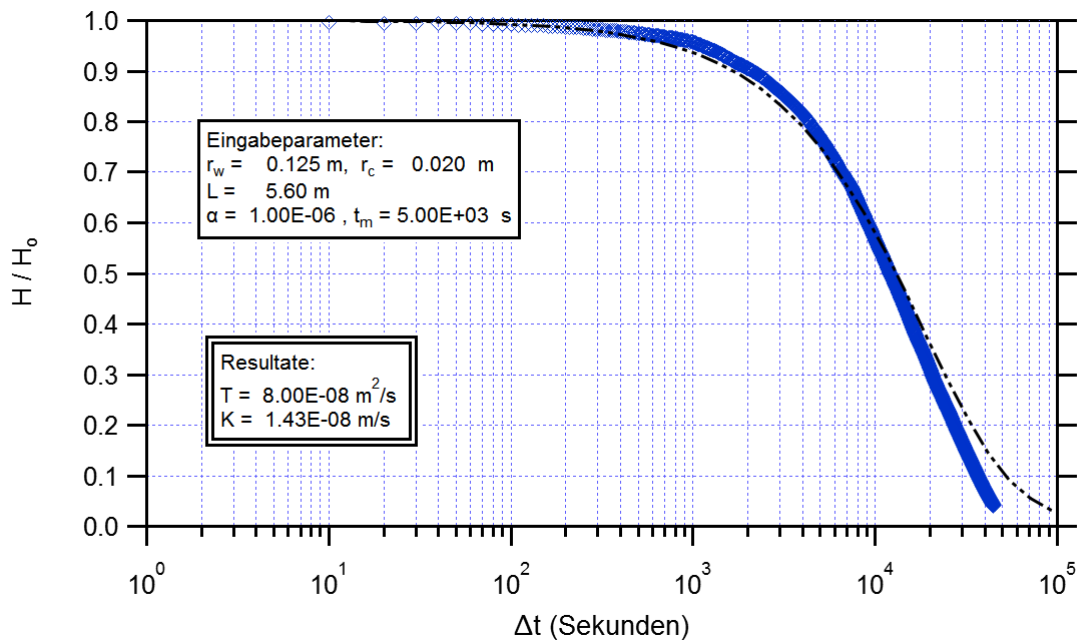


Abbildung 6.4.2: Auswertung des Slug-Tests SI in der Bohrung S141 Intervall i2

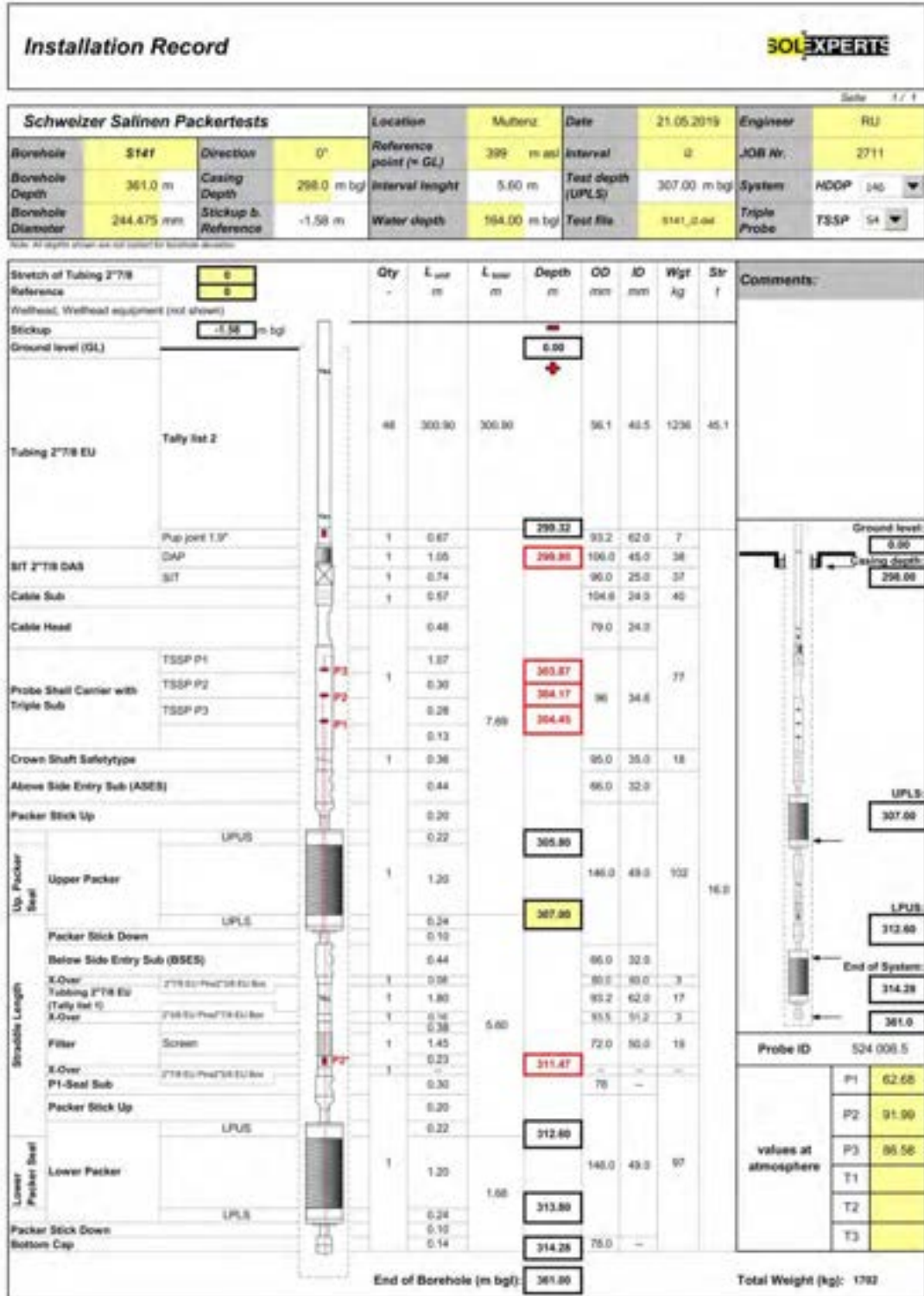


Abbildung 6.4.3: Einbauprotokoll zu S141 Intervall i2

## 7. DOKUMENTATION DER FELDARBEITEN

Datum	Zeit	Aktivität	Wer
20.05.19	07:00	Auf Baustelle, Beginn Einbau, WSP: 164 m	PA, CA, KK
	17:00	PA1 & 2 spannen um Bohrloch zu schliessen, Abfahrt	
21.05.19	07:00	Auf Baustelle	PA, CA
	07:55	Test Sonde 5 P1 : 62.68 kPa P2 : 91.99 kPa P3 : 86.58 kPa PA2 hat 1 bar pro Stunde während die Nacht verloren Einbau fortsetzen	
	11:20	Probe zu tief, neue Datei S142_i1.dat P1 : 1848.80 kPa P2 : 1766.80 kPa P3 : 1759.20 kPa T : 16.93 °C	
	11:24	Tel G. Fuchs, Schweizer Salinen. Anfang mit Rohrschuh Test -> ok	
	11:33	PA1 spannen mit 40 bar	
	11:50	PA2 spannen mit 40 bar	
	12:28	Ventil zu -> PSR	
	12:35	Gestänge füllen, WSP <sub>G</sub> : 12.95 m (Gestänge)	
	12:55	Ventil auf + zu -> PI, WSP <sub>G</sub> : 18.66 m, Δh = 5.71 m Überstand Gestänge : 2.02 m	
	13:49	PI fast fertig, Tel mit G. Fuchs. Ok Rohr mit Wasser füllen + SI im Intervall für 12-14 Std? -> ok	
	13:53	Rohr füllen Start	
	13:59	P2 reagiert	
	14:25	Bohrloch ist voll	
	14:55	10 bar Sensor bei 40 m	
	15:16	PA Telefon mit TT	
	16:33	WSP: 2.50 m, WSP <sub>G</sub> : idem	
	17:45	Ventil auf -> SI, macht nichts, WSP <sub>G</sub> : 18.87 m	
	17:52	Ventil zu + auf -> SI	
	18:00	Abfahrt	
	21:20	Auf Baustelle, WSP <sub>G</sub> : 30.40 m, max Unterschied 5 m/Std -> kein Risiko für die Nacht	
	21:30	Abfahrt Baustelle	
22.05.19	07:00	Auf Baustelle	PA, CA
	07:20	Erster Test ok, PA1 entspannen, i2 318 – 385 m (EP), zuerst SI Wenn zu schnell -> RI	
	07:49	Neue Datei S142_i2.dat P1 : 1846.35 kPa	

Datum	Zeit	Aktivität	Wer
		P2 : 1769.23 kPa P3 : 3339.48 kPa -> Normal Rohr ist voll	
	07:52	Ventil zu -> PSR + Gestänge füllen	
	08:00	Ventil auf -> SI, funktioniert nicht, noch einmal zu + auf	
	08:02	Überdruck zu klein (oder zu schnell), noch einmal	
	08:22	Ventil auf -> SI -> keine Reaktion (Ventil ist immer zu)	
	08:25	Ventil auf SI -> zu schnell -> und zu wenig Überdruck	
	08:31	Versuch SI mit Pumpe (mehr Wasser)	
	08:41	Ventil zu, Vorbereitung RI	
	09:00	Ventil auf -> RI, keine Verbindung mit Flussmeter	
	09:02	Verbindung ok -> Start RI	
	09:16	Kein Wasser mehr und Fluss ist nicht mehr konstant, Test ok -> aber nicht optimal -> Ventil zu + Wasserreservoir füllen (4 m <sup>3</sup> )	
	09:55	Ventil auf -> RI2, nur ~8 l/min.	
	10:02	Ventil zu + auf -> ok	
	10:23	Kann nur ~110 l/min pumpen, Leitung ist deformiert	
	10:25	Ventil voll auf, Pumpleistung nur ~110 l/min	
	10:55	Ventil zu -> RIS2	
	11:02	Probieren ohne Pumpe mit Vakuum (Leitung deformiert) Ventil auf -> RI3	
	11:35	Wasserreservoir ist leer	
	11:53	PA2 entspannen	
	12:08	PA Telefon mit TT: Verschiebung nächste Messungen. Test ok, Beginn Ausbau	
	18:30	Abfahrt Baustelle	
23.05.19	07:05	Auf Baustelle	
	10:00	Abbau fertig ->Material Verschiebung zu S 141	
	12:05	Abfahrt	
03.06.19	07:30	Auf Baustelle, Terratec auf Baustelle, WSP: 144 m (Terratec). Besprechung mit G. Fuchs (Schweizer Salinen) wegen Bohrloch- Durchmesser, max. Tiefe 314 m (Ø~250 mm, Vorab Kalibermessung) i1 : 314 – EP (Einzelpacker) i2 : 308 – 313 m i3 : 303 – 308 m i4 : 297 – 302.5 m + Rohr füllen	PA, CA, SL
	09:54	Test Logger 0.864 bar 22.5 °C	
	10:24	Test Logger ok -> Noch einmal starten	
	14:00	Neue Datei S141_test1.dat P1: 95.07 kPa P2: 100.32 kPa P3: 96.99 kPa T: 34.69 °C	
	14:30	3 Gestänge und System im Bohrloch -> Noch einmal testen +	

Datum	Zeit	Aktivität	Wer
		Packer spannen	
	15:01	New File S141_test2.dat P1: 91.40 kPa P2: 99.77 kPa P3: 93.22 kPa T: 31.86 °C	
	15:05	PA1 & PA2 spannen mit 20 bar	
	15:45	Ventil zu	
	16:00	Abfahrt Baustelle -> Einkauf bei Jumbo (Schlösser)	
	17:00	Abfahrt Jumbo	
	17:35	Auf Baustelle	
	17:45	Abfahrt	
04.06.19	07:00	Auf Baustelle	PA, CA, SL
	08:00	Abfahrt SL -> Muttenz	SL
	08:45	Test nach 25 x 6.5 m P1: 340.96 kPa P2: 343.22 kPa P3: 334.70 kPa T: 13.66 °C	
	10:40	Neue Datei S141_i1.dat P1: 1925.60 kPa P2: 1919.84 kPa P3: 1912.70 kPa T: 17.76 °C	
	10:44	PA2 spannen mit ~40 bar, PA1 nicht spannen	
	10:45	SL zurück -> mit Marco Wilhelm für Logger in S142 & S91	SL
	10:54	WSP: 142.905 m	
	11:15	10 bar sensor @150 m P <sub>10bar</sub> : 65.71 kPa	PA, CA, SL
	11:30	Ventil zu -> PSR	
	11:33	Keine Reaktion -> Ventil noch einmal auf + zu	
	11:50	Gestänge füllen : P1 + P3 reagiert & PA1 und PA2 sind verwechselt -> PA2 entspannen & PA1 spannen mit 40 bar	
	12:22	Ventil auf	
	12:52	Ventil zu -> PSR	
	12:54	Gestänge füllen	
	12:56	Ventil ist nicht zu, undicht?	
	12:58	Ventil auf + zu & Gestänge füllen -> Ventil immer noch nicht zu	
	13:01	Ventil zu mit mehr Druck (200 bar) -> Kein Unterschied	
	13:17	Ventil auf -> nichts -> Ventil funktioniert nicht	
	13:19	Tel Bos Solexperts -> Ein paar Mal Ventil auf + zu -> Während Pumpstest, spülen + zu machen	
	13:41	S142: Logger 47862, WSP: 144.14 (+1.8) m, S91: Logger 47861, WSP: 135.66 m	

Datum	Zeit	Aktivität	Wer
	13:54	RI zuerst mit 20-30 l/min	
	14:00	Mit 100 l/min für mehr Druck	
	14:50	Pumpe aus, Ventil zu -> Druckerholung	
	15:45	Ventil auf -> Pump Test ohne Pumpe, aber keine Vakuum mehr, Ventil ist nicht dicht	
	15:49	Pumpe ein, um Test zu initiieren -> ~SI mit 250 l/min + Vakuum (Flussmeter)	
	16:11	PA1 entspannen -> Verschiebung zu i2	
	16:30	Abfahrt SL	
	16:58	Neue Datei S141_i2.dat P1: 2153.64 kPa P2: 2153.25 kPa P3: 2141.35 kPa T: 16.70 °C P <sub>10bar</sub> : 362.92 kPa	
	17:45	Ventil zu -> nichts -> RI mit 50 l/min	
	19:01	10bar Sensor zu tief -> Verschiebung nach 140 m	
	19:02	Pumpe aus + Ventil auf =~SI	
	19:48	WSP: 48.68 m	
	19:35	Abfahrt	
	05.06.19	07:05	
07:15		PA1 hat Druck verloren -> wieder spannen	
07:29		PA Telefon mit TT wegen Ventil	
07:41		PA1 -> kein Druck mehr. Manschette ist wahrscheinlich kaputt.	
07:46		PA1 & PA2 entspannen + Ausbau	
10:45		Ausbau bis zum PA1 fertig -> PA2 Manschette ist zerstört Ausbau fortsetzen um PA2 zu kontrollieren	
11:35		PA Telefon mit TT, beide Manschetten sind unbrauchbar	
11:45		PA Telefon mit G. Fuchs (Schweizer Salinen), Termin 13:30 auf Baustelle	
12:15		NJ auf Baustelle -> Anhänger bleibt auf Baustelle	
13:30		G. Fuchs auf Baustelle	
14:35		Ende Sitzung: - Ende Messung - Kein weiterer Test mehr (zu gefährlich für Material)	
17:10	Abfahrt Baustelle		
06.06.19	07:05	Ankunft Baustelle	PA, CA
	07:20	S141, WSP : 143.9 m	
	07:35	S142, WSP: 144.23 + 1.38	
	09:07	S91, WSP: 136.0 m	
	10:55	Abfahrt	

PA: Pierrick Altwegg, KK: Karam Kontar, SL: Leo Schwab, CA: Areomar Costa, NJ: Noel Jnglin, Bos: Markus Bosshard, TT: Thomas Trick

---

**Bericht Nr. 2718014.1**

---

**Schweizer Salinen AG, Pratteln**

**Muttenz, Aufarbeitung Sole-Austritt  
Sulzhof (Bohrloch S87)**

**Schlussbericht**

Münchenstein, 9. August 2018

**GEOTEST AG**  
FREILAGER-PLATZ 3  
CH-4142 MÜNCHENSTEIN  
T + 41 (0)61 205 87 50  
F + 41 (0)61 205 87 51  
basel@geotest.ch  
www.geotest.ch

Autor(en)	Bearbeitete Themen / Fachbereiche
Johannes Pietsch	Gesamter Bericht
Supervision	Visierte Inhalte
Felix Bussmann	Gesamter Bericht
Hinweise	

GEOTEST AG

Felix Bussmann

Johannes Pietsch



## Zusammenfassung

Am 13. Juni 2017 kam es im Gebiet Sulz, Gemeinde MuttENZ zu einem 25 m bis 30 m hohen, fontäneartigen Soleaustritt aus dem Bohrloch S87 der Schweizer Salinen AG. Dabei traten schätzungsweise 500 m<sup>3</sup> Sole aus und richteten in der Umgebung des Bohrlochs Schäden an der Bepflanzung der umliegenden Fläche, am Boden und an Flora und Fauna entlang des MuttENZer Dorfbachs an.

Das Bohrloch befand sich zum Zeitpunkt des Austritts im Stand-by-Zustand, war also nicht aktiv und vom Leitungsnetz der Schweizer Salinen AG getrennt. In Erwartung anstehender Arbeiten und Messungen am Bohrloch war dieses zum Zeitpunkt der Havarie unverschlossen.

Während und insbesondere auch nach dem Ereignis wurden verschiedene Massnahmen zur Eindämmung, Erfassung und Behebung der Schäden ergriffen. Das Vorgehen zur Behebung der Schäden wie auch zur Ursachenfindung wurde zwischen der Schweizer Salinen AG, der Gemeinde MuttENZ und dem Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft abgestimmt.

In Folge des Ereignisses wurden verschiedene Untersuchungen zur Ursachenklärung durchgeführt. Insbesondere wurden das Bohrloch und die Kaverne von S87 untersucht, die mit S87 verbundene Kaverne S88 und die Kaverne S141, die im Vorfeld des Soleaustritts Auffälligkeiten gezeigt hatte. Ein Zusammenhang zwischen S141 und dem Soleaustritt aus S87 konnte jedoch schliesslich ausgeschlossen werden und auch die durchgeführten Nivellementmessungen, mit denen die Umgebung auf mögliche Senkungen hin untersucht werden sollte, zeigten keine Auffälligkeiten.

Eine zur Erstellung einer externen Expertise beauftragte Firma konnte auf Basis der verschiedenen Untersuchungsergebnisse den Soleaustritt auf das plötzliche Eindringen von aus Produktionszeiten in der Kaverne verbliebenem Stickstoff in das Bohrloch zurückführen. Dabei führte das plötzliche Aufsteigen des unter Druck stehenden Stickstoffs zu einer Vermischung mit Sole, deren Dichte folglich abnahm und schliesslich mit der Sole zusammen über das Bohrloch aufsteigen und an der Oberfläche fontäneartig austreten konnte.

Auslöser des plötzlichen Stickstoffzutritts in das Bohrloch dürften entweder Nachbrüche im Kavernendach oder Nachsoleffekte durch einen Frischwasserzufluss in die Kaverne gewesen sein.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	8
2.	Verwendete Unterlagen .....	9
3.	Ausgangslage .....	14
3.1	Lokalität.....	14
3.2	Geologie.....	16
3.2.1	Allgemeine Situation .....	16
3.2.2	Lokale Schichtfolge.....	16
3.2.3	Salzlager in S87, S88 und Vergleich mit Umgebung.....	20
3.3	Produktionsgeschichte S87 und S88 .....	22
3.3.1	Hohlraumvermessungen 1998 und Hohlraumentwicklung bis 2000.....	23
3.3.2	Entwicklung zwischen 2000 und Produktionsende 2009.....	25
3.3.3	Hohlraumentwicklung zwischen 2000 und 2017.....	26
3.4	Ereignisse vor dem 13. Juni 2017.....	29
3.4.1	Oberflächlicher Einsturz am 26.05.2010.....	29
3.4.2	Geplante Hohlraumvermessung S87 und S88 .....	29
3.4.3	Oberflächliche Einstürze ca. einen Monat vor dem Soleaustritt.....	30
3.4.4	Druckabfall in S141 .....	31
4.	Sole-Austritt vom 13.06.2017.....	32
4.1	Chronologie des Ereignisses .....	32
4.2	Gaszusammensetzung .....	35
4.3	Überwachung nach dem 13. Juni 2017 .....	37
4.4	Zusammenarbeit .....	37
5.	Schäden/ Bewältigung .....	39
5.1	Schäden .....	39
5.2	Schadensbewältigung.....	39
5.2.1	Boden.....	39
5.2.2	Dorfbach.....	41
5.2.3	Bepflanzung und Vegetation.....	42
5.2.4	Sonstige Massnahmen .....	43
6.	Ursachenanalyse .....	45
6.1	Zusammensetzung des mit der Sole ausgetretenen Gases.....	45

6.2	Hohlraumvermessungen .....	46
6.2.1	Aufbohrarbeiten und Hohlraumvermessung in S87 .....	47
6.2.2	Aufbohrarbeiten und Hohlraumvermessung in S88 .....	48
6.3	Cement-Bond-Logging .....	49
6.4	Pumpversuche .....	49
6.5	Nivellementmessungen .....	49
7.	Resultate .....	51
7.1	Messungen der Gaszusammensetzung .....	51
7.2	Hohlraumvermessungen .....	51
7.2.1	Sole/ Wasser-Grenze in Bohrlöchern S87 und S88 .....	51
7.2.2	Kavernengeometrie und Hohlraumentwicklung .....	52
7.3	Cement-Bond-Logging .....	52
7.4	Pumpversuche .....	53
7.5	Nivellementmessungen .....	58
8.	Externe Expertisen .....	59
8.1	Erklärungsmodell der Firma DEEP .....	59
9.	Diskussion .....	62
10.	Konsequenzen .....	64
10.1	Inventar Bohrlochköpfe .....	64
10.2	Arbeitsanweisung Stand-by .....	65
10.3	Überwachungskonzept .....	65
10.4	Risikoanalyse .....	66

**Anhänge**

- 1 Situation Bohrungen Stand 2017, 1:5000
- 2 Geologische Karte 1:10 000
- 3 Übersichtsprofil inkl. Ausbau S87
- 4 Übersichtsprofil inkl. Ausbau S88
- 5 Querprofile 1:500, Kaverne S87
- 6 Querprofile 1:500, Kaverne S88
- 7 Fotodokumentation oberflächlicher Einsturz am 26.05.2010 nahe S87
- 8 Horizontal- & Querschnitt 1:1000 Einsturz vom 26.05.2010
- 9 Wasser-, Sole- und Blanketdruck S141 (01.01.2017 bis 21.06.2017)
- 10 Chronologie der Massnahmen, Arbeiten und Besprechungen zwischen Ereignis und Wiederinbetriebnahme des Bohrlochs S141 am 18.09.2017
- 11 Resultate der Gasmessungen durch IFRB vom 13.06.2017
- 12 Resultate der Gasmessungen durch Hydroisotop, Prüfbericht
- 13 Protokolle der Krisensitzungen der Gemeinde Muttenz
- 14 Geschädigte Soleaustritt Sulzhof
- 15 Fotodokumentation oberflächliche Einstürze ca. einen Monat vor dem Soleaustritt
- 16 Zustandsaufnahme der Baumvegetation entlang des Dorfbachs in Muttenz nach dem Soleaustritt vom 11.08.2017
- 17 Sicherheitsdispositiv Hohlraumvermessung S87 (Schweizer Salinen AG, 27.06.2017)

## Beilagen

- 1 Detailprofile Salzlager S87 und S88, 1:500
- 2 2.1) Messbericht Kavernenvermessung S87, Vollvermessung, 17.08.2017  
2.2) Messbericht Kavernenvermessung S88, Vollvermessung, 07.09.2017  
2.3) Messbericht Kavernenvermessung S141, Vollvermessung, 29.06.2017
- 3 3.1) Bericht (Risikoanalyse) der Geotechnisches Institut AG zur Schlammverpressung in den Kavernen S85, S86 und S89 vom 08.10.2014  
3.2) Bericht (ergänzende Abklärungen) der Geotechnisches Institut AG zur Schlammverpressung in Kavernen S85 bis S90 vom 14.07.2015
- 4 Bericht zur bodenkundlichen Baubegleitung, Vogt Planer, 28.08.2017
- 5 5.1) Senkungsmessung Gebiet Wartenberg, Muttenz, Pratteln; Rapp Infra AG, 28.09.2016  
5.2) Senkungsmessungen Gebiet Wartenberg/ Sulz, Muttenz – Gebietsmessung Sulz nach Solwasserausbruch; Rapp Infra AG, 28.06.2017  
5.3) Senkungsmessungen Gebiet Wartenberg, Muttenz, Pratteln; Rapp Infra AG, 09.11.2017
- 6 6.1) Untersuchungsbericht zur Videobefahrung in der Bohrung S87 in Muttenz, Bohrfeld Sulz, terratec geophysical services, 26.07.2017  
6.2) Untersuchungsbericht zur zweiten Videobefahrung in der Bohrung S87 in Muttenz, Bohrfeld Sulz, terratec geophysical services, 08.08.2017
- 7 Messbericht Cement-Bond-Logs in den Bohrungen S85 bis S91 Sulz, Muttenz; terratec geophysical services, 07. – 08.09.2016, inkl. Messprofile.
- 8 8.1) Untersuchungsbericht des Sole-Gas Ausstroms der Firma DEEP Underground Engineering, 24.08.2017  
8.2) Addendum zum Untersuchungsbericht des Sole-Gas Ausstroms der Firma DEEP Underground Engineering, 01.11.2017
- 9 Situationsplan (Orthofoto) der durch das Ereignis betroffenen Parzellen im Massstab 1:500 aufgenommen per Drohnenbefliegung am 15.06.2017 durch Jermann Ingenieure + Geometer AG im Auftrag der Gemeinde Muttenz, 21.06.2017.
- 10 Bericht über die Überwachung der Salzkonzentration mit 3 Beilagen; Pfirter, Nyfeler + Partner AG, 22.08.2017

## 1. Einleitung

Am 13. Juni 2017 kam es morgens um ca. 09:30 Uhr im Gebiet Sulz, Gemeinde Muttenz zur Havarie eines stillgelegten Bohrlochs der Schweizer Salinen AG (interne Bezeichnung S87). Dabei trat über einen mehrstündigen Zeitraum ein Sole-Gas-Gemisch aus dem Bohrloch aus. Zunächst fand der Austritt in Form einer 25 m bis 30 m hohen Fontäne statt. Mit zunehmender Zeitdauer des Ereignisses nahm dessen Intensität ab hin zu periodischen Sole-Gas-Austritten und schliesslich reinen Gas-Austritten. Gemäss Schätzungen der Schweizer Salinen AG traten im Zuge dieses Ereignisses insgesamt ca. 500 m<sup>3</sup> Sole aus S87 aus.

Während und insbesondere auch nach dem Ereignis wurden verschiedene Massnahmen zur Eindämmung, Erfassung und Behebung des entstandenen Schadens ergriffen. In mehreren Sitzungen wurde das weitere Vorgehen zwischen der Schweizer Salinen AG, der Einwohnergemeinde Muttenz, dem Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft (AUE) sowie der Staatsanwaltschaft des Kantons Basel-Landschaft abgestimmt. Neben der Behebung des entstandenen Schadens war insbesondere die Ursachenklärung des Ereignisses Ziel der in der Folgezeit stattfindenden Arbeiten der Schweizer Salinen AG. In diesem Rahmen wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt resp. In Auftrag gegeben und Expertisen eingeholt. Neben der Kaverne des betroffenen Bohrlochs S87 wurden auch die Kavernen des benachbarten Bohrlochs S88 sowie des Bohrlochs S141 untersucht, da sie während der Salzproduktionsphase zusammen mit S87 betrieben wurden (S88) beziehungsweise Auffälligkeiten im Vorfeld des Ereignisses gezeigt hatten (S141).

Die GEOTEST AG wurde am 06. Juni 2018 beauftragt den vorliegenden Bericht zu erstellen. Dieser Bericht soll eine abschliessende Schadensaufnahme liefern sowie die durchgeführten Massnahmen zur Schadensbehebung und Arbeiten zur Ursachenklärung auflisten. Die durch diese Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse sollen zusammengestellt und eine abschliessende Interpretation der Ereignisursache aufgezeigt werden. Schlussendlich dienen die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit dem Prozessverständnis und sollen helfen, vergleichbare Schadensereignisse zukünftig zu verhindern.

## 2. Verwendete Unterlagen

Zur Erstellung des vorliegenden Berichts wurden folgende Unterlagen berücksichtigt:

### Fotodokumentation Schweizer Salinen AG

- [1] Fotodokumentation oberflächlicher Einsturz am 26.05.2010 nahe S87
- [2] Fotodokumentation oberflächliche Einstürze ca. einen Monat vor dem Soleaustritt
- [3] Fotodokumentation Ereignis (13.06.2017)
- [4] Fotodokumentation Abhumusieren betroffene Fläche, Lagerung des abgetragenen Humus und Bodenmaterials
- [5] Fotodokumentation Kirschbäume vom 19.06.2017
- [6] Fotodokumentation Bohrköpfe Sulz (22.06.2017 sowie 24. bis 25.07.2017)
- [7] Fotodokumentation Druckablass aus S87 am 28.06.2017

### Berichte

- [8] Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen (02.06.1980). Saline Schweizerhalle, Sondierbohrung 79, Geologischer Bericht.
- [9] Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen, Hauber, L. (24.03.1986). Produktionsbohrungen S85 – 92, Geologischer Bericht.
- [10] Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen, Hauber, L. (14.08.1989). Produktionsbohrungen S108 – 114, Geologischer Bericht.
- [11] Geotechnisches Institut AG (08.10.2014). Schweizer Salinen AG, Bohrfeld Sulz, Etappe 2 – Schlammverpressung in den bestehenden Kavernen S85, S86 und S89, Risikoanalyse.
- [12] Geotechnisches Institut AG (14.07.2015). Schweizer Salinen AG, Bohrfeld Sulz, Etappe 2 – Schlammverpressung Kavernen S85 bis S90, ergänzende Abklärungen.
- [13] Vogt Planer (28.08.2017). Schweizer Salinen AG, Soleaustritt Sulzhof MuttENZ, Sanierung Boden – Dokumentation Stand vom 28. August 2017.
- [14] DEEP Underground Engineering GmbH (24.08.2017). Solegewinnungskaverne S87, Untersuchung des Sole-Gas Ausstroms vom 13.06.2017.
- [15] DEEP Underground Engineering GmbH (01.11.2017). Solegewinnungskaverne S87, Addendum zum Untersuchungsbericht des Sole-Gas Ausstroms vom 13.6.2017.

### Aktennotizen, Mails

- [16] Schweizer Salinen AG (27.06.2017). Sulz 87 – Sicherheitsdispositiv Hohlraumvermessung.
- [17] Schweizer Salinen AG (06.07.2017). Planung Aufbohrarbeiten S87 (PROVISORISCH).
- [18] Schweizer Salinen AG (25.07.2017). Soleaustritt Sulz S87 – Chronologie Massnahmen.
- [19] Schweizer Salinen AG (18.09.2017). Massnahmenplan – Soleaustritt Sulz S87. Nr. 04/18.09.2017 (inkl. vorige Versionen: 22.06.2017, 25.07.2017, 10.08.2017, 05.09.2017).
- [20] Gemeinde MuttENZ (undatiert). Liste der Geschädigten Soleaustritt Sulzhof.
- [21] Eichenberger, M. (11.08.2017). Beurteilung der Folgen des Salzwasserunfalls vom 13.6.2017 auf die Baumvegetation entlang des Dorfbach in MuttENZ.
- [22] Mailverkehr zwischen B. Willinger (Schweizer Salinen AG) und M. Eichenberger (Revierförster) bzgl. einer zweiten Zustandsaufnahme der Baumvegetation entlang des Dorfbachs in MuttENZ.

### Sitzungsprotokolle

- [23] Gemeinde MuttENZ (19.06.2017). Betreff: Soleaustritt Sulzhof. Datum, Zeit: Freitag 16. Juni 2017, 07.00 Uhr. Ort: Gemeindeverwaltung MuttENZ.
- [24] Gemeinde MuttENZ (26.06.2017). Betreff: Soleaustritt Sulzhof. Datum, Zeit: Freitag 23. Juni 2017, 07.00 Uhr. Ort: Gemeindeverwaltung MuttENZ.
- [25] Gemeinde MuttENZ (05.07.2017). Betreff: Soleaustritt Sulzhof. Datum, Zeit: Mittwoch 5. Juli 2017, 06.30 Uhr. Ort: Gemeindeverwaltung MuttENZ.
- [26] Gemeinde MuttENZ (26.07.2017). Betreff: Soleaustritt Sulzhof. Datum, Zeit: Mittwoch 26. Juli 2017, 07.00 Uhr. Ort: Gemeindeverwaltung MuttENZ.

### Messergebnisse

#### *Gasmessungen*

- [27] Industriefeuerwehr Regio Basel AG (13.06.2017). Ausdruck Resultate der Analysesoftware Calcmet.
- [28] Hydroisotop GmbH (10.07.2017). Prüfbericht Nr. 300939 – 300940.



#### *Salzkonzentrationsmessungen*

- [29] Pflirter, Nyfeler + Partner AG (22.08.2017). 4132 MuttENZ, Sulzhof, Sole-austritt, Bericht über die Überwachung der Salzkonzentration mit 3 Beilagen.

#### *Hohlraumvermessungen*

- [30] Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH (09.11.2000). Echo-Log Schweizerhalle S87 2. Messung.
- [31] Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH (09.11.2000). Echo-Log Schweizerhalle S88 2. Messung.
- [32] Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH (17.10.2016). Echo-Log Schweizerhalle S87 3. Messung (Messversuch).
- [33] Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH (17.10.2016). Echo-Log Schweizerhalle S87 3. Messung (Messversuch).
- [34] Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH (17.08.2017). Echo-Log Schweizerhalle S87 4. Messung (Vollvermessung).
- [35] Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH (07.09.2000). Echo-Log Schweizerhalle S88 4. Messung (Vollvermessung).
- [36] Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH (29.06.2017). Echo-Log Schweizerhalle S141 1. Messung (Vollvermessung).

#### *Kamerabefahrungen*

- [37] Untersuchungsbericht zur Videobefahrung in der Bohrung S87 in MuttENZ, Bohrfeld Sulz, terratec geophysical services, 26.07.2017.
- [38] Untersuchungsbericht zur zweiten Videobefahrung in der Bohrung S87 in MuttENZ, Bohrfeld Sulz, terratec geophysical services, 08.08.2017.

#### *Cement-Bond-Log*

- [39] Bohrlochmessungen in den Bohrungen S85 – S91 Sulz, MuttENZ, Schweiz; terratec geophysical services, 07. – 08.09.2016, inkl. Messprofile.

#### *Nivellementmessungen*

- [40] Rapp Infra AG (28.09.2016). Schweizer Salinen AG, Technischer Bericht 2016, Senkungsmessung Gebiet Wartenberg, Muttenz, Pratteln. Bericht-Nr. 4061.2003\_2016.
- [41] Rapp Infra AG (28.06.2017). Schweizer Salinen AG, Technischer Bericht 2017 (Teilmessung Sulz), Senkungsmessungen Gebiet Wartenberg/ Sulz, Muttenz – Gebietsmessung Sulz nach Solwasserausbruch. Bericht-Nr. 4061.203\_2017\_1.
- [42] Rapp Infra AG (09.11.2017). Schweizer Salinen AG, Technischer Bericht 2017, Senkungsmessungen Gebiet Wartenberg, Muttenz, Pratteln. Bericht-Nr. 4061.203\_2017WB\_2.

#### *Drohnenvermessung*

- [43] Jermann Ingenieure + Geometer AG (21.06.2017). Gemeinde Muttenz, Schadenfall Salzlauge, Sulzhof, Parzellen 2849, 2861 und 8271, Situationsplan 1:500. Auftrags-Nr. 37.1.0012.

#### Plangrundlagen Schweizer Salinen AG

- [44] Übersicht Bohretappen Sulz
- [45] Plan Salzbasis (24.07.2017)
- [46] Plan Salzmächtigkeit (24.07.2017)
- [47] Plan Salzdach (24.07.2017)

#### Verschiedene Kostenzusammenstellungen und Rechnungen, u.a.:

- [48] Rechnung Volkswirtschafts- und Gesundheitsdirektion des Kantons Basel-Landschaft, Spezialfinanzierung Fischhege vom 03.08.2017.
- [49] Rechnung Kohler Beat und Heinz, Sulzhof vom 16.12.2017.

#### Produktionsdaten

##### *Bohrprofile*

- [50] Geologisches Bohrprofil S87
- [51] Bohrprofil mit Angaben Ausbau S87
- [52] Geologisches Detailprofil Salzlager S87
- [53] Geologisches Bohrprofil S88

- [54] Bohrprofil mit Angaben Ausbau S88
- [55] Geologisches Detailprofil Salzlager S88
- [56] Geologisches Bohrprofil S79
- [57] Geologisches Detailprofil S79
- [58] Geologisches Bohrprofil S109
- [59] Geologisches Detailprofil S109

#### *Bohrlochlebensläufe*

- [60] Lebenslaufordner S87
- [61] Lebenslaufordner S88
- [62] Lebenslaufordner S141

#### *Produktionsmengen*

- [63] Zusammenstellung der Bohrlöcher/ Salzabbau in t, Produktionsmengen  
Bohrfeld Sulz

#### *Druckdaten*

- [64] Druckmessungen Bohrlöcher S108, S110, S112 bis S114, S125 bis S129,  
S131 bis S137 sowie S141 bis S150

#### Literatur und Karten

- [65] Bitterli-Brunner, P., Fischer, H., Herzog, P. (1984): Blatt 1067 Arlesheim.  
*Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Karte 80.*
- [66] Widmer, T. (1991). Zur Stratigraphie und Sedimentologie der Anhydrit-  
gruppe (Mittlere Trias) in der Region Liestal-Arisdorf (Baselland, Nord-  
westschweiz). *Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie,*  
79.

### 3. Ausgangslage

#### 3.1 Lokalität

Die Bohrung S87 gehört zum Bohrfeld Sulz der Schweizer Salinen AG. Das Bohrfeld liegt südöstlich von MuttENZ, direkt südlich Grosszinggibrunn zwischen Sulz-Eigentelweg und Eigentelstrasse (Abbildung 1, Anhang 1). Das Bohrfeld liegt in Hanglage (Neigung im Bereich S87 ca. 8°/ 14% Richtung Nordwest).

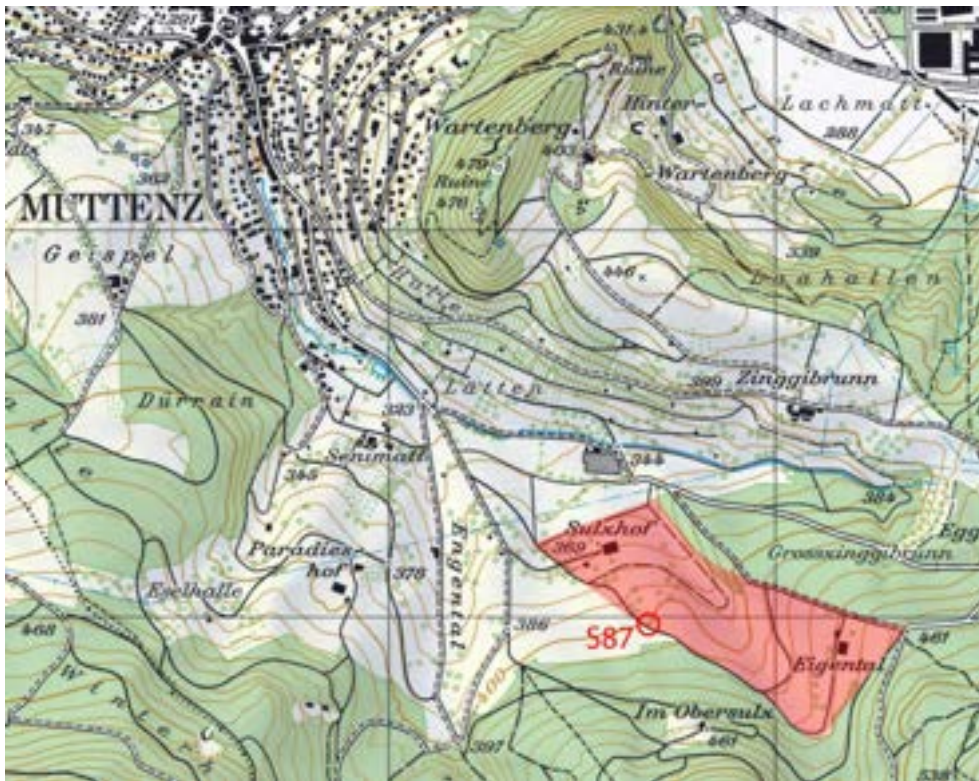


Abbildung 1: Lage des Bohrfelds Sulz (rot) südwestlich von MuttENZ mit Bohrung S87.

Das Bohrfeld Sulz umfasst 25 Bohrungen (S80 bis S92, S108 bis S114, S125 bis S129). Zum Zeitpunkt des Soleaustritts-Ereignisses wurde noch in zwei dieser Bohrungen Salz produziert (S113, S125; zum heutigen Zeitpunkt (Juli 2018) wird in den beiden Bohrungen kein Salz mehr produziert). Drei Bohrungen (S80, S81 und S82) sind verschlossen, der Rest ist im Stand-by-Zustand (Anhang 1). Die nahegelegene Bohrung S141 gehört bereits zum Bohrfeld Grosszinggibrunn. Beide Bohrfelder gehören zum Standort Schweizerhalle der Schweizer Salinen AG.

Sämtliche Bohrungen liegen auf dem Gebiet der Gemeinde Muttenz. Die Bohrungen hangaufwärts von S85 sowie die Bohrung S84 liegen auf Parzellen der Schweizer Salinen AG (Parz. Nr. 2861 und 2875), die Bohrungen S80 bis S83 liegen auf der Parzelle 8271 der Herren Kohler (Sulzhof).

Die Bohrung S87 liegt auf Parzelle 2861 der Schweizer Salinen AG nahe des Sulz-Eigentalswegs an einem Feldweg zur Bohrung S88 (Abbildung 2).



Abbildung 2: Lage der Bohrung S87, Parzellengrenzen und Umgebung oberhalb des Sulzhofs (geoview.bl.ch).

## 3.2 Geologie

### 3.2.1 Allgemeine Situation

Das Bohrfeld Sulz liegt am nördlichen Rand des Schweizer Tafeljuras. Die Schichten fallen im Tafeljura leicht nach Süden ein und werden stellenweise von rheintalisch (SSW-NNE) streichenden Brüchen verworfen. Im Gegensatz zum südlich gelegenen Faltenjura sind die Schichten im Tafeljura nicht wesentlich durch den Fernschub der alpinen Orogenese beeinflusst worden und liegen autochthon auf prämesozoischen Gesteinen. Die Genese des nördlich des Bohrfelds gelegenen Adlerhofgewölbes ist noch nicht abschliessend geklärt.

Im Bereich des Bohrfelds Sulz fällt das Salzlager mit rund 4° nach SSW ein. Gegen Westen und Osten scheinen einige Verwerfungen das Bohrfeld zu begrenzen, die jedoch nur nördlich am Wartenberg bzw. bei Zinggibrunn ausstreichen. Im Bohrfeld selbst sind keine grösseren Verwerfungen bekannt [65] (Anhang 2).

Die Bohrungen setzen in der Staffelegg-Formation (in Anhang 2 noch als „Lias“ bezeichnet) oder der Keuper-Gruppe an und durchteufen diese sowie den Hauptteil der darunter liegenden Muschelkalk-Gruppe. Die lokale Schichtfolge kann Abbildung 3 entnommen werden.

### 3.2.2 Lokale Schichtfolge

Sowohl S87 als auch S88 setzen in der Staffelegg-Formation an [9]. Während in S87 unterhalb einer 6 m mächtigen Quartären Bedeckung („Gehängelehm“) noch das mergelig, tonige Frick-Member („Obtuston“) erbohrt wurde, setzt S88 direkt im kalkigen Beggingen-Member („Arietenkalk“) an.

Die Keuper-Gruppe, welche unter der Staffelegg-Formation folgt, wird in zwei Formationen unterteilt. Die obere ist die Klettgau-Formation, deren oberstes Member (Belchen-Member, früher als „Rhät“ bezeichnet) zumindest in S88 sicher ausgetrennt werden konnte. Unter den Sandsteinen des Belchen-Members wurden Mergel des Gruhalde-Members („Obere Bunte Mergel“) erbohrt, die normalerweise nach unten einen zunehmenden Dolomitgehalt aufweisen, bevor sie in das dolomitische Gansingen-Member übergehen. Im Übergangsbereich zwischen Gruhalde- und Gansingen-Member wurden während einer Kamerabefahrung am 26.07.2017 in S87 Wasserzutritte durch Löcher in der Bohrlochverrohrung festgestellt. Unter dem Gansingen-Member folgt erneut eine mergelige Partie, die jedoch lokal Sandsteinrinnen aufweist (Ergolz-Member, „Schilfsandstein“). Insgesamt fungiert die

Klettgau-Formation als Grundwasserstauer, Wasserführung kann im Gansingen-Member sowie in den Rinnensandsteinen des Ergolz-Members vorkommen.

Der untere Teil der Keuper-Gruppe wird von der Bänkerjoch-Formation („Gipskeuper“) gebildet. Es handelt sich um Gips- und Tonfolgen. In den erbohrten Tiefen liegt der Gips oft als Anhydrit vor. In Bohrung S88 wurde die Basis der Bänkerjoch-Formation nicht sicher erbohrt, da es im unterliegenden Muschelkalk zu starken Spülverlusten kam.

In S87 wurde die Grenze zur Schinznach-Formation (ehemals „Oberer Muschelkalk“) mit dem Übergang zu den Dolomiten des Asp-Members („Lettenkohle“) angetroffen (früher zum Keuper gezählt). In S87 wurde auch das dolomitische und oft verkarstete Stenberg-Member („Trigonodusdolomit“) angetroffen während in S88 dort bereits totale Spülverluste das Heben von Bohrklein verhinderten. Aus dem unter den Dolomiten folgenden „Hauptmuschelkalk“ konnten in beiden Bohrungen kein Bohrklein geborgen werden (totaler Spülungsverlust). Aufgrund der topographisch erhöhten Lage der Bohrungen ist die Verkarstung offenbar vergleichsweise hoch. Die Kalke und Dolomite der Schinznach-Formation fungieren als regionaler (Karst-)Aquifer.

Sowohl für S87 als auch für S88 liegen keine Informationen über den oberen Teil der Zeglingen-Formation („Mittlerer Muschelkalk“ oder „Anhydritgruppe“) vor. Dieser Teil besteht normalerweise im obersten Bereich aus einer meist ca. 10 m mächtigen Dolomitfolge („Dolomitzone“ nach Widmer, 1991 [66]). Gegen unten schalten sich in den Dolomit zunehmend Calciumsulfate (im erbohrten Tiefenbereich normalerweise Anhydrit) ein („Dolomit-dominierte Schichten“ und „Übergangsschichten“ nach [66]), bevor eine massive Anhydritbank die Folge gegen unten abschliesst („Obere Anhydritschichten“ nach [66]). Die Schichten unterhalb der „Dolomitzone“ und oberhalb des Salzlagers werden als „Obere Sulfatzone“ bezeichnet. Die im Top des Salzlagers, unterhalb der „Oberen Anhydritschichten“ vorkommenden Ton- und Anhydritbrekzien werden je nach Bearbeiter noch zur „Oberen Sulfatzone“ oder bereits ins Salzlager gestellt.

Die gebirgsmechanische Auslegung der Laugungskavernen ist so konzipiert, dass allein die Obere Sulfatzone sowie das Dach des Salzlagers als tragende Schichten über den Kavernen fungieren. Alle darüber liegenden Formationen werden als Auflast in entsprechende gebirgsmechanische Kalkulationen eingerechnet.

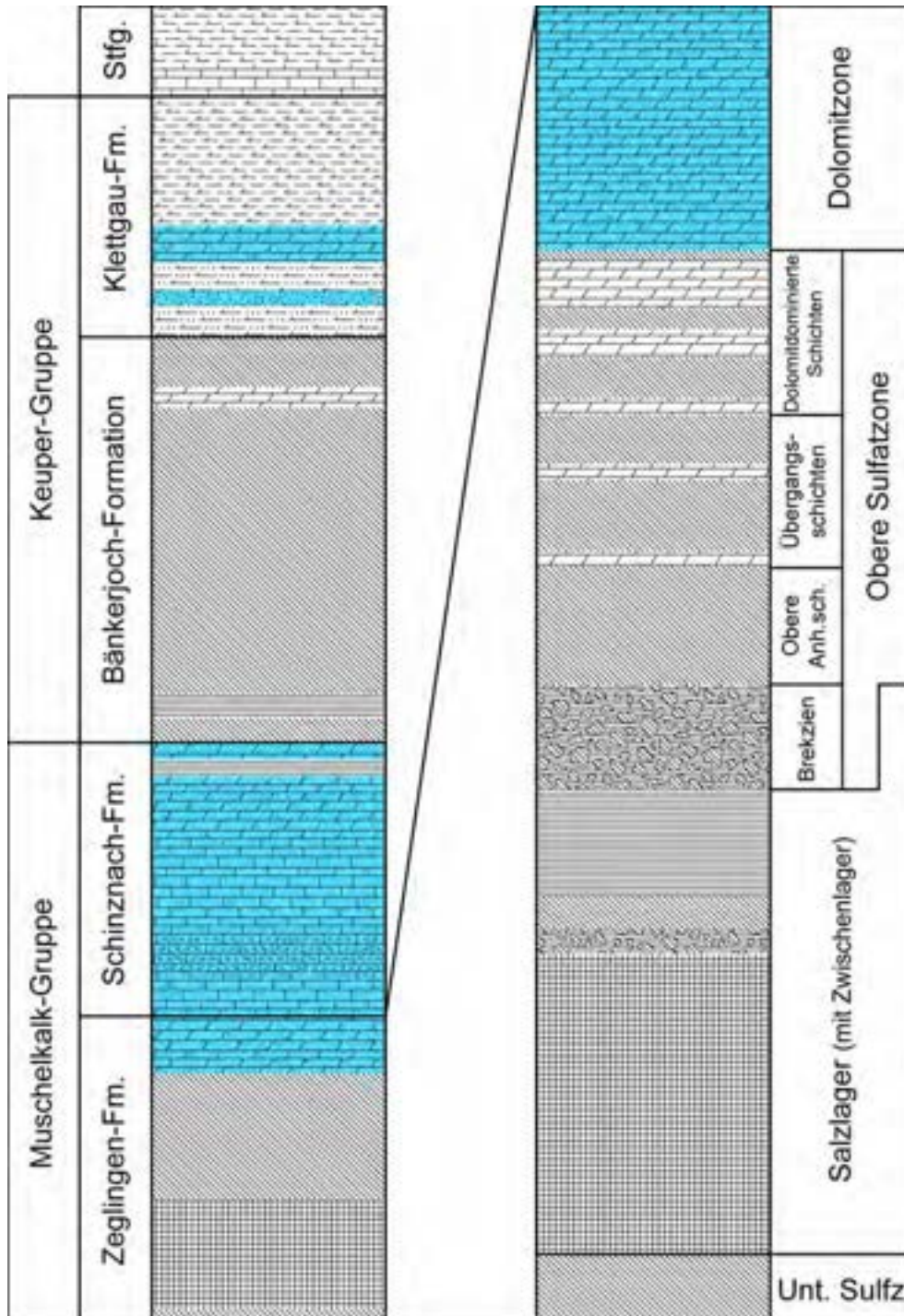


Abbildung 3: Schematisches lithostratigraphisches Übersichtsprofil des Gebiets Sulz/ Eigentäl.  
 Blaue Flächen: Wasserführung möglich. Stfg. = Staffelegg-Formation, Obere Anh. sch. = Obere Anhydritschichten, Unt. Sulfz. = Untere Sulfatzone.



Das Salzlager ist sowohl vertikal als auch lateral heterogen aufgebaut. Einzelne Zwischenlagen aus massivem Anhydrit oder Anhydrit- und Ton-Brekzien können stellenweise über mehrere Bohrungen verfolgt werden. In der Region Liestal wurde von Widmer eine Gliederung in „Obere“ und „Untere Salzschieben“ aufgestellt [66]. Diese Zweiteilung kann in vielen Bohrungen der Nordwestschweiz festgestellt werden und ist auch in S87 und S88 erkennbar. Eine detailliertere Beschreibung des Salzlagers in der Umgebung von S87 und S88 folgt im nächsten Kapitel.

Die Basis des Salzlagers wird meist von einem „Salzton“ gebildet, einem dunklen Ton mit rötlichen Salzeinsprenglingen.

Unter dem Salzlager folgt die sogenannte „Untere Sulfatzone“, die mit oft weniger als 10 m wesentlich geringmächtiger ist als die Obere und die Zeglingen-Formation gegen die unterliegende Kaisten-Formation abgrenzt. Diese wurde weder in S87 noch in S88 erbohrt. Von einer möglichen Wasserführung in einer eventuell verkarsteten Dolomitzone abgesehen, fungiert die Zeglingen-Formation als Grundwasserstauer.

Übersichtsprofile der erbohrten Geologie und des dokumentierten Ausbaus der beiden Bohrungen S87 und S88 finden sich in Anhang 3 und 4. Die Darstellung des Ausbaus der beiden Bohrungen orientiert sich dabei an den Informationen des geologischen Profils im geologischen Bericht zu den beiden Bohrungen [9]. Ein im Jahr 2016 durchgeführtes Cement-Bond-Logging in den beiden Bohrungen (siehe Kapitel 6.3 bzw. 7.3 und Originalbericht der Firma terratec in Beilage 7) zeigte jedoch eine Zementation bis 180 m Teufe (S87) bzw. 235 m Teufe. Dies bedeutet, dass mindestens im Bereich der Oberen Sulfatzone die Verrohrung durch eine durchgehende Zementation hinterfüllt ist. Eine höher reichende Zementation dürfte aufgrund von Verlusten in der verkarsteten Schinznach-Formation (Oberer Muschelkalk) praktisch unmöglich gewesen sein.

### 3.2.3 Salzlager in S87, S88 und Vergleich mit Umgebung

Das Salzlager wurde von T. Widmer 1991 für die Region Liestal wie folgt von oben nach unten unterteilt [66]:

Obere Brekzien \*  
Obere Salzschieben  
Untere Anhydritschichten  
Untere Brekzien  
Untere Salzschieben

\* von manchen Bearbeitern bereits in die darüber folgende Obere Sulfatzone gestellt

Die beiden Salzschieben entsprechen dabei dem oberen und unteren Salzlager, die Unteren Anhydritschichten und Unteren Brekzien dem Zwischenlager gemäss Saline-interner Benennung.

Detailprofile des Salzlagers für S87 und S88 [9] finden sich in Beilage 1.

Das Salzlager kann als Folge von Ablagerungen in sehr flachen und nur sporadisch vom Meer überfluteten, randmarinen Becken angesehen werden. Durch Verdunstung in einem ariden Klima kommt es zu einer Übersättigung des in den Becken befindlichen Wassers an gelösten Stoffen, die schliesslich mit fortschreitender Evaporation in einer bestimmten Folge ausfallen: Calciumkarbonat (Kalk, oft schnell in Dolomit umgewandelt), Calciumsulfate (Gips, durch spätere Versenkung des Gesteins in Anhydrit umgewandelt), Halit, Bittersalze. Ein Zustrom weniger gesättigten Wassers kann also z.B. zu einem Wechsel von der Halit-Ausfällung zur Gips-Ausfällung führen. Das Salzlager des Mittleren Muschelkalks der Nordschweiz besteht praktisch nur aus Halit und kaum bis keinen Bittersalzen. Sowohl Calciumsulfate als auch Salze sind leicht wasserlöslich.

Die Unteren Anhydritschichten werden als Folge einer marinen Transgression angesehen, infolge derer es zur Gipsausfällung kam. Untere und Obere Brekzien können als syndimentäre Lösungsbrekzien angesehen werden, also als Resultat einer während der Ablagerung stattfindenden Lösung bereits abgelagerten Materials im oberflächennahen Untergrund. Während der Ausfällung des Halits können marine Ingressionen zur Verdünnung des Wassers und damit verbundener Ausfällung von Gips führen. Durch äolischen Transport wird Ton in die Becken eingetragen. Eine gewisse Verunreinigung des Salzes ist also über das gesamte Salzlager zu finden, beschränkt sich jedoch im Bereich der beiden Salzschieben auf wenige Prozent (S87: 1-5%). Durch syndimentäre oder früh postsedimentäre Lösung können verschiedene Schichtabschnitte lokal fehlen.

Sowohl in S87 als auch in S88 kann das Salzlager in Obere und Untere Salzsichten unterteilt werden. Der Übergang von Oberen Brekzien zum Oberen Salzlager (Top Salz) konnte in S88 aufgrund der Spülverluste nicht festgestellt werden. Bei Umstellung auf Kernbohrung war die Bohrung bereits in den Oberen Salzsichten. Die Oberen Salzsichten sind in beiden Bohrungen weit weniger rein als die Unteren Salzsichten. In S87 schwankt der Salzgehalt in den Oberen Salzsichten zwischen 75% und 95%, in S88 zwischen 65% und 99%. Die Oberen Salzsichten sind in S87 5 m mächtig und in S88 mindestens 12 m mächtig.

Das Zwischenlager wurde in S87 bei von 336.5 m bis 338.5 m ab OKT durchteuft, bei S88 bei 338 m bis 340 m ab OKT. Sowohl Mächtigkeit, als auch lithologischer Aufbau und Tiefenlage (Top bei ca. 63 m ü. M.) des Zwischenlagers sind in beiden Bohrungen also annähernd gleich. Das Zwischenlager wird von unten nach oben aus einer knapp einen Meter mächtigen, brekzierten Mergelschicht, Steinsalz mit Anhydrit und schliesslich einer rund 20 cm mächtigen Anhydritschicht aufgebaut. Ob die letztere den Unteren Anhydritschichten entspricht oder ob diese lokal fehlen, kann nicht bestimmt werden.

Auch die Unteren Salzsichten ähneln sich in S87 und S88 sehr. Sie sind in beiden Bohrungen ca. 22 m mächtig, ihre Basis liegt in beiden Bohrungen bei ca. 39 m ü. M. Das Salzlager ist zwischen S87 und S88 also als horizontal liegend anzunehmen. Die höhere Gesamtmächtigkeit des Salzlagers (ohne Obere Brekzien) in S88 ist auf das Fehlen der obersten Schichten der Oberen Salzsichten in S87 zurückzuführen. In beiden Bohrungen ist über dem Zwischenlager zunächst eine ca. 2 m mächtige Salzsicht mit mergeligen Verunreinigungen festgestellt worden, gefolgt von wieder reineren Salzsichten (Salzgehalt in S87: 95%, in S88: 98% bis 99%). Über diesen Schichten enden in S87 bereits die Oberen Salzsichten und mindestens 6.35 m mächtige Brekzien folgen. In S88 folgt über einer 0.5 m mächtigen Anhydrit-Mergelschicht erneut eine mindestens 6.5 m Wechselfolge aus Salz, Anhydrit und Brekzien. Diese Schichten liegen in S87 vermutlich aufgrund früher Lösung nicht vor. Das Salzdach liegt damit in S87 bei ca. 68 m ü. M., in S88 über 75 m ü. M.

Die zwischen S87 und S88 gute Korrelierbarkeit des Salzlagers nimmt nach Südosten zu den nächstgelegenen Bohrungen S79 und S109 bereits ab. Die Mächtigkeit des Salzlagers (ohne Brekzien) nimmt von 29.75 m (S87) und 36 m (S88) auf 31.4 m (S79) und schliesslich 20.4 m (S109) ab. In S79 wurde kein Zwischenlager beschrieben [8], einige Anhydrit- und Mergelverunreinigungen und -lagen sind jedoch auch in S79 und S109 beschrieben [57], [59], ob es sich bei einer davon je-

doch um das Zwischenlager handelt, ist unklar. Allgemein zeigt der Vergleich mit umliegenden Bohrungen den lateral heterogenen Aufbau des Salzlagers.

### 3.3 Produktionsgeschichte S87 und S88

Das Bohrfeld Sulz wurde in vier Etappen erstellt (Abbildung 4). Die Bohrungen S87 und S88 gehören zusammen mit den Bohrungen S85, S86 sowie S89 bis S92 zur zweiten Etappe und wurden im Sommer 1985 erstellt (Bohrdauer 27.06. bis 09.08.1985 bzw. 09.05. bis 26.06.1985) Beide produzierten seit 1986 Salz [51], [54], [63]. Die Produktion wurde 2009 eingestellt.

Beide Bohrungen gehörten zu den ersten Bohrungen der Schweizer Salinen AG (damals Schweizer Rheinsalinen AG), welche mit einem sogenannten Stickstoff-Blanket betrieben wurden. Das Blanket soll das Kavernendach vor unkontrollierter Solung schützen und damit eine aktive Beeinflussung der Kavernenentwicklung ermöglichen. Kavernen, die mit einem Blanket gelaugt werden, zeigen typischerweise ein relativ ebenes Kavernendach. Die Verwendung eines Stickstoff-Blankets entspricht heute dem Stand der Technik und wird weltweit im Lösungsbergbau angewandt.

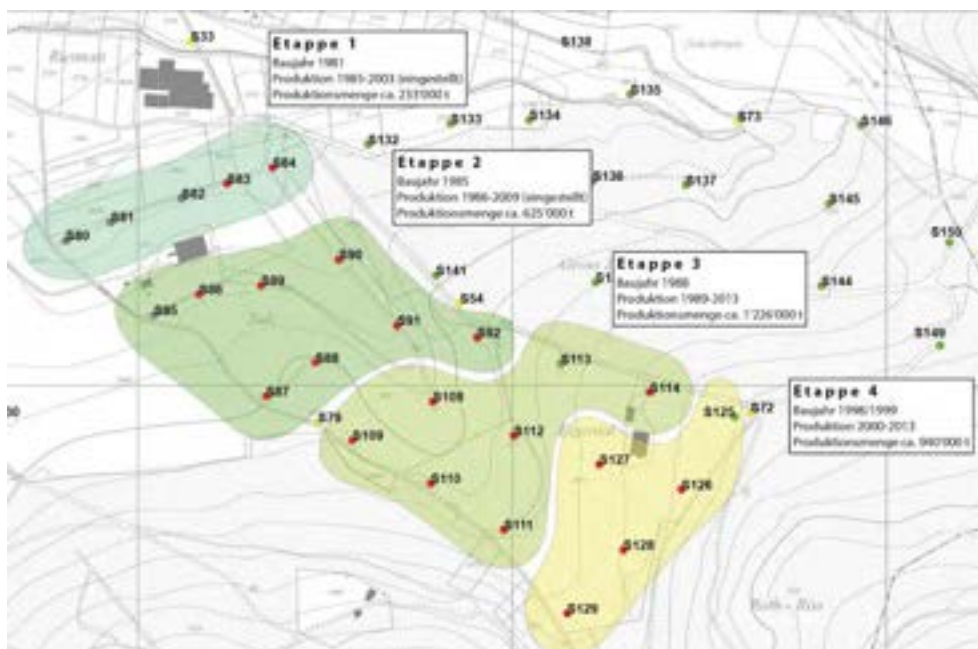


Abbildung 4: Übersicht Etappen Bohrfeld Sulz (Abbildung Schweizer Salinen AG).

Am 10.08.1990 wurde eine Verbindung der beiden Kavernen S87 und S88 festgestellt. Daraufhin wurde auf eine kombinierte Solung umgestellt mit wechselweiser Einspeisung von Frischwasser in S87 oder S88 und Entnahme der Sole mittels Unterwasserpumpe in der jeweilig anderen Bohrung. In den Jahren 1995 bis 1998 wurde kein Salz in S87 und S88 produziert (Abbildung 5).

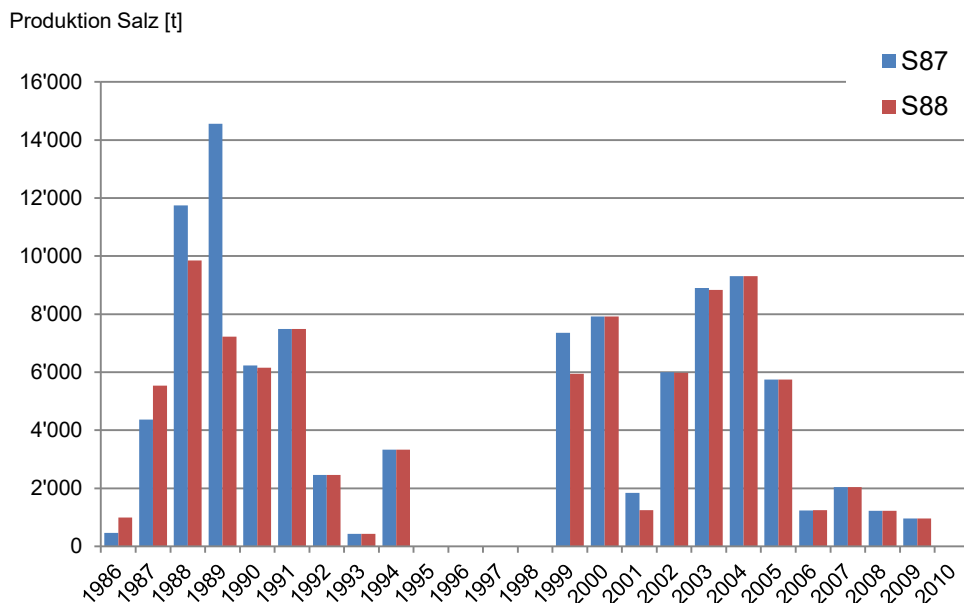


Abbildung 5: Produktionsmengen von S87 und S88 von 1986 bis 2009 (Produktionsende) [63].

Seit der Verbindung der beiden Kavernen (1990) konnten keine Einzelproduktionsmengen mehr festgestellt werden, weswegen die Gesamtproduktion durch zwei geteilt wurde. Eine Ausnahme bilden die Jahre 1999 und 2001, für die Hohlraumvermessungsergebnisse aus den Jahren 1998 und 2000 vorlagen, die eine Korrektur der Produktionsmengen erlaubten. Insgesamt wurden zwischen 1986 und 2009 in S87 103'641 t Salz und in S88 93'926 t Salz gefördert [63].

### 3.3.1 Hohlraumvermessungen 1998 und Hohlraumentwicklung bis 2000

Die Hohlraumvermessungen vom 19.06.1998 zeigen für beide Kavernen ein ebenes Kavernendach bei ca. 345 m ab OKT (S87) bzw. ca. 348 m ab OKT (S88) [30], [31], also ca. 6.5 m (S87) bzw. 8 m (S88) unterhalb des Zwischenlagers. Die Form des Kavernendachs deutet – entgegen der Darstellung im ersten Bericht der Firma DEEP – auf eine gute Bedeckung der Sole durch das Stickstoff-Blanket hin.

Eine zweite Hohlraumvermessung in den beiden Kavernen wurde am 09.11.2000 durchgeführt [30], [31]. Die Entwicklung der beiden Kavernen im Zeitraum zwischen den beiden Hohlraumvermessungen ist sehr unterschiedlich.

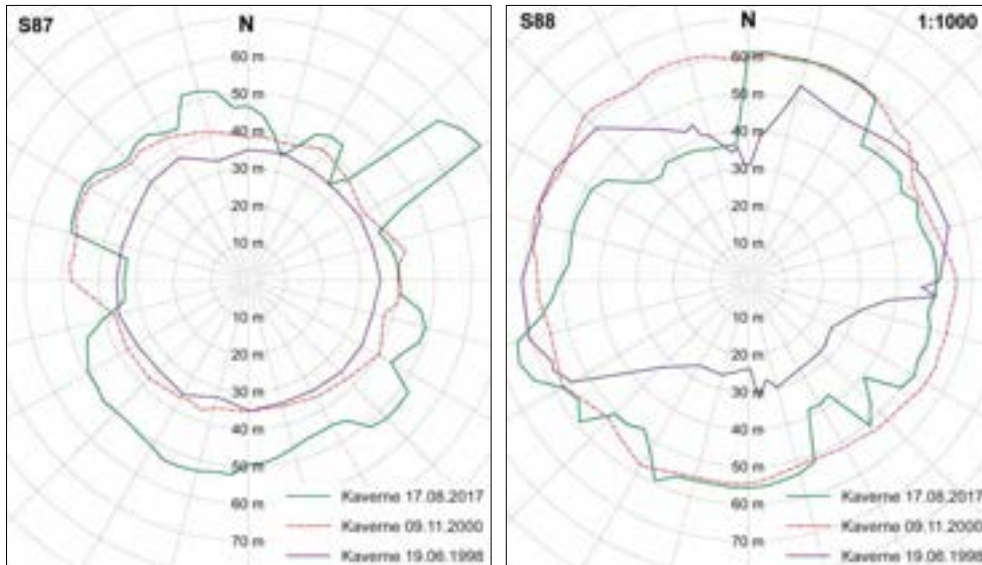


Abbildung 6: Maximum-Plots der Kavernen S87 (links) und S88 (rechts) der Jahre 1998, 2000 und 2017. Dargestellt ist jeweils die grösste laterale Ausdehnung der Kavernen über die gesamte Kavernenhöhe.

### *Entwicklung in S87*

Die Entwicklung der Kavernengeometrie S87 ist in Anhang 5 anhand von Schnitten durch die Kaverne dargestellt sowie in Abbildung 6 anhand von Maximum-Plots dargestellt.

In S87 fand die Solung in den Jahren 1999 und 2000 hauptsächlich am Kavernendach statt. Ausser im Sektor W-NW (ca. 270° bis 315°) fand keine nennenswerte laterale Vergrößerung der Kaverne statt (Abbildung 6). Das Kavernendach hatte im November 2000 eine insgesamt unregelmässige Form als im Juni 1998 und lag im Norden bei ca. 342 m ab OKT um gegen Süden auf ca. 340 m ab OKT anzusteigen. Die Firma DEEP führte die Bildung dieser Tasche im Kavernendach zunächst auf eine fehlende Dachabdeckung durch das Stickstoff-Blanket zurück [14]. Jedoch liegt auch die Kavernenbasis in diesem Bereich deutlich höher (Anhang 5.1 bis 5.3), was unseres Erachtens eher auf einen Abbruch hauptsächlich unlöslichen Materials vom Kavernendach zurückgeführt werden kann. Der Vergleich mit umliegenden Bohrungen deutet eine laterale Heterogenität des Salzlagerns an (vgl. Kapitel 3.2.3). Ein lokal grösseres Vorkommen unlöslicher Lithologien im südlichen Be-

reich der Kaverne ist also denkbar. Diese Erklärung wird auch im zweiten, ergänzenden Bericht der Firma DEEP [15] gewählt.

#### *Entwicklung in S88*

Die Entwicklung der Kavernengeometrie S88 ist in Anhang 6 anhand von Schnitten durch die Kaverne sowie in Abbildung 6 anhand von Maximum-Plots dargestellt.

Im Gegensatz zur hauptsächlich vertikalen Entwicklung von S87 zwischen den Hohlraumvermessungen in den Jahren 1998 und 2000 fand in S88 während dieses Zeitraums vor allem eine laterale Vergrößerung der Kaverne statt. Das Kavernendach lag im Jahr 2000 annähernd auf dem gleichen Niveau wie 1998. Dies deutet auf eine gute Bedeckung durch das Blanket hin. Trotzdem ist eine Verbreiterung des Kavernenhalses um die in die Kaverne reichenden Rohre herum für diesen Zeitraum feststellbar.

#### **3.3.2 Entwicklung zwischen 2000 und Produktionsende 2009**

Nach den Hohlraumvermessungen am 09.11.2000 wurden bis zum Soleaustrittsereignis am 13.06.2017 keine weiteren Vermessungen durchgeführt. Im Jahr 2009 wurde die Produktion in den beiden Bohrungen S87 und S88 beendet. Seitdem befinden sich beide Bohren im Stand-by-Zustand, d.h. sie wurden vom Leitungsnetz getrennt (Frischwasser, Sole, Stickstoff), der Stickstoff wurde abgelassen und die Bohrlochköpfe wurden geschlossen.

Die während der Produktion in Bohrlöcher eingegebenen Stickstoffmengen werden nicht erfasst, können aber nach Hohlraumvermessungen der Kavernen durch die Bestimmung des Solespiegels annähernd bestimmt werden. Welche Menge Stickstoff im Zuge der Umstellung von S87 auf Stand-by-Zustand abgelassen wurde ist jedoch nicht bekannt.

Im Stand-by-Zustand sind die Kavernen mit gesättigter Sole gefüllt, was eine weitere Solung verhindern soll. Die Bohrlöcher bleiben in diesem Betriebsstadium noch offen um eine Überwachung, eine mögliche spätere Produktion oder eine Schlammverpressung zu ermöglichen.

Am 17.10.2016 geplante Hohlraumvermessungen der beiden Kavernen S87 und S88 konnten aufgrund eines Aufstehens der Sonden nicht durchgeführt werden und wurden abgebrochen (siehe Kapitel 3.4.2). Ein Aufstehen der Sonde kann verschiedene Ursachen wie zum Beispiel Auskristallisation von Salz oder Gips oder

eine Deformation der Rohre haben. Das Soleaustritts-Ereignis vom 13.06.2017 fand vor den geplanten Aufbohrarbeiten statt.

### **3.3.3 Hohlraumentwicklung zwischen 2000 und 2017**

Da nach der Umstellung auf Stand-by-Zustand keine Hohlraumvermessungen der Kavernen S87 und S88 durchgeführt wurden, kann keine Aussage zur Entwicklung der Kavernengeometrie für den Zeitraum 2000 bis 2009 getroffen werden. Die nächsten Hohlraumvermessungen in den beiden Kavernen wurden erst nach dem Soleaustritts-Ereignis vom 13.06.2017 durchgeführt. Im Folgenden wird daher die Entwicklung zwischen den Jahren 2000 und 2017 insgesamt dargestellt. Eine Aufteilung, welche Entwicklungen während und welche nach der Produktion stattfanden, kann nicht vorgenommen werden.

#### *Entwicklung in S87*

Die nach dem Ereignis vom 13.06.2017 durchgeführte Hohlraumvermessung in S87 (vgl. Kapitel 6.2.1) zeigt eine deutlich abweichende Kavernengeometrie gegenüber der letzten Vermessung aus dem Jahr 2000. Im Gegensatz zu der hauptsächlich vertikalen Entwicklung der Kaverne zwischen 1998 und 2000 ist für den Zeitraum zwischen 2000 und dem Produktionsende im Jahr 2009 eine differenzierte Entwicklung erkennbar. Die Änderungen der Kavernengeometrie S87 können Anhang 5 (Querschnitte) und Abbildung 6 (Maximum-Plots) entnommen werden.

Zu einer lateralen Ausweitung der Kaverne kam es zwischen 2000 und 2017 insbesondere im südlichen Quadranten (zwischen ca. 135° und ca. 240°) um 10 bis 15 m (Abbildung 6). In diesem Bereich war zwischen 2000 und 2017 so gut wie keine vertikale Veränderung der Kaverne feststellbar. Eine zweite laterale Ausdehnung der Kaverne gegenüber 2000 scheint gemäss Hohlraumvermessung bei ca. 60° im Bereich der Verbindung von S87 zu S88 zu liegen (Anhang 5.5). Unter Berücksichtigung der Raumlage der beiden Kavernen dürften die äussersten gemessenen Punkte jedoch bereits in Kaverne S88 liegen.

Gegen Westen ist zwischen den beiden Vermessungen aus den Jahren 2000 und 2017 lateral eine negative Entwicklung feststellbar, nach der die Kavernenwand nun näher am Bohrloch liegt, als im Jahr 2000. In diesem Bereich ist eine deutliche vertikale Verlagerung der Kaverne nach oben bis auf ca. 338 m Tiefe, d.h. in den Bereich des Zwischenlagers feststellbar. Die Erhöhung der Kavernenbasis in diesem Bereich hält mit der Erhöhung des Kavernendachs weitgehend Schritt und erreicht abschnittsweise das Niveau des Kavernendachs aus dem Jahr 2000 (Abbildung 7). Dies wie auch die senkrechte Begrenzung dieses Teils der Kaverne



kann am besten mit einem Abbruch unlöslichen Materials vom Kavernendach erklärt werden. Ob hinter der dabei gebildeten heutigen, senkrechten Begrenzung des Salzlagers noch Hohlräume aus vergangenen Produktionszeiten liegen, kann mittels Echo-log nicht geklärt werden.

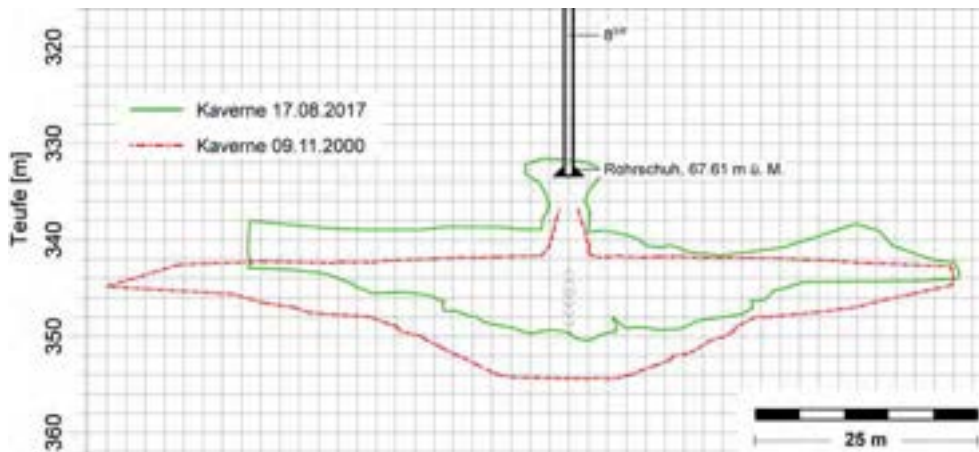


Abbildung 7: Querprofil (270° - 90°) durch S87: Vergleich Hohlraumvermessungen 2000 und 2017.

Neben einer vertikalen Entwicklung im westlichen Teil der Kaverne ist im nordöstlichen Quadranten der Kaverne (zwischen ca. 0° und 90°) eine Verlagerung der Kaverne nach oben feststellbar. Diese beschränkt sich im Vergleich zur Entwicklung im Westen jedoch nur auf den äusseren Teil des Kavernendachs, während näher am Bohrloch kaum Veränderungen gegen oben feststellbar sind (Abbildung 7).

Neben all diesen Änderungen der Kavernengeometrie zwischen den Jahren 2000 und 2017 fällt auch eine Verbreiterung des Halsbereichs um die in die Kaverne reichenden Rohre herum auf (Abbildung 7). Auch reicht dieser Bereich, in dem um die Rohre Salz gelöst wurde nun höher – nämlich bis zum Salzdach – als im Jahr 2000 (bis 332 m ab OKT statt 336 m ab OKT im Jahr 2000).

Diese heterogene Entwicklung im Kavernendach deutet zum einen auf einige Nachbrüche aus dem Kavernendach hin. Andererseits bestehen Hinweise auf entweder eine zeitweise schlechte Bedeckung mit Blanket, welche die Lösung im Halsbereich erlaubte, oder aber Frischwasserzuflüsse entlang des Halsbereichs. Ob diese beiden Entwicklungen jedoch noch während der Produktionsphase bis 2009 oder danach stattfanden, kann nicht geklärt werden, da nach der Umstellung auf Stand-by-Zustand (und damit Ablassen des Stickstoffs) wie bereits erwähnt keine Hohlraumvermessung durchgeführt wurde.

### *Entwicklung in S88*

Die Entwicklung der Kavernengeometrie in S88 zwischen den Jahren 2000 und 2017 war grundsätzlich ähnlich wie die Entwicklung in 87. So war auch in S88 das Kavernendach 2017 sehr uneben mit zum Teil abrupten Niveauänderungen (z.B. in Richtung NNW sowie im Sektor WSW-W (Anhang 6: Richtungen 0° bis 330° und 240° bis 270°)). Wir führen auch dies auf Nachbrüche unlöslichen Materials aus dem Kavernendach zurück.

Neben diesen Abbrüchen ist eine allgemeine Erhöhung des Kavernendachs in grossen (wenn auch nicht allen) Bereichen der Kaverne erkennbar. Gleichzeitig ist das Niveau des Sumpfs nun deutlich höher, was auf den höheren Gehalt unlöslicher Lithologien oberhalb von 340 m ab OKT zurückzuführen ist. In einigen Bereichen liegt das Kavernendach nun auf Niveau des Zwischenlagers oder sogar darüber. Eine laterale Vergrösserung ist in S88 zwischen 2000 und 2017 nicht feststellbar. Stattdessen war – vermutlich auf Grund der Abbrüche – die laterale Ausdehnung im Jahr 2017 geringer als im Jahr 2000 (Abbildung 6).

Der Kavernenhals, der in S88 bereits im Jahr 2000 ausgeprägt war, hat sich danach bis zur Vermessung im Jahr 2017 nicht nennenswert verbreitert.

### **3.4 Ereignisse vor dem 13. Juni 2017**

#### **3.4.1 Oberflächlicher Einsturz am 26.05.2010**

Am 26.05.2010 kam es 17 m westlich des Bohrlochs S87 auf dem Sulz-Eigentelweg zu einer abrupten Absenkung und Einbruch des Untergrunds. Dabei trat ein Loch im Asphaltbelag des Wegs auf. Das Ereignis wurde als Doline bezeichnet auch wenn die Ursache nicht ermittelt werden konnte. Gemäss den vorhandenen Unterlagen [1] (Anhang 7) betrug der Durchmesser des Einsturzes 2 m und die Tiefe 1.8 m. Den vorhandenen Fotos des Ereignisses nach zu schliessen dürfte der Durchmesser des gebildeten Lochs im Asphalt jedoch nicht wesentlich grösser als 70 cm gewesen sein. Zudem scheint das Loch nicht unter die Koffierung des Wegs gereicht zu haben.

Trotz der Nähe zur Bohrung S87 scheint ein Zusammenhang zwischen dem oberflächlichen Einsturz und der Laugungskaverne S87 äusserst unwahrscheinlich. Einstürze entstehen durch Hohlräume im Untergrund, die sich bis zur Terrainoberkante hocharbeiten. Sollte die Quelle eines solchen Verbruchs das Dach einer Laugungskaverne sein, das Ereignis also ein Tagbruch sein, so müsste aufgrund der während des Verbruchs stattfindenden Auflockerung im Dach der Kaverne ein Hohlraum mit grösserem Volumen als das bis zur Oberfläche durchgepauste Loch erkennbar sein. Gemäss Hohlraumvermessung der Kaverne S87 am 17.08.2017, nach dem Ereignis vom 13.06.2017 [34], deutet im Bereich direkt unterhalb des Einbruchs vom 26.05.2010 nichts auf Unebenheiten im Kavernendach hin (Anhang 8).

#### **3.4.2 Geplante Hohlraumvermessung S87 und S88**

Die Schweizer Salinen AG plant in den zu S87 benachbarten Kavernen S85, S86 und S89 Schlamm zu verpressen. Dieser Schlamm fällt bei der Ausfällung von Salz aus der Rohsole an und wird seit 1974 in ausgelaugte Kavernen im Bohrfeld Ättigraben/ Zurlinden verpresst. In Ergänzung zum von der Schweizer Salinen AG beim Kanton eingereichten Baugesuch 1458/2012 wurde zunächst eine Risikoanalyse durch die Geotechnisches Institut AG Basel erstellt [11].

In Ergänzung zu dieser Risikoanalyse wurden im Rahmen einer Sitzung mit der Bau- und Umweltschutzdirektion des Kantons Basel-Landschaft am 02.03.2015 ein Dichtheitsnachweis bzw. Hohlraumvermessungen auch für die Kavernen S87 und S88 gefordert. Ergänzende Abklärungen und ein ergänztes Überwachungskonzept für die geplante Schlammverpressung wurden in einem zweiten Bericht der Geo-

technisches Institut AG Basel beschrieben [12]. Die beiden Berichte finden sich in Beilage 3.

Die Hohlraumvermessungen der Kavernen S87 und S88 sollten am 17.10.2016 durch die Socon Kavernenvermessung GmbH durchgeführt werden. Dabei stand die Sonde jedoch 1.4 m unterhalb des 8 5/8" Rohrschuhs (S87) bzw. in Tiefe des 8 5/8" Rohrschuhs (S88) auf, woraufhin die Messungen abgebrochen wurden. Gründe für ein solches Aufstehen der Sonde können pfpfenartige Auskristallisationen (Salz, Gips) oder Deformationen der Rohre sein. Beide Bohrlöcher sollten aufgebohrt werden, um das Hindernis zu beseitigen. Die Aufbohrarbeiten waren mit dem Bohrgerät der Saline geplant, wurden jedoch aufgrund anderer dringlicherer Aufgaben mehrmals verschoben. Die Aufbohrarbeiten hatten zum Datum des Soleaustritts aus S87 am 13.06.2017 noch nicht stattgefunden. Nach den abgebrochenen Hohlraumvermessungen wurden die Bohrlochköpfe nicht fest verschlossen, da man von einem baldigen Aufbohren ausging und einen festen Verschluss aufgrund der Tatsache, dass die Bohrlöcher ausser Betrieb waren und nicht unter Druck standen, als nicht notwendig erachtete.

### **3.4.3 Oberflächliche Einstürze ca. einen Monat vor dem Soleaustritt**

Der Gemeinde MuttENZ wurden ca. einen Monat vor dem Soleaustritt zwei potentielle oberflächliche Einstürze im Bereich des Bohrfelds Sulz gemeldet. Die Gemeinde hat daraufhin die Pfirter, Nyfeler + Partner AG (MuttENZ) zu einer Dokumentation der Ereignisse aufgegeben [2] (Anhang 15).

Bei dem in Anhang 7 mit "Doline 1" bezeichneten Ereignis handelt es sich um einen oberflächlichen Einsturz mit einem Durchmesser von ca. 1 m und einer Tiefe von ca. 80 cm. Der Einsturz befindet sich nicht im Kavernenbereich des Bohrlochs S87. Somit scheint ein Zusammenhang zwischen dem oberflächlichen Einsturz und der Laugungskaverne S87 äusserst unwahrscheinlich.

Bei dem in Anhang als "mögliche Doline 2" bezeichneten Ereignis handelt es sich um eine oberflächliche Mulde mit einem Durchmesser von schätzungsweise 1.5 m und einer Tiefe von wenigen dm. Die Mulde befindet sich ausserhalb des Kavernenbereichs des Bohrlochs S87. Ob es sich bei der Mulde um einen oberflächlichen Einsturz oder um eine z.B. durch Tiere geschaffene Struktur handelt ist unklar. Ein Zusammenhang zwischen der oberflächlichen Mulde und der Laugungskaverne S87 scheint jedoch äusserst unwahrscheinlich.

#### 3.4.4 Druckabfall in S141

Am 05.06.2017 wurde ein abrupter Druckabfall des Stickstoff-Blankets und der Sole in S141 (Bohrfeld Grosszinggibrunn) festgestellt [64] (Anhang 9). Die Kaverne befand sich zu diesem Zeitpunkt in der Anlaufphase. Während der Anlaufphase wird der Druck in der Kaverne regelmässig erhöht, um die Laugungsrate zu erhöhen. Auf die gesteigerte Laugung reagiert das System schliesslich mit einem tendenziellen Druckabfall. Der Druckabfall am 05.06.2017 war jedoch wesentlich abrupter und grösser als die kontrollierten Druckschwankungen des Laugungsprozesses.

Die Kaverne S141 steht nicht mit den untereinander verbundenen Kavernen S87 und S88 in Verbindung (vgl. Kapitel 7.2). Ein Zusammenhang mit dem Ereignis vom 13.06.2017 kann folglich ausgeschlossen werden.

Als mögliche Ursachen für den Druckabfall kommen undichte Rohrleitungen oder eine undichte Zementation des Rohrschuhs in Betracht. Aufgrund der Lage der Kaverne mitten im Salzlager ohne Verbindung zum Deckgebirge scheint eine undichte Kaverne selbst unwahrscheinlich.

#### 4. Sole-Austritt vom 13.06.2017

##### 4.1 Chronologie des Ereignisses

Im Folgenden soll eine zeitliche Übersicht über das Soleaustritt-Ereignis am 13.06.2017 sowie die an diesem Tag ergriffenen Sofortmassnahmen gegeben werden [18]:

09:30 Uhr Um ca. 09:30 Uhr begann der Soleaustritt aus S87 in Form einer 25 m bis 30 m hohen Fontäne (Abbildung 8). Ein Bohrfeldbetreuer der Schweizer Salinen AG arbeitete zu diesem Zeitpunkt in der Nähe, weswegen zügig auf das Ereignis reagiert werden konnte. Parallel dazu wurde von der Saline unbekannter Seite die Polizei benachrichtigt, welche ca. eine Stunde nach Beginn des Austritts vor Ort war.



Abbildung 8: Fontäneartiger Soleaustritt aus S87 vor Beschwerung des Schachtdeckels [3].

10:00 Uhr Eine halbe Stunde nach Beginn des Soleaustritts wurde der Druck des N<sub>2</sub>-Blankets in den Bohrungen S112, S113, S125 und S141 abgelassen [64].

- 10:15 Uhr Um den Soleabfluss über einen Graben bündeln zu können, wurde bei der Ernst Frey AG ein Bagger bestellt.
- 10:30 Uhr Um eine grosse Sprühfahne des Austritts zu verhindern, wurde ein Felsblock auf den Deckel des Bohrschachts gehieft (Abbildung 9).



Abbildung 9: Soleaustritt nach Beschwerung des Schachtdeckels [3].

- 11:15 Uhr Beginn des Aushubs eines Grabens um den unkontrollierten Abfluss der Sole über die Wiese zu verhindern sowie eines Beckens um die Sole zu sammeln. Eine Pumpe zum Abführen der so gesammelten Sole wurde installiert.
- Ab 11:30 Uhr Nach Abklärung des Weiherschutzes sowie der Verträglichkeit einer Einleitung der Salzfracht in den Rhein sowie der Auswirkungen einer Einleitung in die Kanalisation auf die Kläranlage wurde durch das Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft (AUE), die Feuerwehr und die Saline der Beschluss gefasst, die gesamte Sole direkt in das Riedmattbächlein zu leiten.
- 12:30 Uhr Zur Abführung der Sole wurde eine grössere Pumpe bestellt.
- Ab 13:00 Uhr Um das Bohrloch zu verschliessen wurde ein Packer beschafft.

- Ab 15:00 Uhr Fünfeinhalb Stunden nach Beginn des Soleaustritts begann dieser periodisch zu schwanken. Die Zeitspanne zwischen den Austritten betrug zunächst ca. 5 min und wurde kontinuierlich grösser.
- 15:00 Uhr Eintreffen des Packers. Aufgrund einer Verengung der Rohrleitung am Bohrlochkopf, die zuvor wegen der Fontäne und dem gefüllten Bohrschacht nicht ersichtlich war, konnte der Packer jedoch nicht installiert werden.
- 16:00 Uhr Nach dem erfolglosen Versuch, das Bohrloch mittels Packer zu verschliessen wurde ein Blindflansch provisorisch am Bohrkopf angebracht. Die Installation erfolgte zunächst ohne ausreichende Dichtung und Manometer.
- Ab 16:00 Uhr Nach provisorischer Schliessung des Bohrlochs wurde begonnen, den Bohrschacht leer zu pumpen.
- Ab ca. 17:00 Uhr Im solegefüllten Bohrlochschacht war ein „schäumen und blubbern“ zu vernehmen, welches in Intensität variierte bzw. Unterbrechungen aufwies.
- 17:45 Uhr Durch die ABC-Wehr wurde eine Messung des aus dem Bohrloch ausströmenden Gases durchgeführt (siehe Kapitel 4.2) [27].
- 19:00 Uhr Nach der provisorischen Schliessung wurde ein Blindflansch mit Dichtung und Manometer sowie grösserer Schrauben für den grossen (unteren) Flansch am Bohrloch beschafft.
- Ab 19:00 Uhr Der Stickstoff in S141 wurde, nachdem der Druck bereits gesunken war, komplett abgelassen.
- Ab ca. 19:00 Uhr Elfeinhalb Stunden nach Beginn des Soleaustritts ebte dieser komplett ab. Periodische Gasaustritte waren auch danach noch bemerkbar.
- 21:00 Uhr Eintreffen des Flanschs mit Manometer und Dichtung sowie zusätzlicher Schrauben. Warten auf Resultate der Gasmessungen und Zusatzgerät der ABC-Wehr.



22:00 Uhr	Mit Atemschutz und in drei Schritten aufgrund nötiger Gasflaschenwechsel wurde der Flansch durch die ABC-Wehr und die Saline im Bohrschacht installiert.
22:10 Uhr	Durch die ABC-Wehr wurde eine zweite Messung des aus dem Bohrloch ausströmenden Gases durchgeführt (siehe Kapitel 4.2) [27].
Über Nacht	Während der Nacht zum Folgetag wurde das Bohrloch durch die Saline überwacht und der Pikettdienst des AUE durch die Polizei aufgeboten.

Eine Chronologie der Massnahmen, Arbeiten und Besprechungen in Folge des Ereignisses bis zur Wiederinbetriebnahme des Bohrlochs S141 am 18.09.2017, drei Monate nach dem Ereignis, findet sich in Anhang 10.

#### **4.2 Gaszusammensetzung**

Die Gaszusammensetzung wurde am Tag des Ereignisses von der Industriefeuerwehr Regio Basel AG (IFRB) um 17:45 Uhr und um 22:10 Uhr mit einem tragbaren Gasanalysator (Verfahren: FT Infrarot-Spektrometrie) gemessen. Die Resultate liegen in Form eines Ausdrucks der Analysesoftware vor [27].

Im Zuge des Druckablasses aus S87 am 28.06.2017 wurde erneut eine Gasprobe entnommen und an die Hydroisotop GmbH zur Analyse versandt. Die Analyse wurde mit einem Gaschromatographen (Wärmeleitfähigkeits- (WLD) und Flammenionisationsdetektor (FID)) durchgeführt. Die Resultate liegen in Form eines Messberichts vor [28].

Aufgrund unterschiedlicher Probenahmebedingungen, verschiedener den Messungen zugrundeliegenden Prämissen und unterschiedlicher Messverfahren lassen sich die Resultate der IFRB nicht mit denen der Hydroisotop GmbH vergleichen. So wurde von der IFRB ein auf Industrieunfälle ausgelegtes Messprogramm durchgeführt, weswegen hauptsächlich Kohlenwasserstoffe gemessen wurden. Die Messung wurde an aus dem Bohrloch strömendem Gas durchgeführt.

Demgegenüber wurde die Probe, die am 28.06.2017 zur Laboranalyse genommen wurde, mit einer vorevakuierten, also unter Unterdruck stehenden „Minican“ am Ablasshahn des Bohrlochkopfs entnommen. Dadurch konnte ein Einfluss der Umgebungsluft praktisch ausgeschlossen werden. Die Messparameter sahen auch

Tabelle 1: Resultate der Gaszusammensetzungsmessungen durch die IFRB und die Hydroisotop GmbH gemäss [27] und [28].

Messparameter	Einheit	IFRB	IFRB	Hydroisotop
		17:45	22:10	
Wasserdampf	vol-%	1.17	1.42	--
Kohlenstoffdioxid	ppm	730.15	1208.27	< 0.05
Kohlenstoffmonoxid	ppm	2.29	0.00	--
Distickstoffmonoxid	ppm	5.66	4.81	--
Stickstoffdioxid	ppm	1.61	2.59	--
Methanthiol	ppm	0.00	0.00	--
Ethanthiol	ppm	0.00	0.00	--
Ammoniak	ppm	0.16	0.22	--
Ethylacetat	ppm	0.00	0.00	--
Phenol	ppm	0.27	0.10	--
Dimethylsulfid	ppm	0.00	0.00	--
Butanol	ppm	0.00	0.08	--
Chloroform	ppm	0.57	0.57	--
Dichlormethan	ppm	0.00	0.00	--
Methylacrylat	ppm	0.00	0.00	--
Ethylacrylat	ppm	0.00	0.00	--
Tertrachlorethen	ppm	0.00	0.00	--
Benzaldehyd	ppm	0.05	0.09	--
Methan	ppm/ vpm	41.05	59.61	386
Butansäure	ppm	0.00	0.00	--
Essigsäure	ppm	0.00	0.00	--
Triethylamin	ppm	0.00	0.00	--
Pyridin	ppm	0.00	0.00	--
Dimethylamin	ppm	0.00	0.00	--
Anilin	ppm	0.23	0.19	--
Hexan	ppm	0.51	0.25	--
Tetrahydrothiopen	ppm	1.10	0.85	--
Stickstoff	vol-%	--	--	95.4
Wasserstoff	vol-%	--	--	0.14
Argon	vol-%	--	--	0.26
Sauerstoff	vol-%	--	--	3.5
Ethan	vpm	--	--	7
Propan	vpm	--	--	3
i-Butan	vpm	--	--	1
n-Butan	vpm	--	--	1
i-Pentan	vpm	--	--	< 1
n-Pentan	vpm	--	--	< 1
Ethen	vpm	--	--	< 1
Propen	vpm	--	--	< 1

entsprechend anders aus. So wurde in den Messungen vor Ort durch die IFRB kein elementarer Stickstoff gemessen sondern lediglich Stickstoffdioxid und Distickstoffmonoxid. Eine Zusammenstellung der Resultate der unterschiedlichen Messungen findet sich in Tabelle 1, die Messberichte in den Anhängen 11 und 12.

#### **4.3 Überwachung nach dem 13. Juni 2017**

Mit dem Folgetag des Ereignisses, dem 14.06.2017, wurde begonnen, den Druck am Bohrlochkopf von S87 zunächst täglich am installierten Manometer zu kontrollieren. Am 23.06.2017 wurden an den Bohrlochköpfen der Bohrungen S85, S86, S88, S89, S90, S91 und S109 ebenfalls Manometer angebracht. Parallel dazu begann eine Inventur aller Bohrlochköpfe im Stand-by-Zustand. Diese Inventur ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen. Seit Installation der Manometer werden die Drücke in den Stand-by-Bohrungen regelmässig kontrolliert. Die Drücke der aktiven Bohrungen wurden bereits vor dem Ereignis automatisch erfasst und aufgezeichnet.

Seit dem Ereignis und den in der Folge am Bohrloch S87 durchgeführten und in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurde das Bohrloch lediglich für Solespiegelmessungen geöffnet.

#### **4.4 Zusammenarbeit**

Im Verlauf des Ereignisses am 13.06.2017 und insbesondere im Nachgang des Ereignisses wurden Massnahmen zu Schadensminderung und –bewältigung zwischen der Schweizer Salinen AG und weiteren Beteiligten geplant und besprochen.

Am 13.06.2017 wurde das Vorgehen vor Ort von Vertretern der Schweizer Salinen AG, der Gemeinde Muttenz, des AUE sowie der hinzugezogenen Feuerwehr und ABC-Wehr besprochen und beschlossen (vgl. Kapitel 4.1). Der Pikettdienst des AUE wurde am 14.06.2017 aufgehoben.

Eine erste Zusammenstellung an Unterlagen (Senkungsmessungen um S87 aus dem Jahr 2016 [40], Berichte der Geotechnisches Institut AG zur geplanten Schlammverpressung in zu S87 und S88 benachbarten Kavernen [11] & [12], Lebenslauf S87 [60] sowie Leitungspläne und Echologs) wurde am 14.06.2017 der Polizei zuhanden der Staatsanwaltschaft Basel-Landschaft übergeben. Weitere Dokumente (Lebenslauf S141 [62], Druckverlauf in S141 [64] und eine Liste der

verantwortlichen Personen in Form ausgewählter Organigramme) wurden der Staatsanwaltschaft am 20.06.2017 nachgereicht.

Am Folgetag des Ereignisses (14.06.2017) fanden zunächst Begehungen durch die Schweizer Salinen AG und die Gemeinde MuttENZ statt bevor am 15.06.2017 vor Ort zwischen dem AUE, der Gemeinde MuttENZ und der Schweizer Salinen AG beschlossen wurde, eine bodenkundliche Baubegleitung des Bodenaushubs des direkt betroffenen Bodens durchführen zu lassen (vgl. Kapitel 5.2.1). Die Abnahme dieser Arbeiten geschah wieder durch AUE, Schweizer Salinen AG und Gemeinde MuttENZ.

Insgesamt fanden fünf Krisensitzungen statt. Die erste Krisensitzung fand am 16.06.2017 in der Gemeinde MuttENZ statt. Das Protokoll der ersten Krisensitzung [23], sowie auch die Protokolle der im Juni und Juli 2017 abgehaltenen Folgesitzungen [24][25][26] finden sich in Anhang 13. Die Koordination der Ereignisbewältigung wurde dem Gemeindeführungsstab MuttENZ übertragen. Neben der Vorstellung bereits durchgeführter Massnahmen und der Planung bzw. Abstimmung weiterer Massnahmen zur Schadensbewältigung waren mögliche Ursachen des Ereignisses sowie mögliche Massnahmen zur Ursachenklärung Thema der Sitzungen. Die letzte Krisensitzung fand am 20.09.2017 statt (Protokoll zum Zeitpunkt der Berichtsabgabe von der Gemeinde MuttENZ noch nicht versandt).

## **5. Schäden/ Bewältigung**

### **5.1 Schäden**

Die Begutachtung der entstandenen Schäden fand in der Folgezeit des 13.06.2017 statt. Am Folgetag des Ereignisses (14.06.2017) fand eine erste Schadensbegutachtung mit dem Pächter des hauptsächlich betroffenen Areals um S87 statt. Bürger- und Einwohnergemeinde wurden durch die Schweizer Salinen AG über das Ereignis informiert. Die betroffenen Flächen wurden durch die Gemeinde MuttENZ abgesteckt.

Am 15.06.2017 wurde ein Drohnenüberflug über das betroffene Gebiet von der Gemeinde MuttENZ veranlasst [43] und ein erster Augenschein mit dem Revierförster, Herr Eichenberger, durchgeführt. Eine Begehung des gesamten Dorfbachs mit einer Zustandsdokumentation durch Herrn Eichenberger folgte am 09.08.2017 [20]. Einzelne Folgebegehungen fanden im Frühjahr und Sommer 2018 statt. Eine dokumentierte Schlussbegehung steht derzeit noch aus.

Insgesamt wurden durch den Salzaustrag Schäden an Bewuchs und Boden in direkter Umgebung von S87, am Fischbestand des Dorfbachs sowie an Bäumen und Sträuchern entlang des Dorfbachs festgestellt. In der Umgebung von S87 kam es zu einem Ernteausfall.

Ein von der Gemeinde MuttENZ erstelltes Verzeichnis der Geschädigten [20] findet sich in Anhang 14.

Einen detaillierten Überblick über die beschädigte Fläche im Gebiet Sulzhof (Parzellen 2849, 2861 und 8271) vermittelt der am 15.06.2017 per Drohnenbefliegung erstellte Orthofotoplan [43] in Beilage 9.

### **5.2 Schadensbewältigung**

#### **5.2.1 Boden**

Die direkt vom Soleaustritt betroffenen Flächen um S87 herum wurden am 15.06.2017, zwei Tage nach dem Ereignis, vor Ort von den Herren Schmutz (AUE), Holzherr und Nyffeler (Gemeinde MuttENZ) sowie der Schweizer Salinen AG begutachtet. Vor Ort wurde beschlossen, dass eine bodenkundliche Baubegleitung (BBB) durchgeführt werden solle. Die BBB wurde durch Vogt Planer ausgeführt.

Am selben Tag begann die Abhumusierung des betroffenen Gebiets (Abbildung 10) mit Erfassung der Aushubtiefe (5 cm bis 25 cm). Das abhumusierte Material wurde entlang des Sulz-Eigentalswegs zwischengelagert und zum Schutz vor Austrag infolge möglichen Niederschlags mit Folie abgedeckt (Abbildung 11).



Abbildung 10: Abgrenzung des sichtbar geschädigten Bereichs (orange Fläche) gemäss BBB [13], die Sanierungsfläche beschränkte sich auf das Gebiet östlich des Sulz-Eigentalswegs sowie die Erosionsrinne nördlich des Sulzhofs; Abbildung: Vogt Planer.

Das abgetragene Material wurde schliesslich in der Deponie Elbisgraben entsorgt [13]. Als Ersatz des abgetragenen Materials wurde Bodenaushub aus Möhlin aufgetragen. Bevor das Ersatzmaterial aufgetragen wurde, wurde die betroffene Fläche mit einem Grubber bearbeitet. Das Ersatzmaterial wurde auf seine Eignung chemisch untersucht.

Nach dem Bodenersatz wurde eine dreijährige Klee-/Grasmischung angesät. Die Abnahme der Arbeiten wurde am 24.08.2017 durch den Bewirtschafter der Fläche, die Gemeinde Muttenz, die Schweizer Salinen AG und Vogt Planer durchgeführt.

Eine detaillierte Dokumentation der durchgeführten Arbeiten findet sich im Bericht zur BBB durch Vogt Planer [13] in Beilage 4.

Die im Bericht von Vogt Planer erwähnte Erosionsrinne nördlich (unterhalb) des Sulzhofs wurde am 30.08.2017 mit 2.2 m<sup>3</sup> Humus durch die Ernst Frey AG ausgeglichen.



Abbildung 11: Abhumusierungsarbeiten und Zwischenlagerung des abgetragenen Bodenmaterials [4].

### 5.2.2 Dorfbach

Der Dorfbach war bis zu seiner Eindolung über eine Länge von 1'100 m von dem Ereignis betroffen. Der Forellenbestand wie auch der Begleitfischbestand wurde durch das Einleiten der Sole über die gesamte Schadensstrecke vernichtet. Gemäss Zusammenstellung durch die Fischhege ist ein Ertragsvermögen von 49 kg bzw. 377% des jährlichen Fangertrags vernichtet worden [48].

Das Gewässer wurde mit 1'000 Begleitfischen, 100 Sömmerlingen, 50 Jährlingen, 30 2-Jährigen und 20 3-Jährigen aus Umsiedelung wiederbesetzt [48].

Vom 6. Juli bis zum 11. August 2017 wurde die Salzkonzentration im Dorfbach ober- und unterhalb des Einlaufs der Drainagen aus dem Gebiet Sulzhof sowie in den Drainageleitungen selbst durch die Pfirter, Nyfeler + Partner AG im Auftrag der Gemeinde MuttENZ überwacht [29] (Beilage 10).

Es wurden insgesamt fünf Messrunden durchgeführt, in welchen jeweils sechs Messstellen beprobt wurden. Im Bericht der Pfirter, Nyfeler + Partner AG wird festgehalten, dass im beobachteten Zeitraum andauernd Salz aus dem Bereich des Soleaustritts in das Wasser der Drainageleitungen ausgewaschen wird. Bis zum

Überwachungsende am 11. August 2017 konnte noch keine Abnahme der Salzkonzentration festgestellt werden.

Im Dorfbach selbst konnten im Überwachungszeitraum, vermutlich aufgrund der starken Verdünnung des Wassers, nur leicht erhöhte Salzkonzentrationen festgestellt werden. Im Bereich des Einlaufs des Dorfbachs in die Birs konnte am 11. August 2017 keine erhöhte Salzkonzentration mehr nachgewiesen werden. Im Rahmen einer Gefährdungsabschätzung wurde festgehalten, dass im Dorfbach infolge der erhöhten Salzkonzentration von maximal 0.46 g/l keine Gefährdung für Pflanzen und Wasserorganismen mehr besteht.

### 5.2.3 Bepflanzung und Vegetation

Neben Boden und Fauna des Dorfbachs waren auch verschiedene Pflanzen von dem Ereignis betroffen und wiesen in Folge des Soleaustritts Schäden auf. In der näheren Umgebung des Bohrlochs S87 waren dies zwei Kirschbäume, deren Blätter sich zunächst verfärbten (Abbildung 12) und dann abfielen. Beide Kirschbäume wurden im folgenden Frühjahr 2018 auf ein Austreiben hin beobachtet werden um anschliessend zu entscheiden, ob ein Ersatz nötig sei.

Die beiden Kirschbäume wurden schliesslich gefällt. Es wurden auf der Parzelle zwei Ersatzbäume gepflanzt.

Der durch Soleaustritt und die darauf folgenden Arbeiten entstandene Ernteverlust auf den durch den Soleaustritt betroffenen Flächen wurde mit einem Ertragsausgleich an den Pächter der Parzelle kompensiert.

Aufgrund der Einleitung der Sole in den Dorfbach waren auch Bäume und Sträucher vom Ereignis betroffen. Eine Begehung durch den Revierförster, Herrn Eicheberger fand am 09.08.2017 statt. Die Zustandsdokumentation [20] findet sich in Anhang 16. Es wurde zunächst keine Gefährdung durch möglicherweise umstürzende Bäume festgestellt. Auch hier sollte eine Folgebegehung über eine Erholung der Bäume und Sträucher Auskunft geben und das weitere Vorgehen im Anschluss bestimmt werden.

Eine dokumentierte Folgebegehung steht zum jetzigen Zeitpunkt (Juli 2018) noch aus. Trotzdem haben bereits mehrere Einzelbegehungen der Strecke entlang des Dorfbachs durch den Revierförster ergeben, dass einige Bäume am Absterben sind und gefällt werden müssen [22].





Abbildung 12: Braun verfärbte Blätter eines Kirschbaums infolge des Soleaustritts aus S87 [5].

#### 5.2.4 Sonstige Massnahmen

Am 20. und 21.06.2016 wurden die vom Soleaustritt betroffenen Strassenabschnitte mit Hochdruck gereinigt und die Schlammsammler entlang der Strassen geleert.

Der während des Ereignisses angelegte Belagskeil (Abbildung 13) entlang des Sulz-Eigentalswegs wird zurzeit (Juli 2018) entfernt. Im Anschluss an diese Arbeiten wird eine weitere Begehung mit der Gemeinde Muttenz (Ressortleiter Strassenunterhalt, A. Handschin) bezüglich einer allfälligen Instandsetzung der Strasse (Wegrand entlang der Kurve) stattfinden.



Abbildung 13: Graben und Belagskeil unterhalb S87 sechs Tage nach dem Ereignis. Über den Graben und mit dem Keil wurde die ausgetretene Sole kanalisiert.

## 6. Ursachenanalyse

Im Rahmen einer Ursachenanalyse wurden verschiedene Arbeiten durchgeführt sowie bestehende Arbeiten zu Rate gezogen. Dabei wurden folgende Analyse-schwerpunkte gelegt:

Untersuchungen an den Bohrlöchern S87 und S88

- Zusammensetzung des mit der Sole ausgetretenen Gases
- Kavernen-Hohlraumvermessungen (S87, S88)
- Cement-Bond-Logging (aus dem Jahr 2016)
- Pumpversuche

Untersuchungen in der Umgebung von S87 und S88

- Kavernen-Hohlraumvermessung (S141)
- Nivellementmessungen

Ziel der Untersuchungen war der Gewinn von Erkenntnissen zu den Ursachen und Auslösemechanismen des Soleaustritts vom 13.06.2017. Auf Basis dieser Analysen sollten schliesslich Massnahmen für den zukünftigen Betrieb der Bohrfelder der Schweizer Salinen AG erarbeitet werden, die eine Wiederholung des Ereignisses verhindern sollen. In Kapitel 6 werden die durchgeführten Arbeiten, in Kapitel 7 die Resultate, in Kapitel 8 externe Expertisen und in Kapitel 9 die Interpretation der gesammelten Resultate beschrieben. Konsequenzen aus dem Ereignis und der gewonnenen Erkenntnisse werden schliesslich in Kapitel 10 behandelt.

### 6.1 Zusammensetzung des mit der Sole ausgetretenen Gases

Eine Ermittlung der Zusammensetzung des Gases, das mit der Sole zusammen aus dem Bohrloch ausgetreten war, sollte dessen mögliche Herkunft klären. Analysen der Gaszusammensetzung fanden vor Ort am Ereignistag (durchgeführt durch die Industriefeuerwehr Regio Basel AG) sowie später im Labor (durchgeführt durch Hydrosond GmbH) statt (vgl. Kapitel 4.2).

Aufgrund des auf Industrieunfälle ausgelegten Messprogramms der IFRB wurde das Gas während der ersten Analyse hauptsächlich auf Kohlenwasserstoffe hin untersucht. Die Resultate der zweiten Analyse sind in Bezug auf eine Herkunftsklärung des Gases aussagekräftiger, da die untersuchten Messparameter eine Unterscheidung zwischen möglichen in der Kaverne vorkommenden geogenen Gasen oder Überresten eines Stickstoff-Blankets ermöglichen.

## 6.2 Hohlraumvermessungen

Hohlraumvermessungen in den Kavernen S87 und S88 sowie in S141 sollten zum einen klären, ob es im Inneren der miteinander verbundenen Kavernen S87 und S88 zu grösseren Einbrüchen des Kavernendachs gekommen war, die den Soleaustritt verursacht haben könnten. Zum anderen sollte geklärt werden, ob es zu einer Verbindung zwischen S87/ S88 und S141 gekommen war. Da S141 aktiv war und unter Druck stand, hätte eine Verbindung zu einem Druckausgleich und dieser wiederum zu einem plötzlichen Soleaustritt in S87 führen können.

Die Hohlraumvermessungen der drei Kavernen wurden am 19.06.2017 durch die Schweizer Salinen bei Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH bestellt.

Für die nötigen Arbeiten zur Vorbereitung der Hohlraumvermessungen in S87 sowie die Messungen selbst wurde am 27.06.2017 ein Sicherheitsdispositiv Hohlraumvermessung erstellt (Anhang 17) und innerhalb der Schweizer Salinen AG, an die Gemeinde Muttenz und das AUE verteilt. Zweck des Sicherheitsdispositivs war eine Massnahmenplanung für das Szenario eines Druckaufbaus und Soleaustritts während den Vorbereitungs- oder Messarbeiten sowie die Festlegung weiterer sicherheitsrelevanter Vorkehrungen für Arbeiten am Bohrloch S87.

Da die beiden Bohrungen S87 und S88 im Stand-by-Zustand waren und zu diesem Zeitpunkt nicht klar war, ob die Sonde bei den Messversuchen im Jahr 2016 (vgl. Kapitel 3.4.2) an Auskristallisationen oder in einem möglicherweise deformierten Rohrbereich aufstand, mussten zur Sicherstellung, dass die Sonden ungehindert in den Kavernenhohlraum gelangen konnten, 4½“-Rohre als Führungsrohre in die fest verbauten 8½“-Rohre eingebaut werden. Bei den Einbauversuchen am 27.06.2017 in S88 und am 28.06.2017 in S87 standen die Rohre jedoch kurz unterhalb des Rohrschuhs (S88) bzw. bei 323.5, 8.5 m oberhalb des Rohrschuhs (S87) auf, weswegen die Arbeiten zunächst abgebrochen wurden. Während des Druckablasses aus S87 (Druck zu Beginn der Arbeiten 2.2 bar) wurde eine Gasprobe entnommen und zur Analyse an Hydroisotop verschickt (s.o. und vgl. Kapitel 4.2).

Die Hohlraumvermessung der Kaverne S141 fand am 29.06.2017 statt [36], der Bericht findet sich in Beilage 2.3.

### 6.2.1 Aufbohrarbeiten und Hohlraumvermessung in S87

Nach den gescheiterten Einbauversuchen der 4½“-Rohre für die Hohlraumversuche sollten die beiden Bohrungen aufgebohrt werden. Für diese Arbeiten wurde ein Sicherheitsdispositiv erstellt (Anhang 17).

Am 30.06.2017 wurde dafür das Bohrgestänge in S87 eingebaut und versucht das Hindernis bei 323.5 m ab OKT aufzuboahren. Die Arbeiten wurden infolge „Rumorens“ im Bohrloch abgebrochen [18].

Für die infolgedessen aufwändigeren Bohrarbeiten wurde am 30.06.2017 ein Blow-Out-Preventer (BOP) bei der Firma Daldrup & Söhne AG bestellt. Blow-Out-Preventer sollen spontane Gasaustritte aus Bohrlöchern verhindern. Währenddessen wurde das Bohrgestänge aus S87 ausgebaut und das Bohrloch wieder dicht verschlossen.

Da der am 06.07.2017 gelieferte und zunächst in der Saline Riburg zwischengelagerte BOP zu gross für den Bohrschacht von S87 war, musste eine Verlängerung des Bohrlochkopfes angefertigt werden, um diesen mit dem BOP verbinden zu können. Daneben wurde auf dem Bohrplatz von S87 eine Auffahrrampe erbaut, um eine erhöhte Position des Bohrgeräts zu erhalten damit der BOP zwischen Gerät und Bohrschacht installiert werden konnte. Die Vorbereitungsarbeiten am Bohrplatz inklusive der Beschaffung allen nötigen Materials und einer Schulung am BOP durch die Firma Daldrup & Söhne AG waren am 17.07.2017 abgeschlossen, sodass am 18.07.2017 Rollenmeissel und Bohrgestänge eingebaut werden konnten.

Der Versuch, das Bohrloch mit Rollenmeissel aufzuboahren scheiterte tags darauf, am 19.07.2017, bei 320 m ab OKT als der Rollenmeissel offenbar auf Metall aufstand. Daraufhin wurde am 20.07.2017 eine Fräse inklusive nötiger Stabilisatoren über die Firma Daldrup & Söhne AG in den Niederlanden bestellt. Eine Kamerabefahrung des Bohrlochs S87 wurde am 24.07.2017 bei terratec geophysical services bestellt. Die Kamerabefahrung fand am 26.07.2017 statt und zeigte neben Frischwasserzutritten durch Löcher im Casing des Bohrlochs bei 321.81 m ab OKT ein 4½“-Rohrstück im Bohrloch (Abbildung 14). Der Bericht zu der Kamerabefahrung, sowie zu einer zweiten Befahrung am 08.08.2017 findet sich in Beilage 6.

Vermutlich ist dieses Rohrstück während des Einbauversuchs vom 28.07.2017 abgeschert und im Bohrloch verblieben.

Nach Lieferung der Fräse wurde zwischen dem 26. und dem 28.06.2017 zunächst versucht, das Rohrstück zu bergen. Die anschliessenden Fräsearbeiten wurden am 02.08.2017 aufgrund ausbleibender Fortschritte eingestellt. Am 08.08.2017 folgte eine weitere Kamerabefahrung. Erst am 10.08.2017 konnte das Bohrloch schliesslich aufgefräst werden. Nach Ausbau der Fräse und des Gestänges sowie eines Verschlusses des Bohrlochs (10. bis 11.08.2017), konnte der Bohrplatz geräumt werden und das 4½"-Gestänge für die Hohlraumvermessung eingebaut werden. Diese fand schliesslich am 17.08.2017 statt.



Abbildung 14: 4"-Rohrstück in 8" Casing des Bohrlochs S87, Blick nach unten.

### 6.2.2 Aufbohrarbeiten und Hohlraumvermessung in S88

Nach Ausbau des Gestänges und Abbau allen Geräts bei S87, wurde das Bohrgerät auf S88 umgesetzt und der BOP installiert (25. bis 31.08.2017). Nach Antransport des Gestänges, des Bohrmeissels und der Fräse zu S88 wurde S88 am 05. und 06.09.2017 aufgebohrt sodass am 06.09.2017 bereits das 4½"-Rohr für die Hohlraumvermessung eingebaut werden konnte.

Die Hohlraumvermessung der Kaverne S88 fand schliesslich am 07.09.2017 statt.

### **6.3 Cement-Bond-Logging**

Am 07. und 08.09.2016, also vor dem Ereignis am 13.06.2017, wurden im Rahmen der geplanten Schlammverpressung (s. Kapitel 3.4.2) durch die Firma terratec geophysical services GmbH & Co. KG Cement-Bond-Logs an den Bohrlöchern S85 bis S91 des Bohrfelds Sulz erstellt. Ziel solcher Logs ist die Bestimmung der Anbindungsqualität des Zements an die Verrohrung eines Bohrlochs. Dabei wird ein Full Wave Sonic Log durchgeführt. Anhand der Wellenrefraktion kann auf die Anbindung der Verrohrung mittels Zement an das Gestein rückgeschlossen werden (für Details, s. beiliegender Bericht der Firma terratec: Beilage 7, [39]).

### **6.4 Pumpversuche**

Parallel zu den Aufbohr- und Vorbereitungsarbeiten für die Hohlraumvermessungen in S87 und S88 wurden von der Schweizer Salinen AG insgesamt drei Pumpversuche am 23. und 24.08.2017 sowie am 14.09.2017 durchgeführt. Ziel der Versuche war es, die Dimension der hydraulischen Verbindung zwischen den Kavernen S87 und S88 genauer abschätzen zu können sowie eine mögliche Verbindung zu S86 zu klären.

Dafür wurde am 23.08.2017 in S87 mittels Pumpe (Pumpleistung:  $15\text{m}^3\text{h}^{-1}$ ) der Solespiegel abgesenkt und in S87, S88 und S86 der Solespiegel mit einem Lichtlot überwacht. Eine Wiederholung des Versuchs fand am 24.08.2017 statt, um die Ergebnisse des ersten Pumpversuchs zu verifizieren.

Am 14.09.2017 wurde ein Pumpversuch mit umgedrehter Anordnung durchgeführt. Dabei wurde in S88 der Solespiegel mittels Pumpe (Pumpleistung:  $15\text{m}^3\text{h}^{-1}$ ) gesenkt und in S88, S87 und S86 mit Lichtlot überwacht.

Eine hydraulische Verbindung mit S141 konnte zu diesen Zeitpunkten bereits auf Basis der Hohlraumvermessung in S141 am 29.06.2017 ausgeschlossen werden, weswegen auf Spiegelmessungen in S141 verzichtet wurde.

### **6.5 Nivellementmessungen**

Seit dem Jahr 2001 werden jährlich Nivellementmessungen im Bereich des Bohrfelds Sulz wie auch in anderen Produktionsgebieten der Schweizer Salinen AG durchgeführt.

Ausserplanmässige Nivellementmessungen im Bohrfeld Sulz und dessen Umgebung sollten klären, ob es in Zusammenhang mit dem Ereignis vom 13.06.2017 zu plötzlichen Senkungen der Terrainoberfläche gekommen war. Diese sollten bereits Rückschlüsse auf mögliche Prozesse im Untergrund erlauben. Die Nivellementmessungen wurden bereits am Folgetag des Ereignisses durch die Schweizer Salinen AG bestellt und vom 15. bis 16.06.2017 sowie vom 22. bis 23.06.2017 durch die Rapp Infra AG durchgeführt [41].

Die folgenden planmässigen Nivellementmessungen wurden vom 22.09.2017 bis 26.10.2017 durch die Rapp Infra AG durchgeführt [42].

Die Berichte zu den durchgeführten Nivellementmessungen in den Jahren 2016 (vor dem Ereignis) und 2017 finden sich in Beilage 5.



## **7. Resultate**

### **7.1 Messungen der Gaszusammensetzung**

Die Resultate der durch die IFRB und Hydroisotop vorgenommenen Gasanalysen finden sich in Kapitel 4.2, Tabelle 1.

Während die erste, durch die IFRB vor Ort durchgeführte Analyse der Gaszusammensetzung hauptsächlich eine Aussage über den Gehalt an verschiedenen Kohlenwasserstoffen und damit nur an Nebengemengteilen erlaubt, zeigte die Laboranalyse durch Hydroisotop, dass das Gas fast vollständig (95.4 vol. %) aus Stickstoff sowie untergeordnet Sauerstoff (3.5 vol. %) bestand.

Die stete Zunahme des am Bohrlochkopf gemessenen Drucks bis zur Gasentnahme am 28.06.2017 auf 2.2 bar deutet auf eine Entmischung des noch in der Sole befindlichen Gases und der Ansammlung desselben im Bohrloch hin. Dies würde bedeuten, dass am 28.06.2017 tatsächlich das gleiche Gas beprobt wurde, wie das am Ereignis des 13.06.2017 ausströmende.

Die Zusammensetzung lässt den Schluss zu, dass das während des Ereignisses ausgetretene Gas Reste des Stickstoff-Blankets waren, die nach Umstellung auf Stand-by-Zustand in Auslaugungen bzw. Ausbruchbereichen im Kavernendach verblieben waren.

### **7.2 Hohlraumvermessungen**

#### **7.2.1 Sole/ Wasser-Grenze in Bohrlöchern S87 und S88**

Im Vorgang zu Hohlraumvermessungen werden Schallgeschwindigkeits- und Druckprofile im Bohrloch gemessen. Diese sind für die korrekte Verarbeitung der Messergebnisse der Hohlraumvermessungen notwendig, erlauben aber auch aufgrund sich mit dem Salzgehalt ändernder Schallgeschwindigkeit in Wasser die Bestimmung der Sole/ Wasser-Grenze im Bohrloch, wenn über der Sole eine Frischwasserschicht liegt. Auch durch die parallel durchgeführten Druckmessungen im Bohrloch kann auf die Dichte des Bohrlochfluids und damit auf die Sole/Wasser-Grenze im Bohrloch rückgeschlossen werden.

Die Messprofile in S87 und S88 zeigen, dass zum Zeitpunkt der Messung am 17.08.2017 in S87 das gesamte Bohrloch mit Frischwasser gefüllt war. In S88 wurde die Sole/ Wasser-Grenze 28 m unterhalb des Wasserspiegels festgestellt (bei 222.9 m ü M), also rund 150 m oberhalb des 8<sup>5/8</sup>“ Rohrschuhs.

Bereits der während des Messversuchs im Jahr 2016 gemessene Druckverlauf im Bohrloch S87 zeigte, dass dieses mit Frischwasser gefüllt war.

Ob die mächtige Frischwasserschicht über der Sole in S87 alleinig auf die während der Kamerabefahrung entdeckten Wasserzutritte zurückzuführen ist, kann zum heutigen Zeitpunkt nur vermutet werden, ist jedoch aufgrund der Resultate des Cement-Bond-Logs (s. Kapitel 7.3) plausibel.

## **7.2.2 Kavernengeometrie und Hohlraumentwicklung**

Die Entwicklung der Kavernengeometrie zwischen den drei in den Kavernen S87 und S88 durchgeführten Hohlraumvermessungen wurde bereits in Kapitel 3.3 vorgestellt. Erkenntnis der letzten Hohlraumvermessungen in S87 und S88 vom 17.08.2017 bzw. 07.09.2017 war, dass es in beiden Kavernen zwischen den Jahren 2000 und 2017 zu verschiedenen Nachbrüchen des Kavernendachs in die Kavernen kam. Diese fanden insbesondere in Bereichen mit hohen Gehalten unlöslicher Lithologien um das Zwischenlager herum statt (vgl. Kapitel 3.3). Die dadurch entstandenen Volumina könnten als Stickstofffalle gewirkt haben.

Neben S87 und S88 wurde auch die Kaverne S141 vermessen [36]. Ziel der Vermessung dieser Kaverne war eine mögliche Verbindung dieser Kaverne zu S87/S88 feststellen oder ausschliessen zu können. Die Resultate der Vermessung können dem Bericht der Firma Socon [36] entnommen werden, der sich, wie auch die Berichte zu den Kavernen S87 und S88, in Beilage 2 befindet.

Die Kaverne S141 zeigt gemäss der durchgeführten Hohlraumvermessung keine Verbindungen zu anderen Kavernen. Das Dach der Kaverne ist eben bei ca. 350 m Teufe ab OKT ausgeprägt. Es wurde keine Verbreiterung des Kavernenhalses festgestellt. Das Volumen der Kaverne S141 ist verhältnismässig klein, da dort die Anlagephase noch nicht abgeschlossen wurde.

## **7.3 Cement-Bond-Logging**

Die in den Anhängen 3 und 4 dargestellten Übersichtsprofile der erbohrten Geologie und des dokumentierten Ausbaus der beiden Bohrungen S87 und S88 orientieren sich an den Informationen des geologischen Profils im geologischen Bericht zu den beiden Bohrungen [9]. Darin war lediglich eine Fusszementation der einzelnen Rohrtouren verzeichnet. Die im Jahr 2016 im Rahmen der Untersuchungen für eine mögliche Schlammverpressung durchgeführten Cement-Bond-Logs zeigten in den beiden Bohrlöchern S87 und S88 eine Zementation vom Rohrschuh bis 180 m

Teufe (S87) bzw. 235 m Teufe mit guter Anbindung. Dies bedeutet, dass mindestens im Bereich der Oberen Sulfatzone die Verrohrung durch eine durchgehende Zementation hinterfüllt ist.

Die während der Kamerabefahrung in S87 festgestellten Wasserzutritte ins Bohrloch liegen über der zementierten Strecke. Dass die Zementation in den beiden Bohrungen nicht höher reicht, kann an Zementationsverlusten in der verkarsteten Schinznach-Formation (Oberer Muschelkalk) liegen.

Der Bericht der Firma terratec zum Cement-Bond-Logging mitsamt der gemessenen Profile findet sich in Beilage 7.

#### **7.4 Pumpversuche**

Der Verlauf des Solespiegels in den Bohrlöchern S86, S87 und S88 während der beiden Pumpversuche am 23.08.2017 und 14.09.2017 können Abbildung 15 und Abbildung 16 entnommen werden.

Auffällig sind die jeweils unterschiedlichen Spiegelhöhen in S87 und S88 vor Pumpbeginn. Eine unterschiedliche Steighöhe trotz hydraulischer Verbindung deutet nach folgendem Verhältnis auf einen Dichtekontrast hin.

$$\rho_{S88} \times z_{S88} = \rho_{S87} \times z_{S87}$$

Wobei  $\rho$  der Dichte und  $z$  der Steighöhe im Rohr entspricht.

Dieser Dichtekontrast erklärt sich durch die Süßwasser-Überlagerung der Sole in S87 (vgl. Kapitel 7.2.1). Das aus den vor Pumpbeginn ermittelten Unterschieden der Steighöhe berechnete Verhältnis der (höheren) Dichte in S88 gegenüber derjenigen in S87 betrug sowohl am 23.08.2017 als auch am 14.09.2017 ca. 1.08.

##### *Pumpversuch vom 23.08.2017 und Wiederholung am 24.08.2017*

Nach dem Pumpbeginn in S87 am 23.08.2017 um 07:15 Uhr und über den gesamten Verlauf des Pumpversuchs konnte in S87 eine nahezu konstante Absenkungsrate beobachtet werden. Die Gesamtabenkung in S87 betrug während des 4 h dauernden Pumpversuchs 10.24 m (Abbildung 15). Nach Ende des Versuchs stieg der Spiegel sprunghaft auf ein höheres Niveau als zu Beginn des Versuchs.

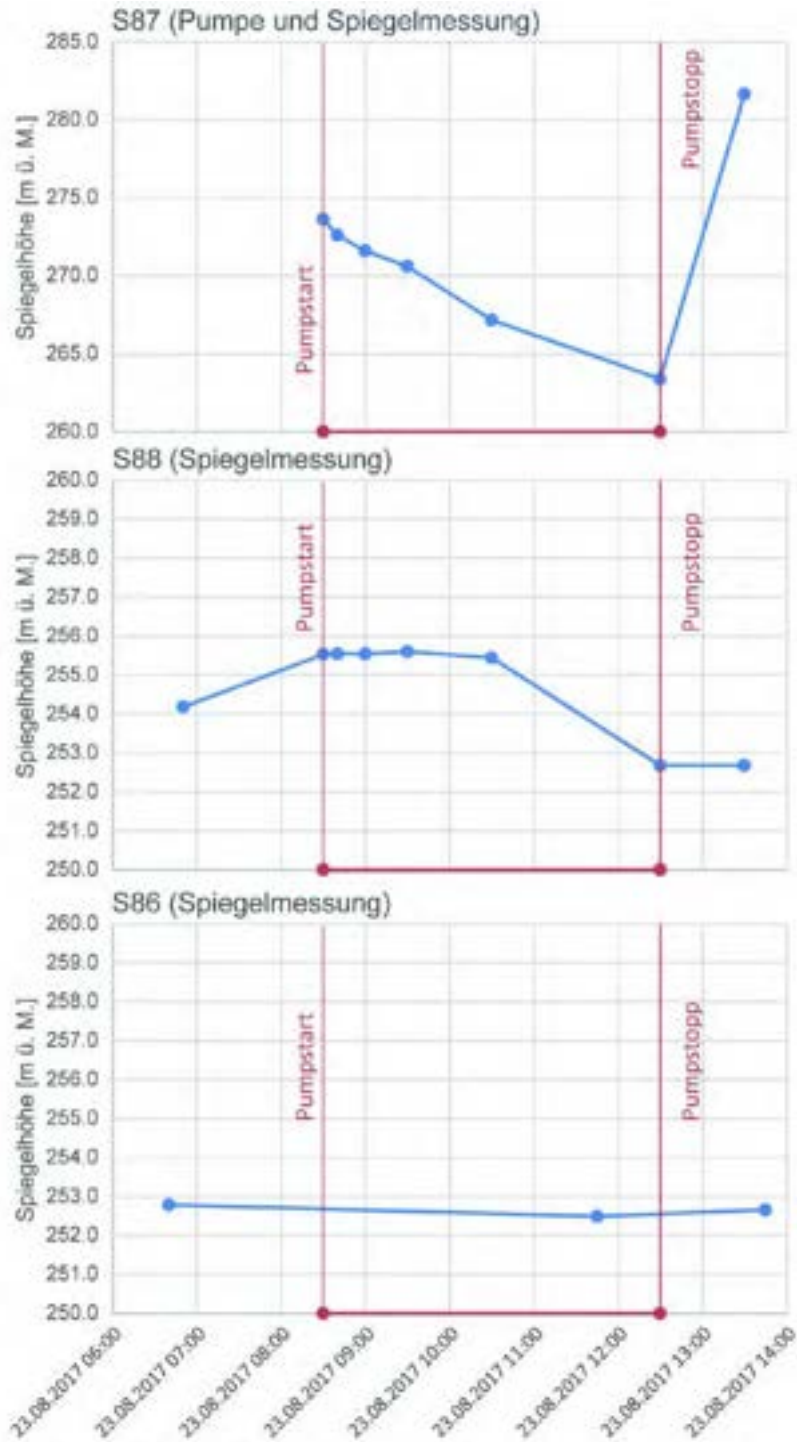


Abbildung 15: Ganglinien der während des Pumpversuchs vom 23.08.2017 gemessenen Spiegelhöhen in den Bohrlöchern S87 (Pumpe), S88 und S86 (Massstabswechsel zwischen S87 und den anderen).

Eine Absenkung des Pegels in S88 konnte erst nach min. 2 h beobachtet werden, eventuell noch später. Erst in der letzten Pegelmessung am Ende des Pumpversuchs konnte eine Absenkung um 2.85 m beobachtet werden. Der dabei erreichte Pegel von ca. 252.7 m ü. M. blieb dabei bis zum nächsten Pumpversuch am 14.09.2017 stabil.

Eine nennenswerte Absenkung des Pegels in S86 konnte während des 4 h dauernden Pumpversuchs nicht festgestellt werden.

Eine am Folgetag (24.08.2017) durchgeführte Wiederholung des Pumpversuchs ergab keine verwertbaren Resultate, da während des Pumpens in der Kaverne S87 verbliebener Stickstoff durch das Bohrloch aufstieg und den Pegel rasch und stark steigen liess. Während des Pumpens in S87 fiel der Spiegel in S88 um 20 cm.

#### *Pumpversuch vom 14.09.2017*

Der dritte Pumpversuch am 14.09.2017 dauerte ebenfalls 4 h. Nachdem der Pegel in S88 durch das Pumpen zunächst sank (um insgesamt 0.6 m nach 2 h) stieg er bis zum Ende des Versuchs wieder leicht an um nach Pumpende wieder auf den Anfangsspiegel anzusteigen (Abbildung 16).

In S87 sank der Pegel während der Dauer des Pumpversuchs um 3.51 m. Eine Verzögerung der Absenkung gegenüber S88 konnte aufgrund des Messintervalls in S87 nicht festgestellt werden.

Der Pegel in S86 stieg während des Pumpversuchs um ca. 1 m an und blieb nach Ende des Versuchs zunächst auf dem neuen Niveau.

#### *Resultate der Pumpversuche*

Durch die Pumpversuche konnte die Verbindung zwischen S87 und S88 erneut bestätigt werden. Eine hydraulische Verbindung der beiden Kavernen zur Kaverne S86 kann aus den Resultaten weder einwandfrei bestätigt noch ausgeschlossen werden. Es kam zwar in S86 während des Pumpens in S87 oder in S88 nicht zu nennenswerten Absenkungen, allerdings war während des zweiten Pumpversuchs (Pumpe in S88) ein plötzlicher Spiegelanstieg in S86 zu verzeichnen. Eine direkte Verbindung der Kavernen S87 und S88 zur Kaverne S86 (und damit zu den mit dieser wiederum verbundenen Kavernen S85 und S89) kann aufgrund von Hohlraumvermessungen ausgeschlossen werden.

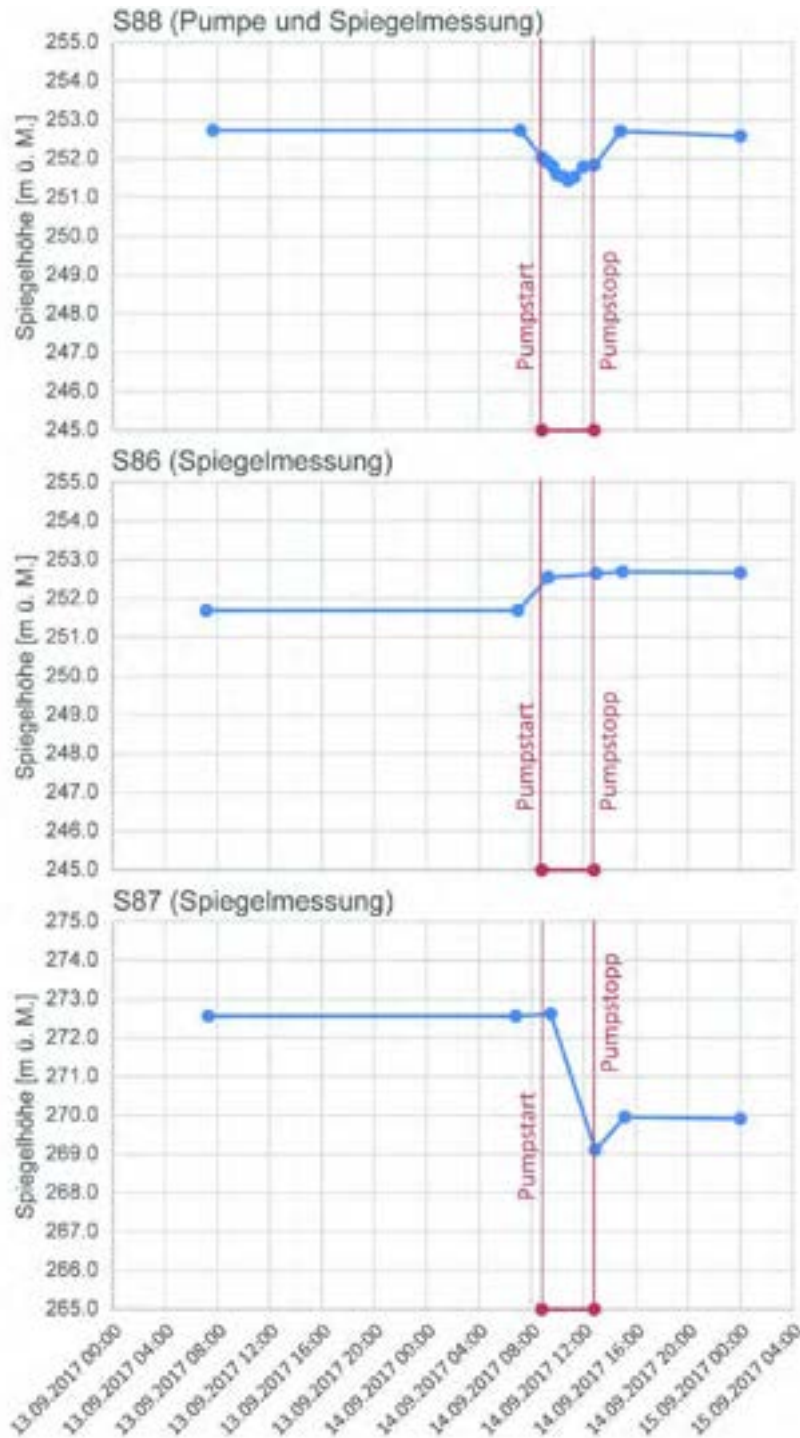


Abbildung 16: Ganglinien der während des Pumpversuchs vom 14.09.2017 gemessenen Spiegelhöhen in den Bohrlöchern S88 (Pumpe), S86 und S87 (Massstabswechsel zwischen S87 und den anderen).

In den beiden miteinander verbundenen Kavernen S87 und S88 fielen die Reaktionen im Bohrloch ohne Pumpe auf die Absenkung im jeweilig anderen Bohrloch mit Pumpe jeweils unterschiedlich aus. Die Spiegeländerungen in S87 waren in beiden Fällen, egal ob in S87 oder in S88 gepumpt wurde, höher als in S88. Eine unterschiedliche Absenkung in S87 als in S88, die nur auf den Dichteunterschied der jeweiligen Wassersäule zurückzuführen wäre, hätte während des ersten Pumpversuchs zu einem Angleichen der beiden Pegel führen müssen, da durch das Pumpen in S87 das leichtere Frischwasser über der Sole während des Pumpversuchs sukzessive abgepumpt wurde.

Ob es während des dritten Pumpversuchs am 14.09.2017 in S87 zu einer ähnlich langen Verzögerung kam wie in S88 während des ersten am 23.09.2017 kann aufgrund des Messintervalls in S87 nicht geklärt werden. Der Wiederanstieg des Pegels in S88 während des zweiten Pumpversuchs deutet jedoch auf eine verzögerte Reaktion in der verbundenen Kaverne S87 hin, deren Sole erst verzögert in S88 einfluss und den Pegel in S88 anhob. Ein ähnliches Verhalten wurde während des Ereignisses am 13.06.2017 beobachtet, als im Verlaufe des Sole-/ Gasaustritts aus S87 der Druck nachliess und ein Übergang von einem steten, fontäneartigen Austritt zu periodisch schwankenden Gasaustritten festzustellen war. Dies wird im Bericht der Firma DEEP [14] auf zwischen den beiden Kavernen hin und her schwingende Solebewegungen zurückgeführt. Eine solche Schwingung würde insbesondere durch noch im Kavernendach bestehende Stickstoffpolster begünstigt, die durch Kompression und Ausdehnung einen Teil der Druckschwankungen zwischen S87 und S88 zunächst abfangen würden.

Die verzögerte Auswirkung des Pumpbetriebs in S87 auf S88 kann auch durch die Bildung einer relativen Unwegsamkeit zwischen den beiden Kavernen erklärt werden, welche erst bei steigendem Druckgradienten durchlässig wurde und zu einem raschen Druck- und damit verbundenen Pegelausgleich führte. Ein plötzliches Einströmen der Sole aus der benachbarten Kaverne könnte unter Umständen trotz Abpumpens zu einem Pegelanstieg führen, wie während des Pumpversuchs am 14.09.2017 in S88 beobachtet wurde.

## 7.5 Nivellementmessungen

In den nach dem Soleaustrittsereignis durchgeführten Nivellementmessungen, wie auch in den planmässig im September/ Oktober 2017 durchgeführten wurden keine aussergewöhnlichen Setzungen im Bereich der Bohrlöcher S87 und S88 festgestellt. Die hauptsächlichen Setzungen im Bohrfeld Sulz fanden während des Jahres 2017 im Osten des Gebietes um den Eigentalhof statt. Der Messpunkt auf dem Schacht der Bohrung S87 (431S) zeigt mit 10 mm zwischen den beiden planmässigen Messungen 2016 und 2017 einen vergleichsweise niedrigen Setzungswert [41].

Für die meisten Messpunkte im Bereich des Bohrfelds Sulz wird seit Messbeginn ein relativ gleichmässiger Senkungsverlauf festgestellt. Dies gilt auch für die beiden Messpunkte 431S und 432S auf den Schächten der Bohrungen S87 und S88 (Abbildung 17). Die Messung aus dem Jahr 2016 zeigte für einige Messpunkte eine leichte Abschwächung der Senkungsraten. Die beiden Messungen aus dem Jahr 2017 zeigen jedoch wieder die zuvor üblichen Senkungsraten.

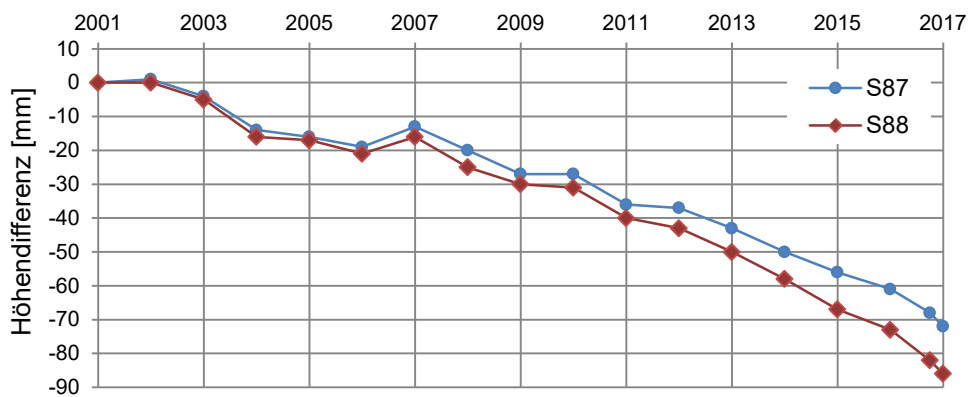


Abbildung 17: Senkungsverlauf der Messstellen 431S (auf Schacht S87) und 432S (auf Schacht S88) zwischen 2001 und 2017.

Weder die Messungen nach dem Soleaustrittsereignis, noch die im Herbst 2017 durchgeführten planmässigen Messungen zeigten Auffälligkeiten in der Umgebung der Bohrlöcher S87 und S88. Eine Auflistung und Darstellung der Messergebnisse findet sich in den drei Berichten der Rapp Infra AG in Beilage 5.



## **8. Externe Expertisen**

Zur Klärung der Ursachen des Sole-Austrittsereignisses vom 13.06.2017 beziehungsweise zur Verifikation verschiedener Hypothesen wurden einige Institutionen angefragt, Berechnungen und Abschätzungen zum Ereignis oder zu einzelnen Aspekten des Ereignisses anzustellen:

Das Departement Physik der Universität Basel wurde angefragt, Berechnungen zu einem gasgetriebenen Soleaustritt anzustellen, konnte jedoch zur Thematik keinen weiteren nennenswerten Beitrag leisten.

Daneben wurden die Firmen Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH und DEEP Underground Engineering GmbH angefragt, Berechnungen zum Soleaustritt an sich anzustellen; ein Auftrag zur Untersuchung des Ereignisses wurde an die Firma DEEP vergeben.

Eine Anfrage der Institut für Gebirgsmechanik GmbH an die Schweizer Salinen AG über eine Zusammenarbeit zur möglichen Klärung des Ereignisses mittels gebirgsmechanischen Simulationen und Untersuchung möglicher Auslösemechanismen hat bis zum aktuellen Zeitpunkt nichts ergeben – insbesondere da sich das Ereignis nach eingehender Befassung mit dem Sachverhalt als nicht gebirgsmechanisch simulierbar herausstellte.

Die Firma Hydrosond wurde angefragt, ein Review zum Bericht der Firma DEEP zu erstellen. Die Firma Hydrosond hat die beiden Berichte der Firma DEEP erhalten und studiert. Ein Review ist zum heutigen Zeitpunkt nicht erstellt.

### **8.1 Erklärungsmodell der Firma DEEP**

Von der Firm DEEP Underground Engineering GmbH liegt ein Bericht [14] sowie eine Ergänzung dieses Berichts nach Abschluss der Hohlraumvermessungen in S87 und S88 im August und September 2017 [15] vor. Bericht und Ergänzung finden sich in Beilage 8. Für Details wird auf diesen Anhang verwiesen. Im Folgenden soll eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der Firma DEEP gegeben werden.

In ihrem Bericht vom 24.08.2017 stellt die Firma DEEP fest, dass drei Szenarien als mögliche Auslösemechanismen des Sole-Austritts vom 13.06.2017 in Betracht gezogen werden können:

- 1. Das System Bohrung und Kaverne S87 standen hydraulisch nicht in Verbindung, und innerhalb der Kaverne kam es aufgrund von Temperaturänderungen und Konvergenz zu einem Druckanstieg. Ab einer bestimmten Druckdifferenz zwischen Bohrloch und Kaverne konnte die Verbindung wieder hergestellt werden und es kam zum Ausbruch des Gas-Sole Gemisches. Ursache für die hydraulische Trennung beider Systeme kann z.B. durch Kristallisations- und/oder Ausfällungsprozesse, das Kollabieren des Bohrlochs oder der Formation hervorgerufen werden.*
- 2. Das System Bohrung und Kaverne S87 bildeten in Richtung Oberfläche ein offenes System, so dass ein Druckaufbau nicht möglich war. In diesem Fall müsste Stickstoff schlagartig, z.B. durch einen Abbruch im Kavernendach, in Bewegung gesetzt werden, so dass Stickstoff ins Bohrloch gelangt. Durch diesen Gaseintrag reduziert sich die Flüssigkeitsdichte im Bohrloch und somit auch die Auflast der Säule. Aufgrund der geringeren Auflast dehnen sich die Stickstoffpolster im Dachbereich der Kavernen aus, welches wiederum zu einem Transport von weiterem Stickstoff und Sole in die Bohrung führt.*
- 3. Durch Frischwasserzuflüsse, wie sie bei der Kamerafahrt vom 26.07.17 festgestellt wurden, kann es zu Nachsoleffekten im Hals und Dachbereich kommen, die wiederum zu einer spontanen Stickstofffreisetzung in Richtung Bohrloch führen können und den gleichen Prozess wie oben beschrieben in Gang setzten.*

*(Zitiert aus [14])*

Im Weiteren wird dargelegt, dass das vermutlich noch im Bohrloch befindliche Stickstoff-Volumen bei Weitem ausreichte, Sole über die Höhe des Bohrlochs an die Oberfläche zu fördern. Durch den Gas-Sole-Austritt wurde gemäss des Berichts der Druck in der Kaverne weiter reduziert, wodurch sich der verbliebene Stickstoff weiter ausdehnen konnte. Durch die hydraulische Verbindung zu S88 floss Sole aus S88 in S87 nach, was wiederum zu einem Druckabfall in S88 und damit verbundener Ausdehnung möglicher Stickstoffpolster in S88 führte. Als Resultat der sich wechselweise komprimierenden und ausdehnenden Stickstoffpolster habe es zu einer „Wellenbewegung“ von Sole zwischen S87 und S88 kommen können, die die periodischen Gas- und Soleaustritte im späteren Verlauf des Ereignisses vom 13.06.2017 erklären würde.

Der Verlauf des Ereignisses deutet also auf das Vorhandensein von Stickstoffpolstern in den beiden Kavernen S87 und S88 hin und lässt die beiden Szenarien 2 und 3 als plausibel erscheinen.

Nachdem die Ergebnisse der Hohlraumvermessungen vorlagen, konnte auf deren Basis eine Ergänzung zum ersten Bericht erstellt werden [15]. Nach einer Zusammenstellung der Kavernenentwicklung zwischen 1998 und 2017 wird darin festgestellt, dass die deutlichen Hinweise auf Abbrüche im Dachbereich das zweite Szenario (Abbruch im Kavernendach) als das wahrscheinlichste erscheinen lassen. Solche Abbrüche sind laut Angaben DEEPs typisch für Bereich mit höheren „Feststoffgehalten“ (nicht lösliche Bestandteile) bzw. an Übergangsschichten zwischen „feststoffarmen und feststoffreichen Schichten“ [15].

Das dritte Szenario (Nachsoleffekt aufgrund von Frischwasserzuflüssen) wird in Anbetracht des im Bohrloch S87 festgestellten Frischwassers ebenfalls als plausibel eingestuft. Die Verbreiterung des Halsbereichs der Kavernen kann gemäss Angaben DEEPs ebenfalls auf Frischwasserzuflüsse zurückgeführt werden.

## 9. Diskussion

Die Resultate der in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungen geben eindeutige Hinweise zum Mechanismus des Soleaustritts aus S87 vom 13.06.2017 und lassen dabei zwei mögliche Auslöser dieses Mechanismus plausibel erscheinen.

Der späte Verlauf des Austrittsereignisses, während dem nur noch in periodischen Abständen Gas austrat und die Analyse des austretenden Gases deuten klar auf den Mechanismus eines Stickstoff-getriebenen Kaltwassergeysirs hin. Dabei führte ein plötzlicher Austritt von in der Kaverne S87 verbliebenem Stickstoff in das Bohrloch zu einer abrupten Verminderung des Wasserdrucks und zum Aufstieg von Sole und Stickstoff durch das Bohrloch. Da das Bohrloch zu diesem Zeitpunkt unverschlossen war, konnte es zu einem fontäneartigen Austritt des Sole-Gas-Gemischs kommen. In den diesem Bericht beiliegenden Berichten der Firma DEEP Underground Engineering GmbH (Beilage 8.1 und 8.2) wird dargelegt, dass das mutmasslich in der Kaverne befindliche Stickstoff-Volumen bei Weitem ausreichte, Sole über die Höhe des Bohrlochs an die Oberfläche zu fördern. Stickstoff ist wie alle Gase stark kompressibel. Die unter Druck stehenden Stickstoffreste in der Kaverne erreichen somit ein Vielfaches Volumen unter atmosphärischen Druckbedingungen.

Der in der Kaverne befindliche Stickstoff war offensichtlich als Rest des während der Produktion als Schutzblanket verwendeten Stickstoffs in Taschen im Kavernendach gefangen. Die nach dem Ereignis vom 13.06.2017 durchgeführten Hohlraumvermessungen der miteinander verbundenen Kavernen S88 und S87 zeigen einige solcher Taschen im Dach der beiden Kavernen.

Als Auslöser des plötzlichen Austritts dieses gefangenen Stickstoffs in das Bohrloch S87 sind auf Basis der Untersuchungsergebnisse zwei Szenarien denkbar:

Frischwasserzuflüsse in die Kaverne S87 können nach der Umstellung auf Stand-by-Zustand zu einer Nachsolung geführt haben, die schliesslich Wegsamkeiten zwischen dem in Taschen gefangenen Stickstoff und dem Rohrschuh bildeten. Im Bohrloch S87 wurde tatsächlich Frischwasser festgestellt und die breite Form des Kavernenhalses deutet auf Nachsolung durch Frischwasserzuflüsse hin. In der Verrohrung von S87 wurden Löcher, über die Felsgrundwasser in das Bohrloch floss, festgestellt. Diese Löcher können jedoch auch während des Austrittsereignisses und den danach durchgeführten Arbeiten entstanden sein. Eine Untersuchung des Bohrlochs auf weitere Frischwasserzuflüsse ist geplant.

Neben einer möglichen Verbindung durch Nachsolung ist ein Nachbrechen des Kavernendachs als weiterer Auslösemechanismus denkbar resp. wahrscheinlich. Ein Nachbruch zwischen einer bereits bestehenden mit Stickstoff gefüllten Tasche im Kavernendach von S87 und dem Rohrschuh könnte ebenfalls zu einer plötzlichen Freisetzung des Stickstoffs in Richtung Bohrloch geführt haben. Die Hohlraumvermessungen von S87 und S88 zeigen in beiden Kavernen deutliche Anzeichen von Nachbrüchen. Dieses Szenario wird von der Firma DEEP als das wahrscheinlichste angesehen.

Möglich ist ebenfalls eine Kombination der beiden Szenarien. So hätte eine Nachsolung aufgrund zufließenden Frischwassers Nachbrüche im Kavernendach begünstigen können. Eine endgültige Festlegung, welcher Prozess zur Freisetzung des gefangenen Stickstoffs führte, kann nicht angestellt werden.

## 10. Konsequenzen

In Konsequenz des Soleaustritts aus S87 am 13.06.2017 und der daraufhin angestellten Untersuchungen ergab sich für die Schweizer Salinen AG Anpassungsbedarf verschiedener Betriebsprozesse und –konzepte. Dies umfasst folgende Punkte:

- 1) Erstellung eines Inventars der Bohrlochköpfe aller Bohrungen im Stand-by-Zustand.
- 2) Erstellung einer Arbeitsanweisung zur Umstellung von Bohrungen auf Stand-by sowie zur Handhabung von Bohrungen im Stand-by-Zustand.
- 3) Erstellung eines Überwachungskonzepts von Bohrungen im Stand-by-Zustand.
- 4) Ergänzung der Risikoanalyse Geologische und Umwelt-Risiken für den internen Gebrauch und zuhanden der Versicherung.

Da die festgestellten Auslösemechanismen nur in einer Bohrung, die sich im Stand-by-Zustand befand, zu einem Soleaustritts-Ereignis führen konnten, betreffen die Konsequenzen hauptsächlich diese Bohrungen. Bohrungen im Produktionsbetrieb sind fest mit den entsprechenden Sole-, Wasser- und Stickstoffleitungen verbunden. Die Flansche halten Drücken bis 64 bar stand. Ein Austritt wie am 13.06.2017 aus S87 kann also nicht aus Produktionsbohrungen heraus stattfinden.

Auch die potentielle Entwicklung von Auslösemechanismen, die in S87 zu einem Soleaustritt führten, können in Produktionsbohrungen wesentlich früher erkannt werden. So wird der Druck im Bohrloch (Wasser, Sole, Stickstoff) permanent überwacht. Die Kavernen produzierender Bohrungen werden momentan alle vier Jahre per Hohlraumvermessung überwacht. So können auch ungünstige Entwicklungen im Kavernendach und Halsbereich früher erkannt werden. Zusammen mit den jährlich auf allen Bohrfeldern (aktiv und inaktiv) durchgeführten Nivellementmessungen werden die Produktionsbohrungen und Entwicklungen in ihrem Umfeld gut überwacht.

### 10.1 Inventar Bohrlochköpfe

Zurzeit wird eine Inventur der Bohrlochköpfe aller Bohrungen im Stand-by-Zustand durchgeführt. Dabei wird zum einen Zustand der Bohrlochköpfe erfasst als auch die Inventarliste wo nötig aktualisiert. Dies erlaubt, möglicherweise unzureichend verschlossene Bohrlöcher zu identifizieren und Defizite zu beheben. Gleichzeitig dient die Inventur als Grundlage der zukünftigen Überwachungen der Bohrlochköpfe (Punkt 3).

## 10.2 Arbeitsanweisung Stand-by

Eine interne Arbeitsanweisung, welche das Verhalten bei der Umstellung von Bohrungen auf den Stand-by-Zustand sowie den Umgang mit Bohrungen im Stand-by-Zustand regelt, befindet sich momentan in Ausarbeitung. Sie wird als zentralen Punkt die Ausrüstung aller Bohrungen in Stand-by mit folgenden Installationen beinhalten:

- Blindflansch min. PN64
- Manometer
- Kugelhahn

Die Installation eines Blindflanschs mit einer Auslegung von mindestens 64 bar an den Bohrlochköpfen aller Bohrungen im Stand-by-Zustand und ein ständiger Verschluss sollen in Zukunft Sole- und Gasaustritte verhindern. So war das Ereignis vom 13.06.2017 nur möglich, da zu diesem Zeitpunkt das Bohrloch in Erwartung einer bald durchzuführenden Messung unverschlossen war. In Zukunft sollen alle Bohrlöcher nach Arbeiten am Loch sofort verschlossen werden; Unverschlossene Bohrlöcher ohne Personen und/ oder Gerät am Bohrloch werden nach der neuen Arbeitsanweisung unzulässig sein.

Ein fest installiertes Manometer erlaubt eine jederzeitige Kontrolle des Drucks im Bohrloch und ein Kugelhahn den kontrollierten Ablass von Gas und Flüssigkeit aus dem Bohrloch.

Derzeit werden während der Produktionsphase alle vier Jahre Hohlraumvermessungen der Kavernen durchgeführt. Eine abschliessende Hohlraumvermessung findet vor dem endgültigen Verschluss eines Bohrlochs statt. Zukünftig soll bei der Umstellung auf Stand-by-Zustand zwingend eine Hohlraumvermessung durchgeführt werden, wenn keine aktuelle Hohlraumvermessung vorliegt. Ab welchem Alter der letzten Hohlraumvermessung vor Umstellung auf Stand-by zukünftig eine neue Hohlraumvermessung durchgeführt werden soll, wird momentan geklärt. Eine Kombination aus geförderter Salzmenge und Zeitdauer, bei der entweder nach einer maximalen seit der letzten Vermessung geförderten Tonnage oder einer maximalen Zeitdauer eine Hohlraumvermessung nötig sein wird, ist momentan am wahrscheinlichsten.

## 10.3 Überwachungskonzept

In Ergänzung der Arbeitsanweisung Stand-by wird momentan ein Überwachungskonzept der Bohrungen im Stand-by-Zustand erarbeitet. Dies soll neben der Ver-

hinderung von Gas-/ Sole-Austritten durch die Arbeitsanweisung Stand-by das frühzeitige Erkennen ungünstiger Entwicklungen ermöglichen. Das Überwachungskonzept wird folgende zentrale Punkte beinhalten:

Während jährlich stattfindender Kontrollen aller Stand-by-Bohrungen soll Zustand des Bohrlochkopfs und –schachts, der Druck im Bohrloch und die Funktionalität des zu installierenden Kugelhahns erfasst und protokolliert werden.

Parallel dazu sollen in regelmässigen Abständen Kontrollen der Sole im Bohrloch durchgeführt werden, um die Bildung von Frischwasserlinsen wie in S87 beobachtet, frühzeitig entdecken zu können. Dies soll durch Logs entweder der Leitfähigkeit oder des Drucks im Bohrloch geschehen.

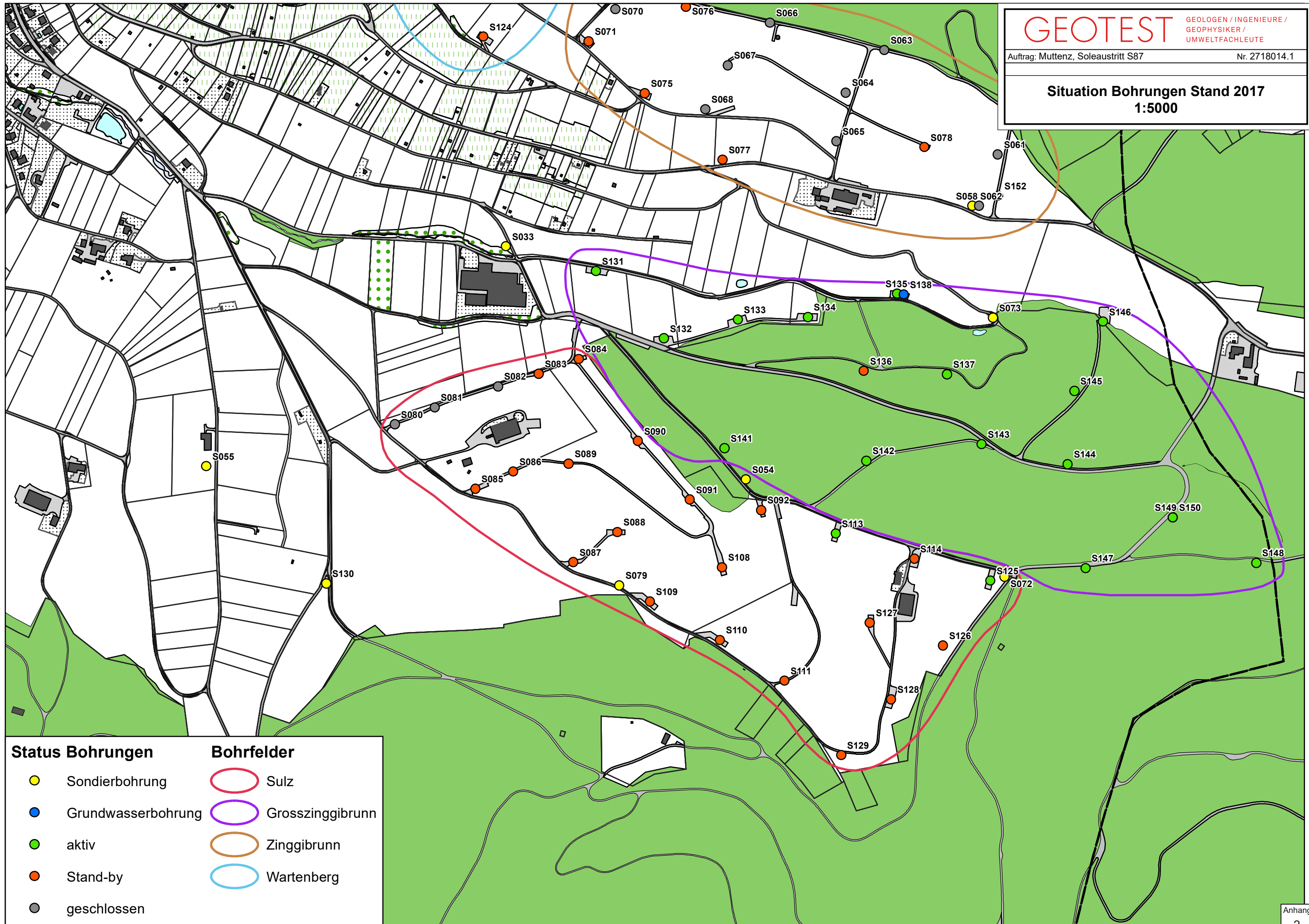
#### **10.4 Risikoanalyse**

Die bestehende Risikoanalyse Geologische und Umwelt-Risiken für den internen Gebrauch und zuhanden der Versicherung der Schweizer Salinen AG wird nach dem Ereignis vom 13.06.2017 um den potentiellen Austritt eines Gas-Sole-Gemischs aus einer Stand-by-Bohrung ergänzt. Eine Analyse des Risikos sowie der zu treffenden Massnahmen gegen zukünftige Ereignisse dieser Art wird darin erfasst.



**Anhang 1: Situation Bohrungen Stand 2017, 1:5 000**

## Situation Bohrungen Stand 2017 1:5000



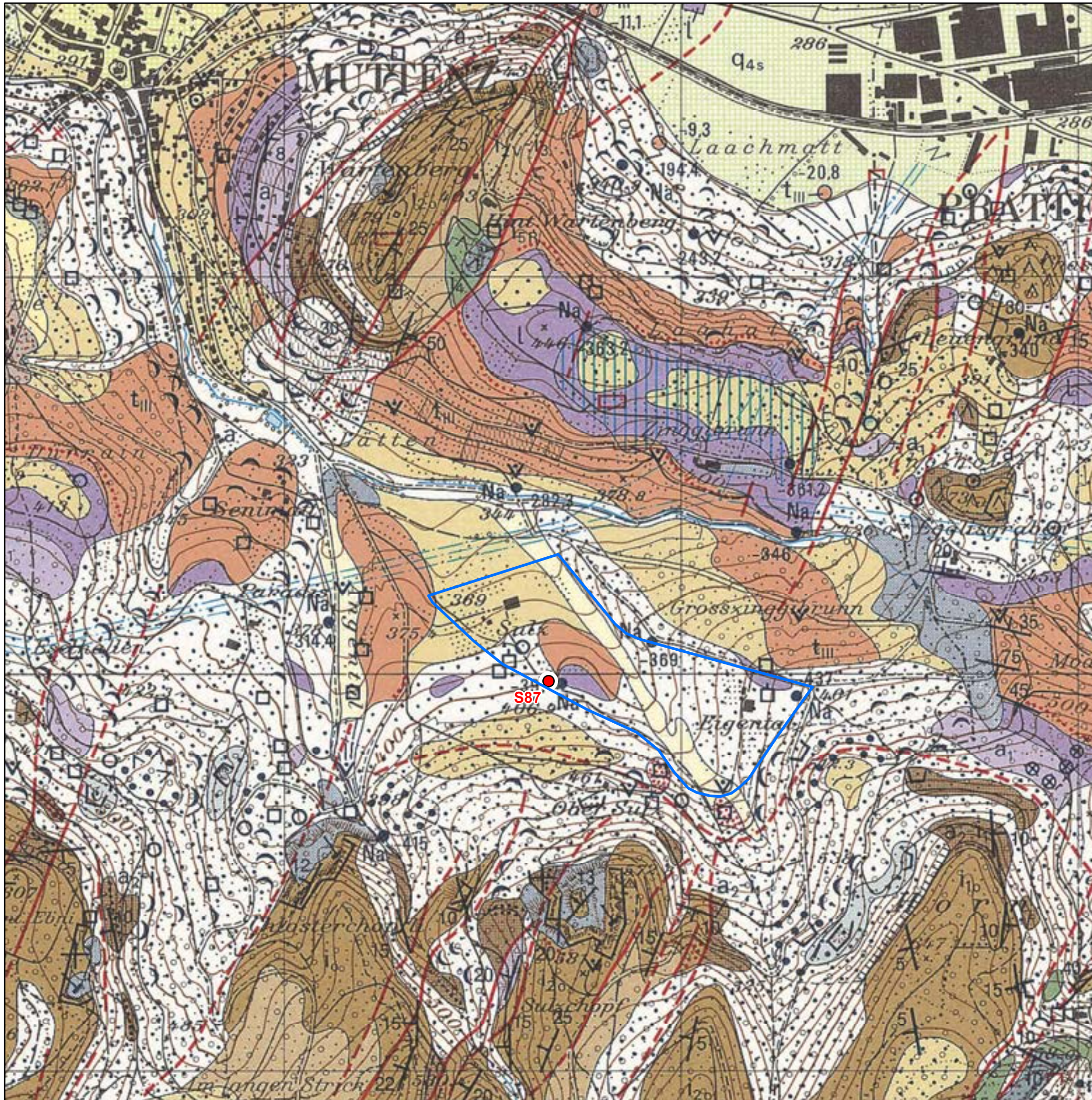
### Status Bohrungen

- Sondierbohrung
- Grundwasserbohrung
- aktiv
- Stand-by
- geschlossen

### Bohrfelder

- Sulz
- Grosszinggibrunn
- Zinggibrunn
- Wartenberg

## **Anhang 2: Geologische Karte 1:10 000**



Bohrfeld Sulz

Quartär	
	Kinetische Aufschüttung, Depone Aufgeschüttete Kiesgrube, Tongrube usw.
	Kinetische Terrain-Veränderungen (Gullys)
	Holozäne Terrassen, Alluvialböden
	Ehemalige Wehler
	Sonstige Gesteine
	Armourige Böden – Seesande und Torf (Kont. 600 a/250 T)
	Kalkuff
	Beachstratagem, Schwebelächer
	Terrassenrand, markanter Einsenkung
	Gehängeschutt
	Bergmassen, Blockschutt (auf der Westseite der Blau-Rote Tabelle gezeichnet)
	Rutschung, Hangschutt (mit Anmerk.)
	Schutt (mit Anmerk.)
	Versteckte und verweirte Massen von Mollasse und Schotter, von Schwebelächen bedeckt (siehe Brunnen)
	Schwebelächen in Mulden, Deltalächen
	Löss und Lösslehm (in hohen Mulden weitläufig angelegt, verweirter)
	Lösslehm, verweirte mit ungesättigtem Quarz- und Sandsteinen
	Lösslehm, verweirte mit Gehängeschutt bzw. Kalkgeröll
	Verwitterungslöss, Gehängelöss Verweirter Gabbler- und Verwitterungsschutt
Dogger	
	Varisz-Schichten bis Ansoep-Athina-Schichten Fingermass-Gebirg Obere Hauptmassen (L) Kornmassen-Mergel (Kornmassen-Schichten) Hauptmassen (H) Untere Hauptmassen (L) Untere Doggers (Murchison- bis Blagden-Schichten) Wegener-Schichten Hauptmassen-Schichten Murchison-Schichten Opalinus-Ton
Lias	
	Lias-Schichten, ungesättigt (Asterisk für Jura-Schichten)
Trias	
Keuper	
	Wald (Sandstein, Mergel und Ton) Gipskeuper, Schilfsandstein-Gruppe, Bunte Mergel mit Gipskeuper Dolomit
Muschelkalk	
	Trigonodus-Dolomit Hauptmassen (Trübsen- und Nollau-Kalk) Anhydritgruppe (wie in Bohrunge eingetragen)
	Streichen und Fallen der Schichten in Normallage (mit Fallweg)
	Streichen und Fallen der Schichten in überkippter Lage (mit Fallweg)
	Horizontale Schichtlage
	Vertikale Schichtlage
	Streichen und Fallen von Bruchflächen (mit Fallweg)
	Verwerfung, Störungsverschiebung (gesichert – vermutet)
	Aufschüttung, Überschiebung (gesichert – vermutet)

Ausschnitt aus: Bitterli-Brunner et al. (1984): Blatt 1067 Ariesheim, Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Karte 80 [58], einsehbar auf <https://map.geo.admin.ch>

### **Anhang 3: Übersichtsprofil S87 mit Ausbau, Schweizer Salinen AG**

# Profil Geologie

## S 87

Koordinaten: [616'670.65 / 261'985.78]

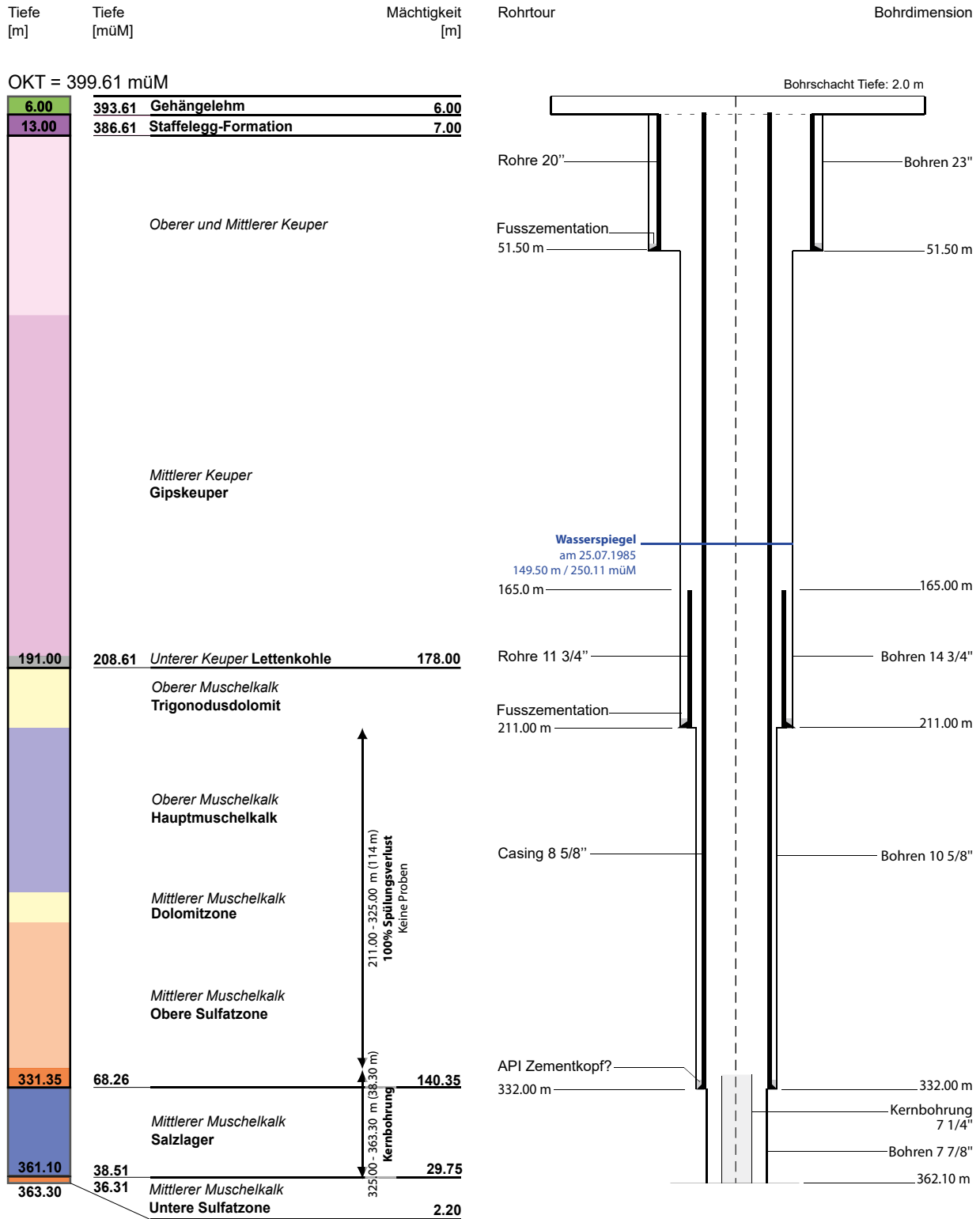
Standort: Sulz, MuttENZ

Parzelle: 2861

Bohrdauer: 27.06.1985 bis 09.08.1985

Bohrfirma: Fehlmann Grundwasserbauten AG

Geologisches Profil	Geologie	Endausbau
---------------------	----------	-----------



## **Anhang 4: Übersichtsprofil S88 mit Ausbau, Schweizer Salinen AG**

# Profil Geologie

## S 88

Koordinaten: [616'736.95 / 262'030.75]

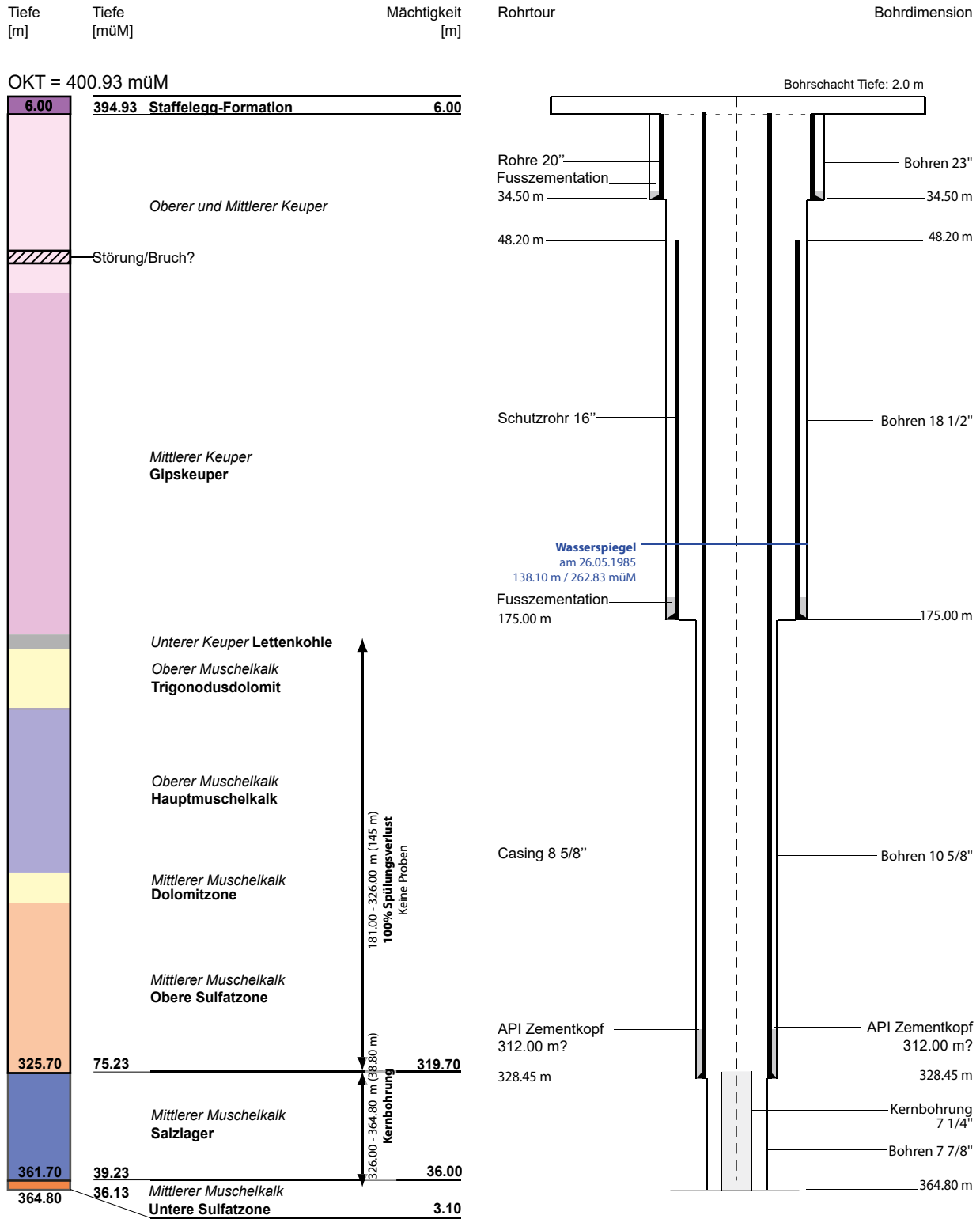
Standort: Sulz, MuttENZ

Parzelle: 2861

Bohrdauer: 09.05.1985 bis 26.06.1985

Bohrfirma: Fehlmann Grundwasserbauten AG

Geologisches Profil	Geologie	Endausbau
---------------------	----------	-----------





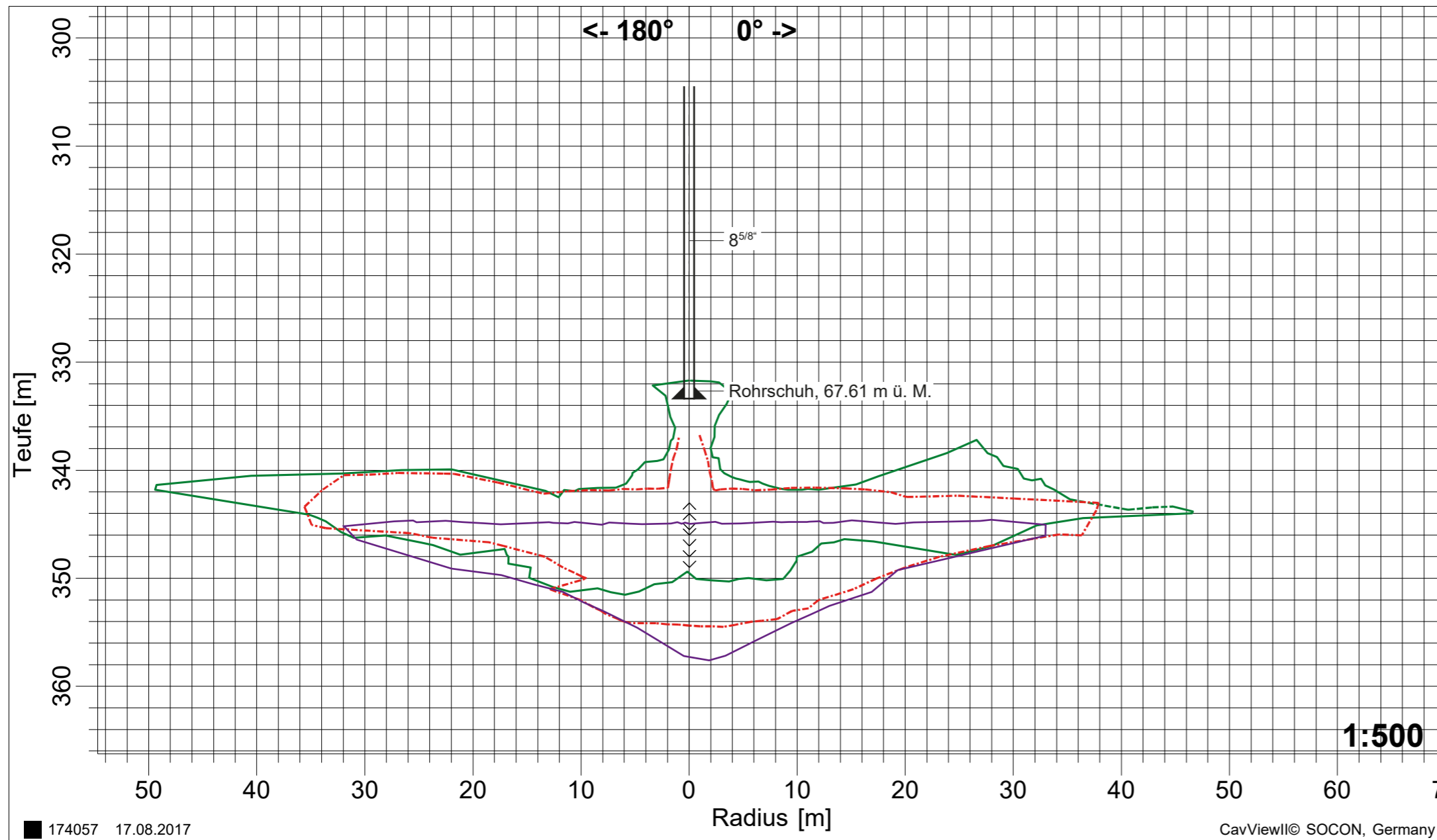
## Anhang 5: Querprofile 1:500, Kaverne S87

- 5.1) Querprofil 180°/0°
- 5.2) Querprofil 195°/15°
- 5.3) Querprofil 210°/30°
- 5.4) Querprofil 225°/45°
- 5.5) Querprofil 240°/60°
- 5.6) Querprofil 255°/75°
- 5.7) Querprofil 270°/90°
- 5.8) Querprofil 285°/105°
- 5.9) Querprofil 300°/120°
- 5.10) Querprofil 315°/135°
- 5.11) Querprofil 330°/150°
- 5.12) Querprofil 345°/165°

**Querprofil 180° / 0° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



■ 174057 17.08.2017

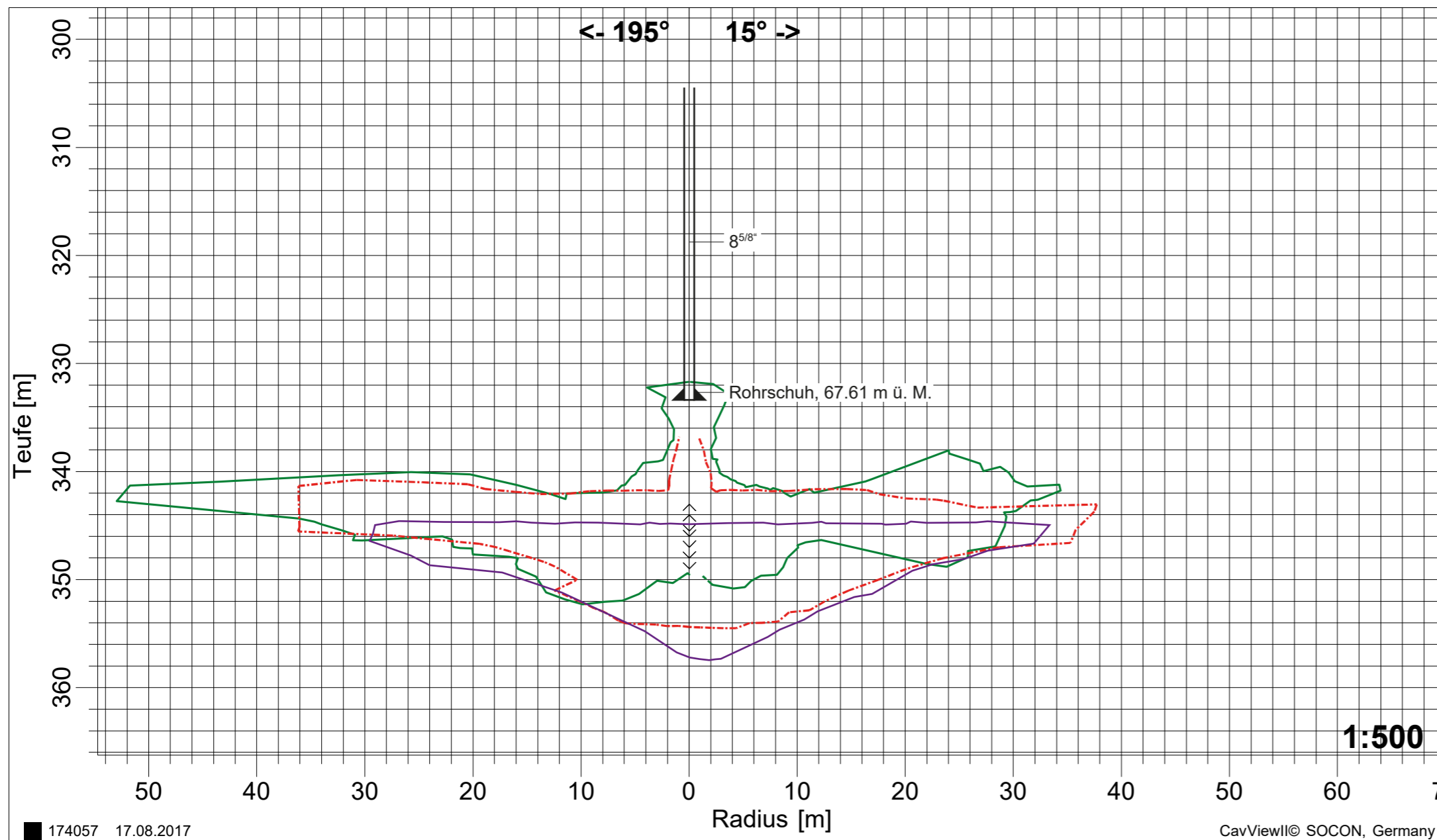
CavViewII© SOCON, Germany

8 5/8" : 323.6 m	4 1/2" : 342.6 m	<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)
<span style="color: green;">—</span> (17.08.2017)	Kipp-Position	

**Querprofil 195° / 15° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



174057 17.08.2017

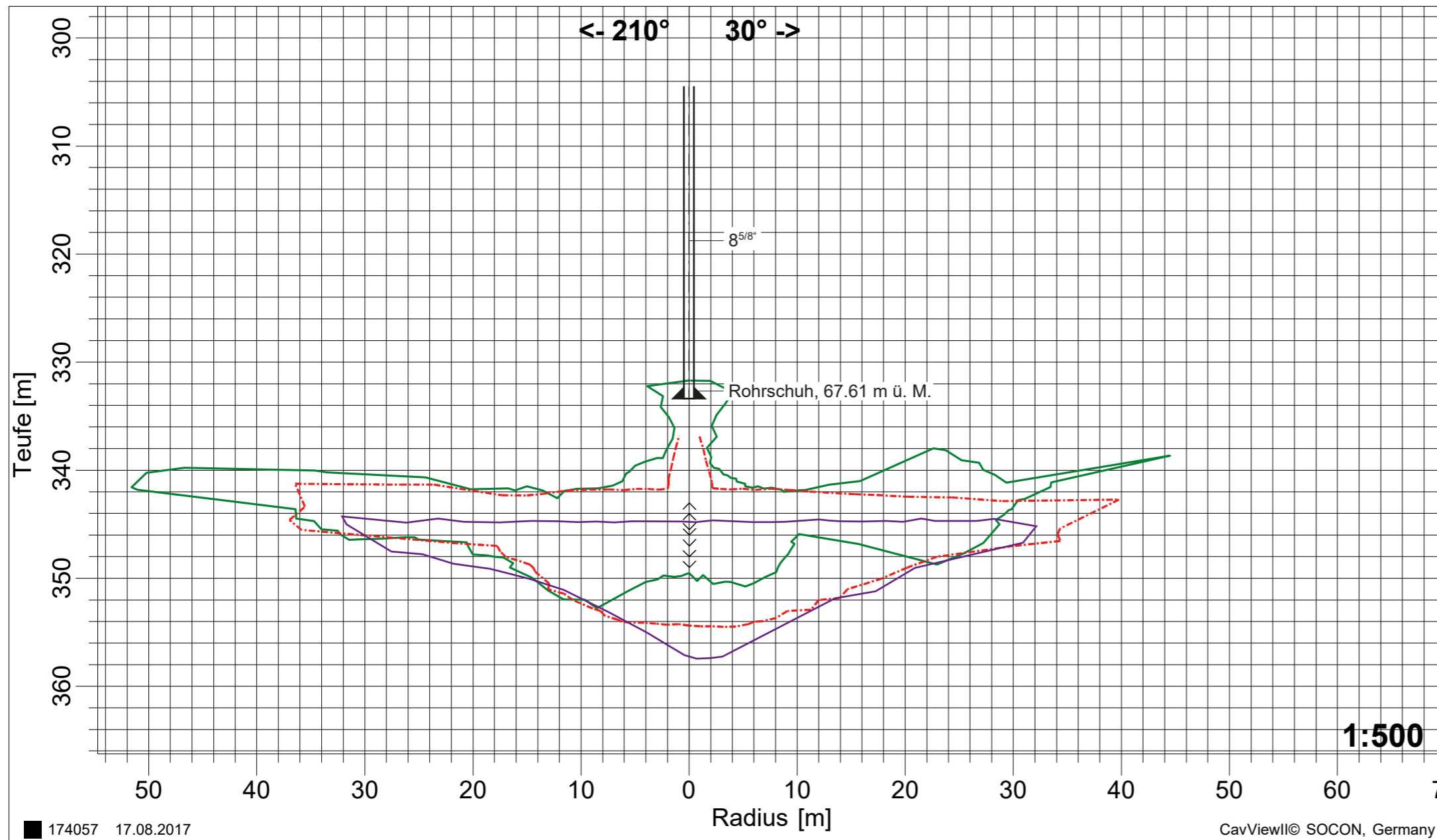
CavViewII© SOCON, Germany

8 5/8" : 323.6 m	4 1/2" : 342.6 m	<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)
<span style="color: green;">—</span> (17.08.2017)	Kipp-Position	

**Querprofil 210° / 30° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

■ 174057 17.08.2017

CavViewII© SOCON, Germany

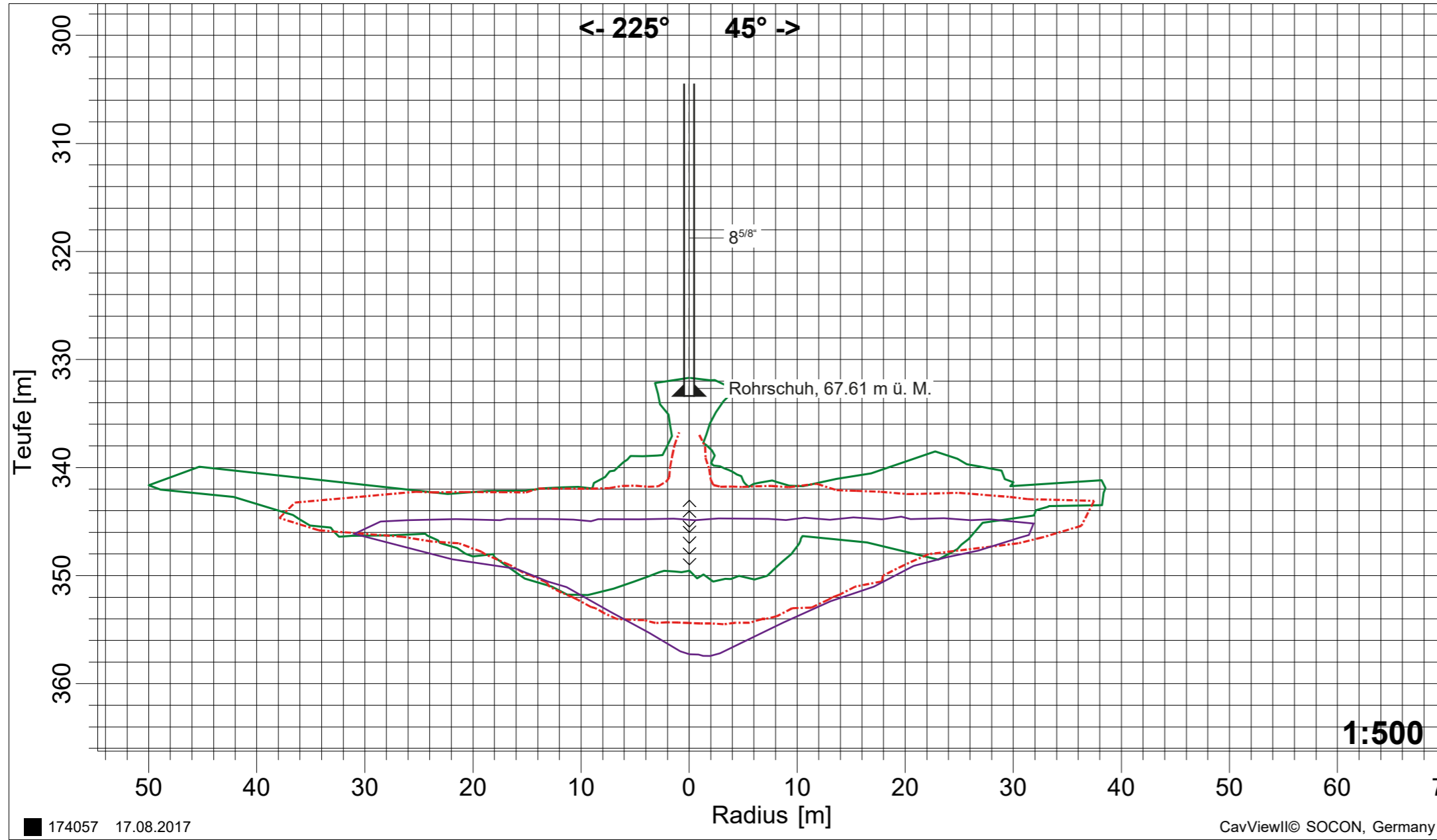
▲ 8 5/8" : 323.6 m	▲ 4 1/2" : 342.6 m	- - - (09.11.2000)
— (17.08.2017)	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 225° / 45° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



174057 17.08.2017

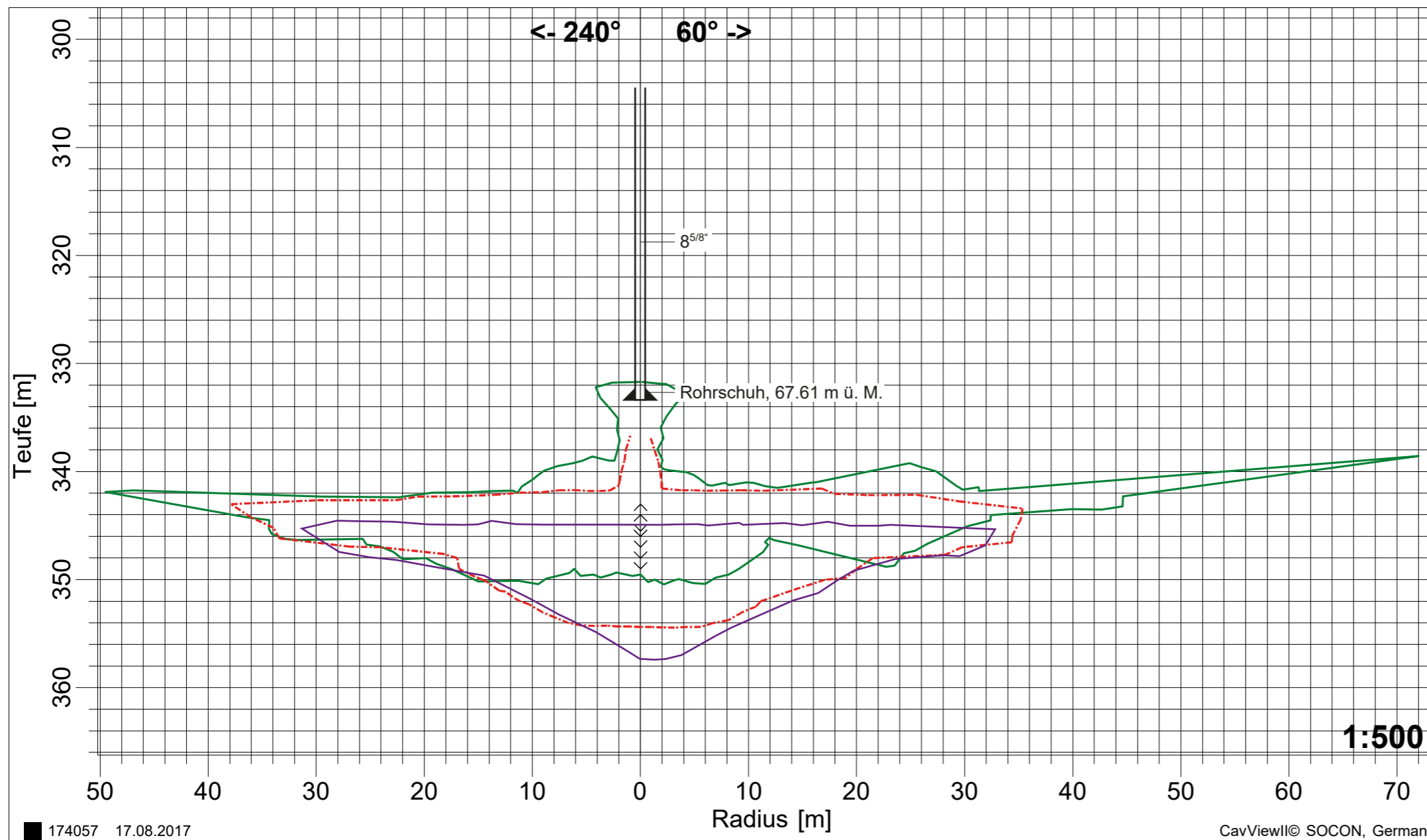
CavViewII© SOCON, Germany

8 5/8" : 323.6 m	4 1/2" : 342.6 m	<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)
<span style="color: green;">—</span> (17.08.2017)	Kipp-Position	

**Querprofil 240° / 60° 1:500**  
**Kaverne S87**

S 87

17.08.2017



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



**1:500**

■ 174057 17.08.2017

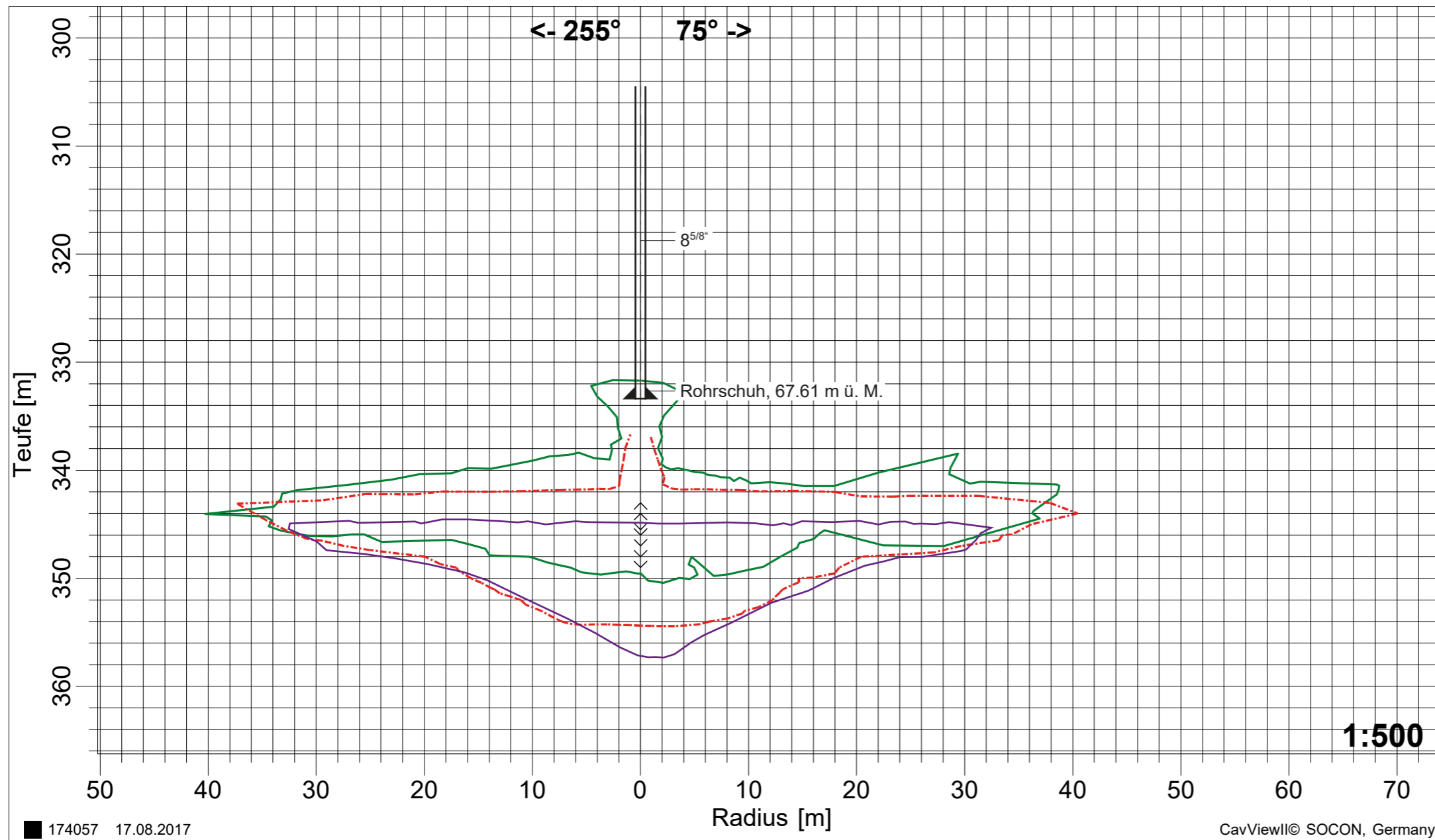
CavViewII© SOCON, Germany

▲ 8 5/8" : 323.6 m	▲ 4 1/2" : 342.6 m	- - - (09.11.2000)
— (17.08.2017)	∨ ∨ Kipp-Position	

**Querprofil 255° / 75° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



■ 174057 17.08.2017

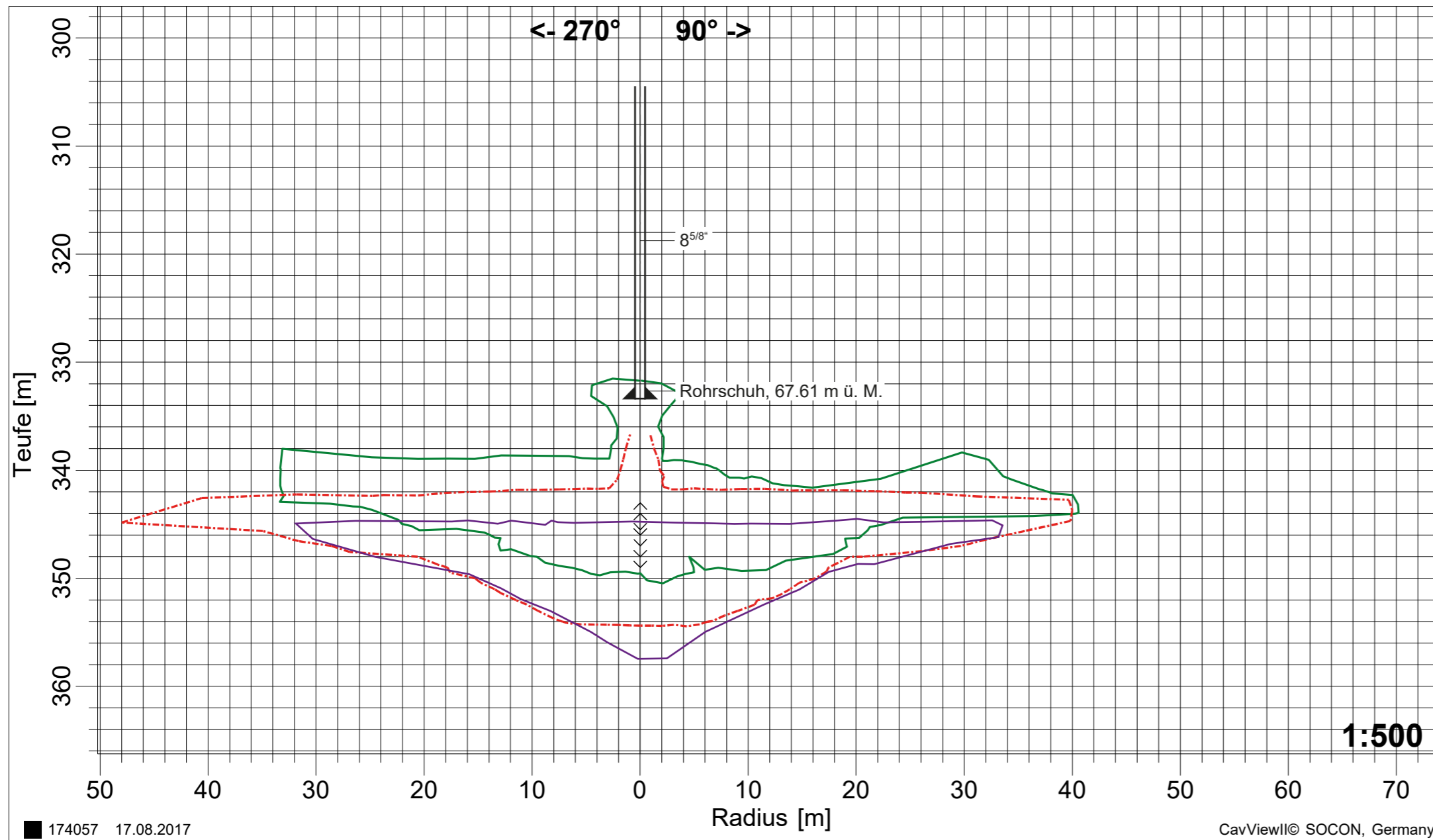
CavViewII© SOCON, Germany

▲ 8 5/8" : 323.6 m	▲ 4 1/2" : 342.6 m	- - - (09.11.2000)
— (17.08.2017)	∨ ∨ Kipp-Position	

**Querprofil 270° / 90° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



■ 174057 17.08.2017

CavViewII© SOCON, Germany

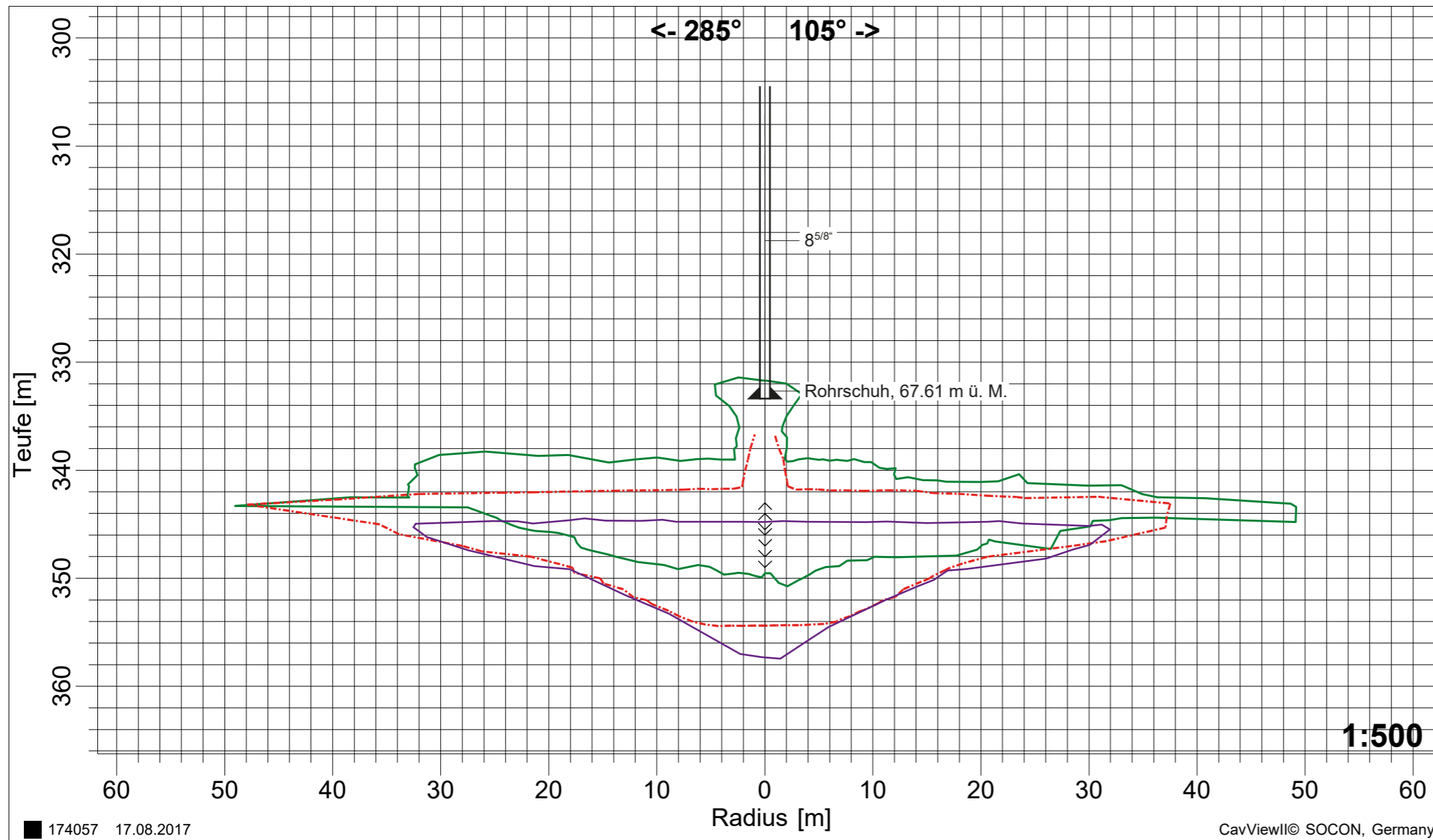
▲ 8 5/8" : 323.6 m	▲ 4 1/2" : 342.6 m	- - - (09.11.2000)
— (17.08.2017)	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 285° / 105° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

■ 174057 17.08.2017

CavViewII© SOCON, Germany

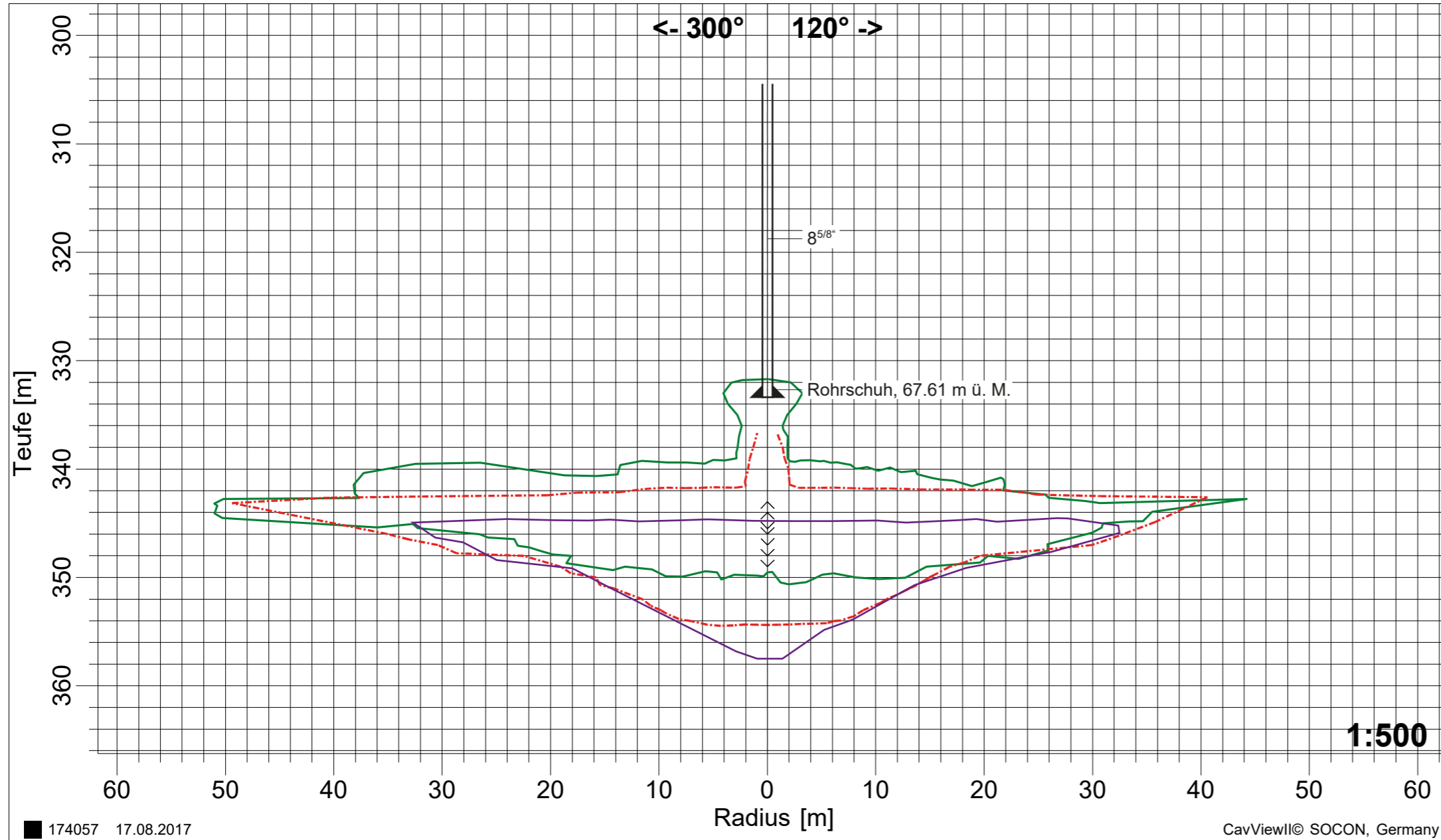
▲ 8 5/8" : 323.6 m	▲ 4 1/2" : 342.6 m	- - - (09.11.2000)
— (17.08.2017)	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 300° / 120° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

■ 174057 17.08.2017

CavViewII© SOCON, Germany

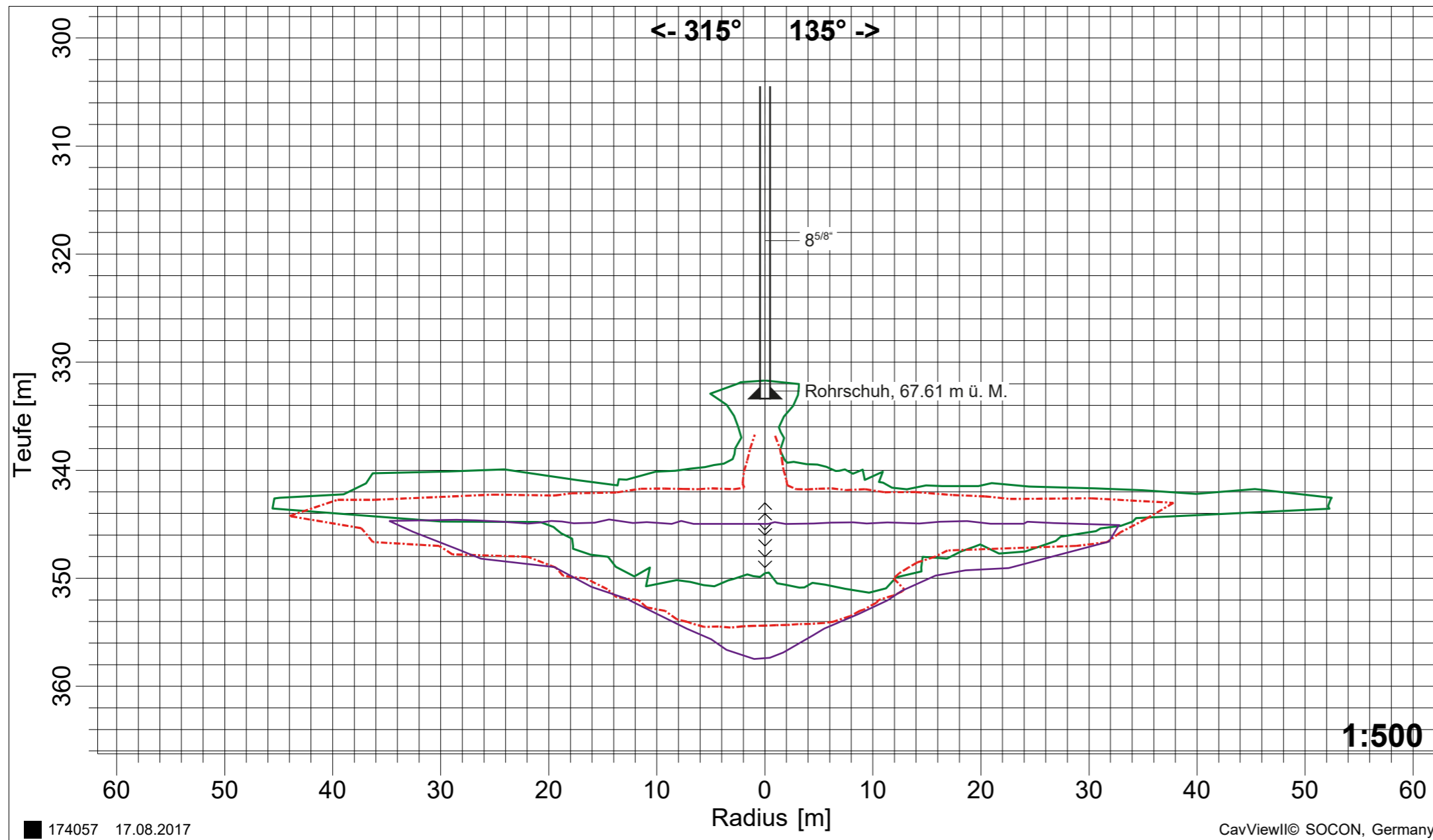
▲ 8 5/8" : 323.6 m	▲ 4 1/2" : 342.6 m	- - - (09.11.2000)
— (17.08.2017)	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 315° / 135° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

■ 174057 17.08.2017

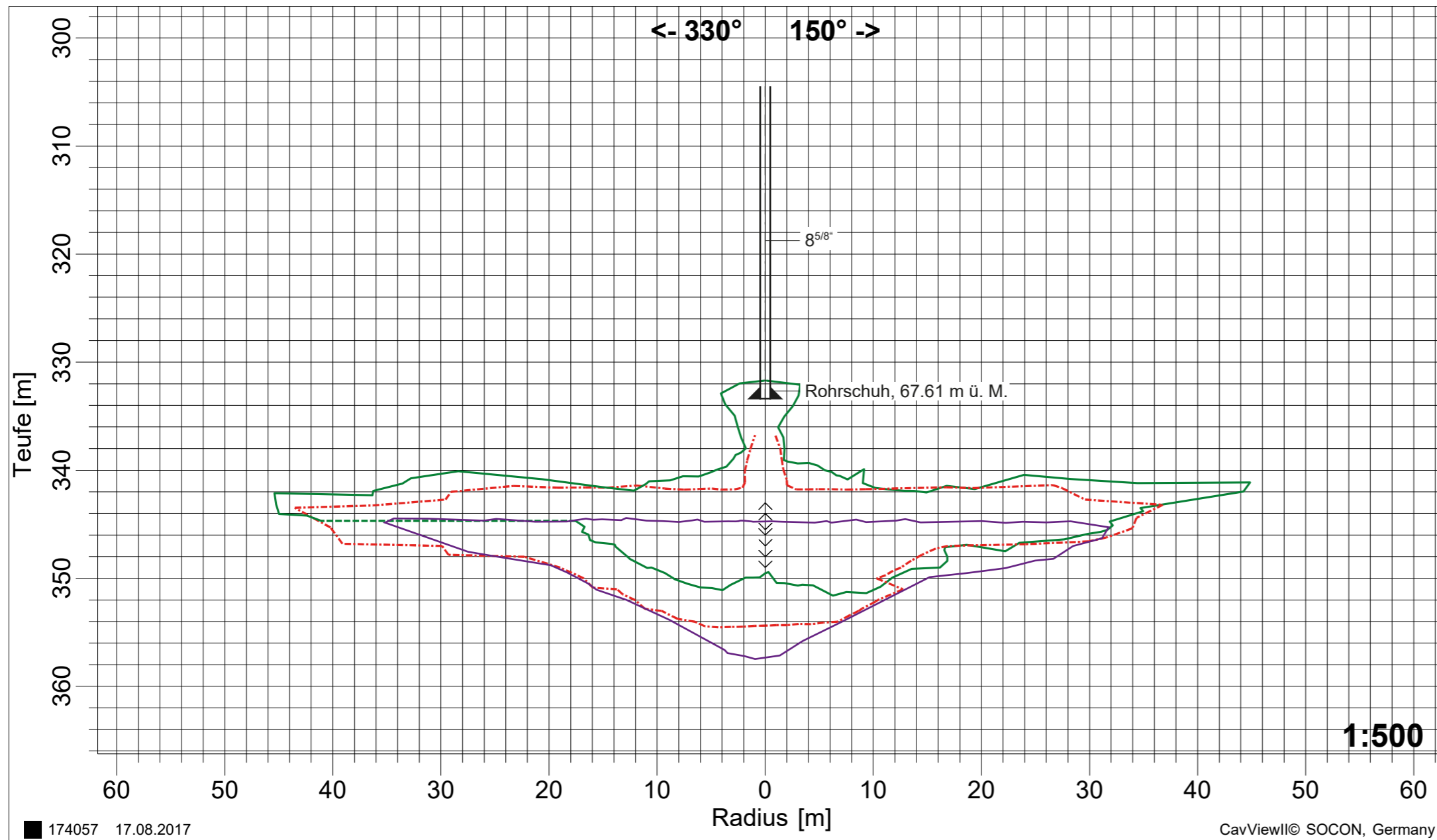
▲ 8 5/8" : 323.6 m	▲ 4 1/2" : 342.6 m	- - - (09.11.2000)
— (17.08.2017)	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 330° / 150° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

**1:500**

■ 174057 17.08.2017

CavViewII© SOCON, Germany

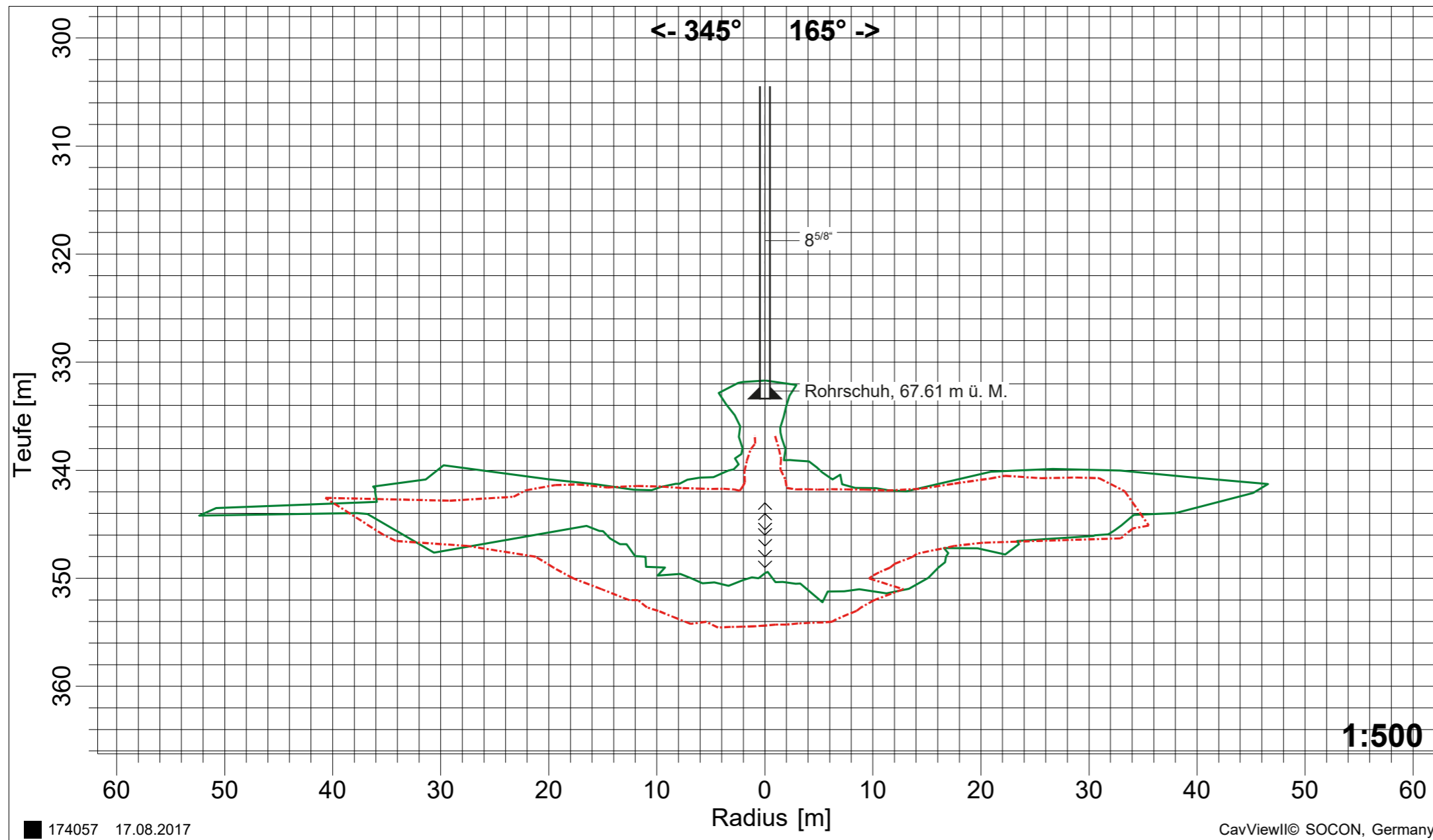
8 5/8" : 323.6 m	4 1/2" : 342.6 m	(09.11.2000)
(17.08.2017)	Kipp-Position	



**Querprofil 345° / 165° 1:500**  
**Kaverne S87**

**S 87**

**17.08.2017**



**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

**1:500**

■ 174057 17.08.2017

CavViewII© SOCON, Germany

▲ 8 5/8" : 323.6 m	▲ 4 1/2" : 342.6 m	- - - (09.11.2000)
— (17.08.2017)	∨ ∨ Kipp-Position	



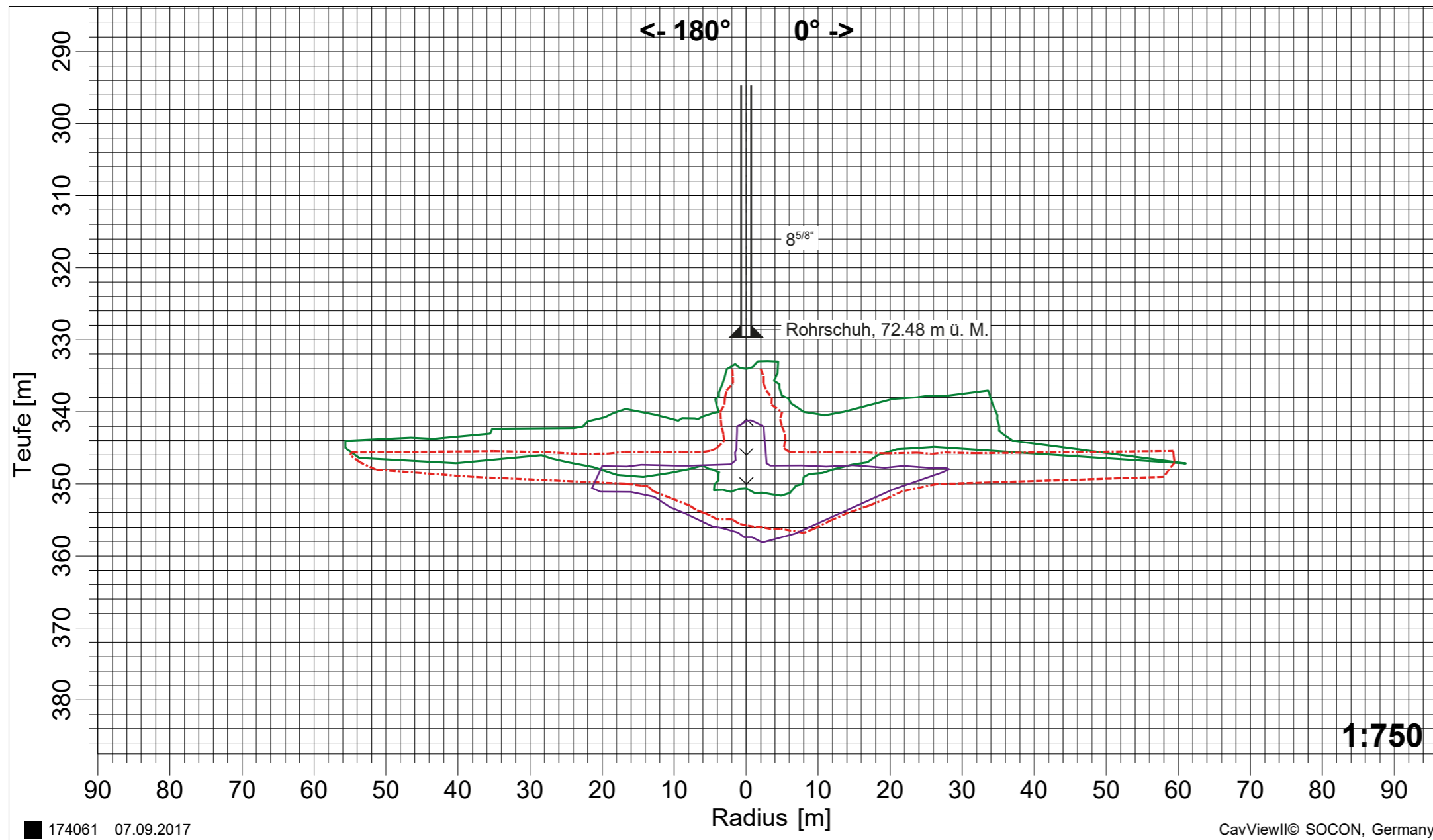
## Anhang 6: Querprofile 1:500, Kaverne S88

- 6.1) Querprofil 180°/0°
- 6.2) Querprofil 195°/15°
- 6.3) Querprofil 210°/30°
- 6.4) Querprofil 225°/45°
- 6.5) Querprofil 240°/60°
- 6.6) Querprofil 255°/75°
- 6.7) Querprofil 270°/90°
- 6.8) Querprofil 285°/105°
- 6.9) Querprofil 300°/120°
- 6.10) Querprofil 315°/135°
- 6.11) Querprofil 330°/150°
- 6.12) Querprofil 345°/165°

**Querprofil 180° / 0° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

174061 07.09.2017

CavViewII© SOCON, Germany

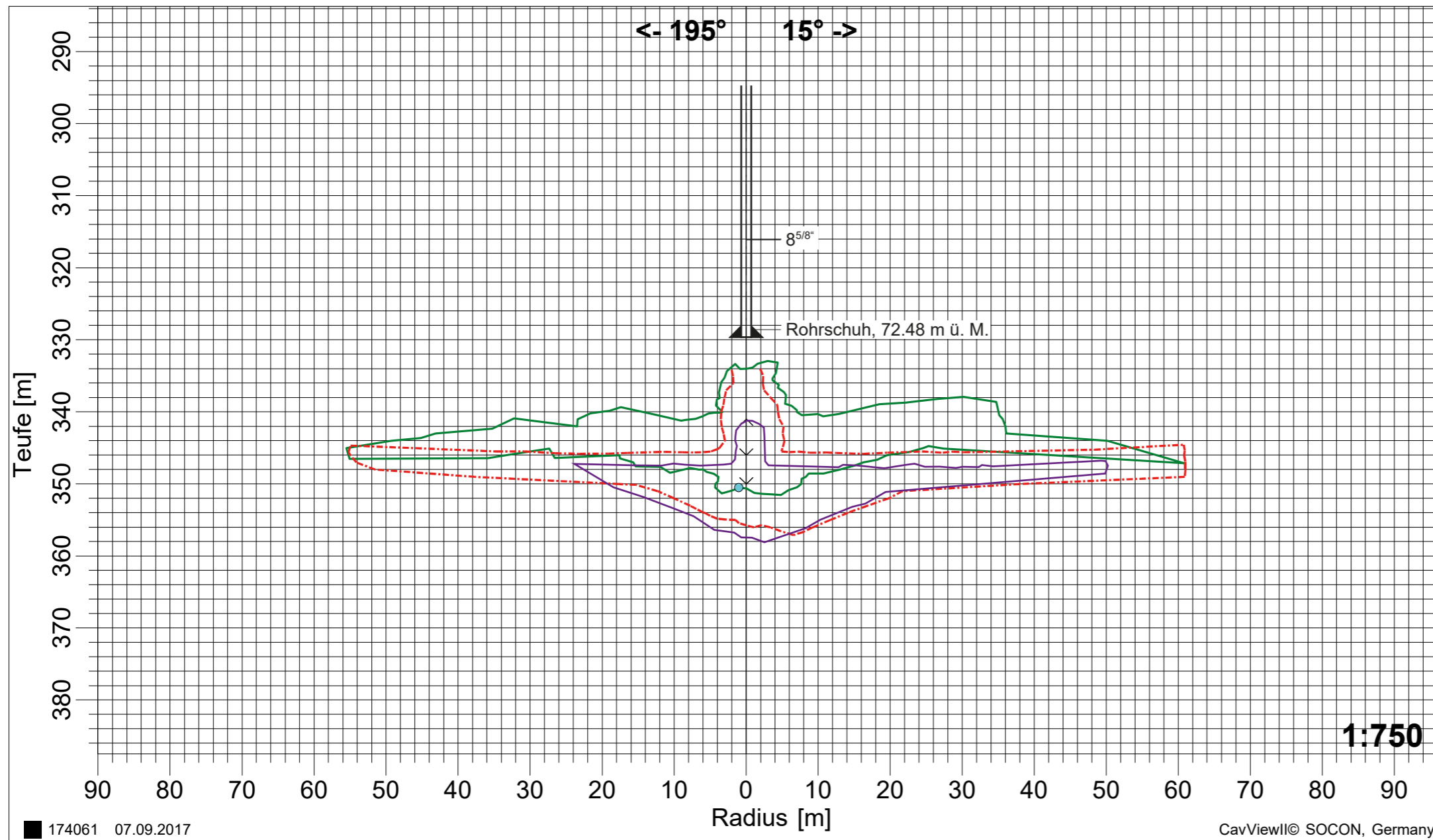
<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)	<span style="color: green;">—</span> (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 195° / 15° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998



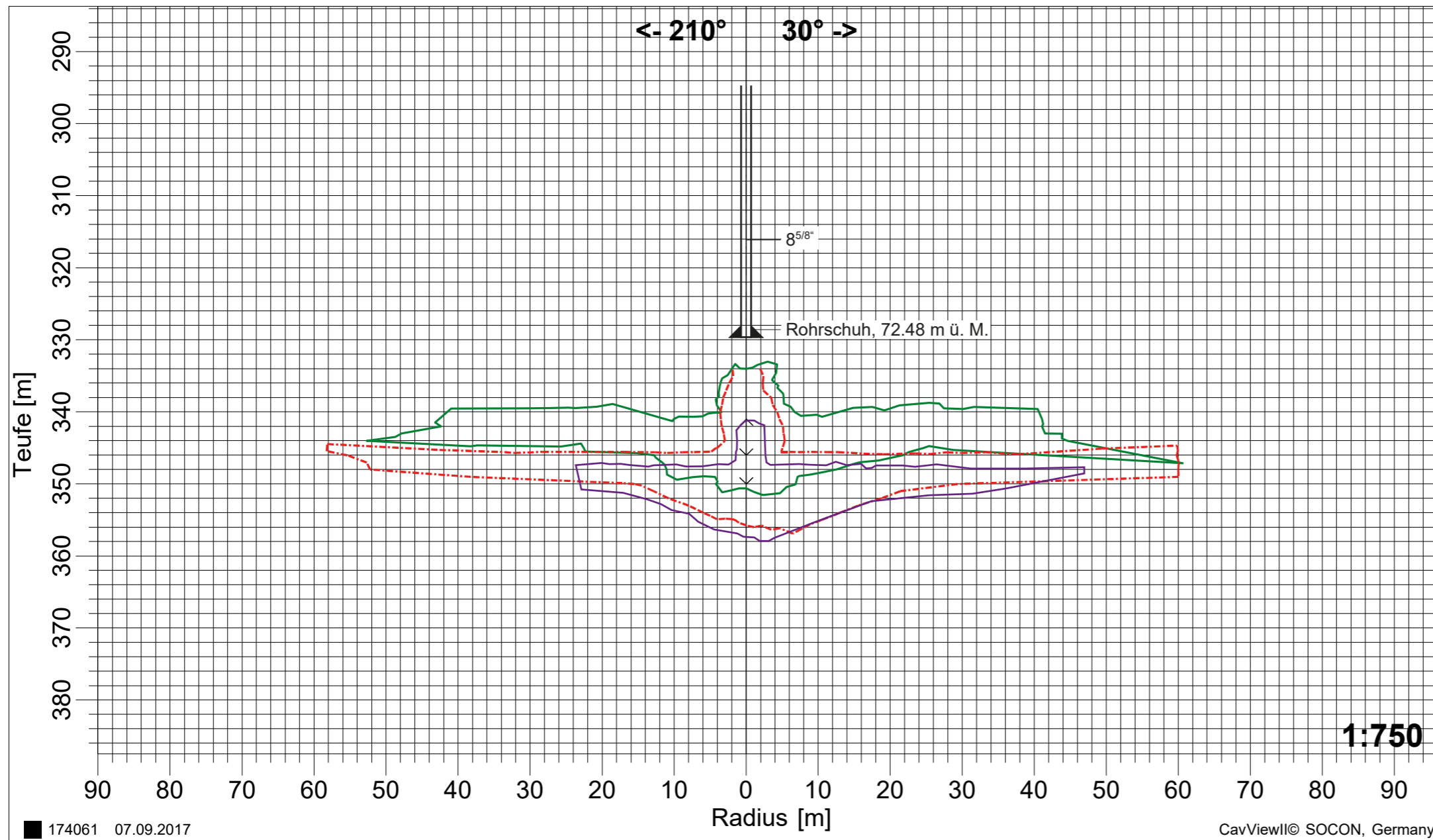
<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)	<span style="color: green;">—</span> (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∩ ∪ Kipp-Position	



**Querprofil 210° / 30° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

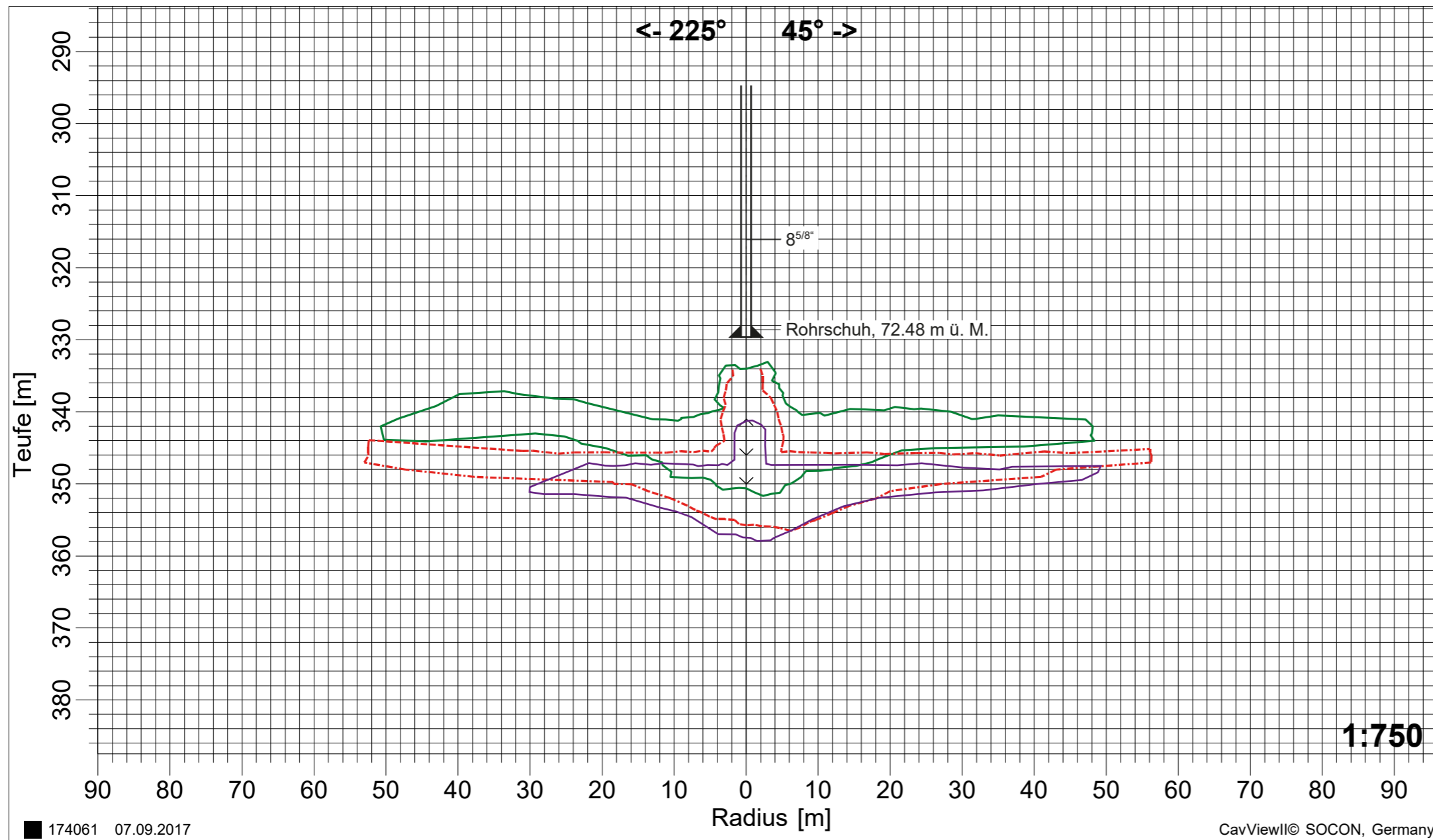


- - - (09.11.2000)	— (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∩ ∪ Kipp-Position	

**Querprofil 225° / 45° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998



**1:750**

174061 07.09.2017

CavViewII© SOCON, Germany

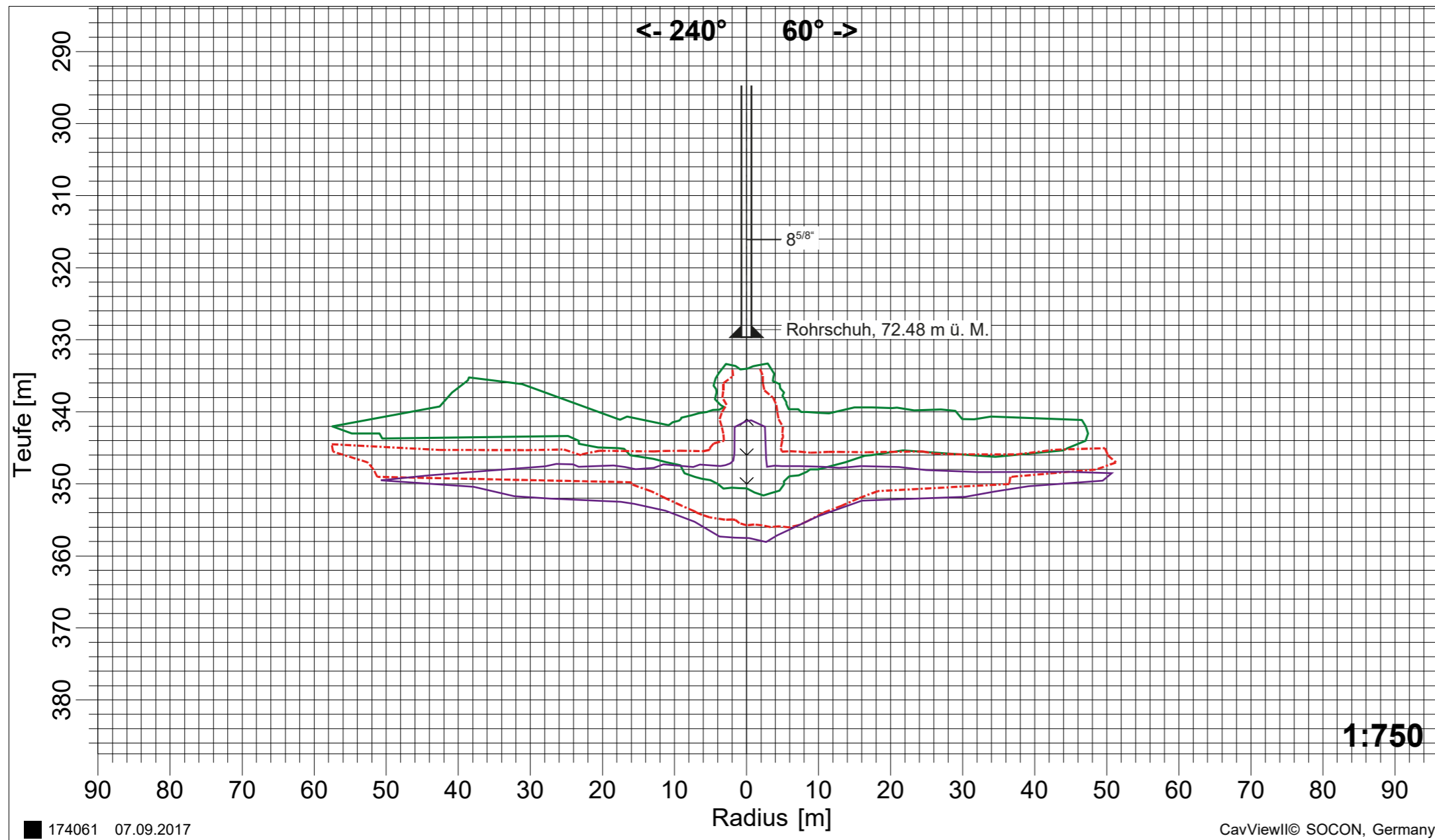
<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)	<span style="color: green;">—</span> (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 240° / 60° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

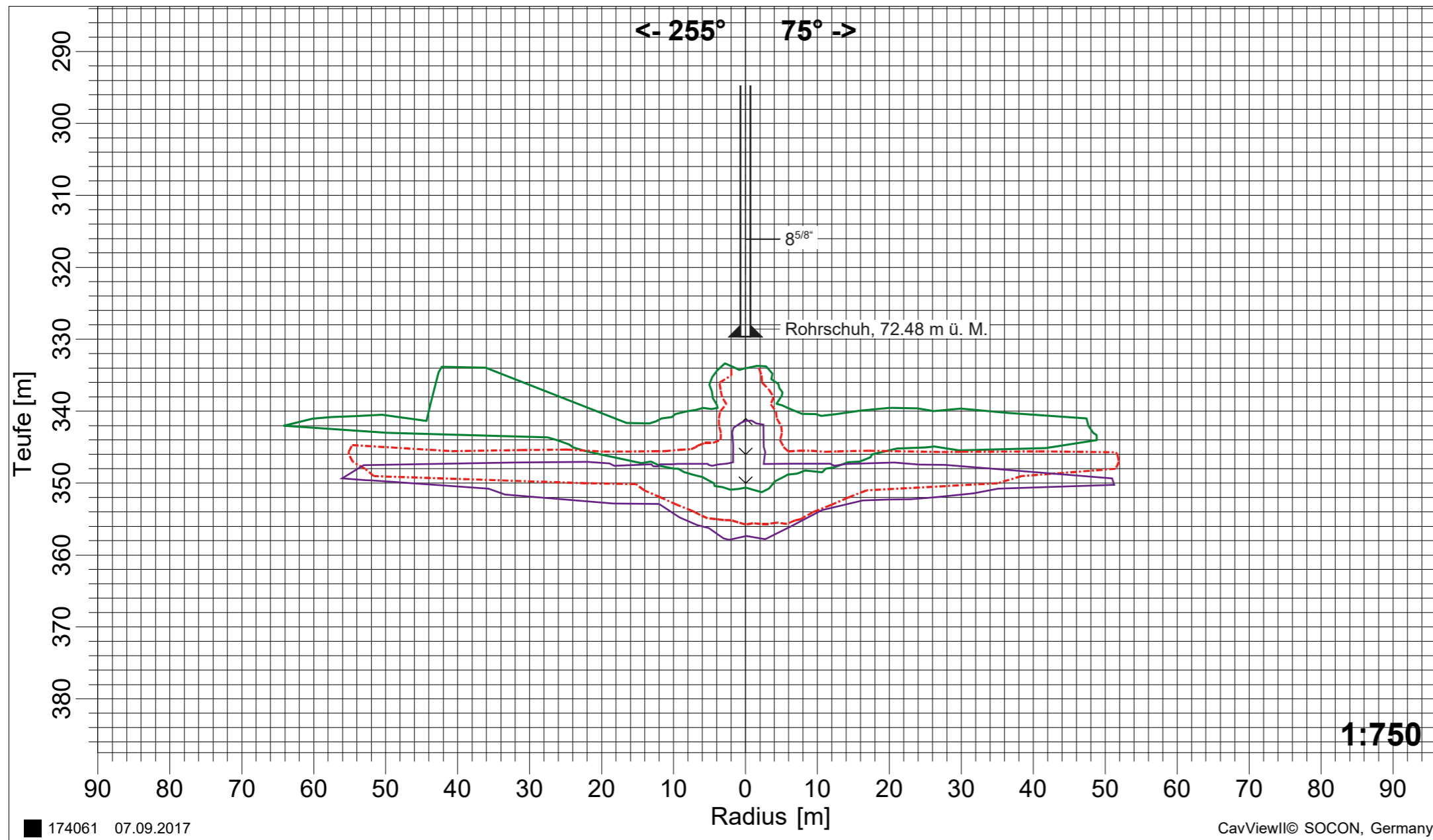


— (09.11.2000)	— (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∩ ∪ Kipp-Position	

**Querprofil 255° / 75° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998



**1:750**

174061 07.09.2017

CavViewII© SOCON, Germany

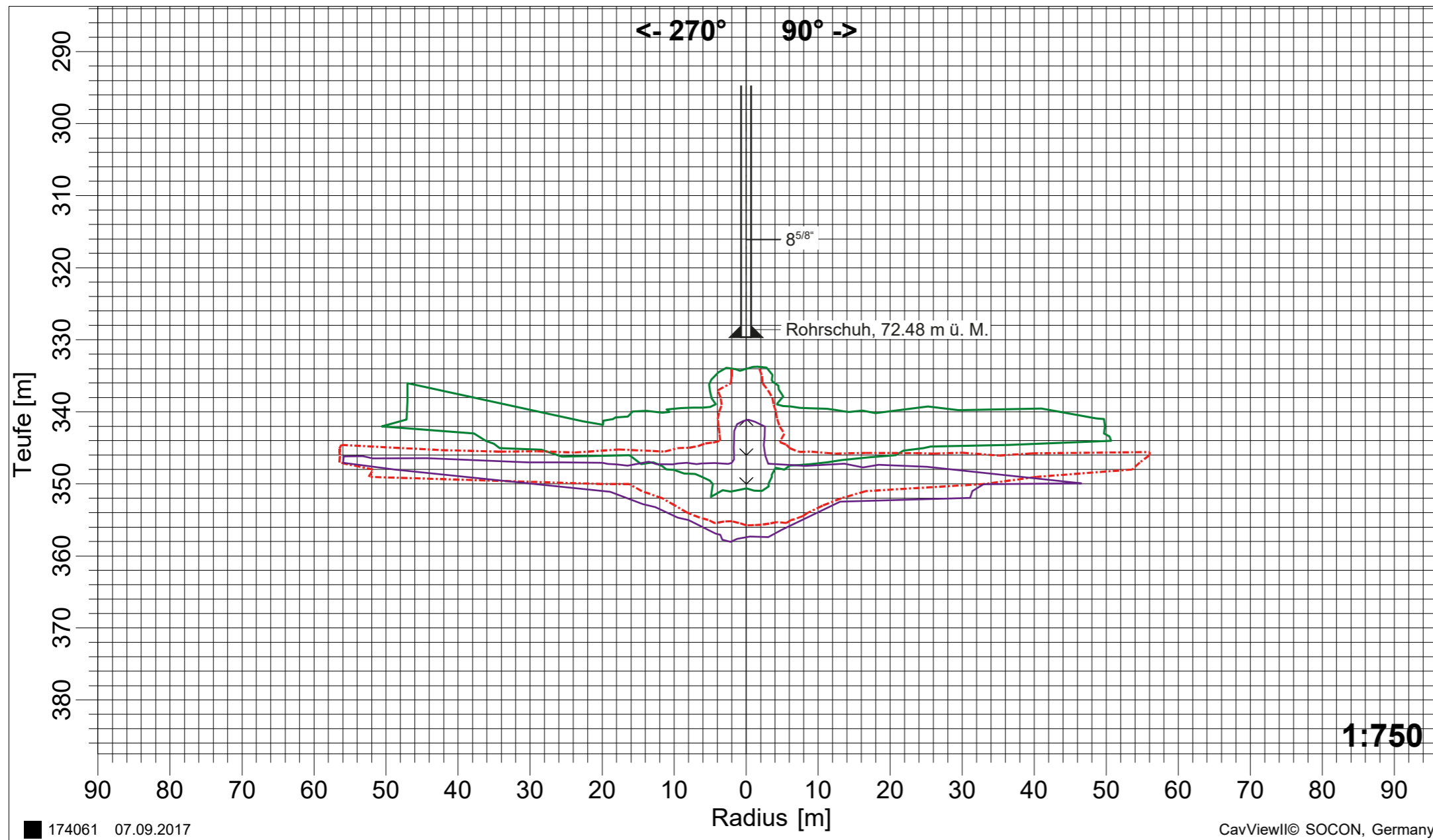
<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)	<span style="color: green;">—</span> (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 270° / 90° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998



174061 07.09.2017

- - - (09.11.2000)  
▲ 4" : 334.0 m

— (07.09.2017)  
∨ ∨ Kipp-Position

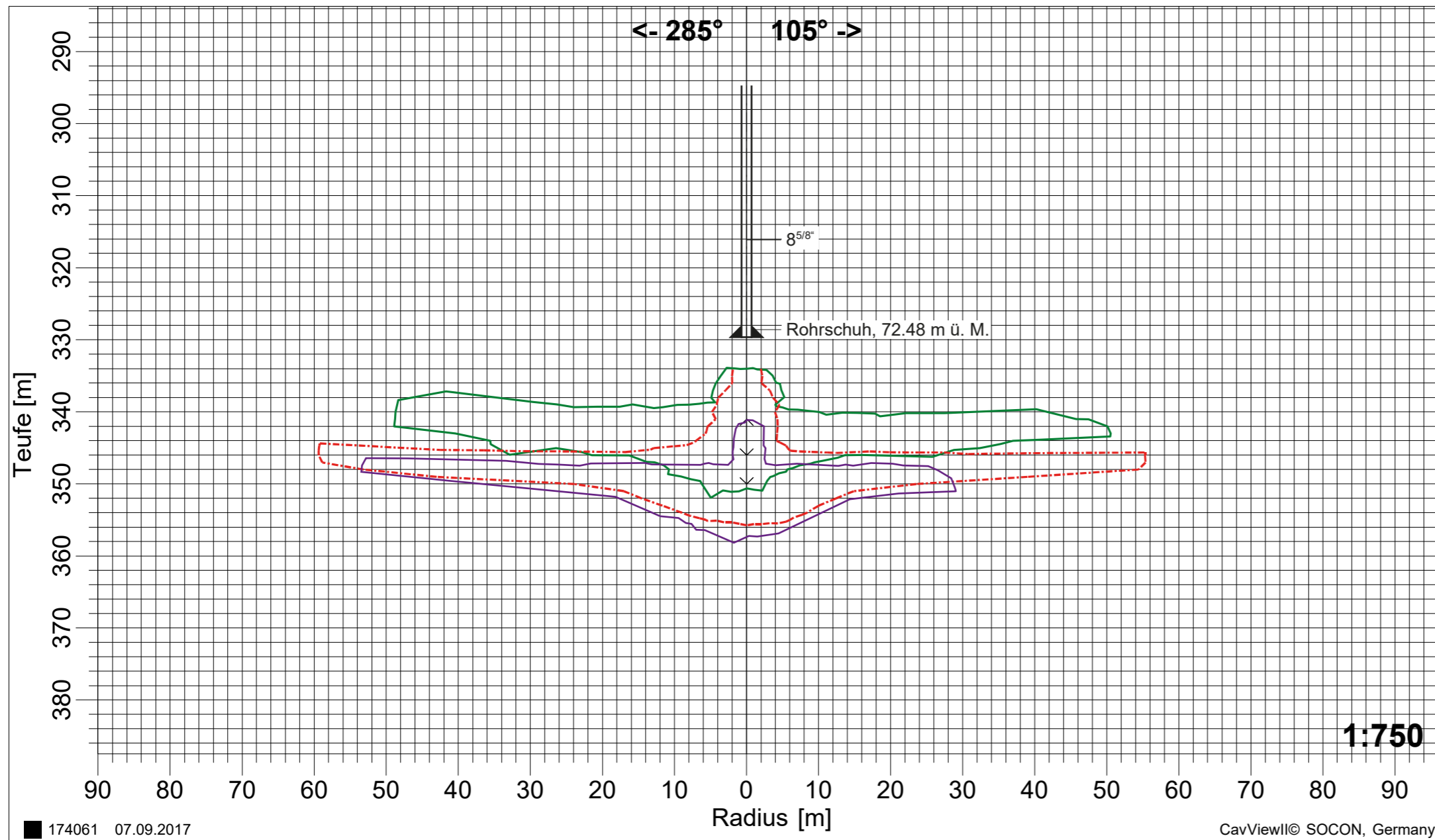
▲ 8 5/8" : 328.5 m



**Querprofil 285° / 105° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

174061 07.09.2017

CavViewII© SOCON, Germany

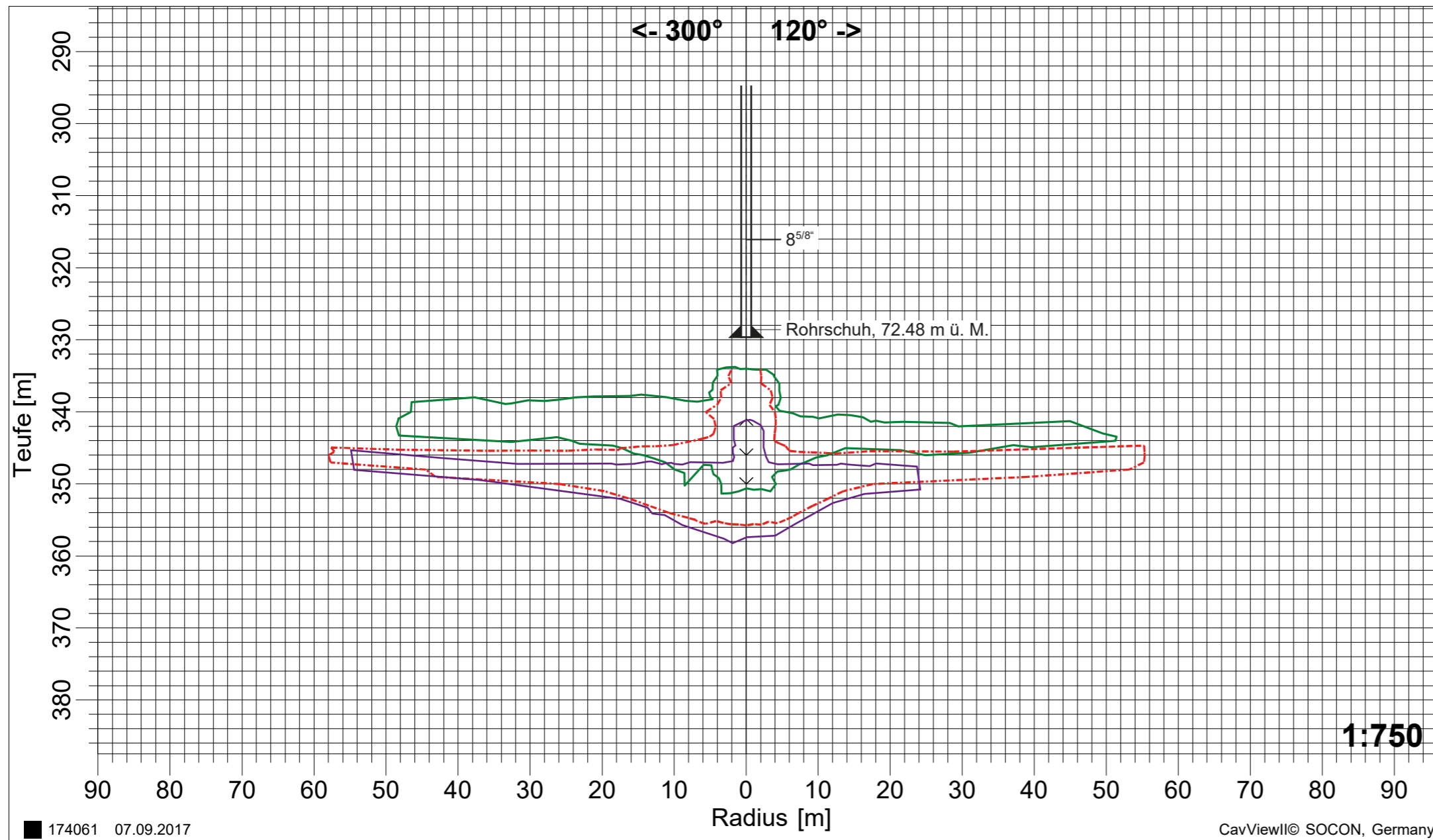
- - - (09.11.2000)	— (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 300° / 120° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

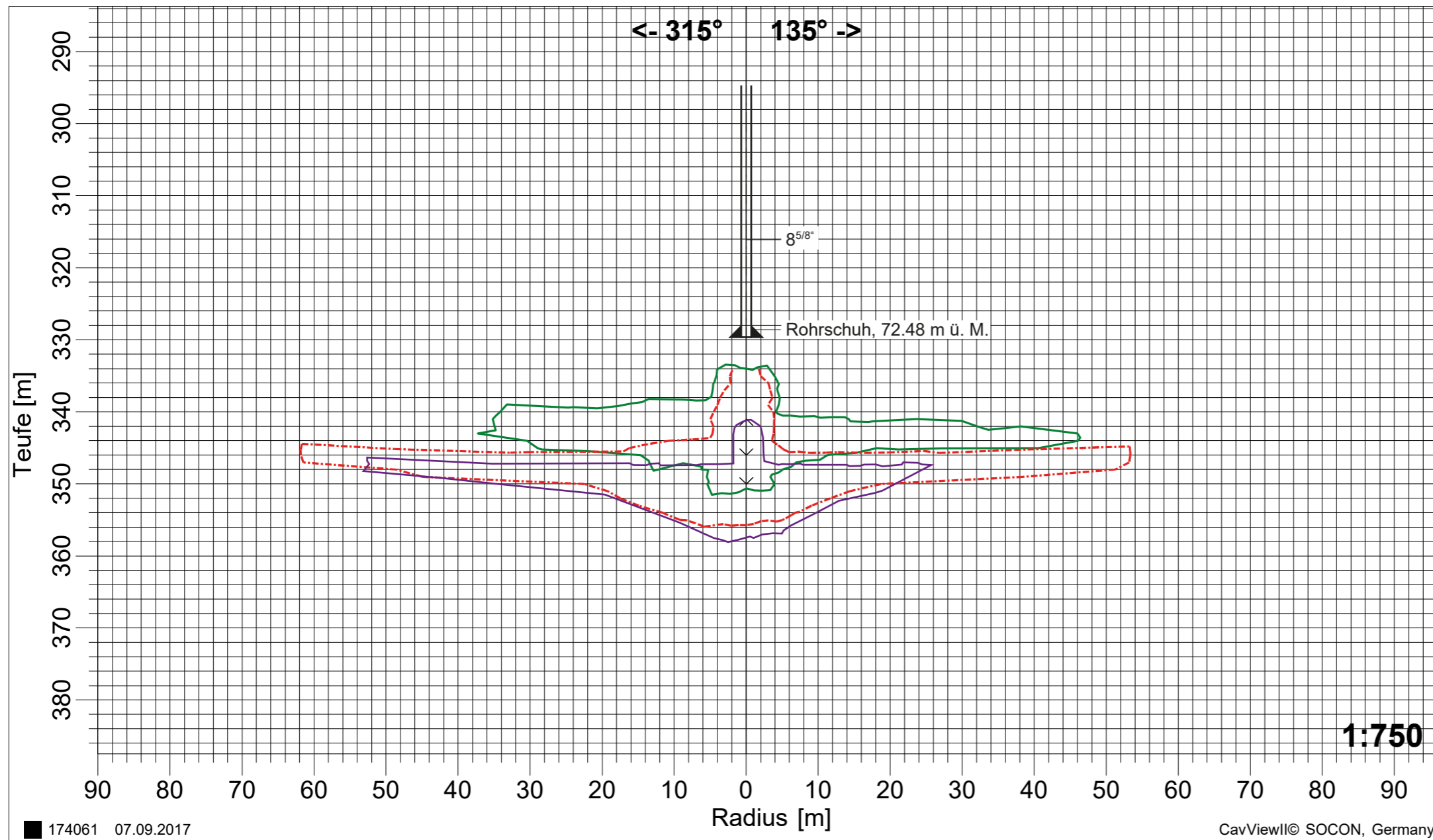


<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)	<span style="color: green;">—</span> (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∨ ∨ Kipp-Position	

**Querprofil 315° / 135° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON** Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

**1:750**

174061 07.09.2017

CavViewII© SOCON, Germany

<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)	<span style="color: green;">—</span> (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∩ ∪ Kipp-Position	

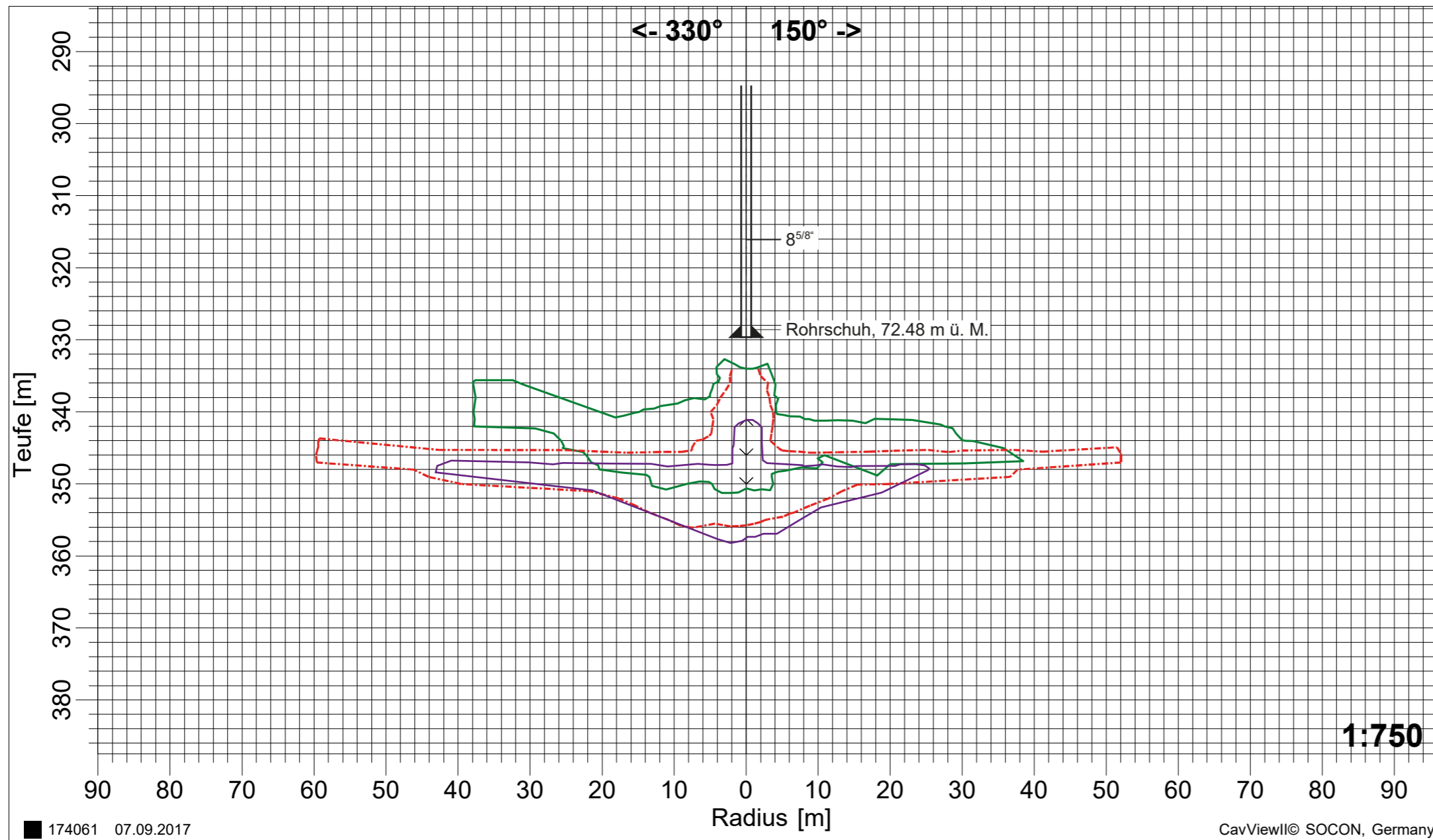




**Querprofil 330° / 150° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH



**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

174061 07.09.2017

CavViewII© SOCON, Germany

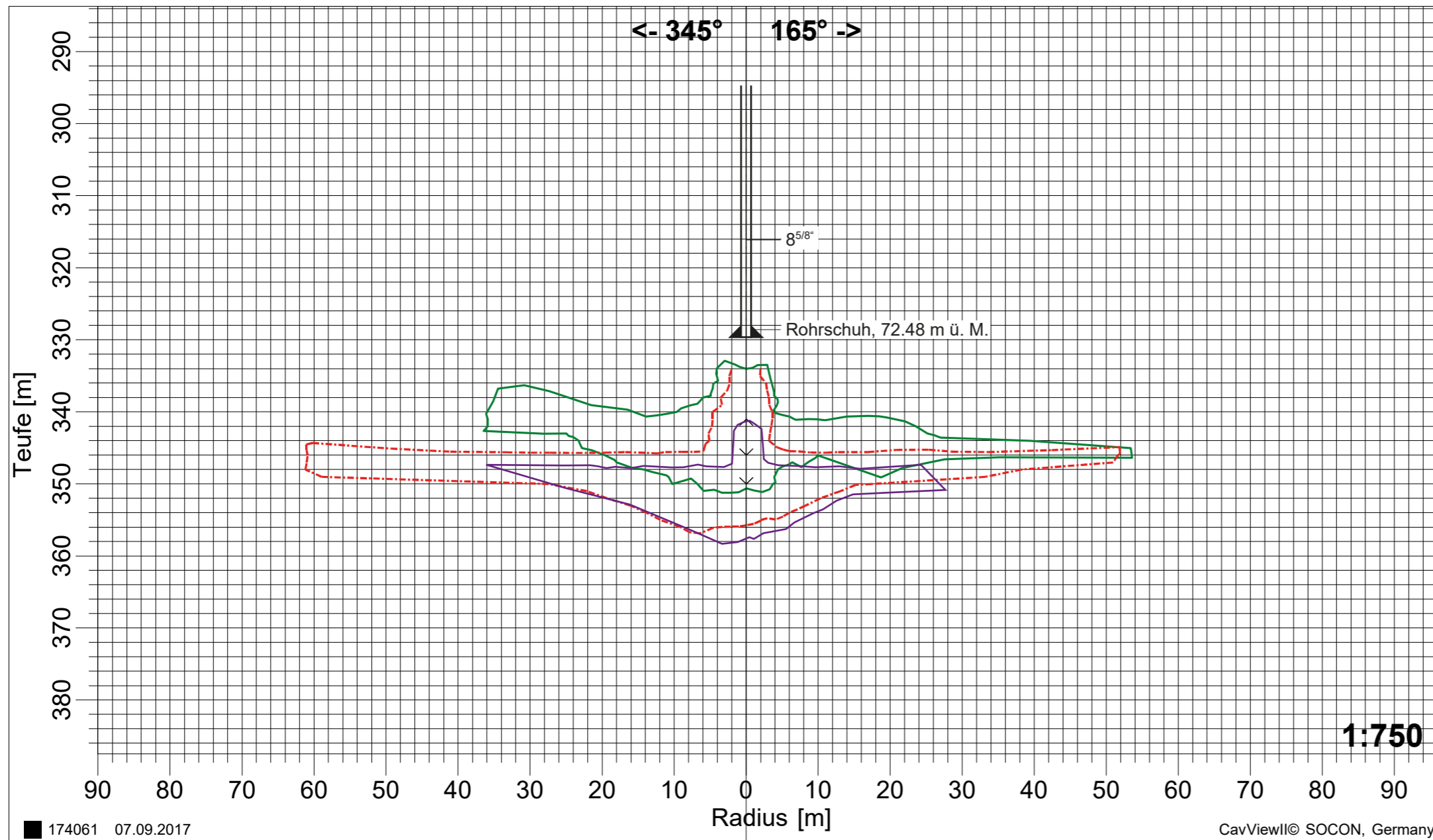
<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)	<span style="color: green;">—</span> (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∨ ∨ Kipp-Position	



**Querprofil 345° / 165° 1:500**  
**Kaverne S88**

**S88**

**07.09.2017**



**SOCON**  
Sonar Control Kavernenvermessung GmbH

**Legende**

- Kaverne 17.08.2017
- - - Kaverne 09.11.2000
- Kaverne 19.06.1998

174061 07.09.2017

CavViewII© SOCON, Germany

<span style="color: red;">- - -</span> (09.11.2000)	<span style="color: green;">—</span> (07.09.2017)	▲ 8 5/8" : 328.5 m
▲ 4" : 334.0 m	∨ ∨ Kipp-Position	



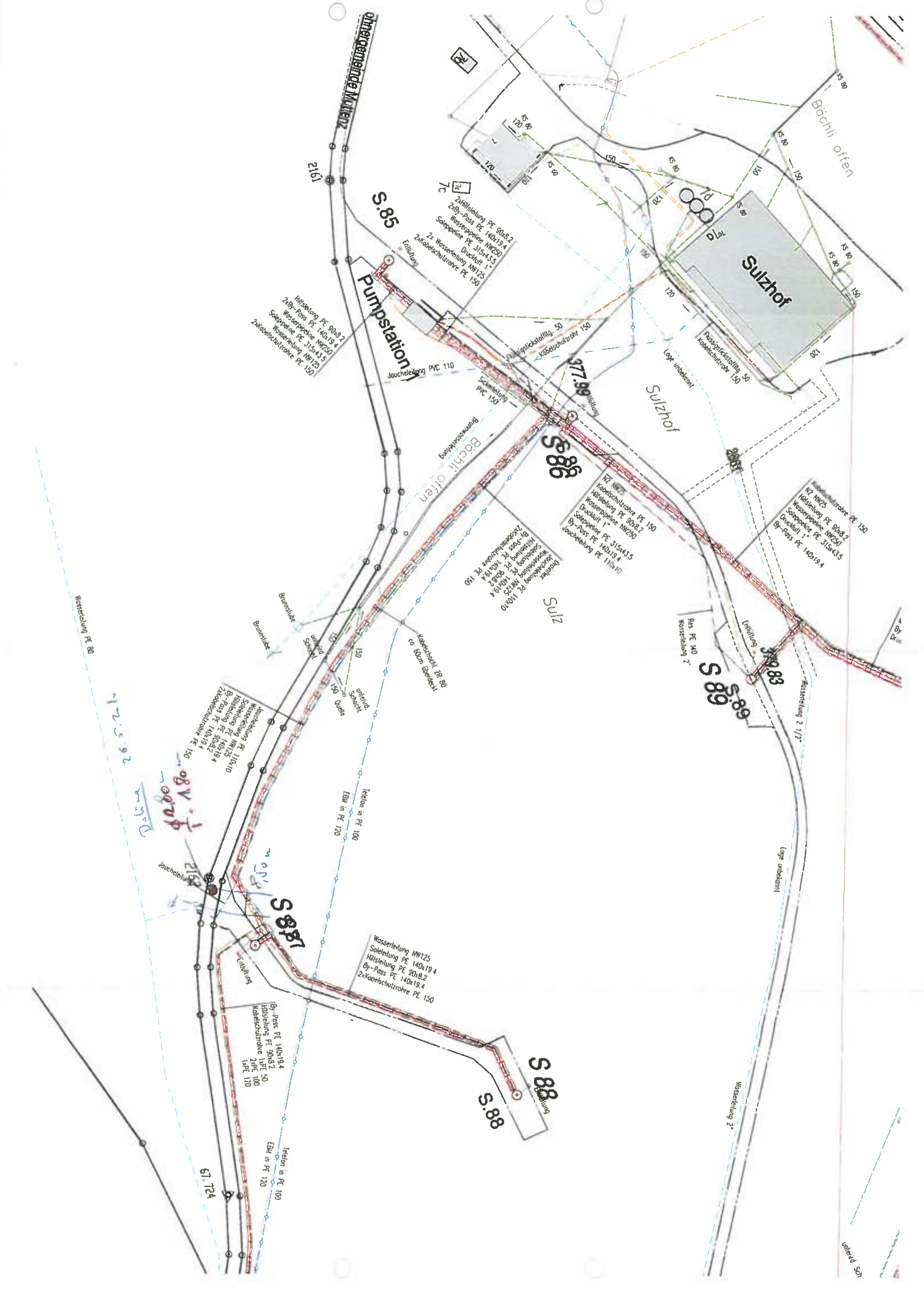
2718014.1

Muttenz, Aufarbeitung Sole-Austritt Sulzhof (Bohrloch S87)

**GEOTEST**

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

**Anhang 7: Fotodokumentation oberflächlicher Einsturz am  
26.05.2010 nahe S87**



Gemeinde Mollenz

2161

S.85

**Pumpstation**

Hilfsleitung PE 90x8.2  
2xBy-Pass PE 140x19.4  
Soleppelle PE 315x43.5  
Wasserleitung NW125  
2xKabelschutzhohr PE 150

Joucheleitung PVC 110

Sackleitung PVC 150

Brunnenleitung

Bächli offen

S.88

Sulz

S.88

S.88

**Sulz**

Passierleitföhrung 50  
Kabelschutzhohr 150

Sulz

S.89

S.89

S.88

Wasserleitung NW125  
Soleleitung PE 140x19.4  
Hilfsleitung PE 90x8.2  
By-Pass PE 140x19.4  
2xKabelschutzhohr PE 150

By-Pass PE 140x19.4  
Hilfsleitung PE 90x8.2  
Kabelschutzhohr 2xPE 100  
1xPE 120

61.724

Bächli offen

Kabelschutzhohr PE 150  
N2 NW125  
Hilfsleitung PE 90x8.2  
Soleppelle PE 315x43.5  
Druckluft 1"  
By-Pass PE 140x19.4

Kabelschutzhohr 2 1/2"

Lage unbetont

Wasserleitung 2"

unbetont Sch.

1.2.5.92

S.88

S.88

Tiefen in PE 100  
EBM in PE 120

Tiefen in PE 100  
EBM in PE 120

Wasserleitung PE 80

Ras PE 140  
Wasserleitung 2"

Bohrloch  
587

26.05.2010

2,0 m

Tiefe 1,80 m

Doline im Bohrloch Sub

26.5.2010





587

240

26 05 2010

$\phi$  2,0 m

T. 1,80 m



26.05.2010

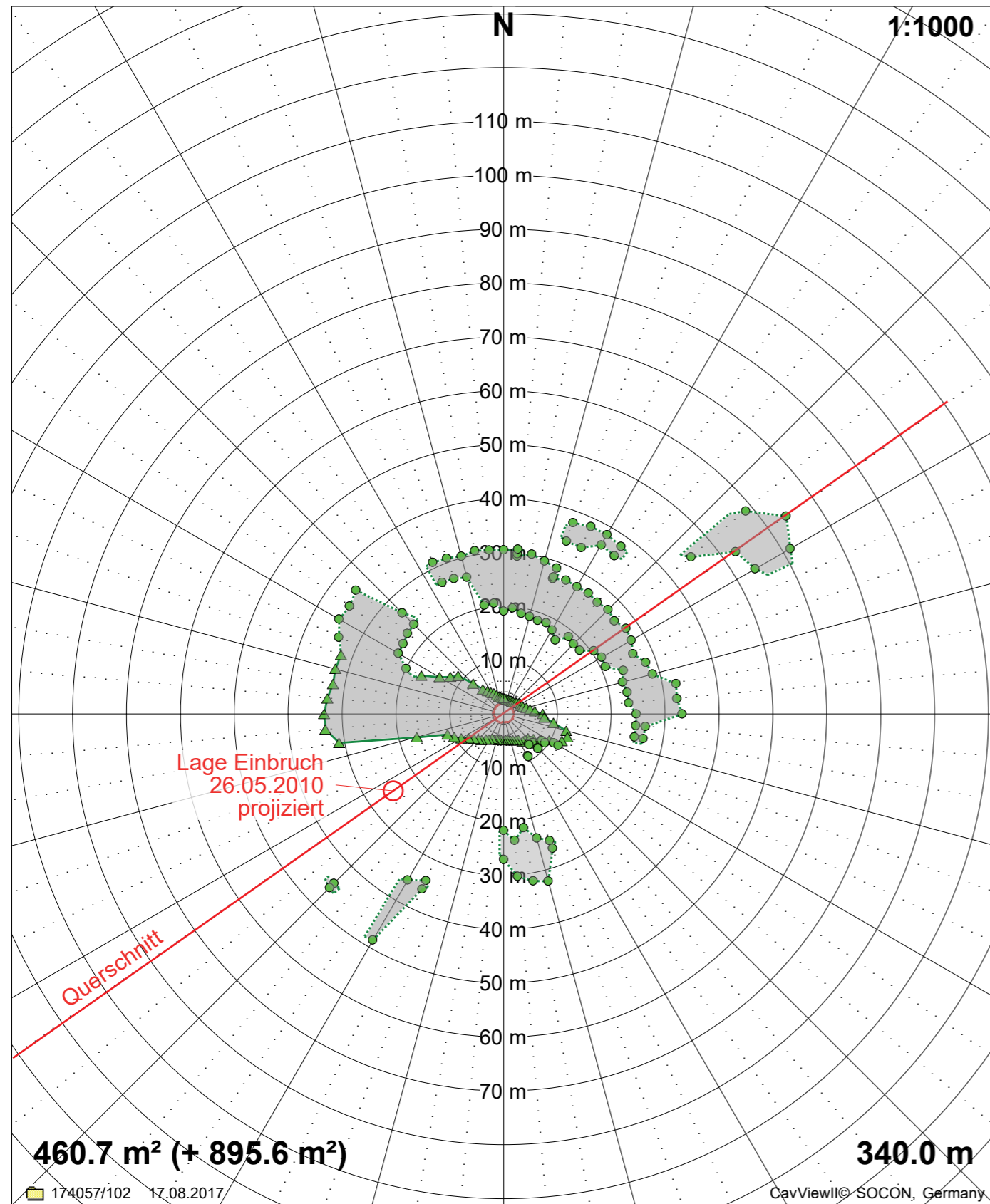


26.05.2010



**Anhang 8: Horizontal- & Querschnitt 1:1000, Einsturz vom  
26.05.2010**

Horizontalschnitt 1:1000



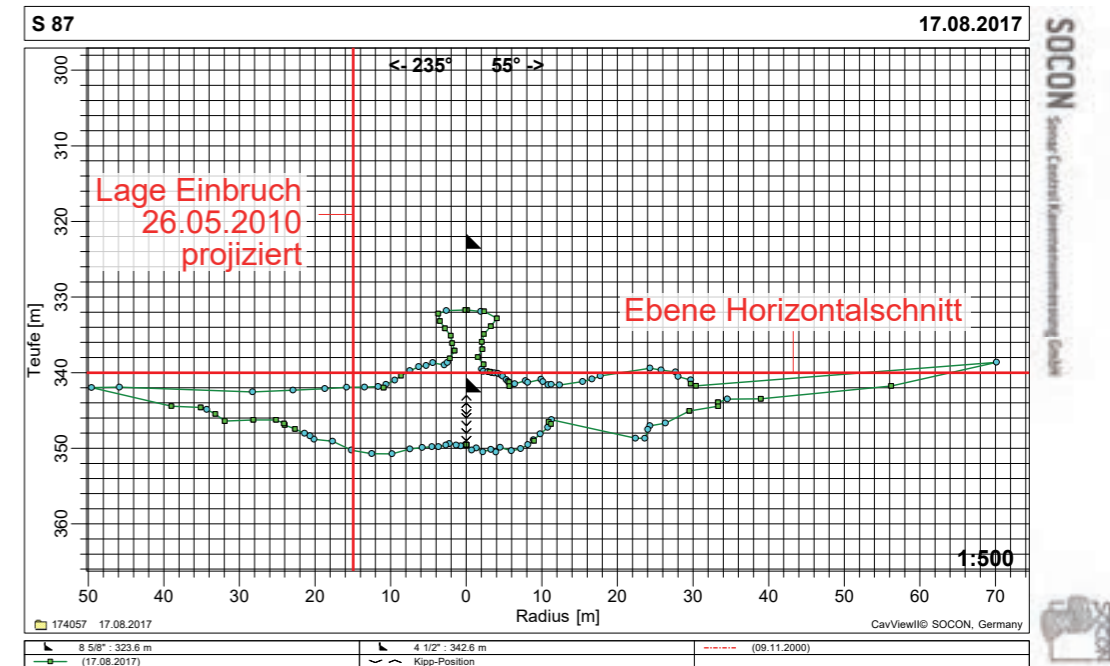
Horizontal- & Querschnitt 1:1000  
Einsturz vom 26.05.2010



Legende

■ Ausbuchtungen im Kavernendach

Querschnitt 1:1000



2718014.1

Muttenz, Aufarbeitung Sole-Austritt Sulzhof (Bohrloch S87)

**GEOTEST**

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

**Anhang 9: Wasser-, Sole- und Blanketdruck S141 (01.01.2017 bis  
21.06.2017)**

**Wasser-, Sole- und Blanketdruck S141  
(01.01.2017 bis 21.06.2017)**



**Anhang 10: Chronologie der Massnahmen, Arbeiten und  
Besprechungen zwischen Ereignis und  
Wiederinbetriebnahme des Bohrlochs S141 am  
18.09.2017**

**Anhang 10: Chronologie der Massnahmen, Arbeiten und Besprechungen zwischen Ereignis und Wiederinbetriebnahme des Bohrlochs S141 am 18.09.2017**

Datum	Ereignis
13.06.2017	Soleaustritt aus S87, infolgedessen Sofortmassnahmen
13. - 14.06.2017	Überwachung des Bohrlochs durch die Saline
	Pikettdienst des AUE wird durch die Polizei aufgeboten
14.06.2017	Schadensbegutachtung und Fotodokumentation
	Kontakt mit Pächter und Landeigentümern
	Information und Kontakt mit Bürger- und Einwohnergemeinde MuttENZ
	Aushändigen gemäss Editionsverfügung verlangter Aufzeichnungen an Staatsanwaltschaft
	Abstecken geschädigter Flächen durch die Gemeinde MuttENZ
	Beauftragung ausserplanmässiger Nivellementmessungen durch Rapp Infra AG um allfällige Setzungen infolge des Ereignisses zu erfassen
	Beginn täglicher Überwachung des Drucks am Bohrlöchkopf S87
15.06.2017	Drohnenüberflug über dem betroffenen Gebiet durch Gemeinde MuttENZ
	Besprechung vor Ort zwischen AUE, Gemeinde MuttENZ und Saline betreffs Vorgehen Sanierung; Beschlussfassung eine bodenkundliche Baubegleitung durchführen zu lassen
	Beginn der Abhumusierung mit Erfassung der Aushubtiefen; Zwischenlagerung des Humus entlang der Strasse (inkl. Abdeckung als Schutz vor Austrag infolge Niederschlag)
	Hinzuziehen von Vogt Planer zur bodenkundlichen Baubegleitung
	Einsatz eines Grubbers auf der abhumusierten Fläche durch Herrn Kohler, Betreiber Sulzhof
	Augenschein mit Revierförster, Herr Eichenberger
	Probenahme von Bodenproben als mögliches Ersatzmaterial in Möhlin, Versand zur Analyse auf Schwermetalle (Bachema AG)
15. - 16.06.2017	Durchführung der Nivellementmessungen durch Rapp Infra AG
16.06.2017	1. Krisensitzung in Gemeindeverwaltung MuttENZ mit Vertretern der Gemeinde MuttENZ, des AUE, des Dept. Umweltwissenschaften der Universität Basel, der Saline sowie der Staatsanwaltschaft
	Weiterführung Abhumusierung und sichere Lagerung des abgetragenen Humus
19.06.2017	Ersatz des provisorisch installierten Flanschs am Bohrloch S87 durch einen definitiv installierten
	Bestellung eine Hohlräumvermessung der Kavernen S87, S88 und S141 bei der Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH
20.06.2017	Beginn der Entsorgung des belasteten Bodenmaterials in der Deponie Elbisgraben durch die Ernst Frey AG
	Kontaktaufnahme mit dem Departement Physik der Universität Basel zwecks Thesenüberprüfung der Ereignisursache (letztlich ergebnislos)
	Nachreichen weiterer Dokumente gemäss Editionsverfügung an Staatsanwaltschaft via elektronischer Übermittlung an die Polizei
	provisorischer Analyse-Bericht der Bachema AG zu geplantem Boden-Ersatzmaterial aus Möhlin
20. - 21.06.2017	Hochdruckreinigung Strassen, Schlammsammler entlang Strassen gelehrt, Schlamm entsorgt
21.06.2017	telefonische Besprechung zwischen Saline und AUE, Übermittlung von Daten
	Beschaffung der Resultate der Gasmessungen durch die ABC-Wehr
	Anlieferung des Ersatzhumus durch Ernst Frey AG
22.06.2017	Ausbringen des Ersatzhumus durch Ernst Frey AG
	Übermittlung sämtlicher Druckdaten als Datenbankexport an das AUE
	Vorbereitungsarbeiten Hohlräumvermessung der Kaverne S141: Ausbau Förderrohtouren
22. - 23.06.2017	Ausführung weiterer Nivellementmessungen durch Rapp Infra AG infolge der Resultate der Messungen vom 15. - 16.06.2017
23.06.2017	2. Krisensitzung in Gemeindeverwaltung MuttENZ
	Installation von Manometern an den Bohrköpfen und Kontrolle der Flansche der Bohrungen S85, S86, S88, S89, S90, S91, S109
	Beginn der Inventur aller Bohrlöchköpfe der Stand-by Bohrungen
26.06.2017	Sanierung der Umgebung von S87 ist abgeschlossen, einige Massnahmen verbleiben hängig - es wird die weitere Entwicklung abgewartet
27.06.2017	Sicherheitsdispositiv (Vorbereitung Hohlräumvermessungen)
	Vorbereitung Hohlräumvermessung S88: Einbauversuch 4" Rohre in S88; Aufstand kurz unterhalb Rohrschuh, infolgedessen Abbruch und Ausbau
28.06.2017	Druckablass S87 (Druck: 2.2 bar); Entnahme Gasproben aus S87, Versand an Hydroisotop GmbH
	Vorbereitung Hohlräumvermessung S87: Einbauversuch 4" Rohre in S87; Aufstand bei 323.5 m ab OKT, infolgedessen Abbruch und Ausbau
28.06. - 22.07.2017	Aussaaten auf sanierte Flächen
29.06.2017	Hohlräumvermessung der Kaverne S141 durch Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH
	Eingang Bericht zu Nivellementsmessungen "Senkungsmessung Gebiet Wartenberg/ Sulz, MuttENZ - Gebietsmessung Sulz nach Solwasserausbruch", Rapp Infra AG
30.06.2017	Einbau Bohrgestänge in S87, Versuch das Bohrloch aufzubohren; Abbruch infolge "Rumorens" im Bohrloch
	Organisation eines Blow Out Preventers (BOP) mit Zubehör bei Daldrup & Söhne AG für die Sicherheit während des geplanten Aufbohrens von S87 und S88
03.07.2017	Anfrage bei der Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH betreffs Berechnungen zum Soleaustritt (letztlich ergebnislos)
04.07.2017	Ausbau des Bohrgestänges aus S87, Abdichtung des Bohrlochs, Regelmässige Druckkontrolle
05.07.2017	3. Krisensitzung in Gemeindeverwaltung MuttENZ
06.07.2017	Eintreffen des BOP mit Steuereinheit, Zwischenlagerung in Saline Riburg
	Räumen des Bohrplatzes S87 (4" Gestänge und Zubehör) um Platz für Auffahrrampe zu schaffen; Umzug Bohrgerät zu S89 für Ausbau Pumpe
	Gestängelager auf Bohrplatz S89 errichtet für Ausbau Pumpe, Abhängen Pumpe durch Elektriker
07.07.2017	Auftrag Anfertigung eines Verlängerungsrohrs zwischen BOP und Bohrkopf in Bohrschacht (Spezialanfertigung durch Firma Fischer), da BOP zu gross für den Bohrschacht ist

Datum	Ereignis
10.07.2017	Ausbau der Pumpe aus S98, Abbau Bohrgerät und Transport Pumpengestänge zu S109 (Zwischenlagerung)
	Installation Auffahrrampen für Bohrgerät auf S87 (Erhöhte Position des Bohrgeräts nötig für die Installation des BOP über dem Bohrschacht)
	Eintreffen der Resultate der Gasmessungen durch Hydroisotop GmbH
11.07.2017	Lieferung des Verlängerungsrohrs für den BOP an S87
	Organisation eines Luftkompressors für die Steuerungseinheit des BOPs
	Arbeiten an der Auffahrrampe bei S87
12.07.2017	Bohrgerät wird zu S87 gefahren und aufgebockt
	Anfrage an die Firma DEEP Underground Engineering GmbH zwecks Modellierungen/ Berechnungen zum Soleaustritt und einer Plausibilitätsprüfung bisheriger Thesen
13.07.2017	Antransport BOP und Steuereinheit an Bohrplatz S87; Lieferung & Installation Luftkompressor
	Organisation, Lieferung und Installation Stromaggregat
14.07.2017	Transport von Gestänge und Schwerstangen zum Bohrplatz S87
17.07.2017	Montage und Inbetriebnahme BOP, Instruktion BOP durch Firma Daldrup
	Organisation "kleiner" Schwerstangen wegen Verengung in Verlängerungsstück
	Auftragsvergabe an DEEP Underground Engineering GmbH: Plausibilitätsprüfung bisheriger Ursachenthesen und Berechnungen
18.07.2017	Einbau Rollenmeissel und Bohrgestänge in S87
19.07.2017	Versuch S87 aufzubohren, Aufstand bei 320 m ab OKT ("Metall auf Metall")
20.07.2017	Organisation einer Fräse und von Stabilisatoren aus den Niederlanden mit Firma Daldrup
24.07.2017	Organisation Kamerabefahrung des Bohrlochs S87 bei terratec geophysical services
26.07.2017	4. Krisensitzung in Gemeindeverwaltung Muttenz
	Lieferung der Fräse und der Stabilisatoren um das Bohrloch S87 ab 320 m aufzufräsen
	Kamerabefahrung des Bohrlochs S87 durch terratec geophysical services: Sonde steht bei 321.81 m auf 4" Rohr in 8 5/8" Rohrtour auf
26. - 28.06.2017	Bergungsversuch des 4" Rohrstücks
02.08.2017	Fräsearbeiten im Bohrloch S87, Abbruch aufgrund ausbleibender Fortschritte
08.08.2017	Kamerabefahrung des Bohrlochs S87 durch terratec geophysical services
09.08.2017	Begehung Dorfbach durch Revierförster, Zustandsdokumentation der Bäume und Sträucher
09. - 10.08.2017	Fräsearbeiten im Bohrloch S87, Kaverne ist frei
10. - 11.08.2017	Ausbau Fräse, Gestänge und Schwerstangen, Abdichtung Bohrloch
14.08.2017	Abbau BOP, Abtransport Gestänge
15. - 16.08.2017	Antransport und Einbau 4 1/2" Rohr für geplante Hohlarumvermessung
17.08.2017	Hohlraumvermessung der Kaverne S87 durch Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH
18.08.2017	Ausbau 4 1/2" Rohr aus S87 und Abtransport
21. - 22.08.2017	Antransport und Einbau Pumpengestänge und Pumpe
22.08.2017	Durchführung Pumpversuch S87 mit Pegelüberwachung in S88 und S86 um hydraulische Verbindung abzuklären
24.08.2017	Wiederholung Pumpversuch in S87 zur Verifizierung der Ergebnisse vom 22.08.2017
25. - 31.08.2017	Umsetzen Bohrgerät auf S88, Installation BOP
28.08.2017	Abschlussbericht bodenkundliche Baubegleitung "Soleaustritt Sulzhof Muttenz - Sanierung Boden", Vogt Planer
01. - 04.09.2017	Antransport Gestänge, Schwerstangen, Bohrmeissel und Fräse zu S88
05. - 06.09.2017	Einbau Bohrmeissel, Bohrgestänge, Beginn Aufbohren S88
06.09.2017	Ausbau, Abtransport Meissel und Bohrgestänge von S88, Antransport und Einbau 4 1/2" Rohre für geplante Hohlraumvermessung
07.09.2017	Hohlraumvermessung der Kaverne S88 durch Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH
08.09.2017	Ausbau 4 1/2" Rohr aus S88
11. - 12.09.2017	Antransport und Einbau von Pumpengestänge und Pumpe in S88
14.09.2017	Durchführung Pumpversuch S88 mit Pegelüberwachung in S87 und S86 um hydraulische Verbindung abzuklären
14. - 15.09.2017	Vorbereitung Inbetriebnahme S141, Umsetzen Bohrgerät auf S104; Einbau Förderrohre
18.09.2017	Inbetriebnahme S141 mit kontrolliertem Druckaufbau (Drucküberwachung in Umgebungsbohrungen)

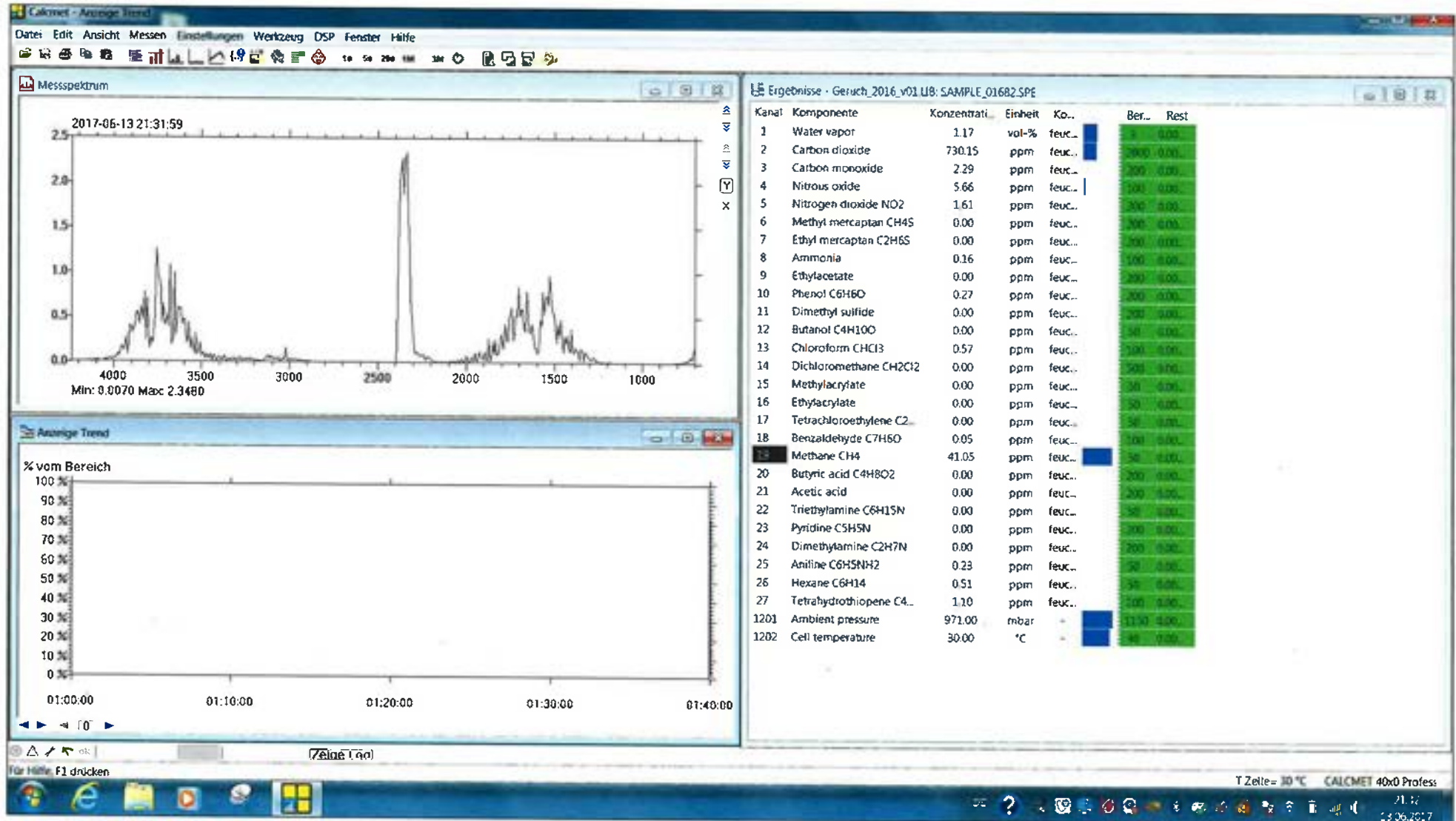
**Anhang 11: Resultate der Gasmessungen durch IFRB, 13.06.2017**



Todlar Bog Saleprobe 87

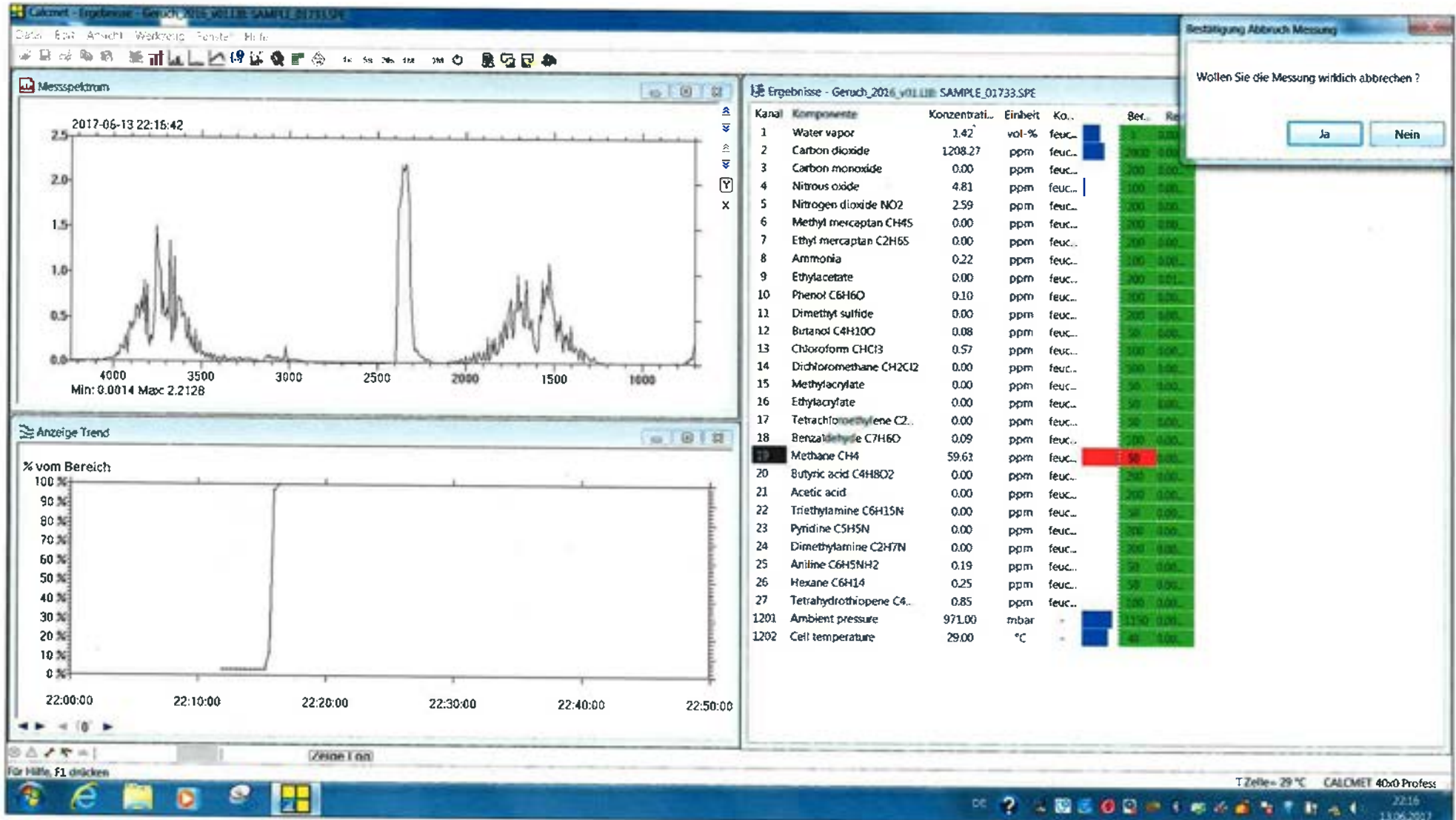
Ausdruck vom: Dienstag, 13. Juni 2017 21:32:46  
 PC-Name: PC107  
 Benutzername: GasmeterDX4040

77.45



5 87  
22.10

Ausdruck vom: Dienstag, 13. Juni 2017 22:20:54  
PC-Name: PC107  
Benutzername: GasmeterDX4040



2718014.1

Muttenz, Aufarbeitung Sole-Austritt Sulzhof (Bohrloch S87)

**GEOTEST**

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

**Anhang 12: Resultate der Gasmessungen durch Hydroisotop,  
Prüfbericht, 10.07.2017**

Schweizer Salinen AG  
Schweizerhalle  
Rheinstraße 52

4133 Pratteln 1 - SCHWEIZ

vorab per Email: gabor.fuchs@saline.ch

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025  
akkreditiertes Prüflaboratorium



Nach § 15 Abs. 4 TrinkwV 2001 zugelassene  
Trinkwasseruntersuchungsstelle

Schweitenkirchen, 10.07.2017

Dr.Lo

**Prüfbericht Nr. 300939 - 300940**

**Blatt 1 von 2**

Projekt:	<b>Gasanalyse</b>	Auftrag:	28.06.2017
Auftraggeber:	<b>Schweizer Salinen AG</b>		
Probenart:	Gasprobe	Probenahme:	Auftraggeber
Laboreingang:	30.06.2017	Analytikbeginn:	30.06.2017
		Analytikende:	06.07.2017

Prüfparameter	Prüfergebnis		Einheit
	S87/01	S87/02	
PROBENBEZEICHNUNG			
Labornummer	300939	300940	
Probenahmedatum	28.06.2017, 08:27	28.06.2017, 08:30	
Wasserstoff	0,14	-	Vol%
Argon	0,26	-	Vol-%
Sauerstoff	3,5	-	Vol-%
Stickstoff	95,4	-	Vol-%
Kohlenstoffdioxid	< 0,05	-	Vol-%
Methan	386	-	vpm
Ethan	7	-	vpm
Propan	3	-	vpm
i-Butan	1	-	vpm
n-Butan	1	-	vpm
i-Pentan	< 1	-	vpm
n-Pentan	< 1	-	vpm
Ethen	< 1	-	vpm
Propen	< 1	-	vpm

O:\Schweizer Salinen AG\300939 - 300940 Gasanalysen.doc

Projekt: **Gasanalyse** Auftrag: 28.06.2017  
 Auftraggeber: **Schweizer Salinen AG**

**Prüfparameter**

**Prüfverfahren**

Sauerstoff	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-WLD
Stickstoff	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-WLD
Argon	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-WLD
Kohlenstoffdioxid	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-WLD
Methan	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-FID
Ethan	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-FID
Propan	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-FID
i-Pentan	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-FID
n-Pentan	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-FID
i-Butan	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-FID
n-Butan	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-FID
Ethen	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-FID
Propen	QMA 504-2/15; Gaschromatographie GC-FID

**Legende**

*	Analytik in Kooperation mit akkreditiertem bzw. qualifiziertem Prüflabor
n.b.	nicht bestimmt, Konzentration zu gering
<	für Messungen radioaktiver Parameter Angabe der Nachweisgrenze, für alle anderen Messungen Angabe der Bestimmungsgrenze
-	nicht beauftragt
x	qualifiziertes Verfahren mit ausstehender Akkreditierung

**Anmerkungen**

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.  
 Auch eine auszugsweise Veröffentlichung von Prüfergebnissen bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Hydroisotop GmbH.  
 Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen der Hydroisotop GmbH.  
 Die Hydroisotop GmbH übernimmt keine Verantwortung für die Korrektheit von Probenahmen durch Dritte.

Dr. Eichinger  
 (Geschäftsführer)  
 10.07.2017

### **Anhang 13: Protokolle der Krisensitzungen der Gemeinde MuttENZ**

- 13.1) 1. Sitzung: Freitag, 16. Juni 2017
- 13.2) 2. Sitzung: Freitag, 23. Juni 2017
- 13.3) 3. Sitzung: Mittwoch, 5. Juli 2017
- 13.4) 4. Sitzung: Mittwoch, 26. Juli 2017

Protokoll  
Sitzung 01

---

## Protokoll

---

<b>Betreff</b>	Soleaustritt Sulzhof
<b>Datum, Zeit</b>	Freitag 16. Juni 2017, 07.00 Uhr
<b>Ort</b>	Gemeindeverwaltung Muttenz
<b>Anwesend</b>	Peter Vogt, Gemeindepräsident EWG Muttenz Roger Boerlin, Gemeinderat EWG Muttenz Peter Holzherr, Abteilungsleiter Sicherheit, EWG Muttenz Jürg Nyfeller, Mitglied Gemeindeführungsstab EWG Muttenz Peter Hänggi, Abteilungsleiter Betreibe, EWG Muttenz Christoph Erne, Abteilungsleiter Zentrumsdienste, EWG Muttenz Aurelia Wirth, Abteilungsleiterin Umwelt, EWG Muttenz Dieter Rebmann, Schweizer Salinen Nicole Riethmüller, Schweizer Salinen Christoph Mettler, Rechtsvertretung Schweizer Salinen Adrian Auckenthaler, AUE BL Dominik Bänninger, AUE BL Eric Zechner, Universität Basel Peter Leoni, Untersuchungsbeauftragter Staatsanwaltschaft BL Valeri Buri, Kriminalitätsbekämpfung BL Elina Flenner, Kriminalitätsbekämpfung BL

---

### 1. Allgemeines

Begrüssung durch Peter Holzherr, Leitung Gemeindeführungsstab und Abteilung Sicherheit Gemeinde Muttenz.

Der Gemeindeführungsstab wurde im Auftrag des Kantons die Koordination der Ereignisbewältigung übertragen.

Das Ziel der Sitzung ist ein Informationsabgleich unter den Beteiligten über die durchgeführten und geplanten Massnahmen sowie die Festlegung des weiteren Vorgehens.

### 2. Massnahmen seitens der Gemeinde

Die Gemeinde hat im Nachgang an das Ereignis folgende Massnahmen durchgeführt:

- Geschädigte Bereiche ausgepflockt und mittels Drohnenflug festgehalten.
- Mit Rheinsaline und AUE Bodenabtrag festgelegt, Anhäufung und Abdeckung Bodendepot vor Ort, Fertigung Belagswulst gegen Ausschwemmung.
- Der Bodenabtrag wird von einem Bodenfachmann laufend begleitet und es wird abgeklärt wo wie tief der Boden abgetragen werden muss.
- Reinigung der Strasse mit Hochdruckgerät.

- Geplant ist das Auspumpen der Zyste (80m<sup>3</sup>) vom Sulzhof, welche während des Ereignisses durch das Bächli mit Sole gefüllt wurde.
- Im Zusammenhang mit der Leerung der Zyste ist ein Färbversuch geplant, damit der Wege der Sole nach Austritt aus der Zyste nachverfolgt werden kann.
- Kontrolle und Drainage der betroffenen Leitungen.

### 3. Aktueller Stand Schweizer Saline AG

Von der Schweizer Salinen AG wurden folgenden Massnahmen durchgeführt:

- Abhumisierung wurde eingeleitet.
- Absprache der Massnahmen mit Geschädigten.
- Die umliegenden Bohrlöcher wurden alle auf Veränderungen kontrolliert, es sind keine Veränderungen feststellbar.
- Das Terrain wird grossflächig vermessen, um Veränderungen festzustellen.
- Es wurde ein Dossier für die Staatsanwaltschaft zusammengestellt mit allen erforderlichen Daten zur Aufarbeitung des Ereignisses.
- Nach möglichen Ursachen wurde gesucht und erste mögliche Thesen aufgestellt.

Mögliche Szenarien welche zum Ereignis führten und deren Überprüfung aus Sicht Saline nach momentanem Kenntnisstand:

- Teileinsturz in der Kaverne mit Nachrutschen von Gelände.  
Überprüfung in KW 26 vorgesehen durch Vermessung der Kaverne mit einem Echolot. Die letzte Vermessung hat im Jahr 2000 stattgefunden.
- Eine Verbindung zu Bohrloch S141 hat sich gebildet. S141 steht unter Druck, durch den Druckausgleich kam es zum Soleaustritt.  
Überprüfung durch Simulierung Druckaufbau im Bohrloch S141 nach Aufnahme der Arbeiten nach Abschluss Revision (25.6.-27.6.17).
- *Keiniger* Eine Methanansammlung (durch Gülleleitung in Umgebung) hat sich im Untergrund gebildet und mit dem Bohrloch verbunden, dadurch ist der Druck entstanden.  
Überprüfung durch geologische Beurteilung wie wahrscheinlich der Aufbau einer Methanschicht ist.

Die Szenarien werden nach dem Ausschlussverfahren überprüft und weitere Szenarien entwickelt.

Es wird festgehalten, dass die betroffene Kaverne (S87) isoliert ist und keine Verbindung zur Infrastruktur der weiteren Bohrstandorte besteht. Das Bohrloch war nicht verschlossen, dies ist auch nicht vorgeschrieben und üblich während Betrieb und definitivem Abschluss des Bohrstandortes. Da kein Druck in der Kaverne bestand, war es nicht nötig, dass diese mit einem Deckel fest verschlossen wurde. Der Druck wurde nicht gemessen, auch unter Terrain nicht.

Durch die geplante Überführung der Kavernen in Schlammverpressungskavernen wurde die Umgebung auf unterschiedliche Risiken hin abgeklärt. Das Risiko, dass Sole aus einer Kaverne austreten könnte wurde dabei nie genannt. Dabei wurde auch festgehalten, dass das Gebiet kein Risikogebiet für Einstürze ist. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde der Zustand des Bohrlochs und der möglich Austritt von Sole ins Grundwasser untersucht.

Nötige weitere Abklärungen und Schritte welche sich aus der Diskussion ergeben:

- Druckverhältnisse S141 vom 13.6. morgens bis abends wurden eingefordert und werden von der Saline aufgearbeitet.
- Die Gefährdung des Grundwassers durch den Vorfall muss überprüft werden.



#### 4. Abklärungen AUE BL

Vom Amt für Umwelt und Energie werden folgende Abklärungen durchgeführt und Massnahmen vorgeschlagen:

- Abschluss Gewässerpikett vom 13.06.17
- Die Entsorgung des Bodendepots wird überprüft
- Langfristig ist ein Monitoring der Oberflächengewässer, insbesondere des Dorfbachs in die Wege zu leiten. Dies ist erst sinnvoll, wenn kein weiteres Salz in den Dorfbach eingeschwemmt werden kann.
- Terrainmessung um hydrogeologische Prozesse ermitteln zu können.
- Das Tiefengewässer in der Umgebung wird momentan (unabhängig vom Ereignis) in Zusammenarbeit mit der Uni Basel untersucht, da in der Umgebung erhöhte Chloridgehälter im Muschelkalk festgestellt wurden. In diesem Zusammenhang lässt sich nun untersuchen, ob die beiden Quellen im Eigental durch das Ereignis einen höheren Chloridgehalt aufweisen.
- Für die Untersuchungen des Ereignisses wird eine Karte der Saline benötigt, auf welcher ersichtlich ist, welche Bohrfächer inaktiv und aktiv sind und wo aktuell Druck und Pegel gemessen werden sowie die Druckmessungen vom 13.06.
- Ein Austausch und Abgleich der Daten zwischen AUE und Rheinsaline ist nötig um die Prozesse zu verstehen
- Druckmessung in allen Kavernen nötig ist, welche in der Nähe von S87 sind und nicht nur in der S87 selbst. Die Saline hält fest das bis jetzt in Kaverne S88, welche mit S87 verbunden ist, nie ein Druck feststellbar war.

#### 5. Kommunikation

Der Gemeinderat Muttenz hat beschlossen, dass bis dato noch nicht über den Vorfall kommuniziert wird und wünscht zusammen mit der Saline eine gemeinsame Medienmitteilung herauszugeben. Ansprechperson für die Medien seitens Gemeinde Muttenz ist Gemeinderat Roger Boerlin, Departementsvorsteher Umwelt und Sicherheit. Im Anschluss an die Sitzung findet ein Treffen mit den Kommunikationsverantwortlichen Saline und Gemeinde Muttenz statt, worin das Kommunikationsvorgehen festgelegt wird. Das AUE klärt ab, inwieweit sie in die Kommunikation miteinbezogen werden.

#### 6. Weiteres Vorgehen

Der Gemeinderführungsstab Muttenz trifft sich regelmässig zu einem Rapport um die durchgeführten und geplanten Massnahmen zu besprechen. Eine vorerst wöchentliche Rapport GFS und Schweizer Salinen zur Koordination wird vereinbart. Das AUE und die Staatsanwaltschaft BL erhalten jeweils eine Einladung zur Sitzung und nehmen nach Bedarf daran teil.

#### 7. Übriges

Ein Zeitplan wird durch die Schweizer Saline in Absprache mit dem AUE aufgestellt. Darin werden die nächsten Untersuchungsschritte und Massnahmen festgehalten. Die Untersuchungen werden zwischen Saline und AUE abgesprochen und die Gemeinde Muttenz über die jeweiligen Schritte informiert.

## 8. Termine

Nächster Rapport: 23.06.2017, 7h, Gemeindeverwaltung MuttENZ

## Schluss der Sitzung: 08.00 Uhr

Sollten Teile dieses Protokolls nicht den Gesprächsverlauf wiedergeben, sind alle Teilnehmer aufgefordert, dies innerhalb einer Woche nach Erhalt dieses Protokolls dem Verfasser mitzuteilen.

MuttENZ 19.06.2017

Für das Protokoll: A. Wirth

**Geht an**

Anwesende

---

## Protokoll

---

<b>Betreff</b>	Soleaustritt Sulzhof
<b>Datum, Zeit</b>	Freitag 23. Juni 2017, 07.00 Uhr
<b>Ort</b>	Gemeindeverwaltung Muttenz
<b>Anwesend</b>	Peter Vogt, Gemeindepräsident EWG Muttenz Roger Boerlin, Gemeinderat EWG Muttenz Peter Holzherr, Abteilungsleiter Sicherheit, EWG Muttenz Peter Hänggi, Abteilungsleiter Betreibe, EWG Muttenz Christoph Erne, Abteilungsleiter Zentrumsdienste, EWG Muttenz Aurelia Wirth, Abteilungsleiterin Umwelt, EWG Muttenz Dieter Rebmann, Schweizer Salinen Nicole Riethmüller, Schweizer Salinen Christoph Mettler, Rechtsvertretung Schweizer Salinen Adrian Auckenthaler, AUE BL Dominik Bänninger, AUE BL Eric Zechner, Universität Basel Patrizia Krug, Staatsanwaltschaft BL Monika Burri, Flurcheffin Bürgergemeinde Muttenz
<b>Abwesend</b>	Jürg Nyfeller, Mitglied Gemeindeführungsstab EWG Muttenz Peter Leoni, Untersuchungsbeauftragter Staatsanwaltschaft BL Valeri Buri, Pol BL Elina Flenner, Pol BL

---

### 1. Protokoll

Korrektur S. 2, Szenario Methangasbildung: Auf Grund von Messungen ist es möglich, dass Methangas im Untergrund vorkommen könnte und sich so eine Methangasblase im der Sole gebildet hat, welche den Druck ausgelöst hat.  
Das Protokoll wird entsprechend angepasst und genehmigt.

### 2. Stand Gemeinde

Die Gemeinde hat seit dem ersten Gesamtrapport vom 16.06.17 folgende Massnahmen durchgeführt:

- Im Chlösterli wurden von zwei Quellen Wasserproben genommen und auf Leitfähigkeit untersucht.
- Die Zysterne auf dem Sulzhof wurde geleert.
- Auf Grund der guten optischen Sichtbarkeit des Wasserflusses wurde auf einen Färbversuch verzichtet.

- Zum Abtransport des Humus wurden Massnahmen wie die Festlegung der Fahrtrichtungen eingeleitet.

### 3. Stand Schweizer Saline AG

Von der Schweizer Salinen AG wurden folgenden Massnahmen durchgeführt:

- Eine Massnahmenplanung wurde vorgenommen
- Die Rekultivierung der Böden, begleitet durch einen Bodenfachmann, vor Ort läuft, Abschluss der Arbeiten bis spätestens Montag, 26.06.17
- Beim Ab- und Zutransport des Humus wurden Massnahmen zum Schutz der Strasse durchgeführt
- Bäume und Sträucher wurden inventarisiert, es wird momentan noch abgewartet, ob sich ein Teil der betroffenen Bäume regeneriert.
- Daten und Unterlagen wurden aufgearbeitet und an Staatsanwaltschaft, AUE und Polizei weitergegeben.
- Zur Überprüfung der möglichen Hypothesen wurde mit einem Faktencheck begonnen. Alle drei Szenarien, welche am 16.06. formuliert wurden, sind unsicher. Die beiden Szenarien Teileinsturz der Kaverne und Verbindung zu Bohrloch S141 können vermutlich bis Ende nächste Woche überprüft werden.
- Die aktuellen Terrainmessungen haben ergeben, dass im Gebiet Sulzhof sowie rund um das Bohrloch S87 es teilweise zu mittleren bis erheblichen Senkungen gekommen ist (Absenkung im Umfang von 1cm). Dies muss beobachtet werden, ein partieller Einsturz der Kaverne ist dadurch nicht erklärbar, die Variante partieller Einsturz kann dennoch noch nicht ausgeschlossen werden.
- Die Bohrlöcher in der Umgebung wurden überwacht ohne das Auffälligkeiten festgestellt wurden. Das Bohrloch S87 steht mittlerweile unter einem Druck von etwa 2.5 bar, ob dies durch ein Gas oder Sole hervorgerufen wird ist unklar.
- Alle umliegenden Bohrlöcher wurden mit einem Deckel verschlossen und einem Manometer versehen, diese werden einmal täglich abgelesen.
- Ein weiteres mögliches Szenario, welcher zum Soleaustritt führte, wäre ein Phänomen ähnlich wie ein Kaltwassergeysir mit Stickstoff als treibendes Gas an Stelle von Kohlenstoffdioxid. Stickstoff müsste sich dazu in einer Ausbuchtung der Kaverne angereichert haben. Eine Stickstoffblase trieb schliesslich die Sole durch die vorhandene Öffnung des Bohrlochs nach oben.
- Zur Überprüfung dieses Szenarios wurde das physikalische Institut der Universität Basel angefragt, sie können die nötigen Abklärungen jedoch nicht durchführen. Es wird nun nach einem Fachspezialist gesucht, welcher das Szenario überprüfen kann.

Geplante weitere Schritte und Vorgehen:

- In der Woche 26 wird der Druck von S87 abgelassen um das Bohrloch zu öffnen, Proben zu nehmen und ein Hilfsgestänge für die Echolotmessung einzuführen.
- S88 und S141 werden ebenfalls vermessen um (möglich) Verbindungen zu überprüfen.
- Die Auswertung der Messungen erfolgt im Anschluss und Resultate werden ab Woche 27 erwartet (Sitzung 3. Gesamtrapport)
- Da durch den vorhandenen Druck in S87 ein gewisses Risiko besteht können die Massnahmen nur mit einem Sicherheitsdispositiv durchgeführt werden. Sobald bemerkt wird, dass erneut Sole austritt, wird der Deckel geschlossen und die Messungen können vorläufig nicht durchgeführt werden.
- Ein Wiederanschluss ans System und die Ableitung der Sole wäre ein mögliche Variante, wenn Sole austreten oder der Druck in S87 wieder erwarten zunehmen würde.

- Das Sicherheitsdispositiv zur geplanten Öffnung des Bohrlochs S87 wird erarbeitet und vorgängig an die Gemeinde sowie das AUE gegeben.

#### 4. Stand AUE BL

Das AUE hält folgendes fest:

- Es ist wichtig, weiterhin offen für andere Szenarien und mögliche Ursachen des Ereignisses zu sein, da der Sachverhalt sehr komplex ist. Für die Analyse des Ereignisses und um die Ursache herauszufinden müssen alle Daten gesammelt und gesichtet werden.
- Das AUE steht im Kontakt zum Geologe der Schweizer Salinen AG Gabor Fuchs um die offenen Fragen zu klären und die benötigten Unterlagen und Daten anzufordern
- Zur Überprüfung des Sicherheitsdispositivs und für allfällige Anpassungen bzw. Auflagen ist eine rechtzeitige Zusendung des Sicherheitsdispositivs an das AUE nötig.
- Das AUE informiert, auf Wunsch der Gemeinde, die weiteren Fachstellen beim Kanton/AUE welche vom Ereignis betroffen sein könnten.

#### 5. Stand Staatsanwaltschaft BL

Die Staatsanwaltschaft Baselland hält folgendes fest:

- Ein Verfahren wurde eröffnet um damit die benötigten Unterlagen zu erhalten.
- Die Schweizer Rheinsalinen AG ist selbst sehr bemüht, die Ursache für das Ereignis zu finden. Aus diesem Grund wird momentan auf weitere Schritte, wie der Beizug eines externen Experten, verzichtet.

#### 6. Stand Kommunikation

Seitens Kommunikation/Medien wird folgendes festgehalten:

- Die Medien berichten bis jetzt zurückhaltend und sachlich.
- Die Bevölkerung ist über die Sachlage informiert aber nicht beunruhigt.
- Eine weitere Medienmitteilung über den Stand der Arbeiten wird im Namen des Gemeinderats im Muttenzer Amtsanzeiger vom 30.6.16 erscheinen. Ein entsprechender Entwurf wird in Absprache mit der Schweizer Salinen AG vorbereitet.
- Seitens der Gemeinde ist Roger Boerlin, Gemeinderat / Vorsteher Departement Umwelt und Sicherheit (M +41 79 471 72 98, [roger.boerlin@bluewin.ch](mailto:roger.boerlin@bluewin.ch)) Ansprechperson für die Medien. Anfragen der Medien, werden an die Gemeinde und Roger Boerlin weitergeleitet.
- Auf Seiten der Schweizer Salinen AG ist Dr. Urs Ch. Hofmeier, Geschäftsführer, (T +41 61 825 51 04, [urs.hofmeier@saline.ch](mailto:urs.hofmeier@saline.ch)) Ansprechperson für die Medien.

#### 7. Übriges

Gemeindepräsident Peter Vogt hält fest, dass die Zusammenarbeit und das gegenseitige Vertrauen sehr gut sind und dankt der Rheinsaline dafür. Er spricht die weitere Bereitschaft zur Unterstützung durch die Gemeinde aus, gerade auch in Hinsicht auf das kommende Sicherheitsdispositiv.

## 8. Termine

Nächster Rapport: 05.07.2017, 06.30h, Gemeindeverwaltung Muttenz

### **Schluss der Sitzung: 08.15 Uhr**

Sollten Teile dieses Protokolls nicht den Gesprächsverlauf wiedergeben, sind alle Teilnehmer aufgefordert, dies innerhalb einer Woche nach Erhalt dieses Protokolls dem Verfasser mitzuteilen.

Muttenz 26.06.2017

Für das Protokoll: A. Wirth

### **Geht an**

Anwesende

---

## Protokoll

---

<b>Betreff</b>	Soleaustritt Sulzhof
<b>Datum, Zeit</b>	Mittwoch 5. Juli 2017, 06.30 Uhr
<b>Ort</b>	Gemeindeverwaltung Muttenz
<b>Anwesend</b>	Peter Vogt, Gemeindepräsident EWG Muttenz Roger Boerlin, Gemeinderat EWG Muttenz Peter Holzherr, Abteilungsleiter Sicherheit, EWG Muttenz Jürg Nyfeler, Mitglied Gemeindeführungsstab, EWG Muttenz Peter Hänggi, Abteilungsleiter Betriebe, EWG Muttenz Aurelia Wirth, Abteilungsleiterin Umwelt, EWG Muttenz Sandra Schneider, Abteilung Sicherheit, EWG Muttenz Dieter Rebmann, Schweizer Salinen Gabor Fuchs, Schweizer Salinen Nicole Riethmüller, Schweizer Salinen Christoph Mettler, Rechtsvertretung Schweizer Salinen Adrian Auckenthaler, AUE BL Dominik Bänninger, AUE BL Patrizia Krug, Staatsanwaltschaft BL Monika Burri, Flurchefin Bürgergemeinde Muttenz
<b>Abwesend</b>	Christoph Erne, Abteilungsleiter Zentrumsdienste, EWG Muttenz Eric Zechner, Universität Basel Peter Leoni, Untersuchungsbeauftragter Staatsanwaltschaft BL Valeri Buri, Pol BL Elin Flenner, Pol BL Monika Burri, Flurchefin Bürgergemeinde Muttenz

---

### 1. Protokoll

Richtigstellung Name: Schweizer Salinen anstatt Schweizer Rheinsalinen

Das Protokoll wird entsprechend angepasst und genehmigt

### 2. Stand Gemeinde

Rückblick:

- Durchführung von 3 Rapporten in der Woche 26 inkl. Augenschein vor Ort bei Vorbereitungsarbeiten Hohlraumvermessungen Bohrlöcher S87 und S141
- Aufnahme und Erstellen einer Übersichtsliste der Geschädigten zu Händen Polizei Basel-Landschaft

- Gespräche Abteilung Umwelt Aurelia Wirth betreffend geschädigter Bäume entlang des Baches im Gang

### 3. Stand Schweizer Salinen AG

Die Schweizer Salinen AG orientieren über die durchgeführten Massnahmen seit 23.06.2017 und händigen die **Beilage „Chronologie Massnahmen“ per 04.07.2017** aus.

Insbesondere:

- Zusätzliche Nivellements-Messungen haben zu keinen neuen Erkenntnissen geführt
- Bestätigung nachweisbarer grossflächiger Senkungen. Im oberen Hangteil stärker als im unteren Bereich. Erfordert keine Sofortmassnahmen, wird im Auge behalten
- Vorbereitungsarbeiten S141 zur Hohlraumvermessung. Für den Zugang mit der Sonde mussten die Rohre ausgewechselt werden
- Installationen Manometer und Flansche gemäss Auftrag Kanton
- Inventarisierung Bohrlochkopf div. Standorte
- Erstellen Sicherheitsdispositiv; keine Vorkommnisse
- Druckablass S87 ohne Probleme erfolgt
- Gasproben entnommen; Resultate werden bis Ende Woche 27 erwartet
- Nach Einbau 4“ Rohre und Beginn Vermessung S87 und S88 auf Aufstand gestossen und folglich Abbruch
- Kavernenvermessung S141 durchgeführt, keine Anomalien oder Verbindungen zu S87 oder S88 festgestellt
- Abbruch des Versuchs Aufbohren S87 aufgrund „Rumoren“ im Bohrloch sowie dessen Abdichtung und Verschluss gemäss Sicherheitsdispositiv
- Nächster Versuch Zutrittsverschaffung zur Kaverne S87 (Aufbohrung Pfropfen) mittels eines Blow Out Preventer (BOP) geplant, dessen Eintreffen in der Woche 27 vorgesehen ist. Methode zu gesichertem Vorgehen, falls es während Bohrungen zu einem Einbruch kommt und ein allfälliger Druck nicht ein Szenario II verursacht. Bohrungen ab Woche 28
- Firma Socon zur Berechnung Szenario Kaltwassergeysir
- Indizienkette Aufstand (Pfropfen aus Salz/Gips) zusammen mit Gaspolster als treibendes Element und allfälligen Geländesenkungen zum Druckaufbau verhärtet sich

Geplante weitere Schritte und Vorgehen:

Aushändigung der **Beilage „Massnahmenplan“ per 04.07.2017**. Neue oder überholte Einträge sind rot markiert.

Insbesondere:

- Vorbereitungsarbeiten für Einsatz BOP. Instruktionen notwendig
- Aufbohrung S87 für 10.07.2017 vorgesehen
- Aktionen werden avisiert; Vorbereitungsarbeiten nicht
- Bei Nichtfunktionieren wird Planung angepasst
- Umsetzen Bohrgerät auf S88 für 13.07.2017 vorgesehen. Zeitverzögerungen durch den Umstand, dass nur ein Bohrgerät vorhanden ist
- Ziel S87 und S88: Aufbohren / 4“ Rohre einbauen / Vermessung durch Firma Socon aus Hannover für 25.07.2017 vorgesehen
- Danach Umzug zu S141, welches bis dahin ausser Betrieb bleibt. Vorbereitungsarbeiten ab 02.08.2017 sowie Wiederinbetriebnahme mit kontrolliertem Druckaufbau am 04.08.2017



## Weitere Anmerkungen:

- D. Rebmann um Meldung und Kontaktaufnahme zur Unterstützung bei anstehenden Re-naturierungsmassnahmen
- Kontakt mit Amt für Wald und Fischereiverein ist hergestellt
- Sitzungsrhythmus ausdehnen: Vorschlag 25. oder 26.07.2017 sowie Planung Abschluss auf 17.08.2017

## Umfrage:

- AUE: erachtet die geplanten Aufbohrungen ohne die Erkenntnisse, ob hydraulische Verbindungen zwischen S87 und S88 bestehen, als sehr problematisch, da der jetzige Ist-Zustand nicht mehr hergestellt werden kann. Schweizer Salinen sehen die Aufbohrungen als folgliche Massnahme, um zu diesen Erkenntnissen zu gelangen  
Vorschlag AUE: Druckaufbau S87 und Überprüfung ob Reaktion im S88
- AUE: was hat den erneuten Pfropfen verursacht? Schweizer Salinen gehen von einem Teilabbruch des bestehenden Propfens und nicht von einer Neubildung aus
- AUE: wo wird aktuell gelaugt? Rund um das Gebiet S141 (Zinggibrunn)
- AUE: Pfropfenzusammensetzung nicht bekannt  
Auskristallisierung Salz/Mineralstoffe über längeren Zeitraum. Enger Kavernenhals begünstigt Ansammlung > naheliegendste Erklärung (Hypothese!): Pfropfenbildung in S87 und S88 als Ursache
- AUE: ist in den umliegenden Kavernen ebenfalls mit einer Pfropfenbildung zu rechnen? S85, S86 und S89 wurden im Herbst 2016 vermessen und keine Pfropfen festgestellt
- Stawa: werden regelmässige Kontrollen durchgeführt? Bei Kavernen in Betrieb ja (alle paar Jahre), bei Kavernen im Standby wird vor der Zementierung eine Schlussvermessung durchgeführt
- AUE: Ursache des Druckanstieges muss zwingend geklärt sein bevor Schlammverpressung in Betracht gezogen werden kann. Dringende Empfehlung von Online-Drucksonden. Eine mögliche hydraulische Verbindung zwischen S87/S88 muss geklärt werden
- J. Nyfeler: Hinweis, dass am Ereignistag beim Bohrloch beim Hof massiver Gasaustritt mit hohem Druck bis in die Nacht zu verzeichnen war. Sollte als Indiz zur Gesamtbeurteilung mitberücksichtigt werden. Schweizer Salinen sehen Gasaustritt nicht aus dem Bohrloch sondern aus den Abpumpleitungen aufgrund des geflossenen Solewassers

#### 4. Stand AUE BL

## Das AUE hält folgendes fest:

- Anfrage betreffend Dokumentation zur erwähnten Doline beim Landwirtschaftsbetrieb. Zustellung erfolgt durch P. Holzherr  
Es handelt sich um einen kleinen Einsturz oberhalb des Bohrlochs, welcher sich ca. 1 Monat vor dem Sole-Austritt ereignete. Durchmesser 1m, Tiefe 80cm.  
Schweizer Salinen AG bitten um Information über derartige Vorkommnisse
- Konzept Überwachung Wasserqualität bzw. Leitfähigkeit im Bach vom Büro Pfirter, Nyfeler und Partner erhalten und begrüsst. Kontaktaufnahme und Absprache
- Bittet Schweizer Salinen AG, die Vermessungsdaten der Gemeinde Muttenz (GFS) zuzustellen
- Rücksprache mit Herrn Misoun betreffend geschädigter Bäume entlang des Bachlaufes. Keine wasserbaulichen Massnahmen, da Bäume nicht auf Wasserparzellen. Zuständigkeit Forstamt

- Betreffend Massnahmenkonzept der Schweizer Salinen AG fehlt dem AUE das Verständnis der aktuellen Druckausbreitung in den Kavernen. Es sind keine Informationen über Überwachung, Zeitplan, Installationen, Ablesung der Manometer, etc. vorhanden. Dabei geht es nicht um das Monitoring sondern um hydraulische Verbindungen. Dringende Empfehlung Einbau von Online-Sonden

#### 5. Stand Staatsanwaltschaft BL

Ergänzende Frage, ob Vorgehen nach Massnahmenplan auch bedeuten kann, dass gewisse Ursachen nachträglich nicht mehr geklärt werden können. Aus Sicht der Staatsanwaltschaft dürfen keine Beweise vernichtet werden. Das AUE teilt die Ansicht, dass dies mit den angesetzten Bohrungen durchaus möglich ist.

://: Zur Klärung des weiteren Vorgehens wird auf bilaterale Gespräche zwischen Stawa, AUE und Schweizer Salinen AG im Nachgang an diese Sitzung verwiesen

#### 6. Stand Kommunikation

Zum heutigen Zeitpunkt besteht kein Bedarf. Nächste Informationen bzw. Medienmitteilungen bei konkreten Ergebnissen geplant

#### 7. Übriges

Jürg Nyfeler orientiert, dass die Wasserproben der Quellen nachweislich in Ordnung sind

#### 8. Termine

- Nächster Rapport Mittwoch, 26.07.2017, 07.00 Uhr, Gemeindeverwaltung Muttenz (P. Krug entschuldigt, Stv. wird teilnehmen)
- Reservation Donnerstag, 17.08.2017, 07.00 Uhr, Gemeindeverwaltung Muttenz (Entscheid am nächsten Rapport)

#### Schluss der Sitzung: 07.40 Uhr

Sollten Teile dieses Protokolls nicht den Gesprächsverlauf wiedergeben, sind alle Teilnehmer aufgefordert, dies innerhalb einer Woche nach Erhalt dieses Protokolls dem Verfasser mitzuteilen.

Muttenz 05.07.2017

Für das Protokoll: S. Schneider

**Geht an**

Anwesende

---

## Protokoll

---

<b>Betreff</b>	Soleaustritt Sulzhof
<b>Datum, Zeit</b>	Mittwoch 26. Juli 2017, 07.00 Uhr
<b>Ort</b>	Gemeindeverwaltung Muttenz
<b>Anwesend</b>	Peter Vogt, Gemeindepräsident EWG Muttenz Roger Boerlin, Gemeinderat EWG Muttenz Peter Holzherr, Abteilungsleiter Sicherheit, EWG Muttenz Jürg Nyfeler, Mitglied Gemeindeführungsstab, EWG Muttenz Peter Hänggi, Abteilungsleiter Betriebe, EWG Muttenz Aurelia Wirth, Abteilungsleiterin Umwelt, EWG Muttenz Christoph Erne, Abteilungsleiter Zentrumsdienste, EWG Muttenz Dieter Rebmann, Schweizer Salinen Gabor Fuchs, Schweizer Salinen Daniel Schaffner, Rechtsvertretung Schweizer Salinen Adrian Auckenthaler, AUE BL Dominik Bänninger, AUE BL Peter Leoni, Untersuchungsbeauftragter Staatsanwaltschaft BL Monika Burri, Flurchefin Bürgergemeinde Muttenz Colin Lukas, Gemeinderatssekretariat, EWG Muttenz
<b>Abwesend</b>	Christoph Mettler, Rechtsvertretung Schweizer Salinen Nicole Riethmüller, Schweizer Salinen Patrizia Krug, Staatsanwaltschaft BL Eric Zechner, Universität Basel Valeri Buri, Pol BL Elina Flenner, Pol BL Sandra Schneider, Abteilung Sicherheit, EWG Muttenz

---

Begrüssung durch Peter Holzherr, Leitung Gemeindeführungsstab und Abteilung Sicherheit Gemeinde Muttenz.

**1. Protokoll vom 5. Juli 2017**

Keine Einwände - das Protokoll vom 5. Juli 2017 wird genehmigt.

**2. Stand Gemeinde**

Rückblick:  
Abteilung Umwelt und Abteilung Betriebe nichts Nennenswertes

### 3. Stand Schweizer Salinen AG

Die Schweizer Salinen AG orientieren über die bis jetzt durchgeführten Massnahmen und informieren über den Ablauf mit zwei erstellten Dokumenten.

Von der Schweizer Salinen AG wurden folgenden Massnahmen durchgeführt (Erläuterungen durch Herrn D. Rebmann):

- Ein gewisser Restdruck wurde beim Bohrloch S87 festgestellt, welcher kontrolliert abgelassen wurde. Die Gelegenheit wurde dazu genutzt das darin enthaltene Medium zu fassen und durch ein deutsches Institut zu analysieren lassen. Die wesentlichen Erkenntnisse daraus waren, dass u.a. 96 Volumenprozent Stickstoff festgestellt wurden. Somit kann, zwar nicht mit hundertprozentiger Sicherheit, festgestellt werden, dass Stickstoff die treibende Kraft und somit der Auslöser für die sogenannte Kaltwassergeysir gewesen sein könnte. Weitere Thesen wie z.B. Methanaustritt kann man verwerfen. Weiter wurde ein Beurteilung über das gesamte Problem durch das renommierte deutsche Institut (Firma DEEP) gemacht und diese beauftragt, Gesamtberechnungen vorzunehmen. Parallel dazu wurde mit der Firma Soccon aus Deutschland Kontakt aufgenommen, welche in der Nähe von Koblenz ein Kaltwassergeysir touristisch nutzt, um eine Zweitmeinung einzuholen.
- Bei der Bohrung bei S87 wurde festgestellt, dass man erneut auf Widerstand gestossen ist, weshalb die Übung abgebrochen werden musste. Man musste deshalb ein neues Verfahren wählen was bedeutet, dass sie das Bohrloch ausfräsen werden müssen.
- Allgemein wurde beschlossen, dass man zukünftig sehr vorsichtig vorgeht und dass die weiteren Aktivitäten sehr zeitintensiv sein werden.

Erklärung, warum es bereits zum zweiten Male zu Verzögerungen gekommen ist (Erläuterungen durch Herrn G. Fuchs):

- Es wird mit dem Blow Out Preventer (BOP) gearbeitet, welcher aus zwei Teilen besteht. Auf die detaillierte Beschreibung betr. Bohrung, Bohrlochmontage bzw. -abdichtung, Steuerungseinheit, geringer Platz und Spezialtransport wird an dieser Stelle verzichtet. Der grosse und notwendige Aufwand hat zur Verzögerung geführt. Bei Beginn des Bohrens wurde festgestellt, dass man nicht auf Gestein, Salz oder Gips aufschlägt, sondern dass man mit dem Meissel nicht durch das Rohr hindurchkommt. Der Grund dafür ist noch nicht bekannt, weshalb weitere Schritte geplant sind, eine Lösung zu finden. Heute am 26.07. wird die Firma terratec eine Kamerabefahrung machen und geophysikalische Messungen vornehmen. Wegen oftmals grossen Trübungen im Loch wurde bis jetzt auf diese Art von Messungen verzichtet. Je nachdem zeigt sich dann heute, wo das Problem liegt und ob man allenfalls ein grosses Stück von diesem Rohr aufbohren muss. Als weiterer Schritt wird mit einer Fräse das Bohrloch ausgefräst.
- Der Aufstand befindet sich in einer Tiefe von 320 Meter, was ca. 10 – 12 Meter über dem Ende des Rohres, welches sich in dieser Salzkaverne befindet. Im schlimmsten Fall müssten diese 12 Meter durchfräst werden, damit der Zugang zur Kaverne wieder frei ist. Die benötigte Zeit dafür liegt zwischen 2- 14 Tagen.
- Nach einer erfolgreichen Öffnung des Bohrloches mit der Fräse, würde man mit den bereits geplanten Schritten weiterfahren:

- Einbau einer Pumpe mit anschliessendem Pumpversuch im Bohrloch S87 mit Kontrolle Solenspiegel
- anschliessend Übergang zum Nachbarsloch S88 mit Kavernenmessung
- Bohröffnung
- abschliessende Vermessung beider Kavernen wie mit AUE besprochen

Geplante und bereits ausgeführte Massnahmen:

Aushändigung der *Beilage* „**Massnahmenplan**“ per 25.07.2017

Weitere Anmerkungen:

- Die entsprechenden Verzögerungen aufgrund der genannten Schwierigkeiten haben nun Auswirkungen auf den damals „sportlich“ genannten Endtermin vom 17.08.2017 mit Vorlage der Lösung.  
Die Schweizer Salinen AG schlägt einen neuen Termin für die Endbesprechung vor – 20.09.2017
- Betreffend Presseanfragen macht Herr Rebmann beliebt, dass aufgrund der genannten Bohrschwierigkeiten auf den 20.09.2017 „vertröstet“ bzw. verwiesen wird.
- Einigung erzielt mit Amt für Wald beider Basel (Wald, Jagd- und Fischereiwesen) betreffend Abrechnung. Schweizer Salinen AG wird Schaden übernehmen.

Fragen:

- Schweizer Saline: Macht die Gemeinde noch ein Schadensinventar?  
P. Holzherr teilt mit, dass dies zusammengestellt wurde und der Schweizer Salinen zugestellt wird.
- Schweizer Saline hat Schäden an Kulturlandschaft verursacht. Können sie Drittbetroffene direkt kontaktieren bzw. sich mit ihnen einigen und diese entschädigen?  
P. Holzherr teilt mit, dass dies möglich ist.
- AUE betr. besprochenen Druckmessungen in den beiden Rohre: Schon Resultate ersichtlich oder kommt dies erst?  
Schweizer Saline, G. Fuchs teilt mit, dass sie das Bohrloch S87 frei machen und eine Pumpe einbauen werden. Die Druckmessung passiert dann bei beiden Löchern per Lichtlot.
- AUE betr. Fusszementation: Wenn diese 10 - 12 Meter ausgefräst werden, wird gemäss der Info von Schweizer Saline üblicherweise genügend Zement verwenden um die gesamte Zone zu schliessen. Sind Protokolle über diesen Vorgang vorhanden oder ist es eine Annahme?  
Schweizer Saline, G. Fuchs teilt mit, dass dies eine Annahme ist und nicht in diesem Masse dokumentiert ist.
- AUE betr. Basis vom Rohr: Ist diese ziemlich genau das Salzdach?  
Schweizer Saline, G. Fuchs teilt mit, dass diese knapp einen Meter in die Kaverne hineinragt.
- AUE betr. Hinterfüllung: Kann man diese feststellen?  
Schweizer Saline, G. Fuchs teilt mit, dass es geophysikalische Messmethoden gibt, z.B. eine akustische Prüfung (abklopfen des Rohres). Über eine Schallreflektion können anschliessend Aussagen getroffen werden, ob eine Anbindung zwischen Stahlrohr und Felsen besteht.  
Eine solche Messung wurde bereits im Herbst vorgenommen aber man kann aus dieser keine absoluten Messwerte ziehen.

- AUE betr. Hinterfüllung: Gibt es innerhalb der Sulfatzone Unterschiede bei dieser Zementation?  
Schweizer Saline, G. Fuchs teilt mit, dass es Unterschiede gibt.
- AUE: Kann man nach dem Ausfräsen nochmals prüfen, ob alles dicht ist?  
Schweizer Saline, G. Fuchs teilt mit, dass man nochmals Messungen vornehmen und allenfalls Massnahmen ergreifen kann.
- EWG Muttenz, Chr. Erne: Hat es in der Zwischenzeit Medienreaktionen gegeben?  
Schweizer Saline, D. Rebmann teilt mit, dass es zwei Anfragen (TV + bz) gegeben hat aber diese auch auf die Informationshoheit der Gemeinde hingewiesen hat und man bis zum damals bekannten Termin (17.08.2017) keine neuen Informationen weitergeben wird. Wie gesagt, sollte nun auf den 20.09.2017 vertröstet werden.

Allgemeine Umfrage:

- AUE Info betr. Rechnung Gewässerschutz-Pikett / ABC-Wehr
- GFS, J. Nyfeler Info betr. Wasser-Leitfähigkeiten
- AUE Info betr. Gewässerökologie bezgl. Messungen

#### 4. Stand AUE BL

Nur die Frage betr. Bericht über die Senkungsmessung in welchem ersichtlich ist, dass die Senkung im einen Gebiet grösser ist und nach unten abnimmt. Die Frage diesbezüglich wäre, was die Interpretation davon ist und was kann man davon ableiten? Bis wann können wir mit einem abschliessenden Bericht rechnen?

Schweizer Saline AG, D. Rebmann gibt zur Antwort, dass momentan noch keine verbindlichen Aussagen gemacht werden können und verweist auf den kommenden Abschlussbericht im Herbst.

AUE bittet darum festzuhalten, dass man die Daten in Form von Senkungsdiagrammen im Schlussbild darstellt und soweit möglich die Interpretation dazu.

Ein aktueller Bericht mit Senkungsdiagrammen wird mit dem Protokoll verschickt.

#### 5. Stand Staatsanwaltschaft BL

Nichts Nennenswertes

GFS, P. Holzherr teilt der Stawa mit, dass sie eine Liste der Geschädigten von der Polizei Basel-Landschaft hätte erhalten sollen, welche durch Frau Wirt (Abtl. Umwelt) erstellt wurde.

Stawa teilt mit, dass sie diesbezüglich von der Polizei Basel-Landschaft kontaktiert wurden mit der Mitteilung, dass die Liste noch zugestellt wird.

Schweizer Saline fragt nochmals zur Sicherheit, ob sie frei mit den Geschädigten in Kontakt treten können ohne die Zustimmung der Stawa?

Stawa teilt mit, dass es rein darum geht, dass die Polizei einen Bericht bzw. eine Anzeige verfassen muss, enthalten mit allen Betroffenen.

#### 6. Stand Kommunikation

Zum heutigen Zeitpunkt besteht kein Bedarf. Nächste Informationen bzw. Medienmitteilungen sind bei konkreten Ergebnissen, frühestens aber ab 20.09.2017, geplant.

**7. Übriges**

Falls sich bei den Bohrungen etwas Unvorhergesehenes ereignen würde, dann wird Schweizer Salinen alle per E-Mail darüber informieren.

**8. Termine**

Nächster Rapport: Mittwoch, 20.09.2017, 07.00 Uhr, Gemeindeverwaltung Muttenz

**Schluss der Sitzung: 07.50 Uhr**

Sollten Teile dieses Protokolls nicht den Gesprächsverlauf wiedergeben, sind alle Teilnehmer aufgefordert, dies innerhalb einer Woche nach Erhalt dieses Protokolls dem Verfasser mitzuteilen.

Muttenz 26.07.2017

Für das Protokoll: C. Lukas

**Geht an**

Anwesende

## **Anhang 14: Geschädigte Soleaustritt Sulzhof**



## Geschädigte Soleaustritt Sulzhof

<b>Geschädigte</b>	<b>Objekte</b>
Gebrüder Kohler, Sulzhof 7, 4132 Muttenz	Eigentümer geschädigte Grundstücke 2849, 2851, 8271, Zysterne, Pächter weiterer geschädigter Grundstücke
Bürgergemeinde Muttenz Oberdorf 1, 4132 Muttenz	Eigentümer geschädigtes Grundstück Wald 1025 und Dorfbach Parzelle 2763
Fischereiverein Reinach/Münchenstein	Dorfbach Fischhege
Einwohnergemeinde Muttenz Kirchplatz 3, 4142 Muttenz	Eigentümer Grundstück Strasse 2853, 2850, Wiese 2860, Leitungen, Dorfbach Parzellen 2759, 8934, 3007, 3008, 2251, 2363
Isabelle Bellakovics, Gruthweg 60, 4142 Muttenz	Eigentümer geschädigtes Grundstück 2859
Astrid und Elke Hallauer, Weiherstrasse 40, 4142 Muttenz	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 2369
Löw Gartenbau, Gwidmenstrasse 7, 4142 Muttenz	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 2370
Claudia und Christoph Schwob, Nadelberg 13, 4051 Basel	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 3515
Hans Christoph Seiler, Stüssistrass 7, 8057 Zürich	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 2368
Karl und Rosmarie Grollimund, Gwidmenstrasse 1, 4142 Muttenz	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 2371
Erbengemeinschaft Meister, Elisabeth Alig-Meister, Dreibündenstrasse 28, 7000 Chur	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 4081
Elise Brüderlin, Breitestrasse 42, 4132 Muttenz	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 3009, 3010
Reinhard Dettwiler-Urech, Wolfenseestrasse 8 4132 Muttenz	Anstösser Bach Miteigentümer Parzelle 5249
Ruth Eggs-Dettwiler, Wolfenseestrasse 6 4132 Muttenz	Anstösser Bach Miteigentümer Parzelle 5249, 2365, Eigentümer 5248
Hedwig Dettwiler, Mühlackerstrasse 84 4132 Muttenz	Anstösser Bach Miteigentümer Parzelle 2365
Roland Meister-Wehner, Wolfenseestrasse 4 4132 Muttenz	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 4080
Alice Schweizer-Vogt, 2752 El Rancho Drive Santa Cruz CA 95060, VEREINIGTE STAATEN	Anstösser Bach Miteigentümer Parzelle 2364, 2362
Beatus Kaspar, Mühlackerstrasse 78, 4132 Muttenz	Anstösser Bach Miteigentümer Parzelle 2364, 2362, Eigentümer 2361
Staat Baselland, Baudirektion, 4410 Liestal	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 2887
Beatrice und Martin Wüthrich, Mühlackerstrasse 74, 4132 Muttenz	Anstösser Bach, Eigentümer Parzelle 2278
Rolf Stalder, Helsinki-Strasse 7 4142 Münchenstein	Anstösser Bach Eigentümer Parzelle 2277

2718014.1

Muttenz, Aufarbeitung Sole-Austritt Sulzhof (Bohrloch S87)

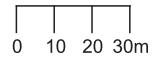
**GEOTEST**

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

**Anhang 15: Fotodokumentation oberflächliche Einstürze ca. einen  
Monat vor dem Soleaustritt**



Massstab 1: 2'000



Auszug aus dem Geoinformationssystem Basel-Landschaft  
© Kantonale Verwaltung Basel-Landschaft  
PK, SWISSIMAGE, Geolog. Atlas/Spezialkarten: Quelle swisstopo

Die aus dem Geoinformationssystem publizierten Daten haben nur informativen Charakter. Aus diesen Daten und deren Darstellung können deshalb keine rechtlichen Ansprüche irgendwelcher Art abgeleitet werden. Auskunft erteilt die GIS-Fachstelle, Tel. 061 552 52 13.



<b>Ungefähre Lage der Dolinen Situation 1:2'000</b>		
<b>PFIRTER NYFELER</b> + PARTNER AG	4888.0000	gez. bsa
Geologie, Geotechnik, Spezialtiefbau Gartenstrasse 15 4132 MuttENZ	Tel. 061-467 68 30 Fax 061-467 68 36 E-Mail info@pnpmu.ch	24.07.2017 kontr. Ny

Doline 1



Doline 1



mögliche Doline 2



mögliche Doline 2



2718014.1

Muttenz, Aufarbeitung Sole-Austritt Sulzhof (Bohrloch S87)

**GEOTEST**

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

**Anhang 16: Zustandsaufnahme der Baumvegetation entlang des  
Dorfbachs in Muttenz nach dem Soleaustritt vom  
11.08.2017**

# Beurteilung der Folgen des Salzwasserunfalls vom 13.6.2017 auf die Baumvegetation entlang des Dorfbach in Muttenz

## 1. Ausgangslage

Am 13.6.2017 gelangten grössere Mengen Sole in den Dorfbach bei Muttenz. Dieser ist umgeben von Sträuchern und Bäumen. Im Juli haben vor allem Erlen und Weiden ihr Laub verloren, wahrscheinlich auf Grund des Salzes, welche die Bäume über die Wurzeln aufgenommen haben. Das nun vorliegende Dokument hält den Zustand der Bäume am 9.8.2017 fest.

## 2. Ziele

Die Baum- und Strauchvegetation entlang des Dorfbach in Muttenz soll beurteilt werden. Aus der Beurteilung abgeleitet werden allfällige Massnahmen, welche nötig werden.

## 3. Methode

Die Bäume und Sträucher wurden nach optischen Gesichtspunkten untersucht. Dabei wurde vor allem die Belaubung der Kronen begutachtet. Für die Beurteilung wurde der Dorfbach zu Fuss abgesprochen.

## 4. Beurteilung

Am Dorfbach besteht die Baumschicht zur Mehrheit aus Erlen, welche in einer Vielzahl entlang des Baches stocken. Eine üppige Strauchschicht ist dort vorhanden, wo genügend Licht auf den Boden kommt. Es stocken vor allem Weiden, Haseln und weitere heimische Arten am Ufer.

Anfang Juli 2017 ist das Laub der Erlen und Weiden braun geworden. Die meisten andern Baum und Straucharten haben keine Auffälligkeiten gezeigt. Am Tag der Begehung habe ich festgestellt, dass die meisten der Bäume neue Blätter gemacht haben. Die Bäume machen einen vitalen, gesunden Eindruck. Vereinzelt sind Exemplare vorhanden, welche abgestorben sind. Auf der gesamten Länge handelt es sich dabei um ca. 10 Bäume (eine Hagebuche, ca. neun Erlen), welche im Moment keine neuen Blätter mehr machen. Während der Begehung konnte ich mit verschiedenen Anwohnern sprechen. Die Bäume waren vor dem Unfall grün, weshalb mit ziemlicher Sicherheit gesagt werden kann, dass ein Zusammenhang zwischen dem Ereignis und dem heutigen Zustand der Bäume besteht. Einzelne kleinere Büsche sind ebenfalls abgestorben.

## 5. Empfehlung

Aus meiner Sicht besteht zum heutigen Zeitpunkt kein Handlungsbedarf. Die nun laublosen Bäume und Sträucher stellen zurzeit keine Gefahr für umliegende Sachwerte oder Personen dar. Auf Grund dessen, dass diese bis vor kurzem noch gesund waren, dürften diese noch stabil sein.

## 6. Weiteres Vorgehen

Der gesamte Bachlauf muss im April/ Mai 2018 ein weiteres Mal abgelaufen werden. Dabei wird wiederum die Baum- und Strauchvegetation optisch beurteilt. Bei dieser Begehung kann abschliessend beurteilt werden, ob und wenn ja, welche Bäume definitiv abgestorben sind.

Pratteln, 11.8.2017



Markus Eichenberger, Revierförster

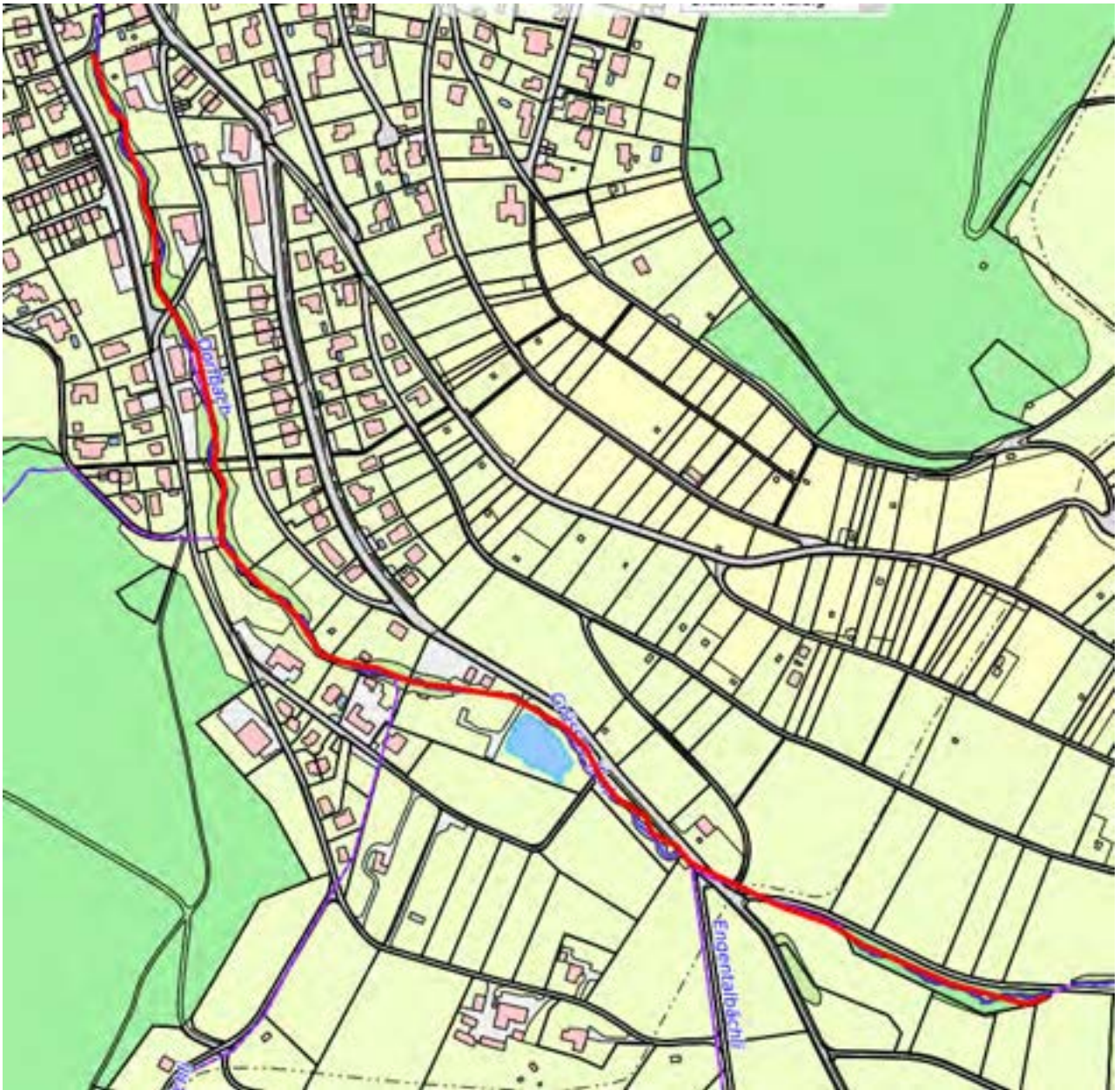


Bild: Rot eingezeichnet der untersuchte Bereich





Bild: Abgestorbene Hagebuche



Bild: Weide mit dürren Blättern- ein neuerlicher Laubaustrieb ist Ansatzweise erkennbar



Bild: Abgestorbene Erlen (Starker Effeubewuchs am Stamm hat keinen Einfluss auf Vitalität des Baumes)



Bild: Abgestorbene Erle im unteren Bereich des Perimeters

2718014.1

Muttenz, Aufarbeitung Sole-Austritt Sulzhof (Bohrloch S87)

**GEOTEST**

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

**Anhang 17: Sicherheitsdispositiv Hohlraumvermessung S87,  
Schweizer Salinen AG, 27.06.2017**

## Sulz S87 – Sicherheitsdispositiv Hohlraumvermessung

### Verteiler:

Saline: Dieter Rebmann, Gabor Fuchs, Michael Balke, Bohrbetrieb  
 Gemeinde Muttenz: Peter Holzherr  
 Kanton BL AUE: Adrian Auckenthaler, Dominik Bänninger

### Hintergrund:

Geplante Hohlraumvermessung der Kaverne S87 am 29.06.2017. Seit Soleaustritt am 13.06.2017 ist das Bohrloch verschlossen. Druck aktuell: 2.0 bar am Bohrlochkopf (27.06.2017 10:00 Uhr).

### Durchzuführende Arbeiten:

(Bedeutung Farbgebung siehe "Szenarien und Massnahmen")

#### Mittwoch, 28.06.2017

1	Druckkontrolle	
2	Bohrloch kontrolliert und langsam öffnen	ca. 08:00 Uhr
3	Probenahme Gasmessung (am Manometer)	
4	Kompletter Druckablass	
5	Demontage Bohrlochabschluss	
6	Einbau 4" Rohre für Vermessung	ca. 09:30 Uhr
7	Verschluss Bohrung mit Flansch (neu) mit Manometer und Kugelhahn (an DN200 Flansch). DN100 Flansch darüber als Abschluss (an 4" Rohr) ebenfalls mit Hahn	ca. 15:00 Uhr

#### Donnerstag, 29.06.2017

1	Druckkontrolle	
2	Bohrloch kontrolliert und langsam öffnen	ca. 07:00 Uhr
3	<i>Falls Druck vorhanden: kompletter Druckablass</i>	
4	Demontage Bohrlochabschluss DN100	
5	Montage "Messflansch"	ca. 07:30 Uhr
6	Durchführung Hohlraumvermessung	ca. 08:00 Uhr
7	Demontage "Messflansch"	
8	Verschluss Bohrung mit DN100 Flansch als Abschluss (an 4" Rohr) mit Hahn	ca. 13:30 Uhr

#### Montag, 03.07.2017

1	Druckkontrolle	
2	Bohrloch kontrolliert und langsam öffnen	ca. 08:00 Uhr
3	<i>Falls Druck vorhanden: kompletter Druckablass</i>	
4	Demontage Bohrlochabschluss	
5	Ausbau 4" Rohre	ca. 08:30 Uhr
6	Verschluss Bohrung Blindflansch (DN200) mit Manometer und Kugelhahn	ca. 11:00 Uhr

Szenarien und Massnahmen:

Szenario	Massnahme und Vorgehen	Reaktionszeit (bis Verschluss)
Soleaustritt beim Druckablassen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abbruch aller vorgesehenen Arbeiten</li> <li>- Bohrloch ist jederzeit wieder verschliessbar</li> </ul>	Ca. < 2 min
Druckaufbau und Soleaustritt bei offenem Bohrloch <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bohrgerät vor Ort</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Blindflansch mit Hebekappe (Montage Bohrgestänge) vor Ort bereitgestellt</li> <li>- Druck Bohrgerät mit bis zu 5 Tonnen</li> <li>- Verschluss durch Festschrauben Flansch</li> </ul>	Ca. 5 min
Druckaufbau und Soleaustritt beim Ein- und Ausbau 4" Rohre <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bohrgerät vor Ort</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestängestück (9 Meter) fertig ablassen und abfangen</li> <li>- Blindflansch mit Hebekappe (Montage Bohrgestänge) vor Ort bereitgestellt</li> <li>- Druck Bohrgerät mit bis zu 5 Tonnen</li> <li>- Verschluss durch Festschrauben Flansch</li> </ul>	Ca. 5-10 min
Druckaufbau und Soleaustritt während Messung <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Messwagen vor Ort</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Messung durch Flansch mit 11 mm Durchlass (und Schlitz) für Sondenkabel (9.2 mm Durchmesser) mit Gummi zur Abdichtung</li> <li>- Mögliche Austrittsrate begrenzt</li> <li>- Abpumpen der austretenden Sole</li> <li>- Kompletter Verschluss nach Druckablass und Ausbau Messsonde</li> </ul>	Ca. 1 h

Weitere sicherheitsrelevante Vorkehrungen:

Generell wird vor Ort vorgehalten:

- 2 Pumpen mit Förderleistung  $\geq 20$  m<sup>3</sup>/h (vorgängig Funktionstest) mit Schläuchen und passenden Kupplungen zum Abpumpen in Leitung Solereservoir und Produktion Saline (Kapazität:  $\geq 500$  m<sup>3</sup>). Strom ab Netz, Diesel-Aggregat vorhalten
- Sandsäcke

Arbeiten im Schacht

- Kontrolle Sauerstoffgehalt vorgängig mittels Oximeter
- Schachteinstieg mit Oximeter auf Mann (Ersatzgerät vor Ort)
- Belüftungseinrichtung Bohrschacht vor Ort

Zusätzliche Massnahmen:

- Druckkontrolle in S88
- Feuerwehr auf Abruf (Alarmierung über ELZ)

27.06.2017/Fu

Personal vor Ort:

**Mittwoch, 28.06.2017**

Saline: Bohrmannschaft 4 Personen; Micheal Balke; Gabor Fuchs (zeitweise)

**Donnerstag, 29.06.2017**

Saline: Bohrmannschaft 1 Person, Michael Balke  
SOCON: Messmannschaft 2 Personen

**Montag, 03.07.2017**

Saline: Bohrmannschaft 4 Personen; Michael Balke (zeitweise)

Bilder Bohrlochabschlüsse:



Flansch DN200, Rohrstück 4" und Blindflansch DN100 als Abschluss



Flansch DN100



Schlussstück "Messflansch"



---

**Bericht Nr. 2720047.3**

---

**Schweizer Salinen AG, Pratteln 1**

**Muttenz, Bohrfeldintegrität  
Sulz/Grosszinggibrunn, Phase I**

**Beschreibung der Tabelle zur Kavernenbeurteilung**

Münchenstein, 15. März 2021

GEOTEST AG  
FREILAGER-PLATZ 3  
CH-4142 MÜNCHENSTEIN  
T + 41 (0)61 205 87 50  
F + 41 (0)61 205 87 51  
basel@geotest.ch  
www.geotest.ch

2720047.3

Muttenz, Bohrfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn, Phase I  
Beschreibung der Tabelle zur Kavernenbeurteilung

GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

Autor(en)	Bearbeitete Themen / Fachbereiche
Tobias Brehm	Gesamter Bericht
Supervision	Visierte Inhalte
Florentin Ladner	Gesamter Bericht
Hinweise	

GEOTEST AG

Felix Bussmann

Tobias Brehm

## Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage .....	4
2.	Methodik .....	4
3.	Genereller Aufbau .....	5
3.1	Arbeitsblatt «Kavernenbeurteilung» .....	5
3.2	Arbeitsblatt «Kriterienbeschreibung» .....	8
3.3	Arbeitsblatt «_lib» .....	8

## Anhang

Anhang 1	Excel-Tabelle Kavernenbeurteilung
----------	-----------------------------------

## 1. Ausgangslage

Im Rahmen der Beurteilung der Stabilität und Integrität der Solfelder Grosszinggibrunn / Sulz wurde durch die *GEOTEST AG* eine Tabelle erstellt, in der jede einzelne Kaverne nach Prüfkriterien (= Grundannahmen der gebirgsmechanischen Auslegung in [1] & [2]) untersucht und qualitativ beurteilt wurde.

### Referenzen:

- [1] Gebirgsmechanische Auslegung des Solegewinnungsfeldes Grosszinggibrunn. Prof. Dr.-Ing. habil. R.B. Rokahr, 2005.
- [2] Gutachterliche Stellungnahme zum Bruchverhalten der Kavernen beim Überschreiten der Auslegungsdaten. IUB GmbH Institut für unterirdisches Bauen – Hannover, 2013.
- [3] Aktennotiz: Qualitative Beurteilung der Kavernenstabilität – Vorgehensvorschlag. GEOTEST AG, 3.2.2021.

## 2. Methodik

Folgende Vorgehensweise wurde zur qualitativen Beurteilung der Kavernenstabilität umgesetzt:

- 1) Für jede Kaverne in den Solfeldern Sulz und Grosszinggibrunn wird geprüft, ob die Prüfkriterien (=getroffenen Grundannahmen in [1] & [2]) eingehalten oder verletzt werden resp. ob Kenntnislücken vorhanden sind.
- 2) Die Abweichungen von den «Grundannahmen für die Auslegung» werden in einer Tabelle dokumentiert (siehe Tabelle im Anhang).
- 3) Die Abweichungen werden hinsichtlich der Auswirkungen auf die Kavernenstabilität qualitativ bewertet unter Verwendung folgender Farbkodierung:
  - a) **Grüne** Färbung bedeutet: Prüfkriterium wird nicht verletzt.
  - b) **Gelbe** Färbung bedeutet: Kenntnislücke oder Grenzwert erreicht
  - c) **Rote** Färbung bedeutet: Prüfkriterium wird verletzt
  - d) **Lila** Färbung: Prüfkriterium wird stark verletzt

Damit liegt eine erste qualitative Mit dieser Beurteilung ist es nun möglich die Kavernen bezüglich Handlungsbedarfes zu klassifizieren:

- a) Dringender Handlungsbedarf angezeigt.
- b) Handlungsbedarf angezeigt.
- c) Kein Handlungsbedarf.

Die Tabelle ist dieser Aktennotiz als Anhang beigefügt.

### 3. Genereller Aufbau

Die Excel-Tabelle besteht aus drei Arbeitsblättern. Dabei hat jedes Blatt eine spezifische Funktion (Tabelle 1). Die im Arbeitsblatt «Kavernenbeurteilung» verwendeten automatischen Farbkodierungen sind mit dem Arbeitsblatt «\_lib» verlinkt.

Die Verknüpfung der bedingten Formatierung des Arbeitsblatts «Kavernenbeurteilung» mit den definierten Grenzwerten innerhalb des Arbeitsblatts «\_lib» erlaubt es dem Nutzer, Rahmenbedingungen anzupassen und damit eine automatische Farbanpassung zu erzielen.

Tabelle 1: Auflistung aller Arbeitsblätter und deren Funktion.

Arbeitsblatt	Funktion
Kavernenbeurteilung	Beurteilung jeder einzelnen Kaverne auf Basis vordefinierter Kriterien
Kriterienbeschreibung	Auflistung der durch <i>GEOTEST</i> aufgestellten Prüfkriterien für die qualitative Beurteilung der Kavernenstabilität und -integrität.
_lib	Definition der Farbkriterien/Grenzwerte und die Inhalte der Dropdown-Menüs

Weiterhin sind im Arbeitsblatt «\_lib» die Inhalte für die einzelnen Dropdown-Menüs des Arbeitsblatts «Kavernenbeurteilung» definiert.

#### 3.1 Arbeitsblatt «Kavernenbeurteilung»

Das Arbeitsblatt «Kavernenbeurteilung» stellt das Kernstück der Datei dar und beinhaltet die Beurteilung jeder einzelnen Kaverne in Bezug auf die vorgängig definierten Kriterien (Tabelle 2). DAM steht dabei für das Dirk-Arndt-Modell – ein

3D-Modell, erstellt von Dirk Arndt (*GeoExplorers AG*), und in der Software Move visualisiert.

Tabelle 2: Auszug aller Prüfkriterien aus dem Arbeitsblatt "Kavernenbeurteilung" und deren Herleitung.

Prüfkriterium:	Beschreibung / Ursprung:
Mächtigkeit Ob. Sulfatzone [m]:	Daten aus Bohrprofilen entnommen. Ist die Zelle leer, ist entweder Top oder Basis der Ob. Sulfatzone nicht bekannt.
Mächtigkeit Ob. Sulfatzone, <b>vermutet</b> [m]:	vermutete Lage Top Ob. Sulfatzone, hergeleitet aus dem Schnittpunkt des DAMs mit dem Bohrlochverlauf; berechnet aus der Differenz der folgenden Zeilen
Top Obere Sulfatzone, <b>vermutet</b> :	Schnittpunkt Top Obere Sulfatzone aus dem DAM mit dem Bohrfeld (handgepickt in Move)
Basis Ob. Sulfatzone / Top Salzlager:	Top Salz aus den Bohrprofilen
Rohrschuh LZRT in Referenz zu DAM Top Salzlager [m]:	Höhendifferenz zwischen Rohrschuh (aus Bohrprofilen) und Top Salz aus dem DAM gepickt. positive Werte = unterhalb Top Salz negative Werte = oberhalb Top Salz innerhalb der Ob. Sulfatzone
Kaverne hat Rohrschuh LZRT erreicht:	qualitative Aussage aus dem Move-Modell
Minimale Mächtigkeit, Salzscheibe [m]:	Minimalwert ermittelt in GIS für Kavernenvermessungspunkte in Relation zum DAM
$K_0$ (Salzlager)	Seitendruckbeiwert, derzeit nicht ermittelt (Werte in Tabelle: Annahme aus Gebirgsspannungsmessungen in S156 auf der Rütihard)
$K_0$ (Ob. Sulfatzone)	Seitendruckbeiwert, derzeit nicht ermittelt (Werte in Tabelle: Annahme aus Gebirgsspannungsmessungen in S156 auf der Rütihard)
Kavernenform:	qualitative Beurteilung aus Profilschnitten im Move-Modell
Durchmesser, Kavernenhals [m]:	in Move-Profilschnitten abgemessen (breitester Punkt, oder nahe Rohrschuh falls dorthin verjüngend)
Durchmesser, Kaverne [m]:	in GIS ermittelter Punkt mit maximaler Entfernung zum Kavernenzentrum
Kavernenabstand, minimal [m]:	in GIS händisch ermittelte geringste Entfernung zur Nachbarkaverne
Kaverne in Relation zum Dimensionspuffer:	qualitative Aussage in GIS in Bezug auf Pufferkreis
Kaverne in Relation zum Abstandspuffer:	qualitative Aussage in GIS in Bezug auf Pufferkreis
Dimensionspuffer zu Nachbarkaverne(n):	qualitative Aussage in GIS in Bezug auf Pufferkreise
Abstandspuffer zu Nachbarkaverne(n):	qualitative Aussage in GIS in Bezug auf Pufferkreise
Kavernenverbindung, physisch:	qualitative Aussage in GIS in Bezug auf die maximalen Ausdehnungspolygone der Kavernen

Prüfkriterium:	Beschreibung / Ursprung:
Kavernenverbindung, hydraulisch:	Informationen aus der Aktennotiz von J. Pietsch (10.03.2020)
Verbindung zum Grundwasser:	Informationen aus der Aktennotiz von J. Pietsch (10.03.2020)
Trennflächen vorhanden:	qualitative Aussage auf Basis von Profilschnitten im Move-Modell zusammen mit DAM
Kavernendruck, Bohrlochkopf [bar]:	derzeit nicht gemessen; Drucksensoren sind jedoch an allen Bohrlöchern installiert und können abgelesen werden
Downhole Pressure am Rohrschuh [bar]:	berechnet aus Dichtemessungen des Projekts 2720030 und der Terratec anhand der freien Wassersäule über Rohrschuh und dem Dichtegradient (für safety margin immer aufgerundet)  ANNAHME: Bohrlochkopf NICHT unter Druck
gemessener GWSP [m.ü.M.]	gemessener GWSP aus Druckprofilmessungen Terratec (erster Messpunkt im Druckprofil) – umgerechnet in m ü. M.
gemessener GW-Pegel ab OK Schacht [m]	gemessener GWSP aus Druckprofilmessungen Terratec (erster Messpunkt im Druckprofil)
Senkung, prognostiziert [mm pro Jahr]:	derzeit nicht berücksichtigt; theoretische Senkungsberechnung auf Grund der gegebenen Kavernenform
Senkung, real [mm pro Jahr]:	derzeit nicht berücksichtigt; tatsächlich an der Oberfläche gemessene Senkungsrate (Rapp Nivellement)
Dichtheit, Bohrung:	qualitative Aussage aus Bohrlochlebensläufen
Dichtheit, Kaverne:	qualitative Aussage aus Bohrlochlebensläufen
Klassifizierung gemäss AN Druckprofile:	Einteilung der Bohrlochfüllung auf Basis der Druckprofilauswertung Geotest und Terratec Salzwasser = Profil verläuft entlang theoretischer Linie von Salzwasser (1.2 G) Mischwasser = Profil verläuft entlang theoretischer Linie für Frischwasser (1.0 G) Gaseinfluss = Profil verläuft unterhalb der theoretischen Linie von Frischwasser
Bemerkung:	weitere Anmerkungen, Beschreibungen, Hinweise, Unstimmigkeiten, etc.
Ampel:	qualitative Einschätzung und Einteilung in: grün = unkritischer Zustand gelb = grenzwertiger Zustand rot = kritischer Zustand

Handelt es sich nicht um Zahlenwerte, so sind die Zellen als Dropdown-Menüs konfiguriert. Dies stellt sicher, dass nur eine begrenzte Anzahl an Attributen eingefügt werden kann. Nur so bleibt die Tabelle übersichtlich, nachvollziehbar und kann mit automatisierten Farbkodierungen arbeiten. Die bedingten Formatierungen für die Farbänderung ist mit dem Arbeitsblatt «\_lib» verknüpft und sollte nur ausschliesslich dort geändert werden (siehe Kapitel 3.3).

### 3.2 Arbeitsblatt «Kriterienbeschreibung»

Zu Beginn des Arbeitspakets «Kavernenbeurteilung» wurden eine Reihe an Grundannahmen getroffen. Diese sind innerhalb des Arbeitsblattes zusammengefasst und deren Grenzwerte, sofern weiterhin gültig, in das Arbeitsblatt «\_lib» als Zahlenwerte übertragen worden. Weiterhin bildeten die einzelnen Themenbereiche den Grundstein für die später detaillierter ausgeführte Tabelle, wie unter Kapitel 3.1 beschrieben.

Für die weitere Ausführung der Beurteilung hat dieses Arbeitsblatt keine Funktion mehr.

### 3.3 Arbeitsblatt «\_lib»

Das Arbeitsblatt «\_lib» stellt die Bibliothek dar (Abb. 1). Hier sind alle unter 3.1 definierten Kriterien aufgelistet. Daneben stehen die Grundannahmen aus dem Arbeitsblatt «Kriterienbeschreibung». Anschliessend folgen die Farbkategorien und Wertedefinitionen. Die Werte innerhalb der Farbkategorien sind mit den Zahlen der Grundannahme verlinkt. Die Farbkategoriewerte sind wiederum mit der bedingten Formatierung des Arbeitsblattes «Kavernenbeurteilung» für jede einzelne Kategorie verknüpft. Ändert man also die Grundannahme in der Bibliothek, ändert sich automatisch die Farbzuzuweisung der einzelnen Kavernenbeurteilungen.

Die blau-weissen Tabellen rechts neben dem Abschnitt «Farbkategorie & Wertedefinition» beinhaltet die einzelnen Dropdown-Menüeinträge, ebenfalls für das Arbeitsblatt «Kavernenbeurteilung».



Abb. 1: Unterteilung des Arbeitsblatts "\_lib".



# **Zusammenfassende Bewertung der Expertenberichte Soleförderung Rütihard**

erstellt für:

Trägerschaft der Dialoggruppe zum Projekt Salzabbau auf der Rütihard

Erstellt durch:

Prof. Dr. Simon Löw

Jasmin Maissen

Professur für Ingenieurgeologie der ETH Zurich

19. Januar 2021



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1. Ausgangslage und Auftrag .....	1
1.2. Bearbeitung .....	1
1.3. Verwendete Unterlagen .....	2
1.3.1. Berichte der Schweizer Salinen AG .....	2
1.3.2. Allgemeine Literatur .....	3
<b>2 Geologische Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
2.1. Bedeutung des geologischen Modells für den Salzabbau.....	4
2.2. Geologische Verhältnisse auf der Rütihard.....	5
<b>3 Fundamentale Kriterien für die Bewertung der Umweltverträglichkeit .....</b>	<b>7</b>
3.1. Integrität der Kavernen während Betrieb und Verwahrung.....	7
3.2. Dichtheit der Produktionsbohrungen während Betrieb und Verwahrung .....	9
<b>4 Beurteilung der Integrität von Kavernen und Bohrungen.....</b>	<b>10</b>
4.1. Methoden und Vorgehen zur Beurteilung der Kavernen-Integrität .....	10
4.2. Gebirgsmechanische Modellrechnungen.....	12
4.3. Kavernenintegrität in Grosszinggibrunn .....	13
4.4. Dichtheit der Bohrungen in Grosszinggibrunn.....	15
<b>5 Risiken eines Salzabbaus auf der Rütihard .....</b>	<b>16</b>
5.1. Grundwässer in der Umgebung der Rütihard.....	16
5.2. Potenzielle Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse .....	18
5.3. Potenzielle Auswirkungen an der Geländeoberfläche.....	18
5.4. Massnahmen zur Risikominderung.....	19
<b>6 Schlussbemerkungen und Empfehlungen .....</b>	<b>20</b>

# 1 Einleitung

## 1.1. Ausgangslage und Auftrag

Die Absicht der Schweizer Salinen AG, auf der Rütihard Salz abzubauen, führte zu intensiven öffentlichen Diskussionen. Der Bürgerrat und der Gemeinderat der Einwohnergemeinde Muttenz stellten fest, dass die vorliegenden Informationen für eine sorgfältige Meinungsbildung nicht genügten. Sie starteten deshalb unter Einbezug der Schweizer Salinen AG ein breit geführtes Dialogverfahren. Mit dem Dialog wurde eine breit diskutierte und transparente Auslegeordnung von Nutzen und Risiken eines Salzabbaus auf der Rütihard sowie diesbezügliche Alternativen angestrebt. Die zahlreichen Fragen und Unsicherheiten in der komplexen Sachlage sollten geklärt und wo möglich ein gegenseitiges, allenfalls ein gemeinsames Verständnis entwickelt werden. Auf Basis dieser Grundlagen sollten sich später Bevölkerung, Politik und kommunale Behörden ihre Meinung bilden, ob sie einen Salzabbau auf der Rütihard unterstützen können oder nicht.

Acht Expertenberichte zum Salzabbau Rütihard, welche seit Sommer 2019 im Auftrag der Schweizer Salinen AG durch unterschiedliche Fachpersonen und Institutionen erarbeitet wurden, stellen eine zentrale Grundlage des Dialogverfahrens, der Baubewilligung und der Umweltverträglichkeitsprüfung zu Handen der Bau- und Umweltdirektion des Kantons Basel-Land dar. Die für einen Salzabbau auf der Rütihard zu beurteilenden geologischen, hydrogeologischen und geophysikalischen Sachverhalte sind sehr komplex. Deshalb benötigte die Dialoggruppe Rütihard einen unabhängigen Experten. Die Aufgaben dieses Experten wurden folgendermassen umschrieben:

- Der Experte begleitet das Dialogverfahren und steht den Beteiligten für Fachfragen in den Bereichen Geologie, Hydrogeologie, Geotechnik, Seismologie (Erdbeben) und Seismik zur Verfügung,
- Der Experte beurteilt die Vollständigkeit und Relevanz der Fragestellungen, welche von den Experten der Schweizer Salinen AG beantwortet werden sollen,
- Der Experte formuliert erforderlichenfalls zusätzliche Fragestellungen an die Experten der Schweizer Salinen AG,
- Der Experte führt Reviews sämtlicher Expertenberichte durch und prüft diese auf wissenschaftliche Vollständigkeit und Plausibilität.

Der unterzeichnende Experte wurde aufgrund des Entscheides der Dialoggruppe vom 29. August 2019 im Dezember 2019 von der Trägerschaft Dialoggruppe Rütihard<sup>1</sup> beauftragt, diese Aufgaben wahrzunehmen.

## 1.2. Bearbeitung

Im Zeitraum von Januar bis Juni 2020 erfolgte - trotz Einschränkungen durch die Corona Pandemie - die weitere Bearbeitung aller acht Expertenberichte im Auftrag der Schweizer Salinen AG, sowie die Überprüfung und Bewertung der ersten fünf Expertenberichte durch den unterzeichnenden Experten. Diese Überprüfung basierte neben dem Studium der vorgelegten Berichte auf einer detaillierten Analyse von

---

<sup>1</sup> Zusammengesetzt aus Einwohnergemeinde Muttenz, Bürgergemeinde Muttenz und der Schweizer Salinen AG

Primärdaten und -Berichten zum Salzabbau im Gebiet der Saline Schweizerhalle. Da das Bohrfeld Grosszinggibrunn heute in Betrieb steht und in einer geologisch vergleichbaren Situation wie die Rütihard liegt, wurden für eine Beurteilung der für die Rütihard geplanten Methoden und resultierenden Risiken auch Datensätze dieses Bohrfeldes analysiert und am 24. Juni 2020 vor Ort begutachtet. Der Trägerschaft wurden in dieser Periode die Resultate der Überprüfung der ersten fünf Expertenberichte zur Kenntnis gebracht.

Am 30. Juni wurden die Medien und die Dialoggruppe Rütihard darüber informiert, dass die Schweizer Salinen aus unternehmerischen Gründen den Entscheid getroffen hatten, das geplante Projekt zur Soleförderung unter der Rütihard per sofort zu sistieren und für mindestens 20 Jahre zurückzustellen. Am 11. August präsentierte der unterzeichnende Experte der Trägerschaft eine Zusammenfassung der dazumal vorliegenden Bewertungen der Expertenberichte sowie seine ersten Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Die Trägerschaft hat im Anschluss an diese Sitzung entschieden, diese Bewertungen, Schlussfolgerungen und Empfehlungen in einem Schlussbericht zu dokumentieren und zu veröffentlichen.

### **1.3. Verwendete Unterlagen**

#### **1.3.1. Berichte der Schweizer Salinen AG**

Die verwendeten Unterlagen für die vorliegende zusammenfassende Bewertung der geologischen Risiken und Chancen eines Salzabbaus auf der Rütihard beinhalten die Expertenberichte, welche durch Auftragnehmer der Schweizer Salinen AG für das Projekt Soleförderung auf der Rütihard erstellt wurden. Die nachfolgend gelisteten Expertenberichte 1 bis 5 wurden für die vorliegende Bewertung im Detail geprüft, die Expertenberichte 6 bis 8 wurden gesichtet, aber nicht im Detail geprüft:

1. ExB-1 Bau und technischer Betrieb Soleförderung, DEEP.KBB GmbH, 15.11.2019
2. ExB-2 Regionale Geologie, GEOTEST. Zollikofen, 20. November 2019.
3. ExB-3 Hydrogeologie, GEOTEST. Zollikofen, 22. April 2020.
4. ExB-4 Gebirgsmechanische Bewertung, Institut für Gebirgsmechanik IUB GmbH, 22.10.2019
5. ExB-5 Seismizität, GEOTEST. Zollikofen, 28. Januar 2020.
6. ExB-6 Senkungen und Bergschäden, GEOTEST, 15. Juni 2020.
7. ExB-7 Hanginstabilität / Naturgefahren, GEOTEST, Zollikofen, 01. Mai 2020.
8. ExB-8 Geologische Schadensfälle im Zusammenhang mit Eingriffen in den Untergrund im Grossraum Basel, GEOTEST. Zollikofen, 20. Februar 2020.

Wichtig für den vorliegenden Bericht sind zudem eine große Anzahl weiterer technischer Detailberichte, welche dem unterzeichnenden Experten als vertrauliche Dokumente von der Schweizer Salinen AG zur Verfügung gestellt worden sind:

9. 29 technische Detail-Berichte der Schweizer Salinen AG (vertraulich, nicht zitiert)
10. 15 Bohrberichte (vertraulich, nicht zitiert)
11. 5 umfangreiche Datensätze zur Soleförderung und Überwachung des Kavernenfeldes von Grosszinggibrunn (vertraulich, nicht zitiert)

### 1.3.2. Allgemeine Literatur

Allgemein zugängliche Literatur wurde für diese Bewertung ebenfalls verwendet. Es wurden internationale Literatur zur Salzförderung und allgemeine Grundlagen zur lokalen Geologie, Seismizität und Hydrogeologie, insbesondere hydrogeologischen Berichten der Universität Basel, welche im Auftrag des Kantons und der Gemeinde Muttenz erstellt worden sind beigezogen. In diesem Schlussbericht zitiert sind:

1. Huggenberger P., Affolter A., Zechner E., Dresmann H. (2009) Stationär kalibriertes Grundwassermodell Muttenz unteres Birstal. Bericht Geologisches Institut Universität Basel, Baugrundarchiv Basel Muttenz-187, pp. 31.
2. Voegeli, S. (2017) Salt Cavern Failure and Sinkhole development. KDHE Geology & Well Technology Section Fall Seminar, August 29 th & 30 th , 2017

## 2 Geologische Grundlagen

### 2.1. Bedeutung des geologischen Modells für den Salzabbau

Der Bericht ExB-1 diskutiert in sehr ausführlicher und vollständiger Art und Weise den Stand der Technik für Planung, Bau, Betrieb und Verwahrung von Salzförderkavernen. Der Bericht ExB-1 ist wissenschaftlich und technisch von sehr hoher Qualität. Da in der Schweiz keine behördlichen Vorgaben zu Bau und Betrieb von Kavernen vorliegen und auch keine Bergbaubehörde existiert, nimmt der Bericht ExB-1 Bezug auf Deutsche Regelwerke für Tiefbohrungen und Bergbautätigkeiten<sup>2</sup>. In Abbildung 1 werden die Aktivitäten dargestellt, welche nach heutigem Stand der Technik vor, während und anschließend an die Realisierung eines neuen Kavernenfeldes für die Soleförderung durchgeführt werden (aus ExB-1). Am Anfang der Planung eines neuen Kavernenfeldes stehen die Definition der Projektanforderungen und die Erarbeitung des geologischen Modells. Dieses Modell stellt eine belastbare Beschreibung des lokalen geologischen Untergrundes dar, welche auf Bohrungen, Literaturstudien und geophysikalischen Messungen an der Oberfläche, insbesondere seismischen Messungen, basiert. Anschliessend an die Erarbeitung dieses geologischen Modells erfolgen gebirgsmechanische Untersuchungen zur Auslegung des Kavernenfeldes (Kavernendimensionen und Abstände) und zur Festlegung der Betriebsbedingungen (insb. Sole- und Gasdrucke) während der Soleförderung. Diese gebirgsmechanischen Untersuchungen beinhalten in erster Linie Computersimulationen der langfristigen Stabilität und Verformungen der Kavernen und des umgebenden Gebirges. Diese Berechnungen sollten auf dem lokalen geologischen Modell und repräsentativen felsmechanischen Kennwerten beruhen, und anschliessend mit Langzeitmessungen des tatsächlichen Verhaltens verglichen und kalibriert werden. Solche während und nach dem Solebetrieb

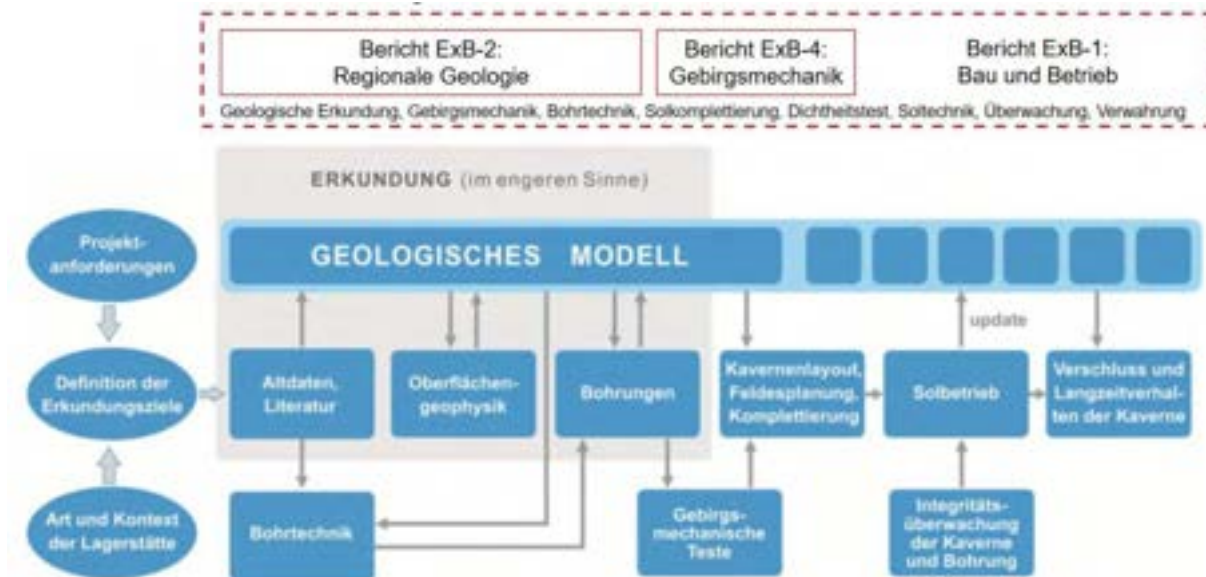


Abbildung 1. Aktivitäten im Lebenszyklus einer Salzkaverne (aus ExB-1, ergänzt)

<sup>2</sup> 1. Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen (Tiefbohrverordnung -BVOT-). 2006.

2. Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. Technische Regel Bohrungsintegrität. Hannover : s.n., 2017.

3. Oberbergamt in Clausthal-Zellerfeld. Richtlinien über das Verfüllen auflässiger Bohrungen. 1998.

laufenden gebirgsmechanischen Untersuchungen (Integritätsüberwachung in Abbildung 1) beinhalten jährliche Setzungsmessungen an der Oberfläche, Hohlraumvermessungen der Kavernen, einen Vergleich der geförderten Salzmenge mit der Hohlraumentwicklung der Kavernen, und Tests zur Dichtheit der Sohleförderbohrungen. Anschließend an den Betrieb werden die Bohrungen und Kavernen basierend auf einem Verwahrungskonzept verschlossen, welches garantieren muss, dass die Kavernen und Bohrungen auch für lange Zeiträume (mindestens hunderte von Jahren) stabil und dicht bleiben und dadurch keine negativen Einflüsse auf die Umwelt haben können. Abbildung 1 zeigt zusätzlich die Rolle der Expertenberichte 1, 2 und 4 in diesem Lebenszyklus eines Kavernenfeldes. In diesem Diagramm der Abbildung 1 nicht dargestellt sind die Expertenberichte zum Thema Grundwasser, Setzungen, Seismizität, Hanginstabilität und Schadensfälle. Diese Berichte sind spezifisch für das Projekt Rütihard erstellt worden, aufgrund der Bedürfnisse der Dialoggruppe und der gesetzlich vorgeschriebenen Umweltverträglichkeitsprüfung.

## 2.2. Geologische Verhältnisse auf der Rütihard

Im Bericht ExB-2 werden die regionalen geologischen Verhältnisse umfassend, die lokalen geologischen Verhältnisse auf der Rütihard aber nur punktuell beschrieben. Aufgrund der Zeitplanung im Dialogverfahren beinhaltet der Bericht ExB-2 nur die Resultate der ersten neuen Erkundungsbohrung auf der Rütihard (Bohrung S157). Unter Berücksichtigung der mittlerweile vorliegenden Resultate der zweiten neuen Erkundungsbohrung S156 ergeben sich die folgenden Kernaussagen:

- Das Salzlager der Rütihard befindet sich im Kern oder Nordschenkel des sogenannten Adlerhofgewölbes.
- Die Struktur oberhalb des Salzlagers ist komplex; die Basis des Salzlagers verläuft weitgehend ungefalt.
- In 6 von 7 Bohrungen auf der Rütihard bewegt sich die Mächtigkeit des Salzlagers zwischen 18 und 65 m und bildet eine ausreichende und relativ homogene Lagerstätte (Bohrung S94 ist ohne Salzlager). Die Bohrungen geben einen guten Eindruck der lokalen Schichtabfolge.
- Das strukturgeologische Wissen im Bereich der Rütihard ist erst in groben Zügen bekannt. Bis anhin wurden nur die Bohrungen S157 und S156 strukturgeologisch ausgewertet, mit überraschenden Resultaten hinsichtlich der Komplexität der lokalen geologischen Verhältnisse.
- Im Bereich der Rütihard ist das räumliche Verständnis zu Vorkommen und Verlauf von möglichen Bruchsystemen und der Achse des Adlerhofgewölbes noch lückenhaft.

Die Bohrungen S157 und S156 weisen auf eine kompliziertere geologische Struktur im Untergrund der Rütihard mit mehreren grösseren Bruchzonen hin. Die ursprünglich geplanten seismischen Messungen (und weitere Bohrungen) auf dem Gebiet der Rütihard würden zu einer substantiellen Verbesserung der Kenntnisse der geologischen Strukturen im Untergrund der Rütihard führen.

Ein schematisches geologisches Profil gemäss den Vorstellungen des unterzeichnenden Experten ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Adlerhofgewölbe verläuft u.U. nicht parallel zur Rütihard und weicht gegen SW ab. Dadurch kommt ein Teil der Rütihard möglicherweise in einen ruhiger aufgebauten Nordschenkel zu liegen. Die Schichtabfolge besteht aus (1) dem Salzlager, (2) der oberen Sulfatzone und dem



darüberliegenden Anhydrit-Dolomit, (3) gefolgt vom Muschelkalk Aquifer der Schinznach-Formation, welcher (4) vom quellbaren Gipskeuper und (5) den quartären Lockergesteinen (Deckenschotter und Löss) überdeckt ist. Wie auch in ExB-1 ausgeführt, ist die Kenntnis der Struktur der Salzsichten in einem geplanten Kavernenfeld für die Planung und Auslegung der Kavernen von grosser Bedeutung, da die Dichtheit der Kavernen nur gewährleistet werden kann, wenn immer genügend dichtes Salz um die Kavernen herum erhalten bleibt. Dies setzt eine genaue Kenntnis der Salzränder und Einschaltungen fremder Gesteine voraus. Es ist aus anderen Gebieten bekannt, dass Kavernen, welche ungenügende Salzmächtigkeiten in der Firste oder den Paramenten aufweisen, nicht mehr dicht sind.

Die Stabilität der Kavernen hängt insbesondere von der Struktur und der Mächtigkeit des Deckgebirges (Obere Sulfatzone, Dolomitzone, Schinznach Formation) ab. Je komplizierter die geologischen Strukturen im Deckgebirge sind, umso schwieriger wird die Ausführung und der Nachweis von langfristig stabilen Kavernen. Die heutigen geologischen Kenntnisse zum Untergrund der Rütihard genügen darum nicht für eine Bewertung potenzieller Umweltauswirkungen und die Kavernenauslegung.

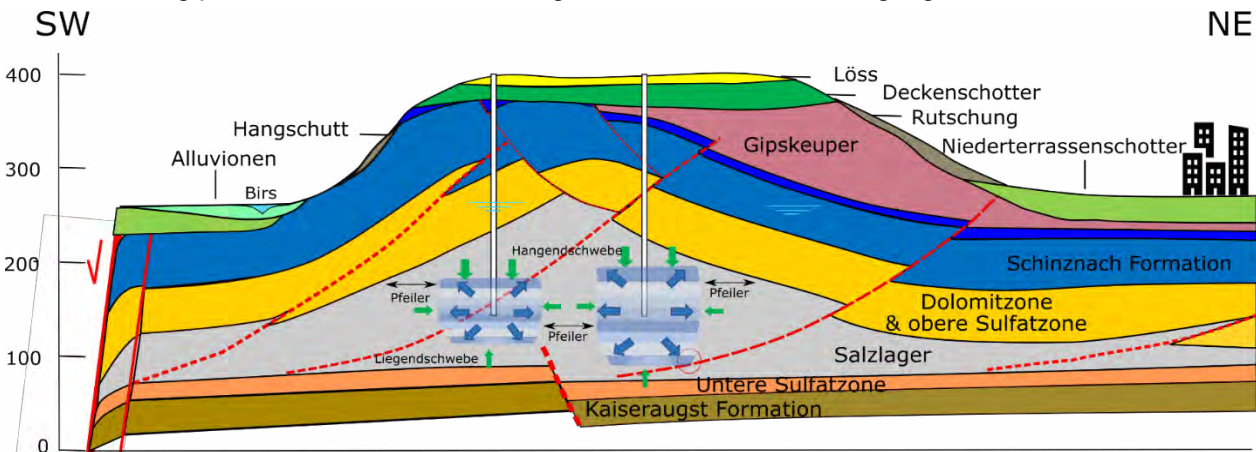


Abbildung 2. Hypothetisches geologisches Modell durch die Rütihard bei Bohrung S157 mit variablen Mächtigkeiten des Salzlagers in einem mit Brüchen durchzogenen Deckgebirge im Adlerhofgewölbe<sup>3</sup>. Das Adlerhofgewölbe verläuft u.U. nicht parallel zur Rütihard und weicht gegen SW ab.

<sup>3</sup> Gründe für die Komplexität der Geometrie des Salzlagers sind (1) unterschiedliche erbohrte Salzmächtigkeiten, (2) mechanisches Verhalten der verschiedenen Lithologien (Salz ist die schwächste Einheit), (3) Strukturmessungen im Salzlager und der Oberen Sulfatzone in den Bohrungen S157/S156, (4) Hinweise auf kompressive Bruchstrukturen im Adlerhofgewölbe aus Feldkartierung, Bohrkernanalysen S157/S156, und Spannungsmessungen, (5) mächtigere Bruchstrukturen im Deckgebirge in den Bohrungen S157/S156.

### 3 Fundamentale Kriterien für die Bewertung der Umweltverträglichkeit

#### 3.1. Integrität der Kavernen während Betrieb und Verwahrung

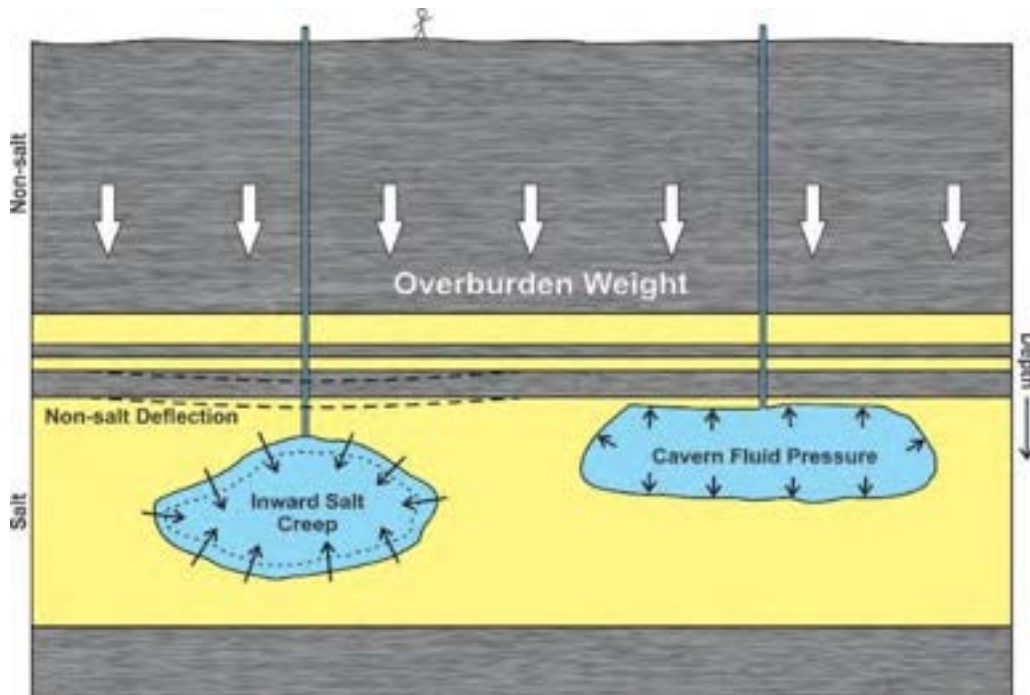


Abbildung 3. Schematischer Schnitt durch den Untergrund eines stabilen Kavernenfeldes (blau = Salzkaverne, gelb = Salzschicht, grau = Deckgebirge (Voegeli 2017))

In Abbildung 3 ist eine mögliche Solekaverne in Salzschichten (gelb) und darüberliegende Deckschichten (grau) schematisch für einfache geologische Verhältnisse dargestellt. Wesentlich für die Beurteilung der Umweltauswirkungen eines Kavernenfeldes ist die Integrität, also die Dichtheit und Stabilität der Kavernen während dem Betrieb und der Verwahrung. Dichtheit bedeutet, dass keine Sole oder Betriebsgas in das Nebengestein oder Deckgebirge entweicht (beide stehen während Betrieb und Verwahrung unter erhöhten Drucken). Stabil bedeutet, dass sich das Salz um die Kavernen zwar bruchlos verformen (kriechen) kann und eine Volumenkonvergenz eintritt (Abbildung 3), aber die Deckschichten über diesen Kavernen ihre Tragwirkungen langfristig gewährleisten können, d.h., dass diese stabil bleiben und nicht teilweise oder vollständig in die Kavernen einbrechen. Wenn eine Kaverne nicht stabil ist, kann in einem ersten Stadium eine relativ dünne Gesteinsschicht einbrechen, die sich dann in Form einzelner Blöcke am Kavernenboden ablagert (A in 4). Es kann sich dadurch eine neue Kavernengeometrie einstellen, die einen stabilen Zustand erreicht. Es ist aber auch möglich, dass sich diese Bruchprozesse weiter in den Deckschichten fortpflanzen, die Kaverne vollständig einstürzt, und mit den Trümmern aus dem eingestürzten Dach der Kaverne gefüllt wird (B in Abbildung 4). Dies ist das für die Experten der Schweizer Salinen AG wahrscheinlichste Szenario für instabile Kavernen. Das ungünstigste Versagensszenario ist ein Fortpflanzen der Brüche bis zur Geländeoberfläche mit einer Bildung eines Einsturztrichters oder Tagbruchs (C in Abbildung 4). In einem wenig besiedelten Raum sind Senkgruben mit geringem Versatz an sich keine dramatische Umweltauswirkung. Welches Szenarium sich einstellen wird, ist nicht immer klar und Brüche und

Bruchschlote können nicht nur spontan, sondern auch um viele Jahre zeitlich verzögert erfolgen. Dies zeigen auch die Bruchschlote im Gebiet der Saline von Riburg.

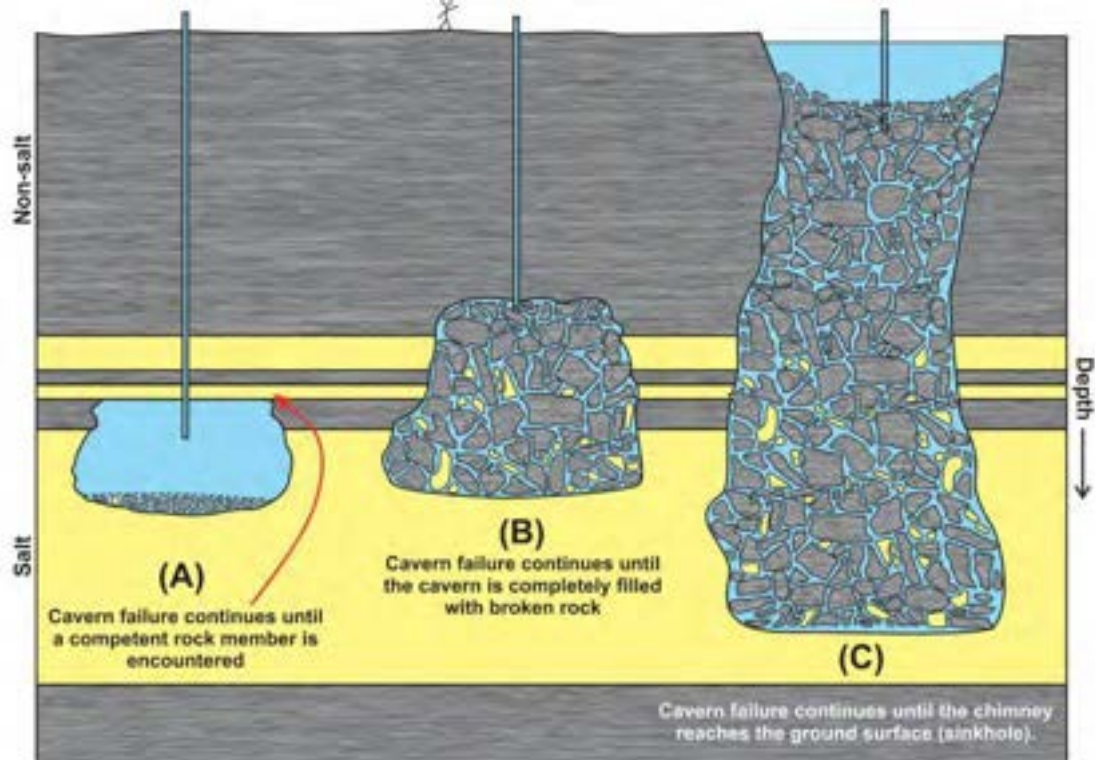


Abbildung 4. Instabile Kaverne mit Verbrüchen. Der Verbruch im Untergrund dauert an bis: **(A)** der Bruchschlot kompetentes (tragfähiges) Gestein erreicht. **(B)** die Kaverne und der Bruchschlot sich vollständig mit gebrochenem Gestein gefüllt haben. **(C)** der Bruchschlot die Oberfläche erreicht, was zu einer Senkgrube (Tagbruch) führt. Die Entwicklung von Bruchschloten kann spontan oder verzögert erfolgen (Voegeli 2017)

### 3.2. Dichtheit der Produktionsbohrungen während Betrieb und Verwahrung

Das zweite zentrale Kriterium für die Langzeitsicherheit und die Bewertung der Umweltauswirkungen ist die Dichtheit der Bohrungen. In Abbildung 5 ist ein Schema der geplanten Produktionsbohrungen auf der Rütihard dargestellt. Im Bohrschema ist zu sehen, dass die Bohrung im unteren Teil für die Erstellung der Kavernen offen ist. Die anderen Teile der Bohrung sind durch mehrfache einzementierte Stahl-Verrohrungen von den umgebenden geologischen Schichten getrennt. Es ist wichtig, dass keine Sole oder Gase aus der Kaverne in eine überliegende Schicht oder bis and die Oberfläche zirkulieren können.

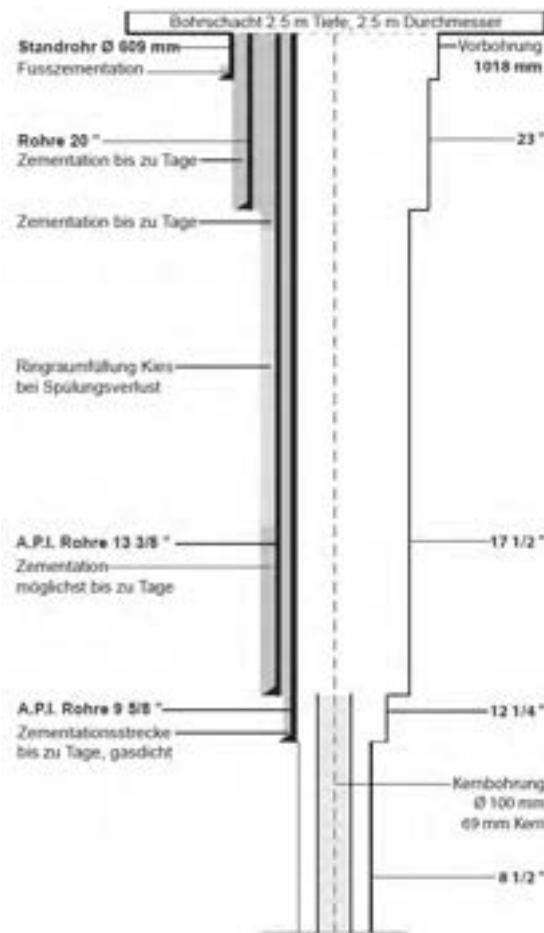


Abbildung 5. Bohrschema Produktionsbohrung Rütihard (ExB-1)

In den folgenden Kapiteln 4 und 5 wird die Integrität von Kavernen und Dichtheit von Bohrungen im Adlerhofgewölbe im Detail erläutert und diskutiert, basierend auf den Expertenberichten der Schweizer Salinen AG und bisheriger Erfahrungen im Kavernenfeld Grosszinggibrunn.

## 4 Beurteilung der Integrität von Kavernen und Bohrungen

### 4.1. Methoden und Vorgehen zur Beurteilung der Kavernen-Integrität

In Abbildung 6 sind alle Elemente (oder Indikatoren) dargestellt, welche heute zur Beurteilung der Stabilität von Untertagehöhlräumen wie Salzkavernen zur Verfügung stehen. Das wichtigste Element für die Bewertung der Stabilität von Soleförderkavernen sind gebirgsmechanische Modellrechnungen. Solche Modellrechnungen werden heute auch systematisch für andere Untertagebauwerke, wie zum Beispiel Kavernen im Wasserkraftbau, angewendet. Gebirgsmechanische Modellrechnungen benötigen als Grundlage ein lokales geologisches und felsmechanisches Modell des Untergrundes, sowie Materialkennwerte. Es ist wichtig, dass die Modellrechnungen mittels messtechnischer Kontrollen, d.h. Messungen der tatsächlichen Kavernengeometrie, der Hohlraumverformungen und der Senkungen der Oberfläche kalibriert und überprüft werden. Zudem wichtig bei der Entwicklung und Überprüfung der Modelle ist die Analyse von Schadensfällen durch sogenannte Rückrechnungen. Einbrüche bis zur Geländeoberfläche fanden bisher ausschliesslich im Gebiet von Riburg, in der Nähe von alten Kavernen statt. Diese wurden meistens mit einem heute nicht mehr angewendeten Soleverfahren (Laugung ohne Blanket<sup>4</sup>) erstellt, liegen aber in einem Gebiet mit relativ einfachen geologischen Verhältnissen (ohne Faltenstrukturen).

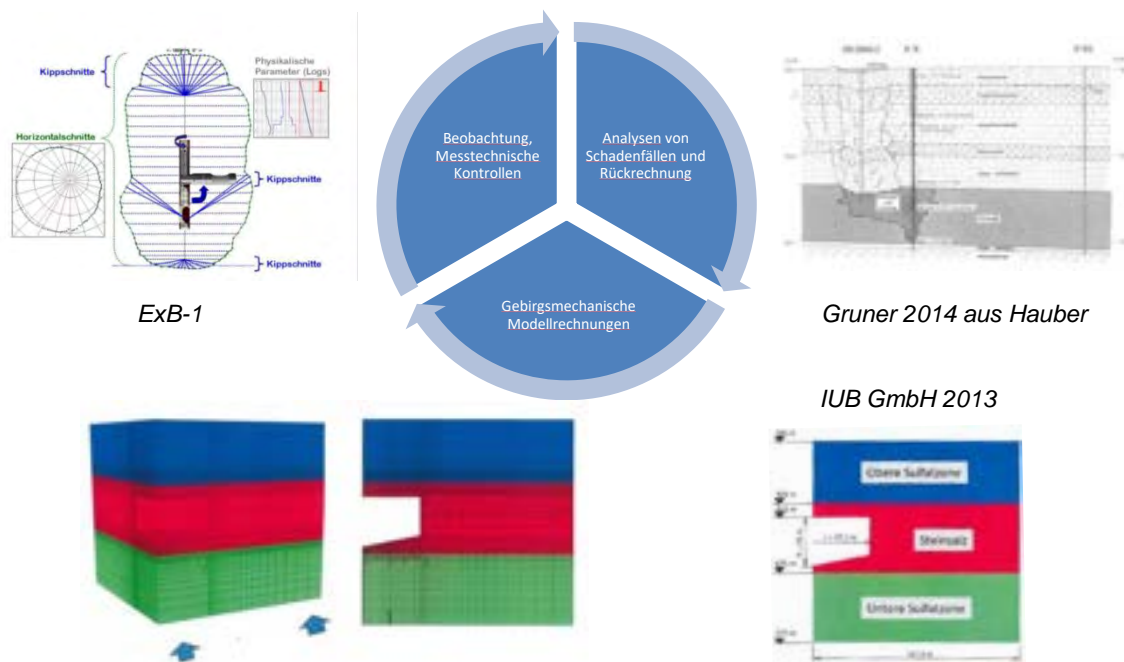


Abbildung 6. Elemente der Beurteilung einer Stabilität einer Solekaverne. Im gebirgsmechanischen Modell (Figur unten) wird aus Gründen der zylindrischen Geometrie nur  $\frac{1}{4}$  der Kavernengeometrie nachgebildet

<sup>4</sup> Um das Lösen des Salzes im oberen Bereich und somit auch die Ausdehnung der Kaverne nach oben zu kontrollieren, wird in das Dach der Kaverne ein Spermedium eingebracht, auch Blanket genannt. Als Spermedium eignen sich entweder Gase oder Flüssigkeiten, die das Salz nicht lösen, nicht mit Wasser mischbar sind und eine geringere Dichte als Wasser haben (aus ExB-1).

Mit Modellrechnungen werden für die lokalen geologischen Verhältnisse die Geometrie von stabilen Kavernen, die Auslegung der Kavernenfelder und die Betriebsdrucke ermittelt. Die Solekavernen haben im Idealfall eine Zylinderform mit einem trichterförmigen Sumpf<sup>5</sup> (Abbildung 6) und werden in hexagonalen Feldern angeordnet (Abbildung 7). In den gebirgsmechanischen Modellrechnungen werden der stabile Durchmesser (d in Abbildung 7), die Kavernenhöhe, die Mächtigkeit der Hangend- und Liegendschwabe (Abbildung 2) sowie die Abstände zwischen Kavernen (A in Abbildung 7), respektive die notwendige Breite der stützenden Pfeiler (B in Abbildung 7) ermittelt. Da die Stabilität und Dichtheit der Kavernen auch abhängig ist von den Wasser-, Sole- und Blanket-Drucken innerhalb der Kaverne, werden mit diesen Modellrechnungen auch die notwendigen Betriebsdrucke ermittelt. Es ist wichtig, dass diese Berechnungen auf lokalen Daten beruhen, und die lokale Geologie, Spannungen, Bruchstrukturen und felsmechanischen

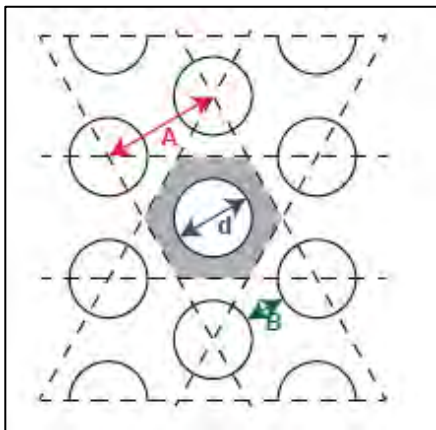


Abbildung 7. Geometrie eines hexagonalen Kavernenfeldes (Gruner 2014)

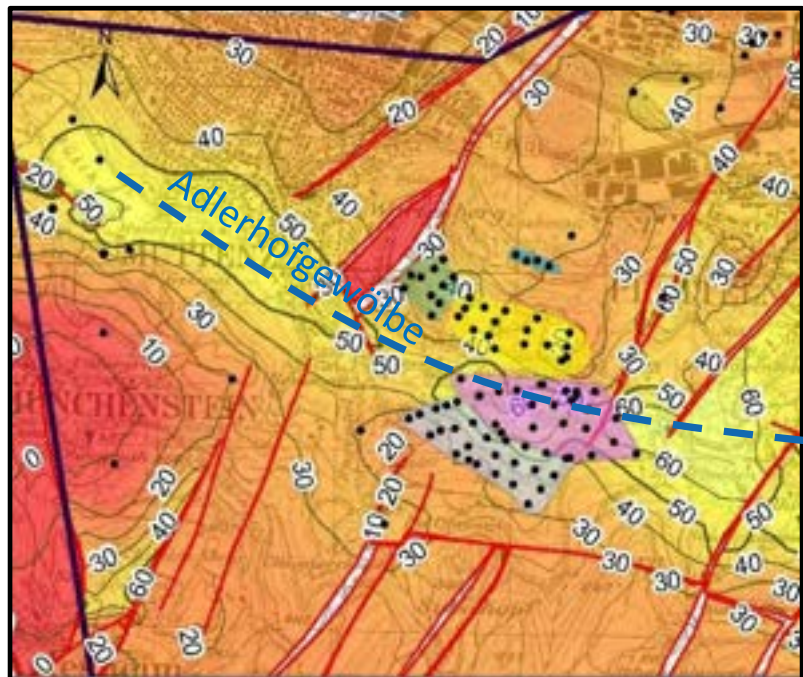


Abbildung 8. Ungefährer Verlauf des Adlerhofgewölbes und interpolierte Salzmächtigkeiten von 0 m (rot) bis 60 m (gelb) im Gebiet MuttENZ/Münchenstein/Pratteln (Schweizer Salinen AG). Bisherige Bohrfelder Sulz (grau), Grosszinggibrunn (lila), Zinggibrunn (gelb) und Wartenberg (grün)

Eigenschaften der einzelnen Schichten berücksichtigen. Für die Rütihard liegen bisher keine gebirgsmechanischen Modellrechnungen, sondern nur Plausibilitätsbetrachtungen vor (ExB-1, ExB-4). Die heutige Auslegung des Kavernenfeldes der Rütihard basiert auf dem Kavernenfeld von Grosszinggibrunn. In der Karte der Salzmächtigkeiten im Gebiet MuttENZ-Münchenstein-Pratteln sind die bisherigen Bohrungen auf der Rütihard und in den Kavernenfeldern Grosszinggibrunn, Sulz, Zinggibrunn, Wartenberg und Lachmatt zu sehen (Abbildung 7). Sowohl die Rütihard, wie auch das Kavernenfeld Grosszinggibrunn liegen in der gleichen Faltenstruktur, dem sogenannten Adlerhofgewölbe (blau gestrichelte Linie in Abbildung 7). Auch wenn es heute keine detaillierten geologischen Untersuchungen gibt, weder im Gebiet

<sup>5</sup> Feststoffe im Salzgestein, die sich nicht im Wasser lösen, setzen sich im unteren Bereich der Kaverne als „Sumpf“ ab.

der Rütihard noch in Grosszingbrunn, kann man grundsätzlich davon ausgehen, dass die geologische Situation in den beiden Gebieten ähnlich ist. Die bestehenden gebirgsmechanischen Modellrechnungen werden in den Expertenberichten (ExB-1 und ExB-2) auf die Rütihard übertragen und darum im Folgenden diskutiert. Grosszinggibrunn stellt seit dem Jahr 2006 das aktuelle Sohleförderungsfeld der Saline Schweizerhalle dar.

## 4.2. Gebirgsmechanische Modellrechnungen

In den letzten und heute gültigen gebirgsmechanischen Modellrechnungen für Grosszinggibrunn (IUB, 2013) werden sehr einfache geologische Lagerungsverhältnisse angenommen (Abbildung 6 unten), bestehend aus horizontal gelagerten, konstant mächtigen Schichten der unteren Sulfatzone, dem Salzlager und der oberen Sulfatzone. Die Materialkennwerte wurden an Bohrkernproben von Grosszinggibrunn hergeleitet und berücksichtigen nur intakte Proben (keine natürlichen Bruchstrukturen). Mit diesem Modell wurden verschiedene Szenarien analysiert, insbesondere Kavernen mit unterschiedlichen Durchmessern (von 75–100m), unterschiedlichen Höhen (35–60m) und unterschiedlichen Schwebemächtigkeiten. Schliesslich wurden auch Stabilitäts-Berechnungen für ein Kavernenfeld mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Kavernen und unterschiedlichen Betriebsdrücken durchgeführt. Die Modellrechnung von IUB aus dem Jahr 2013 zeigen:

- Bei Verlust eines stützenden Innendruckes (atmosphärischer Druck) ist ein schlotartiger Kollaps innerhalb weniger Monate zu erwarten. Allerdings ist im Gebiet von Grosszinggibrunn ein derartiges Szenario sehr unwahrscheinlich, da die Kavernen in der Regel unter dem Grundwasserspiegel liegen und eine luftgefüllte Kaverne in dieser Tiefe kaum denkbar ist.
- Für sehr einfache geologische Verhältnisse und unter der Annahme eines konstanten Innendruckes ist ein Versagen der Tragfähigkeit der Kavernen bei einem Durchmesser von 100 m (oder mehr) oder bei einer Salzscheibe von 5 m (und weniger) nach einer Standzeit von 5–20 Jahren zu erwarten. Es ist darum notwendig, eine ausreichend dicke Salzscheibe zu belassen und den Durchmesser der Kavernen auf 75 m zu begrenzen.

Es bestehen heute keine Modellrechnungen für Zeiträume nach einer Betriebsphase von 10–20 Jahren. Für die anschliessende Verwahrung von mindestens mehreren 100 Jahren fehlen ein standortspezifisches technisches Konzept und der Nachweis der Integrität der Kavernen. Dieser Nachweis sollte mit Modellen erfolgen, welche validiert und geeicht sind und die reale Gebirgsstruktur bis zur Oberfläche abbilden. Wie auch in ExB-4 erläutert, entsprechen die heute vorliegenden Modellrechnungen nicht diesen Anforderungen.

Die Modellresultate von IUB (2013) erscheinen grundsätzlich plausibel, wenn sie mit den heute vorliegenden Beobachtungen im Kavernenfeld Grosszinggibrunn und Sulz verglichen werden (Kapitel 4.3). Es ist heute aber nicht abzuschätzen, welche Auswirkungen die nachweislich vorhandenen Abweichungen der lokalen Geologie von den stark vereinfachenden geologischen Modellannahmen haben. Wichtige Faktoren, welche vermutlich die Stabilität der Kavernen beeinflussen sind (1) Unregelmässigkeiten in der Mächtigkeit des Salzlagers und der Hangendscheibe, (2) Deckschichten welche tektonisch gefaltet oder/und durch Brüche versetzt und geschwächt sind, (3) natürliche Lösungs- und Verkarstungserscheinungen, (4) vom Modell abweichende Gebirgsspannungen.

### 4.3. Kavernenintegrität in Grosszinggibrunn

Die einzelnen Soleförderbohrungen in Grosszinggibrunn sind die modernsten aktiven Bohrungen der Soleförderung der Schweizer Salinen AG. Weil die geologische Situation in den Gebieten Rütihard und Grosszinggibrunn ähnlich ist und in letzterem moderne Fördermethoden angewendet werden, können aus Beobachtungen von Grosszinggibrunn auch Rückschlüsse über die Stabilität und Integrität der Kavernen auf der Rütihard abgeleitet werden. In Abbildung 9 sind die einzelnen Kavernenfelder, Produktionsbohrungen und Sondierbohrungen dargestellt (Stand 14.1.2021). Heute (September 2020) sind von 17 Produktionsbohrungen in Grosszinggibrunn vier Bohrungen in Reparatur: S136 (vermutlich undichte Zementation des Rohrschuhs), S141, S142, S147 (vermutlich Verbindung zu alten Bohrungen im Bohrfeld Sulz; in Abklärung).

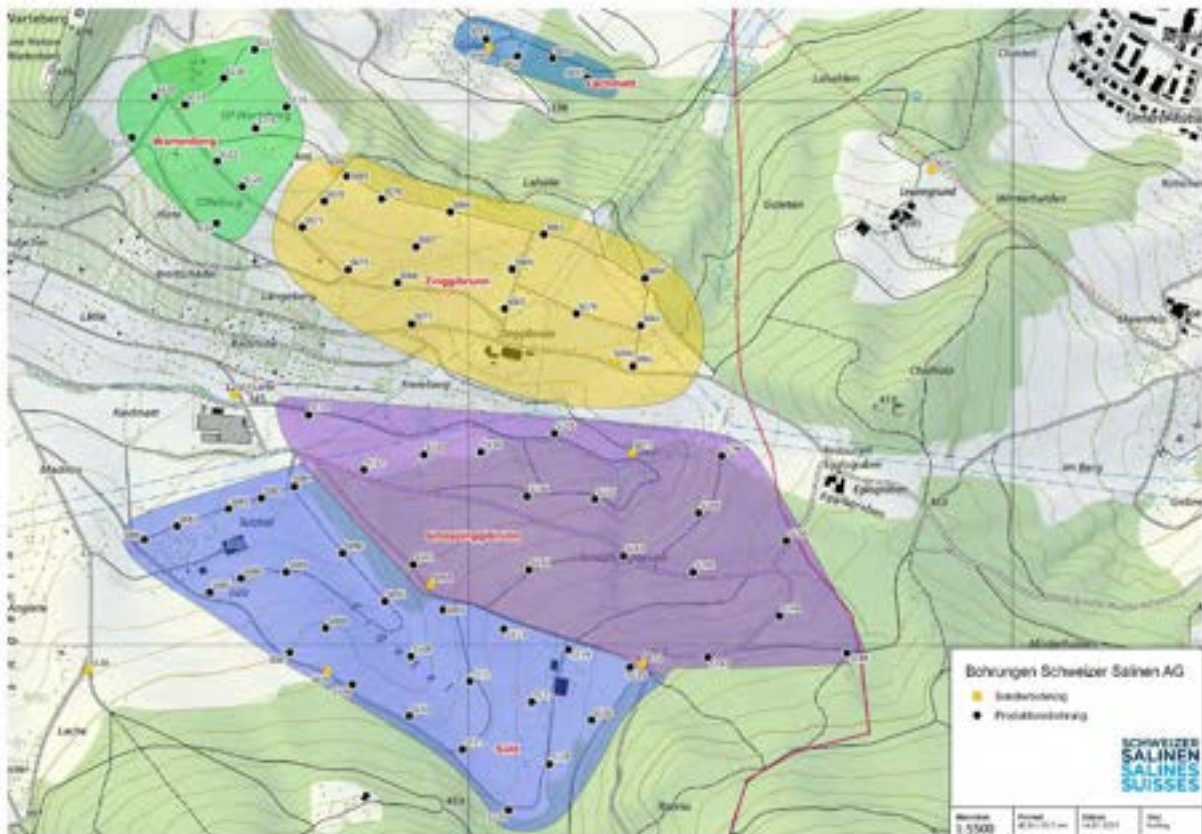


Abbildung 7. Soleförderungsfelder Grosszinggibrunn, Zinggibrunn, Sulz, Wartenberg und Lachmatt mit Sondier- und Produktionsbohrungen (Schweizer Salinen AG, 14. Januar 2021)



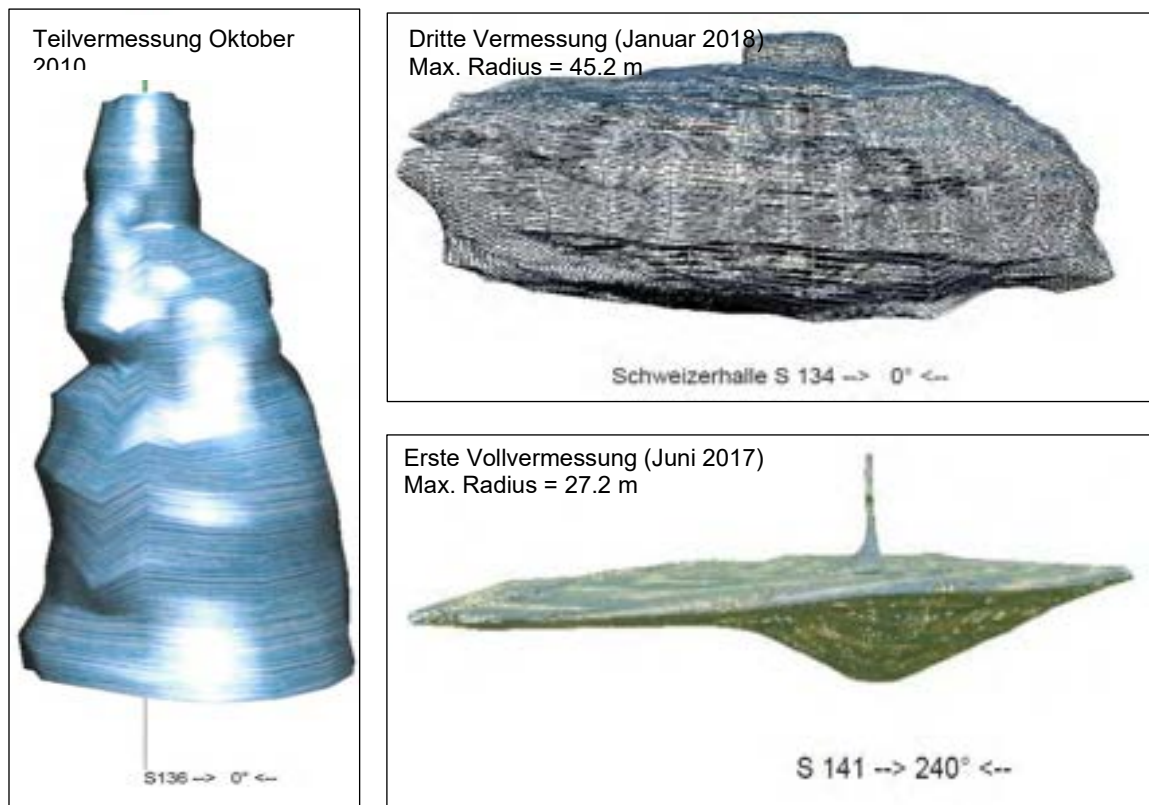


Abbildung 8. Hohlraumvermessungen von Soleförderkavernen in Grosszinggibrunn. Schweizer Salinen AG

Im Kavernenfeld von Grosszinggibrunn wird ein echometrisches Verfahren zur Hohlraumvermessung angewendet. Ausgewählte Resultate solcher Vermessungen sind in Abbildung 10 dargestellt. Bei der Bohrung S134 wurde eine Kaverne mit mittlerem Radius von 36 m und einem maximalen Radius von 45.2 m gesolt (Auslegungsradius (37.5 m)). Diese Kaverne weist zwar nicht die ideale Geometrie auf, also keine vertikalen Ränder und kein horizontal ebenes Dach, kommt aber der Auslegung im Vergleich zu anderen Kavernen in Grosszinggibrunn relativ nahe. Die ebenfalls in Figur 10 dargestellte Bohrung S141 ist eine Bohrung in Reparatur. Zum Zeitpunkt der Vermessung (Juni 2017) war diese Kaverne in der Anfangssolphase (Sumpfsolphase), wobei sich schon hier eine sehr asymmetrische Ausbildung der Kaverne zeigte. Kaverne S136 weicht stark von der Sollgeometrie ab, mit einem maximalen Radius von nur maximal 11.29 m und einer Höhe von 30 m. In den Kavernenhohlraum von S136 konnte nicht eingefahren werden, da die Sonde in der Verrohrung einklemmte. Die bestimmungsmässige Auslegung der Kavernen wird im Gebiet von Grosszinggibrunn trotz moderner Sole- und Überwachungsverfahren oft nicht erreicht.

Die Setzungen im zentralen und südlichen Bereich von Grosszinggibrunn (sowie im südlichen Teil von Sulz) liegen seit mehreren Jahren im Bereich von 15–40 mm/Jahr und in der letzten jährlichen Wiederholungsmessung im Jahr 2019 im Bereich von 20–26 mm/Jahr. Diese Setzungen betragen deutlich mehr als die erwarteten mittleren Senkungsraten von 5–7 mm/Jahr im Zentrum eines stabilen Kavernenfeldes während der aktiven Solung (ExB-4, ExB-6). Der unterzeichnende Experte vermutet darum, dass aufgrund komplexer geologischer Verhältnisse schon heute im Gebiet Grosszinggibrunn/Sulz lokal Kavernenverbrüche stattfinden (Stadium A und B, Abbildung 4). Andere Erklärungen dafür sind nach GEOTEST AG (EXB-6) Rutschungen und Abnahme der Bodenfeuchte.

#### 4.4. Dichtigkeit der Bohrungen in Grosszinggibrunn

Die Dichtigkeit von Bohrungen nach ihrer Zementation wird mittels mehrstufigen Dichtigkeitstests mit Sole und Blanketgas bestimmt. In diesen Tests werden die ausgebauten Bohrungen vor der Solung in mehreren Stufen und Ruhephasen mit einem erhöhten Druck (von z.B. 10 bar) beaufschlagt. Anschliessend wird der Druckabfall während mindestens einem Tag kontinuierlich erfasst. Bei dichten Bohrungen sollte dieser Druckabfall einen mittleren Wert von 0.02 bar/Stunde nicht überschreiten (ExB-1). Ein schnelles Abfallen ist ein Hinweis darauf, dass die Bohrungen nicht dicht sind. Die Schweizer Saline AG hat sowohl für Grosszinggibrunn (2003, Anhang 7) wie auch für Rütihard denselben Grenzwert von 0.02 bar/Stunde festgelegt. Die Tests wurden bis Februar 2006 (Bohrung S137) mit analogen Druckaufzeichnungen und anschliessend mit genauer digitaler Druckaufzeichnung ausgeführt.

Im Rahmen des vorliegenden Mandats wurden von der ETH alle Dichtigkeitstests der jüngsten Bohrungen, welche in den Jahren 2006 bis 2013 in Grosszinggibrunn durchgeführt wurden (S131-S150), ausgewertet. Diese Auswertung zeigt, dass in 75% der Bohrungen die geforderte Dichtigkeit nicht nachgewiesen werden konnte und dass die Grenzwerte teilweise massiv (>100%) überschritten wurden.

Druckabfälle von mehr als 0.02 bar/Stunde können Ursachen in einer nicht regelkonformen Testdurchführung, in einer undichten oder schlecht zementierten Verrohrung, oder in einer ungenügenden Dichtigkeit des Salzlagers haben. Der Unterzeichnende ist der Ansicht, dass die teilweise undichten Bohrungen in Grosszinggibrunn auch eine Folge der komplizierten geologischen Verhältnisse im Adlerhofgewölbe sein könnte. Dies könnte auch den Sole/Gas-Austritt in der Bohrung S87 vom Kavernenfeld Sulz (13. Juni 2017) erklären.

## 5 Risiken eines Salzabbaus auf der Rütihard

### 5.1. Grundwässer in der Umgebung der Rütihard

Gemäss ExB-3 und der Gewässerschutzkarte des Kantons BL finden sich auf der Rütihard keine nutzbaren oder schützenswerten Grundwasservorkommen. Meteorwasser wird über ein Drainagesystem in den Rhein und die Birs abgeleitet. Wenig Wasser tritt an Quellen in den nördlichen und östlichen Hängen der Rütihard aus und wird dort teilweise gefasst. Auf der anderen Seite finden sich sehr wichtige genutzte Grundwasservorkommen im Gebiet zwischen Muttenz und Pratteln, insbesondere NE der Bahngeleise im Gebiet Hard-Schweizerhalle. Hier werden aus den Rheinschottern aus 70 Bohrbrunnen jährlich 60 Mio. m<sup>3</sup> Wasser gefördert. Die Rheinschotter stehen hier in einer direkten hydraulischen Verbindung mit dem darunter liegenden Muschelkalk-Aquifer der Schinznach-Formation (Figur 7). Auf der Südwestseite der Rütihard bilden die Birsschotter einen weiteren wichtigen geschützten Grundwasserleiter für die lokale Grundwasserversorgung.

GEOTEST stellt in ExB-3 einen einfachen hydrogeologischen Schnitt von Südwest nach Nordost, d.h. aus dem Gebiet der Birsschotter durch die Rütihard bis in das Gebiet der Rheinschotter, dar (Abbildung 11). Der Profilschnitt enthält die gering durchlässigen Gesteine der Unteren Sulfatzone und des Salzlagers (orange), die Obere Sulfatzone (ocker), die Schinznach-Formation mit dem regionalen Muschelkalkaquifer (blau), den Gipskeuper (rosa) und die quartären Sedimente (Schotter und Löss, grün). Aufgrund von Porenwasserdruck-Messungen in Pegeln des Muschelkalks NE und SW der Rütihard wird vermutet, dass es unter der Rütihard im Muschelkalk-Aquifer eine Verbindung zwischen dem Birs- und dem Rheinschotter gibt. Diese hydraulische Verbindung hängt stark von der geologischen Struktur des Adlerhofgewölbes ab, insbesondere dem Niveau der Oberen Sulfatzone. Die Druckpegel (hydraulischen Potenziale) im Muschelkalk bei der Rütihard liegen deutlich tiefer als jene der angrenzenden Birsschotter. Dies deutet auf einen möglichen Grundwasserfluss von der Birs in Richtung Rütihard (und Schweizerhalle) hin.

Laut GEOTEST (ExB-3) und dem Unterzeichnenden, bestehen folgende wichtigen Wissenslücken über die Grundwasserverhältnisse im Gebiet Rütihard:

- Regionale Grundwasserpotentialverteilung, Fliessrichtung und Fliessgeschwindigkeit im Muschelkalk Aquifer, insb. im Abstrombereich der Rütihard
- Struktureller Aufbau des Deckgebirges (Klüfte und Störzonen und deren hydrogeologischen Eigenschaften).
- Hydraulische Eigenschaften der Oberen Sulfatzone selbst und der hydraulischen Verbindung zum höher gelegenen Muschelkalk-Aquifer.
- Lokal auftretende Subrosionsprozesse im Dach des Salzlagers.

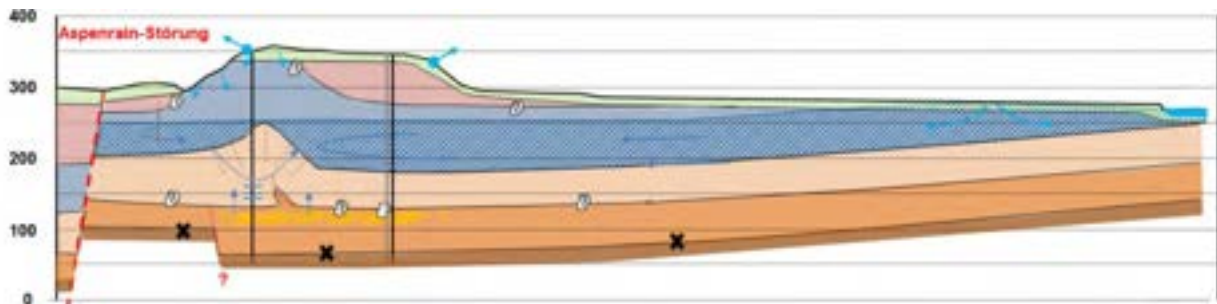


Abbildung 9. Hydrogeologischer Modellschnitt durch die Rütihard bei Bohrung S157, nach GEOTEST (EXB-3)

Ein Teil dieser Wissenslücken wurde in der kürzlich abgeteuften Bohrung S156 untersucht. So ergaben hydraulische Tests der Sondierbohrung S156 für die jeweiligen Formationen typische hydraulische Durchlässigkeiten: sehr gering bis nahezu undurchlässige Werte ( $K = 3.3 \cdot 10^{-12} - 8.4 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$ ) im Steinsalz, sehr geringe Werte ( $K = 7.0 - 8.7 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$ ) in der Oberen Sulfatzone, hohe Werte ( $K = 2.3 - 6.9 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ) im Bereich des geklüfteten und verkarsteten Muschelkalk-Aquifers.

Die Grundwasserfließverhältnisse nördlich und östlich der Rütihard (dem vermuteten Abstrombereich) sind sehr komplex und abhängig von der Grundwasserbewirtschaftung im Raum Hard-Schweizerhalle. Die Universität Basel unter der Leitung von Prof. Huggenberger hat in den letzten 20 Jahren diese Grundwasserfließverhältnisse intensiv mit Modellrechnungen untersucht. Die 3-dimensionalen Modelle erfassen die Lockergesteine und die Festgesteine bis zum Muschelkalk-Aquifer und wurden mit Daten aus

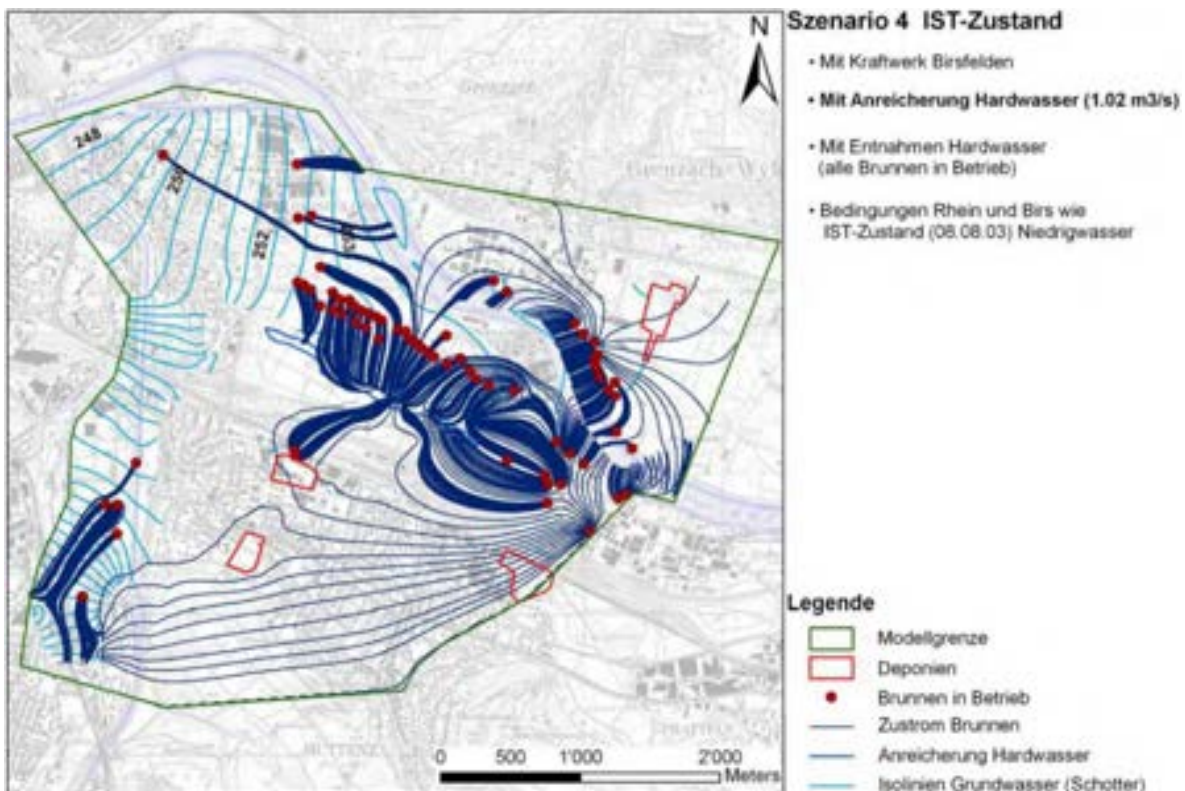


Abbildung 10. Simulierte Strömungslinien zu wichtigen aktiven Pump-Brunnen im Birs- und Rheintal. Berechnet mit einem kalibrierten Grundwassermodell entsprechend Grundwasserständen vom 8. August 2003 (aus Huggenberger et al. 2009)

Messpegeln kalibriert. Trotzdem weisen die Modellresultate immer noch grössere Unsicherheiten bezüglich der hydraulischen Durchlässigkeiten auf (insb. von tektonischen Brüchen und geklüfteten/verkarsteten Festgesteinen).

Abbildung 12 zeigt exemplarisch eine Aufsicht auf die Grundwasserströmungen im Gebiet der Rütihard sowie ihrem potenziellen Zufluss- und Abstromgebiet. Nach diesem Modell strömen die tieferen Grundwässer aus dem Muschelkalk-Aquifer der Rütihard in Richtung der Pumpbrunnen von Schweizerhalle. Ohne Anreicherung Hardwasser und Kraftwerk Birsfelden ergeben sich noch deutlich stärkere Abflüsse aus der Rütihard in Richtung Schweizerhalle.

## **5.2. Potenzielle Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse**

Auch deformiertes Salz in einer möglicherweise komplizierten Struktur wie dem Adlerhofgewölbe und seinen Bruchstrukturen ist dicht, solange es nicht durch Zwischenlagen mit natürlichen Verunreinigungen (von anderen Mineralien wie Tonen, Anhydrit und Dolomit) unterbrochen wird. Solange die Kavernen integer und die Soleförderbohrungen dicht sind, sind darum keine negativen Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse zu erwarten.

Zum heutigen Zeitpunkt fehlt der Nachweis der Stabilität der geplanten Kavernen im Gebiet der Rütihard, sowohl für die Phasen des Betriebs als auch des Nachbetriebs (Verwahrung). Die Beobachtungen im Gebiet von Grosszinnggibrunn deuten zudem schon heute auf teilweise undichte Bohrungen und potenziell instabile Kavernen hin (Kapitel 4). Verbrüche von Kavernen bis auf das Niveau des Muschelkalks könnten zu einer dauerhaften Versalzung des Grundwassers in diesem Aquifer führen, falls Grundwasser aus dem Muschelkalk durch den Verbrauch in Evaporitschichten gelangt und diese längerfristig durchströmt. Welche qualitativen Auswirkungen auf die Grundwasserversorgung im Abstromgebiet damit verbunden wären, kann heute nicht ohne spezielle Modellrechnungen beurteilt werden (die Muschelkalkwässer werden stark mit Schottergrundwasser verdünnt). Auch andere negative Szenarien einer Auswirkung auf die Grundwasserverhältnisse sind denkbar, aber in ihren potenziellen Auswirkungen vermutlich weniger risikoreich. Dazu gehören Hebungen auf der Rütihard aus quellendem Anhydrit der Oberen Sulfatzone, oder Gasaustritte durch Leckagen des Blankets entlang undichter Bohrungen.

## **5.3. Potenzielle Auswirkungen an der Geländeoberfläche**

Wie in Bericht ExB-6 (Senkungen und Bergschäden) beschrieben, sind die erwarteten Setzungen aus dem bestimmungsmässigen Betrieb und der Volumenkonvergenz meist so klein, dass daraus – insbesondere in unbebautem Gebiet – wenig oder keine Schäden an der Geländeoberfläche resultieren. Die intensivsten differentiellen Setzungen (Verkippungen) werden auf den Rändern des Rütihard-Plateaus, d.h. in unbebautem Gebiet erwartet. Hier sind primär Drainageleitungen von Setzungen betroffen. Schäden an Drainageleitungen müssen in diesem Gebiet vermieden werden, da ansonsten ein Potenzial für eine Reaktivierung natürlicher Rutschungen am NE Hang der Rütihard gegeben ist. Geringe Zerrungen und Schäden sind gemäss ExB-6 nur für Gebäude am NE Rand der Rütihard zu erwarten.

Die grössten Risiken für Schäden an der Geländeoberfläche bestehen für Abweichungen vom bestimmungsmässigen Betrieb, d.h. im Falle grösserer Verbrüche der Kavernen während Betrieb und Verwahrung. In diesem Fall sind grössere differentielle Setzungen und horizontale Verformungen zu erwarten. Die räumliche Ausdehnung dieser Geländeformungen muss sich dann auch nicht mehr auf

den Nahbereich der Rütihard beschränken, da unkontrollierte Lösungserscheinungen undichter Kavernen auch einzelnen Stör- oder Schwächezonen folgen können.

Es ist nicht zu erwarten, dass sich durch langfristige Verbrüche von Kavernen Änderungen in der seismischen Aktivität im Einflussgebiet der Rütihard ergeben.

#### **5.4. Massnahmen zur Risikominderung**

Wesentlich für eine sichere Soleförderung sind belastbare lokale geologische und gebirgsmechanische Modelle, systematische Dichtheitstests der Soleförderbohrungen, sowie eine umfangreiche Überwachung der Förderparameter, der Betriebsdrucke, der Kavernenentwicklung und der Verformungen an der Geländeoberfläche. Die räumliche Entwicklung, Dichtheit und Stabilität einer Soleförderkaverne kann heute mittels aufwändiger Messungen (Drucktests, tägliche Probenahmen, monatliche Massenbilanzierung, jährliche Sonarvermessung aller aktiven Kavernen) im Detail nachverfolgt und überprüft werden. Die Dichtheit der Bohrungen kann (und muss) durch systematische Drucktests mit Sole und Gas sowie durch eine geophysikalische Vermessung der Bohrloch-Zementation nachgewiesen werden. Die im Bericht ExB-1 im Detail beschriebene Vorgehensweise für die Rütihard stellt auf umfassende Weise den heutigen Stand der-Technik dar. Dieser Stand kommt im aktuellen Soleförderungsgebiet Grosszinggibrunn nur teilweise zur Anwendung.

Für die langfristige Verwahrung der Soleförderkavernen stehen grundsätzlich verschiedene Konzepte zur Verfügung. Wesentlich für den Nachweis der Stabilität und Dichtheit sind neben lokationsspezifischen gebirgsmechanischen Modellrechnungen und Verwahrungskonzepten, messtechnische Nachweise des Stillstandes der Kavernenkonvergenz und der Dichtheit der Bohrungen (ExB-1).

## 6 Schlussbemerkungen und Empfehlungen

Die Salzvorkommen auf der Rütihard sind von hoher Qualität und zeigen eine Mächtigkeit von 18 bis 65 Meter. Aufgrund der vorhandenen Reserven und bestehenden Förderanlagen im Gebiet Sulz/Grosszinggibrunn ist ein Salzabbau auf der Rütihard wirtschaftlich interessant.

Die Untersuchungen und Expertenberichte zum Projekt Rütihard, welche im Auftrag der Schweizer Salinen AG von verschiedenen Firmen ausgeführt und erstellt wurden, sind umfangreich und von hoher Qualität. Die Schweizer Salinen AG hat dem unterzeichnenden Experten zusätzlich sehr umfangreiche Primärberichte und Datensätze zeitgerecht zur Verfügung gestellt.

Der heutige Salzabbau im Gebiet Grosszinggibrunn erfolgt in einem ähnlichen geologischen Kontext wie auf der Rütihard: beide Gebiete liegen grundsätzlich in der gleichen geologischen Struktur, im sogenannten Adlerhofgewölbe. Obwohl die heutigen Erkundungs- und Überwachungs-Massnahmen von Grosszinggibrunn von den geplanten Massnahmen auf der Rütihard abweichen, lassen sich aus den bisherigen Erfahrungen potenzielle Erschwernisse für ein Projekt Rütihard ableiten, welche vom unterzeichnenden Experten insbesondere auf die heute nicht im Detail bekannten geologischen Verhältnisse zurückgeführt werden.

Für eine abschliessende Beurteilung der Risiken eines Salzabbaus auf der Rütihard fehlen umfassendere geologische Untersuchungen zur Struktur des Untergrundes sowie Nachweise der mittel- und langfristigen Integrität der geplanten Kavernen. Die bisherigen Modellrechnungen gehen von sehr einfachen geologischen Verhältnissen aus und zeigen nur für die Betriebsphase von 10 bis 20 Jahren stabile Verhältnisse auf. Es ist heute davon auszugehen, dass mit zunehmender Komplexität der lokalen, geologischen Verhältnisse dichte und stabile Bohrungen sowie Kavernen schwierig zu realisieren sind und der Nachweis der Integrität mit Modellrechnungen deutlich weniger belastbar wird. Sowohl für Sulz/Grosszinggibrunn wie Rütihard fehlt heute ein lokationsspezifisches Verwahrungskonzept.

Der Experte geht davon aus, dass im bestimmungsmässigen Betrieb (mit stabilen Kavernen und dichten Bohrungen) der Salzabbau keine negativen Auswirkungen auf das Grundwasser, die (spürbare) Seismizität und die natürlichen Hanginstabilitäten hat. Die grössten langfristigen Risiken eines Salzabbaus auf der Rütihard betreffen nach dem unterzeichnenden Experten negative Auswirkungen auf die Grundwasserqualität im Gebiet Muttenz - Schweizer Halle, ausgelöst durch grössere Kavernenverbrüche. Weitere Risiken instabiler Kavernen betreffen die räumliche Ausdehnung von Verformungen (Setzungen, Zerrungen) an der Geländeoberfläche, welche im Falle instabiler Kavernen und undichter Bohrungen deutlich in das Siedlungsgebiet von Muttenz hineinreichen könnte.

Für eine weitere Evaluation einer möglichen Soleförderung auf der Rütihard empfiehlt der unterzeichnende Experte folgende Erkundungen und Massnahmen:

1. Detaillierte Erkundung der geologischen/gebirgsmechanischen Verhältnisse im Gebiet Sulz/Grosszinggibrunn und Rütihard mit zusätzlichen Bohrungen und Seismik
2. Überprüfung (Validierung) und Kalibrierung neuer gebirgsmechanischer Modelle für den Betrieb von Grosszinggibrunn und Rütihard mit Langzeit-Messreihen und Rückrechnungen von früheren Schadensfällen

3. Durchführung von Modellrechnungen zur langfristigen (z.B. 500 Jahre) Integrität von Kavernen im Adlerhofgewölbe unter Berücksichtigung der lokalen Geologie/Geomechanik
4. Entwicklung von lokationsspezifischen Verwahrungskonzepten für die Kavernenfelder im Adlerhofgewölbe (Sulz/Grosszinggibrunn und Rütihard)
5. Detail-Untersuchung der Ursachen von erhöhten Leckagen von Bohrungen und Setzungen in Grosszinggibrunn
6. Modellierung möglicher Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität im Abstrombereich der Rütihard im Schadensfall (Verbruch der Kavernen, Leckagen entlang Bohrungen)
7. Aufbau eines umfassenden Monitoringsystems für die Grundwasserqualität im Abstromgebiet der Kavernenfelder im Adlerhofgewölbe

Zürich, den 19. Oktober 2020 (Bericht mit vertraulichen Figuren/Tabellen)

Zürich, den 19. Januar 2021 (Bericht ohne vertrauliche Figuren/Tabellen)



Prof. Dr. Simon Löw



---

**Bericht Nr. 2720047.10**

---

**Schweizer Salinen AG, Pratteln 1**

**Muttenz, Solfeldintegrität  
Sulz/Grosszinggibrunn**

**Solfeld Sulz:  
Gefährdungs- und Risikoanalyse  
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung  
(Vorläufige Beurteilung)**

Münchenstein, 18. August 2022

GEOTEST AG  
FREILAGER-PLATZ 3  
CH-4142 MÜNCHENSTEIN  
T + 41 (0)61 205 87 50  
F + 41 (0)61 205 87 51  
basel@geotest.ch  
www.geotest.ch

2720047.10

Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn  
Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse  
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung  
(Vorläufige Beurteilung)

GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

<b>Autor(en)</b>	<b>Bearbeitete Themen</b>
Felix Bussmann	Kapitel 1, 2, 3, 4, 5
Florentin Ladner	Kapitel 1, 3, 6
Moira Arnet	Kapitel 6
<b>Supervision</b>	<b>Visierte Inhalte</b>
René Brinkmann	Ganzer Bericht
<b>Hinweise</b>	
Entwurf vom 27.06.2022 Überarbeiteter Version vom 18.08.2022	

GEOTEST AG

Felix Bussmann

Florentin Ladner

## Inhaltsverzeichnis

1.	Präambel: Einordnung der Gefährdungs- und Risikoanalyse.....	5
2.	Einleitung.....	7
2.1	Ausgangslage .....	7
2.2	Veranlassung für die Gefährdungs- und Risikoanalyse.....	8
2.3	Perimeter und Zielsetzung .....	11
2.4	Methodik.....	11
3.	Literatur und Datensätze .....	12
4.	Ist-Zustand Solfeld Sulz .....	14
4.1	Entwicklung Oberflächendeformationen .....	14
4.1.1	Senkungen .....	14
4.1.2	Verschiebungen .....	16
4.1.3	Visuelle Beurteilung .....	17
4.2	Zwischenresultate zum Zustand der Produktionsbohrungen .....	17
4.3	Zwischenresultate Kavernengeometrien und Kavernenentwicklungen .....	17
4.4	Vorläufiges Fazit Ist-Zustand Solfeld Sulz .....	19
5.	Oberflächendeformationen.....	21
5.1	Einleitung und Grundlagen .....	21
5.1.1	Betrachtungssperimeter.....	21
5.1.2	Stabilität von Kavernen im Schichtsalz .....	22
5.1.3	Analyse bekannter Tagbrüche über Salzkavernen weltweit .....	24
5.1.4	Tagbruch Kaverne R31 (Solfeld Neuland, Saline Riburg).....	24
5.1.5	Konzeptuelle Überlegungen zur Entwicklung von Tagbrüchen.....	26
5.2	Gefährdungs- und Risikoanalyse «Oberflächendeformationen» .....	28
5.2.1	Schutzgüter und Schutzobjekte .....	28
5.2.2	Risikoanalyse .....	28
5.2.2.1	Gefährdung .....	28
5.2.2.2	Risiko .....	29
5.2.2.3	Risikobeurteilung Szenario 1 «Status-quo».....	30
5.2.2.4	Risikobeurteilung Szenario 2 «Tagbruch» .....	31
5.2.2.5	Schlussfolgerung Risikoanalyse Oberflächendeformationen .....	32
6.	Grundwasser .....	33

6.1	Einleitung und Grundlagen .....	33
6.1.1	Betrachtungssperimeter .....	33
6.1.2	Geologisch-hydrogeologischer Rahmen .....	33
6.1.2.1	Geologie und Tektonik .....	33
6.1.2.2	Hydrostratigraphie .....	34
6.1.3	Lokale Hydrogeologie im Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn .....	36
6.1.4	Regionale Strömungsverhältnisse im Muschelkalk- Aquifer .....	37
6.1.4.1	Grundwasserneubildung .....	37
6.1.4.2	Strömungsverhältnisse im Muschelkalk-Aquifer .....	38
6.2	Transport hoch konzentrierter Chloridlösungen im Grundwasser .....	39
6.2.1	Hydrochemische Hinweise für hoch konzentrierte Chloridlösungen im Betrachtungssperimeter .....	41
6.2.1.1	Räumliche Verteilung der Chlorid-Konzentrationen .....	41
6.2.1.2	Tiefenverteilung der Chlorid-Konzentrationen .....	43
6.2.1.3	Chlorid-Konzentrationen in den Produktionsbohrungen Solfeld Sulz .....	44
6.3	Konzeptuelles hydrogeologisches Modell .....	45
6.4	Gefährdungs- und Risikoanalyse «Grundwasser» .....	48
6.4.1	Schutzgüter .....	48
6.4.2	Risikoanalyse .....	49
6.4.2.1	Gefährdung .....	49
6.4.2.2	Risiko .....	49
6.4.2.3	Risikobeurteilung Szenario 1 «Status-quo» .....	50
6.4.2.4	Risikobeurteilung Szenario 2 «Tagbruch» .....	51
6.4.2.5	Schlussfolgerung Risikoanalyse Grundwasser .....	53
6.5	Grundwassermonitoring .....	54

## Anhang

Anhang 1: Hydrochemische Wasseranalysen Sulz, 2021 / 2022

Anhang 2: Hydrogeologischer Plan mit Schutzgüter und Stauertopographie der Oberen Sulfatzone.

## 1. Präambel: Einordnung der Gefährdungs- und Risikoanalyse

Die vorliegende Gefährdungs- und Risikoanalyse gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 werden die Ausgangslage im Solfeld Sulz sowie Veranlassung und Rahmendbedingungen für die Erarbeitung der vorliegenden Gefährdungs- und Risikoanalyse dargelegt.

Die für die Gefährdungs- und Risikoanalyse herangezogenen Grundlagen und Datensätze sind in Kapitel 3 aufgelistet.

In Kapitel 4 wird der Ist-Zustand des Solfelds Sulz, soweit aktuell bekannt, illustriert. Es handelt sich dabei um eine **vorläufige Beurteilung** Stand Sommer 2022. Hervorzuheben ist, dass durch die laufende Messkampagne im Solfeld Sulz sowie durch weitere, parallellaufende Arbeiten (z.B. gebirgsmechanische Modellierungen) das Wissen bezüglich des Zustands des Solfelds Sulz ständig erweitert wird.

In den Kapiteln 5 und 6 folgt schliesslich eine **vorläufige** Gefährdungs- und Risikoanalyse für die beiden Gefährdungsbilder (1) Oberflächendeformationen und (2) Grundwasserversalzung. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Eine Gefährdungsanalyse gibt Antworten auf die Frage: **«Was kann passieren?»**. Dabei steht die Identifikation möglicher Gefährdungsbilder im Zentrum, wobei im vorliegenden Fall auf die beiden oben genannten Gefährdungsbilder (1) Oberflächendeformationen und (2) Grundwasserversalzung fokussiert wird.
- Für beide Gefährdungsbilder haben wir **zwei Szenarien** definiert:  
Szenario 1: «Status quo»  
Szenario 2: «Tagbruchereignis im Solfeld Sulz»  
Die beiden Szenarien stellen die logischen Endpunkte der zukünftigen Entwicklung im Solfeld Sulz dar. Die Szenarien sind in ihrer Natur hypothetisch aber gleichzeitig realistisch.
- Eine Risikoanalyse gibt schliesslich Antworten auf die Frage: **« Was darf passieren?»**. Die etablierten Gefährdungsbilder werden in diesem Schritt hinsichtlich ihrer Risiken bewertet und hinsichtlich ihrer Tragbarkeit beurteilt. Einerseits wird mit geeigneten Szenarien das Spektrum möglicher Ereignisse abgedeckt und andererseits wird die Wahrscheinlichkeit sowie das Schadensausmass dieser Ereignisse bestimmt.

**Das vorliegende Dokument beantwortet somit nicht die Frage, ob und wann im Bereich des Solfelds Sulz ein Tagbruchereignis stattfinden wird. Diese Frage kann frühestens nach Vorliegen der Resultate der laufenden Messkampagnen sowie der gebirgsmechanischen Modellierungen zuverlässig beantwortet werden.**

Die Gefährdungs- und Risikoanalyse soll vielmehr ein **Instrument für die aktuelle und zukünftige Massnahmenplanung** im Zusammenhang mit der beabsichtigten Nachsorge des Solfelds Sulz sein. Es werden darin auch unwahrscheinliche Ereignisse gedanklich durchgespielt, solange diese als relevant taxiert werden. Ziel ist es, durch die anvisierten Massnahmen das verbleibende Risiko auf ein für alle relevanten Stakeholder akzeptables Niveau zu bringen (Abbildung 1).

Die vorliegende Gefährdungs- und Risikoanalyse stellt einen vorläufigen Stand dar, welcher von der GEOTEST AG im Auftrag und unter Mitwirkung der Schweizer Salinen AG erarbeitet wurde. Sie sollte unter Einbezug weiterer relevanter Stakeholder spätestens vor Beginn der eigentlichen Solfeld-Nachsorge aktualisiert werden.

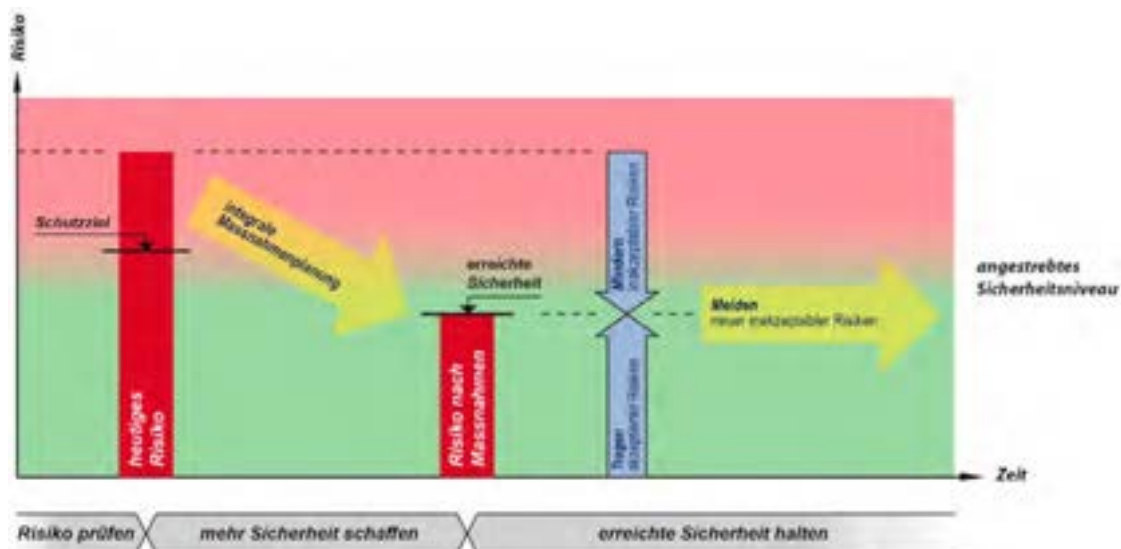


Abbildung 1: Ablauf und Ziel einer integralen Massnahmenplanung: Inakzeptable Risiken durch geeignete Massnahmen mindern und akzeptable Risiken als Gesellschaft tragen. Aus [1].

## 2. Einleitung

### 2.1 Ausgangslage

Die Schweizer Salinen AG (SSAG) gewinnt an ihrem Standort Schweizerhalle (Kanton Basel-Landschaft) Salz im Lösungsbergbauverfahren (*solution mining*). Für den Salzabbau entwickelt die SSAG dabei Solfelder, die in der Regel in mehreren Etappen erschlossen werden, wobei eine Etappe jeweils aus mehreren Produktionsbohrungen besteht.

Das aktuelle Solfeld des Standorts Schweizerhalle ist das Solfeld Grosszinggibrunn (Muttenz), das 2006 in Betrieb genommen wurde (Abbildung 2). Vor Inbetriebnahme des Solfelds Grosszinggibrunn erfolgte der Salzabbau im Zeitraum von 1982 bis 2019 hauptsächlich im Solfeld Sulz (Muttenz).

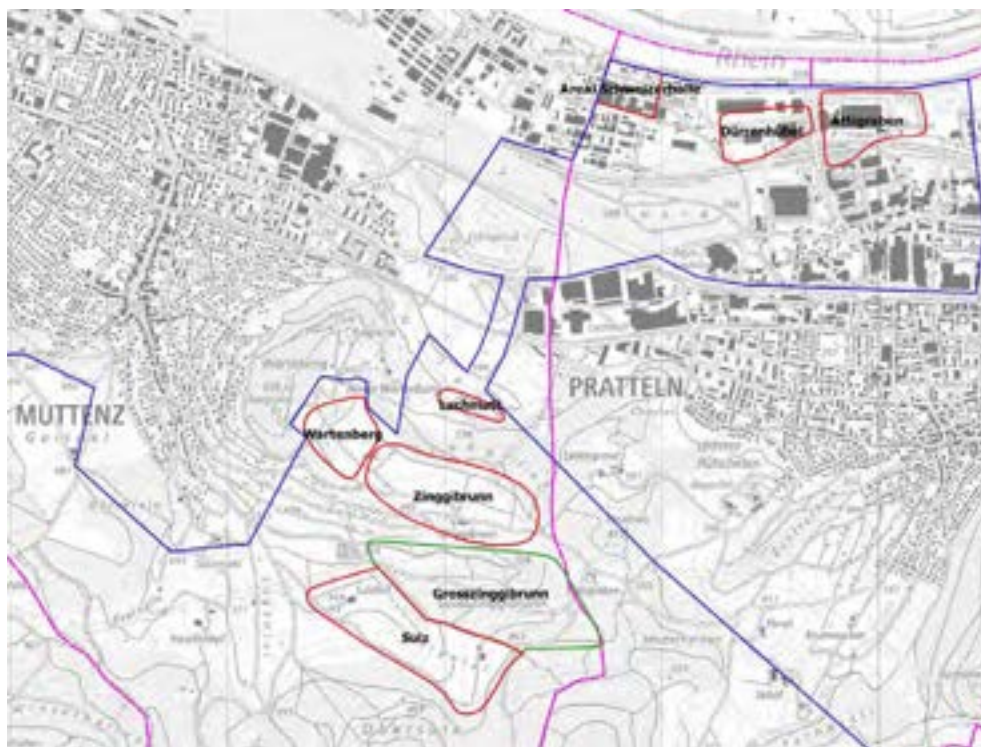


Abbildung 2: Nördliches Konzessionsgebiet der Saline Schweizerhalle (Kanton BL, blau umrandet) mit Lage des aktuellen Solfeldes Grosszinggibrunn (grün) sowie der nicht mehr aktiven Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn (rot) der Saline Schweizerhalle. Die beiden jüngsten Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn liegen im Tafeljura südöstlich des Muttenzer Dorfkerns. Kartenausschnitt nicht massstäblich, Gemeindegrenzen = pink.

Im Zusammenhang mit der im Kanton Basel-Landschaft anstehenden Konzessionsverlängerung wurde erstmals ein «generelles Überwachungs- und Nachsorgekonzept für die Solfelder der SSAG im Kanton Basel-Landschaft» erarbeitet [1] und mit den zuständigen Behördenstellen abgestimmt. Im Kern lehnt sich der in dem Konzept entwickelte Ansatz stark an das in der Schweiz etablierte Vorgehen im Deponiewesen an. Er unterteilt die Salzgewinnung in die Phasen (1) Planung- und Erkundung, (2) Bau, (3) Betrieb und (4) Nachsorge (Abbildung 3).

Planungs- und Erkundungsphase	Bauphase	Betriebsphase	Nachsorgephase	
			<b>Ordentliche Nachsorge</b>	
			Wartephase / Standby	Nachsorge
variabel	variabel	variabel	ca. 5 Jahre	ca. 10 Jahre
Planung & Erkundung	Produktionsbohrungen	Solbetrieb	Beobachtung	Beobachtung
			Verschluss	Abnahme
			<b>Störfall-Nachsorge</b>	

Abbildung 3: Phasen der Salzgewinnung gemäss [1].

Um ein erstes Solfeld im Kanton Basel-Landschaft in die Nachsorgephase zu überführen, wurde beschlossen, den Ist-Zustand der Produktionsbohrungen und Kavernen des Solfelds «Sulz» im Rahmen einer umfangreichen Messkampagne zu erfassen (bohrlochgeophysikalisches *well-integrity logging* sowie Kavernenvermessung mit Ultraschall).

## 2.2 Veranlassung für die Gefährdungs- und Risikoanalyse

Das Solfeld Sulz wurde in vier Etappen gebaut und besteht aus insgesamt 25 Produktionsbohrungen resp. Kavernen. Die Salzproduktion wurde in der Etappe Sulz 1 1982 in Betrieb genommen und endete in der Etappe Sulz 4 2019 (Abbildung 4). Die Etappe Sulz 1 wurde noch mittels Drucklaugung, d.h. ohne Stickstoff-Blanket gelaugt. Ab Etappe Sulz 2 wurden zunächst alle Kavernen mit einem Stickstoff-Blanket betrieben. Jedoch wurden in der Betriebsphase zwischen mehreren Bohrungen / Kavernen Verbindungen festgestellt. Daraufhin wurden die früheren Kavernen der Etappen Sulz 1 bis Sulz 3 oft quergelaugt, z.T. unter Aufgabe des ursprünglichen Stickstoff-Blankets. In einer späteren Produktionsphase wurde dann versucht, die verbundenen Kavernen so weit wie möglich getrennt zu betreiben [3].



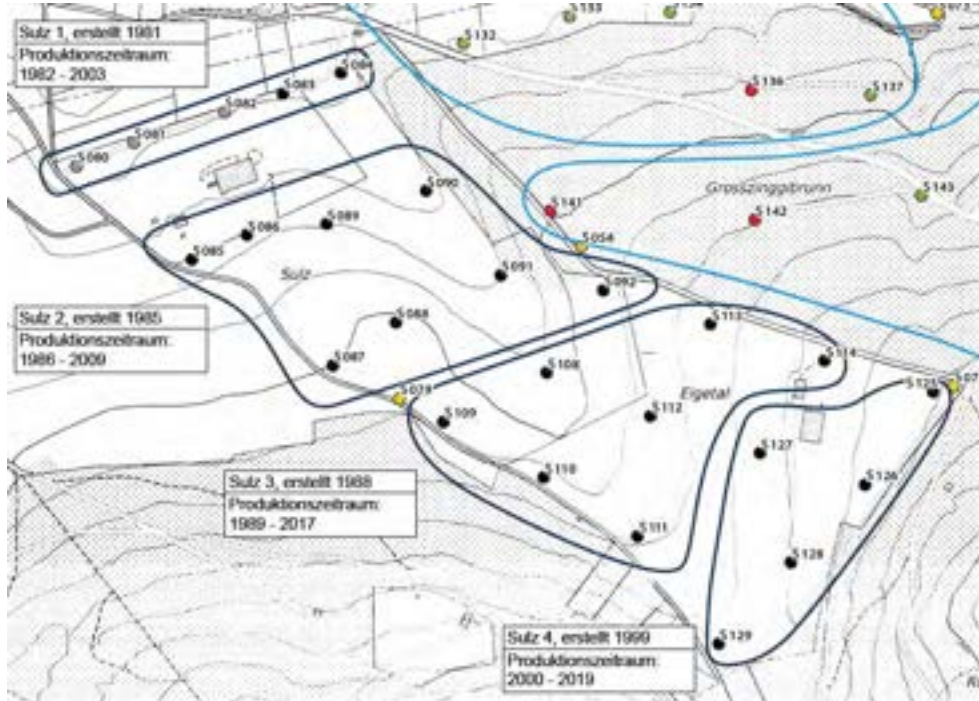


Abbildung 4: Die vier Etappen des Solfelds «Sulz (dunkelblau umrandet) mit den dazugehörigen Produktionsbohrungen (grau = Bohrung verfüllt, schwarz = Bohrung im Stand By Modus, gelb = Sondierbohrung). Ebenfalls dargestellt sind die westlichsten Bereiche des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn (hellblau umrandet) mit den dazugehörigen Produktionsbohrungen (grün = Bohrung aktiv, rot = Bohrung inaktiv). Aus [3].

Im Rahmen einer ersten Zusammenstellung und Auswertung vorhandener Daten zum damalig bekannten Zustand der Produktionsbohrungen sowie insbesondere zu den Kavernengeometrien («Factsheets Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn») vom Mai 2021 [4] wurden in mehreren Produktionsbohrungen und Kavernen signifikante Abweichungen von deren Ist-Zustand zum Soll-Zustand festgestellt. Hervorzuheben ist hierbei jedoch, dass die damals analysierten Kavernenvermessungen in der Regel um das Jahr 2012 und somit deutlich vor dem Produktionsende der beiden Etappen Sulz 3 und Sulz 4 durchgeführt wurden. Die aus Kavernenintegritätsüberlegungen relevantesten Abweichungen zum Soll-Zustand betrafen (1) die Mächtigkeit resp. das Nicht-Vorhandensein der Salzschwebe im Kavernen-Hangenden, (2) die laterale Ausdehnung der einzelnen Kavernen, (3) die verbleibenden Pfeilmächtigkeiten zwischen benachbarten Kavernen sowie (4) das generelle Vorhandensein von miteinander verbundenen Einzelkavernen zu sogenannten «Galeriekavernen».

Parallel zu den geometrischen Auswertungen wurden im Rahmen der jährlich durchgeführten Senkungsmessungen (Präzisionsnivellements) im Bereich des

Solfelds Sulz seit einigen Jahren lokal Senkungen nachgewiesen, die deutlich über den durch analytische Berechnungen vorausgesagten Deformationsbeträgen lagen. Erhöhte Senkungsbeträge können darauf hindeuten, dass im Gebirge Prozesse auftreten, die nicht mehr allein durch zu erwartende Spannungumlagerungen im Gebirge erklärt werden können, die im Umfeld der Kavernen infolge der Kavernenkonvergenz<sup>1</sup> auftreten, sondern dass neben visko-elasto-plastischen auch bruchhafte Prozesse im Untergrund auftreten.

Infolge der oben dargelegten Feststellungen wurde seitens SSAG beschlossen, eine erste Beurteilung der Stabilität der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn vornehmen zu lassen [5]. Die auf Basis der Factsheets [4] und unter Zuhilfenahme verschiedener Beurteilungsansätze vorgenommene, semi-quantitative Beurteilung kam zum Schluss, dass die Langzeitsicherheit der meisten Kavernen im Solfeld Sulz aufgrund potenzieller Firstbrüche nicht gegeben ist. Infolge eines Firstbruchs kann an der Geländeoberfläche ein ausgeprägter Senkungstrog bis hin zu einer Kraterbildung (Erdfall resp. Tagbruch) mit einem abrupten Abbruch an der Geländeoberkante auftreten.

Gegenüber dieser Eingangsanalyse hat sich die Datengrundlage zum Ist-Zustand des Solfelds Sulz aufgrund der aktuell (Frühsommer 2022) noch laufenden Messkampagne verbessert. Die bislang erhobenen zusätzlichen Daten zum Zustand der Produktionsbohrungen und der stillgelegten Salzkavernen akzentuieren jedoch die in [5] gemachte gebirgsmechanische Erstbeurteilung weiter. Insbesondere wurden bereits zwei kollabierte Salzkavernen (S109 und S126) nachgewiesen, in denen sich kaminartige Verbrüche im Hangenden der ursprünglichen Kavernen progressiv entwickeln. Somit weist der aktuelle Wissenstand auf einen allgemein schlechten Zustand des Solfelds Sulz hin [6]. Die dafür verantwortlichen Prozesse laufen weiter und sind momentan nicht unter Kontrolle. Es stehen zwei Gefährdungsbilder im Fokus:

1. Starke Oberflächendehformationen bis hin zu Tagbrüchen (kaminartiger Verbruch bis an die Geländeoberfläche).
2. Versalzung des Muschelkalk-Aquifers infolge undichter oder kollabierter Salzkavernen und/oder undichter Produktionsbohrungen.

---

<sup>1</sup> Kavernenkonvergenz: Als Folge der Hohlraumschaffung ändert sich der Gebirgsspannungszustand. Im Falle von Steinsalz, dessen gebirgsmechanisches Verhalten von visko-elasto-plastischen Eigenschaften bestimmt wird, führt diese Zustandsänderung zu einem Kriechen des umgebenden Salzes. Das Salzkriechen führt dazu, dass das Kavernenvolumen mit der Zeit kontinuierlich abnimmt. Dieser Prozess wird als Konvergenz bezeichnet.

### **2.3 Perimeter und Zielsetzung**

Die beiden Gefährdungsbilder (1) starke Oberflächendehformationen und (2) Grundwasserversalzung sollen für den Untersuchungsperimeter Solfeld Sulz im Rahmen einer Gefährdungs- und Risikoanalyse untersucht werden.

Es sollen für beide Gefährdungsbilder Szenarien gebildet werden. Darüber hinaus sollen die möglichen Auswirkungen der für die beiden Prozesse gebildeten Szenarien auf Anthro- und Geosphäre unter Berücksichtigung der jeweiligen Eintretenswahrscheinlichkeit abgeschätzt werden.

Abschliessend sollen im Rahmen der Gefährdungs- und Risikoanalyse für beide Gefährdungsbilder sinnvolle Überwachungsmassnahmen definiert werden.

### **2.4 Methodik**

Die vorliegende Gefährdungsanalyse stützt sich zum einen auf den zur Verfügung stehenden Messdaten der SSAG sowie des Kantons Basel-Landschaft ab. Zudem werden anhand von Literaturangaben Analogieschlüsse gemacht und auf die Situation im Solfeld Sulz übertragen. Vereinzelt werden Szenarien auf der Basis von bekannten Faustformeln und analytischen Berechnungsansätzen hergeleitet.

### 3. Literatur und Datensätze

- [1] Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS (2014): Integrales Risikomanagement – Bedeutung für den Schutz der Bevölkerung und ihrer Lebensgrundlagen.
- [2] GEOTEST AG (2021): Generelles Überwachungs- und Nachsorgekonzept für die Solfelder der Schweizer Salinen AG im Kanton Basel-Landschaft (unveröffentlicht).
- [3] Schweizer Salinen AG (2020): Grosszinggibrunn, Sulz: Undichtigkeiten und Verbindungen zwischen Kavernen – aktueller Kenntnisstand (Aktennotiz, unveröffentlicht).
- [4] GEOTEST AG (2021): Factsheets Solkavernen der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn (Arbeitsdokumente Schweizer Salinen AG, Stand 21.05.2021, unveröffentlicht).
- [5] DEEP.KBB (2021): Beurteilung der Stabilität der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn der Schweizer Salinen AG – Eingangsanalyse 2021 (unveröffentlicht).
- [6] GEOTEST AG (2022): Weiteres Vorgehen für Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn (BL); Aktennotiz 2720047.9 vom 09.03.2022 (unveröffentlicht).
- [7] GEOTEST AG (2020): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-6 Senkungen und Bergschäden (unveröffentlicht).
- [8] Rapp Infra AG (2022): Senkungsmessung Gebiet Wartenberg, Muttenz, Pratteln – Technischer Bericht 2021 (unveröffentlicht).
- [9] Rapp Infra AG (2022): Lage-Überwachungsmessung Muttenz Gebiet Eigental, Sulz, Grosszinggibrunn – Technischer Bericht Messung 2021 (unveröffentlicht).
- [10] DEEP.KBB (2019): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-1 Bau und technischer Betrieb Soleförderung (unveröffentlicht).
- [11] Institut für Gebirgsmechanik GmbH (2019): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-4 Gebirgsmechanik (unveröffentlicht).
- [12] Bérest, P. (2017): Cases, causes and classifications of craters above salt caverns. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 100 (2017) 318-329.
- [13] Warren, J. K. (2016): Evaporites – A Geological Compendium (Second Edition).
- [14] Minkley, W. (2018): Expert Judgement Sinkhole over Solution-Mined Cavern Field Dow Brazil S/A Mineracao (unveröffentlicht).

- [15] Hauber, L. (1987): Geologischer Bericht über den Einsturztrichter im Neu-land (Gde. Rheinfeldern) vom 6.12.1986 (unveröffentlicht).
- [16] Voegeli, S. (2017): Salt Cavern Failure and Sinkhole Development (KDHE Geology & Well Technology Section Fall Seminar (unveröffentlicht).
- [17] GEOTEST AG (2019): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-2: Regionale Geologie (unveröffentlicht).
- [18] GEOTEST AG (2019): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-3: Hydrogeologie (unveröffentlicht).
- [19] GEOTEST AG (2019): Muttenz, Sondierbohrung Rütihard – Geologie und Stratigraphie Sondierbohrung S157 (unveröffentlicht).
- [20] GEOTEST AG (2020): Muttenz, Sondierbohrung Rütihard – Geologie und Stratigraphie Sondierbohrung S156 (unveröffentlicht).
- [21] Regierungspräsidium Freiburg (2008): INTERREG III A Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim. Endbericht.
- [22] Spottke, I., Zechner, E., Huggenberger, P. (2005): The southeastern border of the upper rhine graben: a 3D geological model and its importance for tectonics and groundwater flow. Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.) 94: 580 – 593.
- [23] Zechner, E., Epting, J. (2021): Physikalische, hydrochemische und Isotopen-Untersuchungen an Tiefengrundwasserproben von 2020 aus Muttenz und Pratteln: Hydrogeologische Auswertung und Empfehlungen. BGA BL-188 (unveröffentlicht).
- [24] Post, V. & Simmons, C.T. (2022): Variable-Density Groundwater Flow. Published by the Groundwater Project.
- [25] Zidane, A. et al. (2014): Simulation of rock salt dissolution and its impact on land subsidence. Hydrology and Earth System Sciences, 18.
- [26] GEOTEST AG (2022): Muttenz, Bohrfeldintegrität Sulz / Grosszinggibrunn. Vorgehenskonzept Grundwassermonitoring für die Solfelder Grosszinggibrunn / Sulz (unveröffentlicht).

## 4. Ist-Zustand Solfeld Sulz

Verschiedene, aktuell (Juni 2022) laufende Messkampagnen tragen zu einer kontinuierlichen Verbesserung des Wissensstands bezüglich des Ist-Zustands des Solfelds Sulz bei. Hervorzuheben sind dabei insbesondere folgende Kampagnen:

- Seit 2002, jährlich durchgeführte **Senkungsmessungen** (Präzisionsnivelements, bislang 20 Folgemessungen; in einfacherer Konfiguration reicht die Datenreihe bis 1985 zurück).
- Seit 2019, jährlich durchgeführte **Lagemessungen** (statische GNSS-Messungen, bislang zwei Folgemessungen).
- Seit 2021, jährlich durchgeführte **photogrammetrische Vermessungen** (Drohnenbefliegungen, bislang eine Folgemessung, gemessene Deformationen noch unterhalb der Auflösungsgrenze der Methode).
- Seit Herbst 2021, **Zustandserhebung Produktionsbohrungen und Kavernen** Solfeld Sulz (Kavernenvermessungen durch SOCON Sonar Control sowie *cased hole loggings* durch Terratec Geophysical Services), Messkampagne sollte Ende 2022 beendet sein.

Die resultierenden vorläufigen Erkenntnisse zum Ist-Zustand des Solfelds sind in den nachfolgenden Kapiteln zusammengefasst.

### 4.1 Entwicklung Oberflächendeformationen

#### 4.1.1 Senkungen

Für das Solfeld Sulz wurde 2006 eine numerische Vorausberechnung der zu erwartenden Senkungen durchgeführt. Gemäss den Resultaten aus den Modellrechnungen ist im Zentrum des durch den Lösungsbergbau induzierten Senkungstrog nach 20 Jahren Betriebszeit eine kumulative maximale Senkung von ca. 10 cm zu erwarten. Dies entspricht einer maximalen Senkungsrate von ca. 5 mm/a [7].

Die in der aktuellen Messkonfiguration seit 2002 jährlich durchgeführten Senkungsmessungen zeigen seit ca. 2015 (örtlich auch bereits seit ca. 2011) in den Solfeldetappen Sulz 2, Sulz 3 und Sulz 4 an zahlreichen Orten eine deutliche Zunahme der Senkungsrate. Exemplarisch kann die Zunahme der Senkungsrate am Fixpunkt 472S abgelesen werden, der im Bereich des Bohrplatzes der Produktionsbohrung S112 liegt (Abbildung 5). Die für den Zeitraum 2016 – 2021 gemittelte, jährliche Senkungsrate beläuft sich auf ca. 18 mm/a, was mehr als dem Dreifachen der numerisch simulierten, maximalen Senkungsrate entspricht.

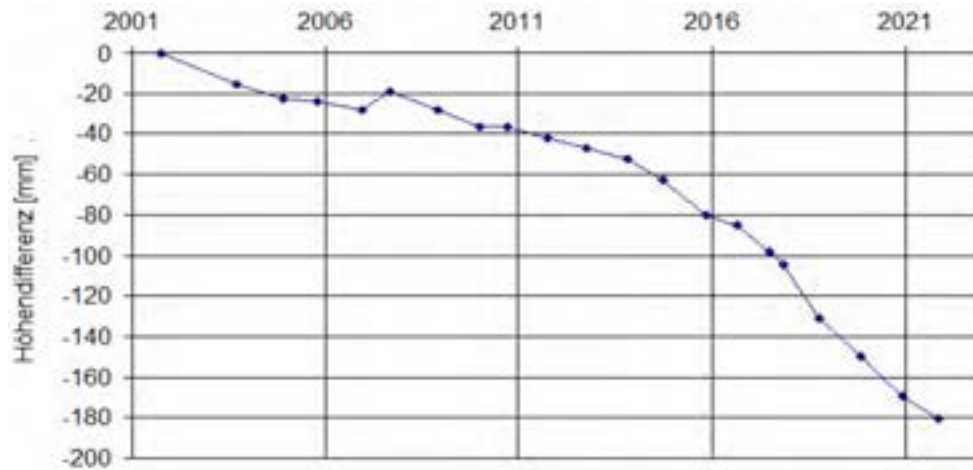


Abbildung 5: Senkungsverlauf für den Messpunkt 472S, der im Bereich der Produktionsbohrung S112 (Sulz 3) liegt. Seit ca. 2015 ist eine deutliche Zunahme der Senkungsrate erkennbar. Die gemittelte jährliche Senkungsrate für den Zeitraum 2016 - 2021 beträgt ca. 18 mm/a. Aus [8].

Eine Beschleunigung der Senkungsraten wird in den Solfeldetappen Sulz 2, Sulz 3 und Sulz 4 seit ca. 2015 praktisch flächig beobachtet. Das heisst, dass seit ca. 2015 an vielen Messpunkten Senkungen > 10 mm/a und an vereinzelt Messpunkten Senkungen > 20 mm/a nachgewiesen werden.

Bemerkenswert ist, dass im Rahmen der letzten Folgemessung im Dezember 2021 an zwei unmittelbar benachbarten Messpunkten (479S und D1, Sulz 4, in der Nähe des Bohrplatzes der Produktionsbohrung S126) signifikante Hebungen gemessen wurden (Abbildung 6). Die Hebungsraten belaufen sich auf 37 mm/a und 48 mm/a.

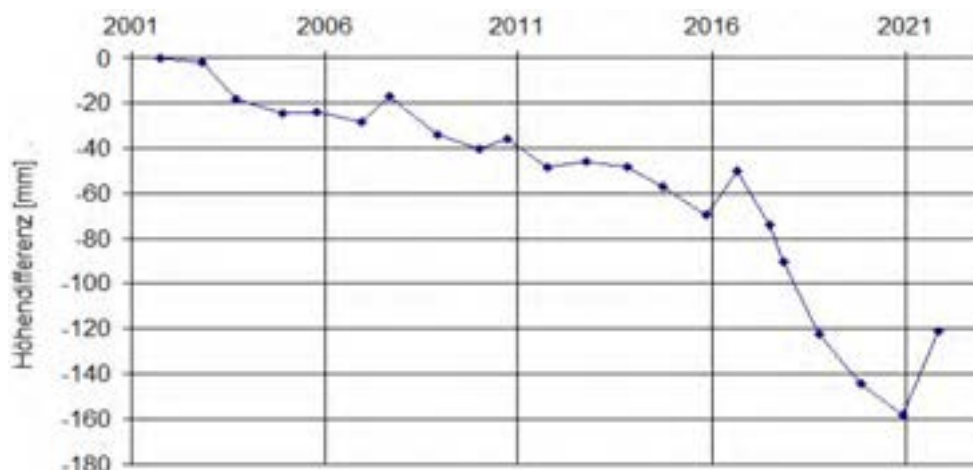


Abbildung 6: Senkungsverlauf für den Messpunkt 479S, der im Bereich der Produktionsbohrung S126 (Sulz 4) liegt. Von 2016 – 2020 war nach einer kurzfristigen Hebung eine deutliche Zunahme der Senkungsrate erkennbar. Im Rahmen der letzten Folgemessung im Dezember 2021 wurde eine Hebungsrates von 37 mm/a ermittelt. Aus [8].

#### 4.1.2 Verschiebungen

Verschiebungen wurden im Gebiet Eigental-Sulz-Grosszinggibrunn bislang mittels zweier Folgemessungen gemessen. Es werden für die bislang zweijährige Messperiode praktisch an allen Messpunkten signifikante Verschiebungen von 2 – 22 mm festgestellt.

Überraschenderweise sind die gemessenen Verschiebungen dabei mit grosser Mehrheit in den Sektor NNW – NNE gerichtet. Im Bereich des Solfelds Sulz entspricht diese Verschiebungsrichtung mehr oder weniger dem topografischen Gefälle. Weiter nördlich, im Gebiet Zinggibrunn, zeigen die NNW – NNE gerichteten Verschiebungsvektoren hingegen in den Hang hinein.

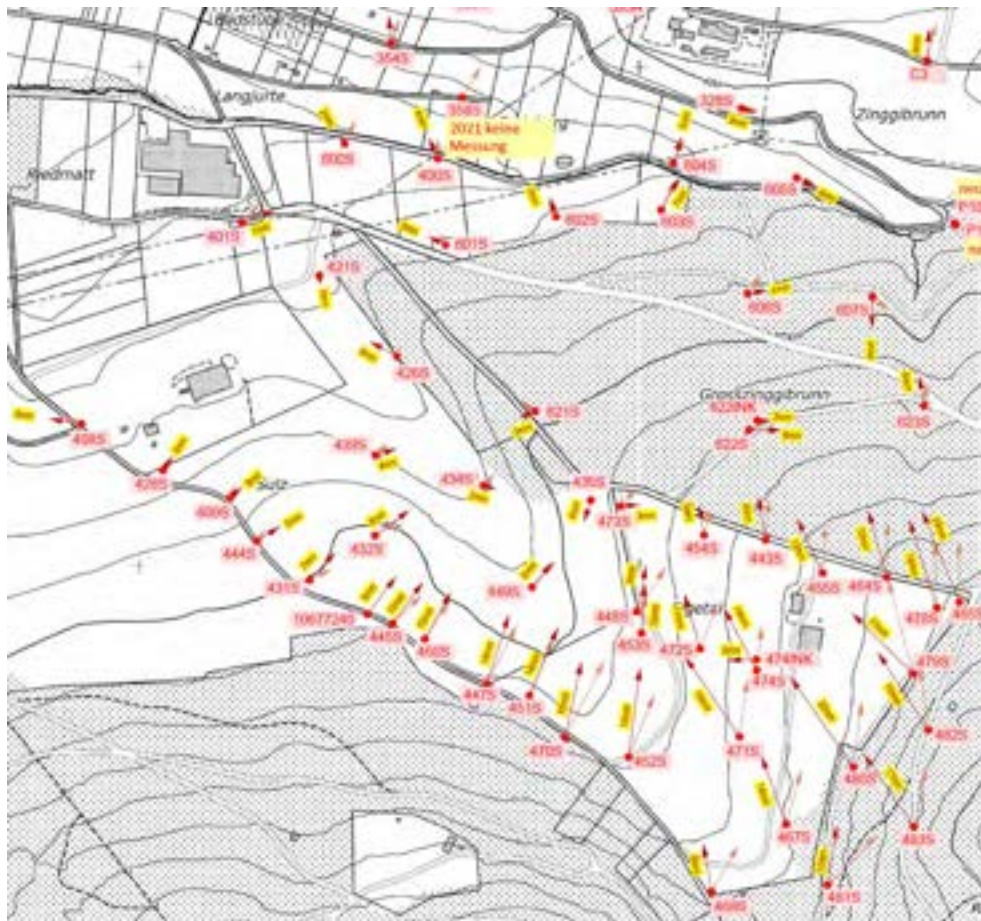


Abbildung 7: Gemessene Verschiebungsvektoren 2019 – 2020 (rosa) und 2019 – 2021 (rot) im Bereich des Solfelds Sulz (Karte nicht massstäblich). Die gemessene Verschiebung für die bislang zweijährige Messperiode beträgt im Bereich des Solfelds Sulz zumeist 2 – 22 mm. Nördlich an das Solfeld Sulz angrenzend zeigen die Bewegungsvektoren in den Gegenhang hinein. Aus [9].



#### 4.1.3 Visuelle Beurteilung

Das Solfeld Sulz weist eine ausgeprägte Topografie aus. Aufgrund der Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen ist die Geländeoberfläche zudem unruhig und einem steten Wandel unterworfen.

Visuell können an der Geländeoberfläche bislang keine Anzeichen für übermäßige Deformationen festgestellt werden (keine Gebäuderisse, keine Geländestufen o.ä.).

#### 4.2 Zwischenresultate zum Zustand der Produktionsbohrungen

Im Rahmen der aktuell laufenden *cased-hole logging* Kampagne sind bis dato 12 der insgesamt 25 Produktionsbohrungen untersucht worden. Die bis anhin ausgewerteten Logs lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die letzte zementierte Rohrtour (LZRT, 8 5/8" resp. 9 5/8") ist oft über weite Strecken stark korrodiert. Teilweise sind Lochfrasskorrosion und Spaltkorrosion erkennbar.
- Vereinzelt sind Verrohrungen abgerissen und in die Kavernen gefallen.
- Es gibt Hinweise auf ungenügende Zementation und damit verbundenem *flow behind casing*.
- Es finden vertikale Fluidströmungen («Frischwasser») in die Kavernen statt, die in den Kavernen zu Nachsoleffekten führen können.

Aufgrund der Beobachtungen ist davon auszugehen, dass die mechanische und hydraulische Integrität der Produktionsbohrungen bei den meisten Bohrungen stark beeinträchtigt resp. nicht gegeben ist (Leckagen). Der Ist-Zustand ist nur vereinzelt akzeptabel, generell schlecht bis vereinzelt sogar besorgniserregend. Erschwerend hinzu kommt die Tatsache, dass die bestehenden Bohrungslebensläufe teilweise unvollständig sind.

#### 4.3 Zwischenresultate Kavernengeometrien und Kavernenentwicklungen

Die aus Kavernenintegritätsüberlegungen relevantesten Abweichungen der Ist-Geometrien der Kavernen zu deren Soll-Zustand betreffen (1) die Mächtigkeit resp. das Nicht-Vorhandensein der Salzscheibe im Kavernen-Hangenden, (2) die laterale Ausdehnung der einzelnen Kavernen, (3) die verbleibenden Pfeilmächtigkeiten zwischen benachbarten Kavernen sowie (4) das generelle Vorhandensein von miteinander verbundenen Einzelkavernen zu sogenannten «Galeriekavernen» [4].

Im Rahmen der laufenden Zustandserhebungen (*cased hole logging* und Kavernenvermessung) wurden im Januar und Februar 2022 Teilverbrüche in zwei Kavernen entdeckt.

#### Bohrung / Kaverne S109

Die Bohrung ist aktuell nur noch bis in eine Teufe von 349 m befahrbar, der Rohrschuh der LZRT lag gemäss Ausbauprotokoll bei 356.2 m. Der unterste Teil der LZRT ist abgerissen.

Videoaufnahmen zeigen in einer Teufe von 349 m lose Blöcke. Die Höhe des Verbruchs kann aufgrund der fehlenden Befahrbarkeit nicht ermittelt werden.



Abbildung 8: Videoaufnahme (axial nach unten, unterhalb des Rohrschuhs) vom 17.02.2022 der Produktionsbohrung S109 in einer Teufe von 349 m. Es sind lose Blöcke zu erkennen, woraus sich ein Teilverbruch der ursprünglichen Kaverne ableiten lässt. Der unterste Teil der LZRT ist abgerissen. Bohrlochaufnahme: Terratec Geophysical Services.

#### Bohrung / Kaverne S126

Ein deutlich grösserer Kavernenteilverbruch wurde in S126 festgestellt. Das aktuelle Rohrende der LZRT liegt bei ca. 330 m, der ursprüngliche Rohrschuh lag bei 391 m, somit fehlen gut 60 m der LZRT.

Bei 330 m ist die Vermessungssonde in einen grossen Hohlraum eingefahren, dessen Volumen beträgt ca. 25'400 m<sup>3</sup>. Das Dach des Hohlraums ist gegen S geneigt

und befindet sich im Dachbereich der evaporitischen Zeglingen-Formation (Dolomitzone und Obere Sulfatzone, Abbildung 9). Der Hohlraum ist mit (Gips-, Anhydrit-, Calcit- und Halit-) gesättigtem Fluid gefüllt und aufgrund seiner Erstreckung bis in die Dolomitzone mit dem Muschelkalk-Aquifer verbunden.

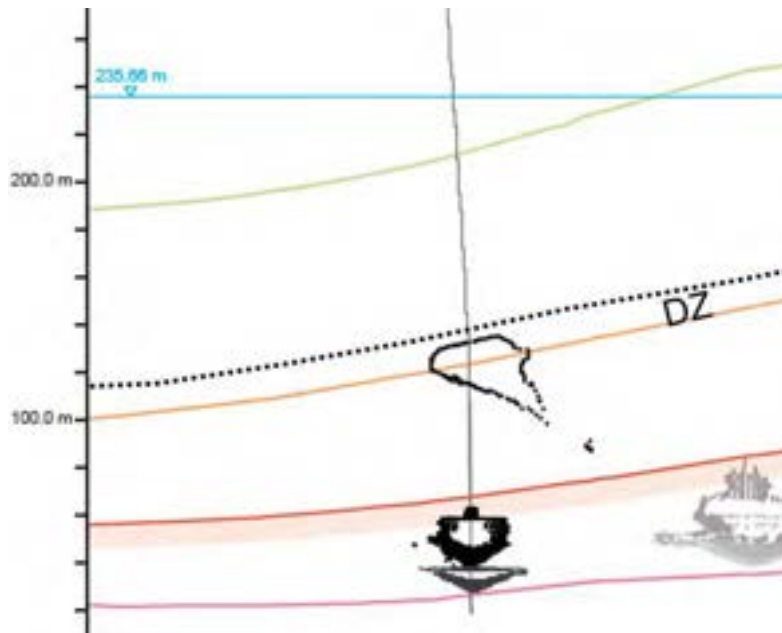


Abbildung 9: S-N-Profil (nicht massstäblich) durch die Kaverne S126. Unten ist die letzte durchgeführte Hohlraumvermessung der ursprünglichen Kaverne sichtbar, diese war zum Zeitpunkt der Messung bis fast in das Dach des Salzlagers (rote Linie) gesolt. Der durch den Kavernenteilverbruch entstandene und vermessene Hohlraum ist oben dargestellt. Er reicht vermutlich bis in das Dach der Dolomitzone («DZ»). Am rechten Bildrand ist die Kaverne S125 angedeutet.

Um ein erstes Verständnis zur zeitlichen Entwicklung der Verbruchprozesse in S126 zu erhalten, wurde sechs Wochen nach der Entdeckung des neu entstandenen Hohlraums eine Folgevermessung vorgenommen. Dabei wurde im Firstbereich des Hohlraums eine messbare Erweiterung des Hohlraums nachgewiesen.

#### 4.4 Vorläufiges Fazit Ist-Zustand Solfeld Sulz

Aufgrund der bis dato vorliegenden Resultate kann folgendes vorläufiges Fazit zum Ist-Zustand des Solfelds Sulz gezogen werden.

- Die Produktionsbohrungen sind generell in einem schlechten und teilweise besorgniserregenden Zustand.
- Die Kavernengeometrien entsprechen in mehreren Aspekten nicht den gebirgsmechanischen Vorgaben.

- Die im Untergrund ablaufenden Prozesse sind noch nicht vollständig verstanden.
- Es treten Prozesse auf (z.B. ungewollte Nachsolung), die kontinuierlich weiterlaufen und aktuell nicht unter Kontrolle sind.
- Es können daraus zwei Gefährdungsbilder abgeleitet werden:
  1. Starke Oberflächendehformationen bis hin zu Tagbrüchen (kaminartiger Verbruch bis an die Geländeoberfläche).
  2. Versalzung des Muschelkalk-Aquifers infolge undichter oder kollabierter Salzkavernen und/oder undichter Produktionsbohrungen.

## 5. Oberflächendeformationen

### 5.1 Einleitung und Grundlagen

In den folgenden Kapiteln werden konzeptuelle Überlegungen hinsichtlich der Stabilität von Kavernen im Schichtsalz vermittelt sowie aus der Fachliteratur bekannte Analogiebeispiele eingeführt. Anschliessend wird auf dieser Basis in Kapitel 0 eine Gefährdungs- und Risikoanalyse «Oberflächendeformationen» vorgenommen.

#### 5.1.1 Betrachtungsperimeter

Der Betrachtungsperimeter «Oberflächendeformationen» umfasst das gesamte Solfeld Sulz sowie einen 100 m breiten Puffer um die äussersten Produktionsbohrungen (Abbildung 10). Der 100 m breite Puffer wird aufgrund eines möglichen Kavernenradius von 50 m plus 50 m Sicherheitszuschlag festgelegt.



Abbildung 10: Der Betrachtungsperimeter «Oberflächendeformationen» (rot, schraffiert, nicht massstäblich). Das Solfeld Sulz ist rot umrandet, Gemeindegrenzen sind lila dargestellt.

### 5.1.2 Stabilität von Kavernen im Schichtsalz

Eine schematische Darstellung des Lösungsbergbauverfahrens mit der Nomenklatur der wichtigsten Haupttragelemente des die Kavernen umgebenden Gebirges findet sich in Abbildung 11.

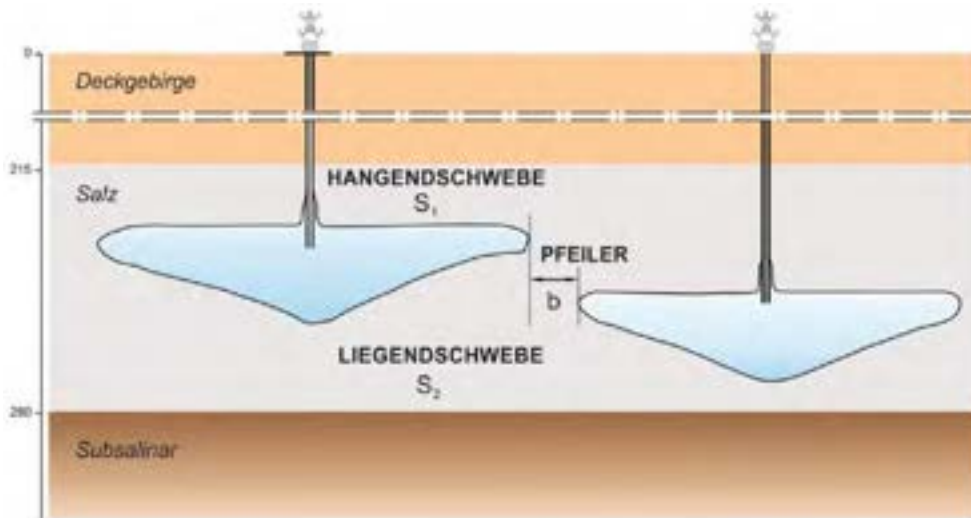


Abbildung 11: Schema Lösungsbergbau und Nomenklatur der wichtigsten Haupttragelemente des die Kavernen umgebenden Gebirges. Aus [10].

Für die nachfolgenden Erläuterungen sind einführend einige Definitionen notwendig. Ein «**Senkungstrog**» ist ein Trog an der Geländeoberfläche, der sich über jedem Hohlraum im Untergrund mit der Zeit entwickelt. Das vertikale Profil eines Senkungstrogs ist nur wenig ausgeprägt, mit geringen Neigungen an den Trogrändern von lediglich wenigen mm/m. In Einzelfällen geben Stauchwülste oder Zerrspalten an der Erdoberfläche Hinweise zu Diskontinuitäten bei den mit den Senkungen assoziierten horizontalen Verschiebungen [12].

Ein «**Erdfall**» (auch **Tagbruch** oder **Kraterbildung**) wird durch die abwärts gerichtete Verschiebung eines Gebirgsblocks (Kolbenmodell) oder die horizontal einwärts zu einer zentralen Öffnung hin gerichtete Verschiebung von kohäsionslosem Material (Sanduhrmodell) gebildet. Bei einem Erdfall treten scharfe Diskontinuitäten in den vertikalen Deformationsbeträgen von mehreren Metern auf, welche an der Erdoberfläche zu der Bildung von charakteristischen Geländestufen führen [12].

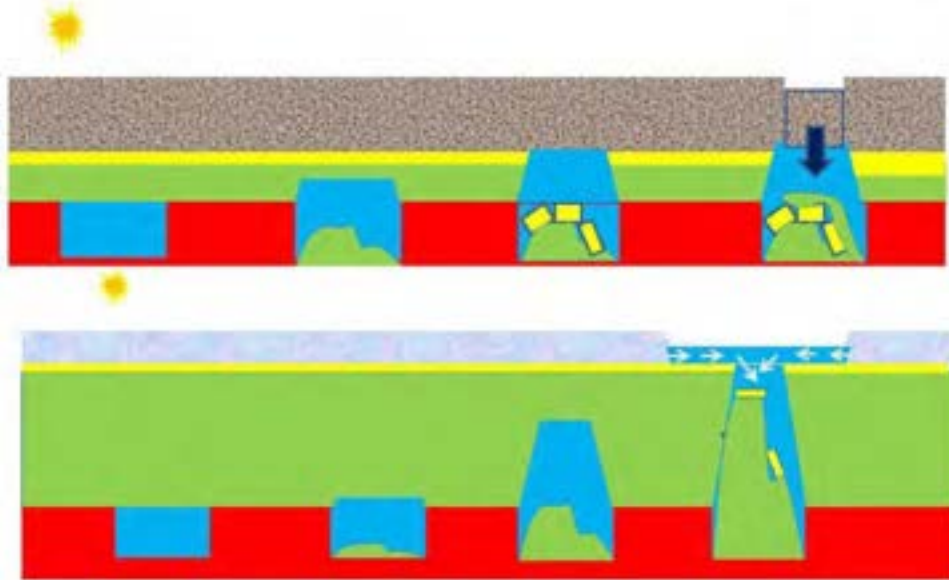


Abbildung 12: Kategorisierung von Erdfällen (Kraterbildung). Kolbentyp (oben) und Sanduhrty (unten). Aus [12].

Grundsätzlich kann über einer dicht verschlossenen Kaverne im Salzgestein kein Erdfall eintreten. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass eine ausreichend mächtige Sicherheits-Salzscheibe im Hangenden der Kaverne vorhanden ist (Abbildung 11), die auch bei einem sich durch die einsetzende Konvergenz aufbauendem Überdruck in der verschlossenen Kaverne und druckgetriebener Perkolation<sup>2</sup> ihre mechanische Integrität bewahrt und ihr Tragverhalten langfristig aufrechterhält [11].

Erdfälle sind jedoch aus vielen Gebieten mit unterirdischem Rohstoffabbau bekannt (siehe z.B. [11], [12], [13]), auch aus Gebieten wo Steinsalz im Lösungsbergbauverfahren gewonnen wird. Dabei folgt die Entstehung von Erdfällen über Kavernen grundsätzlichen geomechanischen Versagensabläufen [14]:

1. Im Salzlager wird ein Hohlraum mit ausreichend resp. zu grosser Spannweite gesolt.
2. Die Salz-Sicherheitschwebe im Hangenden der Kaverne verliert ihre Integrität, wird weggesolt oder stürzt in die Kaverne.

<sup>2</sup> Druckgetriebene Perkolation: fluiddruck-getriebene Generierung von hydraulischen Fließwegen entlang von Diskontinuitäten im mikro- und makroskopischen Massstab im Salzgebirge (Korn Grenzen, Schichtflächen), wenn die Fluiddrucke innerhalb der Kaverne die minimale Gebirgsspannung übersteigen; siehe ExB-4 Gebirgsmechanische Bewertung.

3. Das Deckgebirge kann den unter Soledruck stehenden Hohlraum im Salzlager nicht mehr bruchfrei überspannen.
4. Im geklüfteten Deckgebirge über dem Hohlraum setzt unter der Wirkung des herrschenden Sole- bzw. Kluftwasserdrucks der Prozess des Blockabgleitens ein (kaminartige Verbrüche).

### **5.1.3 Analyse bekannter Tagbrüche über Salzkavernen weltweit**

Weltweit sind zahlreiche Tagbrüche über Salzkavernen im Schichtsalz bekannt und geomechanisch untersucht worden. Im Rahmen einer solchen Aufarbeitung wurde erkannt, dass als Ursache solcher Tagbrüche in der Regel das Hochsolen der Kaverne bis zum Dach des Salzlagers, d.h. der Verlust einer Salz-Sicherheitsschwebe im Hangenden der Kaverne, anzusehen ist [12]. Dadurch wird das Deckgebirge im Hangenden des Salzlagers durch die gesättigte Sole aufgeweicht resp. verwittert und es kommt im Bereich der Kavernenfirste zu kaminartigen Teilverbrüchen. Diese Prozesse laufen verhältnismässig langsam ab.

Die Analyse bekannter Tagbrüche über Schichtsalzkavernen lässt somit die Schlussfolgerung zu, dass dem Stehenlassen einer Salz-Sicherheitsschwebe im Kavernenhangenden eine entscheidende Bedeutung für die langfristige Kavernenstabilität zukommt.

### **5.1.4 Tagbruch Kaverne R31 (Solfeld Neuland, Saline Riburg)**

Am 6. Dezember 1986 ereignete sich im Solfeld Neuland der Saline Riburg direkt neben der Kantonsstrasse zwischen Rheinfelden und Möhlin ein Tagbruch (Abbildung 13). Der dabei entstandene Erdtrichter hatte eine Fläche von rund 7'200 m<sup>2</sup> bei einer maximalen Absenkung der Geländeoberfläche von bis zu 6 m [15].





Abbildung 13: Erdfall / Tagbruch über der Solkaverne R31 der Saline Riburg (Rheinfelden) vom 6. Dezember 1986. Quelle: Neue Fricktaler Zeitung.

Der Salzabbau in der Produktionsbohrung R31 erfolgte seinerzeit durch das aus heutiger Sicht überholte Drucklaugungs-Verfahren. Dabei wurde Frischwasser für den Solprozess unter Druck in die Laugungskaverne verpresst. In der Produktionsbohrung R31 führte dies zu einer unkontrollierten lateralen Ausdehnung der Kaverne in nordwestlicher Richtung.

Die zu grosse Ausdehnung sowie das Fehlen einer Salz-Sicherheitsschwebe sorgten dafür, dass das darüber liegende Deckgebirge die Kaverne nicht länger ohne Bruchbildung überspannen konnte. Infolgedessen kam es zur Ausbildung von Druck-Entlastungsklüften und zur Abnahme des Kavernendrucks in der stillgelegten Produktionsbohrung R31. Dies hatte einen Stabilitätsverlust der Kaverne zur Folge, der schliesslich zum Tagbruch führte. Dabei kam es zu einem zapfenartigen Absacken des über dem Hohlraum liegenden Deckgebirges, welches als Block und mit relativ scharfer räumlicher Ausdehnung absackte (Abbildung 14). Gleichzeitig wurde Sole aus der Kaverne, entlang neu entstandener Wasserwegsamkeiten (Klüfte im Deckgebirge), in den Grundwasserleiter im Hangenden der Kaverne verdrängt.

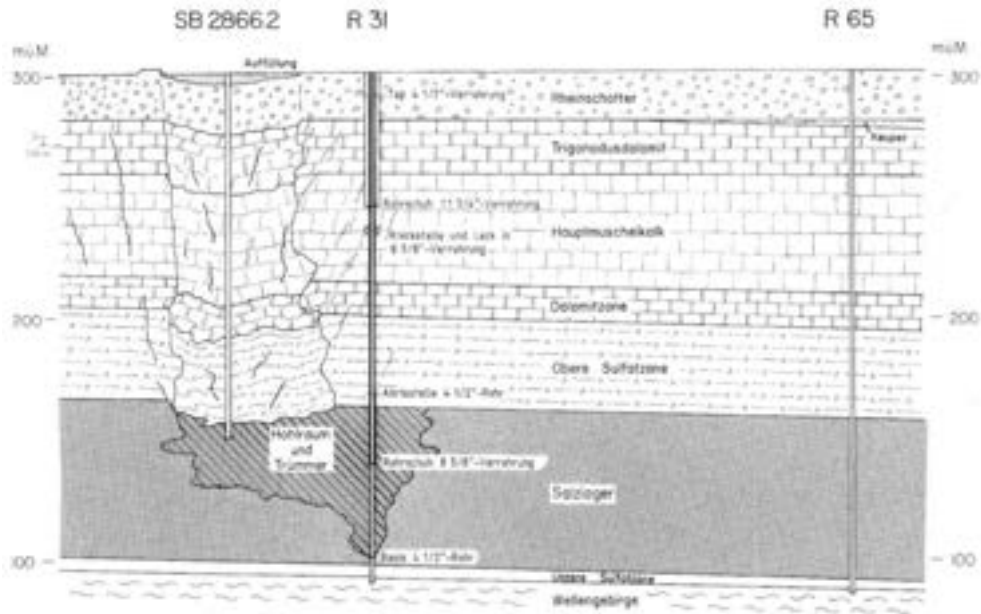


Abbildung 14: Geologisches Profil durch den Tagbruch über der Solkaverne R31 des Solfelds Neuland (Saline Riburg). Aus [15].

Das Beispiel des Tagbruchs R31 zeigt klare Gemeinsamkeiten mit den in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Ereignissen:

- Eine **zu grosse Firstspannweite** sowie eine **fehlende Salz-Sicherheits-schwebe** zusammen mit einem ungünstigen Trennflächengefüge in den kompetenten Abschnitten des Deckgebirges sind die Hauptursachen für den Einsturz der Kaverne.
- Die resultierende Kraterbildung kann dem **Kolbentyp** zugeordnet werden. Das Deckgebirge über dem Kavernenverbruch ist als **weitestgehend intakter Block** in den Hohlraum gesackt.

### 5.1.5 Konzeptuelle Überlegungen zur Entwicklung von Tagbrüchen

Bevor ein Tagbruch eintritt, migrieren instabile Solkavernen durch progressive, kaminartige Verbrüche nach oben. Es bildet sich über der ursprünglichen Kaverne ein sogenannter Kamin (Bruchschlot) aus (Abbildung 15).

Die Kavernenmigration dauert so lange an bis

- der Kamin kompetentes / tragfähiges Gebirge erreicht,
- Kaverne und Kamin vollständig mit Gesteinstrümmern gefüllt sind oder
- der Kamin die Geländeoberfläche erreicht und dort einen Krater bildet [16].

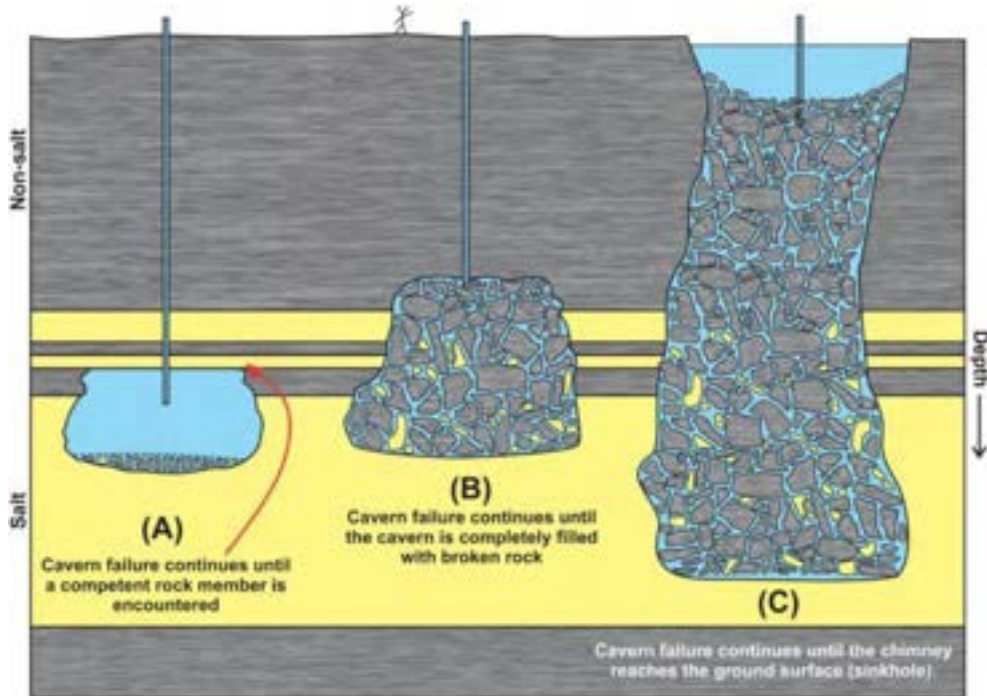


Abbildung 15: Kavernenmigration durch kaminartige Verbrüche bei instabilen Solkavernen. Der Verbruch dauert an bis: (A) der Kamin kompetentes / tragfähiges Gebirge erreicht, (B) Kaverne und Kamin vollständig mit Gesteinstrümmern gefüllt sind oder (C) der Kamin die Geländeoberfläche erreicht und dort einen Krater bildet. Aus [16].

Durch die progressive Bruchbildung erfährt das Deckgebirge eine Auflockerung durch Erhöhung des Hohlraum-/Porenanteils. Wie oben beschrieben, dauern die Verbruchprozesse so lange an, bis der entstehende Hohlraum vollständig mit Gesteinstrümmern aufgefüllt ist. Um abzuschätzen, ob sich der kaminartige Verbruch bis an die Geländeoberfläche fortsetzen wird, müssen folgende Randbedingungen bekannt sein: (1) Kavernenvolumen, (2) Form des Bruchschlots (abhängig von den rheologischen Eigenschaften des Deckgebirges) und (3) Auflockerungsfaktor des Deckgebirges.

## 5.2 Gefährdungs- und Risikoanalyse «Oberflächendeformationen»

### 5.2.1 Schutzgüter und Schutzobjekte

Im Betrachtungsperimeter Abbildung 10 befinden sich hinsichtlich der Prozesse Oberflächendeformationen und Tagbruch folgende Schutzgüter bzw. Schutzobjekte:

- Südlichste Bereiche des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn der SSAG.
- Inaktives Solfeld Sulz der SSAG.
- Bestehende erdverlegte Leitungen (Frischwasser, Sole, Stickstoff, Strom) der SSAG.
- Stickstoff-Tank der SSAG beim Eigentahof.
- Pumpstation der SSAG an der Zinggibrunnstrasse.
- Liegenschaft Eigentahof inkl. Ökonomiegebäude.
- Liegenschaft Sulzhof.
- Hochspannungsfreileitungen und -masten.
- Verschiedene Strassen und Wege, insbesondere Strasse zum Sulzchopf.
- Öffentliche Quellen 21.4.A, 21.6.A, 21.7.A und 21.5.E und private Quellen 21.8.F, 21.10.E und 21.11.E

### 5.2.2 Risikoanalyse

#### 5.2.2.1 Gefährdung

Die Risikoanalyse wird bezogen auf die genannten Schutzgüter ausgeführt und basiert auf der folgenden Gefährdung (Tabelle 1).

Tabelle 1: Gefährdungsanalyse Oberflächendeformationen.

Gefährdungsbild	Gefährdungsursachen	Schadensbild / Wirkung
Hohe Spannungsumlagerungen im Untergrund des Solfelds Sulz und dadurch stark erhöhte Oberflächendeformationen (Subsidenz) mit Senkungsraten >> 10 mm/a (lineare Deformationen) bis hin zu Kraterbildungen (nicht-lineare Deformationen).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhöhte Konvergenzraten in den stillgelegten Solkavernen infolge von Leckagen (Druckaufbau in den Kavernen nicht möglich).</li> <li>- Kaminartige Teilverbrüche über Solkavernen.</li> </ul>	Verschiedenartige Bergschäden (hervorgerufen z.B. durch Senkungen, Schiefstellungen, Krümmungen, Zerrungen, Pressungen etc.).

## 5.2.2.2 Risiko

Ausgehend von der Gefährdung wird das Risiko für die genannten Schutzobjekte bzw. Schutzgüter anhand zweier hypothetischer Szenarien beurteilt:

- Szenario 1: Status-quo  
 Dieses Szenario beschreibt den seit ca. 2015 gemessenen Zustand der Oberflächendeformationen im Betrachtungsperimeter wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Es werden praktisch flächig linear ablaufende Oberflächendeformationen mit Senkungsraten von oft > 10 mm/a und vereinzelt > 20 mm/a nachgewiesen.
- Szenario 2: Tagbruch mit Kraterbildung  
 Dieses Szenario beschreibt ein oder mehrere Tagbruchereignisse im Betrachtungsperimeter, bei denen an der Geländeoberfläche scharfe Diskontinuitäten in den vertikalen Deformationsbeträgen von mehreren Metern resultieren, welche an der Erdoberfläche zu der Bildung von charakteristischen Geländestufen führen.

Die Risikobeurteilung erfolgte im Rahmen von GEOTEST-intern geführten Diskussionen und Abwägungen mit Hilfe einer 4x4-Risikomatrix unter Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit und der Auswirkungen.

Eintretenswahrscheinlichkeit	4 sicher	1 / 4	2 / 4	3 / 4	4 / 4
	3 sehr wahrscheinlich	1 / 3	2 / 3	3 / 3	4 / 3
	2 wahrscheinlich	1 / 2	2 / 2	3 / 2	4 / 2
	1 unwahrscheinlich	1 / 1	2 / 1	3 / 1	4 / 1
		1 unbedeutend	2 moderat	3 bedeutend	4 schwerwiegend
		Auswirkungen			

**Grün = geringes Risiko** Akzeptable Situation. Keine weiteren bzw. zusätzlichen Massnahmen erforderlich.

**Gelb = mittleres Risiko** Zusätzliche Überwachungsmaßnahmen notwendig.

**Rot = hohes Risiko** Nicht akzeptable Situation. Integrale Massnahmenplanung erforderlich (Überwachungsmaßnahmen und Massnahmen zur Kontrolle der Gefährdung).

Abbildung 16: Verwendete 4x4-Risikomatrix.

### 5.2.2.3 Risikobeurteilung Szenario 1 «Status-quo»

Es wird bei Szenario 1 davon ausgegangen, dass im Bereich des Solfelds Sulz Oberflächendeformationen in der Grössenordnung der aktuell gemessenen Raten auftreten. Beurteilt wird die Wahrscheinlichkeit von negativen Auswirkungen sowie das Schadensausmass auf die definierten Schutzobjekte, jedoch nicht die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses Szenarios.

Schutzobjekt / Schutzgut	Beurteilung	A*	W*	Risiko
Aktives Solfeld Grosszinggibrunn (südlichste Teile)	Bei anhaltend hohen Subsidenzraten auch im Bereich von aktiven Produktionsbohrungen können einzelne Komponenten des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn Schaden nehmen (z.B. Leitungen für verschiedene Medien, Produktionsbohrungen etc.). Dies kann die Salzproduktion bedeutend einschränken.	2	2	mittel 2 / 2
Inaktives Solfeld Sulz	Bei anhaltend hohen Subsidenzraten können die zu verwahrenden inaktiven Produktionsbohrungen des Solfelds Sulz weitere Schäden erleiden (insbesondere Deformationsschäden an Verrohrungen).	2	2	mittel 2 / 2
Erdverlegte Leitungen der SSAG (Wasser, Sole, Stickstoff, Strom)	Bei anhaltend hohen Subsidenzraten können die erdverlegten Leitungen Schäden nehmen, so dass deren Funktionstüchtigkeit eingeschränkt ist. Bei Leitungen, die ausser Betrieb sind, ist die Auswirkung daraus unbedeutend. Falls die Leitungen für den Betrieb des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn notwendig sind, so sind die Auswirkungen bedeutend. Die Leitungen (insbes. Hauptsoleleitung) werden aktuell bereits überwacht.	3	2	mittel 3 / 2
Stickstoff-Tank der SSAG beim Eigentalhof	Bei grossen differentiellen Senkungen im Bereich des Stickstoff-Tanks können Schiefstellungen eintreten. Wir gehen aber nicht davon aus, dass dies zu Schäden an der Anlage führt. Der Stickstoff-Tank wird mittels Nivellement periodisch überwacht.	1	2	gering 1 / 2
Pumpstation der SSAG an der Zinggibrunnstrasse	Die bislang im Bereich der Pumpstation gemessenen Senkungsraten sind < 10 mm und auch die horizontalen Verschiebungen sind gering. Schäden an der Pumpstation sind bei diesem Szenario unwahrscheinlich.	1	1	gering 1 / 1
Liegenschaft Eigentalhof	Bei der Liegenschaft Eigentalhof sind die seit 2015 gemessenen Senkungen insgesamt hoch, aber flächenhaft gesehen gleichmässig (nur geringe differentielle Bewegungen). Bislang sind keine Schäden an der Gebäudesubstanz bekannt.	2	1	gering 2 / 1
Liegenschaft Sulzhof	Bei der Liegenschaft Sulzhof sind die Senkungen bislang < 10 mm/a. Schäden an der Gebäudesubstanz sind keine bekannt.	2	1	gering 2 / 1
Hochspannungsfreileitungen und -masten	Fünf Masten befinden sich in den nördlichsten Abschnitten des Betrachtungsperimeters. Die dort gemessenen Deformationen sind gering und flächenmässig einheitlich (nur geringe differentielle Senkungen). Massgebliche Schäden an den Leitungsmasten sind demnach unwahrscheinlich.	1	1	gering 1 / 1

Verschiedene Strassen und Wege, insbesondere Strasse zum Sulzchopf	Die im Betrachtungsperimeter liegenden Strassen und Wege weisen mehrheitlich ein deutliches Gefälle auf. Insbesondere die Deformationskomponenten Schiefstellung, Zerrung, Pressung und Krümmungsveränderungen können zu Schäden an den bestehenden Strassen und Wegen führen (z.B. Veränderungen von Quergefällen und damit verbunden Verschlechterung des Regenwasserabflusses, Risse in der Strassendecke, Verformung der Bitumendecke, Reissen oder Stauen von Kanalrohren etc.). Im aktuellen Zustand sind örtlich Schäden an Strassen und Wegen sehr wahrscheinlich.	1	3	mittel 1 / 3
Öffentliche und private Quellen	Aufgrund der ausgeprägten Geländetopografie sind keine schädlichen Auswirkungen auf die Quellschüttungen zu erwarten. Da die räumliche Ausdehnung der Fassungsbauwerke klein ist, sind auch da keine signifikanten Schäden zu erwarten.	1	1	gering 1 / 1

A = Auswirkungen (1 = unbedeutend, 2 = moderat, 3 = bedeutend, 4 = schwerwiegend)

W = Eintretenswahrscheinlichkeit (1 = unwahrscheinlich, 2 = wahrscheinlich, 3 = sehr wahrscheinlich, 4 = sicher)

### 5.2.2.4 Risikobeurteilung Szenario 2 «Tagbruch»

Es wird bei Szenario 2 davon ausgegangen, dass im Bereich des Solfelds Sulz ein oder mehrere Tagbruchereignisse stattfinden. Beurteilt wird die Wahrscheinlichkeit von negativen Auswirkungen sowie das Schadensausmass auf die definierten Schutzobjekte, jedoch nicht die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses Szenarios.

Schutzobjekt / Schutzgut	Beurteilung	A*	W*	Risiko
Aktives Solfeld Grosszinggibrunn (südlichste Teile)	Ein oder mehrere Tagbruchereignisse im Solfeld Sulz können sich direkt auf die südlichsten Teile des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn ausdehnen oder für den Betrieb des Solfelds wichtige Anlagen zerstören. Ein Einstellen des Solfelds Grosszinggibrunn wäre bei einem Tagbruchereignis zumindest kurzfristig wahrscheinlich.	4	2	gross 4 / 2
Inaktives Solfeld Sulz	Ein oder mehrere Tagbruchereignisse im Solfeld Sulz würden die betroffenen Produktionsbohrungen zerstören. Dies hätte insbesondere Auswirkungen auf die langfristige Verwahrung der Bohrungen.	2	4	gross 2 / 4
Erdverlegte Leitungen der SSAG (Wasser, Sole, Stickstoff, Strom)	Ein oder mehrere Tagbruchereignisse im Solfeld Sulz würde mit grosser Wahrscheinlichkeit erdverlegte Leitungen der SSAG zerstören. Bei Leitungen, die ausser Betrieb sind, ist die Auswirkung daraus unbedeutend. Falls die Leitungen für den Betrieb des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn notwendig sind, so sind die Auswirkungen auf den Produktionsbetrieb bedeutend.	3	3	gross 3 / 3
Stickstoff-Tank der SSAG beim Eigentalhof	Ein Tagbruchereignis im Bereich des Stickstoff-Tanks würde diesen wahrscheinlich komplett zerstören. Die Auswirkungen wären hingegen moderat.	2	2	mittel 2 / 2
Pumpstation der SSAG an der Zinggibrunnstrasse	Ein Tagbruchereignis im Bereich der Pumpstation würde die Anlage signifikant schädigen. Ein Weiterbetrieb der Produktion im Solfeld Grosszinggibrunn wäre zumindest mittelfristig nicht möglich.	3	3	gross 3 / 3

Liegenschaft Eigentahof	Ein Tagbruchereignis im Bereich der Liegenschaft Eigentahof würde diesen komplett zerstören. Die Auswirkungen wären bedeutend.	3	4	gross 3 / 4
Liegenschaft Sulzhof	Ein Tagbruchereignis im Bereich der Liegenschaft Sulzhof würde diese komplett zerstören. Die Auswirkungen wären schwerwiegend.	4	4	gross 4 / 4
Hochspannungsfreileitungen und -masten	Ein Tagbruchereignis im Bereich der Leitungsmasten würde diese sehr wahrscheinlich gebrauchsuntauglich machen. Die Auswirkungen beurteilen wir als bedeutend.	3	3	gross 3 / 3
Verschiedene Strassen und Wege, insbesondere Strasse zum Sulzchopf	Ein Tagbruchereignis würde Strassen und Wege im Kraterbereich sowie die darunter verlaufenden Leitungsstränge sehr wahrscheinlich vollständig zerstören. Die Auswirkungen wären moderat.	2	3	mittel 2 / 3
Öffentliche und private Quellen	Ein Tagbruchereignis im Bereich einer Quelfassung würde diese sehr wahrscheinlich zerstören. Da für keine der Quellen eine Schutzzone ausgeschieden ist, beurteilen wir die Auswirkungen als moderat.	2	3	gross 2 / 3

A = Auswirkungen (1 = unbedeutend, 2 = moderat, 3 = bedeutend, 4 = schwerwiegend)

W = Eintretenswahrscheinlichkeit (1 = unwahrscheinlich, 2 = wahrscheinlich, 3 = sehr wahrscheinlich, 4 = sicher)

### 5.2.2.5 Schlussfolgerung Risikoanalyse Oberflächendeformationen

Die für die beiden Szenarien «Status-quo» (Szenario 1) und «Tagbruch» (Szenario 2) vorgenommene Risikoanalyse ist nachfolgend tabellarisch zusammengefasst:

Schutzobjekt / Schutzgut	Risiko Szenario 1	Risiko Szenario 2
Aktives Solfeld Grosszinggibrunn (südlichste Teile)	mittel	gross
Inaktives Solfeld Sulz	mittel	gross
Erdverlegte Leitungen der SSAG (Wasser, Sole, Stickstoff, Strom)	mittel	gross
Stickstoff-Tank der SSAG beim Eigentahof	gering	mittel
Pumpstation der SSAG an der Zinggibrunnstrasse	gering	gross
Liegenschaft Eigentahof	gering	gross
Liegenschaft Sulzhof	gering	gross
Hochspannungsfreileitungen und -masten	gering	gross
Verschiedene Strassen und Wege, insbesondere Strasse zum Sulzchopf	mittel	mittel
Öffentliche und private Quellen	gering	gross

Die Risikoanalyse zeigt die bedeutenden Unterschiede zwischen den beiden hypothetischen Szenarien. Während die Risiken für die definierten Schutzobjekte für Szenario 1 bei Etablierung gezielter Überwachungsmassnahmen im akzeptablen Rahmen bleiben, so resultieren unter der Annahme von Szenario 2 praktisch für alle Schutzobjekte nicht akzeptable Risiken. Das Szenario 2 Tagbruch gilt es daher unter allen Umständen zu vermeiden.



## 6. Grundwasser

### 6.1 Einleitung und Grundlagen

In den folgenden Kapiteln wird, ausgehend von den massgeblichen Grundlagen, ein konzeptuelles hydrogeologisches Modell entwickelt. Dieses konzeptuelle Modell bildet dann die Basis für die Gefährdungs- und Risikoanalyse.

#### 6.1.1 Betrachtungsperimeter

Der Betrachtungsperimeter umfasst ein Gebiet mit folgenden hydrogeologischen Randbedingungen:

- Im Norden bildet der Rhein den Vorfluter. Beim KW Augst liegt der Rheinpegel auf einer Kote von ca. 261 m ü. M. Nach der Staustufe KW Augst bis zum KW Birsfelden liegt die Rheinkote auf ca. 255 m ü. M. Nach dem KW Birsfelden liegt die Rheinkote auf ca. 245 m ü. M.
- Im Westen bildet die Birs die hydrogeologische Begrenzung. Der Birspegel liegt auf einer Kote von ca. 263 m ü. M. In der nahliegenden kantonalen Grundwassermessstation Asprain (21.J.1) liegt der gemittelte Pegelstand im Muschelkalk-Aquifer auf einer Kote von 253.3 m ü. M.
- Im Osten bildet die Ergolz die hydrogeologische Begrenzung. Dort liegen die wasserführenden Schotter in direktem Kontakt mit dem Muschelkalk-Aquifer und weisen eine Kote von ca. 264 m. ü. M (Mittelwasser) auf.

Gegen Süden ist die Abgrenzung weniger eindeutig zu vollziehen. Der Grund dafür ist einerseits die vermutete Aspenrainstörung (Kapitel 6.1.2.1), deren Verlauf im Gelände nur teilweise aufgeschlossen ist und bei der unbekannt ist, inwiefern sie eine stauende oder durchlässige Charakteristik aufweist. Weiter im Südwesten wird der östliche Hauptgraben-Randbruch des Oberrheingrabens erreicht. Auch hier sind die hydraulischen Eigenschaften dieser markanten Nord-Süd-streichenden Bruchstruktur grösstenteils unbekannt.

#### 6.1.2 Geologisch-hydrogeologischer Rahmen

##### 6.1.2.1 Geologie und Tektonik

Der Betrachtungsperimeter liegt im Bereich von zwei grosstektonischen Einheiten (ausführliche Darstellung der regionalen Geologie in [17]):

- Östlicher Hauptgraben-Randbruch des Oberrheingrabens (Rheintalflexur).
- Dinkelberg-Tafeljurascholle, welche eine stark tektonische Zergliederung des Gebirges aufweist (Horst-Graben-Strukturen) (Abbildung 17).

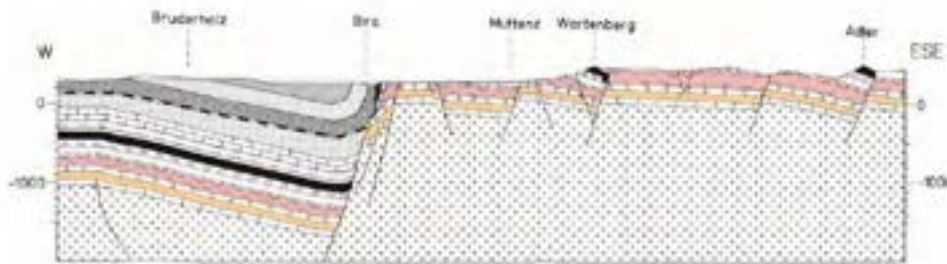


Abbildung 17: Geologisches Querprofil W-ESE durch die Rheintalflexur und die östlich anschließende Dinkelberg-Tafeljurascholle. Orange = Kaiseraugst- und Zeglingen Fm.; Rosa = Keuper-Gruppe (Profil modifiziert nach Gürlé et al. (1987)).

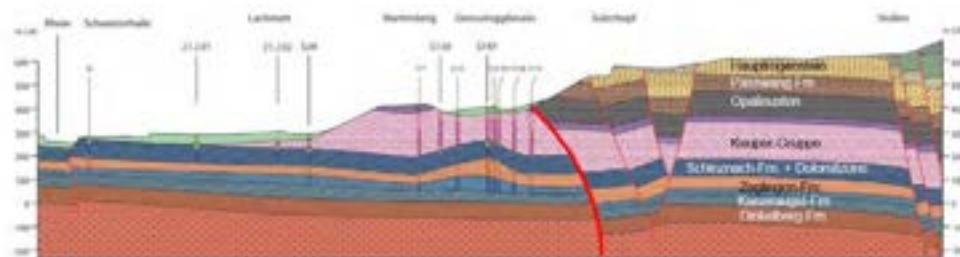


Abbildung 18: Geologisches Längsprofil N-S (1.5-fach überhöht) mit der Aspenrainstörung (rot hervorgehoben) südlich der Solfelder Sulz & Grosszinggibrunn (Profil modifiziert auf der Basis von Bitterli-Brunner & Fischer (1988)).

In N-S-Profil (Abbildung 18) treten als dominante strukturelle Elemente das Adlerhofgewölbe (Antiform im Bereich der Solfelder Sulz & Grosszinggibrunn) sowie südlich davon die Aspenrainstörung in Erscheinung. Die Schichten der Schinznach-Fm. und Dolomitzone (Muschelkalk-Aquifer) liegen im Gebiet Schweizerhalle direkt unter den quartären Rheinschottern und fallen generell leicht nach Süden ein.

### 6.1.2.2 Hydrostratigraphie

Die folgende

Tabelle 2 zeigt die hydrostratigraphischen Einheiten im Betrachtungsperimeter. Wasserführende Members sind blau markiert (ausführliche Darstellung der regionalen Hydrogeologie in [18]).

Tabelle 2: Hydrostratigraphie im Betrachtungsperimeter.

System	Gruppe	Formation	Member (Alte Bezeichnung)	Aquifertyp	
Quartär			Rheinschotter (regional) Gehängeschutt-Ablagerungen (lokal)	Porenaquifer	
	Dogger	Opalinuston	Opalinuston	Aquiclude	
Jura	Lias	Staffelegg-Fm.	Jurensis-Schichten	Aquitard	
			Posidonienschiefer	Aquitard	
			Obliqua-/Numismalis-Schichten	Aquitard	
			Obtus-Tone	Aquiclude	
			Arietenkalk Insektenmergel	Kluftaquifer Aquitard	
Trias	Keuper	Klettgau-Fm.	Belchen-Mb. (Rhät)	Aquitard	
			Gruhalde-Mb. (Obere Bunte Mergel)	Aquitard	
			Gansingen-Mb. (Gansinger Dolomit)	Kluftaquifer	
			Ergolz-Mb. (Untere Bunte Mergel & Schilfsandstein)	Porenaquifer	
			Bänkerjoch-Fm.	Gipskeuper	Aquitard
	Muschelkalk	Schinznach-Fm.	Asp-Mb. (Lettenkohle mit Grenzdolomit)	Karst- und Kluft-aquifer	
			Stammberg-Mb. (Trigonodus-Dolomit)		
			Liedertswil-Mb. (Hauptmuschelkalk)		
			Kienberg-Mb. (Hauptmuschelkalk)		
			Leutschenberg-Mb. (Hauptmuschelkalk)		
	Zeglingen-Fm.	Dolomitzone Obere Sulfatzone Salzlager Untere Sulfatzone	Kluftaquifer Aquitard Aquiclude Aquitard		
	Kaiseraugst-Fm.		Aquitard		

Im Betrachtungsperimeter bilden die quartären Rheinschotter sowie die Schinznach-Fm. zusammen mit der Dolomitzone der Zeglingen-Fm. (Schinznach -Fm. und Dolomitzone der Zeglingen-Fm. bilden den sogenannten «Muschelkalk-Aquifer») bedeutsame, regionale Grundwasserleiter. In Rheinnähe liegen teilweise quartäre Rheinschotter in direktem Kontakt mit der Schinznach-Fm. und sind hydraulisch verbunden.

### 6.1.3 Lokale Hydrogeologie im Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn

Im Gebiet der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn zirkuliert Grundwasser oberflächennah in den Gehängeschutt-Ablagerungen sowie in den Bachablagerungen des Riedmattbaches. Die oberflächennahe Wasserzirkulation wird durch ein Drainage-System, das ab den 1950er Jahren erbaut wurde, beeinflusst (Abbildung 19). Zurzeit liegen keine Angaben zum Zustand resp. zur Wirksamkeit der Drainageleitungen vor.



Abbildung 19: Gewässernetz (violett), Drainageflächen (braun) und Quellen (rot) im Gebiet Sulz und GZB (Quelle: GeoView BL).

Im Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn bestehen mehrere Quellen (Abbildung 19). Nach längeren Regenperioden erweist sich insbesondere die Eigentalquelle 21.4.A (unmittelbar südlich des Solfeldes Sulz) als sichtbar ergiebig. Das Wasser fliesst dann oberflächlich in Richtung Solfeld Sulz, wo es auf der Westseite über einen Strassengraben talabwärts geleitet wird oder im Solfeld Sulz versickert resp. drainiert wird.

In der Tiefe treten wasserführende Horizonte in der Staffelegg-Fm. sowie Klettgau-Fm. mit einer geringen Ergiebigkeit auf.

Eine ergiebige Wasserführung tritt in der Schinznach-Fm. und der Dolomitzone der Zeglingen-Fm. auf.

## 6.1.4 Regionale Strömungsverhältnisse im Muschelkalk-Aquifer

### 6.1.4.1 Grundwasserneubildung

Gemäss BGA BL-188 ([23]) erfolgt die **Grundwasserneubildung** im Muschelkalk-Aquifer wie in Abbildung 20 dargestellt.

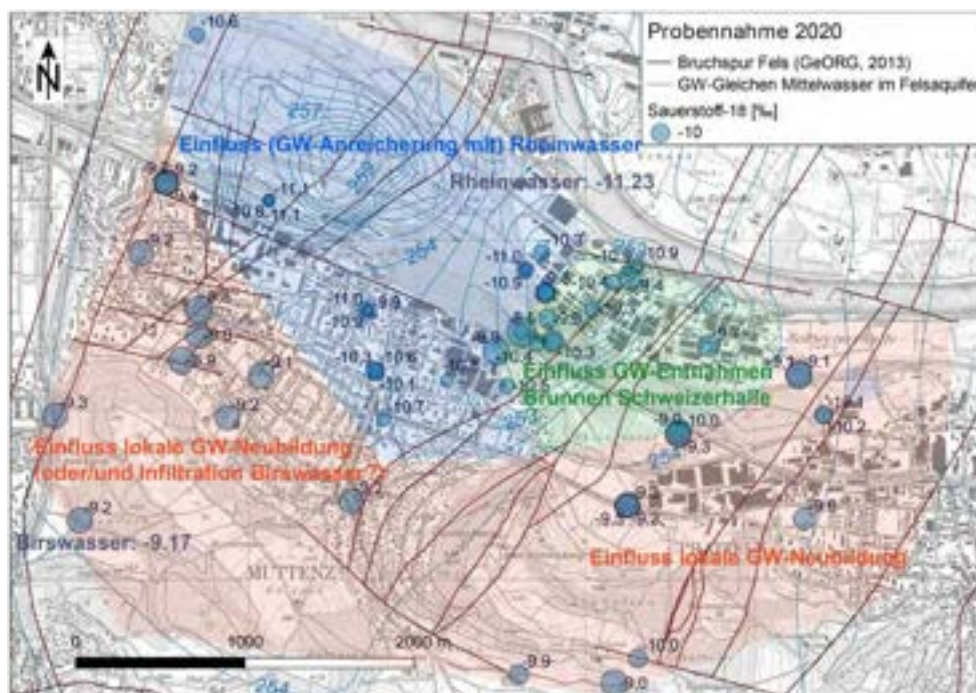


Abbildung 20: Grundwasserneubildung im Muschelkalk-Aquifer auf Basis der gemessenen Sauerstoff-18 [‰]-Anteile in den Grundwassermessstellen gemäss [23].

- 1) Entlang des Rheins erfolgt eine Grundwasserneubildung massgeblich über die Anreicherung von Rheinwasser im Gebiet Muttenzer Hard / Hardwasser (bläulicher Bereich in Abbildung 20) sowie durch abschnittsweise stattfindende natürliche Infiltration des Rheins.
- 2) Im Westen und im Osten ist der Einfluss einer lokalen Grundwasserneubildung erkennbar (rötlicher Bereich in Abbildung 20). Im Westen ist dabei der Anteil von Birsinfiltrat noch nicht abschliessend geklärt. Im Osten dürfte

die Neubildung massgelblich auf Zuflüsse aus dem Ergolzthal und dem Rhein zurückzuführen sein.

- 3) Ebenfalls zur lokalen GW-Neubildung dürfte die Versickerung von Meteorwasser im ganzen Betrachtungsperimeter beitragen.

Der **Grundwasserabfluss** im Muschelkalk-Aquifer erfolgt im Betrachtungsperimeter

- 1) im Norden über abschnittsweise stattfindende Exfiltration in den Rhein.
- 2) über Grundwasserentnahmen im Gebiet Schweizerhalle (grüner Bereich in Abbildung 20) und Muttenz.

#### 6.1.4.2 Strömungsverhältnisse im Muschelkalk-Aquifer

Die regionalen Strömungsverhältnisse im Muschelkalk-Aquifer werden durch die hydrogeologischen Randbedingungen (siehe Kapitel 6.1.1) und die diversen Grundwassernutzungen (Entnahme, Anreicherung) innerhalb des Betrachtungsperimeters bestimmt. Aus diesen Randbedingungen ergibt sich folgendes regionales Strömungsfeld im Muschelkalk-Aquifer (Abbildung 21, modifiziert aus [22]):

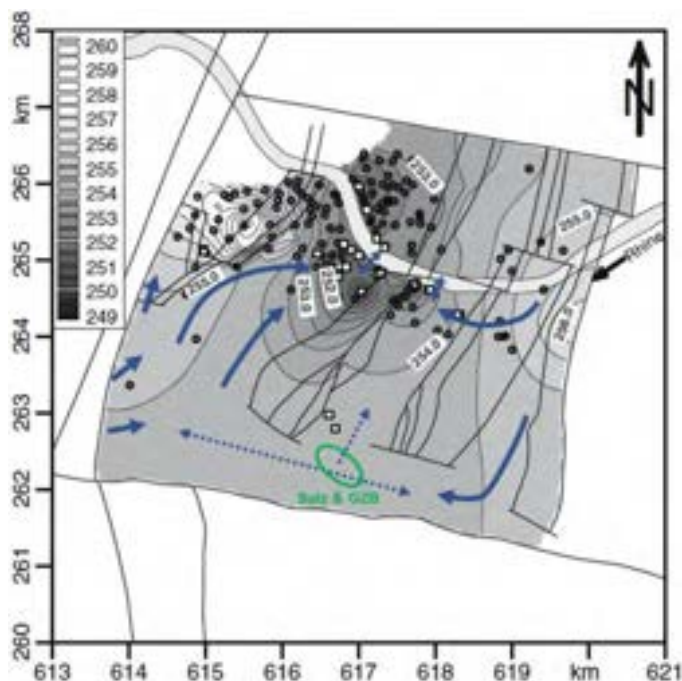


Abbildung 21: Grundwasserfließrichtungen im Muschelkalk-Aquifer auf der Grundlage von modellierten und kalibrierten Grundwasserpegeln [m ü. M.] am Stichtag 8. August 2003 sowie eigenen Beobachtungen (Punkte: Grundwasserpiezometer; Vierecke: Förderbrunnen). Quelle: modifiziert nach [22].

- Im Westen fließt Grundwasser aus dem Birstal in den Betrachtungsperimeter. Ein Teil davon fließt westlich des «Grundwasserberges» im Gebiet Muttenzer Hard in Richtung Rhein. Der andere Teil fließt östlich des «Grundwasserberges» in Richtung der Förderbrunnen im Gebiet Schweizerhalle zu.
- Im Osten fließt ein Teil des Grundwassers durch die Cholholzgaben-Struktur in Richtung der Förderbrunnen im Gebiet Schweizerhalle. Der andere Teil fließt südwärts ausholend in Richtung der Solfelder Sulz & GZB zu.
- Im Gebiet der Solfelder Sulz & GZB bis Rütihard weisen die gemessenen Grundwasserpegel im Muschelkalk-Aquifer auf flache Strömungsgradienten mit nahezu stagnierenden Strömungsverhältnissen hin.

## 6.2 Transport hoch konzentrierter Chloridlösungen im Grundwasser

Die Dichte des Wassers steigt mit der gelösten Ionenkonzentration an (Abbildung 22, aus [24]).

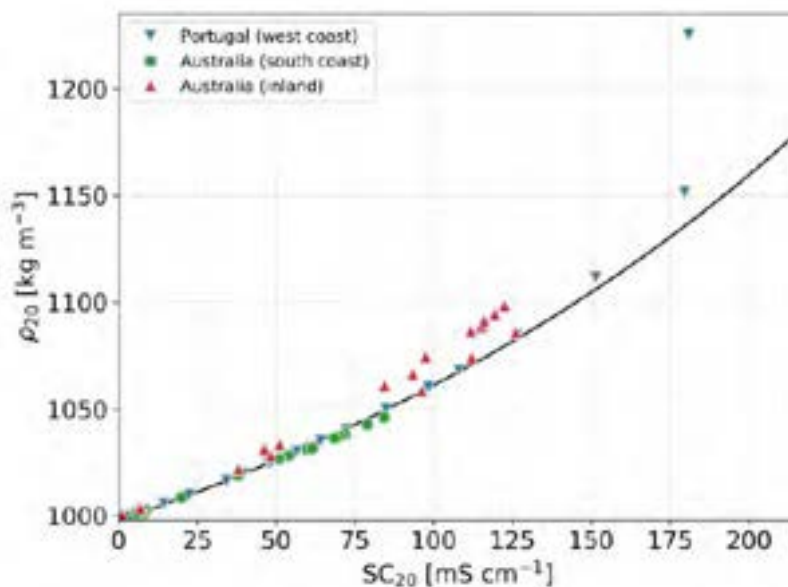


Abbildung 22: Die Dichte ( $\rho_{20}$ ) von Wasser aufgetragen gegen die elektrische Leitfähigkeit ( $SC_{20}$ ). Frischwasser weist eine Dichte von ca.  $1'000 \text{ kg/m}^3$  auf; Sole (=gesättigte NaCl-Lösung) weist eine Dichte von ca.  $1'200 \text{ kg/m}^3$  auf.

Eine numerische Simulation des Transportes von Chloridlösungen verschiedener Konzentrationen bzw. Dichten im Grundwasser ist in der folgenden Abbildung 23 (aus [24]) dargestellt:

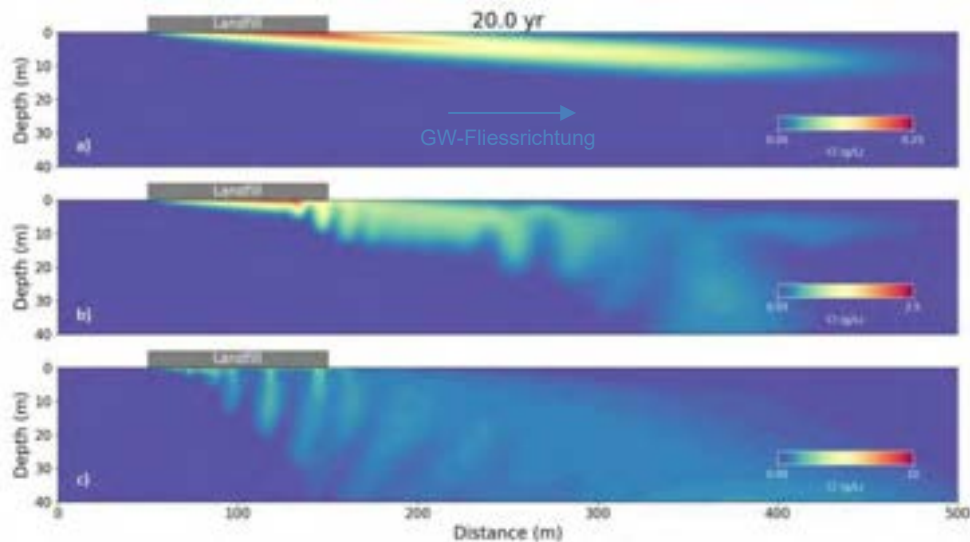


Abbildung 23: Ausgehend von einer Deponie (landfill) wird Chlorid in einen Grundwasserleiter ausgewaschen: A) Chloridkonzentration 250 mg/l (niedrige Dichte); B) Chloridkonzentration 2'500 mg/l (mittlere Dichte); C) Chloridkonzentration 10'000 mg/l (hohe Dichte). Die Bilder zeigen die Verteilung der Chloridkonzentrationen nach 20 Jahren in einer Distanz bis max. 500 m. Die animierte Version befindet sich unter <https://www.youtube.com/watch?v=8xZmSvZix0>.

Es zeigt sich, dass Chloridlösungen mit unterschiedlichen Dichten unterschiedlich im Grundwasser transportiert werden.

- Bei niedriger Dichte / Konzentration resultiert eine schmale und relativ scharf begrenzte Chloridfahne in Fließrichtung. Die maximalen Konzentrationen nehmen in Fließrichtung aufgrund hydrodynamischer Dispersion ab.
- Bei mittlerer und hoher Dichte / Konzentration nimmt die Mächtigkeit der Chloridfahne signifikant in Fließrichtung zu. Die vertikale Ausbreitungskomponente der Fahne aufgrund der höheren Dichten / Konzentrationen dominiert zunehmend den Transport. Dadurch wird einerseits ein immer grösserer Bereich im Grundwasserleiter kontaminiert, andererseits wird durch Mischprozesse die Chlorid-Konzentration «verschmiert». In der animierten Version ist zudem ersichtlich, dass sich die Chloridfahne horizontal entlang des Stauerhorizontes ausbreitet, sobald sie den Stauer erreicht hat.

Im Falle von Sulz und GZB gelangt, in Analogie dazu, hoch konzentrierte Chloridlösung aus den Kavernen in den Muschelkalk-Aquifer. Beim Absinken der Lösung verdünnt sich die Konzentration der Lösung aufgrund von Diffusions- und Mischprozessen. Im Endeffekt kommt es zu einem advektiven Transport von verdünnter Chloridlösung an der Aquiferbasis, einer Misch- resp. Übergangszone und dem



eigentlichen Frischwasser-Aquifer im Hangenden. Je nach Ausprägung (Neigung und Orientierung) der Stauertopographie unterscheiden sich die Fließrichtungen der gravitativ getriebenen konzentrierten Chloridlösungen vom hydraulischen Potential getriebenen Frischwasser-Aquifer. Während sich im Frischwasser-Aquifer die Fließrichtungen immer in Richtung des niedrigsten hydraulischen Potentials einregeln, breitet sich Sole in Richtung der fallenden Topografie des Stauers aus. Dabei kann sie sich in lokalen Senken kumulieren. Die höchsten Chlorid-Konzentrationen sind demnach im Bereich der Chlorid-Quellen selbst (Solfelder) und in Senken der Stauertopographie entlang des Ausbreitungspfades zu erwarten.

### **6.2.1 Hydrochemische Hinweise für hoch konzentrierte Chloridlösungen im Betrachtungsperimeter**

Einleitend wird auf die Wegleitung Grundwasserschutz verwiesen, die Indikatorwerte für die Grundwasserqualität vorgibt. Für Chlorid wird ein Indikatorwert von <40 mg/l angegeben. Erfüllt ein genutztes oder zur Nutzung vorgesehenes Grundwasser diesen Wert nicht und ist die Überschreitung nicht geogen bedingt, sind gemäss Artikel 47 GSchV die Art, das Ausmass und die Ursache der Verunreinigung zu ermitteln und die notwendigen Massnahmen zu treffen.

#### **6.2.1.1 Räumliche Verteilung der Chlorid-Konzentrationen**

Eine regionale Übersicht der gemessenen Chlorid-Konzentrationen liefert die Abbildung 24 (aus [23]). Generell lässt sich feststellen, dass im Vergleich mit anderen Regionen in der Schweiz erhöhte Chlorid-Konzentrationen gemessen werden. Diese erhöhten Werte sind auf geogene (natürliche Laugung von salzhaltigen Gesteinen) und / oder anthropogene Laugungsprozesse (z.B. Salzlösungsbergbau, Deponien) zurückzuführen. Weiter ist feststellbar, dass die Chlorid-Gehalte im Westen (Muttenz, Muttenzer Hard) generell tiefer sind als im Osten (Pratteln). Hohe Chlorid-Werte werden im Gebiet Schweizerhalle gemessen; die höchsten Chlorid-Werte werden im Gebiet des Solfeldes Zinggibrunn gemessen.

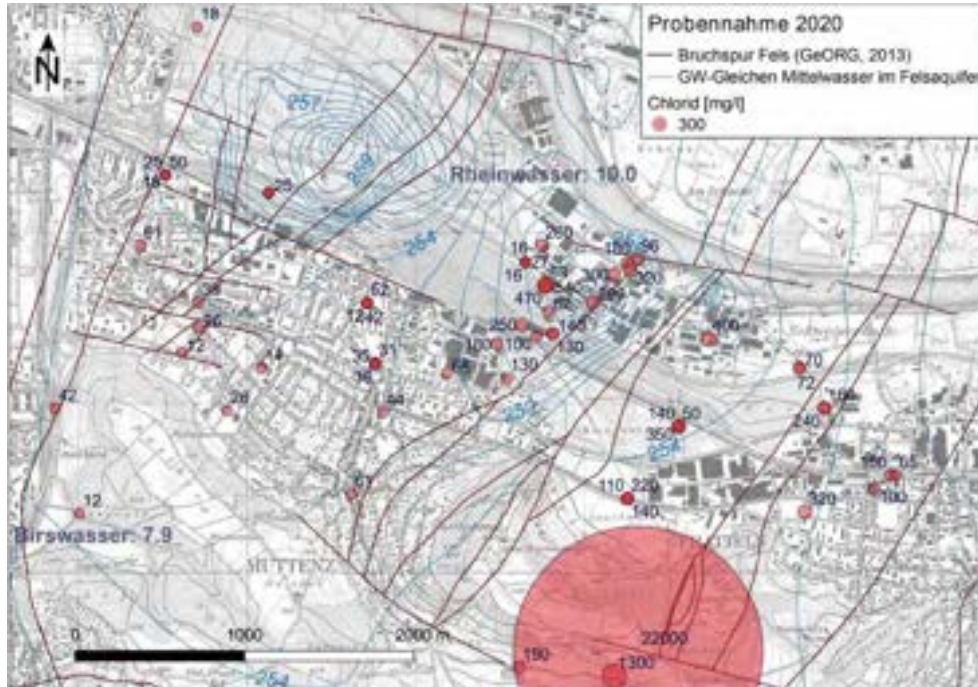


Abbildung 24: Gemessene Chlorid-Konzentrationen in den GW-Messstellen des Muschelkalk-Aquifers, im Rheinwasser der Grundwasseranreicherung und im Birswasser (Probenahme 2020).  
 Quelle: [23].

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn der langjährige Mittelwert der Chlorid-Konzentrationen dargestellt wird (Abbildung 25). Es wird folgendes festgestellt:

- Die höchsten Chlorid-Gehalte werden nördlich der Faltenachse des Adlerhofgewölbes in der Messstelle 21.G.137 im Solfeld Zinggibrunn gemessen.
- Ein hoher Chloridgehalt wird südlich der Faltenachse des Adlerhofgewölbes in der Messstelle 21.X130 südlich des Solfeldes Sulz gemessen.
- Ein erhöhter Chlorid-Gehalt wird in der Messstelle 41.G.2 in der Nähe des Wartenberg-Grabens im Gebiet Schweizerhalle gemessen.

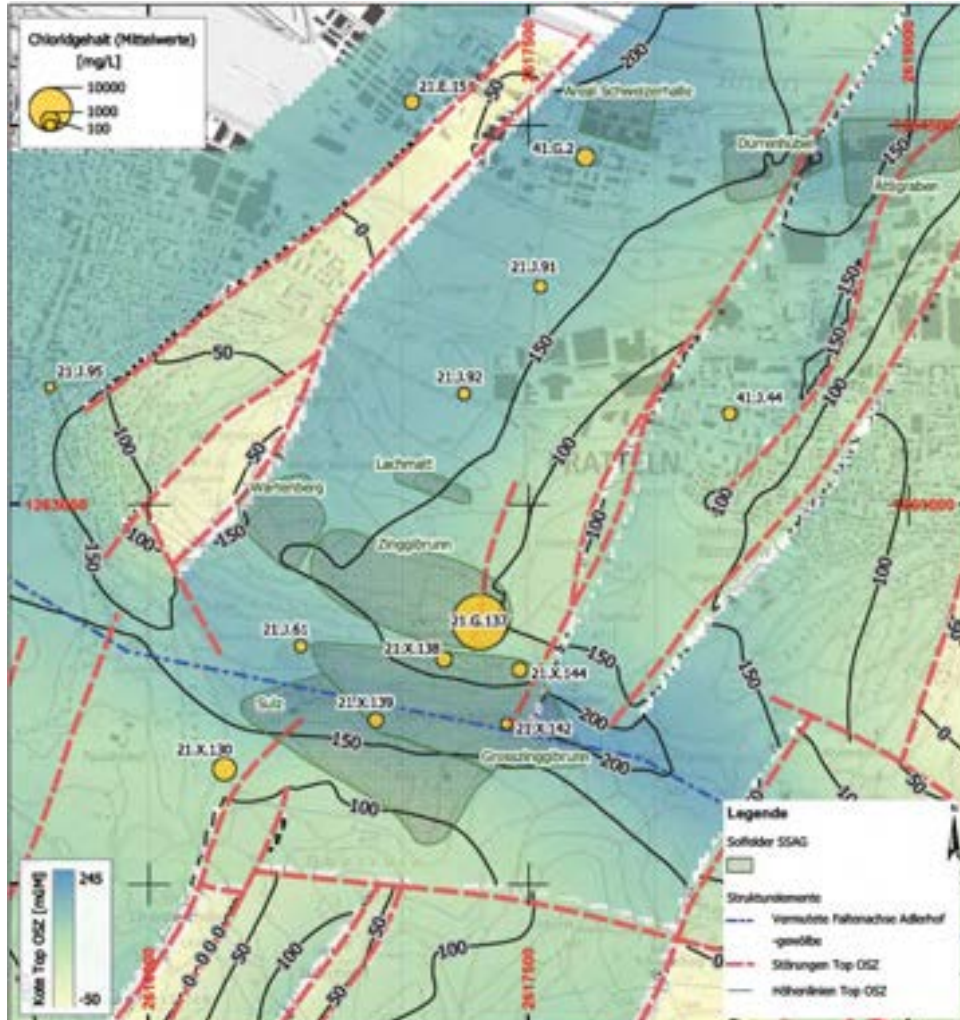


Abbildung 25: Verteilung der Chloridgehalte (**Mittelwerte**) und Stauertopographie der Oberen Sulfatzone.

### 6.2.1.2 Tiefenverteilung der Chlorid-Konzentrationen

Für einige Messstellen liegen ausserdem Analysedaten aus unterschiedlichen Tiefen vor. Die Verteilung der Chlorid- resp. Sulfat-Konzentrationen mit der Tiefe zeigt folgendes Bild (Abbildung 26):

- Alle dargestellten Messstellen zeigen eine graduelle Zunahme der Chlorid- und Sulfatkonzentrationen mit der Tiefe.
- Ausnahmen stellen die Messstellen 21.X.144 und 21.G.137 dar, die eine abrupte Zunahme im untersten Bereich aufweisen.
- Diese letztgenannten Messstellen zeigen eine im Verhältnis zur Sulfat-Konzentration stark erhöhte Chlorid-Konzentration.

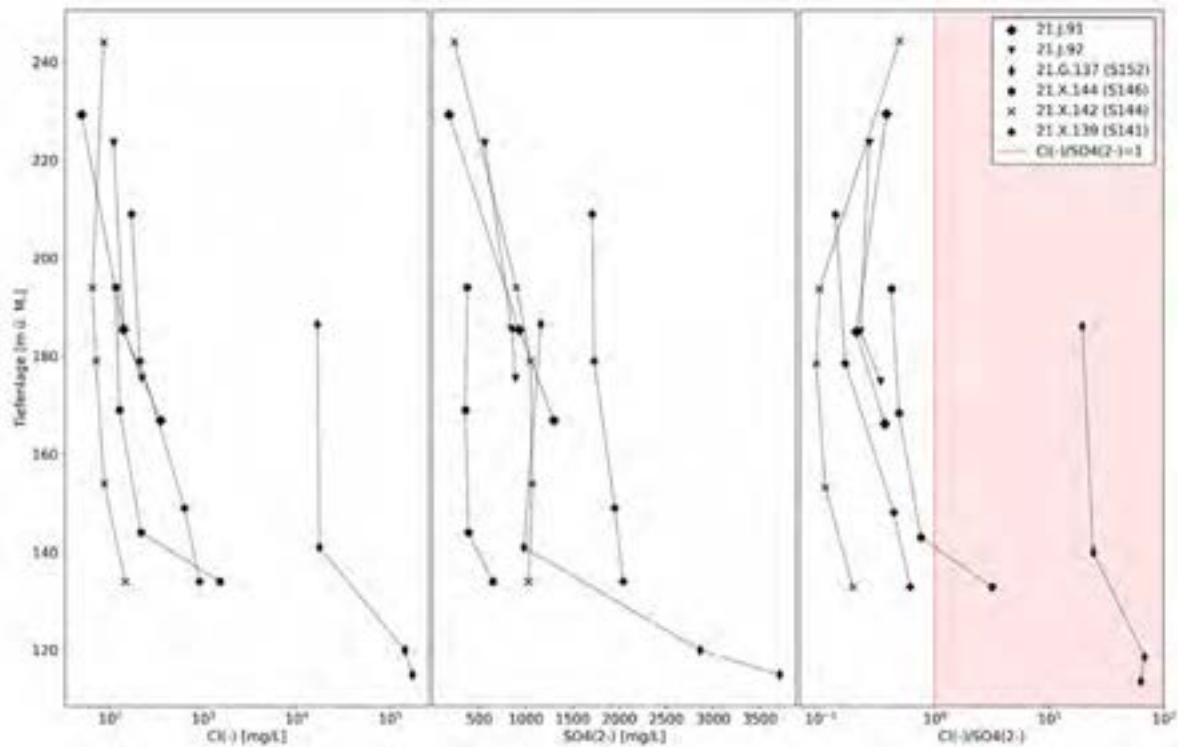


Abbildung 26: Tiefenverteilung der Chlorid- und Sulfatkonzentration (Spalte 1 und Spalte 2) sowie das Verhältnis Cl-SO<sub>4</sub> für die angegebenen Messstellen.

### 6.2.1.3 Chlorid-Konzentrationen in den Produktionsbohrungen Solfeld Sulz

Im Rahmen der Messkampagne 2021 / 2022 wurden aus den Produktionsbohrungen im Solfeld Sulz tiefenabgestufte Grundwasserproben entnommen (Bailer-Proben) und hydrochemisch analysiert (siehe Anhang 1). In den Produktionsbohrungen zeigt sich eine Abhängigkeit der Chlorid-Konzentrationen mit der Tiefe: Je tiefer die Probe entnommen wurden, desto höher wird die Chlorid-Konzentration, die Leitfähigkeit und die Dichte. Folgende Spanneiten wurden festgestellt:

- Chlorid-Konzentrationen (min / max): 180 / 191'000 mg/l
- elektrische Leitfähigkeiten (min / max): 2'000 / 264'000 µS/cm
- Dichten (min / max): 0.998 / 1.203 g/ml

### 6.3 Konzeptuelles hydrogeologisches Modell

Auf der Basis der vorangegangenen Kapitel sowie der ersten Resultate der Messkampagne wurde folgendes konzeptuelles hydrogeologisches Modell entwickelt:

#### Ausgangslage

Aufgrund teilverbrochener Kavernen und Leckagen in den Bohrungen gelangt hoch konzentrierte Chloridlösung («Sole») aus den Salzkavernen in den Muschelkalk-Aquifer (Abbildung 27 und Abbildung 28). Für die anderen Solfelder Grosszinggibrunn, Zinggibrunn, Wartenberg und Lachmatt ist davon auszugehen, dass vergleichbare Prozesse stattfinden.

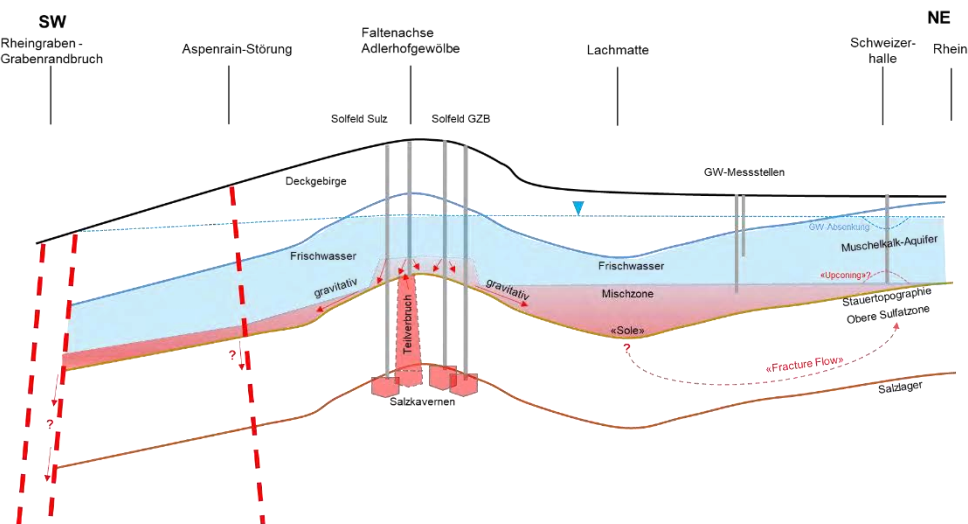


Abbildung 27: Konzeptuelles hydrogeologisches Modell für die Ausbreitung von hoch konzentrierter Chloridlösung im Muschelkalk-Aquifer im Bereich des Adlerhofgewölbes.

#### Eintrag von hoch konzentrierter Chloridlösung

Im hydrogeologischen Konzeptmodell wird angenommen, dass der Eintrag von hoch konzentrierter Chloridlösung hauptsächlich durch anthropogene Prozesse (Lösungsbergbau der Schweizer Salinen AG) erfolgt. Der Eintrag von Chlorid findet mit grosser Wahrscheinlichkeit auch über geogene Prozesse (Subrosion) statt. Da sich dieser Anteil derzeit nicht quantifizieren lässt, werden geogene Einträge im Sinne einer konservativen Annahme nicht berücksichtigt.

Der Soleeintrag kann permanent erfolgen, wenn aufgrund einer teilverbrochenen Salzkaverne ein direkter hydraulischer Kontakt besteht oder wenn aufgrund

kontinuierlicher Kavernenkonvergenz permanent Sole aus der Kaverne in den Muschelkalk-Aquifer gedrückt wird (Abbildung 27).

Der Soleeintrag kann auch impulsartig erfolgen, wenn aufgrund eines Teilverbrauches einer Kaverne Sole impulsartig in den Muschelkalk-Aquifer gelangen kann.

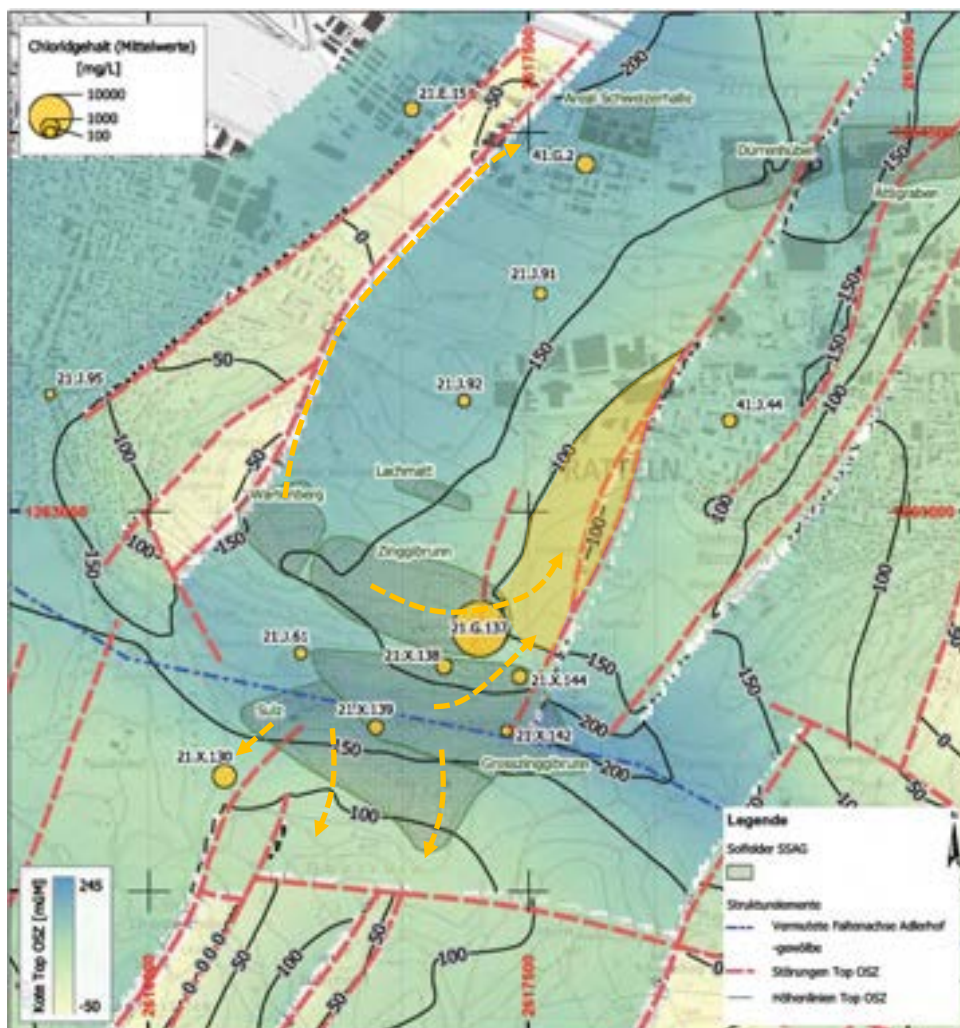


Abbildung 28: Vermuteter Transport (gestrichelte Pfeile) von hochkonzentrierter Chloridlösung ausgehend von den Solfeldern der Schweizer Salinen AG und Kulmination in der Senke im Gebiet Lachmatt (orange eingefärbter Bereich).

### Transport, Kumulation und Verdünnung

Aufgrund der Stauertopographie (= Dach Obere Sulfatzone) im Bereich des Adlerhofgewölbes breitet sich die Sole ausgehend vom Solfeld Sulz bevorzugt in Richtung Süden resp. Südosten aus (Abbildung 27 und Abbildung 28). Inwiefern Störzonen wie z.B. die Aspenrainstörung und der Grabenrandbruch des Rheingrabens die Sole in tieferliegende Grundwasserstockwerke ableitet, ist unbekannt.

Die Sole aus den Solfeldern Grosszinggibrunn und Zinggibrunn breitet sich gravitativ bevorzugt in Richtung Nordosten aus (Abbildung 27 und Abbildung 28). Im Gebiet Lachmatte kann sie sich in einer lokalen Senke in der Stauertopographie ansammeln. Inwiefern rheinisch orientierte Brüche im Norden des Adlerhofgewölbes zum Sole-Transport beitragen (z.B. entlang des Wartenberg-Grabens), ist derzeit nicht schlüssig zu beantworten.

Sowohl im Süden wie auch im Norden des Adlerhofgewölbes findet permanent eine Grundwasserneubildung (Zuflüsse von Frischwasser) statt, welche die ausgetretene Sole verdünnen (Abbildung 27).

#### «Upconing» im Gebiet Schweizerhalle

Im Gebiet Schweizerhalle kann es durch die grossen Entnahmemengen und Grundwasser-Absenkungen zu einem Ansaugen von an Chlorid angereicherterem tieferliegendem Grundwasser kommen («upconing») (Abbildung 27). Einen vergleichbaren Mechanismus wird in [25] als Ursache für erhöhte Chlorid-Konzentrationen im Gebiet Schweizerhalle numerisch simuliert.

## 6.4 Gefährdungs- und Risikoanalyse «Grundwasser»

### 6.4.1 Schutzgüter

Im Betrachtungsperimeter befinden sich aus Sicht des Grundwassers folgende Schutzgüter (Anhang 2):

- Regional bedeutendes Felsgrundwasser im Muschelkalk-Aquifer.
- Regional bedeutendes Lockergesteinsgrundwasser in den Rheinschottern, in den Ergolzschottern und in den Birsschottern.
- Grundwasserschutz-Areale und Grundwasserschutzzonen:
  - o Grundwasserschutzareal GWSA Hardwald (Gde. Pratteln).
  - o Grundwasserschutzzonen Löli-Remeli (Gde. Pratteln).
  - o Grundwasserschutzzonen Hardwald (Gde. Muttenz).
  - o Grundwasserschutzzonen im Birstal (Jakobsmatten, Ehinger, Hofmatt und Welschmatt).
- Brauchwasser-Brunnen resp. Trinkwasserbrunnen ohne Schutzzonen:
  - o Förderbrunnen für Brauchwasser im Gebiet Schweizerhalle (CABB, Novartis, IKEA, Firestone, Schweizer Salinen AG).
  - o Förderbrunnen für Trinkwasser in den Gde. Muttenz & Pratteln (ohne rechtsgültige Schutzzonen).
- Lokal vorhandenes Hanggrundwasser, kommunizierend mit dem Lockergesteinsgrundwasser des Riedmattbächlis.
- Lokale Quellen (ohne rechtsgültige Schutzzonen).
- Lokale Quellen (mit rechtsgültigen Schutzzonen in den Kantonen BL und SO).
- Oberflächengewässer:
  - o Riedmattbach im Gebiet Sulz / Grosszinggibrunn.



## 6.4.2 Risikoanalyse

### 6.4.2.1 Gefährdung

Die Risikoanalyse wird bezogen auf die genannten Schutzgüter ausgeführt und basiert auf der folgenden Gefährdung (Tabelle 3):

Tabelle 3: Gefährdungsanalyse Grundwasser.

Gefährdungsbild	Gefährigungsursache	Schadensbild / Wirkung
Austreten von hochkonzentrierter Chloridlösung (Sole) aus den Kavernen in den Muschelkalk-Aquifer im Gebiet der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teilverbrochene Salzkarvenne mit hydraulischem Kontakt zum Muschelkalk-Aquifer.</li> <li>- Leckagen in Bohrungen und Kavernen mit hydraulischem Kontakt zum Muschelkalk-Aquifer.</li> </ul>	Versalzung / Kontamination des Muschelkalk-Aquifers.

### 6.4.2.2 Risiko

Ausgehend von der Gefährdung wird das Risiko für die genannten Schutzgüter anhand von zwei Szenarien beurteilt:

- Szenario 1: Status-quo  
 Dieses Szenario umfasst den **bis dato bekannten Zustand** in den Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn mit den bekannten Eintritten von hochkonzentrierter Chloridlösung (Sole) in den Muschelkalk-Aquifer. Es berücksichtigt zudem die bereits bestehende regionale Chlorid-Belastung in den beprobten Messstellen.
- Szenario 2: Tagbruch  
 Dieses Szenario umfasst ein oder mehrere Tagbruchereignisse, bei denen grössere Volumina an hochkonzentrierter Chloridlösung (Sole) in den Muschelkalk-Aquifer gelangen. Bei diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass Sole nicht nur in den Muschelkalk-Aquifer gelangt, sondern dass Sole auch obertägig austritt.

Die Risikobeurteilung erfolgte im Rahmen von GEOTEST-intern geführten Diskussionen und Abwägungen mit Hilfe einer 4x4-Risikomatrix unter Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit und der Auswirkung (Abbildung 29).

<b>Eintretenswahrscheinlichkeit</b>	4 sicher	1 / 4	2 / 4	3 / 4	4 / 4
	3 sehr wahrscheinlich	1 / 3	2 / 3	3 / 3	4 / 3
	2 wahrscheinlich	1 / 2	2 / 2	3 / 2	4 / 2
	1 unwahrscheinlich	1 / 1	2 / 1	3 / 1	4 / 1
		1 unbedeutend	2 moderat	3 bedeutend	4 schwerwiegend

**Auswirkungen**

- Grün = geringes Risiko** Akzeptable Situation. Keine weiteren bzw. zusätzlichen Massnahmen erforderlich.
- Gelb = mittleres Risiko** Zusätzliche Überwachungsmassnahmen notwendig.
- Rot = hohes Risiko** Nicht akzeptable Situation. Integrale Massnahmenplanung erforderlich (Überwachungsmassnahmen und Massnahmen zur Kontrolle der Gefährdung).

Abbildung 29: Verwendete 4x4 Risikomatrix.

**6.4.2.3 Risikobeurteilung Szenario 1 «Status-quo»**

Bei diesem Szenario wird vom aktuellen Zustand (Sommer 2022) in den Solfeldern Sulz & GZB ausgegangen. Beurteilt wird die Wahrscheinlichkeit von negativen Auswirkungen sowie das Schadensausmass, die bis dato feststellbar sind.

Schutzgut	Beurteilung	A*	W*	Risiko
Muschelkalk-Aquifer lokal im Gebiet Sulz und GZB	In der GW-Messstelle 21.G.137 werden bereits heute an der Basis des Muschelkalk-Aquifers sehr hohe Chlorid-Konzentrationen festgestellt. Aufgrund der teilverbrochenen Kavernen im Sulz muss davon ausgegangen werden, dass auch hier die Aquiferbasis mit Chlorid belastet ist. Die Auswirkung werden als moderat beurteilt, weil die Belastung lokal und insbesondere an der Basis auftritt.	2	4	hoch
Lockergesteins-aquifer Rheinschotter (Schweizerhalle)	In den Rheinschottern werden bereits heute teilweise erhöhte Chlorid-Konzentrationen festgestellt. Die Auswirkungen sind moderat. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	2	1	gering
Lockergesteins-aquifer Birstal	Für das GW-Vorkommen sind bis dato keine Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
Lockergesteins-aquifer Ergolzthal	Für das GW-Vorkommen sind bis dato keine zusätzlichen Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
GW-Schutzareal Hardwald (Gde. Pratteln)	Das GW-Schutzareal liegt sowohl im hydraulischen wie topographischen Abstrombereich der Solfelder Sulz & GZB. Die Auswirkungen sind heute moderat. Eine Veränderung der Situation ist aufgrund der Nähe zu den Solfeldern wahrscheinlich.	2	2	mittel

GW-Schutzzonen Löli-Remeli (Gde. Pratteln)	Die Brunnen liegen nicht im direkten Abstrombereich. Bis dato sind keine direkten Auswirkungen ausgehend von den Solfeldern nachgewiesen. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
GW-Schutzzonen Hardwald (Gde. Muttenz)	Die Brunnen liegen nicht im direkten Abstrombereich. Bis dato sind keine direkten Auswirkungen ausgehend von den Solfeldern nachgewiesen. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
GW-Schutzzonen im Birstal	Bis dato sind keine Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
Lokales Hanggrundwasser und Quellen im Sulz und GZB	Bis dato sind keine Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
Oberflächengewässer Riedmattbach	Bis dato sind keine Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering

A = Auswirkungen (1 = unbedeutend, 2 = moderat, 3 = bedeutend, 4 = schwerwiegend)

W = Eintretenswahrscheinlichkeit (1 = unwahrscheinlich, 2 = wahrscheinlich, 3 = sehr wahrscheinlich, 4 = sicher)

#### 6.4.2.4 Risikobeurteilung Szenario 2 «Tagbruch»

Es wird bei Szenario 2 davon ausgegangen, dass im Bereich des Solfelds Sulz ein oder mehrere Tagbruchereignisse stattfinden. Beurteilt wird die Wahrscheinlichkeit von negativen Auswirkungen sowie das Schadensausmass auf die definierten Schutzobjekte, jedoch nicht die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses Szenarios.

Schutzgut	Beurteilung	A*	W*	Risiko
Muschelkalk-Aquifer lokal im Gebiet Sulz und GZB	Im Falle eines Tagbruches käme es sicher zu bedeutenden Auswirkungen (sehr hohe lokale Chloridbelastung).	3	4	hoch
Lockergesteins-aquifer Rheinschotter (Schweizerhalle)	Im Falle eines Tagbruches käme es wahrscheinlich zu bedeutenden Auswirkungen (hohe Chloridbelastung).	3	2	mittel
Lockergesteins-aquifer Birstal	Für das GW-Vorkommen sind die Auswirkungen und die Eintretenswahrscheinlichkeit aufgrund des konzeptuellen Modells unsicher. Stand heute wären im Falle eines Tagbruches die Auswirkungen bedeutend, aber unwahrscheinlich.	3	1	mittel
Lockergesteinsaquifer Ergolzal	Für das GW-Vorkommen sind die Auswirkungen und die Eintretenswahrscheinlichkeit aufgrund des konzeptuellen Modells unsicher. Stand heute wären im Falle eines Tagbruches die Auswirkungen bedeutend, aber unwahrscheinlich.	3	1	mittel
GW-Schutzareal Hardwald (Gde. Pratteln)	Im Falle eines Tagbruches wären bedeutende Auswirkungen (sehr hohe Chloridbelastung) sehr wahrscheinlich.	3	3	hoch
GW-Schutzzonen Löli-Remeli (Gde. Pratteln)	Für die GW-Brunnen Löli-Remeli wären die Auswirkungen schwerwiegend; die Eintretenswahrscheinlichkeit ist allerdings unwahrscheinlich.	4	1	mittel

2720047.10

Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn  
Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse  
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung  
(Vorläufige Beurteilung)

GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

GW-Schutzzonen Hardwald (Gde. Muttenz)	Für die GW-Schutzzonen Hardwald (Hardwasser AG) wären die Auswirkungen schwerwiegend. Die Eintretenswahrscheinlichkeit ist allerdings unwahrscheinlich.	4	1	mittel
GW-Schutzzonen im Birstal	Für die GW-Schutzzonen im Birstal wären die Auswirkungen schwerwiegend. Die Eintretenswahrscheinlichkeit ist allerdings unwahrscheinlich.	4	1	mittel
Lokales Hanggrundwasser und Quellen im Sulz und GZB	Im Falle eines Tagbruches wären die Auswirkungen aufgrund von Sole, die an die Oberfläche gelangt, bedeutend und wahrscheinlich.	3	2	mittel
Oberflächengewässer Riedmattbach	Im Falle eines Tagbruches wären die Auswirkungen aufgrund von Sole, die an die Oberfläche gelangt, bedeutend und wahrscheinlich.	3	2	mittel

A = Auswirkungen (1 = unbedeutend, 2 = moderat, 3 = bedeutend, 4 = schwerwiegend)

W = Eintretenswahrscheinlichkeit (1 = unwahrscheinlich, 2 = wahrscheinlich, 3 = sehr wahrscheinlich, 4 = sicher)

## 6.4.2.5 Schlussfolgerung Risikoanalyse Grundwasser

Die für die beiden Szenarien «Status-quo» (Szenario 1) und «Tagbruch» (Szenario 2) vorgenommene Risikoanalyse ist nachfolgend tabellarisch zusammengefasst:

Schutzobjekt / Schutzgut	Risiko Szenario 1	Risiko Szenario 2
Muschelkalk-Aquifer lokal im Gebiet Sulz und GZB	hoch	hoch
Lockergesteinsaquifer Rheinschotter im Gebiet Schweizerhalle	gering	mittel
Lockergesteinsaquifer Birstal	gering	mittel
Lockergesteinsaquifer Ergolzthal	gering	mittel
GW-Schutzareal Hardwald (Gde. Pratteln)	mittel	hoch
GW-Schutzzone Löli-Remeli (Gde. Pratteln)	gering	mittel
GW-Schutzzone Hardwald (Gde. Muttenz)	gering	mittel
GW-Schutzzone im Birstal	gering	mittel
Lokales Hanggrundwasser und Quellen im Sulz und GZB	gering	mittel
Oberflächengewässer Riedmattbach	gering	mittel

Die Risikoanalyse zeigt, dass im **Szenario 1** (Status-quo) lokal im Gebiet Sulz und GZB ein hohes Risiko für eine Chlorid-Belastung des Grundwassers im Muschelkalk-Aquifer besteht. Diese hohe Risiko ist nicht akzeptable und erfordert Überwachungsmassnahmen und Massnahmen zur Kontrolle der Gefährdung (Umsetzung des Überwachungs- und Nachsorgekonzeptes). Aufgrund des besonderen Schutzstatus sind für das GW-Schutzareal Hardwald zusätzliche Überwachungsmassnahmen zu planen und umzusetzen. Für die übrigen Schutzobjekte / Schutzgüter besteht im Status quo ein geringes Risiko, das keine weiteren bzw. zusätzlichen Überwachungsmassnahmen durch die Schweizer Salinen AG erfordert.

Im Falle des **Szenarios 2** (Tagbruch) besteht für die Schutzobjekte / Schutzgüter ein mittleres bis hohes Risiko. Für die Solfelder Sulz & GZB ist das Risiko nicht akzeptabel und es sind zwingend Überwachungsmassnahmen und Massnahmen zur Kontrolle der Gefährdung auszuführen. Konkret heisst das, dass die Umsetzung des vorliegenden Grundwassermonitoring-Konzeptes (siehe folgendes Kapitel 5.5) wie auch des Überwachungs- und Nachsorgekonzeptes zur sicheren Verwahrung von Kavernen und Bohrungen in den Solfeldern Sulz und Grosszinggibrunn (Zustandserhebung Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn, Ursachenanalyse, erste

Massnahmenkonzepte und Handlungsoptionen zwecks Stabilisierung der Solfelder) vorangetrieben werden muss.

## 6.5 Grundwassermonitoring

Auf Basis des konzeptuellen hydrogeologischen Modells wurde ein Grundwasserüberwachungskonzept erarbeitet [26] mit dem Ziel im Zu- und Abstrombereich ausreichend Grundwasserüberwachungsmessstellen zu haben und im Speziellen den Soletransport im «gravitativen Abstrombereich» der Solfelder zu überwachen.

Das Konzept umfasst im wesentlichen folgende Punkte (Abbildung 30):

- Ausbau der bestehenden Bohrung S156 auf der Rütihard zu einer GW-Überwachungsmessstelle (im Westen der Solfelder Sulz und GZB).
- Ausbau der Erkundungsbohrung EX-22-01 im Gebiet Aspenrain / Schauenburg zu einer GW-Überwachungsmessstelle (im Osten der Solfelder Sulz und GZB).
- Erstellung von drei neuen GW-Überwachungsmessstellen im Umkreis der Solfelder Sulz und GZB.
- Aufbohren der bestehenden, alten Sondierbohrungen S56 und S130 und Ausbau zu GW-Überwachungsmessstellen.
- Überwachung des Riedmattbächli.

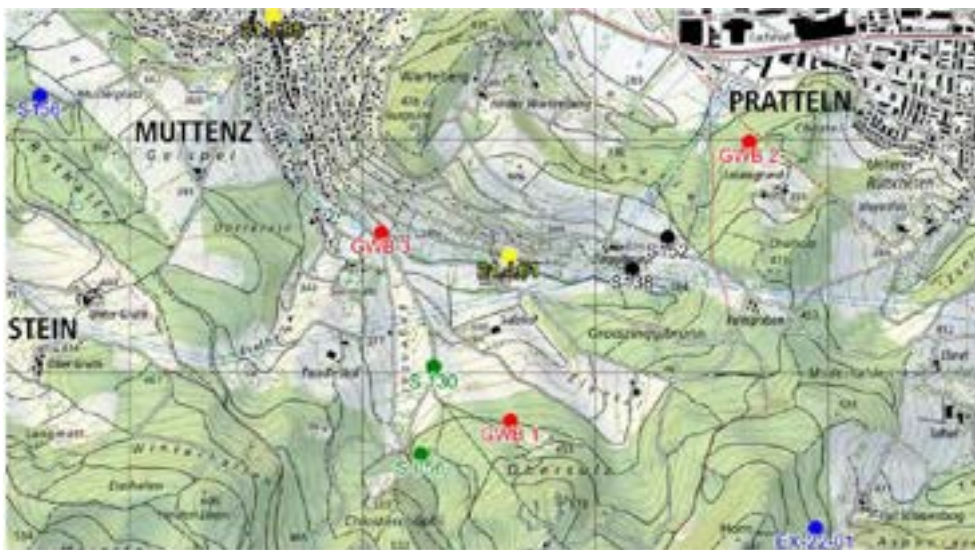


Abbildung 30: Vorschlag für Grundwassermessstellen zur Überwachung der Solfelder Sulz und GZB. Rot: Neue GW-Messstellen. Blau: Ausbau zu GW-Messstellen. Gelb: Bestehende GW-

2720047.10

Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn  
Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse  
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung  
(Vorläufige Beurteilung)

GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

Messstellen (Kanton BL). Schwarz: Bestehende GW-Messstellen (Salinen AG). Grün: GW-Messstellen, die aufgebohrt und ausgebaut werden müssen.

Die GW-Überwachungsmessstellen werden mit Messsonden ausgerüstet, die kontinuierlich den GW-Pegel, GW-Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers überwachen. Diese kontinuierliche Überwachung wird ergänzt durch eine jährlich stattfindende Grundwasserprobenahme für hydrochemische Analysen. Es wird empfohlen diese Überwachung mit der bereits bestehende Grundwasserüberwachung des Kantons BL (Amt für Umwelt und Energie) abzustimmen.

2720047.10

Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn  
Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse  
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung  
(Vorläufige Beurteilung)

**GEOTEST** GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

## **Anhang 1: Hydrochemische Wasseranalysen Sulz, 2021 / 2022**



Schweizerhalle, 17.03.2022

## Untersuchungsbericht Nr. 14211/22/4-010

**Betrifft:**

**Bearbeitet von:** FS, LM  
LJ -

Sonderuntersuchung der Wasserproben aus Bohrlöchern (J. Pietsch)

---

### **Untersuchungsauftrag:**

Untersuchung diverser relevanter Parameter in Wasserproben aus den Bohrlöchern Grosszinggibrunn und Sulz

---

### Analysenergebnisse:

Siehe folgende Seiten

LABOR

### Geht an:

Labor CA  
Geologie (G. Fuchs)  
Geologie (J. Pietsch)

Probenahme	S 087	S 087	S 087	S 088	S 088	S 088	S 089	S 089	S 090	S 090	S 090
Datum	04.02.2022	04.02.2022	04.02.2022	08.04.2022	08.04.2022	08.04.2022	18.03.2022	18.03.2022	21.03.2022	21.03.2022	21.03.2022
Tiefe (m)	125	315	324	155	190	290	160	295	155	250	276
Probemenge (l)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
pH (-log H <sup>+</sup> )	7.43	7.41	6.72	5.97	7.06	6.52	6.36	6.49	8.02	6.45	6.69
Leitfähigkeit (20° C, mS/cm)	2	2	211	4	6	232	150	215	3	238	237
Dichte (20° C, g/ml)	0.998	0.998	1.163	0.999	1.001	1.200	1.098	1.203	1.000	1.197	1.197
m-Wert (mmol/l)	6.69	6.74	4.98	0.61	5.47	4.09	0.27	4.31	2.03	3.79	4.20
Gesamthärte (° f.H.)	84	85	413	134.8	273.2	293.0	134.9	332.9	49.6	332.8	317.1
Carbonathärte (° f.H.)	33	34	25	3.0	27.4	20.5	1.4	21.6	39.5	313.9	296.1
Nichtcarbonathärte (° f.H.)	51	51	388	131.8	245.8	272.5	133.5	311.3	10.1	18.9	21.0
Bor (mg/l)	0.33	0.33	1.32	0.24	0.35	1.36	0.23	0.87	0.24	0.88	0.90
Calcium (mg/l)	217	218	1568	334.5	750.5	1115.0	525.7	1308.0	119.2	1307.0	1244.0
Eisen (mg/l)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	13.87	< 0.05	0.13	2.43	0.08	< 0.05	1.16	< 0.05
Kalium (mg/l)	9.6	4.2	55.2	11.6	9.1	59.5	35.2	39.4	7.8	38.9	37.0
Magnesium (mg/l)	72.9	72.8	51.0	124.1	207.5	34.6	8.4	14.3	48.0	15.0	15.0
Natrium (g/l)	0.07	0.05	107.5	0.4	0.5	135.3	56.3	124.7	0.35	130.3	127.6
Phosphat (mg/l)	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15
Strontium (mg/l)	14.4	14.6	18.4	5.7	17.7	10.0	5.0	7.9	1.7	7.9	7.9
Sulfat (mg/l)	376.0	379.2	4448.0	357.2	710.0	3928.0	1512.0	3539	190.3	3510.0	3500.0
Chlorid (g/l)	0.18	0.15	149.2	1.3	2.0	187.6	83.5	189.7	0.65	183.5	179.7
(Natriumchlorid)	0.30	0.25	246.0	2.1	3.3	309.2	130.6	296.7	1.07	302.5	296.2

Probenahme	S 109	S 109	S 114	S 125	S 125	S 125	S 126	S 127	S 127	S 127	S 128
Datum	16.03.2022	16.03.2022	01.02.2022	15.02.2022	15.02.2022	15.02.2022	01.02.2022	08.04.2022	08.04.2022	08.04.2022	14.02.2022
Tiefe (m)	185	348	90	208	300	391	331	210	320	368	250
Probemenge (l)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
pH (-log H <sup>+</sup> )	5.89	6.21	6.08	6.15	5.44	6.47	6.75	7.13	6.57	6.42	6.31
Leitfähigkeit (20° C, mS/cm)	219	221	182	183	225	248	233	51	148	228	254
Dichte (20° C, g/ml)	1.198	1.204	1.112	1.104	1.156	1.201	1.175	1.022	1.082	1.202	1.177
m-Wert (mmol/l)	0.31	2.71	0.33	0.75	0.17	4.21	2.25	1.77	0.56	4.01	0.28
Gesamthärte (° f.H.)	281.2	321.0	290.0	168.4	220.5	332.3	597	204.6	333.0	338.6	160.9
Carbonathärte (° f.H.)	1.5	1.5	2.0	3.8	0.8	21.1	11	8.9	2.8	20.1	1.4
Nichtcarbonathärte (° f.H.)	279.7	319.5	288.0	164.6	219.7	311.2	586	195.7	330.2	318.5	159.5
Bor (mg/l)	0.58	1.42	0.31	0.33	0.41	0.82	3.47	0.64	0.76	1.65	1.76
Calcium (mg/l)	1109.0	1236	1131	650.8	855.9	1300.0	1841	749.2	1279.0	1305.0	634.1
Eisen (mg/l)	30.2	18.1	20.1	7.6	19.6	14.9	0.09	4.04	20.76	0.37	1.98
Kalium (mg/l)	39.0	61.2	65.2	22.6	31.9	39.9	132.4	11.8	22.9	60.6	134.2
Magnesium (mg/l)	9.8	29.4	16.9	13.9	16.0	17.9	333.1	42.1	32.4	30.1	5.8
Natrium (g/l)	122.4	125.7	74.7	67.9	100.9	129.1	114.2	12.8	49.4	138.1	108.8
Phosphat (mg/l)	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15
Strontium (mg/l)	5.5	9.7	11.0	5.2	5.7	8.0	64.1	7.1	9.4	22.3	3.7
Sulfat (mg/l)	5290	5734	2181.0	1787.0	2643.0	3699.0	3640.0	2008.0	3530.0	3918.0	6217.0
Chlorid (g/l)	183.8	189.6	103.7	95.4	147.4	188.6	166.2	19.1	72.5	188.3	160.6
(Natriumchlorid)	303.0	312.5	171.0	157.2	242.9	311.0	273.9	31.5	119.5	310.4	264.8

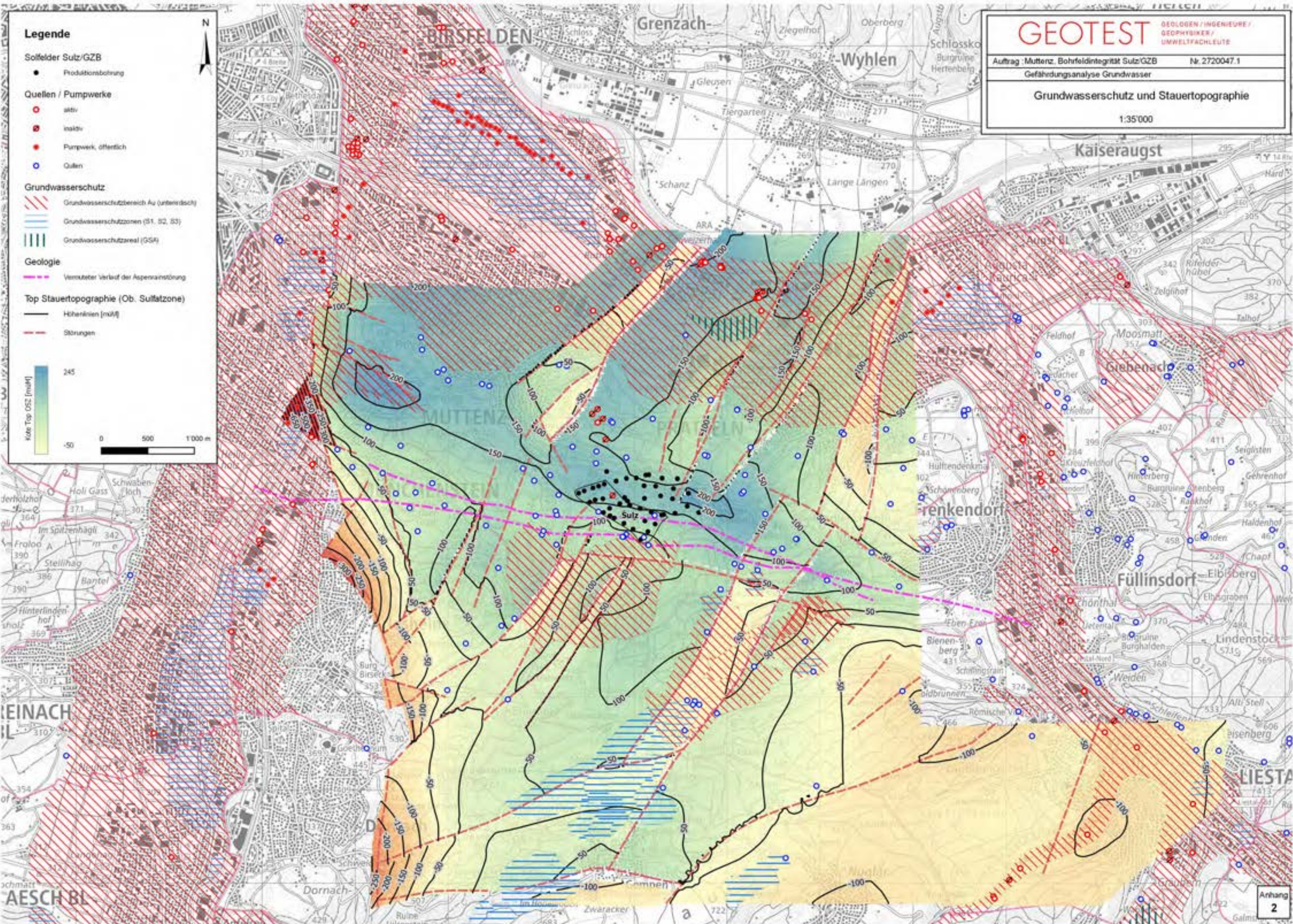
Probenahme	S 128	S 128									
Datum	14.02.2022	14.02.2022									
Tiefe (m)	360	371									
Probemenge (l)	1.0	1.0									
pH (-log H <sup>+</sup> )	6.39	6.44									
Leitfähigkeit (20° C, mS/cm)	264	261									
Dichte (20° C, g/ml)	1.203	1.202									
m-Wert (mmol/l)	3.38	4.19									
Gesamthärte (° f.H.)	320.3	326.5									
Carbonathärte (° f.H.)	16.9	20.89									
Nichtcarbonathärte (° f.H.)	303.4	305.6									
Bor (mg/l)	1.68	1.70									
Calcium (mg/l)	1234.0	1258.0									
Eisen (mg/l)	27.33	2.58									
Kalium (mg/l)	60.1	58.3									
Magnesium (mg/l)	28.9	29.3									
Natrium (g/l)	123.9	127.2									
Phosphat (mg/l)	< 0.15	< 0.15									
Strontium (mg/l)	21.5	22.2									
Sulfat (mg/l)	3848.0	3763.0									
Chlorid (g/l)	188.6	191.1									
(Natriumchlorid)	311.0	315.0									

2720047.10

Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn  
Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse  
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung  
(Vorläufige Beurteilung)

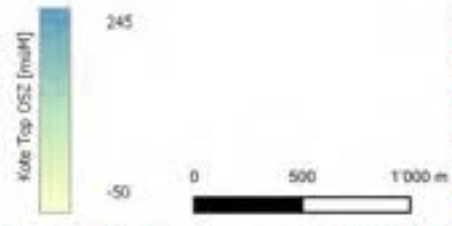
**GEOTEST** GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

## **Anhang 2: Hydrogeologischer Plan mit Schutzgüter und Stauertopographie der Oberen Sulfatzone.**



**Legende**

- Sulfelder Sulz/GZB**
  - Produktionsbohrung
- Quellen / Pumpwerke**
  - aktiv
  - inaktiv
  - Pumpwerk, öffentlich
  - Quellen
- Grundwasserschutz**
  - ▨ Grundwasserschutzbereich Au (unterirdisch)
  - ▨ Grundwasserschutzzonen (S1, S2, S3)
  - ▨ Grundwasserschutzareal (GSA)
- Geologie**
  - Vermuteter Verlauf der Asperminstörung
- Top Stauertopographie (Ob. Sulfatzone)**
  - Höhenlinien (müüf)
  - - - Störungen



**GEOTEST** GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

Auftrag: Muttensulz, Bohrfeldintegrität Sulz/GZB Nr. 2720047.1  
Gefährdungsanalyse Grundwasser

**Grundwasserschutz und Stauertopographie**

1:35'000

---

**Bericht Nr. 2720047.**

---

**Schweizer Salinen AG, Pratteln 1**

**Muttenz, Bohrfeldintegrität  
Sulz/Grosszinggibrunn**

**Sicherheitskonzept Messkampagne 2021**

Münchenstein, 17. September 2021

GEOTEST AG  
FREILAGER-PLATZ 3  
CH-4142 MÜNCHENSTEIN  
T + 41 (0)61 205 87 50  
F + 41 (0)61 205 87 51  
basel@geotest.ch  
www.geotest.ch

<b>Autor(en)</b>	<b>Bearbeitete Themen / Fachbereiche</b>
Florentin Ladner	Ganzer Bericht
<b>Supervision</b>	<b>Visierte Inhalte</b>
Felix Busmann	Ganzer Bericht
<b>Hinweise</b>	

GEOTEST AG

Felix Busmann

Florentin Ladner



## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	4
2.	Konsultierte Unterlagen.....	4
3.	Messkampagne 2021.....	4
3.1	Organisation.....	4
3.2	Zeitraum.....	5
3.3	Arbeits- und Messprogramm.....	5
4.	Gefährdungsanalyse.....	6
5.	Getroffene Sicherheitsvorkehrungen.....	7
5.1	Organisatorische Massnahmen.....	7
5.2	Technische Massnahmen.....	7
6.	Informationsfluss bei Schadensereignis . <b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>	

## 1. Einleitung

Im Rahmen der Überprüfung der Solfeldintegrität Sulz (Gemeinde MuttENZ) wird die Schweizer Salinen AG (SSAG) im Oktober 2021 eine umfangreiche Messkampagne durchführen. Die Messkampagne hat zum Ziel alle im Solfeld Sulz befindlichen Produktionsbohrungen und Kavernen zu vermessen (je 22 Stück). Vorgängig zur Messkampagne müssen alle Bohrungen zugänglich gemacht werden. Das bedeutet, dass die Bohrungen geöffnet und die abgehängten Solstränge ausgebaut werden.

In diesem Zusammenhang hat die SSAG die GEOTEST AG damit beauftragt zusammen mit den involvierten Unternehmen ein Sicherheitskonzept auszuarbeiten, um die geplante Messkampagne sicher und ohne schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt durchführen zu können.

## 2. Konsultierte Unterlagen

- [1] GEOTEST AG: MuttENZ, Aufarbeitung Sole-Austritt – Sulzhof (Bohrloch S87). Schlussbericht vom 9. August 2018.
- [2] Bergverordnung für Tiefbohrungen, Unterspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Nordrhein-Westfalen (Tiefbohrverordnung – BOVT) vom 31. Oktober 2006.
- [3] Koopmans et al.: State-of-the-art, multiple-barrier design based on a novel risk management approach. SMRI Technical Conference Paper, 2014.

## 3. Messkampagne 2021

### 3.1 Organisation

Bauherr:	Schweizer Salinen AG Gabor Fuchs, 078 857 05 58 Michael Balke, 079 211 60 43
Projektleitung:	GEOTEST AG Florentin Ladner, 079 815 94 21
Bohrfirma:	Daldrup & Söhne AG Martin Autermann, +49 151 18832154

Messfirma 1: terratec Geophysical Services (Bohrlochgeophysik)

Messfirma 2: SOCON Sonar Control (Kavernenvermessung)

### 3.2 Zeitraum

Geplant ist die Messkampagne am 18. Oktober 2021 zu starten. Die Dauer der Messkampagne beträgt ca. 2 Monate. Es wird tagsüber gearbeitet von jeweils montags bis freitags. Es ist mit keinem aussergewöhnlichen Verkehrsaufkommen sowie Lärmemissionen zu rechnen.

### 3.3 Arbeits- und Messprogramm

Das Arbeitsprogramm umfasst folgende operationelle Tätigkeiten im Solfeld Sulz:

- 1) Als Vorbereitung für die Messungen muss jede Bohrung zuerst zugänglich gemacht werden. Dies beinhaltet das Öffnen der Bohrungen sowie den Ausbau der Solstränge.
- 2) Vermessung der Bohrung durch terratec mit folgenden Sonden:
  - i. Cement Bond Log / Temperatur- & Leitfähigkeitslog zwecks Beurteilung der Zementhinterfüllung der letzten zementierten Rohrtour (LZRT).
  - ii. Optischer Bohrlochscan zwecks Beurteilung des Zustandes der Verrohrung im oberen nicht-fluidgefülltem Teil der Bohrung.
  - iii. Akustischer Bohrlochlog zwecks Beurteilung des Zustandes der Verrohrung (Korrosion, Wandstärke, Zementanbindung) im fluidgefüllten Teil der LZRT.
  - iv. Fluid-Geschwindigkeitslog als Grundlage für iii).
  - v. Kaliber-Log (bis 70 cm Durchmesser) bis in den obersten Bereich des Kavernenhalses.
  - vi. Bei Bedarf: gezielte Kamerabefahrungen bei weiterem Abklärungsbedarf.
- 3) Vermessung der Kaverne durch SOCON zwecks Bestimmung der aktuellen Kavernengeometrie.
- 4) Verschluss der Bohrungen am Bohrlochkopf mit Blindflansch.

#### 4. Gefährdungsanalyse

Im Rahmen einer vergleichbaren Messkampagne kam es im Juni 2017 im Solfeld Sulz zu einem rund 30 m hohen, fontänenartigen Soleaustritt (Blowout) aus der Bohrung S87 der Schweizer Salinen AG [1]. Dabei traten ca. 500 m<sup>3</sup> Sole aus und richteten in der Umgebung des Bohrlochs Schäden an der Bepflanzung der umliegenden Fläche, am Boden und an Fauna und Flora entlang des MuttENZer Dorfbachs an. Personenschäden waren keine zu beklagen.

Als Ursache für den Blowout zeichnete sich das Eindringen von Stickstoff-Gas verantwortlich, das aus Produktionszeiten vermutlich im Dach der Kaverne verblieben ist. Auslöser für den Stickstoff-Gaszutritt in die Bohrung dürften entweder Nachbrüche im Kavernendach oder Nachsoleeffekte durch einen Frischwasserzufluss in die Kaverne gewesen sein.

Aufgrund der vergleichbaren Umstände und Örtlichkeit stellt dieser Blowout das Schadensereignis dar, das während der Messkampagne 2021 zu verhindern ist resp. dessen Auswirkungen zu minimieren sind.

Für die zu treffenden Sicherheitsvorkehrungen wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- Druck am Bohrkopf: < 5 bar oder 0.5 MPa
- Volumen: < 700 m<sup>3</sup>

## 5. Getroffene Sicherheitsvorkehrungen

Die getroffenen Sicherheitsvorkehrungen umfassen sowohl organisatorische wie auch technische Massnahmen.

### 5.1 Organisatorische Massnahmen

Die organisatorische Massnahmen sind:

- 1) Erstellung eines Sicherheitskonzeptes zu Händen der Behörden und involvierten Unternehmen (vorliegender Bericht).
- 2) Per Ende September 2021: Vorabinformation der Behörden zur geplanten Messkampagne (Gemeinde MuttENZ, AUE des Kantons Basel-Landschaft).
- 3) Per Ende September 2021: Vorabinformation der Feuerwehr und Polizei der Gemeinde MuttENZ.
- 4) Ab 11. Oktober 2021: Information der betroffenen Landeigentümer und Pächter.
- 5) Vor Messkampagne: Sicherheitsinstruktion der involvierten Unternehmen und Prüfung Funktionalität der Sicherheitsvorkehrungen vor Ort.
- 6) Während Messkampagne: Supervision vor Ort durch die Projektleitung (GEOTEST AG).

### 5.2 Technische Massnahmen

Die technischen Massnahmen wurden zusammen mit den involvierten Unternehmen auf Basis der erfolgten Gefährdungsanalyse (Kapitel 4) und den Vorgaben der Tiefbohrverordnung des Landes Nordrhein-Westfalen [2] erarbeitet. Für die Festlegung der konkreten technischen Massnahmen wurde auf die sogenannte «Bow-Tie-Methodik» zurückgegriffen, bei der ausgehend von einem Schadensereignis (im vorliegenden Fall: Blowout) sowohl vorbeugende Massnahmen wie auch im Falle eines Schadensereignisses schadenmindernde Massnahmen festgelegt werden [3].

Die folgende Tabelle zeigt die getroffenen technischen Massnahmen für jeden einzelnen Arbeitsschritt bezogen auf eine Bohrung:

Tabelle 1: Vorbeugende und schadensmindernde technische Massnahmen für das Schadensereignis «Blowout»

Arbeitsschritt	Dauer	Vorbeugende Massnahmen	Vorereignisse / Ereignis	Schadensmindernde Massnahmen
1 Bohrung drucklos machen (Wasser- und N <sub>2</sub> -Gasdruck ablassen)	Stunden bis Tage	Bohrkopf mit Ablassventil, das nur tagsüber offen ist. Nachts wird das Ventil geschlossen.	-	Keine Massnahmen notwendig.
2 Demontage Bohrkopf	ca. 1 Std.	Vor Demontage immer zuerst N <sub>2</sub> -Gas / Druck ablassen.	Brodelgeräusche / Soleaustritt / Blowout	Montage Sicherheitslocke, die über den Bohrkopf gestülpt wird und das Gas-/Solegemisch auffängt und über eine Leitung kontrolliert abgibt.
3 Ausbau Solstrang innen	1 Arbeitstag	Diverter bestehend aus Stopfbuchse zur Gestängeabdichtung, Schieber und Rohrstützen für Diverterleitung.	Brodelgeräusche / Soleaustritt / Blowout	Öffnen Gestängeklemme und Montage Sicherheitslocke, die über den Bohrkopf gestülpt wird und das Gas-/Solegemisch auffängt und über eine Leitung kontrolliert abgibt.
4 Temporärer Verschluss mit Blindflansch	über Nacht	Festgeschraubter Blindflansch	-	Keine Massnahmen notwendig.
5 Ausbau Solstrang aussen	1 Arbeitstag	Diverter bestehend aus Stopfbuchse zur Gestängeabdichtung, Schieber und Rohrstützen für Diverterleitung.	Brodelgeräusche / Soleaustritt / Blowout	Öffnen Gestängeklemme und Montage Sicherheitslocke, die über den Bohrkopf gestülpt wird und das Gas-/Solegemisch auffängt und über eine Leitung kontrolliert abgibt.
6 Temporärer Verschluss mit Blindflansch	über Nacht	Festgeschraubter Blindflansch	-	Keine Massnahmen notwendig.
7 Demontage Blindflansch & Montage Stopfbuchse für Messkabel und Messung terratec	1 Arbeitstag	Diverter bestehend aus Stopfbuchse zur Messkabelabdichtung, Schieber und Rohrstützen für Diverterleitung.	Brodelgeräusche / Soleaustritt / Blowout	Schliessen Stopfbuchse und Ableitung Gas-/Solegemisch über Diverterleitung in Pralltank und schliesslich in Soleleitung.
8 Temporärer Verschluss mit Blindflansch über Diverter	über Nacht	Festgeschraubter Blindflansch.	-	Keine Massnahmen notwendig.
9 Demontage Blindflansch & Montage Stopfbuchse für Messkabel und Messung SOCON	1 Arbeitstag	Diverter bestehend aus Stopfbuchse zur Messkabelabdichtung, Schieber und Rohrstützen für Diverterleitung.	Brodelgeräusche / Soleaustritt / Blowout	Schliessen Stopfbuchse und Ableitung Gas-/Solegemisch über Diverterleitung in Pralltank und schliesslich in Soleleitung.
10 Montage Bohrkopf	permanent	Bohrkopf mit Ablassventil	-	Keine Massnahmen notwendig.

## **6. Kommunikation**

### **6.1 Informationsfluss bei Schadensereignis**

Bei einem Schadensereignis informiert die örtliche Bauleitung unverzüglich folgende Personen / Behörden:

- 1) Schweizer Salinen AG, Dr. Andreas Kühni (079 338 51 25)
- 2) Polizei MuttENZ: XY, Telefon
- 3) Feuerwehr MuttENZ: XY, Telefon
- 4) Gemeinde MuttENZ / Krisenstab: XY, Telefon
- 5) AUE BL / Gewässerschutzpikett: XY, Telefon

### **6.2 Umgang mit Medien sowie Anfragen externer Personen**

Für Anfragen jeglicher Art durch Medien sowie durch externe Personen und Passanten wird grundsätzlich auf die Medienstelle der Schweizer Salinen AG zu verweisen (061 825 51 51). Die vor Ort tätigen Personen geben grundsätzlich keine Informationen weiter.

Für die:  
Schweizer Salinen AG  
Schweizerhalle  
Rheinstraße 52  
CH-4133 Pratteln 1  
Schweiz

Im Auftrag der:  
GEOTEST AG  
Bernstraße 165  
CH-3052 Zollikofen  
Schweiz

# Expertenbericht Soleförderung Rütihard

## Bau und technischer Betrieb Soleförderung

Auftragsnr. des Kunden: -

Projektnr. des Kunden: -

Projektnr.: 4613-881774

Erstellt von: Volker Burghardt  
Dr. Olaf Kruck  
Stephan Rohs  
Dr. Max Wippich  
Dr. Dirk Zander-Schiebenhöfer

Datum: 15.11.2019

Geprüft von: Stephan Rohs

Freigegeben von: Reinhard Steenken

Revision: 00  
**Version für die  
Vorprüfung**

DEEP.KBB GmbH

Eyhauser Allee 2a | 26160 Bad Zwischenahn

info@deep-kbb.de | www.deep-kbb.de





## Inhaltsverzeichnis

### Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>2</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Umfang und Methodik sowie Datengrundlage .....</b>	<b>4</b>
2.1 Umfang und Methodik .....	4
2.2 Datengrundlage .....	4
<b>3 Lösungsbergbau .....</b>	<b>10</b>
3.1 Allgemeine Darstellung des Lösungsbergbaus .....	10
3.2 Historie des Lösungsbergbaus .....	12
<b>4 Stand der Technik .....</b>	<b>13</b>
4.1 Geologische Erkundung .....	13
4.2 Gebirgsmechanik .....	17
4.3 Bohrtechnik .....	20
4.4 Solkomplettierung .....	23
4.5 Dichtheitstest .....	25
4.6 Soltechnik .....	27
4.7 Verwahrung .....	29
4.8 Überwachung während des Betriebs und der Verwahrung .....	31
<b>5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG .....</b>	<b>36</b>
5.1 Geologische Erkundung .....	36
5.2 Gebirgsmechanik .....	40
5.3 Bohrtechnik .....	41
5.4 Solkomplettierung .....	45
5.5 Dichtheitstest .....	46
5.6 Soltechnik .....	47
5.7 Verwahrung .....	48
5.8 Überwachung .....	51
<b>6 Zusammenfassung und Empfehlungen .....</b>	<b>53</b>
<b>7 Firmendarstellung DEEP.KBB GmbH .....</b>	<b>56</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>57</b>

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung einer Kavernenanlage zur Solegewinnung .....	10
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des Lösungsbergbaus, modifiziert nach (54) .....	11
Abbildung 3:	Links: Geophone zur Aufzeichnung des Signals; Rechts: Schematische Darstellung einer seismischen Erkundung .....	14
Abbildung 4:	Bohrklein („Cuttings“) zur Interpretation für den Geologen aufbereitet .....	15
Abbildung 5:	Aus Bohrungen entnommene Bohrkerne .....	15
Abbildung 6:	Prinzipieller Ablauf bei der Überarbeitung und Anpassung der Planungen .....	17
Abbildung 7:	Haupttragelemente des umgebenden Gebirges .....	18
Abbildung 8:	Gebirgsmechanisches Untersuchungskonzept .....	19
Abbildung 9:	Gebirgsmechanische Empfehlungen.....	20
Abbildung 10:	Bohrlochausbau.....	22
Abbildung 11:	Solkomplettierung einer Kavernenbohrung .....	24
Abbildung 12:	Aufbau konventioneller Gasdichtheitstest mit installierten Solsträngen (RS LZRT = Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour).....	26
Abbildung 13:	Darstellung des direkten und des indirekten Solverfahrens .....	27
Abbildung 14:	Schematische Ansicht einer Solanlage .....	29
Abbildung 15:	Prinzip der Blanket-Überwachung mittels Blanket-Röhrchen.....	32
Abbildung 16:	Echometrisches Verfahren zum Erfassen der Kavernengeometrie (61).....	34
Abbildung 17:	Schematischer Zeitplan zur Kavernenüberwachung.....	35
Abbildung 18:	Aktueller Planungsstand der jeweiligen Etappen (8).....	38
Abbildung 19:	Bohrschema Rütihard (35) .....	42
Abbildung 20:	Zeichnung innerer Solstrang (links) und Kavernenkopf / äußerer Solstrang (rechts), aus (37) .....	46
Abbildung 21:	Generisches Solkonzept – Simulierte Entwicklung der Kavernenform (43).....	48
Abbildung 22:	Verwahrung am Beispiel der Bohrung S102, Ättigraben (52) .....	50
Abbildung 23:	Darstellung Höhennivellement.....	52

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Im Rahmen des Expertenberichtes bearbeitete Dokumente der Schweizer Salinen AG (sortiert nach Themengebiet und Datum) .....	5
Tabelle 2:	Geplantes Verrohrungsschema (Festigkeitswerte nach API).....	43

## **1 Einleitung**

### **1 Einleitung**

Die Schweizer Salinen AG deckt mit ihrer Salzproduktion an den Standorten Schweizerhalle, Riburg und Bex die Salzversorgung der gesamten Schweiz. Die Salzproduktion erfolgt mittels Lösungsbergbau. Dazu wird zunächst aus einer untertägigen Salzlagerstätte Sole gefördert und das in der Sole enthaltene Salz mittels einer Kristallisationsanlage gewonnen. Um die Salzproduktion langfristig fortzuführen, beabsichtigt die Schweizer Salinen AG in den nächsten Jahren ein neues Gewinnungsfeld auf der Rütihard in der Gemeinde Muttenz für die Soleförderung zu erschließen. Dafür bedarf es im Standortkanton Basel-Landschaft eines Baubewilligungsverfahrens mit einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP).

Im Auftrag der Schweizer Salinen AG koordiniert die GEOTEST AG die Erstellung der erforderlichen Baubewilligungsunterlagen einschließlich eines Umweltverträglichkeitsberichtes sowie weiterer Expertenberichte zu einzelnen Fachthemen.

Der hier vorliegende Expertenbericht stellt den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf den Bau und den technischen Betrieb einer Kavernenanlage zur Soleförderung dar und stellt diesen dem geplanten Vorgehen der Schweizer Salinen AG beim Bau und Betrieb des Gewinnungsfeldes Rütihard gegenüber. Darauf gestützt werden Abweichungen zwischen dem Stand der Technik und dem geplanten Vorgehen aufgezeigt und Empfehlungen gegeben. Dabei werden ausschließlich Themen betrachtet, die sich aus dem untertägigen Teil einer Kavernenanlage ergeben. Der Bau und Betrieb der zugehörigen obertägigen Anlagen ist nicht Bestandteil der Betrachtungen in diesem Bericht.

## 2 Umfang und Methodik sowie Datengrundlage

## 2 Umfang und Methodik sowie Datengrundlage

### 2.1 Umfang und Methodik

Der Expertenbericht stellt im Kapitel 3 zunächst in allgemeinverständlicher Form die Technik des Lösungsbergbaus dar. Daran anschließend wird im Kapitel 4, gegliedert nach den einzelnen an einem solchen Projekt beteiligten technischen Gewerken, der Stand der Technik im Kavernenbau und -betrieb für die Solegewinnung beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt im Kapitel 5 eine Beurteilung des Vorgehens der Schweizer Salinen AG und ein Abgleich mit dem Stand der Technik bzw. der „Best Practice“. Im zusammenfassenden Kapitel 6 werden hieraus Empfehlungen für eine Anpassung oder Erweiterung der Planung abgeleitet.

Die Darstellungen und Einschätzungen erfolgen auf der Grundlage des Expertenwissens der DEEP.KBB GmbH (DEEP.KBB). Dort wo von der Schweizer Salinen AG Zahlenwerte mitgeteilt werden (z. B. Dimensionierung und Auslegung von Kavernen oder Ausrüstungsteilen) kann im Rahmen des vorliegenden Berichts keine umfassende rechnerische Nachprüfung vorgenommen werden. Eine Einschätzung erfolgt hier erfahrungsbasiert und rein qualitativ.

Da in der Schweiz kaum einschlägige gesetzliche Bestimmungen formuliert sind, die für den Kavernenbau und -betrieb anzuwenden sind, bezieht sich dieser Expertenbericht wiederholt auf relevante Gesetze, Verordnungen und untergesetzliche Regelwerke der Bundesrepublik Deutschland oder ihrer Bundesländer. Im Wesentlichen sind dies

- die Bergverordnung für Tiefbohrungen und die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen, BVOT (1),
- die Technische Regel Bohrungsintegrität (2) und
- Richtlinien über das Verfüllen auflässiger Bohrungen (3).

Der Expertenbericht gibt die fachliche Einschätzung der DEEP.KBB wieder, die nicht notwendigerweise und in jedem Falle mit der Meinung der Schweizer Salinen AG oder der GEOTEST AG übereinstimmen muss.

### 2.2 Datengrundlage

Die Grundlagen der mit diesem Expertenbericht vorgelegten Darstellungen und Einschätzungen sind Planungsdokumente, technische Konzepte und Ergebnisberichte der Schweizer Salinen AG aus den Jahren 1953 bis 2019. Bei diesen handelt es sich teils um Dokumente, die sich auf die bestehenden Solfelder der Salinen Schweizerhalle und Riburg beziehen, teils um solche, die im Zusammenhang mit der Planung und Erkundung des neuen Feldes auf der Rütihard erstellt wurden. Alle im Rahmen des Expertenberichts bearbeiteten Dokumente sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführt.

## 2 Umfang und Methodik sowie Datengrundlage

**Tabelle 1: Im Rahmen des Expertenberichtes bearbeitete Dokumente der Schweizer Salinen AG (sortiert nach Themengebiet und Datum)**

Titel des Dokuments	Datum	Urheber / Autor	Referenz-Nr.	Themengebiet*
Gesuchsformular für Sondierungen mit Anhängen	26.06.15	Schweizer Salinen AG	(4)	EX
Sondierbohrungen S156 und S157 - Rütihard, Muttenz (Begleitdokument zum Bohrgesuch)	14.09.16	Schweizer Salinen AG	(5)	EX
Saline Schweizerhalle - Explorationskonzept	02.05.17	Schweizer Salinen AG	(6)	EX
Planungsbericht Salzexploration Gebiet Schauenburg BL Teil 1: seismische Erkundung	02.10.18	Geo Explorers	(7)	EX
Geologische Erkundung zukünftiger Bohrfelder: Explorationskonzept Rütihard	02.04.19	Schweizer Salinen AG	(8)	EX
Planungsbericht, Version 2 Salzexploration Gebiet Schauenburg BL Teil 1: seismische Erkundung (angepasster Linienplan)	29.05.19	Geo Explorers	(9)	EX
Schweizerhalle Bohrung 37 (Bohrprofil 1:200)	k. A. (1953 ?)	k. A.	(10)	GEO
Geologischer Bericht über die Sondierbohrung 37	06.08.53	Peter Herzog, Schweizerhalle	(11)	GEO
Sondierbohrung Nr. S 93 (Bohrprofil 1:100)	19.07.85	swissboring	(12)	GEO
Sondierbohrung Nr. S 94 (Bohrprofil 1:100)	05.08.85	swissboring	(13)	GEO
Bericht über die Sondierbohrungen S 93 und S 94	21.10.85	Dr. L. Hauber, Schweizerhalle	(14)	GEO

## 2 Umfang und Methodik sowie Datengrundlage

Titel des Dokuments	Datum	Urheber / Autor	Referenz-Nr.	Themen-gebiet*
Sondierbohrung Nr. S 104 (Bohrprofil 1:100)	20.11.86	swissboring	(15)	GEO
Sondierbohrung Nr. S 107 (Bohrprofil 1:100)	07.09.87	swissboring	(16)	GEO
Geologischer Bericht über die Sondierbohrungen S 104 - S 107	29.02.88	Dr. L. Hauber, Schweizerhalle	(17)	GEO
Stammdatensätze für Bohrungen (S 37, S 93, S 94, S 104, S 107)	k.A.	Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen (VSR)	(18)	GEO
Geologische Karte 1:25 000 Blatt 1067 Arlesheim	Oktober 1988	Peter Bitterli-Brunner und Hermann Fischer, Landeshydrologie und -geologie	(19)	GEO
Abschlussbericht zum 3D Modell Schweizerhalle inkl. Anhänge und Karten zu Modellflächen	09.11.17	Geo Explorers	(20)	GEO
Überprüfung Strukturgeologie Asp-Rütihard (Kurzbericht)	15.12.17	Geo Explorers	(21)	GEO
Kartenübersicht der Bohrungen (Karte 1:10 000)	15.03.18	Schweizer Salinen AG	(22)	GEO
Salzgewinnung Rütihard Entwurf: Umweltverträglichkeitsbericht (UVB)	Nov. 2018	Gruner AG	(23)	GEO
Sondierbohrung S157 (Vorabergebnisse)	21.05.19	Geo Explorers	(24)	GEO
Solegewinnungsprojekt Schweizerhalle-Eigentäl - Gebirgsmechanisches Gutachten	Aug. 1980	Prof. Dr.-Ing. H. Wagner	(25)	GM
Gutachten zur Dimensionierung von Solegewinnungskavernen im SalzaREAL Eigentäl	18.12.80	Prof. Dr. W. Dreyer	(26)	GM

## 2 Umfang und Methodik sowie Datengrundlage

Titel des Dokuments	Datum	Urheber / Autor	Referenz-Nr.	Themen-gebiet*
Bewertung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens des Salzgesteins und der oberen Sulfatzone auf der Grundlage der Kavernenbohrungen S137 und S136	2005	Prof. Dr.-Ing. habil. R.B. Rokahr	(27)	GM
Gebirgsmechanische Auslegung des Solegewinnungsfeldes Grosszinggibrunn	Nov. 2005	Prof. Dr.-Ing. habil. R.B. Rokahr	(28)	GM
Vergleich der Gebirgsmechanischen Berechnungen, Saline Schweizerhalle, Rokahr, Dreyer, Wagner	30.11.05	k. A.	(29)	GM
Gutachterliche Stellungnahme zum Bruchverhalten der Kavernen beim Überschreiten der Auslegungsdaten	2013	IUB GmbH	(30)	GM
Solegewinnungsprojekt Schweizerhalle-Eigentäl (Zusammenfassung)	21.02.13	Schweizer Salinen AG	(31)	GM
Gutachten zur Dimensionierung von Solegewinnungskavernen im Salzaareal Eigentäl (Zusammenfassung)	21.02.13	Schweizer Salinen AG	(32)	GM
Gebirgsmechanische Auslegung des Solegewinnungsfeldes Grosszinggibrunn (Zusammenfassung)	21.02.13	Schweizer Salinen AG	(33)	GM
Gutachterliche Stellungnahme zum Bruchverhalten der Kavernen beim Überschreiten der Auslegungsdaten (Zusammenfassung)	13.02.14	Schweizer Salinen AG	(34)	GM
Bohrschema Produktionsbohrung Rütihard	04.04.19	Schweizer Salinen AG	(35)	BOR
Bohrtechnik und Bohrlochverrohrung**	22.12.03	Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen	(36)	BOR, DIC

## 2 Umfang und Methodik sowie Datengrundlage

Titel des Dokuments	Datum	Urheber / Autor	Referenz-Nr.	Themen-gebiet*
Verrohrung im Bohrloch-Schacht – Werkstattplan – Bohrfeld Grosszinggibrunn	10.12.07	Rapp Infra AG	(37)	KOM
Zusammenstellung: Solkomplettierung, Dichtheitstest, Solung	08.04.19	Schweizer Salinen AG	(38)	KOM, DIC, PRO
Kavernendatenblatt Schweizerhalle (ET CL 16-1)	10.01.01	Schweizer Salinen AG	(39)	PRO
Bohrfeld- und Nutzungsplanung**	22.12.03	Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen	(40)	PRO
Laugungstechnik - Laugungs- / Solbetrieb**	22.12.03	Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen	(41)	PRO
Änderungen Bohrlochverrohrung (ET CL 16-2)	29.09.10	Schweizer Salinen AG	(42)	PRO
Generisches Solkonzept für Neubaukavernen	03.11.16	DEEP Underground Engineering	(43)	PRO
Prozessanweisung: Bohrfeldbetrieb (PA 01)	03.05.17	Schweizer Salinen AG	(44)	PRO
Prozessanweisung: Geologische Bohrfeldbetreuung (PA 16)	03.05.17	Schweizer Salinen AG	(45)	PRO
Zusammenfassender Bericht zur Untersuchung von Kernmaterial der Kavernenbohrung Riburg 144	08.08.18	DEEP.KBB	(46)	PRO
Arbeitsanweisung Fixpunktvermessung (ET AW 16-2)	29.09.10	Schweizer Rheinsalinen	(47)	NIV
Terrainüberwachung durch Nivellamentmessungen (Kapitel 11), inkl. Anhänge	04.09.14	Schweizer Rheinsalinen	(48)	NIV



## 2 Umfang und Methodik sowie Datengrundlage

Titel des Dokuments	Datum	Urheber / Autor	Referenz-Nr.	Themen-gebiet*
Technischer Bericht: Senkungsmessung im Gebiet Wartenberg, Muttenz, Pratteln (Bericht-Nr. 4061.203_2018WB)	Nov. 2018	Rapp Infra AG	(49)	NIV
Technischer Bericht: Senkungsmessung 2018 im Gebiet Rütihard, Muttenz (Bericht-Nr. 4061.205-001)	Jan. 2019	Rapp Infra AG	(50)	NIV
Verfüllungsprotokoll (ET CL 16-3)	Aug. 2003	Schweizer Rheinsalinen	(51)	VER
Verfüllung der Bohrungen im Gebiet Ättigraben / Zurlinden	02.06.14	Schweizer Rheinsalinen	(52)	VER
Arbeitsanweisung Bohrbetrieb: Verfüllung von Bohrlöchern (ET AW 16-10)	April 2016	Schweizer Salinen AG	(53)	VER

- \* EX : Exploration  
 GEO: Geologie  
 GM: Gebirgsmechanik  
 BOR: Bohrtechnik  
 KOM: Komplettierung  
 DIC: Dichtheitstest  
 PRO: Produktion  
 NIV: Nivellement  
 VER: Verwahrung

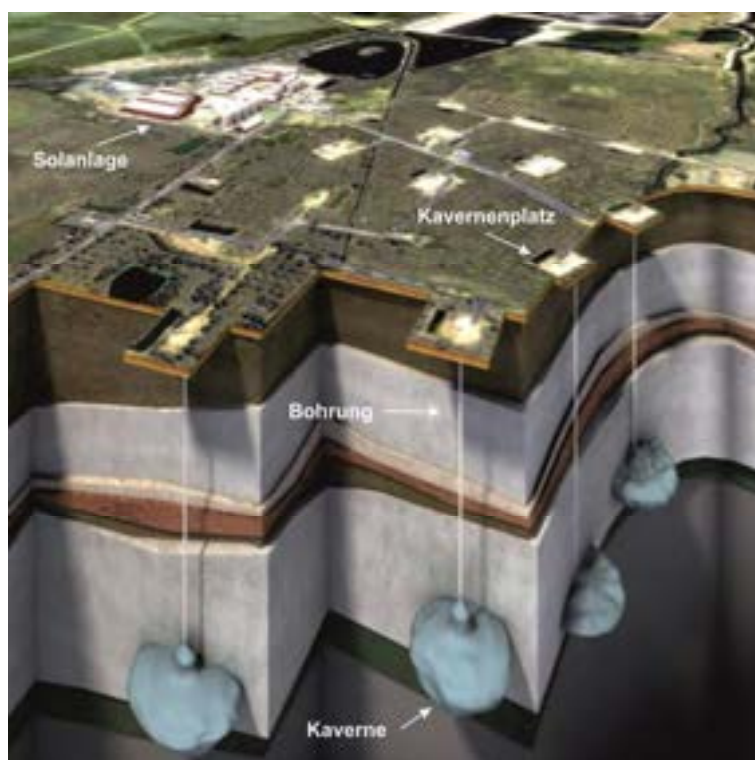
\*\* Dokumente markiert mit: *Achtung: Dokumente sind in einigen Punkten nicht mehr gültig und bedürfen einer Überarbeitung!*

### 3 Lösungsbergbau

## 3 Lösungsbergbau

### 3.1 Allgemeine Darstellung des Lösungsbergbaus

Die Schweizer Salinen AG gewinnt Salz im sogenannten Lösungsbergbau. Hierzu wird das Verfahren der kontrollierten Kavernensolung angewandt. Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung einer Kavernenanlage zur Solegewinnung.

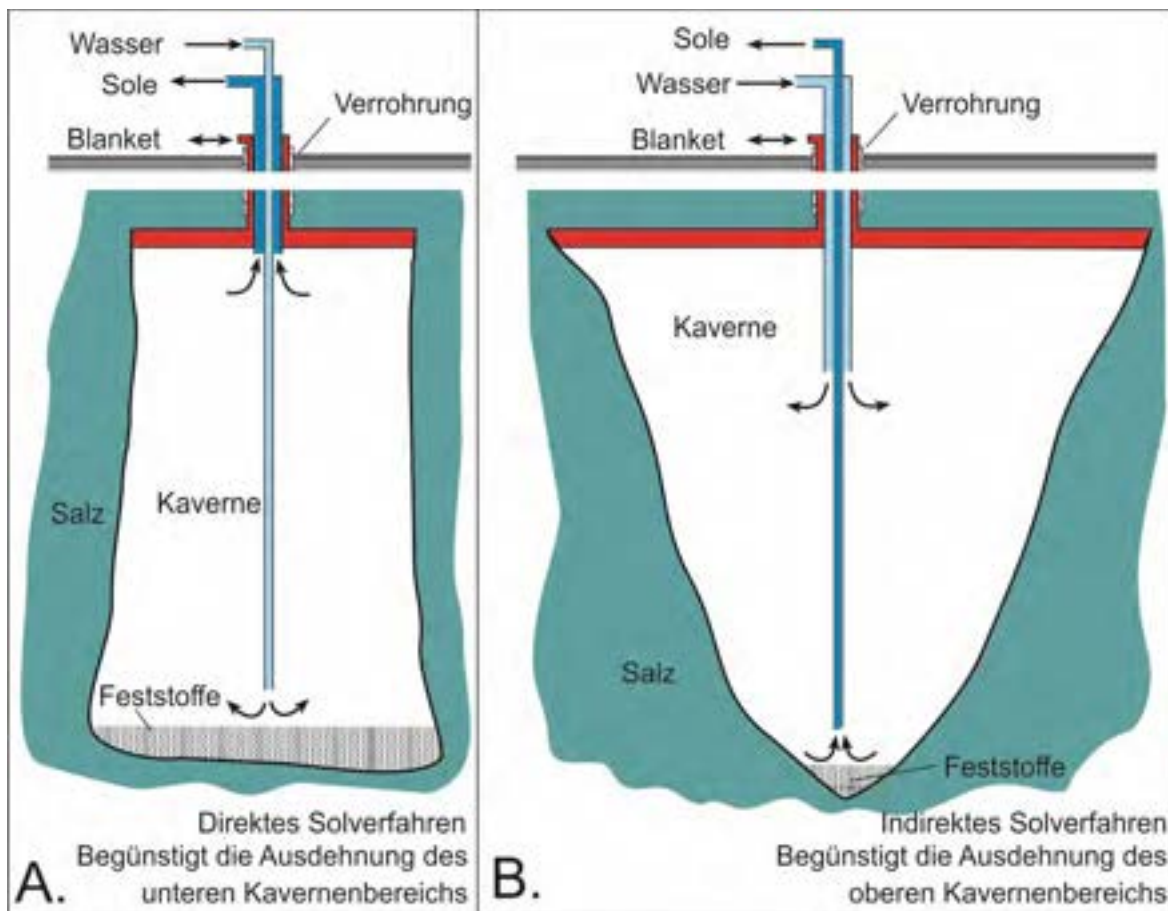


**Abbildung 1: Darstellung einer Kavernenanlage zur Solegewinnung**

Zunächst werden Bohrungen bis in die Salzlagerstätte niedergebracht. Um die Sole zu produzieren, werden üblicherweise zwei Stahlrohre unterschiedlichen Durchmessers in die Bohrung eingebaut, wobei das Rohr mit dem kleineren Durchmesser (inneres Solrohr) in dem Rohr mit dem größeren (äußeres Solrohr) installiert wird. Durch diese Rohrkonfiguration stehen zwei Fließwege zur Verfügung: Wasser kann durch eines der Rohre injiziert werden, wodurch das Salz in der Lagerstätte gelöst wird. Die so mit Salz angereicherte wässrige Lösung (Sole) wird durch das andere Rohr an die Erdoberfläche gefördert. Je nachdem welches Rohr für die Wasserinjektion genutzt wird, spricht man von direkter oder indirekter Solung (Abbildung 2).

Durch den Lösungsprozess entsteht ein mit Sole gefüllter künstlicher unterirdischer Hohlraum, der Kaverne genannt wird. Um 1 m<sup>3</sup> Salz zu lösen, sind 7 bis 8 m<sup>3</sup> Wasser notwendig. Feststoffe im Salzgestein, die sich nicht im Wasser lösen, setzen sich im unteren Bereich der Kaverne als „Sumpf“ ab. Die horizontale Ausdehnung der Kaverne und ihre Form kann sowohl mittels des Solverfahrens (direkte oder indirekte Solung) als auch mittels der Injektionsrate und der Position der Solstränge gezielt gesteuert werden.

### 3 Lösungsbergbau



**Abbildung 2: Schematische Darstellung des Lösungsbergbaus, modifiziert nach (54)**

Um das Lösen des Salzes im oberen Bereich und somit auch die Ausdehnung der Kaverne nach oben zu kontrollieren, wird in das Dach der Kaverne ein Sperrmedium eingebracht, auch Blanket genannt. Als Sperrmedium eignen sich entweder Gase oder Flüssigkeiten, die das Salz nicht lösen, nicht mit Wasser mischbar sind und eine geringere Dichte als Wasser haben.

Die geförderte Sole wird gereinigt und in Verdampfern erhitzt, so dass das Salz wieder auskristallisiert. Das so entstandene Salz wird auch als Siedesalz bezeichnet.

Am Ende des Solbetriebes wird die Kaverne stillgelegt. Hierzu verbleibt die Kaverne flüssigkeitsgefüllt, die Bohrung wird verschlossen.

Generell können drei Phasen des Kavernenbetriebes unterschieden werden:

1. Bauphase (im Wesentlichen Bohrung und Solkomplettierung)
2. Produktionsphase (Solbetrieb)
3. Stilllegung und Nachbetriebsphase

Bei Beachtung aller Faktoren wie z. B. geologischer, gebirgsmechanischer und bohr- und soltechnischer Aspekte ist in jeder dieser Phasen ein sicherer Betrieb der Salzgewinnung mittels Lösungsbergbau gewährleistet, sowohl hinsichtlich der Stabilität der Kavernen, aber auch hinsichtlich umweltrelevanter Aspekte (z. B. Grundwasserschutz).

### **3 Lösungsbergbau**

Im Vergleich zum konventionellen bergmännischen Abbau von Salz bietet die Salzgewinnung im Lösungsbergbau zudem folgenden Vorteile:

- geringer obertägiger Flächenbedarf,
- nichtlösliche Verunreinigungen verbleiben in der Kaverne,
- über Tage entstehen keine großen Rückstandshalden,
- das Salz kann in Form von Sole mittels Pumpen und Soletransportleitungen weiter befördert werden.

#### **3.2 Historie des Lösungsbergbaus**

Der Lösungsbergbau ist eine sehr alte Gewinnungstechnologie. Die ersten Hinweise auf den Abbau von Salz mittels Lösungsbergbau finden sich in China (55), wo bereits im Jahr 300 v. Chr. Schachtbrunnen für die Solegewinnung errichtet wurden. Tiefere Bohrungen zur Förderung von Sole sind ab dem 11. Jahrhundert bekannt. In Europa finden sich erste Hinweise auf einfache Schachtbrunnen zur Solegewinnung im Jahr 858 n. Chr. in Frankreich. Im Mittelalter und in der frühen Neuzeit wurde dort Sole aus mehreren Hundert Meter tiefen Bohrungen produziert (56).

Die Geschichte der Schweizer Salinen AG begann vor ca. 450 Jahren mit der Verdampfung von Sole, die aus natürlichen Quellen stammte. Als die Quellen oberflächlich versiegt, wurden Stollen immer tiefer in den Berg getrieben, um weiterhin zur natürlichen Sole zu gelangen. Über einen kurzen Zeitraum wurde Salz bergmännisch im Untertagebau abgebaut und im Bergwerk aufgelöst, um auf diese Weise Sole zu gewinnen.

Anschließend und bis heute werden Bohrungen abgeteuft und die Sole aus Kavernen mittels Lösungsbergbau gewonnen. Die heutige Salzproduktion der Schweizer Salinen AG stützt sich ausschließlich auf den Lösungsbergbau. Die Schweizer Salinen AG produziert, abhängig vom aktuellen Bedarf, zwischen 400.000 und 600.000 Tonnen Salz pro Jahr und deckt damit den Salzbedarf der gesamten Schweiz (57).

Nicht nur in der Schweiz, sondern auch in Ländern wie Dänemark, Niederlande und Österreich nimmt die Salzgewinnung mittels Lösungsbergbau heute eine führende Rolle bei der Salzproduktion ein. Im Jahr 2015 produzierten diese vier Länder zusammen 8,7 Millionen Tonnen Salz mittels Lösungsbergbau (58). Die Gewinnung von Sole aus Kavernen und die anschließende Salzproduktion ist eine gängige Praxis in Europa.

## 4 Stand der Technik

### 4 Stand der Technik

#### 4.1 Geologische Erkundung

##### Zielsetzung

Einer der ersten Schritte eines jeden Kavernenprojekts ist die geologische Erkundung, deren Ziel es ist, die Lagerstätte mit all ihren relevanten Eigenschaften zu erfassen, die für die Einschätzung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit und für die Gewährleistung eines sicheren Kavernenbetriebs und einer langzeitsicheren Nachbetriebsphase bekannt sein müssen.

Diese Eigenschaften umfassen im Wesentlichen die Geometrie der am Standort vertretenen Schichtglieder, ihre Teufenlage und Mächtigkeiten, ihre unterschiedlichen lithologischen und geochemischen Ausprägungen und nicht zuletzt ihre petrophysikalischen und geomechanischen Charakteristika. Die Detailtiefe, die Methodik und somit der technische Aufwand der Erkundung richten sich dabei nach der geplanten Nutzung, der (erwarteten) Komplexität der Lagerstätte und dem Umfang der vorhandenen Vorinformation.

Die Errichtung von Kavernen zur Solegewinnung, die den zuvor festgelegten Spezifikationen (z. B. Kavernendimension) entsprechen, ist nur bei hinreichender Kenntnis der Salzlagerstätte möglich.

Entsprechend den Anforderungen des Projektes (wirtschaftliche, technisch-betriebliche und sicherheitsrelevante Anforderungen) sind zunächst die Erkundungsziele festzulegen. Für ein Salzgewinnungsprojekt umfassen diese im Wesentlichen die Erhebung von qualitativen und quantitativen Daten

- zum strukturellen und stofflichen Aufbau des Deckgebirges, einschließlich der gebirgsmechanisch wirksamen Tragelemente und der integritätsrelevanten Horizonte (potentiell permeable Schichten),
- zu den in Nutzung stehenden und/oder potentiell nutzbaren Grundwasserleitern,
- zum strukturellen und stofflichen Aufbau des Salzkörpers, einschließlich nicht- und leichtlöslicher Zwischenschichten, die nicht aus (Stein-)Salz bestehen, und integritätsrelevanter Horizonte (potentiell permeable Schichten) sowie
- zur Geometrie des Salzkörpers, seiner Top- und Basisfläche sowie seiner Begrenzung zu den Seiten (Strukturrand, begrenzende Störungen, Auskeilen des Salzlagere).

Die wenigsten der aufgeführten Eigenschaften des Untergrundes sind mit den zur Verfügung stehenden Erkundungstechniken direkt zu ermitteln, sondern müssen über Interpretation und Modellbildung aus den (Mess-)Daten und ggf. aus anschließenden Testen abgeleitet werden.

##### Ablauf und Methoden der Erkundung

Ein vollständiges Erkundungsprogramm wird in der Regel so gestaltet, dass zunächst im regionalen Maßstab Daten erhoben werden und darauf aufbauend schrittweise und zunehmend ortskonkret und mit zunehmender Detailtiefe erkundet wird. Im ersten Schritt werden hierzu häufig Literaturquellen und öffentlich zugängliche Datenbanken (etwa der geologischen Dienste) ausgewertet sowie die Primärdaten vorangegangener Kampagnen im Zielgebiet oder, soweit sinnvoll übertragbar, aus räumlich angrenzenden Bereichen ausgewertet. Vor allem im mitteleuropäischen Raum, wo der regionalgeologische Kenntnisstand überwiegend sehr hoch ist, können so häufig bereits eine Modellvorstellung zum Strukturbaue der Lagerstätte und ein erstes lokationsspezifisches Vorprofil abgeleitet werden.

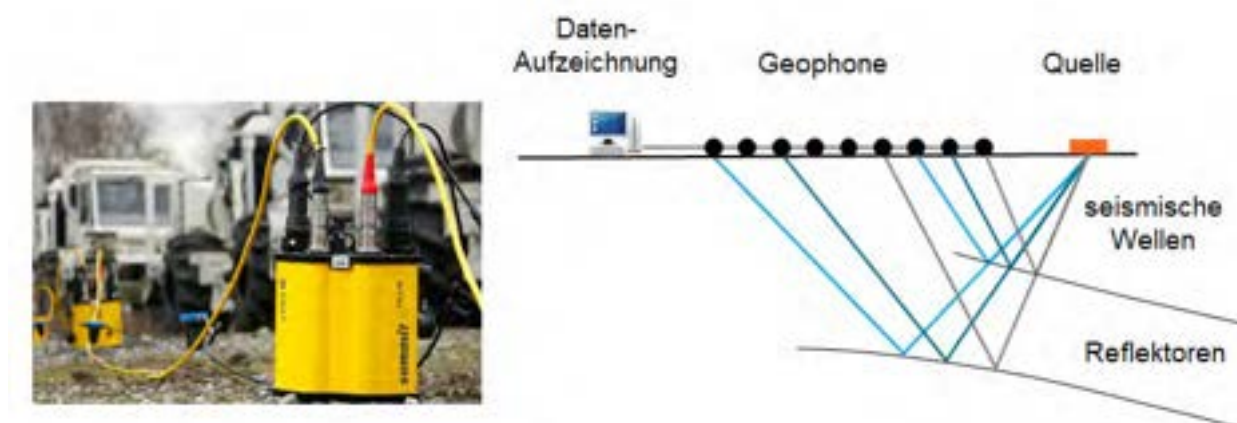
Zumeist schließt sich daran eine Erkundung des eigentlichen Projektgebietes mit geophysikalischen Oberflächen-Messungen an. Die Erkundung von der Oberfläche bedarf aber in größerem Umfang eines

#### 4 Stand der Technik

zugrundeliegenden Untergrundmodells, das Annahmen über den Aufbau der Lagerstätte und ihrer Deck-schichten bereits enthält.

Technisch vergleichsweise wenig aufwendig und mit geringen Kosten verbunden sind Gravimeter-Messungen und verschiedene geoelektrische Methoden (Widerstandsgeoelektrik, Elektromagnetik, Magnetotellurik). Da die Ergebnisse dieser Messungen jedoch noch keinen detaillierten Eindruck von der Geometrie, Begrenzung und Teufenlage des Salzkörpers im Untergrund liefern, sind sie vor allem für die Vorerkundung geeignet und müssen in der Regel mit nachfolgenden Erkundungsschritten präzisiert und ergänzt werden.

Aufwendiger, aber ungleich besser zur räumlichen Auflösung der Strukturen im Untergrund geeignet als die vorgenannten Verfahren sind (reflektions-)seismische Methoden. Seismik misst die Laufzeit und Amplitude von Schallwellen die künstlich an der Erdoberfläche erzeugt und an Grenzflächen im Untergrund gebrochen und reflektiert werden (Abbildung 3). Zu unterscheiden ist zwischen der 2D- und der 3D-Seismik, die beide im Zusammenhang mit individuellen Projektanforderungen und einem spezifischen geologischen Umfeld ihre Berechtigung haben. Zu beachten ist, dass eine 2D-Seismik ausschließlich Informationen entlang einzelner Schnittebenen durch den Untergrund liefert und vor allem hinsichtlich solcher Strukturen, die gegebenfalls zwischen den Linien des Seismik-Netzes liegen, interpolationsbehaftet ist und mit einer gewissen Unschärfe belegt ist. Eine 3D-Seismik ordnet dagegen allen Daten Raumkoordinaten zu und liefert einen interpolationsfreien Volumenkörper des Untergrundes.



**Abbildung 3: Links: Geophone zur Aufzeichnung des Signals; Rechts: Schematische Darstellung einer seismischen Erkundung**

Für viele Anforderungen in der Salzerkundung ist die weniger aufwendige 2D-Seismik bereits ausreichend. Dabei müssen die Anordnung und der Abstand der Anregungspunkte, die eingesetzte Anregungsenergie und die Länge der Geophon-Auslage auf das Erkundungsziel und die Geometrie und Teufenlage der zu erkundenden Struktur hin ausgelegt sein. Das Netz seismischer Linien sollte möglichst parallel oder senkrecht zu den Strukturelementen im Untergrund (Schichten, Störungen) orientiert sein. Um eine enge Korrelation der seismischen Information mit Bohrungsinformationen zu erreichen, sollten die Seismiklinien die Lokationen bestehender oder geplanter Bohrungen schneiden.

Anders als die Erkundung in der Fläche mit geophysikalischen Oberflächen-Messungen stellen Erkundungsbohrungen nur punktuelle Aufschlüsse dar. Jedoch geht die Detailtiefe der mit einer Bohrung gewinnbaren Daten weit über das hinaus, was eine geophysikalische Erkundung von der Oberfläche zu leisten vermag. Auch sind nur mit einer Bohrung Proben des Materials im Untergrund (Bohrkerne) direkt zu gewinnen.

#### 4 Stand der Technik

Die folgenden bohrungsbasierten Untersuchungen wurden in den vergangenen Jahrzehnten in der Salz-  
erkundung etabliert bzw. weiterentwickelt:

- die petrographische Analyse des Bohrkleins („Cuttings“) in zuvor definierten Beprobungsabständen (Abbildung 4),
- die petrographische und strukturgeologische Auswertung von orientiert gewonnenen Bohrkernen (siehe Abbildung 5),
- die geophysikalische Vermessung des unverrohrten Bohrlochs („Openhole Logging“) zur Ermittlung von Formationsdichte sowie der natürlichen Gammastrahlung und ggf. weiterer Eigenschaften (auch Spektral-Gamma, Neutron-Porosität, akustische oder elektrische Imaging-Verfahren),
- in marinen (aus Meerwasser abgeschiedenen) Salzlagerstätten auch die Bestimmung des Bromid-Gehalts im Halit für die relative stratigraphische Zuordnung.



Abbildung 4: Bohrklein („Cuttings“) zur Interpretation für den Geologen aufbereitet



Abbildung 5: Aus Bohrungen entnommene Bohrkern

#### **4 Stand der Technik**

Die räumliche Reichweite der vorgenannten Methoden ist auf die Bohrspur begrenzt oder erstreckt sich, wie im Falle einiger Bohrlochmessungen, allenfalls wenige Dezimeter in die umgebende Formation hinein. Geophysikalische Bohrloch-Verfahren wie Bohrlochradar (EMR-Messung) und VSP („Vertical Seismic Profiling“) gestatten es demgegenüber, petrophysikalische bzw. lithologische Kontrastflächen als Reflektionspunkte und -linien in einer Entfernung von bis zu einigen Hundert Metern vom Bohrloch abzubilden und in ihrer Raumlage zu erfassen.

Das Bohrkernprogramm sollte im Hinblick auf den erwarteten Strukturbau im Salinar und das erwartete Schichteinfallen geplant und flexibel ausgelegt werden. Die Orientierung der Bohrkerns und damit die Möglichkeit, die am Kern aufgenommenen Strukturwerte im Raum zu orientieren, sind für die strukturgeologische Interpretation essentiell. Die Orientierung erfolgt entweder mittels eines magnetischen bzw. elektromagnetischen Kompass-Systems (EMS) schon beim Bohren der Kerne oder nachträglich durch Korrelation der Kerne mit einer akustischen oder elektrischen Abbildung der Bohrlochwand. Je nach Anforderungen und Erkundungsziel werden entweder in vordefinierten Profilabschnitten Einzelkerne (zumeist mit einer Standardlänge von 9 m) gebohrt, oder es wird eine längere zusammenhängende Profilstrecke kontinuierlich gekernt. Für letztere Anwendung empfiehlt sich das Seilkernverfahren, das bei langen Kernstrecken einen zügigeren Arbeitsablauf ermöglicht.

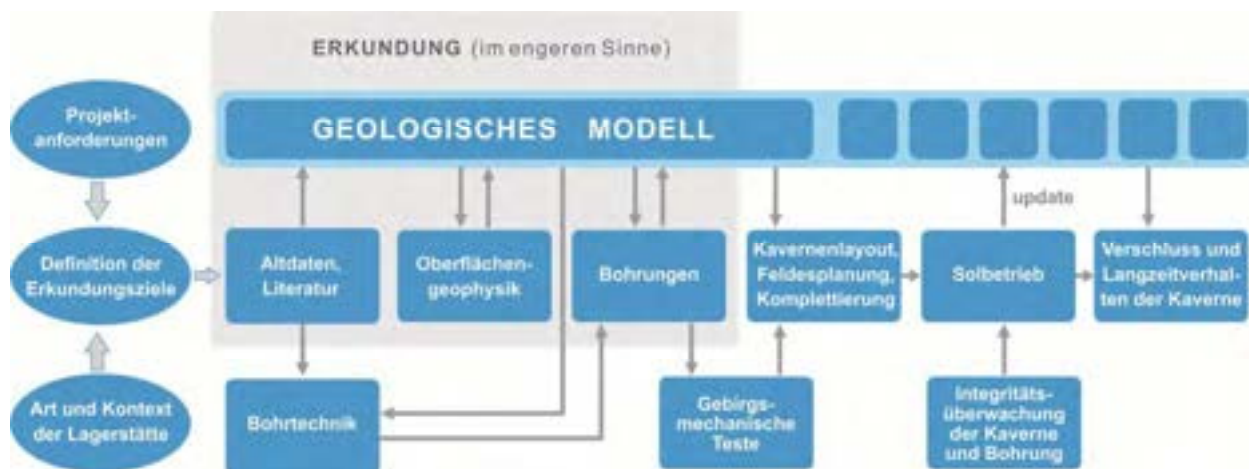
Für alle Erkundungsmethoden gilt, dass sie immer in Kombination angewandt und die mit ihnen generierten Daten im Gesamtzusammenhang interpretiert werden sollten. Da alle geologischen Sachverhalte räumlichen Charakter haben und geologische Körper und Strukturen damit nur im dreidimensionalen Raum schlüssig interpretiert, in ihren wahren Lagebeziehungen erfasst und visualisiert werden können, empfiehlt sich die Zusammenführung der Erkundungsdaten in einem digitalen geologischen 3D-Modell mit räumlichem Bezug. Ein solches Modell sollte bereits parallel zu den ersten Erkundungsschritten aufgesetzt und im gesamten Projekt mitgeführt und fortlaufend aktualisiert werden. Ein digitales 3D-Modell dient nicht nur der Darstellung der geologischen Ergebnisse, sondern stellt auch für die Abbauplanung, d. h. die Kavernenpositionierung und -dimensionierung, ein wertvolles Planungswerkzeug dar. In der Regel werden das Kavernenfeld und die Kavernen bereits im Planungsstadium vorläufig ausgelegt, um die Machbarkeit des Vorhabens und die mögliche Salzproduktion abzuschätzen. Gestützt auf die vorhandenen geologischen Ergebnisse bzw. ein digitales 3D-Modell des Untergrundes erfolgt auch die technische Planung der Produktionsbohrungen.

Die anschließende Feldesentwicklung erfolgt schrittweise. Dabei spielt auch die Bohrreihenfolge der Produktionsbohrungen für die weitere Erkundung eine wichtige Rolle. Generell sollte ein Kavernenfeld „vom Bekannten ins Unbekannte hinein“ entwickelt werden, wobei dann eine fortlaufende Aktualisierung der Bewertung geplanter Bohrlokationen erfolgt. Mit jeder niedergebrachten Produktionsbohrung, ebenso wie mit den Erfahrungen aus dem anschließenden Solbetrieb, werden Daten gesammelt, die das Verständnis der örtlichen Geologie vertiefen und zu einer Aktualisierung des geologischen Modells führen. Nach jeder Aktualisierung des geologischen Modells erfolgt eine Überprüfung aller weiteren Planungen und bei Bedarf z. B. auch eine Anpassung der Bohrreihenfolge und/oder eine Verschiebung einzelner Lokationen. Neue Produktionsbohrungen werden nur abgeteuft, wenn eine ausreichende Kenntnis über die geologischen Verhältnisse an der geplanten Lokation vorhanden ist.

Das Diagramm in Abbildung 6 zeigt das Zusammenspiel der unterschiedlichen zugehörigen Fachdisziplinen sowie den Austausch von Daten und Ergebnissen, die zu einer Überarbeitung und Anpassung der Planungen im Zuge der Feldesentwicklung führen.



## 4 Stand der Technik



**Abbildung 6: Prinzipieller Ablauf bei der Überarbeitung und Anpassung der Planungen**

Geologische Erkundung im Sinne von Untersuchungen, Erkenntnisgewinn und Modellbildung bzw. -überarbeitung beschränkt sich insofern nicht nur auf die Projektierungsphase, sondern wird auch mit der Realisierung des Projektes weitergeführt. Daher werden auch die ersten Produktionsbohrungen an einem neuen Standort mit einem umfassenden geologischen Untersuchungsprogramm begleitet. Je nach Befund und geologischer Situation können die Untersuchungen für weitere Produktionsbohrungen mit verlässlicher geologischer Prognose dann angepasst bzw. im Umfang reduziert werden.

## 4.2 Gebirgsmechanik

### Hintergrund

Aufbauend auf den Ergebnissen der geologischen Erkundung (Exploration) der Lagerstätte erfolgt eine gebirgsmechanische Dimensionierung und Auslegung der Kavernen durch einen gebirgsmechanischen Gutachter, um die Rahmenbedingungen der Aussolung (Lage und geometrische Form) und des Betriebs (Betriebsdrücke) der Kavernen festzulegen. Die Auslegung einer Salzkaverne erfolgt im Prinzip in gleicher Weise wie für andere Untergrundbauwerke (Tunnel, Grubenbaue etc.) und ist in ihrer Zielsetzung (Stabilität, Gebrauchsfähigkeit und Schutz Dritter) mit der Baustatik im Hochbau vergleichbar. Allerdings unterscheiden sich die angewendeten Nachweisverfahren grundlegend davon. Da die Eigenschaften des Baugrundes und des Baustoffes (im Kavernenbau ist es in beiden Fällen das Gebirge) nicht im Voraus bekannt sind, müssen umfangreiche Vorerkundungen und Tests (In-situ und im Labor) vorgenommen werden. Die Nachweisverfahren bedienen sich dieser Erkenntnisse und wenden dies auf physikalisch zu untersuchende Aufgabenstellung und durchdringende Modelluntersuchungen an, die jedoch eine bau- und betriebsbegleitende Beobachtung und Überprüfung erfordern. Dieses nach Eurocode 7 Abschnitt 2.7 (59) als Beobachtungsmethode bezeichnete Verfahren für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung in der Geotechnik gilt als anerkannter Standard für gebirgsmechanische Untersuchungen zur Dimensionierung von Salzkavernen.

Das Ziel dieser Dimensionierung und Auslegung einer Salzkaverne ist die Definition ihrer Größe, Form und Teufenlage sowie ihrer Anordnung in der Salzstruktur. Darüber hinaus werden im Rahmen der Dimensionierung die minimal und maximal zulässigen Betriebsdrücke festgelegt.

#### 4 Stand der Technik

Zusätzlich wird eine Einschätzung der zu erwartenden Auswirkungen des Kavernenbetriebs gegeben. In diesem Zusammenhang ist die Konvergenzentwicklung einer Kaverne zu nennen, die unmittelbar zu einer Absenkung der Geländeoberfläche führt.<sup>1</sup>

Die gebirgsmechanischen Empfehlungen sollen einen sicheren Betrieb und eine langzeitsichere Nachbetriebsphase gewährleisten. Dies bedeutet, dass sowohl die Stabilität als auch die geologische Dichtheit des die Kavernen umgebenden Gebirges zu jeder Zeit gegeben sein muss. Auch ist die technische Dichtheit der Einbauten zu gewährleisten. Stabilitäts- und Dichtheitsanforderungen werden zusammengefasst zur Anforderung an die Integrität einer Kaverne.

Da der gesamte Lebenszyklus einer Kaverne beachtet werden muss, ist auch die spätere Verwahrungphase einer Kaverne bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen. Die gebirgsmechanischen Vorgaben (wie z. B. Form und Tiefe) beziehen neben dem Bau und Betrieb auch eine sichere Verwahrung mit ein. Letzteres wird zu gegebener Zeit anhand eines lokationsspezifischen geotechnischen Nachweises geprüft (siehe Kapitel 4.7).

Wesentliche Anforderungen an die Stabilität einer Kaverne sind zum Beispiel:

- die Langzeitstabilität der Haupttragelemente des umgebenden Gebirges, das aus der Salz-Hangendschwebe  $S_1$  (oberhalb der Kaverne), der Salz-Liegendschwebe  $S_2$  (unterhalb der Kaverne) und den umgebenden Pfeilern  $b$  (zwischen benachbarten Kavernen bzw. zwischen Kaverne und dem Nebengebirge) besteht (Abbildung 7),
- die Konturstabilität der Kaverne, für die nachzuweisen ist, dass sich kein progressiver Bruch (Bruch infolge Überschreitung der Festigkeit mit Ausbildung von Scherflächen) an der Kavernenwand ereignet.

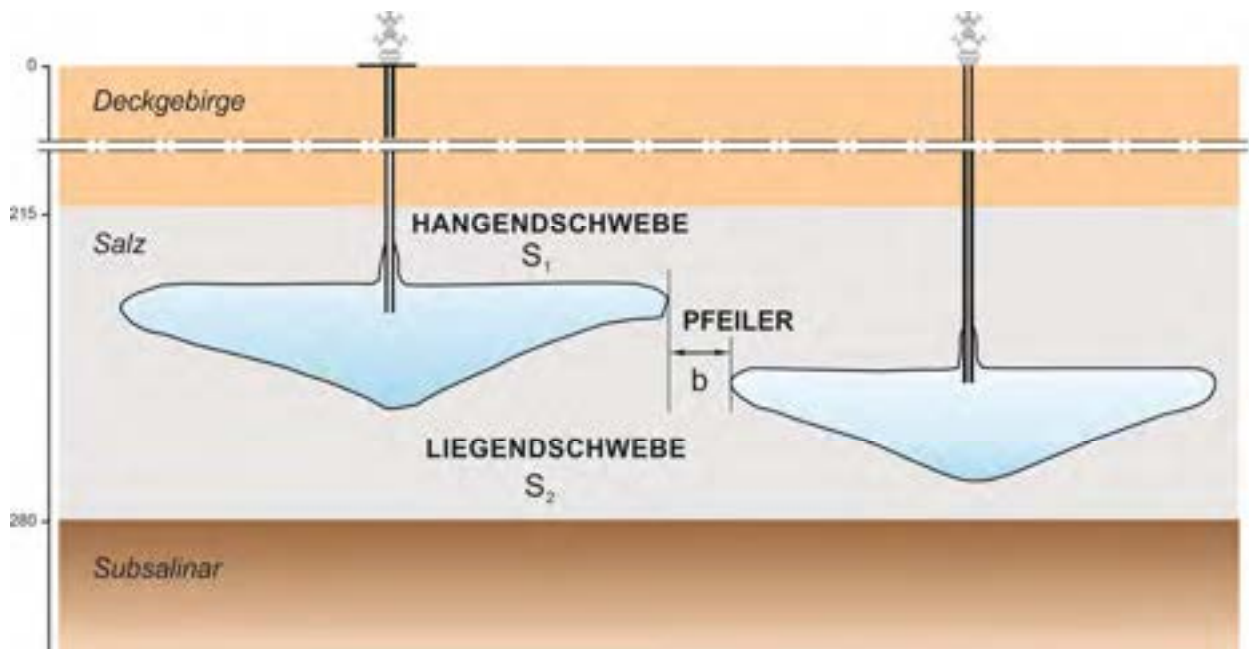


Abbildung 7: Haupttragelemente des umgebenden Gebirges

<sup>1</sup> Als Folge der Hohlraumschaffung ändert sich der Gebirgsspannungszustand. Diese Zustandsänderung führt zum Kriechen des umgebenden Salzes. Das Kriechen führt dazu, dass das Hohlraumvolumen der Kaverne allmählich abnimmt. Dieser Prozess wird als Konvergenz bezeichnet.

#### 4 Stand der Technik

Zur Erfüllung der Anforderungen an die Stabilität wird neben den einzuhaltenden Abmessungen der Haupttragelemente ein minimal erforderlicher Kaverneninnendruck festgelegt, der stützend auf das Gebirge wirkt.

Hinsichtlich der Forderungen an die Dichtheit des Systems ist vor allem der maximale Druck in der Kaverne so zu begrenzen, dass keine Gebirgsspannungszustände entstehen, die die primäre geologische Dichtheit des Salzgesteins global verändern. Darüber hinaus ist die technische Dichtheit der letzten zementierten Rohrtour zu gewährleisten, die über laterale Einspannungsverhältnisse und vertikale Verformungsbegrenzungen im Bereich des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour bewertet wird (siehe Kapitel 4.5).

Die Beschreibung der Konvergenz der Kaverne (Volumenverlust) während des Betriebs wird benötigt, um Aussagen über die zu erwartende Senkung der Geländeoberfläche machen zu können.

#### Ablauf der gebirgsmechanischen Bewertung und Auslegung

Das gebirgsmechanische Untersuchungskonzept basiert auf einer stufenweisen Vorgehensweise, die zunächst die vorliegenden Explorationsergebnisse zu einem Gebirgsmodell zusammenfasst, welches dann in ein gebirgsmechanisches Untersuchungsmodell überführt wird. Einen Überblick über dieses Konzept gibt Abbildung 8. Im Zuge dieses Prozesses werden auch gebirgsmechanische Tests im Labor zur Bestimmung der lokationsspezifischen Festigkeits- und Verformungseigenschaften der relevanten Gesteine durchgeführt, die am Tragsystem des Gebirges beteiligt sind.



Abbildung 8: Gebirgsmechanisches Untersuchungskonzept

#### 4 Stand der Technik

Unter Anwendung anerkannter Berechnungsverfahren wird das Tragverhalten des Gebirges in der Umgebung der Kaverne mit numerischen Berechnungsmodellen simuliert. Anhand der Berechnungsergebnisse können dann die entstehenden Beanspruchungszustände des Gebirges hinsichtlich der geforderten Integritätskriterien bewertet werden. Am Ende der gebirgsmechanischen Untersuchungen werden – basierend auf dieser Bewertung – gebirgsmechanische Empfehlungen abgegeben. In Abbildung 9 sind die zu bestimmenden Parameter einer gebirgsmechanischen Dimensionierung und Auslegung für eine Salzkaverne aufgeführt. Die gebirgsmechanischen Empfehlungen enthalten in der Regel auch Empfehlungen zur Überwachung des Betriebs vor allem zur Kontrolle des durch die Solung entstandenen Hohlraums und der einzuhaltenden minimalen wie maximalen Kopfdrücke. Dazu werden in regelmäßigen Abständen Vermessungen durchgeführt, die dann nachfolgend hinsichtlich der Integritätsanforderungen an die Kaverne bewertet werden. Die Kavernenkopfdrücke werden im Allgemeinen kontinuierlich gemessen und überwacht.

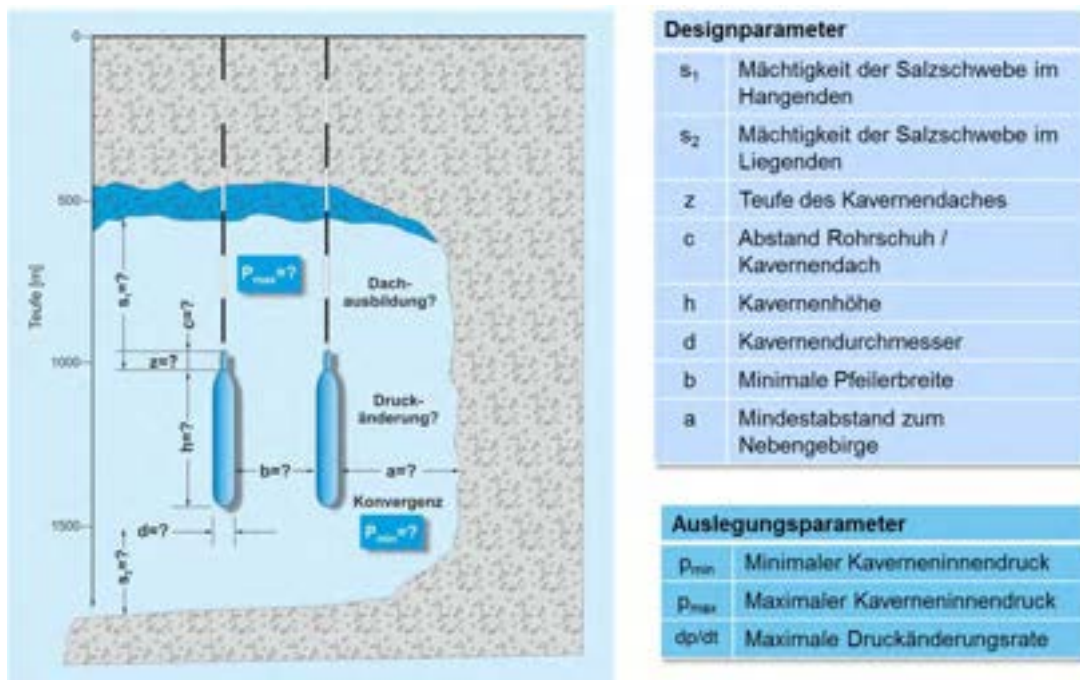


Abbildung 9: Gebirgsmechanische Empfehlungen

### 4.3 Bohrtechnik

#### Funktion der Bohrung

Die Bohrung stellt die Verbindung zwischen der Erdoberfläche und der Salzlagerstätte bzw. später zur Kaverne her. Oberstes Ziel bei der Erstellung einer Bohrung ist es, die Integrität der Bohrung zu jedem Zeitpunkt während des Bohrprozesses, der Betriebsphase und der Rückverfüllung zu gewährleisten. Eine Bohrung gilt als integer, wenn die in ihr enthaltenen flüssigen oder gasförmigen Medien in jedem möglichen vorgesehenen Betriebszustand, also bei jeder möglichen Kombination von Druck und Temperatur, sicher beherrscht werden können und eingeschlossen bleiben. Es ist das übergeordnete Ziel, durch entsprechende technische Maßnahmen und Prozeduren Vorsorge gegen Gefahren für Leben und Gesundheit, Sachgüter, Natur und Umwelt zu treffen (Schutzziele bzw. zu schützende Objekte). In Deutschland gilt als Leitfaden für die Planung und Bewertung tiefer Bohrungen seit kurzem die vom Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. zusammengestellte „Technische Regel Bohrungsintegrität“ (2).

## 4 Stand der Technik

### Grundlegender Ablauf der Bohrung

Eine Bohrung wird „von unten nach oben“ geplant und dimensioniert. Dies bedeutet, dass zuerst der erforderliche Enddurchmesser im tiefsten Punkt (Endteufe) der Bohrung definiert wird. Daraus ergeben sich die notwendigen Bohrungsabschnitte, deren Durchmesser teleskopartig nach oben zur Erdoberfläche hin zunehmen.

Primäres Ziel der Auslegung ist es,

- die Integrität des Bohrlochs in der Bohr- und Betriebsphase zu gewährleisten,
- die Bohrung so auszulegen, dass sie nach der Betriebsphase wieder stillgelegt und integer verschlossen werden kann („Plug and Abandonment“),
- die einzelnen Bohrlochabschnitte gegeneinander zu isolieren (da z. B. unterschiedliche Spülmungszusammensetzungen verwendet werden),
- die Bohrung gegen in Nutzung stehende und/oder potentiell nutzbare Grundwasserleiter zu isolieren, um eine Kontamination mit Spülung oder Sole auszuschließen, sowie
- die Bohrung und ihre Einbauten so zu dimensionieren, dass diese allen auftretenden mechanischen Ansprüchen bezüglich Innen- und Außendruck sowie Abstreiffestigkeit der Rohrverbinder standhalten.

Die Bohrung wird entsprechend teleskopartig ausgeführt, wobei der folgende Ablauf stets eingehalten wird:

1. Bohren der jeweiligen Sektion,
2. Einbau einer Stahlrohrtour (Futterrohre),
3. Zementation der Rohrtour durch Einpressen einer Zementschlämme in den Zwischenraum (Ringraum) zwischen Rohrtour und Bohrlochwand.

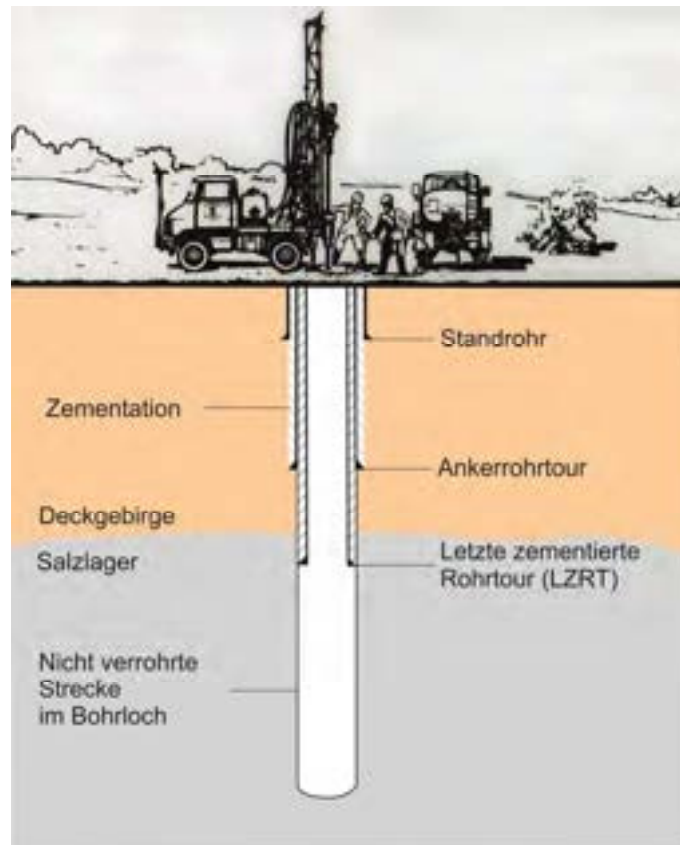
Ganz oben befindet sich das Standrohr, welches zu Beginn der Bohrung in die oberen Lockergesteinsschichten gerammt wird. Zweck des Standrohrs ist es, die Bohrung zu Beginn vor dem Zusammenfall der lockeren Schichten an der Erdoberfläche zu schützen. Die Absetzteufe des Standrohrs richtet sich nach der Mächtigkeit des anstehenden Lockergesteins.

Danach wird mittels Bohranlage das Standrohr ausgeräumt und die Bohrung bis zur geplanten Teufe der nächsten Sektion abgeteuft. Der Durchmesser des Bohrmeißels ist etwas größer als die einzubauende Ankerrohrtour. Ist die entsprechende Teufe erreicht, wird die Rohrtour eingebaut und in der Regel knapp oberhalb des Salzlagers in einem geeigneten Gesteinshorizont abgesetzt. Anschließend wird der verbleibende Raum zwischen Rohr und Formation zementiert. Hierbei wird die Zementschlämme durch das zu zementierende Futterrohr verpumpt, bis sie obertägig im Ringraum (Raum zwischen der Rohrtour und dem Gebirge) wieder austritt. Dadurch wird sichergestellt, dass der Ringraum vollständig mit Zement gefüllt und gegen das Gebirge vollständig abgedichtet ist.

Der nächste Schritt zum Abteufen der letzten Sektion beginnt ebenfalls mit dem Bohren bis die gewünschte Endteufe im Salzlager erreicht ist. Die Endteufe ist dabei je nach Art der Salzlagerstätte entweder durch das Kavernendesign oder die von den gebirgsmechanischen Auslegungen geforderte Mindestmächtigkeit der Liegendschwebe (vgl. Kapitel 4.2) definiert. Die Rohrtour dieser Sektion wird bis in das Salzlager eingebaut. Die Strecke unterhalb (offenes Bohrloch) ist der Bereich, der zum Anlegen der Kaverne geplant ist. Die Teufe der letzten zementierten Rohrtour richtet sich nach der gebirgsmechanischen Auslegung für die Hangendschwebe. Auch hier wird wieder zwischen Gebirge und Rohrtour vollständig zementiert.

#### 4 Stand der Technik

Abbildung 10 stellt den Bohrlochausbau bzw. die unterschiedlichen Rohrtouren vereinfacht dar.



**Abbildung 10: Bohrlochausbau**

In Abhängigkeit des Gebirgsaufbaus und der Endteufe können auch mehrere Sektionen zwischen dem Standrohr und der letzten zementierten Rohrtour notwendig sein, um die Standsicherheit der Bohrung zu gewährleisten.

Je nach Ansatz- und Zielpunkt der Bohrung werden Bohrungen vertikal oder abgelenkt erstellt. Abgelenkte Bohrungen werden mittels Richtbohrtechnik abgeteuft. Die Richtbohrtechnik erlaubt es, eine Bohrung mit einer bestimmten Neigung und einer bestimmten Richtung zu bohren. Bei vertikal geplanten Bohrungen ist eine solche Technik nicht erforderlich. Das Einhalten der vertikalen Bohrspur kann mittels einer starren Bohrlochgarnitur und Bohren mit einer geringen Meißellast erreicht werden. In Abhängigkeit der lokalen geologischen Bedingungen (z. B. Schichteneinfallen, Gesteinsart) und der geplanten Endteufe ist es gegebenenfalls sinnvoll, während des Bohrens die Neigung und Richtung der Bohrspur in regelmäßigen Intervallen zu überprüfen (z. B. mittels Einzelpunktmessungen). Mindestens am Ende des Bohrprozesses sind die Neigung und die Richtung des Bohrlochs zu messen, um die Koordinaten des erreichten Zielpunktes zu überprüfen.

Um das durch die Meißelrotation auf der Bohrlochsohle abgetragene Bohrklein nach Obertage zu fördern und um das Bohrwerkzeug zugleich zu kühlen, wird während des Bohrens eine Spülung zirkuliert. Weiterhin dient die Spülung der Stabilisierung des Bohrlochs während der Bohrphase. Die Zusammensetzung der Spülung wird entsprechend den Eigenschaften der Formation gewählt. In süßwasserführenden Schichten werden nur Spülungen mit Süßwasser eingesetzt. Bohrungstechnisch erforderliche Additive zur Erhöhung der Viskosität sind umweltverträglich und unbedenklich bezüglich des Gewässerschutzes. Ein typisches Additiv ist das Tonmineral Bentonit. Wird Salzgestein gebohrt, so wird die Spülung voll-

## 4 Stand der Technik

ständig aufgesalzen. Dadurch wird verhindert, dass die Bohrlochwand angelöst wird, und die Bohrlochstruktur bleibt erhalten. Gegebenenfalls muss die notwendige Viskosität zum Austrag von Bohrklein über salzresistente Additive eingestellt werden. Wie weiter oben erläutert, wird zuvor die Ankerrohtour eingebaut und zementiert, so dass süßwasserführende Schichten von der Bohrung getrennt und damit geschützt sind, bevor auf salzhaltige Spülung umgestellt wird.

Auch die Zementmischungen zum Abdichten des Ringraumes werden an die Eigenschaften der Bohrlochabschnitte angepasst. In süßwasserführenden Schichten werden die Ringraumzementationen mit Zementen auf Süßwasserbasis durchgeführt. Der Zementation der letzten eingebauten Rohrtour kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie neben der Rohrtour selbst und dem Bohrlochkopf die wesentliche Barriere zur Gewährleistung der Bohrungsintegrität darstellt. Da diese Rohrtour im Salz abgesetzt ist, wird, um ein Anlösen des Salzgesteins zu vermeiden, der Zement mit hochgesättigter wässriger Salzlösung (Sole) angemischt.

Ist die Bohrung fertiggestellt, werden die letzte zementierte Rohrtour und der Zementmantel zwischen Rohr und Formation, d. h. die Zementgüte wie auch die Anbindung des Zementes an einerseits das Rohr und an andererseits das umgebende Gestein, mittels Messungen (Cement-Bond-Log (CBL) bzw. Variabel-Density-Log (VDL), Ultrasonic Radial Imaging o. ä.) überprüft. Auf Basis dieser Messungen kann eine erste Einschätzung zur Dichtheit der Bohrung erfolgen und auch ihr Zustand dokumentiert werden.

Während der Betriebsphase wird in gewissen Abständen eine sogenannte Multifinger-Kaliber Messung durchgeführt, um den Zustand der letzten zementierten Rohrtour zu bewerten. Die Abstände der Messungen richten sich nach der Beanspruchung der Rohre und in welchen Zeiträumen mit einer Zustandsänderung der Rohrtour durch den Betrieb zu rechnen ist. Üblicherweise wird die Kaliber Befahrung ca. alle 10 Jahre durchgeführt und ggf. mit einer akustischen Messung zur Bewertung des Zementes kombiniert.

Schließlich wird die Bohrung mit Solrohren ausgerüstet und obertägig mit einem Bohrlochkopf bzw. Kavernenkopf mit Absperrarmaturen verschlossen. An diese werden die Rohrleitungen für den Solprozess angebunden (siehe Kapitel 4.4).

Ein Drucktest bzw. Dichtheitstest auf die letzte zementierte Rohrtour sowie deren Rohrschuh (das untere Ende des Rohrs) dient dazu, die Dichtheit nachzuweisen und damit einen betriebssicheren und dichten Zustand der Bohrung zu gewährleisten (siehe Kapitel 4.5). Der Dichtheitstest kann vor oder nach dem Einbau der sogenannten Solkomplettierung erfolgen.

### 4.4 Solkomplettierung

Als Solkomplettierung werden alle Ausrüstungsteile bezeichnet, die nach dem Abteufen und Zementieren der Bohrung (Produktionsbohrung) installiert werden. Der Einbau erfolgt, um das Wasser und die Sole kontrolliert im Bohrloch zu zirkulieren sowie das Blanketmedium einzubringen. Dazu besteht die Solkomplettierung aus zwei Solrohren (innerer und äußerer Solstrang) und einem Kavernenkopf bzw. Solkopf mit zugehörigen Absperrarmaturen (Abbildung 11).

Der Steigraum (Innenraum) des inneren Solstranges und der Ringraum zwischen innerem und äußerem Solstrang stehen somit für die Injektion von Wasser bzw. die Produktion von Sole zur Verfügung. Der Ringraum zwischen äußerer Solrohrtour und letzter zementierter Rohrtour dient zur Injektion (und bei Bedarf Rücknahme) des Blanketmediums.

Über den Kavernenkopf können die Zugänge zur Bohrung mit entsprechenden Absperrarmaturen geöffnet und geschlossen werden. An die Absperrarmaturen werden die obertägigen Rohrleitungen angeschlossen, die das Wasser über Pumpstationen heranzuführen und die gewonnene Sole zur Weiterverarbeitung abführen. Darüber hinaus hält der Kopf die frei hängenden Solrohre.

#### 4 Stand der Technik

Der Zugang zum inneren Solrohr erfolgt über eine Absperrarmatur an der Spitze des Kopfes, das sogenannte Topvalve, das es ermöglicht, über eine aufgesetzte Schleuse Messsonden oder andere Werkzeuge in die Bohrung bzw. in die Kaverne einzufahren.

An der Außenseite des äußeren Solstrangs steht das zur kontrollierten Solung erforderliche Blanket an. Bei Verwendung eines gasförmigen Blankets (z. B. Stickstoff) ist der äußere Solstrang daher mit gasdichten Gewindeverbindern auszustatten (wie auch die letzte zementierte Rohrtour). Am inneren Strang steht nur Sole bzw. Wasser an, so dass dort hydraulisch dichte Verbinder ausreichend sind.

Zur Optimierung der Solrate (Volumenstrom bzw. Strömungsgeschwindigkeiten) bzw. zur Minimierung der Reibungsdruckverluste werden die Rohre so gewählt, dass der Steigraum des inneren Stranges einen ähnlichen Strömungsquerschnitt hat wie der Ringraum zwischen innerem und äußerem Solstrang. Der Außendurchmesser des äußeren Solstrangs wird durch das erforderliche Abstandsmaß zur letzten zementierten Rohrtour begrenzt. Je nach benötigter Injektionsrate bzw. gewünschter Soleproduktion haben die Solrohre üblicherweise einen Durchmesser zwischen 3 1/2" und 10 3/4".

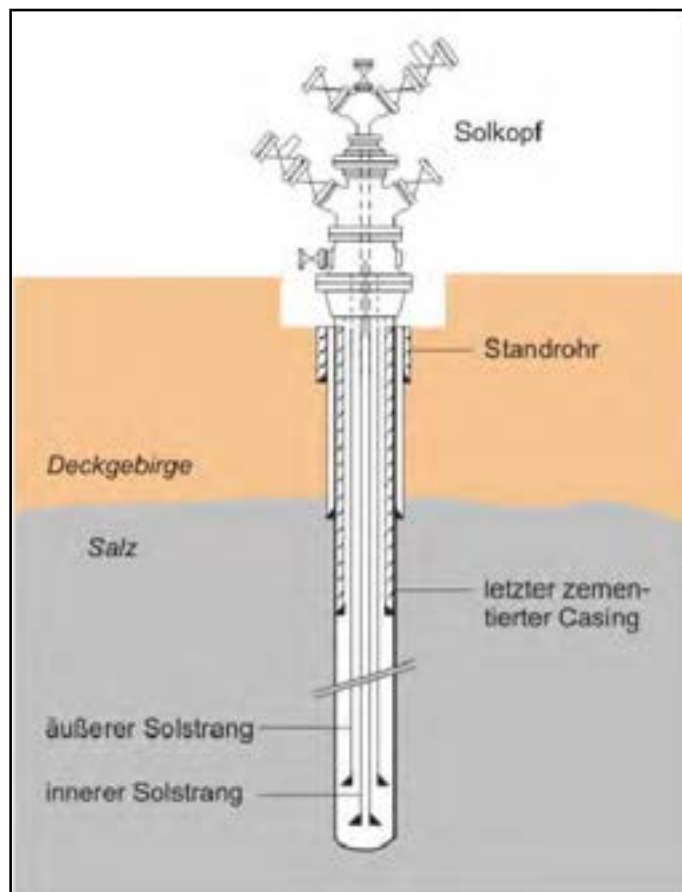


Abbildung 11: Solkomplettierung einer Kavernenbohrung



## 4 Stand der Technik

### 4.5 Dichtheitstest

Nach dem Abteufen der Bohrung (Produktionsbohrung) und vor dem Beginn der Solung ist die Dichtheit der letzten zementierten Rohrtour einschließlich des Rohrschuhs, d. h. des Übergangs Rohrtour-Zementation-Salz, mit einem Test nachzuweisen (2), um sicherzustellen, dass die in der Bohrung zirkulierenden Medien nicht in das Gebirge entweichen können. Im Falle von Solkavernen handelt es sich bei diesen Medien um Frischwasser, Sole und das Blanketmedium. Generell wird bei einem Dichtheitstest ein Testmedium in der Bohrung eingeschlossen. Mittels Pumpen oder Kompressoren wird der Druck in der Bohrung bis zum Testdruck erhöht und anschließend über einen gewissen Testzeitraum beobachtet. Der Testdruck ist so festzulegen, dass damit mindestens die Druckverhältnisse im späteren Betrieb überprüft wurden.

Der Ausgangszustand der Bohrung beim Test entspricht der vollständig abgeteufte und verrohrte Bohrung. Eine Aussolung ist noch nicht erfolgt. In der Regel ist es sinnvoll, dass zum Abschluss der Bohrarbeiten bereits die Solkomplettierung (bestehend aus innerem und äußeren Solstrang sowie Kavernenkopf) installiert wurde. Alternativ kann die Solkomplettierung auch nach dem Dichtheitstest eingebaut werden. Bei der Planung des Testes ist zudem zu berücksichtigen, dass keine Schädigung der Zementierung der Bohrung erfolgen darf. Dazu ist eine ausreichende Wartezeit zur Zementierung nach Fertigstellung der Bohrung einzuhalten.

Die Auswahl des Testmediums erfolgt entsprechend dem späteren Kavernenbetrieb, d. h. ob der spätere Betrieb ausschließlich mit Flüssigkeiten erfolgt, also mit flüssigem Blanket, oder ob gasförmiges Blanket eingesetzt werden soll.

Sofern der spätere Betrieb ausschließlich mit Flüssigkeiten erfolgt, ist ein hydraulischer Dichtheitstest, d. h. mit flüssigem Testmedium, ausreichend. Über den Testzeitraum von 1-2 Tagen erfolgt dann eine Druckbeobachtung. Änderungen des Drucks während des Testzeitraumes deuten auf eine Änderung des Volumens des Testmediums hin und geben so Aufschluss bezüglich Undichtigkeiten und möglicher Leckageraten.

Wird im späteren Betrieb ein gasförmiges Blanket, z. B. Stickstoff eingesetzt, ist die (technische) Gasdichtheit nachzuweisen. Dazu ist der Test mit einem gasförmigen Testmedium, in der Regel Stickstoff, durchzuführen.

Zur Durchführung eines Gasdichtheitstestes wird Stickstoff in die Bohrung injiziert, bis der Gas-Sole-Spiegel etwa 1 bis 3 Meter unterhalb des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour eingestellt ist. Die Sole wird in dieser Phase über den Steigraum abgeleitet. Nachdem der Spiegel positioniert ist, wird die Soleableitung mittels Schließen des entsprechenden Ventils unterbrochen und der Druck durch die fortgesetzte Stickstoffinjektion bis zum Testdruck angehoben. Nach einer Beruhigungszeit von 2 bis 3 Tagen zur Temperaturangleichung beginnt der eigentliche Testzeitraum, während dessen eine Druckbeobachtung erfolgt. Der Testzeitraum muss deutlich länger sein, als bei einem hydraulischen Dichtheitstest, um eine Aussage über die Dichtheit der Bohrung treffen zu können. Da Gase auf Temperaturschwankungen sensibel mit Druckänderungen reagieren, besteht die Herausforderung darin, temperaturbedingte Druckänderungen von möglichen Druckänderungen infolge Leckagen zu unterscheiden.

Eine technische Möglichkeit, die Aussagegenauigkeit eines Gasdichtheitstestes deutlich zu erhöhen, stellt der In-Situ-Bilanz-Test (ISB-Test) dar. Hierbei wird zu verschiedenen Zeitpunkten während des Testzeitraumes die Masse an Testmedium quantifiziert. Aus diesen Massenbilanzen werden zunächst die Leckagemenge und daraus dann eine Leckagerate bestimmt.

Zur Bilanzierung des Testmediums werden in der Bohrung der Druck, die Temperatur und der für das Testmedium zur Verfügung stehende Hohlraum berücksichtigt. Das Volumen der eingebauten Rohrtouren, der Durchmesser des Bohrlochs und insbesondere die Teufe der Grenzfläche zwischen Stickstoff und Sole werden mittels Messungen bestimmt. Abbildung 12 zeigt einen entsprechenden Testaufbau.

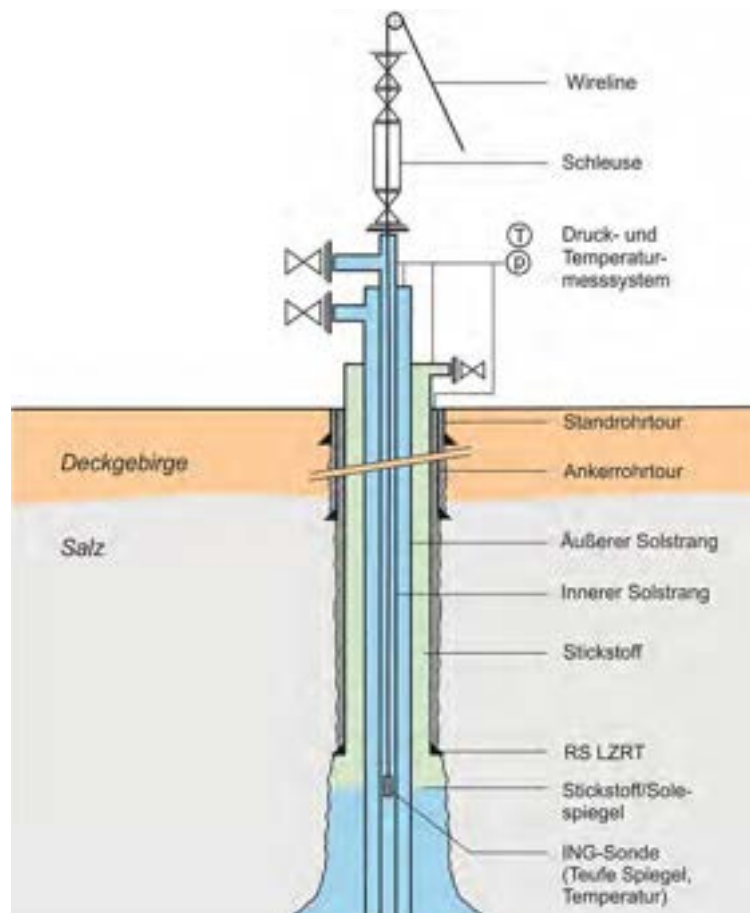
#### 4 Stand der Technik

Während des Testzeitraumes werden in der Bohrung wiederholt die Temperatur und die Teufen des Stickstoff-Sole-Spiegels gemessen, um die Massenbilanzierung durchführen zu können.

Als Optionen zur Spiegelteufenmessung und damit zur Durchführung dieses Testdesigns stehen allgemein zwei Methoden zur Verfügung:

- Konventioneller Test.  
Bestimmung der Spiegelteufe mittels Impuls-Neutron-Gamma-Log (siehe Abbildung 12)
- Sonar Mechanical Integrity Test (SoMIT)  
Bestimmung der Spiegelteufe mittels Sonar

Je nach Art des Testmediums und der Kavernennutzung kann das Testmedium in der Bohrung verbleiben und als Blanket verwendet werden. So kann z. B. nach Abschluss eines Tests der Stickstoff als Blanket in der Solphase genutzt werden.



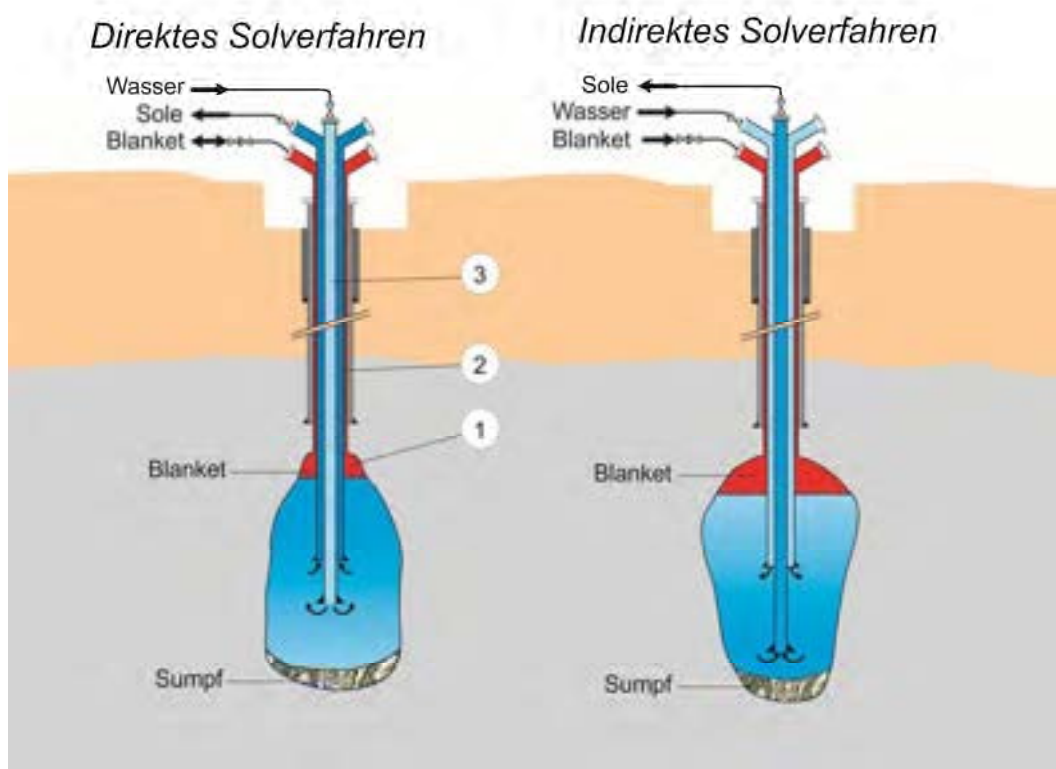
**Abbildung 12: Aufbau konventioneller Gasdichtheitstest mit installierten Solsträngen (RS LZRT = Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour)**

## 4 Stand der Technik

### 4.6 Soltechnik

Grundsätzlich beruht der Solprozess auf der Injektion von Wasser in die Kavernen, um das dort vorhandene Salz zu lösen.

Durch die Anordnung der eingebrachten Solrohrtouren ergeben sich drei Fließwege, nämlich (1) im Ringraum zwischen der letzten zementierten Rohrtour und der äußeren Solrohrtour, (2) zwischen der äußeren und der inneren Solrohrtour und (3) in der inneren Solrohrtour (Abbildung 13). Der innere Solstrang wird dabei tiefer als der äußere abgehängt. Durch die beiden konzentrisch ineinander hängenden Solrohrtouren wird die Möglichkeit geschaffen, in einem Kreislauf Wasser zu injizieren und Sole zu produzieren sowie das Blanket zu injizieren (und bei Bedarf zurückzunehmen).



**Abbildung 13: Darstellung des direkten und des indirekten Solverfahrens**

Durch die Anordnung mit zwei Solsträngen können zwei Verfahren bzw. zwei verschiedene Solmodi zur Injektion von Wasser in die Kaverne angewandt werden. Beim direkten Solverfahren wird das Wasser über den inneren Solstrang in die Kaverne injiziert und die entstehende Sole über den Ringraum zwischen dem äußeren und dem inneren Solstrang produziert. Beim indirekten Solverfahren ist die Fließrichtung entgegengesetzt. Die beiden verschiedenen Zirkulationsrichtungen haben maßgeblich Einfluss auf die Strömungsverhältnisse und die Konzentrationsverteilung in der Kaverne, auf die Konzentration der ausgeförderten Sole und auf die Form des entstehenden Hohlraums.

Zusätzlich kommt ein flüssiges oder gasförmiges Blanket (Sperrmedium) zum Einsatz, das den Dachbereich (Firste) der Kaverne vor Auflösung schützt. Als Sperrmedien werden üblicherweise Rohöl, Diesel, Stickstoff oder Luft verwendet, da diese Medien das Steinsalz nicht lösen, eine geringere Dichte als Sole haben, mit dieser nicht mischbar sind und – mit Ausnahme von Luft – nicht korrosiv sind. Das Blanket wird in kontrollierten Mengen durch den Ringraum zwischen der letzten zementierten Rohrtour und dem äußeren Solstrang in die Kaverne gepumpt. Die Tiefe der Kontaktfläche zwischen Blanket und Sole

#### 4 Stand der Technik

(Blanketspiegel) wird beim Einpumpen über den obertägigen Blanketdruck und gegebenenfalls eine Mengenmessung eingestellt und regelmäßig mittels einer Spiegelmessung (Dichtemessung) oder mit einem an der äußeren Solrohrtour fest installierten Blanket-Messsystem kontrolliert.

In der Regel wird bei der Erstellung einer Kaverne mit einer Sumpfsolphase im direkten Solverfahren begonnen. Hierbei gilt es, Kavernenvolumen für den Sumpfbereich zu schaffen, um die im Salz befindlichen Feststoffe der darüber liegenden Schichten während des weiteren Verlaufs der Kavernensolung aufnehmen zu können. Während dieser Phase wird Sole produziert, die noch nicht komplett aufgesättigt ist bzw. noch keinen hohen Salz-Gehalt aufweist. Je nach Anwendung kann diese sogenannte Dünnsale als Injektionsmedium für weitere Kavernen genutzt werden, bereits zur Salzproduktion verwendet werden oder abgeleitet werden. Nach Beendigung der Sumpfsolphase wird für die Hauptsolphase der Injektionsmodus auf indirekt umgestellt und die Position der Solstränge und der Blanketspiegel entsprechend der Solschritte angepasst. Das Ziel der Hauptsolphase ist die Entwicklung der Kaverne in dem vorgegebenen gebirgsmechanischen Rahmen und einer möglichst konstanten Solesättigung von mehr als 300 g Salz pro Liter Sole.

Der Solprozess lässt sich durch folgende Solparameter steuern:

- die Position (Tiefe) der Kontaktfläche zwischen Sperrmedium und Sole (Blanketspiegel),
- die Absetzteufen der Solrohre,
- das Solverfahren (direkte oder indirekte Fahrweise),
- die Solrate,
- die Soldauer.

In der soltechnischen Praxis werden diese Maßnahmen in Kombination verwendet, um die Salzproduktionsraten zu maximieren und um eine bestimmte Hohlraumform mit dem geplanten Volumen zu erzeugen sowie eine ungewollte Formentwicklung zu vermeiden. Dabei muss der geschaffene Hohlraum innerhalb geometrischer Grenzen liegen, die durch gebirgsmechanische Betrachtungen zur Standfestigkeit bei angestrebter Betriebsweise vorgegeben werden (siehe Kapitel 4.2).

Zur Festlegung der erforderlichen Solparameter (Teufe Blanketspiegel, Absetzteufen der Solstränge, Fahrweise, Solrate und Soldauer) werden Solsimulationen (Computersimulationen) durchgeführt. Dabei werden die geologischen Erkenntnisse sowie Solversuche an Salzkernproben berücksichtigt. Basierend auf den Ergebnissen der Simulation wird kavernenbezogen ein Solkonzept bestehend aus mehreren Solschritten (Solsteps) entwickelt. In dem Solkonzept werden die Solparameter für jeden Solstep definiert.

Während der Kavernensolung werden gemäß Solkonzept zu definierten Zeitpunkten Hohlraumvermessungen der Kaverne (Sonarvermessung) durchgeführt, um das aktuelle Volumen und die Form der Kaverne zu erfassen (siehe Kapitel 4.8). Die Messergebnisse werden mit der vorhergehenden Planung verglichen. Auf Grundlage der Sonarvermessung und eines Abgleichs zwischen der simulierten und der tatsächlich gemessenen Kavernenform wird das Solkonzept für die weiteren Solsteps kalibriert und überarbeitet. Dabei werden grundsätzlich Sicherheitsabstände zum gebirgsmechanischen Rahmen berücksichtigt, um ein Überschreiten des Rahmens auch bei Abweichungen zwischen simulierter und tatsächlicher Hohlraumentwicklung auszuschließen. Zusätzlich wird die Entwicklung des Kavernenvolumens zwischen den Messungen über eine Massenbilanzierung überwacht (siehe Kapitel 4.8).

Eine schematische Darstellung einer Solanlage zur Steuerung des Solprozesses und der entsprechenden Rohrleitungen mit möglichen Fließwegen (u. a. zur Umschaltung zwischen direktem und indirektem Solmodus) zeigt Abbildung 14.

#### 4 Stand der Technik

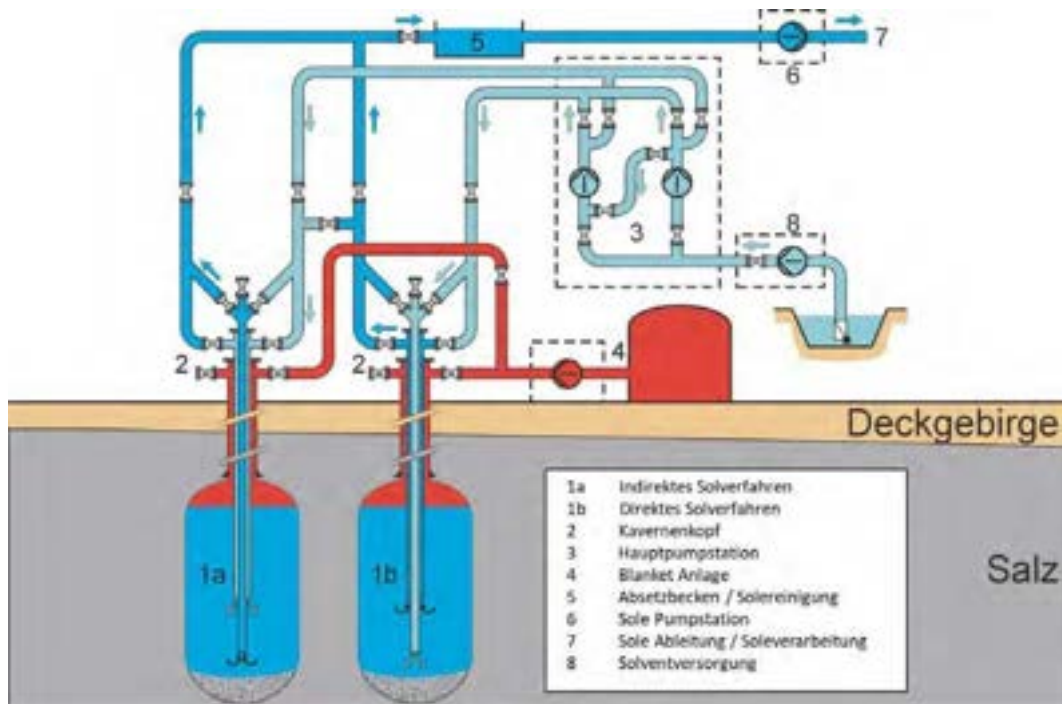


Abbildung 14: Schematische Ansicht einer Solanlage

#### 4.7 Verwahrung

Unter Verwahrung einer Kaverne versteht man die Stilllegung der Kaverne und den Verschluss der Bohrung, so dass

- zwischen dem Kavernenhohlraum und Obertage kein Fluidaustausch stattfinden kann,
- Verunreinigungen des Grundwassers vermieden werden und
- Senkungen an der Oberfläche weitestgehend vermieden werden bzw. langfristig abklingen.

Dies ist so durchzuführen, dass durch den Verschluss die Stabilität und Dichtheit des Kavernenhohlraums für einen ausreichend langen Zeitraum vorhanden sind. Vor diesem Hintergrund sind im Rahmen des Verwahrungskonzeptes sowohl geotechnische Aspekte als auch die Ausführung des Verschlusses selbst zu berücksichtigen.

#### Geotechnische Aspekte

Für die Verwahrung von Salzkavernen sind in der jüngsten Vergangenheit umfangreiche Forschungsarbeiten und in-situ-Versuche durchgeführt worden, die dazu geführt haben, dass in der Fachwelt das Konzept der Verwahrung einer solegefüllten Salzkaverne unter Verschluss der Bohrung derzeit als anerkannt und generell langzeitsicher gilt. Grundlegende Forschungen dazu wurden im Auftrag des Solution Mining Research Institute<sup>2</sup> (SMRI) durchgeführt (60). Im Wesentlichen zeigen diese Forschungstätigkeiten, dass bei der Verwahrung einer solegefüllten Salzkaverne folgende Prozesse berücksichtigt werden müssen:

<sup>2</sup> Das Solution Mining Research Institute (SMRI) ist eine internationale Organisation zur Forschung und Entwicklung im Bereich des Lösungsbergbaus. Die Organisation wird von mehr als 150 Mitgliedern aus Industrie, Behörden und Forschungseinrichtungen aus der ganzen Welt unterstützt.

#### 4 Stand der Technik

- das Kriechen des die Kaverne umgebenden Salzgesteins, welches bei einer verschlossenen und solegefüllten Kaverne zu verhältnismäßig langsamer Erhöhung des Innendrucks führt,
- die Erwärmung des in der Kaverne befindlichen Mediums auf Gebirgstemperatur, wodurch sich der Kaverneninnendruck bei verschlossener Kaverne verhältnismäßig schnell erhöht bzw. erhöhen würde und
- die Infiltration von Sole in das primär dichte Salzgestein, wodurch sich eine geringe sekundär induzierte Permeabilität entwickelt, wenn der Kaverneninnendruck sich der Gebirgsspannung annähert. Dies führt zu einer Verringerung des Kaverneninnendrucks.

Eine Leckage entlang der Bohrung wird durch Dichtheitstests und die geeignete Wahl der Abdichtungselemente der Bohrung vor dem Beginn der eigentlichen Arbeiten zur Verwahrung ausgeschlossen. Auch wird vor dem Verschluss der Bohrung die Qualität der Bohrungszementation mittels akustischer geophysikalischer Logs (Cement-Bond-Log (CBL) bzw. Variabel-Density-Log (VDL), Ultrasonic Radial Imaging) überprüft. Je nach Inanspruchnahme (Zirkulierende Fluide, Druck- und Spannungsänderungen) während des Betriebes wird der Zustand der Rohrtour ggf. zusätzlich mittels Multifinger Kaliber bewertet, um die Integrität der Rohrtour nachzuweisen und zu dokumentieren.

Wie weiter oben angeführt, kommt es in einer verschlossenen Kaverne zu einem Druckanstieg infolge der Temperaturangleichung der Sole in der Kaverne an die Temperatur des umgebenden Gebirges. In einer Solegewinnungskaverne hat sich die Temperatur der Sole zwar bereits während des Betriebes der Gebirgstemperatur angenähert. Am Ende der Solung verbleibt jedoch ein Unterschied zur primären Gebirgstemperatur. Daher ist bei der Planung einer Verwahrungsmaßnahme unter Sole die erforderliche Zeit für eine weitere Temperaturanpassung zwischen Sole und umgebenden Gebirge zu berücksichtigen und der Verschluss erst nach vollständigem Temperatúrausgleich vorzunehmen, um mögliche Rissbildungen an der Kavernenwand zu verhindern.

Die langzeitige Druckerhöhung infolge Kriechen des Salzes und Konvergenz der Kaverne sollte sich durch die Druckminderung infolge Infiltration von Sole in das Salzgestein ausgleichen.

Für ein Kavernenfeld ist zunächst ein generelles (generisches) Verwahrungskonzept zu erstellen, das die geplanten Kavernen in ihrem generellen Design sowie ihre Lage berücksichtigt. Bereits während der Solung kann überprüft werden, inwieweit sich die spezielle Kaverne in diesem generischen Rahmen bewegt. Am Ende der Solung ist für die jeweilige Kaverne das Verwahrungskonzept im lokationsspezifischen Nachweis darzustellen. Fester Bestandteil dieses Gesamtkonzeptes ist eine geotechnische Studie, die sich entweder auf den generischen oder den speziellen Nachweis bezieht. Für die entsprechende Kaverne muss gezeigt werden, dass langfristig die Stabilität des, die Kaverne umgebenden, Gebirges gewährleistet bleibt und dass eine mögliche Soleinfiltration in das Gebirge hinein sehr langsam abläuft bzw. die Infiltrationszone innerhalb der Salzformation verbleibt und somit die Qualität möglicher trinkwasserführenden Schichten oberhalb der Salzformation auf lange Sicht nicht gefährdet wird. Kann der entsprechende Nachweis (Stabilität, Dichtheit, Beeinträchtigung der Umwelt) nicht erbracht werden, muss ein alternatives Konzept erarbeitet werden. Dieses alternative Konzept kann z.B. auf die Wahl anderer Medien zur Verfüllung der Kaverne aufbauen.

Die Betrachtung der Verwahrung wird also in ein generelles und ein spezifisches Verwahrungskonzept unterteilt. Das generelle Konzept wird bereits in der Planungsphase erstellt und das spezifische am Ende der Betriebszeit, wenn die Kavernenform bekannt ist (vgl. auch Kapitel 4.2).

Nach diesem Konzept sind bereits Kavernen erfolgreich verwahrt worden.

## 4 Stand der Technik

### Verschluss der Bohrung

Eine wesentliche Anforderung an die Planung und Ausführung des Bohrlochverschlusses ist die Wartungsfreiheit. Zum einen wäre die Barrierewirkung des Verschlusses erst nach einem sehr langen Zeitraum nachweisbar; zum anderen wäre im Fall einer Undichtheit eine Reparatur nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand möglich. Nur bei einem wartungsfreien Konzept ist eine Befreiung des Kavernenbetreibers aus der Bergaufsicht möglich. Daher ist bei Planung und Bau der Verschlusskonstruktion mit besonderer Sorgfalt vorzugehen. In Deutschland sind dabei die Richtlinien der Behörden und Verbände zum Verfüllen von Bohrungen zu beachten.

Die technische Regel Bohrungsintegrität (2), welche sich an den Richtlinien des ehemaligen Oberbergamts für Niedersachsen in Clausthal-Zellerfeld (heute: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie) zum Verfüllen von Bohrungen orientiert (3), sieht im Rahmen der Verfüllung folgende Punkte vor:

- Offene geologische Formationen sind durch Zementstopfen zu verschließen. Oberhalb dieses Zementstopfens (besondere Verfüllstrecke) werden in der Verrohrung in bestimmten Abständen weitere Zementstopfen ggf. in Kombination mit mechanischen Stopfen eingebracht. Zusätzlich ist der Zwischenraum zwischen den Stopfen mit einem geeigneten Medium (z. B. beschwerte Bohrspülung) aufzufüllen.
- Im oberflächennahen Bereich ist die Bohrung bis zu einer solchen Tiefe zu zementieren, dass Süßwasserhorizonte, die für eine Nutzung vorgesehenen sind, überdeckt werden. Mindestens sind jedoch 100 m einzuhalten.
- Um das Bohrloch zu sichern und eine spätere Nutzung der Tagesoberfläche nicht zu behindern, sind die Rohre bis zu einer Tiefe von 2 m unter Geländeoberkante zu entfernen. Die zurückbleibende Verrohrung ist mit einer Bodenplatte abzudecken.

Sofern der Verschluss der Kavernen nach Beendigung der Soleförderung nach einem anerkannten Verfahren vorgenommen worden ist, mit dem eine langfristig sichere Verwahrung nachgewiesen werden kann, sind nach einer kurzen Übergangszeit keine weiteren Überwachungen notwendig. Nach dem Verschluss ist ein abschließendes Oberflächennivellement anzuraten, um den Stillstand der Kavernenkonvergenz und damit der Bodensenkungen aufzuzeigen.

## 4.8 Überwachung während des Betriebs und der Verwahrung

### Solbetrieb

Während des Betriebs werden Kavernen entsprechend ihrer Nutzung überwacht. Die Überwachung erfolgt dabei sowohl durch kontinuierliche als auch durch diskontinuierliche Methoden.

Zu den kontinuierlichen Überwachungen bei Solegewinnungskavernen zählen die Aufzeichnungen des Drucks, der Temperatur und des Durchflusses von Wasser und Sole am Kavernenkopf. Der Druck des Blanketmediums wird ebenfalls kontinuierlich überwacht.

Die Kontrolle des gesolten Volumens erfolgt über eine Massenbilanzberechnung auf der Grundlage der Dichte und damit der Salzsättigung von Proben der geförderten Sole in Zusammenhang mit den kontinuierlich gemessenen Durchflussmengen und Temperaturen. Die Probennahme erfolgt diskontinuierlich in definierten Abständen (z. B. täglich) sowohl für Wasser als auch für die Sole. Das über die Massenbilanz bestimmte Kavernenvolumen wird zu festgelegten Zeitpunkten während der Kavernenentwicklung durch Hohlraum- bzw. Sonarvermessung überprüft.

Zusätzlich werden in regelmäßigen Abständen (mindestens monatlich) Soleproben chemisch analysiert. Dabei werden zusätzlich zur Dichte die Ionengehalte und der Feststoffgehalt bestimmt. Daraus lassen sich weitere geologische Erkenntnisse zum Salzlager ableiten, die zur Steuerung/Überwachung des Solp-

#### 4 Stand der Technik

rozesses und zur Anpassung nachfolgender Planungen (z. B. der nächsten Solsteps) genutzt werden können.

Zur Umsetzung des Solkonzeptes sind entsprechende initiale Einstellungen und anschließende Überwachung des Blanketspiegels, d. h. der Teufe der Grenzfläche zwischen Blanket und Sole, erforderlich. Dazu wird das Blanket anhand eines vorausgerechneten Blanketdruckes obertage positioniert. Anschließend erfolgt eine Überprüfung der Teufe anhand einer Spiegelmessung mittels einer Messsonde, die in das Bohrloch eingefahren wird. Bei Bedarf wird der Blanketspiegel dabei nachjustiert. Im Weiteren kann die Position des Blanketspiegels über die Beobachtung des Blanketdruckes überwacht werden, entweder bis eine geplante Änderung des Spiegels ansteht oder bis eine weitere Messung zur erneuten Prüfung erfolgt. Dazu sollte ein Blanketmanagementsystem vor Beginn des Solbetriebes aufgestellt werden, welches Häufigkeit und Zeitpunkte der Spiegelmessungen festlegt, so dass der Blanketspiegel ausreichend für eine sichere Kavernenentwicklung kontrolliert werden kann. In der Regel passiert dies im Zuge der Erstellung des Solkonzeptes.

Eine kostengünstige Alternative zur Überwachung der Blanketposition bei gasförmigem Blanket ist die Installation von Blanket-Röhrchen im Blanket-Ringraum, d. h. im Ringraum zwischen letzter zementierter Rohrtour und äußerem Solstrang (siehe Abbildung 15). Dazu werden mehrere Blanket-Röhrchen mit unterschiedlicher Endposition zusammen mit der äußeren Solrohrtour eingebaut. Obertägig werden die Röhrchen an eine Drucküberwachung mit Absperrarmaturen angeschlossen. Je nachdem, ob sich das Ende eines Röhrchens oberhalb des Blanketspiegels, also im Gas, oder unterhalb, also in Sole, befindet, verhält sich der obertägig gemessene Druck unterschiedlich beim Öffnen der jeweiligen Absperrarmatur. Auf diesem Wege lässt sich ermitteln, wo sich der Blanketspiegel in Relation zu einem der Röhrchen (bezogen auf dessen Endposition) befindet, d. h. entweder unterhalb oder oberhalb aller Röhrchen-Enden bzw. in einer Teufe zwischen den jeweiligen Enden. Der Messbereich bzw. die Messgenauigkeit dieses Systems ergibt sich also aus der Anzahl und der jeweiligen Endposition der Blanket-Röhrchen. Da die Position der Enden der Röhrchen auf dem äußeren Solstrang nachträglich nur verändert werden kann, wenn der Strang ausgebaut wird, muss die Position der Enden auf das Solkonzept und die erforderlichen Spiegel-Teufen abgestimmt sein.

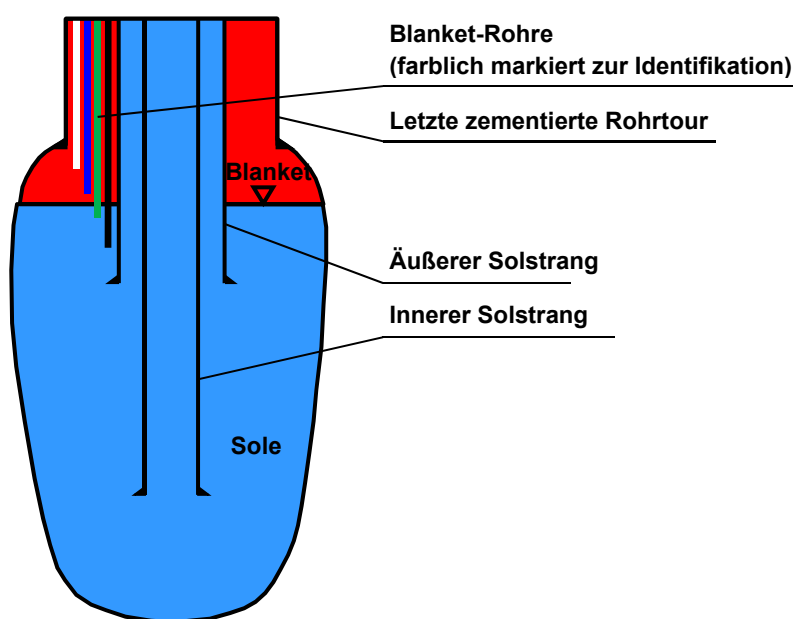


Abbildung 15: Prinzip der Blanket-Überwachung mittels Blanket-Röhrchen



#### **4 Stand der Technik**

Aus den Massenbilanzberechnungen und den Ergebnissen der Hohlraumvermessungen sowie den Labortesten der Deformationseigenschaften des Salzes lassen sich des Weiteren Informationen über das Konvergenzverhalten der Kavernen gewinnen. Die Konvergenz führt wiederum zur Ausbildung eines Senkungstrogens an der Geländeoberfläche, da untertägig entstandene Volumenverluste an die Tagesoberfläche übertragen werden. Die Entwicklung der Bodensenkung wird in regelmäßigen Abständen durch geeignete Verfahren beobachtet. Üblicherweise erfolgt dies durch ein wiederholtes Oberflächennivellement. Sofern eine entsprechend notwendige Messgenauigkeit gewährleistet ist, können auch andere Verfahren wie z. B. satellitengestützte Methoden (Radar-Interferometrie) eingesetzt werden. Durch eine Nullmessung vor Beginn der Bohrungs- und Soltätigkeiten wird der Ausgangszustand dokumentiert.

#### **Hohlraumvermessungen**

Die Hohlraumvermessung von Kavernen zur Form- und Volumenbestimmung erfolgt mit Hilfe von Ultraschallsonden auf der Basis von Laufzeitmessungen. Die druckfesten Messsonden verfügen über einen dreh- und kippbaren Messkopf mit mehreren Ultraschallsensoren, eine Sensorik zur Ortsbestimmung, eine Kreiselstabilisierung zur Unterdrückung von Rotationsschwingungen und eine Vielzahl weiterer Funktionen.

Das Vermessungsprinzip basiert auf einer punktwisen, azimutalen Abtastung der Kavernenwand. Die Messung der Entfernung zur Kavernenwand basiert auf der gemessenen Laufzeit eines Schallimpulses von der Messsonde zur Kavernenwand und zurück sowie der Schallgeschwindigkeit im Medium, welche primär von der Dichte des Mediums und den Temperatur- und Druckverhältnissen in der Kaverne abhängt. Die echometrische Vermessung der Kavernengeometrie beinhaltet eine Vielzahl von Horizontalschnitten. Durch computergesteuerte Positionierungen der Ultraschallsensoren sind von der Messachse aus alle Punkte in der Kaverne, die im gradlinigen Verlauf des Messsignales liegen, in einer Teufe erfassbar. Durch vertikale Bewegung der Sonde werden unterschiedliche Messpositionen angefahren. Durch Messungen mit gekipptem Sondenkopf werden der Boden und das Dach einer Kaverne sowie eventuell vorhandene Hintersolungen erfasst (Abbildung 16). Sowohl die Abstände zwischen den Horizontalschnitten als auch die Winkelschritte zwischen den gekippten Messungen (Kippschnitte) werden in Abhängigkeit von der Kavernengeometrie für eine bestmögliche Berechnung des Kavernenvolumens optimiert. Durch Zusammensetzen aller Messpunkte ergeben sich das Gesamtbild der Kavernengeometrie und damit auch das Kavernenvolumen.

#### 4 Stand der Technik

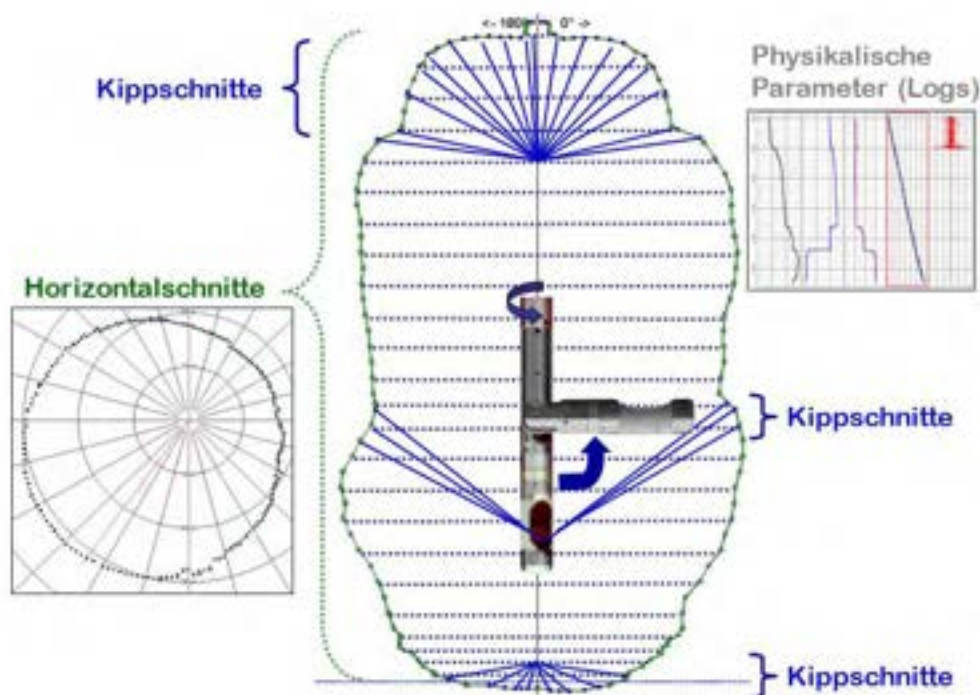


Abbildung 16: Echometrisches Verfahren zum Erfassen der Kavernengeometrie (61)

#### Nivellement

Da die Konvergenz von Kavernen zu Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche führt, müssen über Kavernenanlagen regelmäßig Kontrollvermessungen durchgeführt werden. Dazu sind entsprechende Höhenfestpunktfelder anzulegen und regelmäßig zu überwachen. Die Erfassung der oft nur sehr geringen Höhenänderungen erfolgt in der Regel jährlich durch Präzisionsnivellements. Auf diesem Wege lassen sich sowohl die Höhenänderungen absolut (Senkungen) als auch die zeitliche Änderungen (Senkungsraten) ermitteln. Mit Hilfe von Senkungsrechnungen lassen sich auch weitere Parameter (Schieflagen sowie Zerrungen und Pressungen) ableiten. Sofern eine entsprechend notwendige Messgenauigkeit gewährleistet ist, können auch andere Verfahren wie z.B. satellitengestützte Methoden (Radar-Interferometrie) eingesetzt werden. Durch eine Nullmessung vor Beginn der Bohrungs- und Soltätigkeiten wird der Ausgangszustand dokumentiert.

#### Zeitplan

Abbildung 17 stellt einen schematischen Zeitplan zur Kavernenüberwachung dar. Die Geländeoberfläche wird nicht nur während des Solbetriebes und der Stilllegung (und darüber hinaus) überwacht, sondern die Messungen beginnen vorher mit der Nullmessung. Während des Solbetriebes werden durchgehend Messwerte, die Informationen zur Soleproduktion, zum Solechemismus und gefördertem Volumen geben, aufgezeichnet und ausgewertet. Die Hohlraum- und Spiegelmessungen werden in vorher definierten Abständen durchgeführt. Beides wird z. B. im Solkonzept geplant, wobei sich die Abstände zwischen den Messungen nach Solrate und geschaffenem Hohlraumvolumen richtet. Die Abstände zwischen den Spiegelmessungen nehmen zum Ende des Solbetriebes hin ab.

4 Stand der Technik

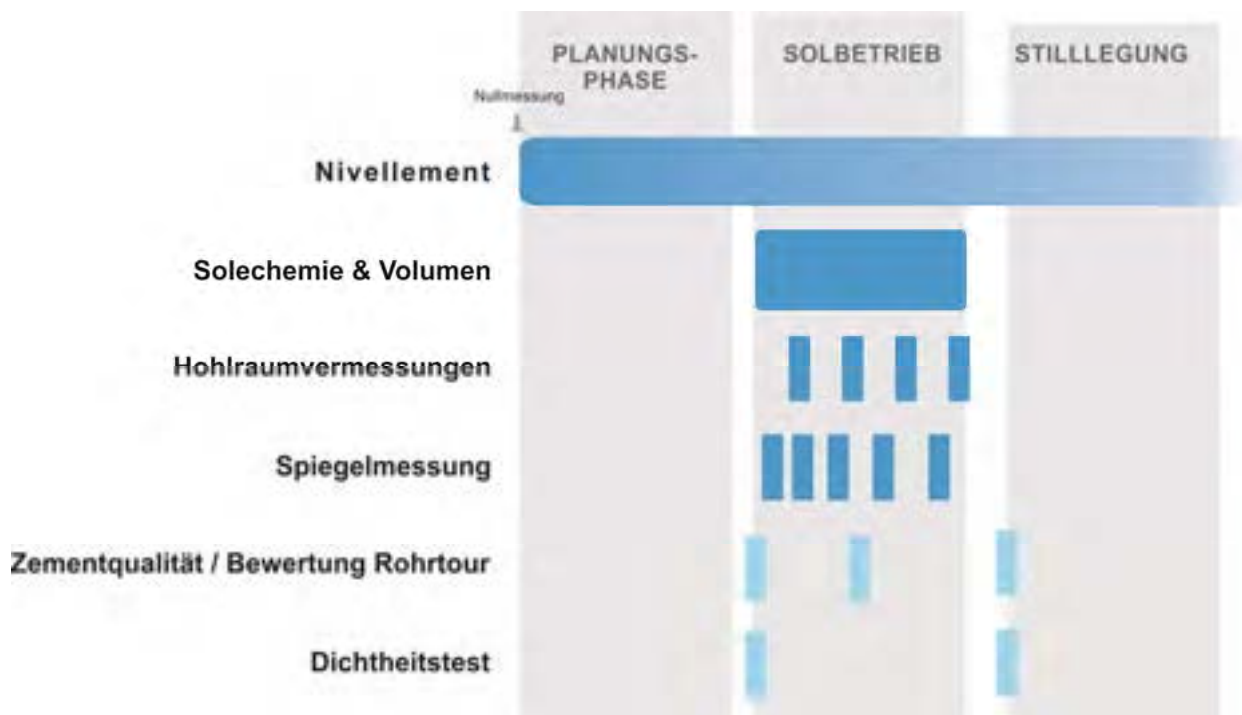


Abbildung 17: Schematischer Zeitplan zur Kavernenüberwachung

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

### 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

#### 5.1 Geologische Erkundung

##### Erkundungskonzept und -ziele

Das „Explorationskonzept Rütihard“ der Schweizer Salinen AG aus dem Frühjahr 2019 (8) stellt die Erkundungsziele und die Abfolge der beabsichtigten Erkundungsschritte und -methoden schlüssig und nachvollziehbar dar. Die Systematik des Konzeptes entspricht im Wesentlichen dem Stand der Technik gemäß Kapitel 4.1.

Eine ausreichende regionalgeologische Kenntnis zur Stratigraphie und zum Strukturbaue des weiteren Gebietes (v.a. östlich des geplanten Bohrfeldes auf der Rütihard) ist vorhanden. Aufgrund bestehender geologischer Daten konnte eine Modellvorstellung des Salzkörpers im Untergrund und insbesondere seines Deckgebirges postuliert werden. In (8) und (20) werden zahlreiche Datensätze und Literaturquellen neueren Datums genannt und es wird auf Bohrungen (der Schweizer Salinen AG und u. a. auch der NAGRA) Bezug genommen.

Die vorhandenen Daten wurden zusammengestellt und „für das Konzessionsgebiet der Saline Schweizerhalle ein geologisches 3D-Modell erstellt, welches auch das Gebiet des geplanten Bohrfeldes Rütihard umfasst.“ ( (8), S. 3). Der Abschlussbericht zur Modellierung liegt vor (20), die konkret für den Modellbereich Rütihard herangezogenen Datenquellen werden in (8) genannt.

Die aus den Projektanforderungen abgeleiteten Erkundungsziele sind im Grundsatz in (8) genannt (dort S. 1). Nachzuweisen ist demnach

- eine ausreichend hohe Salzmächtigkeit,
- eine möglichst geringe Überdeckung des Salzlagers bis zu einem Wert von ca. 150 m (bei geringerer Überdeckung wird mit Subrosion gerechnet), sowie
- eine tektonisch möglichst ungestörte Lagerung des Salzlagers.

Hinsichtlich der oben formulierten Ziele hebt die Schweizer Salinen AG hervor, dass nach Auswertung der vorhandenen Unterlagen bzw. des bestehenden Modells noch die folgenden Unklarheiten bestehen:

- Genauer Verlauf NW-SE-streichender Störungen im geplanten Bohrfeld und seiner Umgebung, die in der Literatur („Geologischer Atlas“) postuliert werden.
- Lage und Entfernung der südlichen Begrenzung des Salzkörpers („Salzrand“) zum geplanten Bohrfeld (der „Salzrand“ wird südwestlich außerhalb des Bohrfeldes vermutet).
- Mögliche Ursachen und räumliche Verbreitung regionaler Subrosions-Erscheinungen.

Die vorgenannten Punkte wurden im Grundsatz bereits in den 1980er Jahren formuliert (vgl. geol. Berichte (14) und (17)). Das aktuelle Erkundungsprogramm der Schweizer Salinen AG scheint eher auf die Beantwortung dieser Fragen ausgerichtet zu sein, als der Ressourcenabschätzung und der Klärung des Gebirgsaufbaus (Salzlager und Deckschichten) unmittelbar im geplanten Bohrfeld Rütihard zu dienen (vgl. auch im Folgenden).

## **5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG**

Die vorgenannten Punkte werden im Zuge gezielter Erkundungsmaßnahmen geklärt bzw. sollen noch geklärt werden:

- Geländebegehung zur Überprüfung der strukturgeologischen Situation (bereits erfolgt, Bericht liegt als (21) vor).
- Abteufen der beiden Sondierbohrungen S156 und S157 (Planungsdokumente liegen mit (5) für beide vor; erste Ergebnisse aus der bereits geteufte S157 wurden mit (24) ebenfalls zur Verfügung gestellt).
- 2D-Seismik zur Identifikation möglicher Störungen.
- Aktualisierung bzw. Detaillierung des geologischen 3D-Modells im Bereich der Rütihard.

Das räumliche Ausmaß der natürlichen Subrosion im Bereich des Salzspiegels, für die im nördlichen Teil des geplanten Bohrfeldes Anzeichen vorhanden sind, soll im Zuge der Feldesentwicklung bestimmt werden. Hierzu wird in (23), S. 21, nachvollziehbar vorgeschlagen, das Bohrfeld von Süden nach Norden zu entwickeln (Etappierung in der Reihenfolge 3, 1, 2 und 4), sodass dabei die Produktionsbohrungen „als fortlaufende Sondierbohrungen genutzt werden“ können. Die Produktionsbohrungen sind hierfür mit einem entsprechenden geologischen Untersuchungsprogramm zu begleiten (Kernstrecken, geophysikalische Messungen im Bohrloch).

### **Geländebegehung**

Im Jahr 2017 wurde die strukturgeologische Darstellung des geologischen Atlas (Blatt 1086 Arlesheim) im Gebiet der Rütihard mit einer Geländebegehung überprüft (21). Dabei konnten offenbar nicht alle in der geologischen Karte verzeichneten Strukturelemente und v.a. nicht die parallelen Störungen im Westteil der Rütihard (nördlich des Aspitals) nachvollzogen werden. Diese Erkenntnisse sind bisher offenbar noch nicht in das geologische 3D-Modell eingeflossen (Fertigstellung des zum Modell gehörigen Berichts im November 2017, vgl. (20)).

### **Sondierbohrungen**

Die Schichtenfolge im Gebiet der Rütihard und seiner weiteren Umgebung ist aus Sondierbohrungen der Schweizer Rheinsalinen aus dem Jahr 1953 (Sondierbohrung S37) und aus dem Zeitraum zwischen 1984 und 1988 (Sondierbohrungen S93, S94, S104 und S107) bekannt. Von diesen Bohrungen liegen drei unmittelbar im Gebiet des geplanten Bohrfeldes, und zwar die S37 in der „Etappe 1“, die S107 in der „Etappe 2“ und die S104 in der „Etappe 4“ (Abbildung 18). Für alle genannten Bohrungen liegen Stammdaten mit Kurzschichtenverzeichnissen, geologische Berichte und synthetische Säulenprofil vor.

Das Erkundungsprogramm für die Rütihard sieht vor, zwei weitere Sondierbohrungen abzuteufen: Die Sondierbohrungen S156 südwestlich außerhalb der „Etappe 1“ des geplanten Bohrfeldes und S157 südwestlich außerhalb der „Etappe 2“. Hauptziel dieser Bohrungen ist es, den Verlauf der in diesem Bereich vermuteten Verwerfung zu bestätigen.

Derzeit ist keine Sondierbohrung im Areal des geplanten Bohrfeldes selbst positioniert. Offenbar erachtet die Schweizer Salinen AG die Bohrbefunde aus den 50er bis 80er Jahren für ausreichend, um den Aufbau und die technische Eignung des Salzlagers im Untergrund der Rütihard für die Soleförderung zu bewerten. Dabei ist zu beachten, dass der Bereich der „Etappe 3“ (d. h. der südliche Abschnitt des Bohrfeldes) durch keine Bohrung belegt ist.

Allerdings nimmt der geologische Kenntnisstand mit jeder Produktionsbohrung sowie dem anschließenden Solbetrieb zu. Dennoch können zusätzliche Sondierbohrungen zu einem späteren Zeitpunkt sinnvoll sein. Dies ist aber erst im weiteren Verlauf der Feldesentwicklung endgültig abzusehen und dann entsprechend einzuplanen.

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

Für die neuen Sondierbohrungen S156 und S157 liegen Vorprofile im Entwurf (mit „provisorisch“ markiert) vor. Das Bohr- und Untersuchungsprogramm gemäß (8) und (5) sieht eine Meißelstrecke (mit Entnahme von Bohrklein) bis in den Top Oberer Muschelkalk oberhalb des Salzlagers vor, die Strecke unterhalb (bis Endteufe in der Unteren Sulfatzone, inklusive Salzlager) soll durchgängig im Seilkernverfahren gekernt werden (Kerndurchmesser 76 mm). Eine Orientierung der Kerne erfolgt nachträglich mittels Abbildung der Bohrlochwand.



**Abbildung 18: Aktueller Planungsstand der jeweiligen Etappen (8)**

Das Untersuchungsprogramm im offenen Bohrloch soll umfassen:

- Gamma-Log
- Optische oder akustische Abbildung der Bohrlochwand („Televiever“) mit Strukturlog
- Sonic-Log
- Bohrlochabweichung
- Temperatur und elektrische Leitfähigkeit zur Bestimmung potentieller Wasserzutritte.
- Pumpversuch im Aquifer im Oberen Muschelkalk

In der älteren Darstellung zur „Bohrtechnik und Bohrlochverrohrung“ ( (36), dort S. 5f) wird grundlegend beschrieben, wie Sondierbohrungen durch geologisches Fachpersonal begleitet und dokumentiert werden sollen.

Die Sondierbohrung S157 wurde im ersten Quartal 2019 bereits abgeteuft, eine vorläufige Dokumentation der Bohrergebnisse liegt mit (24) vor. Die durchgeführten geologischen Untersuchungen gingen über das ursprünglich geplante Programm gemäß (8) und (5) hinaus. Insgesamt wurden folgende geologische Untersuchungen durchgeführt:

- Bohrkern über die gesamte Bohrstrecke
- allgemeine Beschreibung der lithostratigraphischen Einheiten
- Gamma-Log (Messung der natürlichen Gesamt-Gammastrahlung)

## **5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG**

- Sonic-Log (akustische Laufzeitmessung)
- Kalibermessung
- optische und akustische Abbildung der Bohrlochwand
- Fluid-Logging
- strukturgeologische Auswertung
- petrophysikalische Analyse des Salzgehaltes

Nach aktueller Planung der Schweizer Salinen AG ist für die Sonderbohrung S156, die im Herbst 2019 abgeteuft werden soll, das gleiche Untersuchungsprogramm zuzüglich der folgenden Untersuchungen geplant:

- hydraulischer Test mittels Doppelpacker im Bereich des Muschelkalk-Aquifers
- In-situ-Gebirgsspannungsmessungen in Oberer Sulfatzone und Salzlager

Die aufgeführten Methoden werden als für die Erkundung ausreichend eingeschätzt, zusätzliche geophysikalische Bohrlochmessungen (Dichte-, Neutron- und Widerstandsmessung sowie Gamma-Spektroskopie) sind für nachfolgende Sondier- und Produktionsbohrungen jedoch zu empfehlen (vgl. auch Kapitel 6).

Die Messdaten der Sondierbohrung S157 wurden strukturgeologisch ausgewertet und interpretiert, indem Schichtgrenzen und das Schichteneinfallen sowie Störungen und Klüfte identifiziert wurden. In Abhängigkeit von der Qualität und Variabilität der Daten wurden charakteristische Strukturelemente für einzelne Bohrlochabschnitte zusammengefasst. Eine allgemeine lithologische Beschreibung anhand der gewonnenen Bohrkernscheine scheint vorhanden zu sein, wurde jedoch nicht vorgelegt. Für die Salzstrecke wurde auf Basis der geophysikalischen Bohrlochmessungen (Gamma-Ray- und Sonic-Log) eine mineralogische Zusammensetzung berechnet.

Die Darstellung der Vorabergebnisse (24) legt einen deutlichen Schwerpunkt zunächst auf die Interpretation der strukturgeologischen Elemente, während die lithologische Gliederung und Beschreibung der Abfolge nur wenig Raum einnimmt. Insbesondere die lithologische Beschreibung der in der Salzstrecke vertretenen Hauptlithologien sollte noch detaillierter ausgeführt werden. Eine Bewertung der Salzqualität und Salzmächtigkeit und ein Vergleich mit den in den älteren Bohrungen angetroffenen Verhältnissen sind ebenfalls noch nicht erfolgt.

Zu gegebenenfalls geplanten Solversuchen an Bohrkernmaterial oder zu gebirgsmechanischen Laborversuchen liegen keine Angaben vor.

### **Seismik**

Die Durchführung einer 2D-Seismik auf der Rütihard wird in (8) für „spätestens im Jahr 2020“ in Aussicht gestellt. Die geplante seismische Erkundung ist offenbar Teil der weiträumig angelegten „2D-Seismik Schauenburg“, für die eine Planung durch die Fa. Geo Explorers AG aus dem Jahr 2018 (7) und eine Aktualisierung derselben vom Frühjahr 2019 (9) vorliegt. Die neueste Planung (9) sieht vor, ein Gebiet von insgesamt etwa 20 km<sup>2</sup> Fläche mit neun längeren und, im Bereich der Rütihard, zusätzlich zwei kurzen seismischen Ideallinien mit einer Gesamtlänge von 29 km abzudecken. Die Position und Anordnung der Mess- und Anregungslinien berücksichtigt den Strukturbau des Untergrundes (Bruchmuster mit überwiegend NE-SW bis NNE-SSW streichenden Störungen, Einfallrichtung der Schichten). Diese geplante Seismik schließt an die bereits durchgeführte 2D-Seismik der Schweizer Salinen AG im Raum Arisdorf, Füllinsdorf und Liestal an. Für das Gebiet selbst liegen bislang noch keine geophysikalischen Daten vor (vgl. (20), S. 4).

Die Ersteller der Planung bewerten selbst das Areal wegen seiner Topographie, Vegetation und Nutzung als „anspruchsvolles Messgebiet“ ( (9), S. 15))

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

Das geplante neue Bohrfeld umfasst nur einen kleinen Teil im äußersten Nordwesten des Gesamtgebietes. Gemäß der an das regionale Wegenetz angepassten Seismik-Planung (vgl. (9), darin Abb. 7 und Beilage) verläuft eine Streichlinie entlang dem Höhenrücken der Rütihard sowie zwei kurze Falllinien etwa senkrecht dazu; das Teilstück einer weiteren Streichlinie verläuft unmittelbar südlich der Rütihard durch das Asptal. Die Lokationen der Sondierbohrungen S37, S104, S107 und S157 liegen auf den Linien oder in ausreichender Nähe zu diesen. Die Anordnung der Linien wird als im Grunde geeignet eingeschätzt, die für das Projekt relevanten Strukturen abzubilden.

Zusätzlich zur Reflexionsseismik ist nach aktueller Planung der Schweizer Salinen AG eine Refraktionsseismik geplant.

Ziel dieser Untersuchungen ist neben der Erkundung der Kontur des Salzlagers auch ein regional-geologischer Kenntniszuwachs. Hier ist z. B. die Entstehung der großen Salzmächtigkeiten im Bereich des sogenannten Adlerhofgewölbes von Interesse. Diesbezüglich wird ein Zusammenhang mit Strukturen im tieferen Untergrund vermutet, die mittels der Seismik miterfasst werden sollen.

In (9), S. 14, wird das Gesamtgebiet der „2D-Seismik Schauenburg“ als „tektonisch stark überprägtes Gebiet“ eingestuft. Während eine 2D-Seismik für die Abbildung des Salzkörpers im Untergrund ausreichend sein dürfte, ist zu prüfen, ob die erforderliche Auflösung der Deckgebirgsstrukturen gegebenenfalls nur mit einer 3D-Seismik erreicht werden kann.

### Geologisches 3D-Modell

Die vorhandenen geologischen 3D-Modelle „Arisdorf“ und „Schweizerhalle“ umfassen ein größeres Interessensgebiet, das die Gesamtkonzession der Schweizer Salinen AG vollständig überdeckt. Für das Modell „Schweizerhalle“ liegt ein Bericht vor (20), in dem der Anspruch an das Modell folgendermaßen formuliert wird: „Das erstellte 3D Modell kompiliert geologische Daten zu einem konsistenten Datensatz“ (dort S. 8).

Das Modell führt verschiedene Datensätze und Literaturquellen zusammen, die überwiegend auf Bohrungsbefunden und/oder Aufschlüssen, im Modell „Arisdorf“ auch auf einer 2D-Seismik beruhen (vgl. Darstellung in (20)). Relevante Ergebnisse seismischer Messungen liegen für den westlichen Teil des Modellgebietes (Modell „Schweizerhalle“) noch nicht vor. Die Rütihard umfasst nur einen kleinen Teil im äußersten Nordwesten des Gesamtmodells. Inhaltlich auf den Bereich der Rütihard fokussierte Aussagen finden sich im Modellbericht (20) nicht.

Es ist offenbar beabsichtigt, die Erkenntnisse aus der Erkundung im engeren Umfeld der Rütihard in das bestehende Modell einfließen zu lassen bzw. das Modell „Schweizerhalle“ nach Westen zu erweitern.

## 5.2 Gebirgsmechanik

Gebirgsmechanische Gutachten mit dem Ziel der Empfehlung von Dimensionierungs- und Auslegungsparmetern für Solegewinnungskavernen der Schweizer Salinen AG sind für die Gewinnungsfelder

- Eigental (26), (25) und
- Grosszinggibrunn (30), (28), (27)

vorgelegt worden.

Für das Feld Rütihard liegen zurzeit noch keine gebirgsmechanischen Gutachten vor.

Von den anfänglichen Empfehlungen auf Basis von Laboruntersuchungen und analytischen Betrachtungen zur Gebirgsbeanspruchung durch Prof. Dreyer ist man in den folgenden Gutachten dazu übergegangen, die Bewertung des Gebirgszustandes auf Grundlage numerischer Simulationsmodelle durchzuführen. Dadurch wird eine genauere Berücksichtigung der örtlichen Geologie, der Kavernenformen und des



## **5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG**

Deformations- und Festigkeitsverhaltens (vor allem des Kriechens des Salzgesteins) der an der Tragwirkung des Gebirges hauptsächlich beteiligten Gesteinsformationen (Salzgestein und Sulfatzone) erreicht. Darüber hinaus wurden am Institut für Unterirdisches Bauen IUB GmbH anhand von Kernen aus dem Konzessionsgebiet Grosszinggibrunn die Festigkeitswerte für das Salzgestein und für die Sulfatzone lokationsspezifisch bestimmt (30).

Die Gutachten von Prof. Rokahr (30), (28) im Zusammenhang mit den gesteinsmechanischen Laboruntersuchungen des Instituts für Unterirdisches Bauen der Universität Hannover sowie der späteren Erweiterung der Empfehlungen auf der Grundlage der Untersuchung von Sonderszenarien durch die IUB GmbH (27) entspricht dem heutigen Stand der Technik hinsichtlich der Empfehlungen für den Betrieb von Solegewinnungskavernen.

Für die Rütihard ist eine aktuelle gebirgsmechanische Auslegung durchzuführen. Dabei können die bisherigen Empfehlungen für die Dimensionierung als generisches Ausgangsmodell verwendet werden. Auf dieser Basis sollte unter Einbeziehung der lokalen geologischen Situation auf der Rütihard die Übertragbarkeit der bisher für Grosszinggibrunn vorliegenden gebirgsmechanischen Empfehlungen geprüft werden.

Insbesondere sollten Laborversuche an Bohrkernmaterial aus den Sondierbohrungen S156 und S157 zur Ermittlung lokationsspezifischer Materialparameter durchgeführt werden.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass sich der primäre Gebirgszustand des Feldes Rütihard auf Grund der Topografie (Horst) anders als in den Feldern Eigental, Sulz oder Grosszinggibrunn darstellt. Inwieweit weitere gesteinsmechanische Tests und gebirgsmechanische Betrachtungen durchgeführt werden sollten, ist in diesem Zusammenhang durch den gebirgsmechanischen Gutachter ebenfalls zu klären.

Unter der Annahme, dass die vorgenannten gebirgsmechanischen Bewertungen für das Gewinnungsfeld Rütihard vorgenommen wird, entspricht das Vorgehen der Schweizer Salinen AG insgesamt dem Stand der Technik.

Hinsichtlich der Verwahrung der Kavernen nach Beendigung des Betriebes sollte zu gegebener Zeit ein geotechnisches Gutachten vorgelegt werden (siehe Kapitel 5.7).

### **5.3 Bohrtechnik**

Die Beurteilung des bohrtechnischen Vorgehens der Schweizer Salinen AG erfolgt überwiegend auf Basis des Dokuments „Vereinigte schweizerische Rheinsalinen - Bohrtechnik und Bohrlochverrohrung“ von Dezember 2003 (36). Ergänzende aktuelle und z.T. von der älteren Darstellung abweichend Angaben zum Bohrungsausbau liefert darüber hinaus das „Bohrschema Rütihard“ von April 2019 (vgl. (35) und Abbildung 19).

#### **Bohrlochverlauf**

Die Bohrungen der Schweizer Salinen AG sind vertikal ausgelegt. In Anbetracht der geringen Endteufen der Produktionsbohrungen ist der Einsatz einer Richtbohrgarnitur zum Erreichen des Bohrziels (Target) nicht erforderlich.

Beim Abteufen der Bohrungen wird eine steife Bohrgarnitur verwendet. Mit Hilfe der entsprechenden Auswahl der Meißel, der Kombination aus Schwerstangen und der Bohrparameter werden die geologischen Gegebenheiten berücksichtigt und in der Regel eine maximale Abweichung von der Vertikalen von 5° erreicht. Aus bohrtechnischer Sicht ist diese Abweichung von der Vertikalen zu vernachlässigen.

Am Ende des Bohrprozesses werden die Neigung und die Richtung des Bohrlochs überprüft, so dass mögliche Abweichungen von der Vertikalen und damit vom geplanten Zielpunkt festgestellt und erforderli-

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

chenfalls anschließend bei der weiteren Planung, z. B. hinsichtlich der Pfeilerstärken zwischen den Solegewinnungskavernen, berücksichtigt werden können.

### Rohrtouren

Gemäß der Angaben in (36) und (35) sollen Rohrtouren mit folgenden Eigenschaften verwendet werden (Abbildung 19).

- Standrohr: 609 mm Durchmesser, Stahl, Verbindungen geschweißt
- Hilfsrohrtour: 20“ Durchmesser, Stahl, Verbindungen geschweißt
- Ankerrohrtour: 13 3/8“ Durchmesser, 54,5 lb/ft, J55, API 5CT, Verbindungen geschraubt
- letzte zementierte Rohrtour (LZRT): 9 5/8“ Durchmesser, 43,5 lb/ft, L80, Verbindungen geschraubt, Verbinder: Tenaris TSH Blue

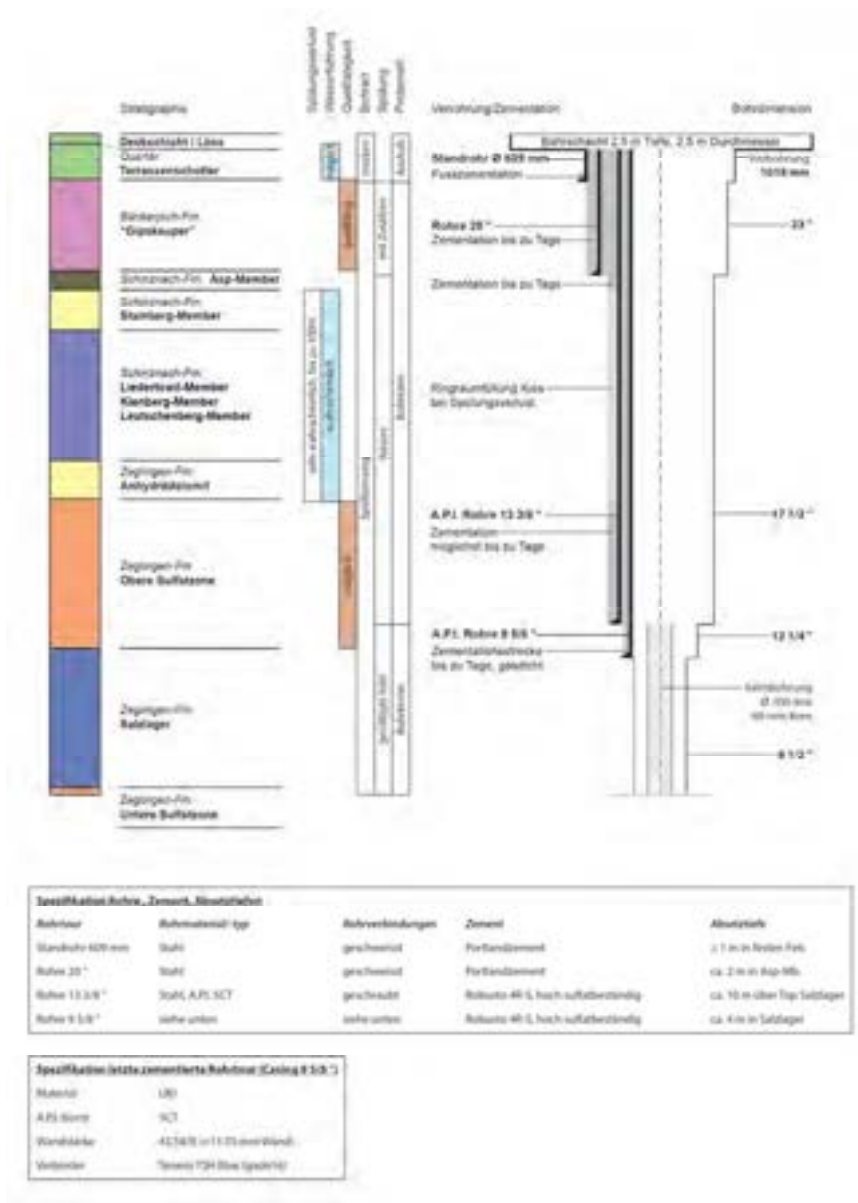


Abbildung 19: Bohrschema Rütihard (35)

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

Auslegungsrechnungen der Rohrtouren sind in der Regel für die Ankerrohrtour und die letzte zementierte Rohrtour erforderlich, lagen aber bei der Erstellung dieses Berichtes nicht vor. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die eingesetzten Rohre den gegebenen Belastungen (Außendruck, Innendruck und Abstreiffestigkeit) standhalten. In Tabelle 2 sind die Festigkeitswerte gemäß API-Norm<sup>3</sup> für die geplante Ankerrohrtour und LZRT wieder gegeben. Bei einer angenommen maximalen Absetzteufe von 250 m für beide Rohrtouren und einem Gebirgsdruckgradienten von 0,25 bar/m (36) halten die Rohre den zu erwartenden Lasten stand.

**Tabelle 2: Geplantes Verrohrungsschema (Festigkeitswerte nach API)**

Außendurchmesser	Typ	Außendruck (Kollapsfestigkeit)	Innendruck (Burstfestigkeit)	Abstreiffestigkeit
<b>13 3/8"</b> <b>(Ankerrohrtour)</b>	54,5 lb/ft J55*	77 bar	386 bar	245 t
<b>9 5/8"</b> <b>(LZRT)</b>	43,5 lb/ft, L80**	262 bar	436 bar	455 t
* Auf Basis „Vereinigte schweizerische Rheinsaline Bohrtechnik und Bohrlochverrohrung“ ** Auf Basis „Bohrschema Produktionsbohrung Rütihard“				

Da von der Schweizer Salinen AG Stickstoff als Blanket in den Ringraum zwischen der letzten zementierten Rohrtour (LZRT) und dem äußeren Solstrang eingebracht wird, ist die LZRT (wie auch die äußere Solrohrtour (siehe Kapitel 5.4)) gasdicht auszuführen. Dazu werden bei der LZRT Rohre mit Verbindern des Typs Tenaris TSH Blue (Premiumverbinder) verwendet. Laut Klassifikation und Datenblatt besitzen diese gasdichten Verbinder die gleichen Eigenschaften bezüglich des maximalen Außendrucks, des maximalen Innendruckes und der Abstreiffestigkeit wie das Rohr selbst, so dass alle Anforderungen erfüllt sind.

### Spülungsregime

Wie im Dokument „Vereinigte schweizerische Rheinsalinen - Bohrtechnik und Bohrlochverrohrung“ von Dezember 2003 (36) angegeben, wird mit einer wasserbasierten Bentonitspülung bis zum Salztop gebohrt. Bei Auftreten von Spülungsverlusten in klüftigen Formationen in größeren Bohrtiefen wird auf eine reine Süßwasserspülung umgestellt. Grundsätzlich ist dieses Vorgehen akzeptabel. Es wird jedoch vorgeschlagen, diese Leckagewege durch Lost Circulation Material (LCM) wie Muschelschrot und Cellophanschnipsel möglichst zu schließen, um die Integrität des Bohrlochs in der Bohrphase sicherzustellen und Verluste der Zementschlämme während der Rohrzementation einzudämmen.

Das Salinar wird mit NaCl-gesättigter Spülung durchteuft, um Auskessellungen zu vermeiden. Dies entspricht dem Standardverfahren beim Durchteufen von Salz.

<sup>3</sup> Das American Petroleum Institute (API) ist ein Interessenverband der Öl- und Gasindustrie in den USA. Das Institut erarbeitet u. a. technische Richtlinien und Standards, die weltweit Anwendung finden.

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

### Futterrohrzementation

Von großer Bedeutung ist die Zementation der Rohrtouren, insbesondere der letzten zementierten Rohrtour. Der für die LZRT der Produktionsbohrungen auf der Rütihard vorgesehene sulfatbeständige Zement (Robusto 4R-S) entspricht nicht den API-Standards hinsichtlich Bohrlochzementation. In Anbetracht der geringen Teufe und der damit einhergehenden vergleichbar geringen Beanspruchung des Zementmantels ist eine Verwendung von Nicht-API-Zementen durchaus akzeptabel. Da der Zement Robusto 4R-S für Bohrlochzementationen ansonsten aber unüblich ist, liegen DEEP.KBB keine Erfahrungen mit diesem Zement vor, so dass lediglich festgestellt werden kann, dass dieser Zement gemäß den Angaben des Herstellers (Holcim, Schweiz) hoch-sulfatbeständig ist und von der Schweizer Salinen AG bisher erfolgreich eingesetzt wurde.

Folgende alternative API-Zementmischungen werden unter Berücksichtigung der geringen Teufen und der niedrigen Temperaturen vorgeschlagen:

- 1. Abschnitt (20“-Rohre): API Class A oder B, Süßwasser als Anmischwasser, Dichte der Schlämme ca. 1,65 kg/l.
- 2. Abschnitt (13 3/8“-Rohre): wie 1. Abschnitt
- 3. Abschnitt 9 5/8“-Rohre: API Class B, Sole als Anmischwasser für die Tail-Zementation (T), Süßwasser als Anmischwasser für die Lead-Zementation (L); Dichte der Zementschlämme (T) ca. 1,85 kg/l, Dichte Zementschlämme (L) ca. 1,65 kg/l, optional mit LCM wie Muschelschrot oder Cellophan-schnipsel (im Bereich klüftiger Formationen)

Die Zementationen sollten grundsätzlich bis zu Tage durchgeführt werden.

Aufgrund der derzeitigen Vorgehensweise der Schweizer Salinen AG, die vorsieht, im Falle größerer Spülungsverluste in klüftigen Formationen auf eine reine Süßwasserspülung umzustellen, werden die betreffenden Abschnitte nicht abgedichtet. Da dies zum Verlust der Zementschlämme bei der Zementation führen würde, werden dieser Abschnitte nicht zementiert, sondern mit Kies aufgefüllt (Abbildung 19). Da die 13 3/8“-Rohrtour nicht als Barriere für den späteren Solbetrieb fungiert, ist dieses Vorgehen grundsätzlich akzeptabel, solange ausgeschlossen werden kann, dass dadurch z. B. keine zuvor getrennten Grundwasserhorizonte hydraulisch miteinander verbunden werden.

Alternativ ist zu empfehlen, mittels LCM-Zusätzen in der Spülung die Fließwege während der Bohrung möglichst zu verschließen und eine Zementation bis zu Tage durchzuführen. Zusätzlich könnten LCM auch der Zementschlämme in diesem Bereich zugesetzt werden. Die Möglichkeit der Umsetzung muss im Detail geprüft werden.

Die Zementation wird bei der Schweizer Salinen AG generell mittels Stab-in Zementation durchgeführt. Hierzu wird ein Hilfsstrang (Drill Pipe) in einen Casing Collar (Rückschlagventil) am unteren Ende der zu zementierenden Rohrtour eingefahren. Anschließend wird solange Zementschlämme durch den Hilfsstrang verpumpt, bis die Schlämme obertägig aus dem Ringraum austritt. Fehlmengen im Ringraum werden durch diese Zementationstechnik vermieden. Während der Abbindephase neigt der Zement zum Nachsacken an der Oberfläche. Dies ist durch eine Nachzementation von oben in den Ringraum zu kompensieren.

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

Folgende technische Alternativen zu oben angeführten Zementationstechniken stehen für die Zementation von klüftigen Formationen zur Verfügung:

- Zweistufenzementation zur Eindämmung von Zementverlusten. Nachteil: Technisch kompliziert und zeitaufwendig.
- Bohrlochzementation (bevor die Rohrtour ins Bohrloch eingefahren wird) zum Abdichten der Verluststrecken, Aufbohren der abzementierten Strecke, Einbau und anschließend Zementation der Rohrtour. Dieser Vorgang muss eventuell mehrmals wiederholt werden. Nachteil: Zeit- und kostenintensiv.

Der Erfolg der Zementation der letzten zementierten Rohrtour sollte nach einer ausreichenden Abbindezeit von mindestens 14 Tagen mittels einer CBL- und VDL-Messung überprüft werden.

### 5.4 Solkomplettierung

Von der Schweizer Salinen AG werden für den Solbetrieb gemäß (38) folgende Solstränge eingebaut:

- Äußerer Solstrang  
Durchmesser: 6 5/8" (168,3 mm), API, K55, 20 lb/ft, Rohrgewinde: STC<sup>4</sup>  
Die unteren 20-24 m bestehen aus nahtlosen Siederohren 168,3 mm x 6,3 mm
- Innerer Solstrang  
Durchmesser: 4 1/2" (114,3 mm), Wanddicke 5,6 mm, Rohrgewinde: Eigenherstellung Schweizer Salinen AG ISO Rp 4"  
Die unteren 20-24m bestehen aus nahtlosen Siederohren 101,6 mm x 3,6 mm
- Blanket-Röhrchen  
Außen an den 6 5/8" Solestrang werden die Leitungen zur Bestimmung des Blanketlevels angebracht.

Diesbezüglich ist anzumerken, dass die STC-Rohrgewinde des äußeren Solstranges gemäß API nicht als gasdicht klassifiziert sind. Da der äußere Solstrang aber mit Stickstoff als Blanket in Berührung steht, ist ein gasdichter äußerer Solestrang erforderlich. Technisch ist es möglich, dass die STC-Verbinder unter den im Bohrloch herrschenden Druckbedingungen gasdicht sein können. Die bisherigen Erfahrungen der Schweizer Salinen AG mit diesen Rohren bestätigen dies (36).

Das Gewinde des inneren Solstranges ist eine Eigenherstellung der Schweizer Salinen AG, daher kann von DEEP.KBB zur Dichtheit dieses Gewindetyps keine Aussage getroffen werden. Da der innere Solstrang aber von Wasser bzw. Sole umströmt wird, ist hier eine hydraulische Dichtheit ausreichend.

Innerer und äußerer Solstrang sind im Kavernenkopf abgehängt. Abbildung 20 zeigt Elemente der Komplettierung (37). Auf der linken Seite ist der innere Solstrang mit Abhänge-Flansch dargestellt, welcher in den äußeren Strang (im Bild rechts) eingebaut und auf dem oberen Flanschanschluss des äußeren Solrohres abgesetzt wird. An den weiteren Flanschanschlüssen werden weitere Kopfbauteile sowie Absperrarmaturen angebracht. Der Kavernenkopf hat einen einfachen, praktikablen Aufbau.

Daten zur maximalen Druckfestigkeit oder Informationen zu Berstdruckversuchen nach der Herstellung des Kavernenkopfes liegen nicht vor.

<sup>4</sup> STC: Short Thread Coupling – Verrohrung mit kurzem Rundgewinde entsprechend API Zertifizierung

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

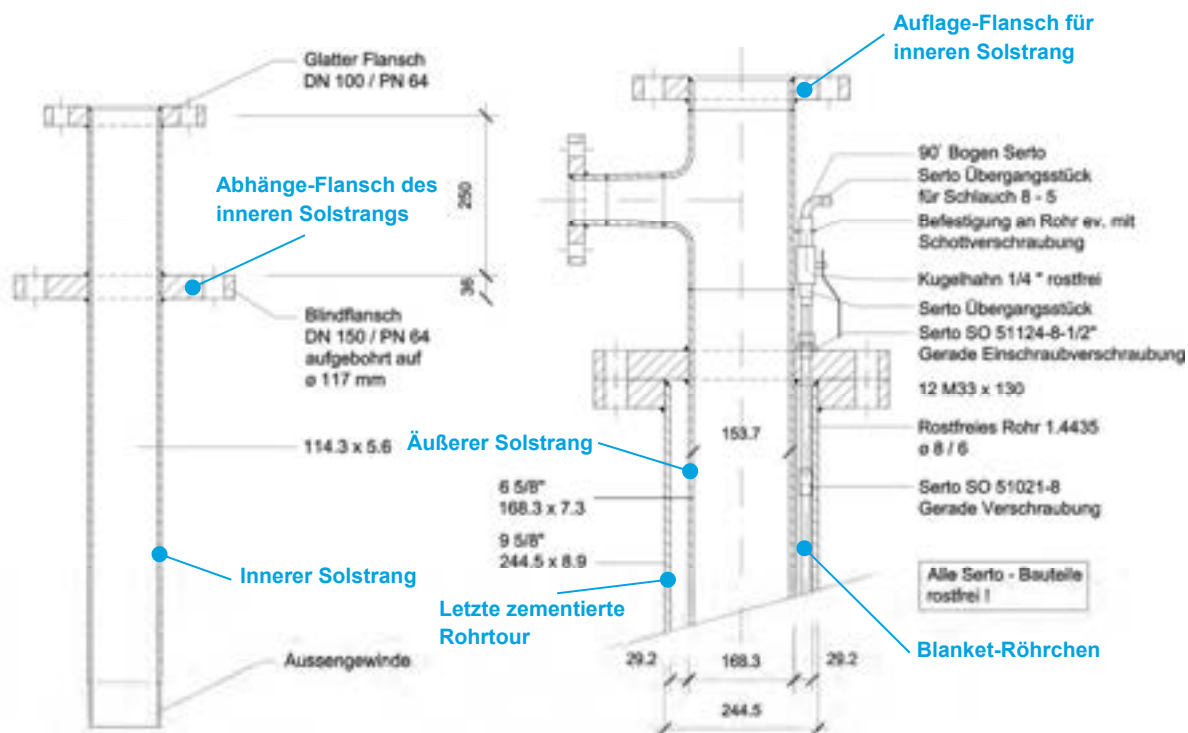


Abbildung 20: Zeichnung innerer Solstrang (links) und Kavernenkopf / äußerer Solstrang (rechts), aus (37)

### 5.5 Dichtigkeitstest

Die Durchführung des Dichtigkeitstest und die Berechnung der zulässigen Kopfdrücke wird überwiegend in dem Dokument „Bohrtechnik und Bohrlochverrohrung“ aus 2003 in Kapitel 4.8 und in den Beilagen 6, 7 und 8 beschrieben (36). Im selben Dokument werden auch die Anforderungen an die Dichtheit der Produktionsbohrungen definiert. So beschreibt Kapitel 4.8, dass für das Solen der Salzlager prinzipiell dichte Bohrlöcher eine Voraussetzung sind. Kapitel 4.6 geht einen Schritt weiter und formuliert, dass die Zementation für den Blanketbetrieb mit Stickstoff gasdicht sein soll.

Die Durchführung des Dichtigkeitstestes erfolgt nach Aushärtung des Zements und nach der Montage des Kavernenkopfes und ist in Beilage 7 des Dokuments zur Bohrtechnik und Bohrlochverrohrung beschrieben. Zunächst wird das Bohrloch mit Sole aufgefüllt, die benötigte Ausrüstung installiert und die Restluft aus der Produktionsbohrung und dem Kavernenkopf verdrängt. Danach erfolgt der erste Druckaufbau mit einer Druckaufzeichnung von mindestens einem Tag. Die Berechnung der Drücke für den Test richtet sich nach Rohrschuhteufe und Medium. Die Grundlage der Berechnung ist Beilage 6 des obengenannten Dokuments zu entnehmen. Nach dem ersten Druckaufbau wird ein weiterer Druckaufbau durchgeführt und für 24 Stunden gemessen. Danach erfolgt die Hauptdruckphase für weitere 24 Stunden. Kriterium für die Dichtheit der Produktionsbohrung ist ein Druckverlust von unter 0,02 bar pro Stunde. Wird dieser Wert nicht eingehalten, muss der Test wiederholt werden und falls nach mehrmaligen Versuchen die Dichtheit nicht nachgewiesen werden kann, ist die Leckage zu lokalisieren und zu reparieren. Der Erfolg der Reparatur ist dann mit einem erneuten Dichtigkeitstest nachzuweisen.

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

Abweichend von dem zuvor dargestellten Vorgehen, wird in dem Dokument „Solkomplettierung, Dichtigkeitstest, Solung“ aus 2019 (38) ein fester Testdruck für alle Produktionsbohrungen von 10 bar definiert, statt lokationsspezifischer Testdrücke in Abhängigkeit der Rohrschuh-Teufe der letzten zementierten Rohrtour. Es ist zu prüfen, ob mit dieser festen Vorgabe die Anforderungen an den Testdruck, d. h.

- oberhalb aller später im Betrieb auftretenden Drücke
- unterhalb des gebirgsmechanisch max. zulässigen Druckes am Rohrschuh

für alle Bohrlöcher erfüllt werden.

Prinzipiell kann der in dem Dokument von 2003 beschriebene Testablauf zur Überprüfung der hydraulischen Dichtheit, d. h. der Dichtheit hinsichtlich flüssiger Medien, einer Bohrung verwendet werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass seitens der Schweizer Salinen AG mit Stickstoff ein gasförmiges Blanket eingesetzt wird. Daraus leitet sich ab, dass die Gasdichtheit der Produktionsbohrung und auch der Zementation im Bereich des Rohrschuhs nachzuweisen ist, um Stickstoff-Verluste ins umgebende Gebirge auszuschließen. Der Nachweis einer Gasdichtheit kann mittels Sole nicht erbracht werden.

### 5.6 Soltechnik

Das Verfahren zur Soleproduktion der Schweizer Salinen AG wird in dem Dokument „Laugungstechnik-Laugungs-/Solbetrieb“ von 2003 grundlegend beschrieben (41). In dem Dokument werden zum einen die Laugung (Solung) mit Blanket, welche Stand der Technik ist, und zum anderen einige Sonderfälle beschrieben. Die Sonderfälle sind:

- Saugende Laugung (mit Unterwasserpumpe wird die Sole ausgepumpt; Frischwasserzufuhr erfolgt über Grundwasserzufluss durch die Produktionsbohrung)
- Laugung ohne Blanket
- Galeriesolen (verbundene Kavernen)

Diese Sonderfälle sind nicht Stand der Technik. Nach Kenntnisstand seitens DEEP.KBB werden diese Sonderfälle auch nicht mehr von der Schweizer Salinen AG angewandt. Daher wird im Folgenden nur das Solen mit Blanket bzw. Sperrmedium betrachtet.

Die Solung beginnt mit der Sumpfsolphase („Anlagephase“) mittels direkten Solbetriebs (Wasserinjektion durch inneren Solstrang) mit geringer Rate. Nach Erreichen eines bestimmten Volumens wird der Solbetrieb auf indirektes Solen umgestellt, der Blanketspiegel und die Rohrstände in Schritten angehoben und die Kaverne dadurch schrittweise, d. h. in den sogenannten Solsteps, von unten nach oben entwickelt.

Um die Salzproduktion innerhalb der gebirgsmechanischen Aussolgrenzen zu optimieren, wurde das grundsätzliche Solkonzept der Schweizer Salinen AG im Jahr 2016 durch DEEP.KBB (vormals DEEP. Underground Engineering GmbH) modifiziert (43). Dazu wurde ein generisches Solkonzept, gestützt auf Computersimulationen, entwickelt. Dieses Solkonzept ist in Abbildung 21 dargestellt. Die unterschiedlichen Farbabstufungen des Kavernenhohlraums stellen die einzelnen Solsteps dar, die durch unterschiedliche Positionen (Abhängeufen) der Solstränge und unterschiedliche Teufen des Blanketspiegels erreicht werden. Dieses generische Konzept ist dann unter Berücksichtigung unterschiedlicher lokationsspezifischer, geologischer Bedingungen anzupassen, wie dies beispielsweise in 2018 für die Kaverne Riburg 144 erfolgt ist (46).

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

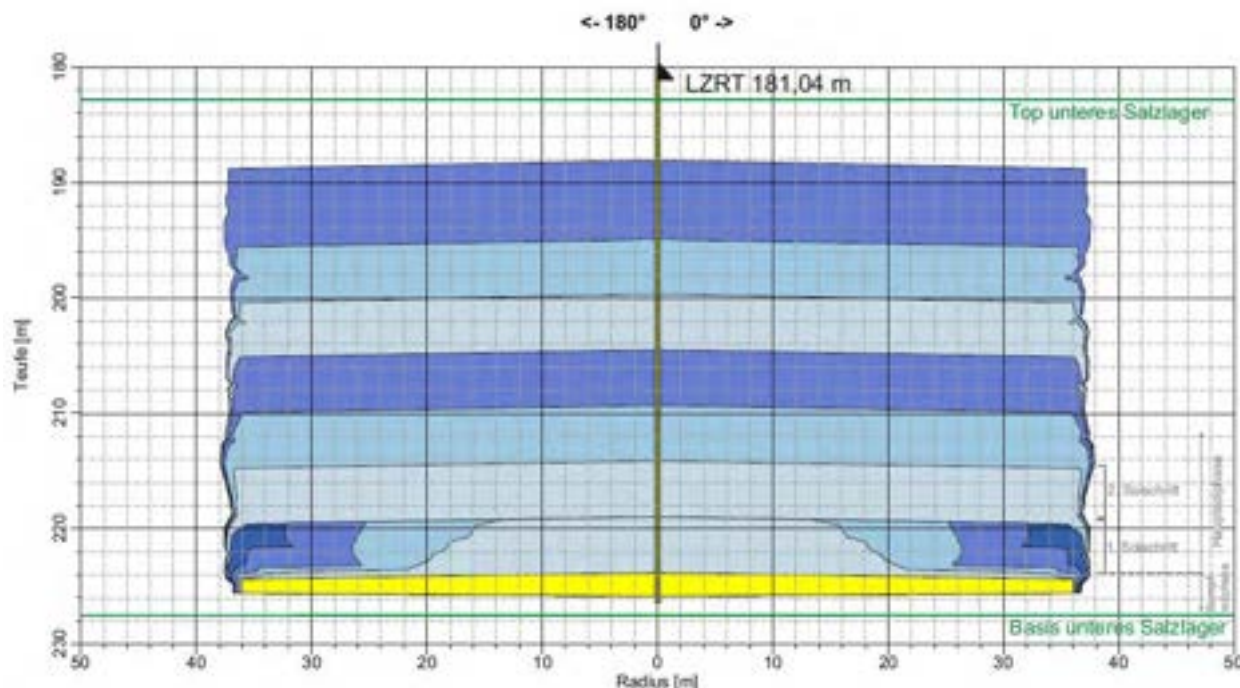


Abbildung 21: Generisches Solkonzept – Simulierte Entwicklung der Kavernenform (43)

Das derzeitige Vorgehen der Schweizer Salinen AG zur Solung entspricht damit dem Stand der Technik. Unter Einhaltung der definierten gebirgsmechanischen Parameter, der zulässigen (und getesteten) Betriebsdrücke und der in Kapitel 5.8 beschriebenen Maßnahmen zur Überwachung des Solbetriebs ist von einem sicheren Betrieb auszugehen.

### 5.7 Verwahrung

Ein geotechnisches Konzept für die Verwahrung der Kavernen der Schweizer Salinen AG liegt nicht vor.

Für den Verschluss einer Bohrung existiert die „Arbeitsanweisung Bohrbetrieb – Verfüllung von Bohrlöchern“ aus dem Jahr 2016 (53). Weiterhin ist das Vorgehen der Verfüllung der Bohrungen im Gebiet Ätti-graben / Zurlinden im Rahmen eines Berichtes von 2014 dokumentiert (52). In beiden Dokumenten wird eine Verwahrung und Verfüllung gemäß internationalem Standard des Solution Mining Research Institute (SMRI) sowie der deutschen Tiefbohrverordnung BVOT (1) und den Richtlinien des Oberbergamtes Clausthal-Zellerfeld über das Verfüllen von Bohrungen angestrebt (3). Da es in der Schweiz keine einer Bergbaubehörde vergleichbaren Einrichtung gibt, welche verbindliche Gesetze oder Verordnungen z. B. für die Verfüllung von Bohrungen und Kavernen erlässt, wird auch in der Schweiz auf deutsche Verordnungen zurückgegriffen.

Folgende Schritte gehören zum generellen Konzept der Schweizer Salinen AG (53), (52):

- Vor der eigentlichen Verfüllung wird das Bohrloch beobachtet, um zu überprüfen, ob die Voraussetzungen erfüllt sind (z. B. keine Senkung, konstanter Druck am Kavernenkopf).
- Kamerabefahrung (ggf. nur bei Bohrungen, bei denen aufgrund fehlender Dokumentation die Tiefe des Rohrschuhs unklar ist).
- Bewertung der Zementation mittels akustischer geophysikalischer Messungen (Cement-Bond-Log/Variable-Density-Log).



## **5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG**

- Werden Abschnitte mit schlechter Zementation identifiziert, werden diese perforiert oder Fenster gefräst, um neuen Zement hinter die Verrohrung einzupressen.
- Verfüllung der Bohrung mit Zement und Kies (Abbildung 22).
- Rekultivierung der Oberfläche.

Gemäß der von der Schweizer Salinen AG bereitgestellten Dokumente wurden bzw. werden die Bohrungen im Bereich eines Grundwasserleiters (Hauptmuschelkalk) mit Kies verfüllt und Rohrperforationen an dieser Stelle nicht verschlossen. Dies bedeutet, dass die Zementationsstrecken nur unter dem Grundwasserleiter in der oberen Sulfatzone und im oberflächennahen Bereich eingebracht werden. Grund hierfür ist möglicherweise, den Grundwasserstrom so wenig wie möglich zu beeinflussen.

Allerdings gehört der Grundwasserleiter im Rahmen der Verfüllung zu den Schutzgütern. Der Schutz des Grundwassers ist als höher einzustufen, als die geringfügige Behinderung des Grundwasserstroms. Dies ist auch konsistent zu den oben genannten Richtlinien.

Ein spezielles und konkretes Verwahrungskonzept mit geotechnischem Nachweis für die Stilllegung der geplanten neuen Kavernen auf der Rütihard liegt zurzeit noch nicht vor. Dieses ist erst zu erstellen, wenn der endgültige Zustand der Kavernen bekannt ist. Die Verwahrung der Kavernen im neuen Bohrfeld Rütihard wird vermutlich erst in einigen Jahrzehnten stattfinden. Bei der Erstellung eines Konzeptes ist die Entwicklung der Verwahrungstechnik von Kavernen weiter zu verfolgen.

Die Schweizer Salinen AG wird als Mitglied des SMRI die Kavernen nach dem grundsätzlichen Konzept verwahren, welches vom SMRI entwickelt wurde.

Aufgrund der geringen Teufenlage und Höhen der Kavernen auf der Rütihard ist nur mit einer äußerst geringen Konvergenz im Verwahrungszustand zu rechnen, sodass derzeit damit gerechnet werden kann, dass die Sole das Salinar nicht verlässt. Dies sollte jedoch mittels geeigneter Methoden oder Tests (z. B. In-situ-Konvergenz- bzw. Druckaufbaubeobachtungen und auf der Grundlage von Erfahrungen aus den benachbarten Feldern) überprüft werden. Eventuell reichen daher eine generelle geotechnische Prüfung der Verwahrung und ein Verschlusskonzept der Produktionsbohrung aus, wie dies bereits von der Schweizer Salinen AG in anderen Gewinnungsfeldern durchgeführt wird.

5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

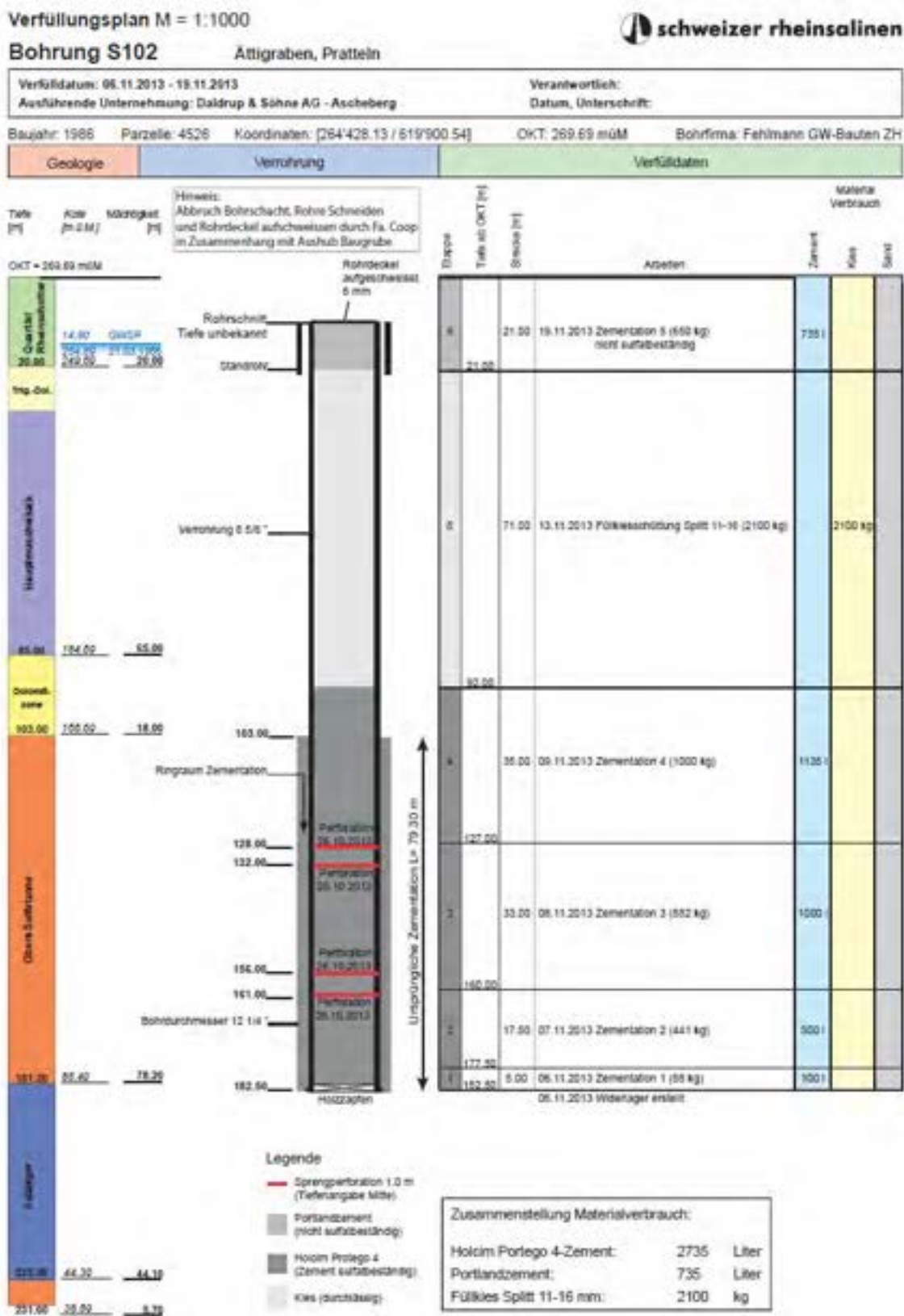


Abbildung 22: Verwahrung am Beispiel der Bohrung S102, Ättigraben (52)

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

### 5.8 Überwachung

#### Solbetrieb

Basierend auf dem Dokument „Solkomplettierung, Dichtheitstest, Solung“ aus dem Jahr 2019 (38) sind während des Solbetriebs auf der Rütihard folgende Überwachungen geplant:

- Die Kopfdrücke von Wasser, Sole und Stickstoff (Blanket) werden kontinuierlich aufgezeichnet und überwacht.
- Der Blanketspiegel wird zusätzlich mittels der installierten Blanket-Röhrchen überprüft. Während der Anlage- bzw. Sumpfsolphase erfolgt dies drei- bis fünfmal wöchentlich. Im anschließenden Laugungsbetrieb (Hauptsolphase) erfolgt dies einmal pro Woche.

Optional wird von der Schweizer Salinen AG zusätzlich eine Blanket-Messsonde installiert. Deren technisches Messprinzip ist zwar anders als bei den Blanket-Röhrchen, detektiert aber letztlich ebenso an definierten Positionen, ob diese sich in Gas oder in Sole befinden. Die Überwachungsart ist damit vom Prinzip her identisch mit den Blanket-Röhrchen.

- Es erfolgen eine kontinuierliche Messung der Solrate (Fließrate Wasser bzw. Sole) sowie periodische Kontrollen der Soledichte zwei- bis dreimal die Woche. Gestützt auf diese Werte erfolgt eine Massenbilanzierung, aus der sich das Kavernenvolumen ableiten lässt.

Die obengenannten Messungen entsprechen dem Stand der Technik. Zusätzlich sollten allerdings in regelmäßigen Abständen (mindestens monatlich) Soleproben je Kaverne chemisch analysiert und die daraus gewonnenen Ergebnisse zur Steuerung/Überwachung des Solprozesses und bei Bedarf zur Anpassung nachfolgender Planungen (z. B. des nächsten Solsteps) genutzt werden.

#### Hohlraumvermessungen

Zur Überwachung der Kavernenentwicklung sind bei der Schweizer Salinen AG echometrische Vermessungen vorgesehen. Die Vermessungsintervalle wurden zunächst 2003 in dem Dokument „Laugungstechnik-Laugungs-/Solbetrieb“ (Kapitel 8.1) festgelegt (41) und im Rahmen der Entwicklung eines neuen generischen Solkonzeptes seitens DEEP.KBB in Zusammenarbeit mit der Schweizer Salinen AG im Jahr 2016 angepasst (43).

Gemäß dem Dokument "Laugungstechnik-Laugungs-/Solbetrieb" aus 2003 (41) sah das Überwachungskonzept der Schweizer Salinen AG vor, eine Hohlraumvermessung am Ende der Sumpfsolphase oder im Laufe des ersten Solsteps der Hauptsolphase durchzuführen, spätestens aber nach der Produktion von 30.000 bis 40.000 Tonnen Salz. Anschließende Messungen wurden nach der Produktion von jeweils 40.000 bis 60.000 Tonnen geplant. Dies wurde im Zusammenhang mit dem generischen Solkonzept (43) geändert und die erste Messung erfolgt am Ende der Sumpfsolphase (Änderung von direktem zu indirektem Verfahren). Die weiteren Hohlraumvermessungen erfolgen jeweils am Ende eines Solsteps der Hauptsolphase. Die Solsteps und infolgedessen die Messungen sind so angelegt, dass diese etwa jährlich nach einer Salzproduktion von jeweils ca. 30.000 bis 40.000 Tonnen erfolgen.

Unter der Annahme,

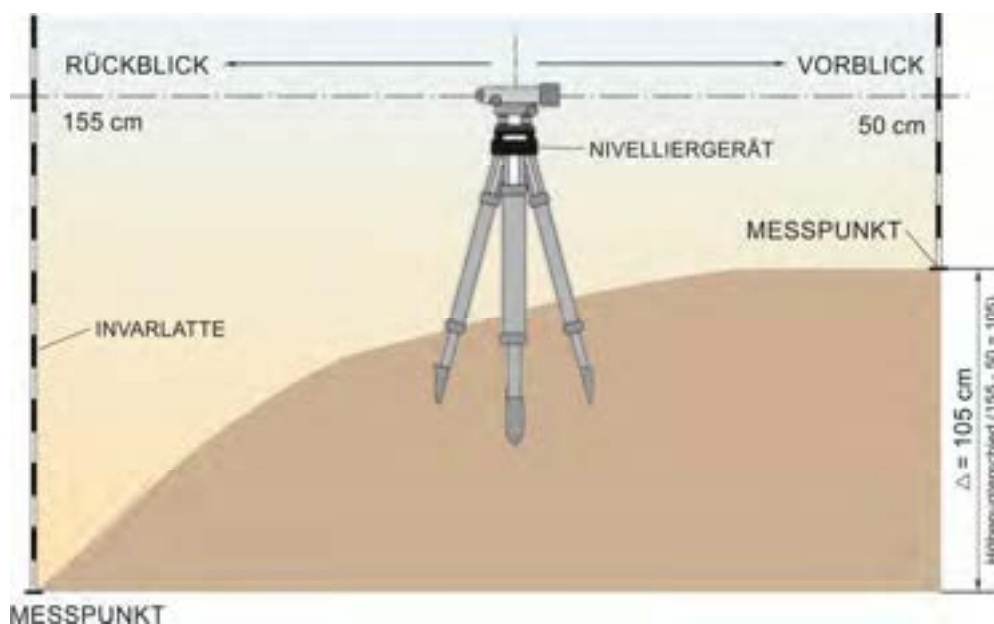
- dass initial jeweils ein lokationsbezogenes Solkonzept (unter Berücksichtigung des generischen Solkonzeptes) erstellt wird und darin die Vermessungen bzw. die Vermessungsintervalle festgelegt werden sowie
- dass die Vermessungsergebnisse nach jedem Solstep jeweils genutzt werden, um eine gegebenenfalls erforderliche Anpassung des Solkonzeptes vorzunehmen

ist der aktuelle Stand der Technik bei den Hohlraumvermessungen gegeben.

## 5 Planung und Erschließung des Bohrfeldes Rütihard durch die Schweizer Salinen AG

### Nivellement

Zur Überwachung von Bodenbewegungen und Senkungserscheinungen werden von der Schweizer Salinen AG in jährlichen Abständen Nivellementmessungen in den Kavernenfeldern durchgeführt. Dazu verfügt die Schweizer Salinen AG über ein eigenes Fixpunktnetz. Die Höhen dieser Fixpunkte werden mit einem digitalen Nivelliergerät und Invarlatten erfasst. Zur Bestimmung der Höhen wird die Rück- und Vorblick Messmethode, die die Differenz zwischen zwei Punkten ermittelt, genutzt (Abbildung 23). Die Messung der Höhenpunkte erfolgt von Punkt zu Punkt und wird an Fixpunkten eingehängt bzw. kalibriert, die außerhalb des Bereichs liegen, der von Senkungen betroffen ist. Zur Absicherung und Überprüfung werden amtliche Höhenfixpunkte mit einbezogen (50), (48).



**Abbildung 23: Darstellung Höhennivellement**

Die Ergebnisse der jährlichen Nivellements werden in technischen Berichten zusammengefasst, bewertet und dokumentiert (48).

In Vorbereitung auf die Erschließung des Gewinnungsfeldes Rütihard wurde das Fixpunktnetz der Schweizer Salinen AG im Bereich Rütihard erweitert (acht Überwachungspunkte neu gesetzt und 26 amtliche Höhenfixpunkte in das Netz mit einbezogen) und im Dezember 2018 ein Nivellement durchgeführt (50). Ziel dieser Messung, auch Nullmessung genannt, ist es, den Zustand vor Beginn der Kavernenlösung zu dokumentieren.

Das Vorgehen der Schweizer Salinen AG hinsichtlich des Nivellements entspricht dem Stand der Technik.

## 6 Zusammenfassung und Empfehlungen

### 6 Zusammenfassung und Empfehlungen

Der vorliegende Bericht beschreibt den Stand der Technik zur Solegewinnung bzw. Salzgewinnung mittels Lösungsbergbau. Der Stand der Technik ist in diesem Fall anhand behördlicher Vorgaben, Normen und Standards (u. a. API), anerkannter Fachinstitute (wie z. B. SMRI) und Erfahrungen bzw. etablierter Praxis definiert. Gegenstand der Betrachtung sind allein die untertägigen Anlagenteile (einschließlich des Kavernenkopfes) und die damit verbundenen Fachdisziplinen. Die Darstellung beinhaltet die folgenden Themen:

- geologische Erkundung
- Gebirgsmechanik
- Bohrtechnik
- Solkomplettierung
- Dichtheitstest
- Soltechnik
- Verwahrung
- Überwachung während des Betriebs und der Verwahrung

Der Stand der Technik wird mit dem Vorgehen der Schweizer Salinen AG verglichen und deren Vorgehen bewertet. Insgesamt kann eine hohe Übereinstimmung des Vorgehens der Schweizer Salinen AG mit dem Stand der Technik festgestellt werden. Relevante Abweichungen zeigen sich lediglich in folgenden Bereichen:

- **Solkomplettierung**

Die äußeren Solstränge sind nicht mit gasdichten Gewindeverbindern ausgestattet. Da der äußere Solstrang aber mit dem Stickstoffblanket in Kontakt steht, sollten andere Rohre mit Verbindern genutzt werden, die als gasdicht klassifiziert sind. Alternativ wäre auch ein Nachrüsten der bestehenden Rohre mit einer Dichtung möglich.

Technisch ist es zwar möglich, dass die eingesetzten STC-Verbinder unter den im Bohrloch herrschenden Druckbedingungen gasdicht sein können, dies ist aber nicht sicher gestellt. Bei weiterer Verwendung dieses Verbindertyps ist zu gewährleisten, dass ein mögliches Eindringen von Stickstoff in den äußeren Solstrang nicht zu einer Überschreitung des zulässigen Betriebsdruckes von angeschlossenen Bauteilen führt, d. h. dass der Stickstoff insgesamt sicher eingeschlossen bleibt. Darüber hinaus ist ein Arbeitsablauf festzulegen, wie in einem solchen Fall, d. h. bei Stickstoff im äußeren Solstrang, vorzugehen ist.

- **Dichtheitstest**

Der Dichtheitstest der Produktionsbohrung wird mit Sole durchgeführt und insofern nur eine hydraulische Dichtheit, d. h. Dichtheit gegen Flüssigkeiten, nachgewiesen. Anforderung ist aber die Gasdichtheit der Produktionsbohrung einschließlich der Zementation im Bereich des Rohrschuhs, da mit Stickstoff als Blanket gesolt wird. Zum Nachweis der Gasdichtheit ist ein Dichtheitstest mit gasförmigem Testmedium, z. B. Stickstoff, durchzuführen. Der Stickstoff kann nach Durchführung des Tests in der Produktionsbohrung verbleiben und anschließend als Blanket weitergenutzt werden.

## 6 Zusammenfassung und Empfehlungen

### • Verwahrung

Zu gegebener Zeit, vor dem endgültigen Verfüllen der Produktionsbohrung, ist ein lokationsspezifisches Verwahrungskonzept mit geotechnischem Nachweis zu erstellen. Eventuell reicht auch eine generelle geotechnische Prüfung der Verwahrung. Dies ist mit dem gebirgsmechanischen Gutachter zu klären.

Bei der Verfüllung der Produktionsbohrung wird im Bereich der grundwasserführenden Schichten die Rohrtour mit Kies verfüllt. Nach dem Stand der Technik und entsprechender Richtlinien (2) ist die Bohrung im oberflächennahen Bereich zu einer solchen Tiefe zu zementieren, dass Süßwasserhorizonte, die für eine Nutzung vorgesehenen sind, überdeckt werden. Mindestens sind jedoch 100 m einzuhalten.

Zusätzlich werden seitens DEEP.KBB nachfolgende Empfehlungen ausgesprochen. Diesbezüglich wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich um Empfehlungen zum Vorgehen der Schweizer Salinen AG handelt, nicht aber um Abweichungen zum Stand der Technik.

### • Geologische Erkundung

Durch die Schweizer Salinen AG ist zu prüfen, ob (zusätzliche) Sondierbohrungen im eigentlichen Areal des geplanten Bohrfeldes Rütihard, und dort bevorzugt im Gebiet der „Etappe 3“, erforderlich sind, um zusätzliche lokationsspezifische Daten zur Mächtigkeit und zum stofflichen Aufbau des Salzkörpers zu gewinnen. Es wird empfohlen, das geophysikalische Untersuchungsprogramm im offenen Bohrloch durch die Dichte-, Neutron- und Widerstandsmessung sowie die Gamma-Spektroskopie zu ergänzen.

Aus den Ergebnissen der Sondierbohrungen sollte eine detaillierte lithologische Beschreibung der – insbesondere im Salzkörper – vertretenen Hauptlithologien abgeleitet werden. Die Erstellung eines lithostratigraphischen Standardprofils für die Rütihard, basierend auf den Altbohrungen und den Sondierbohrungen, ist zu empfehlen.

Im 3D-Modell sollte für den Bereich der Rütihard die Zeglingen-Formation und vor allem der Salzkörper, unter Berücksichtigung der lokalen Mächtigkeitsverteilung und ggf. von Schichtausfällen, lithologisch-feinstratigraphisch gegliedert werden. Eine solche Detailmodellierung könnte dazu dienen, ein Lagerstättenmodell für das neue Bohrfeld zu etablieren, das im weiteren Projektverlauf für die Feldesplanung und die Reserven-Abschätzung genutzt werden kann.

### • Bohrtechnik

Bei auftretenden Spülungsverlusten könnten mittels Einsatz von Lost-Circulation-Material die Spülungsverluste eingedämmt werden, um die Bohrung zu stabilisieren. Zusätzlich würde voraussichtlich die Möglichkeit geschaffen, die Bohrung anschließend mittels Standardverfahren bis zutage zu zementieren. Grundsätzlich wird eine Zementation bis zutage empfohlen. Zusätzlich wird der Einsatz von API-Zementen empfohlen.

### • Soltechnik

Es sollten im Labor Lösungsversuche an Bohrkernmaterial aus den Sondierbohrungen S156 und S157 durchgeführt werden, um lokationsspezifische Kennzahlen zu Lösungsgeschwindigkeiten des Salzgesteins und Gehalt und Schütffaktor unlöslicher Anteilen zu ermitteln. Die Ergebnisse der soltechnischen Laborversuche sollten mit den Ergebnissen der geophysikalischen Bohrlochmessungen korreliert werden. Diese Ergebnisse können dann bei den weiteren Planungen berücksichtigt werden.

## 6 Zusammenfassung und Empfehlungen

- **Verwahrung**

Die Zementation wird mittels CBL- und VDL-Messung vor der Verwahrung überprüft. Es ist zu empfehlen, auch ein Ultra Radial Sonic Imaging (oder vergleichbar) durchzuführen, da hier ein 360°-Bild der Zementation hinter der Verrohrung erstellt wird. Mittels dieses Verfahrens können auch Kanäle und Fluideinschlüsse in der Zementation hinter der Verrohrung identifiziert werden.

- **Überwachung**

In regelmäßigen Abständen (mindestens monatlich) sollten Soleproben je Kaverne chemisch analysiert und die daraus gewonnenen Ergebnisse zur Steuerung/Überwachung des Solprozesses und bei Bedarf zur Anpassung nachfolgender Planungen (z. B. des nächsten Solsteps) genutzt werden.

## **7 Firmendarstellung DEEP.KBB GmbH**

### **7 Firmendarstellung DEEP.KBB GmbH**

Die DEEP.KBB GmbH mit Sitz in Bad Zwischenahn ist eine unabhängige Ingenieurgesellschaft, die auf die Erkundung von Salzlagerstätten und deren Nutzbarbarmachung für die soltechnische Gewinnung von Steinsalz, Edelsalzen und Kalisalz und für die Untertagespeicherung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen spezialisiert ist. Die Ursprünge des Unternehmens gehen auf die „KBB Kavernenbau- und Betriebs-Gesellschaft“ zurück, die im Jahr 1971 gegründet wurde, um die Speicherung der strategischen Rohölreserven der Bundesrepublik zu realisieren.

Als führendes Unternehmen der Untertagetechnik ist DEEP.KBB heute in allen wichtigen deutschen und europäischen Solegewinnungs- und Energiespeicherprojekte involviert. Regionale Schwerpunkte liegen in Deutschland und ferner u. a. in den Niederlanden, in Großbritannien, Dänemark, Portugal, Spanien und Polen. DEEP.KBB war in der Vergangenheit wiederholt in verschiedenen Projekten direkt für die Schweizer Salinen AG tätig. Über den europäischen Markt hinaus ist das Unternehmen auch international an verschiedenen einschlägigen Projekten beteiligt

Die Gesellschaft beschäftigt an zwei Standorten in Bad Zwischenahn und Hannover ein Team von mehr als 60 qualifizierten Geowissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern mit z. T. über 25-jähriger Berufserfahrung. Die Organisationsstruktur des Unternehmens umfasst sieben Fachabteilungen sowie einen kaufmännisch-administrativen Bereich. Die Bündelung verschiedener Disziplinen wie Geologie, Gebirgsmechanik, Bohr- und Komplettierungstechnik, Soltechnik, Thermodynamik und Anlagentechnik, gepaart mit einer interdisziplinären Arbeitsweise, ermöglicht die erfolgreiche Planung und Realisierung umfangreicher und technisch komplexer Untertageprojekte. DEEP.KBB arbeitet zudem bereits seit vielen Jahren erfolgreich mit externen Consultants und Partnern aus der Serviceindustrie zusammen.

Das Portfolio der DEEP.KBB umfasst Ingenieurleistungen für alle Projektphasen, beginnend mit der Standortauswahl und -erkundung über Machbarkeitsstudien bis zur detaillierten Planung (einschließlich der Genehmigungsplanung) und der Umsetzung des Projektes. Darüber hinaus zählen die Betriebsüberwachung und Instandhaltung der Anlagen, das Integritätsmanagement der untertägigen Anlagenteile und die Entwicklung von Konzepten zur Stilllegung und langzeitsicheren Verwahrung von Kavernen zum Leistungsumfang. Zudem beteiligt sich das Unternehmen aktiv an der Forschung und Entwicklung neuer Technologien im Bereich der Speicherung regenerativer Energien (Druckluft- und Wasserstoffspeicherung).

Neben ihrer Tätigkeit im Planungsbüro beaufsichtigen die Geologen und Ingenieure der DEEP.KBB regelmäßig technische Maßnahmen vor Ort und führen dabei für den Auftraggeber die Qualitätssicherung durch. Eine Betriebsmannschaft unterstützt das Stammpersonal des Auftraggebers bei der Steuerung und Wartung der Anlagen.

DEEP.KBB erfüllt alle Anforderungen gemäß SCC\*\* (Safety Certificate for Contractors, Version 2011) und ist zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2015 sowie nach ISO 14001:2015 (Umweltzertifikat). Details zum Unternehmen finden sich unter <https://deep-kbb.de/>.



## Literaturverzeichnis

### Literaturverzeichnis

1. *Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen (Tiefbohrverordnung -BVOT-)*. 2006.
2. **Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V.** Technische Regel Bohrungsintegrität. Hannover : s.n., 2017.
3. **Oberbergamt in Clausthal-Zellerfeld.** *Richtlinien über das Verfüllen auflässiger Bohrungen*. 1998.
4. **Schweizer Salinen.** *Gesuchsformular für Sondierungen (ohne Erdwärmesondenbohrungen) mit Anhängen und Begleitdokument zum Bohrgesuch*. 26.06.15.
5. —. *Sondierbohrungen S156 und S157 (Begleitdokument zu Bohrgesuch)*. 14.09.2016.
6. —. *Saline Schweizerhalle - Explorationskonzept*. 02.05.2017.
7. **geo explorers.** *Planungsbericht - Salzexploration Gebiet Schauenburg BL - Teil 1: seismische Erkundung*. Liestal : s.n., 02.10.18.
8. **Schweizer Salinen.** *Geologische Erkundung zukünftiger Bohrfelder:Exploration Rütihard*. 02.04.2019.
9. **geo explorers.** *Planungsbericht - Salzexploration Gebiet Schauenburg BL - Teil 1: seismische Erkundung (angepasster Linienplan)*. Liestal : s.n., 29.05.2019.
10. **Unbekannter Urheber.** *Bohrprofil 1:200 Schweizerhalle Bohrung 37*. Datum der Erstellung nicht bekannt.
11. **Herzog, P.** *Geologischer Bericht über die Sondierbohrung 37*. 06.08.1953.
12. **swissboring.** *Bohrprofil 1:100 Sondierbohrung Nr. S 93*. 19.07.1985.
13. —. *Bohrprofil 1:100 Sondierbohrung Nr. S 94*. 05.08.1985.
14. **Hauber, L.** *Bericht über die Sondierbohrungen S93 und S 94*. 21.10.1985.
15. **swissboring.** *Bohrprofil 1:100 Sondierbohrung S 104*. 20.11.1986.
16. —. *Bohrprofil 1:100 Sondierbohrung Nr. S 107*. 07.09.1987.
17. **Hauber, L.** *Geologischer Bericht über die Sondierbohrung S 104 - S107*. 29.02.1988.
18. **Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen.** *Zusammenstellung der Stammdatenblätter der Bohrungen S 37, S 93, S 94, S 104, S 107*. Datum der Zusammenstellung unbekannt.
19. **Bitterli-Brunner, P., Fischer, H.** *Geologische Karte 1:25 000 Blatt 1067 Arlesheim*. s.l. : Landeshydrologie und -geologie, 1988.
20. **geo explorers.** *Abschlussbericht 3D Modell Schweizerhalle*. Liestal : s.n., 2017.
21. —. *Überprüfung Strukturgeologie Asp-Rütihard (Kurzbericht)*. 15.12.2017.
22. **Schweizer Salinen.** *Kartendarstellung zur Übersicht der Bohrungen*. 15.03.2018.
23. **Gruner AG.** *Salzgewinnung Rütihard, Entwurf: Umweltverträglichkeitsbericht (UVB)*. November 2018.
24. **geo explorers.** *Vorabergebnisse Sondierbohrung S 157 (Rütihard) - Geologische Analyse von OPTV, ABI und Bohrkernen sowie Bestimmung des Salzgehaltes*. Pratteln : s.n., 21.05.2019.
25. **Wagner, H.** *Solegewinnungsprojekt Schweizerhalle-Eigentel - Gebirgsmechanisches Gutachten*. August 1980.
26. **Dreyer, W.** *Gutachten zur Dimensionierung von Solegewinnungskavernen im Salzreal Eigentel*. 18.12.1980.

Projektnr:	4613-881774	Datum:	15.11.2019
Dateiname:	191030 Expertenbericht Soleförderung Rütihard rev00q.docx		

## Literaturverzeichnis

27. **Rokahr, R.B.** *Kavernenprojekt Grosszinggibrunn - Bewertung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens des Salzgesteins und der oberen Sulfatzone auf der Grundlage der Kavernenbohrungen S137 und S136.* Hannover : s.n., 2005.
28. —. *Gebirgsmechanische Auslegung des Solegewinnungsfeldes Grosszinggibrunn .* Hannover : s.n., 2005.
29. **Unbekannter Urheber.** *Vergleich der gebirgsmechanischen Berechnungen - Saline Schweizerhalle.* 30.11.2005.
30. **IUB GmbH Institut für unterirdisches Bauen.** *Gutachterliche Stellungnahme zum Bruchverhalten der Kavernen beim Überschreiten der Auslegungsdaten.* Hannover : s.n., 2013.
31. **Schweizer Salinen.** *Zusammenfassung des gebirgsmechanischen Gutachten von 1980, Eigental.* 21.02.2013.
32. —. *Zusammenfassung des Gutachten von 1980 zur Dimensionierung von Solegewinnungskavernen, Eigental.* 21.02.2013.
33. —. *Zusammenfassung der gebirgsmechanischen Auslegung des Solegewinnungsfeldes Grosszinggibrunn, 1980.* 21.02.2013.
34. —. *Zusammenfassung der gutachtlichen Stellungnahme zum Bruchverhalten der Kavernen bei Überschreitung der Auslegungsdaten, 2013.* 13.02.2014.
35. —. *Bohrschema Produktionsbohrung Rütihard.* 04.04.2019.
36. **Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen.** *Bohrtechnik und Bohrlochverrohrung.* 22.12.2003.
37. **Rapp Infra AG.** *Bohrfeld Grosszinggibrunn - Verrohrung im Bohrloch - Schacht Werkstattplan.* 10.12.2007.
38. **Schweizer Salinen.** *Solkomplettierung, Dichtheitstest, Solung.* 08.04.2019.
39. —. *ET CL 16-1 Kavernendatenblatt Schweizerhalle.* keine Jahresangabe.
40. **Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen.** *Bohrfeld- u. Nutzungsplanung.* 22.12.2003.
41. —. *Laugungstechnik-Laugungs-/Solbetrieb.* 22.12.2003.
42. **Schweizer Salinen.** *ET CL 16-2 Bohrlochverrohrung Änderung ET CL 16-2.* 29.09.2010.
43. **DEEP Underground Engineering.** *Generisches Solkonzept für Neubaukavernen.* 03.11.2016.
44. **Schweizer Salinen.** *Prozessanweisung Nr. 1: Bohrfeldbetrieb.* 03.05.2017.
45. —. *Prozessanweisung Nr. 16: Geologische Bohrfeldbetreuung .* 3.5.2017.
46. **DEEP.KBB GmbH.** *Zusammenfassender Bericht zur Untersuchung von Kernmaterial der Kavernenbohrung Riburg 144.* 08.08.2018.
47. **Schweizer Rheinsalinen.** *ET AW 16-2 Arbeitsanweisung Fixpunktvermessung.* 29.9.2010.
48. —. *Terrainüberwachung durch Nivellementmessungen (Kapitel 11).* 04.09.2014.
49. **Rapp Infra AG.** *Senkungsmessungen Gebiet, Wartenberg, Muttenz, Pratetteln.* November 2018.
50. —. *Senkungsmessungen 2018 Gebiet Rütihard, Muttenz.* 07.01.2019.
51. **Schweizer Rheinsalinen.** *ET CL 16-3 Verfüllungsprotokoll.* August 2003.
52. —. *Verfüllung der Bohrungen im Gebiet Ättigraben/Zurlinden.* 02.06.2014.
53. **Schweizer Salinen.** *Arbeitsanweisung Bohrbetrieb - Verfüllung von Bohrlöchern ET AW 16-10.* 04/2016.

## Literaturverzeichnis

54. **Warren, John K.** *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Brunei : Springer, 2008.
55. **Yuanxiong, L., Chengxun, N.** *Technical development of solution mining of thinly bedded rock salt deposits of Ziliujing, Sichuan, China*. Alexandrian VA Salt Institute : Proceedings 6th International Salt Symposium, 1983.
56. **Deutsch, Z.G.** *Brine wells and pipelines*, in D. W. Kuafmann, ed., *Sodium Chloride: The production and properties of salt and brine*. Washington D.C : American Chemical Society, 1978.
57. Schweizer Salinen. [Online] 2019. [www.salz.ch](http://www.salz.ch).
58. **Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Rohstoffe (BGR)**. Rohstoffinformationssystem (ROSYS). [Online] 2019. <http://rosys.dera.bgr.de>.
59. **DIN EN 1997-1**. *Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013*.
60. **Ratigan, J.L.** *Cavern Sealing and Abandonment Program 1996 through 2002. Houston TX, USA. Meeting Paper*. s.l. : SMRI, 2003.
61. **Reitze, A., von Tryller, H. & Hasselkus, F.** *Execution and Analysis of Sonar Surveys to support Rock-mechanical Evaluations*. London : Wallner, M., Lux, K.-H., Minkley, W. & Hardy Jr., H. R. (Eds.): *The Mechanical Behaviour of Salt: Understanding of THMC Processes in Salt*: 377-381;, 2007.

Für:  
Schweizer Salinen AG  
Schweizerhalle  
Rheinstraße 52  
CH-4133 Pratteln 1  
Schweiz

# Untersuchungen zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz

## Zwischenbericht

Auftragsnr. des Kunden: -  
Projektnr. des Kunden: -  
Projektnr.: 4613-882373  
Erstellt von: Dr. Markus Perk  
Dr. Gelareh Rahimi  
Johannes Brüning  
Datum: 14.10.2022  
Geprüft von: Reinhard Steenzen  
Freigegeben von: Raphael Schäfer  
Revision: 00

DEEP.KBB GmbH  
Eyhauser Allee 2a | 26160 Bad Zwischenahn  
info@deep-kbb.de | www.deep-kbb.de



Inhaltsverzeichnis

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>2</b>
<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Anlass und Hintergrund .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Kaverne S125.....	6
2.2 Kaverne S128.....	8
2.3 Kaverne S129.....	10
2.4 Zusammenfassung und Empfehlung.....	11
<b>3 Betrachtung der Zugangsbohrungen .....</b>	<b>13</b>
3.1 Grundlagen zur Bohrung .....	13
3.2 Grundlegender Ablauf der Bohrung / Herstellen der Integrität.....	14
3.3 Überprüfung der initialen Integrität der Bohrung .....	15
3.4 Betrieb der Bohrung / Erhalt und Überwachung der Integrität .....	16
3.5 Zusammenfassung und Empfehlung.....	17

Abbildungsverzeichnis

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Factsheet S125 Stand 2022 (links); 2. (rot gestrichelt) und 3. Hohlraumvermessung (grüne Linie) in Richtung 270° - 90° (rechts) ..... 7

Abbildung 2: Vertikalschnitte der 3. Hohlraumvermessung der S128 vom 28.09.2014 in Richtung 315° - 135° (grüne Linie) und der 1. Hohlraumvermessung vom 24.10.2002 (rote Linie) ..... 8

Abbildung 3: Vertikalschnitt der 4. Hohlraumvermessung der S128 vom 10.03.2022 (grüne Linie) und der 3. Hohlraumvermessung (24.06.2014, rote Linie) in Richtung 315° - 135° ..... 9

Anlagenverzeichnis

**Anlagenverzeichnis**

- Anlage 1: History Match der S125 zur Sonarvermessung 2003
- Anlage 2: History Match der S125 zur Sonarvermessung 2010
- Anlage 3: History Match der S125 zur Sonarvermessung 2022
- Anlage 4: History Match der S128 zur Sonarvermessung 2002
- Anlage 5: History Match der S128 zur Sonarvermessung 2007
- Anlage 6: History Match der S128 zur Sonarvermessung 2014
- Anlage 7: History Match der S128 zur Sonarvermessung 2022
- Anlage 8: History Match der S129 zur Sonarvermessung 2001
- Anlage 9: History Match der S129 zur Sonarvermessung 2004
- Anlage 10: History Match der S129 zur Sonarvermessung 2022

## 1 Anlass und Hintergrund

### 1 Anlass und Hintergrund

Die Schweizer Salinen AG betreibt am Standort Schweizerhalle soltechnische Gewinnung von Salz. Für die zugehörigen Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn erfolgt seit 2021 eine Ist-Zustandserhebung, die zum jetzigen Zeitpunkt allerdings noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Die Gesamtprojektleitung dazu erfolgt durch die GEOTEST AG.

Bereits bekannt ist, dass bei einigen der Kavernen sowie der zugehörigen Zugangsbohrungen Abweichungen des Ist-Zustandes vom Soll-Zustand vorliegen. In diesem Zusammenhang wurde die DEEP.KBB GmbH Ende August 2022 von der Schweizer Salinen AG hinzugezogen, um zunächst im Solfeld Sulz Untersuchungen und Bewertungen vorzunehmen mit dem Ziel, mögliche Ursachen (geologisch, technisch, betrieblich/organisatorisch) für diese Abweichungen zu ermitteln.

Die Untersuchungsergebnisse sollen bis Mitte Oktober vorliegen, um eine Entscheidungsgrundlage für die Schweizer Salinen AG über das weitere Vorgehen zu schaffen.



## 2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen

### 2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen

Die Untersuchung der Kavernenentwicklungen im Solfeld Sulz wurde auf Grundlage von Feld- und Kavernenspezifischen Daten durchgeführt, die von der Schweizer Salinen AG zur Verfügung gestellt wurden. Folgende Datensätze wurden im Rahmen der Untersuchung betrachtet:

- Geologische Profile inkl. Detailprofile des Salinars
- Composite logs der Bohrungen
- Echometrische Hohlraumvermessungen
- Lebensläufe der Produktionsbohrungen
- Factsheets zu den Kavernen
- Produktionsdaten
- Übersichtspläne des Kavernenfeldes
- Kavernenbeurteilungen der GEOTEST AG

Aufgrund des begrenzten zur Verfügung stehenden Zeitraumes wurde vereinbart, die Untersuchungen in erster Instanz auf wenige Kavernen zu stützen. Hierzu wurde mit der Schweizer Salinen AG und der GEOTEST AG ein Auswahlverfahren vereinbart. Aus den für die Untersuchung geeigneten Kavernen wurden in Abstimmung mit allen beteiligten Parteien drei Kavernen für die Untersuchung ausgewählt. Für die Auswahl wurden die Kavernen auf Basis der vorhandenen Vermessungsdaten nach Ausmaß der Abweichung des Ist-Zustandes vom Soll-Zustand unterteilt. Ursprünglich sollte je eine Kaverne untersucht werden, deren Ist-Zustand gut mit dem Soll-Zustand übereinstimmt und jeweils eine Kaverne deren Ist-Zustand moderat bzw. deutlich vom Soll-Zustand abweicht. Aufgrund der nicht immer vollständigen Datenlage und der daraus resultierenden eingeschränkten Möglichkeiten, die Entwicklung von Kavernen mit deutlichen Auffälligkeiten zu beurteilen, wurde darauf verzichtet, eine Kaverne mit deutlich Abweichungen des Ist-Zustandes vom Soll-Zustand zu betrachten. Es wurden stattdessen drei Kavernen mit geringen bis moderaten Auffälligkeiten betrachtet. Nach Sichtung der verfügbaren Daten wurden die Kavernen S125, S128 und S129 im für die nachfolgende Untersuchung ausgewählt.

Die Untersuchung der jeweiligen Kavernenentwicklung erfolgte mittels Vergleich der Hohlraumvermessungen (s. Kapitel 2.1 – 2.3) und einer Nachsimulation der Formentwicklung der Kavernen, genannt History Match. Die Simulationen wurden mit Hilfe der Software WinUbro durchgeführt, die ebenfalls in der Planung von Kavernen bzw. in der Erstellung der entsprechenden Solkonzepte Anwendung findet. Als Eingangsparmeter für die Simulation gehen u. a. die Auflösegeschwindigkeiten des Salzes (horizontal, vertikal), die Temperaturen, der Anteil der unlöslichen Stoffe und der Schüttungsfaktor mit ein. Zur Bestimmung des Anteils unlöslicher Stoffe wurden von der Schweizer Salinen AG die entsprechenden Feststoffprofile der Kavernen zur Verfügung gestellt. Hierbei zeigt sich generell, dass der untere Bereich des Salzlagers typischerweise aus sehr reinem Salz besteht, mit einem Feststoffanteil bis max. 1-2 %. In dem oberen Teil des Salzlagers zeigen sich Bereiche mit teils erhöhten Feststoffgehalten. Diese können in Spitzen bis über 90% Feststoffanteil erreichen. Die Feststoffprofile zeigen neben Steinsalz Anteile von Ton, Mergel, Anhydrit, Dolomite und grobkristallinem Salz. Verbleibende Simulationsparameter wurden auf Basis von Erfahrungswerten aus vorherigen Projekten für die Schweizer Salinen AG und aus vergleichbaren Projekten für andere Auftraggeber angenommen.

Zunächst wurde eine History Match Simulation auf Basis der vorhandenen Betriebsdaten, insbesondere der Rohrschuhstände, der Blanketteufen und der Produktionsmengen (Salz-Tonnage) durchgeführt. Eine tages-genaue Nachsimulation konnte aufgrund fehlender entsprechender Betriebsdaten nicht durchgeführt werden. Somit wurde für den Solungszeitraum eine konstante Fließrate angenommen, bzw. auf entsprechende Angaben in den Lebensläufen zurückgegriffen. Die Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit

## 2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen

zwischen Simulation und Hohlraumvermessung sind in diesen Fällen als relativ gering anzusehen, da aufgrund der niedrigen Solraten von durchschnittlich 15 m<sup>3</sup>/h keine gravierenden Änderungen in der Formentwicklung zu erwarten sind.

Die vorliegenden Rohrschuh- und Blanketteufen wurden der jeweiligen Übersichtstabelle des Lebenslaufes entnommen. Etwaige zusätzliche Teufenänderungen, z.B. während eines Workovers innerhalb einer simulierten Solphase, konnten im History Match nicht genau berücksichtigt werden, da aufgrund der fehlenden Tagesdaten kein exakter Abgleich hinsichtlich der Volumenentwicklung möglich war.

Weiterhin traten teilweise Abweichungen zwischen dokumentierten und tatsächlich gemessenen Blanketteufen auf (z.B. S129, s. Kapitel 2.3). Aus diesen Gründen wurden die Blanketteufen in den History Match-Simulation anhand der vorliegenden Hohlraumvermessungen falls notwendig angepasst.

In den Kapiteln 2.1 bis 2.3 sind die angestellten Untersuchungen zu den genannten drei Kavernen und deren Ergebnisse erläutert. Im nachfolgenden Kapitel 2.4 werden die Ergebnisse zusammengefasst und Empfehlungen gegeben.

### 2.1 Kaverne S125

#### Hohlraumvermessungen

Hohlraumvermessungen der Kaverne S125 wurde im Solbetrieb in den Jahren 2003 und 2010 durchgeführt. Laut der vorliegenden Unterlagen wurde die Solphase in 2018 beendet. Die letzte Hohlraumvermessung wurde in 2022, 4 Jahre nach Abschluss des Solbetriebs durchgeführt.

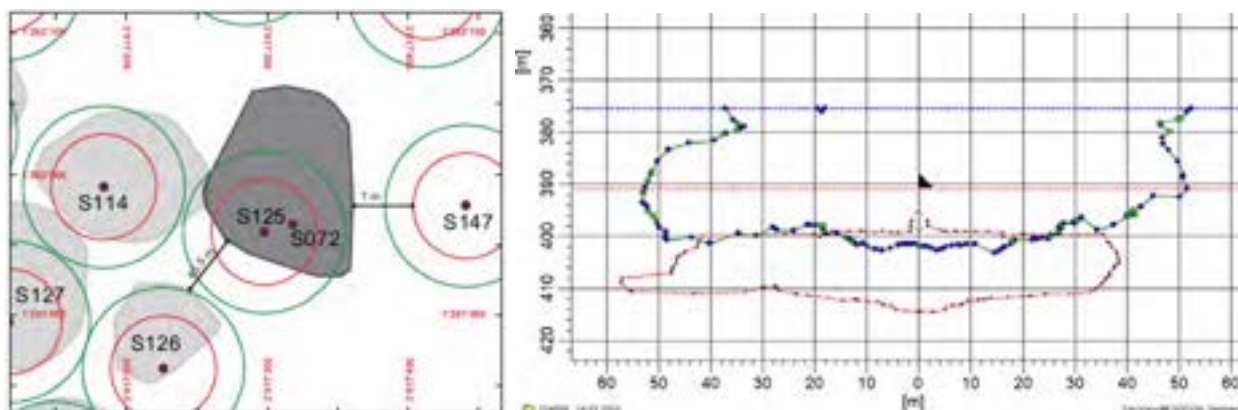
Die erste Vermessung der Kaverne S125 im Jahr 2003 zeigt eine Sumpfsolkaverne mit einem ebenen, flachen Dach (Anlage 1). Die Kavernenform ist zum damaligen Zeitpunkt leicht asymmetrisch, mit einem maximalen Radius Richtung Norden. Der Kavernensumpf fällt in Richtung des Mittelpunktes der Kaverne ein. Abgesehen von der leichten Asymmetrie entspricht die Formentwicklung der Kaverne einer typischen Sumpfsolkaverne. Die Hohlraumvermessung zeigt, dass die Blanketteufe zu diesem Zeitpunkt der Planung entspricht.

Die zweite Hohlraumvermessung wurde im Jahr 2010 durchgeführt (Anlage 2). Hier zeigt sich eine verstärkte Entwicklung der Asymmetrie in der Kavernenform Richtung Norden. Diese asymmetrische Formentwicklung war nach der ersten Vermessung nicht eindeutig erkennbar. Die Hohlraumvermessung zeigt, dass die Blanketteufe zu diesem Zeitpunkt der Planung entspricht.

Eine heute bestehende Verbindung zur Kaverne S114 kann bereits in dieser Phase (s. Abbildung 1, links) entstanden sein, da die Kaverne zu diesem Zeitpunkt bereits den maximalen Radius von ca. 55 m in Richtung der Kaverne S114 erreicht (Abbildung 1, rechts, rot gestrichelt: 2010, grüne Linie: 2022). Im Unterschied zur Hohlraumvermessungen in 2010 ist der maximale Radius in Richtung der Kaverne S114 lediglich in einer anderen Teufe dokumentiert. Aufgrund nicht vorliegender Sonardaten der Kaverne S114 kann an dieser Stelle keine weitere Analyse vorgenommen werden. Das Kavernendach befand sich zum Zeitpunkt der Messung in einer Teufe von ca. 399 m. In diesem Teufenbereich ist im lithologischen Profil eine 0,5 m mächtige Anhydritschicht mit einem Feststoffanteil von 90% dokumentiert.

Die überwiegend ebene Dachform zeigt an, dass bis zu diesem Zeitpunkt kein Verbruch stattgefunden hat. Die Position des Daches in 399 m weist einen ausreichenden Abstand zur Salzhangendschwebe auf.

## 2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen



**Abbildung 1: Factsheet S125 Stand 2022 (links); 2. (rot gestrichelt) und 3. Hohlraumvermessung (grüne Linie) in Richtung 270° - 90° (rechts)**

Die letzte Hohlraumvermessung aus dem Jahr 2022 (Anlage 3) zeigt ein irreguläres Kavernendach, das in Richtung der Messachse ansteigt. Der Verbrauch im Dachbereich dehnt sich mindestens bis ca. 5 m in die hangende Sulfatzone aus (Top Salz in 381,2 m) und liegt damit oberhalb des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour (390,64 m). Das Kavernendach ist in der Hohlraumvermessung nicht vollständig abgebildet, da sich in ca. 376 m der Blanketspiegel befindet und oberhalb des Blanketspiegels keine Messdaten aufgenommen wurden. Die Kaverne setzt sich somit oberhalb des Blanketspiegels fort. Aufgrund der unvollständigen Vermessung des Dachbereiches ist die tatsächliche Höhe des Dachs nicht bekannt, die veranschlagte Salzhangendschwebe von knapp 10 m ist jedoch bereits unterschritten worden. Der Zeitpunkt der Unterschreitung der Salzhangendschwebe lässt sich aufgrund des Zeitraumes zwischen den Hohlraumvermessungen nicht näher bestimmen.

Die Form der Kaverne ist asymmetrisch mit einem maximalen Radiusnördlicher bis nordöstlicher Richtung. Der Sumpf der Kaverne zeigt eine unregelmäßige Form. Das Einfallen des Sumpfes folgt der Asymmetrie der Kavernenform in Richtung Norden bis Nordosten. Die in 2022 gemessene Kavernenform überschreitet in nördlicher Richtung sowohl den für die Kaverne veranschlagten Dimensionspuffer als auch des Abstandspuffer zu benachbarten Kavernen.

Die geförderte Salzmenge überschreitet die veranschlagte Produktionskapazität der Kaverne deutlich um ca. 205.000 t.

### History Match Simulation

Die Formentwicklung der Kavernen S125 kann anhand des History Matches gut nachgebildet werden. Die in 2010 und 2022 gemessene asymmetrische Kavernenform weicht zwar von der simulierten Form ab, die Größe der Grundflächen der simulierten und gemessenen Kavernen stimmen jedoch auf Horizontalschnitten in weiten Teufenbereichen überein.

Ein Vergleich der Hohlraumvermessungen mit Ergebnissen der Simulation lässt erkennen, dass die Blanketteufen in der Endphase der Solung in 390,7 m (geplante oberste Blankethöhe) bzw. 386,2 m nicht gehalten werden konnten. Zwischen 385 m und 390 m weist das Lithologische Profil der Bohrung zwei Schichten mit hohen Feststoffanteilen (Mergel mit Anhydritschlieren) mit geschätzten 90% (ca. 389 m) und 80% (386 m) mit einer Mächtigkeit von jeweils ca. 1 m auf.

## 2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen

### 2.2 Kaverne S128

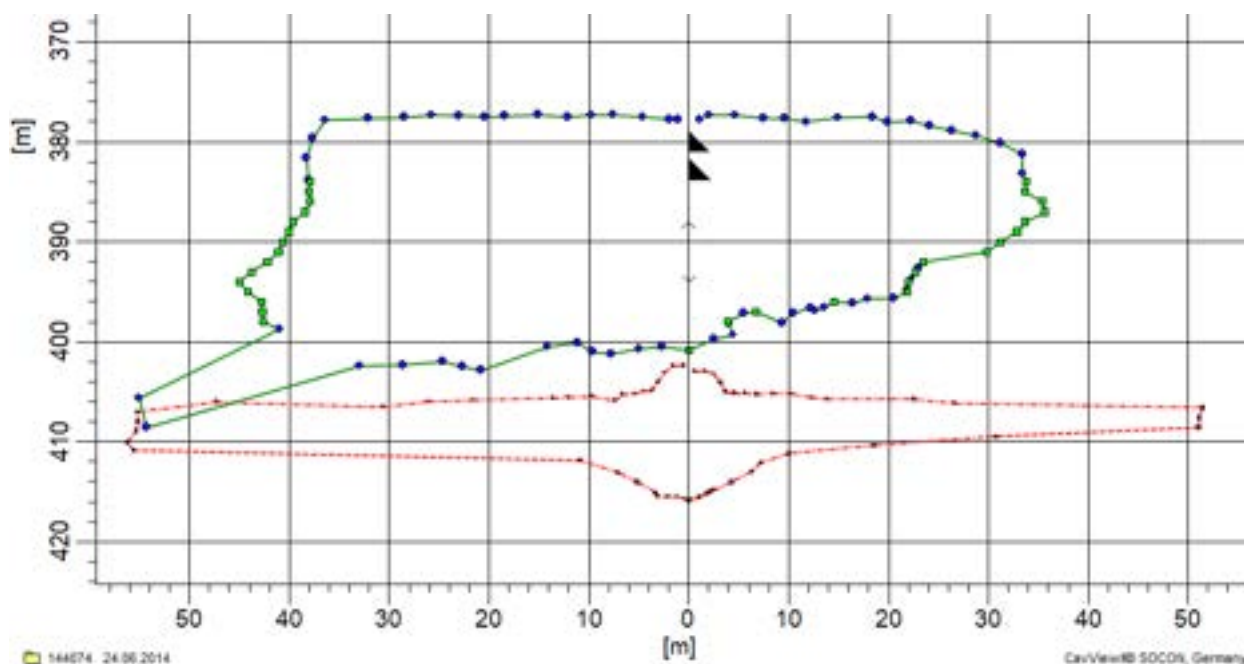
#### Hohlraumvermessungen

Hohlraumvermessungen der Kaverne S128 wurde im Solbetrieb in den Jahren 2002, 2007 und 2014 durchgeführt. Laut der vorliegenden Unterlagen wurde die Solphase in 2014 beendet. Im Jahr 2022 wurde eine weitere Sonarvermessung gemacht.

Die Vermessung der Kaverne S125 (Anlage 4) im Jahr 2002 zeigt eine Sumpfsolkaverne mit einem ebenen, flachen Dach. Die Kavernenform ist stark asymmetrisch mit einer maximalen Ausdehnung Richtung Norden. Der Kavernensumpf fällt in Richtung des Mittelpunktes der Kaverne ein. Das Dach wurde in einer Teufe von ca. 409 m eingemessen (Planungsteufe: ca. 410 m). In dem gesolten Teufenabschnitt liegt der Feststoffanteil zwischen 1 % und 5 %.

Die Hohlraumvermessung im Jahr 2007 (Anlage 5) zeigt eine symmetrische Kaverne mit einem weitgehend flachen Dach in einer Teufe von ca. 405 m. Die Teufenlage des Daches entspricht der zu diesem Zeitpunkt vorgesehenen Blanketteufe.

Die Hohlraumvermessung aus 2014 (Anlage 6) zeigt eine Kavernenentwicklung oberhalb des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour (381,24 m). Die höchste vermessene Dachposition liegt in ca. 376 m und damit knapp 2 m oberhalb vom Top Salz in 378,24 m. Der Blanketspiegel für den letzten Solabschnitt ist laut Planung in 385,5 m angegeben, knapp 2 m unterhalb der vorgesehenen Salzhangenschwebe.



**Abbildung 2: Vertikalschnitte der 3. Hohlraumvermessung der S128 vom 28.09.2014 in Richtung 315° - 135° (grüne Linie) und der 1. Hohlraumvermessung vom 24.10.2002 (rote Linie)**

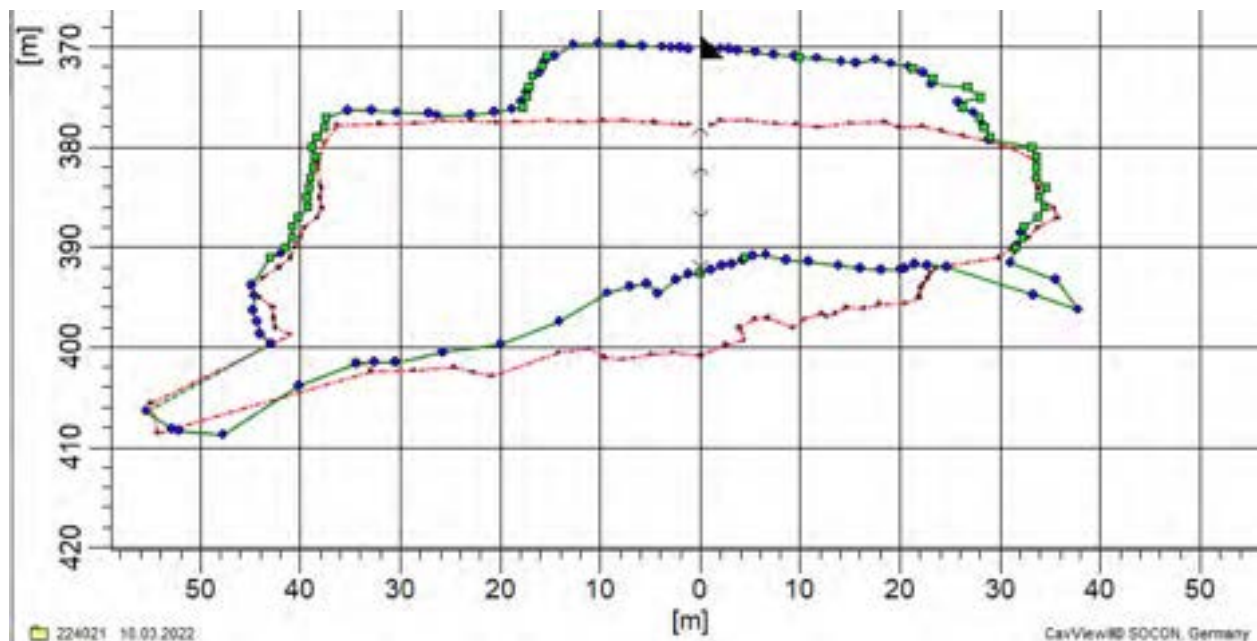
Zwischen 385 m und 405 m zeigt das Lithologische Profil sechs Bereiche mit hohen Feststoffgehalten zwischen 30 % und 98% (Anlage 6) und Mächtigkeiten zwischen ca. 0,3 m und 1 m. Eine genaue Bestimmung des Zeitpunktes des Verbrauchs im Dachbereich und dessen Ursachen lässt die Frequenz der vorliegenden Hohlraumvermessungen nicht zu.

Die letzte Hohlraumvermessung aus dem Jahr 2022 (Anlage 7) zeigt weiterhin ein ungleichmäßiges Kavernendach, gekennzeichnet durch weiteren Verbrauch des Deckgebirges. Der Verbrauch dehnt sich bis ca. 10 m - 11 m in die hangende Sulfatzone aus. Das Kavernendach unterschreitet somit die veranschlagten

## 2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen

Salzhangendschwebe von 10 m unterhalb des Tops der Salzformation. Abweichend zu den vorherigen Hohlraumvermessungen wurde hier der letzte zementierte Rohrschuh in 371,1 m TVD gemessen. Im Vergleich zur Messung aus 2014 hat sich das Dach weiter nach oben entwickelt, während die Seitenwände der Kaverne eine ähnliche Kontur haben. Dies kann gut in der abwärts gerichteten Tasche in 315° in ca. 408 m TVD wiedergegeben werden (Abbildung 3), welche immer noch vorhanden ist. Der Sumpf der Kaverne zeigt eine unregelmäßige Form mit einem Einfallen in Richtung Nordwesten. Die in 2022 gemessene Kavernenform überschreitet in westlicher Richtung sowohl den für die Kaverne veranschlagten Dimensionspuffer als auch den Abstandspuffer zu benachbarten Kavernen.

Die geförderte Salzmenge überschreitet die veranschlagte Produktionskapazität der Kaverne deutlich um ca. 92.500 t.



**Abbildung 3: Vertikalschnitt der 4. Hohlraumvermessung der S128 vom 10.03.2022 (grüne Linie) und der 3. Hohlraumvermessung (24.06.2014, rote Linie) in Richtung 315° - 135°**

### History Match Simulation

Abgesehen von der exzentrischen Form lässt sich die Kavernenentwicklung bis zu der Hohlraumvermessung in 2007 gut mit der History Match Simulation nachvollziehen. Lediglich der gemessene Sumpfanstieg in 2007 liegt mit ca. 1 m deutlich unterhalb dem der Simulation mit ca. 5 m. Der Feststoffanteil im Teufenbereich von 405 m bis 410 m liegt zwischen 2 – 20 %. Das lithologische Profil zeigt in diesem Teufenbereich eine ca. 0,5 m mächtigem Mergelschicht mit einem Feststoffanteil von 95% und einer Schichtneigung von 30°.

Der Vergleich der Hohlraumvermessung in 2014 zur Simulation zeigt ein deutlich abweichendes Verhalten sowohl in der Höhe als auch in der horizontalen Formentwicklung. Ein Großteil des simulierten Abschnitts unterhalb von 400 m TVD ist in der Hohlraumvermessung mit Sumpfmateriale gefüllt, vermutlich da Verbrauch in der Kaverne stattgefunden hat.

## 2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen

### 2.3 Kaverne S129

#### Hohlraumvermessungen

Die Hohlraumvermessungen der Kaverne S129 wurde im Solbetrieb nur in den Jahren 2001 und 2004 durchgeführt. In den verbliebenen drei Jahren des Betriebes der Kaverne wurde keine Hohlraumvermessung durchgeführt. Die aktuellste Vermessung stammt aus dem Jahr 2022.

Die erste Vermessung der Kaverne S129 aus dem Jahr 2001 (Anlage 8) zeigt eine weitgehend symmetrisch entwickelte Sumpfsolkaverne mit einem ebenen, flachen Dach. Der Kavernensumpf fällt deutlich in Richtung des Mittelpunktes der Kaverne ein. Eine derartige Kavernenform ist charakteristisch für Sumpfsolkavernen, wie sie in vergleichbaren Kavernenfeldern anzutreffen sind. Die geplante Blanketteufe lag bei 407,44 m, die zeigt das Dach aber in ca. 405 m. Der Feststoffanteil im Bereich der Ansolteufe liegt allgemein zwischen 1% – 5%, mit einem knapp 0,5 m mächtigem Band aus zusätzlichem Mergel und Anhydrit mit einem Feststoffanteil von 30% in ca. 406 m.

Die zweite Vermessung in 2004 (Anlage 9) zeigt weiterhin eine typische Kavernenentwicklung für die Solung im indirekten Solmodus, mit einer Dachteufe in ca. 402 m. Laut Planung war der Blanket zu diesem Zeitpunkt in einer Teufe von 396 m TVD vorgesehen.

Die letzte Hohlraumvermessung aus dem Jahr 2022 (Anlage 10) zeigt ein unregelmäßiges Kavernendach, das in der Tendenz leicht von den Aussenrändern der Kaverne in Richtung der Messachse hin ansteigt. Der höchste vermessene Punkt liegt in ca. 389 m TVD (Richtung 60°), die allgemeine Dachfläche liegt bei ca. 392 m TVD (lt. ursprünglicher Planung: 390,4 m TVD). In der Messachse beträgt der Abstand zum Top der Salzformation ca. 5-6 m (385,74 m TVD). Das Kavernendach schneidet somit die veranschlagte Salzhangendschwebe von 10 m unterhalb des Tops der Salzformation. Die Form der Kaverne ist weitgehend symmetrisch mit unregelmäßig verlaufenden Wänden. Auch der Sumpf der Kaverne zeigt eine generell unregelmäßige Form mit einer prominenten Erhebung in südwestlicher Richtung. Die in 2022 gemessene Kavernenform überschreitet den für die Kaverne vorgesehenen Dimensionspuffer geringfügig.

Die geförderte Salzmenge aus der Kaverne S129 überschreitet die veranschlagte Salzkapazität geringfügig um ca. 1.200 t. Gleichzeitig weist die Kaverne jedoch eine deutliche Formabweichung auf.

#### History Match Simulation

Mit der History Match Simulation kann unter Berücksichtigung der relevanten Daten die Formentwicklung der Kaverne bis einschließlich der Hohlraumvermessung von 2004 gut nachvollzogen werden (s. Anlage 8 und 9). Wie bei Kaverne S128 (Kapitel 2.3) weicht auch hier der simulierte vom durch Hohlraumvermessungen bestimmten Sumpfanstieg ab. Während der Sumpf laut den Vermessungsergebnissen nur um ca. 1 m angestiegen ist, weist die Simulation einen Anstieg von etwas über 3 m aus. Eine genaue Bestimmung der Ursachen für die Abweichung zwischen simuliertem und gemessenem Sumpfanstieg lässt die Frequenz der vorliegenden Hohlraumvermessungen nicht zu.

Der Vergleich der Hohlraumvermessung von 2022 mit dem History Match (Anlage 10, grüne Form) zeigt eine deutlich tiefere Position des simulierten Kavernendaches im Vergleich zur gemessenen Dachposition. Daher ist hier von einem Verbruch auszugehen, welcher sich zum Zeitpunkt der Hohlraumvermessung aber noch im Salz befindet. Im Feststoffprofil sind oberhalb von 398 m mehrere bis zu einem Meter mächtige Schichten mit hohen Anteilen an unlöslichem Material verzeichnet. Ein Vergleich mit der Dachform kann möglicherweise mit einer (Bruch-)Kante in 395 m TVD korreliert werden. In diesem Band liegt der Feststoffanteil bei 95%.

## 2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen

### 2.4 Zusammenfassung und Empfehlung

Im Zuge einer Zustandserhebung des Solfeldes Sulz wurde die DEEP.KBB GmbH Ende August 2022 von der Schweizer Salinen AG beauftragt, die Entwicklung ausgewählter Kavernen zu untersuchen und zu bewerten. Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung möglicher Ursachen (geologisch, technisch, betrieblich/organisatorisch) für Abweichungen des Ist-Zustandes der untersuchten Kavernen von dem geplanten Soll-Zustand.

Die Untersuchung der Kavernenentwicklung erfolgte mittels Vergleich der Hohlraumvermessungen und History Match Simulation der Formentwicklung auf Grundlage der verfügbaren Feld- und Kavernenspezifischen Daten, die von der Schweizer Salinen AG zur Verfügung gestellt wurden. Nach Sichtung der zur Verfügung gestellten Daten wurden in Abstimmung mit allen beteiligten Parteien die Kavernen S125, S128 und S129 ausgewählt.

Auf Basis der in Kapitel 2.1 – 2.3 beschriebenen Simulation und im Abgleich mit den vorliegenden Hohlraumvermessungen lässt sich die Kavernenentwicklung im unteren Teil des Salzlagers sehr gut nachbilden. Das in diesem Teufenbereich vorliegende, reine Salz mit geringem Anteil an unlöslichen Mineralen (typischerweise zwischen 1 % - 5%) ist sehr gut geeignet für die Solung und sorgt hier für eine gute Übereinstimmung der simulierten initiale Sumpfsolkavernen mit Vermessungsdaten. Daraus lässt sich ableiten, dass die Planung und der Bau von Kavernen in diesem Teufenbereich mittels Solsimulationen gut vorhergesagt und gesteuert werden kann. Ein sicherer Lösungsbergbau in diesen Teufen ist somit möglich.

Aufgrund der festgestellten Abweichungen der Kavernenentwicklungen von dem Soll-Zustand in Form von Asymmetrien der Kavernen und unregelmäßige Dachformen, ist festzustellen, dass die Vorhersagbarkeit der Formentwicklung mittels History Match für den oberen Teil des Salzlagers weniger gegeben ist. Auch Verbruch des Dachbereiche beeinträchtigt hier zusätzlich die Formentwicklung der Kavernen. Ein erhöhter Anteil an unlöslichem Material und vermutlich teilweise eine andere Beschaffenheit des Salzes sorgen hier für eine abweichende Formentwicklung der Kavernen im Vergleich mit Simulationsergebnissen.

Diese Beobachtung deckt sich zunächst nicht mit Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten. Dort ist eine Vorhersage der Kavernenentwicklung auch in sehr feststoffreichen Salzlagern durchaus möglich. Auch wenn die Formen von Kavernen in vergleichbaren Projekten mit Feststoffreichen Salzlagern häufig Unregelmäßigkeiten aufweisen, ist dort eine Stabilität der Form ohne Verbrüche durchaus gewährleistet. Um die Ursachen für die im Solfeld Sulz beobachteten Beeinträchtigungen der Formstabilität der Kavernen genauer zu ermitteln ist eine tiefgreifendere Betrachtung der Kavernen daher empfohlen.

Es ist davon auszugehen, dass auch der obere Bereich des Salinars sich sicher mittels Lösungsbergbau abbauen lässt, sofern dieser auf neuestem Stand der Technik durchgeführt wird. Hierzu werden folgende Punkte empfohlen:

- Die Durchführung von Lösungsversuchen an Kernproben zur Ermittlung der Lösungsgeschwindigkeiten und Feststoffgehalte
- Die Durchführung von gebirgsmechanischen Tri-Axial-Tests zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Salzstruktur, insbesondere des geplanten Kavernendachs
- Die Erstellung von Solkonzepten auf Basis von Solsimulationen unter Berücksichtigung der ermittelten Lösungsgeschwindigkeiten und des Feststoffprofils der Bohrung
- Der Betrieb der Kavernen gemäß Solkonzept im Hinblick auf Solraten, Rohrschuh-Teufen, Dauer des Solprozesses und insbesondere die Produktionskapazität
- Eine kontinuierliche Überwachung der Drücke am Kavernenkopf und eine sofortige Reaktion bei Abweichungen
- Eine regelmäßige Kontrolle und Einstellung der Blanketposition

## 2 Untersuchung der Kavernenentwicklungen

- Eine regelmäßig aktualisierte chemische Volumenbilanzierung auf Basis gemessener Solraten und Salzkonzentrationen
- Regelmäßig durchgeführte Hohlraumvermessungen nach im Solkonzept definierten Intervallen und zum Ende der Solphase
- Überprüfung und Anpassung der Solkonzepte nach Hohlraumvermessungen

Zusätzlich wird eine Überwachung des Solprozesses im oberen Bereich des Salinars mit erhöhter Aufmerksamkeit aufgrund der hier festgestellten Abweichungen empfohlen. Eine engmaschige Kontrolle der Formentwicklung durch eine erhöhte Frequenz von Hohlraumvermessungen, sowie die strikte Berücksichtigung von Sicherheitsabständen zum Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour zur Wahrung der Integrität und zur Prävention von Verbruch des Kavernendaches sind hier zu empfehlen. Wenn ausreichend Erfahrung mit der Solung im oberen Bereich des Salzlagers erlangt wurde, kann die Kontrolle der Formentwicklung ggf. angepasst werden.

Allgemein ist zu beachten, dass die gebirgsmechanischen Vorgaben für einzelne Kavernen wie z. B. der Kavernendurchmesser und die Mächtigkeit der Salzscheibe oberhalb des Kavernendaches unbedingt eingehalten werden müssen. Die gebirgsmechanischen Vorgaben sollten anhand der beobachteten Entwicklung der Kavernen überprüft und ggf. angepasst werden. Bei sorgfältiger Anwendung der o. g. Empfehlungen und einer Optimierung der Ansolphase lässt sich eine optimierte Kavernenform erreichen, die im Vergleich zu den betrachteten Kavernen sogar eine höhere Ausbeute im unteren Teil des Salzlagers ermöglicht, so dass der Lösungsbergbau insgesamt ressourcenschonender erfolgen kann.

Eine umfangreichere Datenlage in Form von Hohlraumvermessungen in kürzeren Intervallen, sowie nach Beendigung der Solphase und eine detailliertere Dokumentation der Produktionsdaten (geplanten Blanketpositionen und Rohrschuhteufen) würde die Aussagekraft der Bewertung deutlich erhöhen. Des Weiteren sind Untersuchungen bezüglich des Ist-Zustandes an weiteren Kavernen, insbesondere Kavernen mit weiteren Auffälligkeiten bzw. Abweichungen vom Soll-Zustand, zu empfehlen. Hier sollten vor allem Kavernen-Cluster mit mehreren verbundenen Kavernen und Kavernen aus anderen Feldern betrachtet werden, um die Ergebnisse und Empfehlungen zu bestätigen. Daher wird dieser Bericht auch als Zwischenbericht betrachtet.



### 3 Betrachtung der Zugangsbohrungen

## 3 Betrachtung der Zugangsbohrungen

Für eine Bewertung des Ist-Zustandes der Zugangsbohrungen liegen nur die Ergebnisse der aktuell durchgeführten Messungen (insbesondere Cased Hole Messungen bzw. Casing-Inspektionen) vor. Im Zuge dieser Messungen wurden die Bohrungen bzw. jeweils die eingebaute letzte zementierte Rohrtour (LZRT) eingehend untersucht und dabei teilweise erhebliche Abweichungen vom Soll-Zustand bzw. von einem integren Zustand festgestellt. Da aber keine Berichte über die Durchführung der Bohrung und der Zementation und auch keine Informationen über eine initiale Überprüfung nach Abteufen der Bohrung (Basismessung bzw. Nullmessung) sowie spätere Überprüfungsmessungen vorliegen, ist eine vergleichbare Vorgehensweise wie bei den Kavernen, d. h. der Versuch, die zeitliche Entwicklung nachzuvollziehen, nicht möglich.

Es kann daher nicht ermittelt werden, ob die festgestellten Abweichungen vom Soll-Zustand auf Ausführungsfehler bei der Erstellung oder auf Belastungen der Bohrungen während der Betriebsphase zurückzuführen sind. Aufgrund der festgestellten Abweichungen ist zu vermuten, dass es sich um eine Kombination aus beidem handelt.

Gerade auch die Abweichungen der Kavernen vom Soll-Zustand, wie größere Kavernendurchmesser, Freisolen des Rohrschuhs usw., führen zu mechanischen Belastungen der Zementation und der Rohrtouren, gerade in nicht zementierten Bereichen, die den jetzigen Zustand mit herbeigeführt haben dürften.

Hinzu kommt, dass Kavernen im Standby nach Betriebsende nicht unter Druck verschlossen sind und der Solespiegel in den Bohrungen teilweise nicht an der Tagesoberfläche ansteht. Ein tiefer liegender Solespiegel im Bereich der verrohrten Bohrung führt zu zusätzlichen Belastungen der letzten zementierten Rohrtour (kein hydrostatischer Innendruck bis zutage) und begünstigt gleichzeitig die Korrosion der Rohre.

Da sich, wie zuvor erläutert, auf Basis der vorliegenden Unterlagen die Ursachen für die Abweichungen vom Soll-Zustand nicht konkret ermitteln lassen, wird stattdessen nachfolgend dargestellt, wie eine Bohrung nach Stand der Technik abgeteuft, ausgerüstet und betrieben wird, um einen integren Zustand herzustellen und anschließend zu erhalten sowie den Zustand zu überwachen.

### 3.1 Grundlagen zur Bohrung

Die Bohrung stellt die Verbindung zwischen der Tagesoberfläche und der Salzlagerstätte bzw. später zur Kaverne her. Oberstes Ziel bei der Erstellung einer Bohrung ist es, die Integrität der Bohrung zu jedem Zeitpunkt während des Bohrprozesses, der Betriebsphase und der späteren Verfüllung nach der Betriebsphase zu gewährleisten. Eine Bohrung gilt als integer, wenn die in ihr enthaltenen (flüssigen oder gasförmigen) Medien in jedem möglichen vorgesehenen Betriebszustand, also bei jeder möglichen Kombination von Druck und Temperatur, sicher beherrscht werden können und eingeschlossen bleiben.

Bei Kavernenbohrungen zur Salzgewinnung wird die Integrität durch die sogenannte primäre Barriere gewährleistet. Die primäre Barriere wird durch alle Barriereelemente gebildet, die direkt mit der Sole oder dem Blanketmedium in Kontakt stehen. Die primäre Barriere besteht somit aus folgenden Barriereelementen:

1. geologische Formation bzw. Salzstruktur
2. letzte zementierte Rohrtour (LZRT)
3. Zementation der LZRT
4. Kavernenkopf

Während die geologische Formation bzw. Salzstruktur eine natürliche Barriere darstellt und der Kavernenkopf obertägig mit einfachen Mitteln auf dessen Integrität überprüfbar ist, ist beim initialen Einbringen und der Erstellung der weiteren primären Barriereelemente äußerste Sorgfalt geboten, da eine Wiederherstellung der Integrität zu einem späteren Zeitpunkt sehr aufwendig sein kann.

### 3 Betrachtung der Zugangsbohrungen

Die Auslegung der jeweiligen Barriereelemente erfolgt auf Basis der geologischen Randbedingungen und der zu erwartenden Belastungen bzw. Betriebsparameter mit folgenden Zielen:

- die Integrität des Bohrloches in der Bohr- und Betriebsphase zu gewährleisten,
- die Bohrung so auszulegen, dass sie nach der Betriebsphase wieder stillgelegt und integer verschlossen werden kann („Plug and Abandonment“),
- die einzelnen Bohrlochabschnitte gegeneinander zu isolieren (da z. B. unterschiedliche Spülungszusammensetzungen verwendet werden),
- die Umwelt vor Einflüssen durch die Bohrung zu schützen, d. h. zum Beispiel, die Bohrung gegen Grundwasserleiter zu isolieren, um eine Kontamination mit Spülung oder Sole auszuschließen, sowie
- die Bohrung und ihre Einbauten so zu dimensionieren, dass diese allen auftretenden mechanischen Belastungen bezüglich Innen- und Außendruck sowie Abstreiffestigkeit der Rohrverbinder standhalten.

#### 3.2 Grundlegender Ablauf der Bohrung / Herstellen der Integrität

Eine Bohrung wird „von unten nach oben“ geplant und dimensioniert. Dies bedeutet, dass zuerst der erforderliche Enddurchmesser im tiefsten Punkt (Endteufe) der Bohrung definiert wird. Daraus ergeben sich die notwendigen Bohrungsabschnitte, deren Durchmesser teleskopartig nach oben zur Tagesoberfläche hin zunehmen. Die Bohrung wird entsprechend ausgeführt, wobei der folgende Ablauf stets eingehalten wird:

1. Bohren der jeweiligen Sektion
2. Einbau einer zugehörigen Rohrtour
3. Zementation der Rohrtour durch Einpressen einer Zementschlämme in den Ringraum (Zwischenraum) zwischen Rohrtour und Bohrlochwand bzw. umgebender Rohrtour

In der Regel besitzt eine Kavernenbohrung mindestens folgende drei Rohrtouren:

- Standrohr mit folgendem Zweck
  - Abdichtung etwaiger oberflächennaher Wasserhorizonte und Spülungsverlustzonen
  - Schutz gegen Ausbruch des Bohrlochs beim Weiterbohren
- Ankerrohrtour mit folgendem Zweck
  - Lastaufnahme von weiteren Rohrtouren sowie vom Bohrlochkopf
  - Schutz gegen ungünstige Gebirgsverhältnisse (Spülungsverlust, Nachfall, quellendes bzw. drückendes Gebirge, Auskesselungen, Zufluss von Formationswässern)
  - Schutz gegen Ausbruch des Bohrlochs beim Weiterbohren
- Produktionsrohrtour oder letzte zementierte Rohrtour (LZRT) mit folgendem Zweck
  - Verbindung zwischen Salzformation und Bohrlochkopf
  - Die LZRT stellt im Verbund mit ihrer Zementation einen wesentlichen Teil der primären Barriere dar.

Die Anzahl der jeweiligen Sektionen und Rohrtouren richtet sich nach den lokalen geologischen Gegebenheiten. Dabei kann es notwendig sein, entsprechend zusätzliche Zwischenrohr Touren einzubauen.

### 3 Betrachtung der Zugangsbohrungen

Wie erwähnt stellt die LZRT im Verbund mit ihrer Zementation einen wesentlichen Teil der primären Barriere dar. Bei der Planung und Durchführung einer Bohrung sollten daher folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Bohrloch:
  - Gegebenenfalls Abzementieren von möglichen Zutritts- oder Verlustzonen, um anschließend eine gute Zementation der Rohrtour zu erreichen
  - Kaliber-Log zur Bestimmung von möglichen Auskesselungen und zur Bestimmung der benötigten Menge an Zementschlämme
- Rohrtour:
  - Auslegung der Rohrtouren gegen alle auftretenden Kollaps-, Burst-, axialen und triaxialen Belastungen während der Erstellung und des Betriebes der Bohrung
  - Auswahl von geeigneten Verbindern entsprechend den späteren Belastungen im Betrieb (z. B. entweder gasdichte oder hydraulisch dichte Verbinder, geschweißte Verbinder).
  - Berücksichtigung des Wanddickenabtrages durch Korrosion und Erosion über die Betriebszeit der Bohrung
  - Qualitätskontrolle der Rohre vor Einbau
  - Korrektes Handling und Verschrauben oder Verschweißen der Rohre beim Einbau
- Zementation
  - Auswahl geeigneter Zementschlämme entsprechend der geologischen Gegebenheiten. Dazu zählt unter anderem die Verwendung von Sole basierter Zementschlämme im Salzbereich
  - Auslegung der Zementschlammendichte entsprechend dem Poren- und Fracdruck der Formation, optional Verwendung von Lead und Tail Zement
  - Auslegung der Endfestigkeit je nach Druckniveau am Rohrschuh
  - Ausreichende Zentralisierung der Rohrtour (vor allem im Rohrschuhbereich), um möglichst gleichmäßige Zementation zu erreichen
  - Die Zementation sollte möglichst immer bis zu Tage erfolgen. Die Durchführung sollte möglichst mittels Stingerzementation durchgeführt werden, um a) die Zementation bis zu Tage sicherzustellen und b) einen Teil der Zementbrühe überpumpen zu können, bis die Mischphase aus Spülung, Spacer und Zement auszirkuliert ist.
  - Zwischen Spülung und Zementschlämme sollte ein Spacer als Trennung verwendet werden.

### 3.3 Überprüfung der initialen Integrität der Bohrung

Die Integrität der letzten zementierten Rohrtour und ihrer Zementation sollte initial nach Erstellung der Bohrung überprüft werden. Der integre (und normgerechte) Zustand der Rohre wird im Zuge üblicher Qualitätskontrollen (Qualitätskontrolle beim Hersteller, Eingangsprüfung beim Käufer usw.) sichergestellt. Darüber hinaus empfiehlt sich eine finale Qualitätskontrolle der Rohre vor dem Einbau.

### 3 Betrachtung der Zugangsbohrungen

Geeignete Mess- bzw. Überprüfungsmethoden zur Überprüfung der Rohrtour und der Zementation nach dem Einbau sind:

- Cased Hole Messungen wie Cement Bond Logs (CBL), Variable Density Logs (VDL), Ultraschall Logs (URS/USIT)
- Dichtheitstest(e) auf die Bohrung und den Rohrschuh entweder hydraulisch oder mit Gas (unter Berücksichtigung der späteren Betriebsdrücke und Betriebsmedien)

Die initialen Cased Hole Messungen dienen auch als Basismessung bzw. Nullmessung zum Vergleich mit später während der Betriebsphase durchgeführten Überprüfungsmessungen. Durch den Vergleich können Veränderungen erfasst und bei Bedarf Maßnahmen zum Erhalt der Integrität daraus abgeleitet werden.

Sollte die Integrität initial nicht nachgewiesen werden können, können Zusatz-/Reparaturmaßnahmen durchgeführt werden, um die Integrität herzustellen. Ist dieses technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht sinnvoll, ist die Bohrung nicht in Betrieb zu nehmen, sondern muss aufgegeben und verfüllt werden.

#### 3.4 Betrieb der Bohrung / Erhalt und Überwachung der Integrität

In der Betriebsphase muss die Integrität der Bohrung erhalten und kontinuierlich bzw. regelmäßig überwacht werden.

Dazu darf die Bohrung nur innerhalb ihrer Auslegungsgrenzen (z. B. Drücke, Temperaturen usw.) betrieben werden. Eine Überschreitung dieser Grenzen führt zu Belastungen, für die die Bohrung bzw. ihre Komponenten nicht ausgelegt sind und die daher die Integrität nachhaltig beeinflussen können. Mit Blick auf die in Kapitel 3.1 genannten Barriereelemente gilt dies insbesondere für das Freisolieren des Rohrschuhs und für unzulässige, d. h. über den in der Planung berücksichtigten Wanddickenabtrag hinausgehende Korrosion oder Erosion der letzten zementierten Rohrtour. Unzulässige Kavernenentwicklungen, die die gebirgsmechanischen Grenzen überschreiten, können erhöhte Bewegungen innerhalb des Gebirges bewirken und damit mechanische Spannungen in den zementierten Rohrtouren verursachen, die ebenfalls über die geplanten Belastungsgrenzen hinausgehen.

Zur Überwachung während der Betriebsphase gehört vor allem:

- kontinuierliche Drucküberwachung, optimaler Weise auch in den zementierten Ringräumen
- regelmäßige Überwachung der Kavernenentwicklung (vgl. auch Kapitel 2.4),
- regelmäßige Cased Hole Messungen, um Veränderungen der letzten zementierten Rohrtour und/oder der Zementgüte festzustellen
- Dichtheitstest(e) auf die letzte zementierte Rohrtour und den Rohrschuh

Die kontinuierliche Drucküberwachung sollte auch vorausschauend zur Erkennung von Trends genutzt werden.

Die Intervalle für die Wiederholung von Cased Hole Messungen und von Dichtheitstesten werden in der Regel vom Betreiber unter Berücksichtigung von Betriebserfahrungen (z. B. zeitlicher Korrosionsfortschritt) festgelegt, da der einzuhaltende maximale Zeitabstand häufig von lokationsspezifischen Faktoren abhängt und nicht verallgemeinert werden kann. Diese Intervalle können durchaus mehrere Jahre betragen, was dazu führen kann, dass keine Wiederholung erforderlich ist, wenn die Betriebsdauer nur wenige Jahre beträgt.

### 3 Betrachtung der Zugangsbohrungen

Kommt es während der Betriebsphase zu einer Überschreitung der Auslegungsgrenzen oder werden Auffälligkeiten festgestellt wie z. B. ungewöhnliche Druckentwicklungen, ist der Betrieb zu unterbrechen, bis die Ursachen ermittelt wurden und die Integrität der Zugangsbohrung bestätigt werden kann.

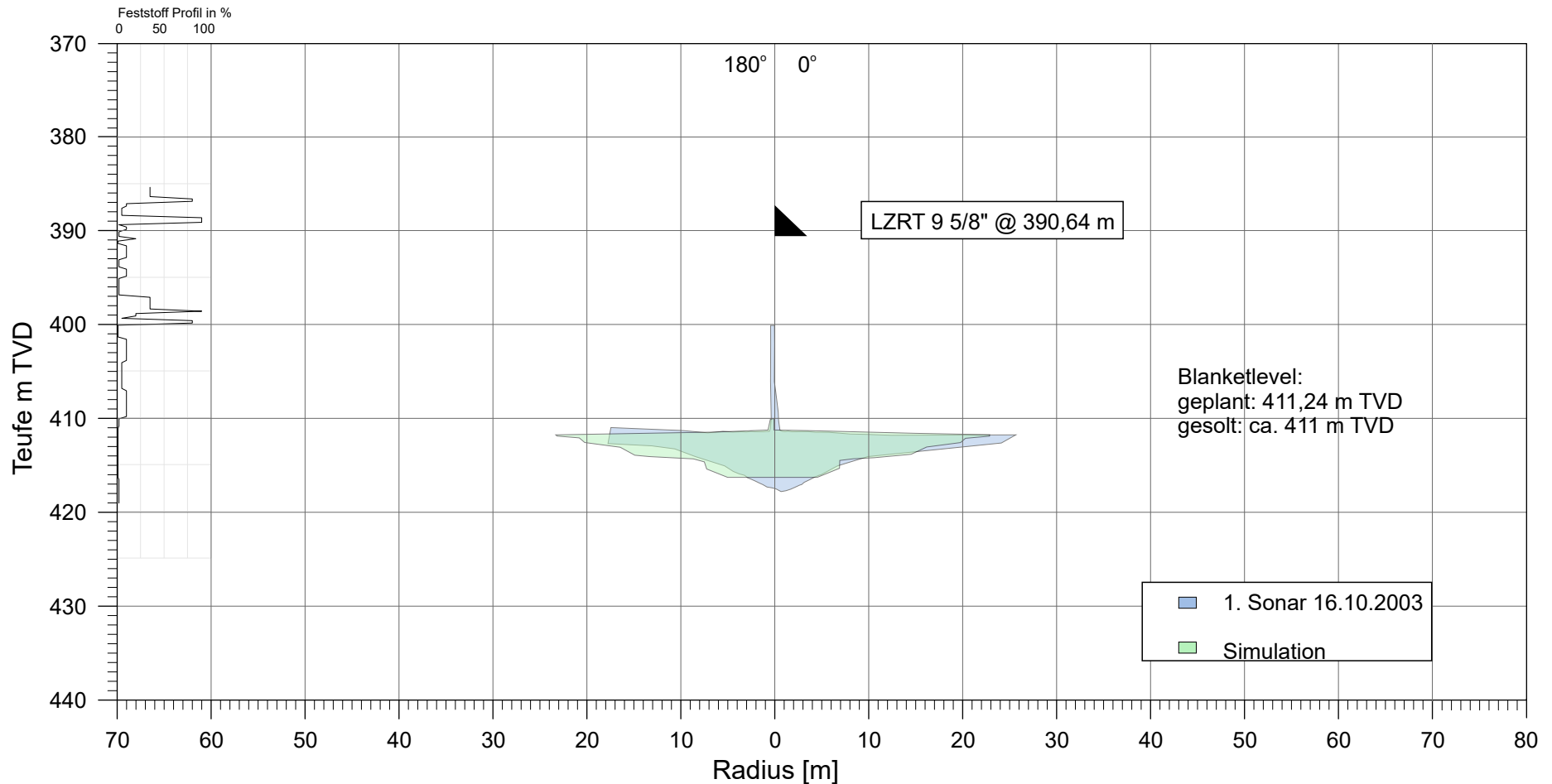
Nach der Betriebsphase ist die Bohrung bis zu Tage mit Sole gefüllt und möglichst unter Druck zu verschließen sowie weiterhin so lange zu überwachen, bis die Bohrung verfüllt wird.

#### 3.5 Zusammenfassung und Empfehlung

Auf Basis des jetzigen Kenntnisstandes und unter Berücksichtigung der vorliegenden geologischen Profile sind keine Ursachen erkennbar, die das Herstellen einer initial integren Bohrung und das Aufrechterhalten der Integrität während des Betriebes und in der Nachbetriebsphase grundsätzlich in Frage stellen.

Diese Aussage gilt unter der Bedingung, dass die Bohrung nach dem in den vorherigen Kapiteln erläuterten Stand der Technik hergestellt, betrieben und überwacht wird.

Anlage 1: History Match der S125 zur Sonarvermessung 2003

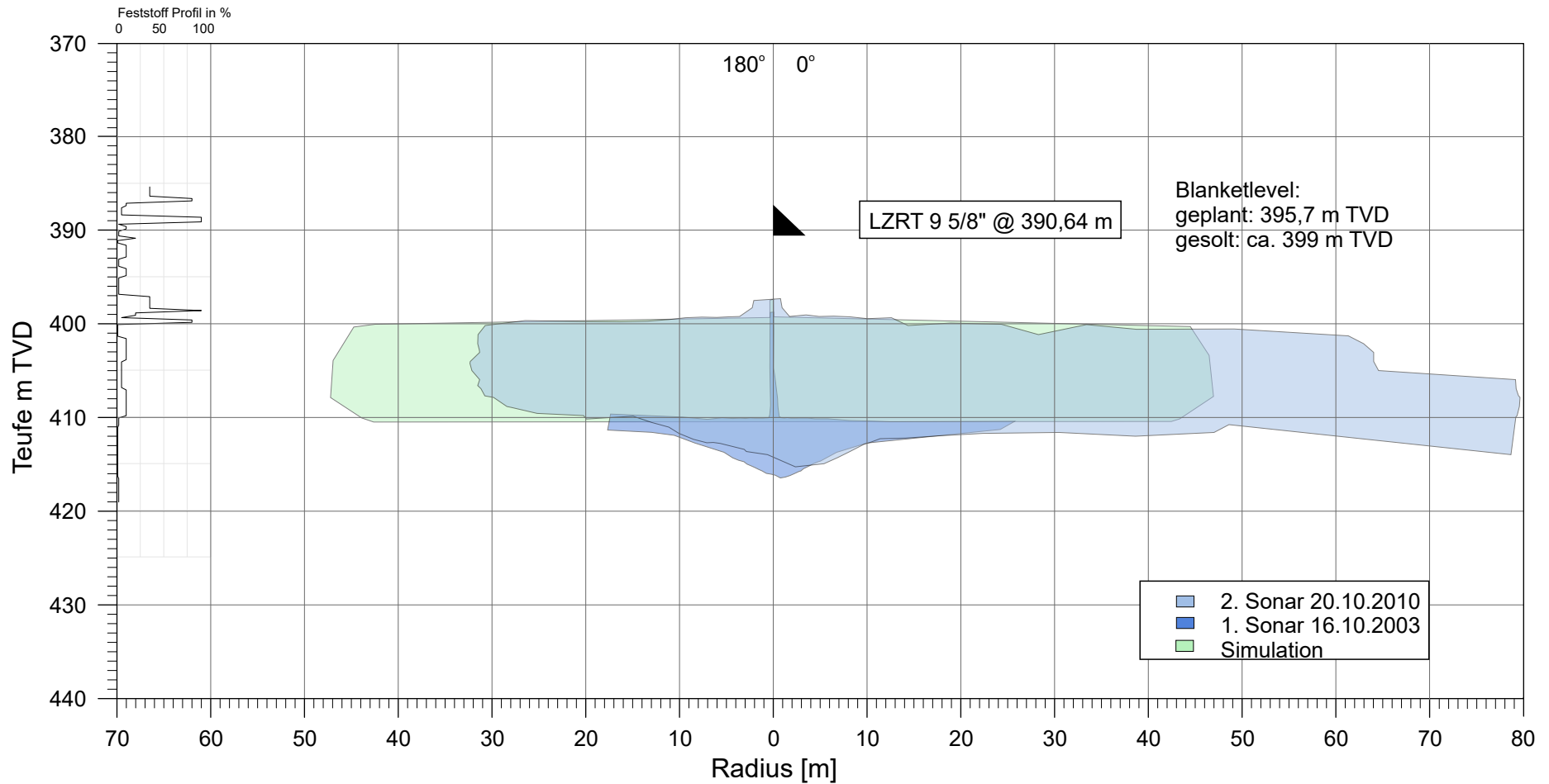


Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP

# Untersuchungen zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz



## Anlage 2: History Match der S125 zur Sonarvermessung 2010

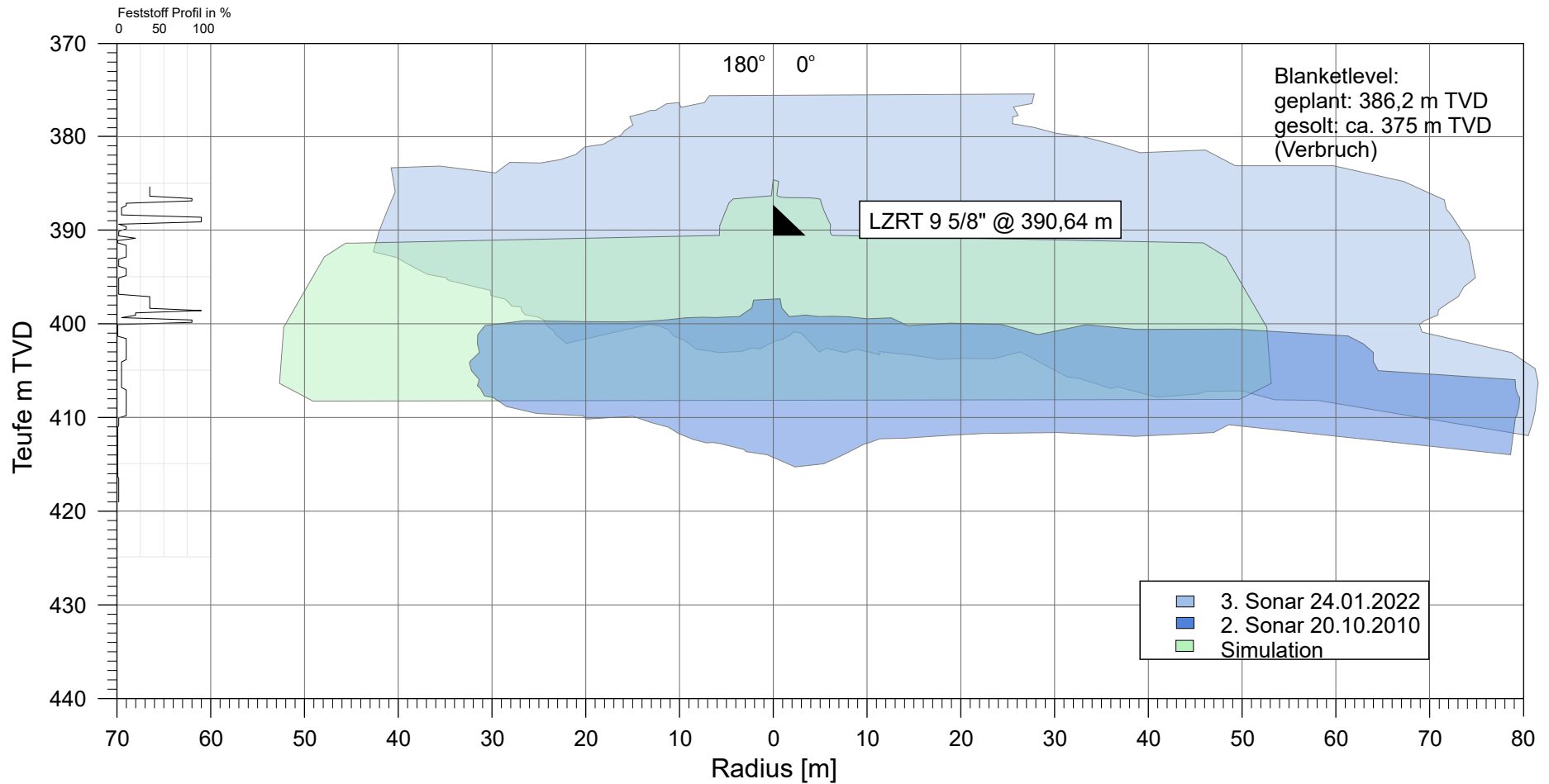


Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP

# Untersuchungen zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz



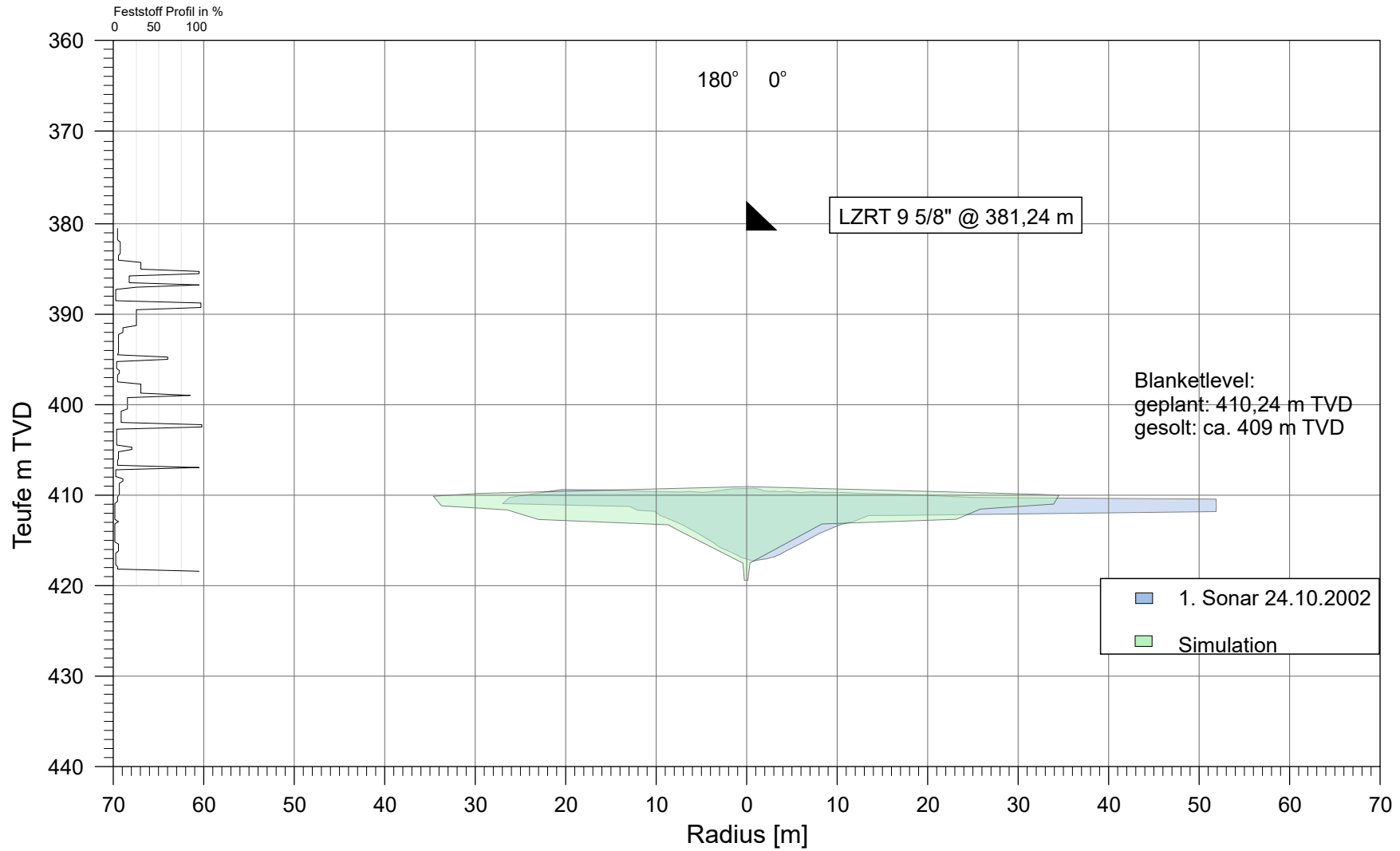
## Anlage 3: History Match der S125 zur Sonarvermessung 2022



Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP

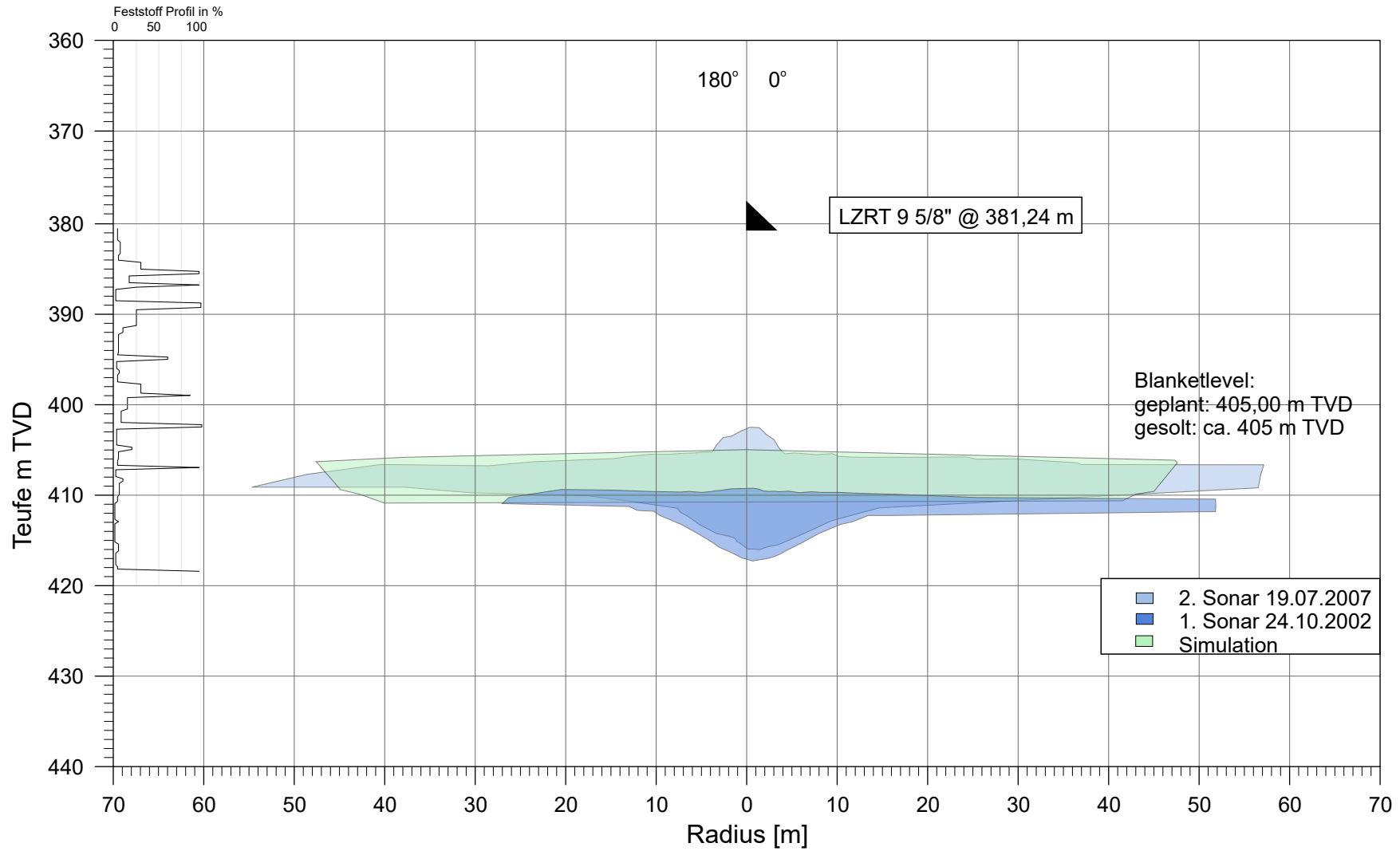


Anlage 4: History Match der S128 zur Sonarvermessung 2002



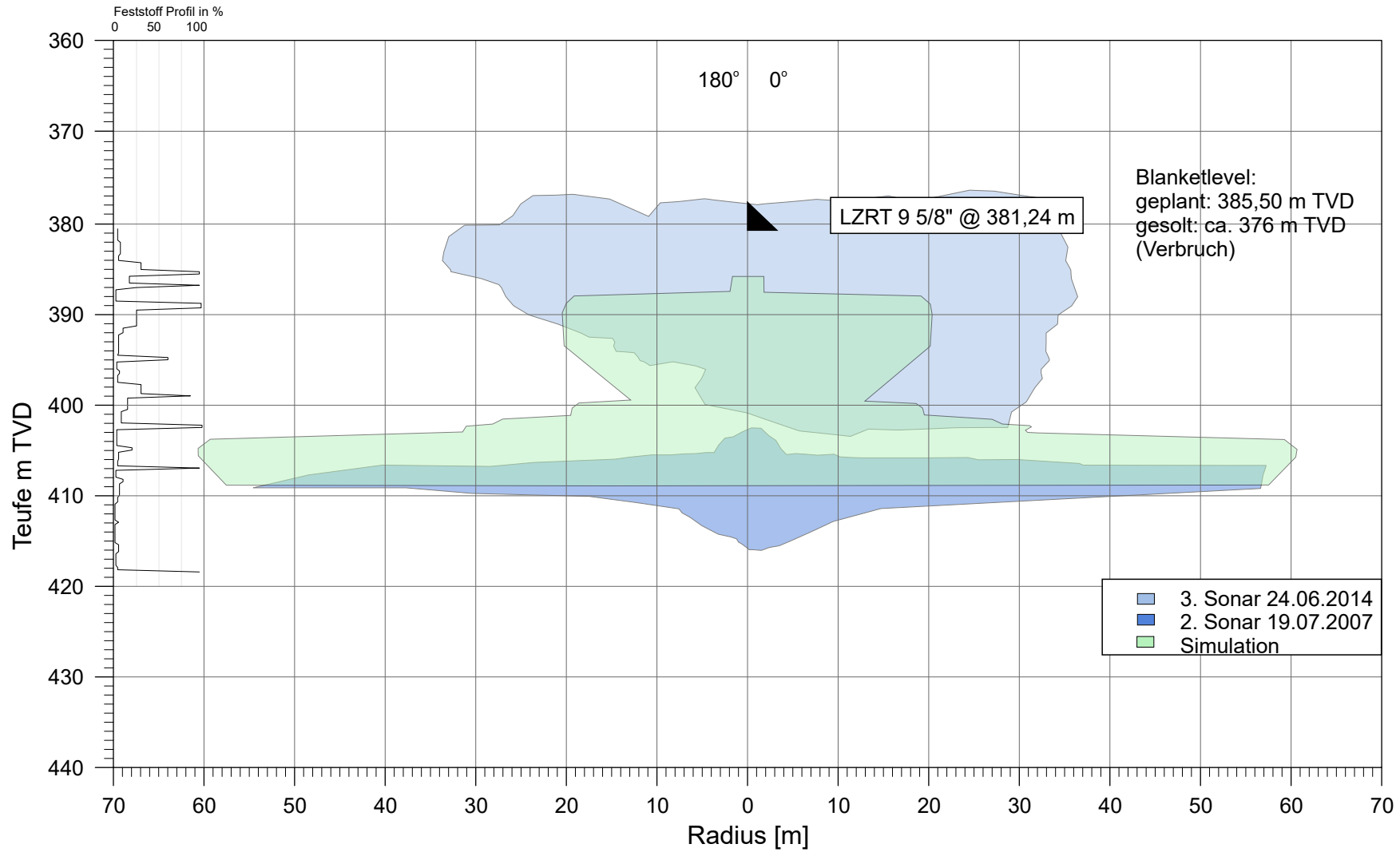
Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP

Anlage 5: History Match der S128 zur Sonarvermessung 2007



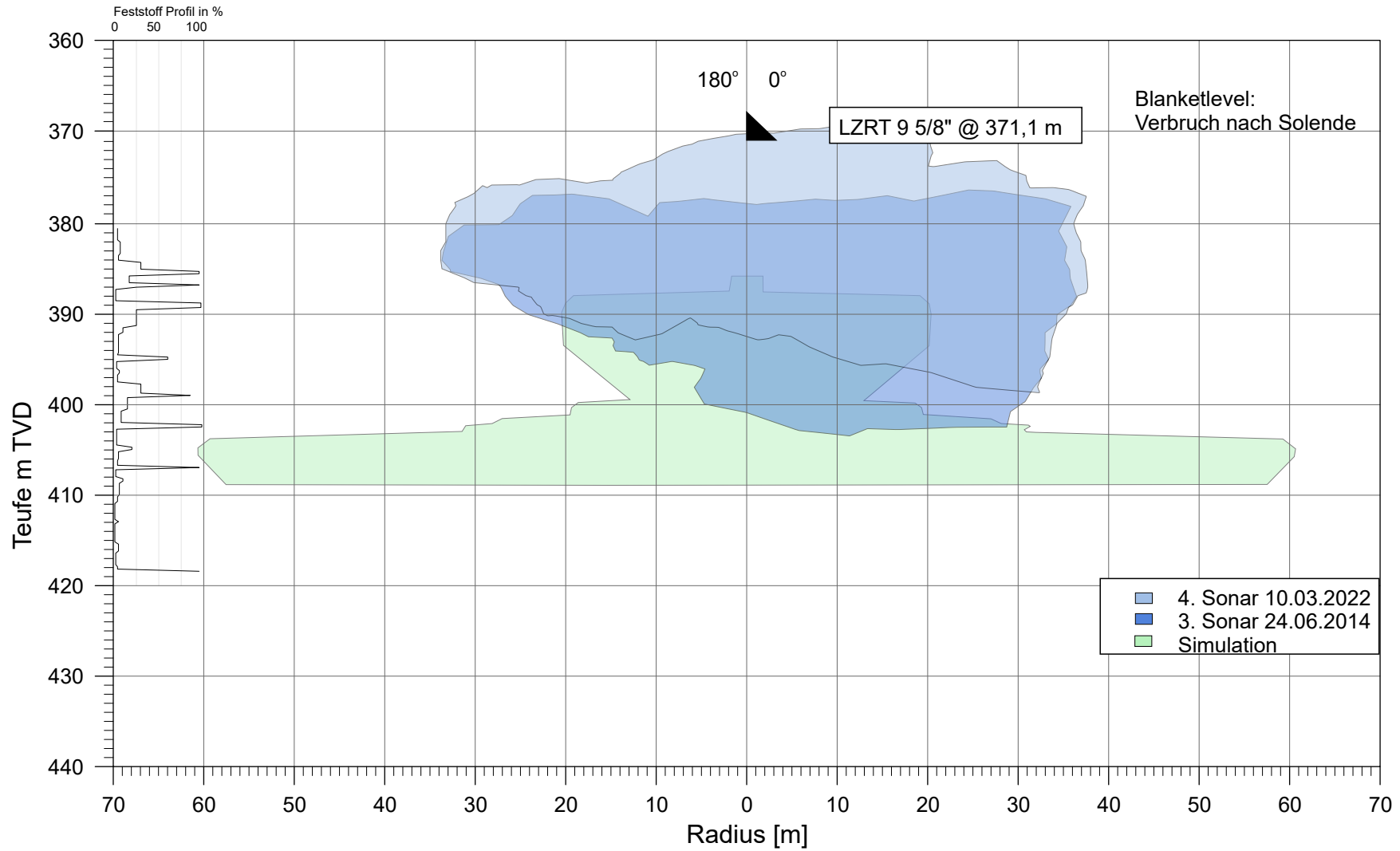
Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP

Anlage 6: History Match der S128 zur Sonarvermessung 2014



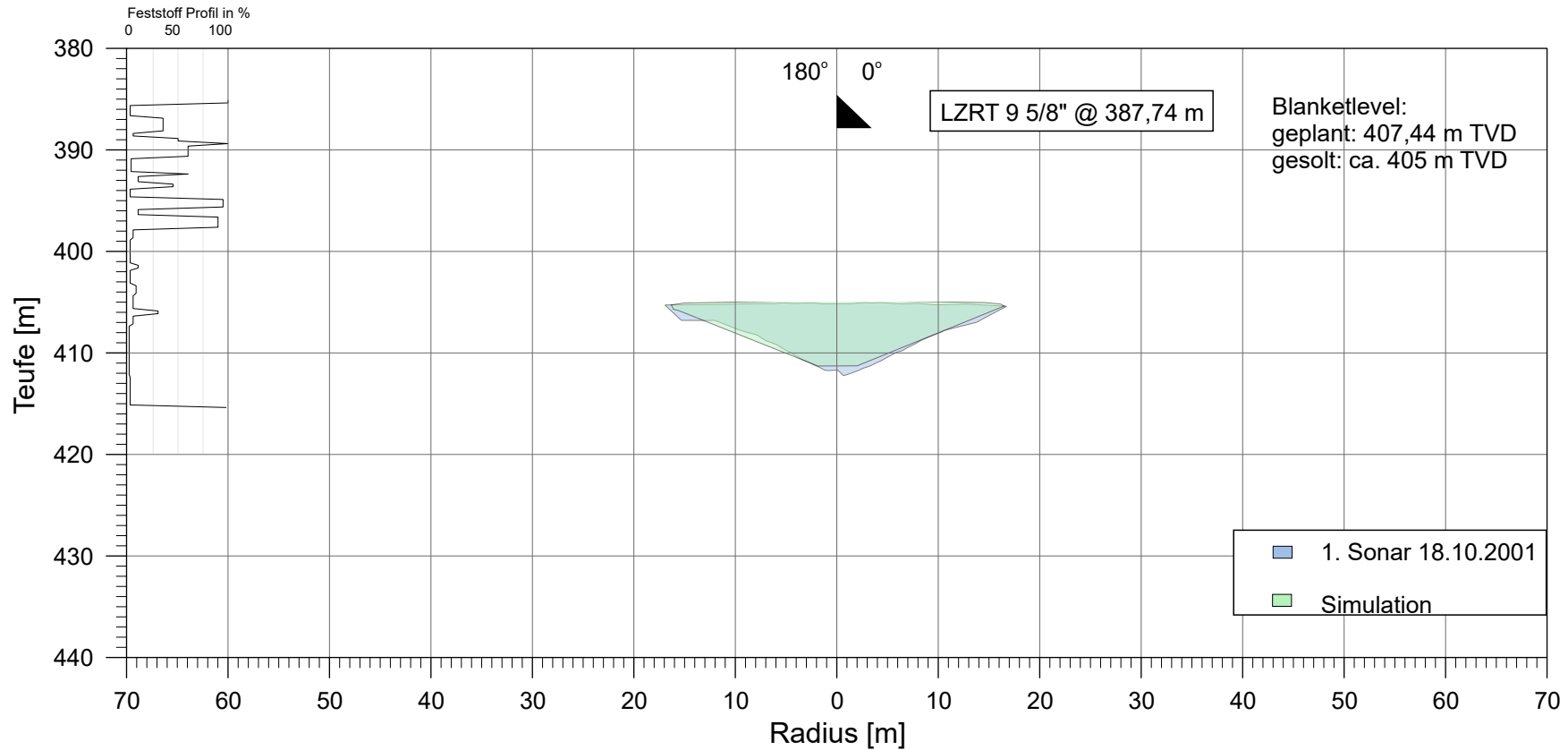
Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP

Anlage 7: History Match der S128 zur Sonarvermessung 2022



Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP

Anlage 8: History Match der S129 zur Sonarvermessung 2001

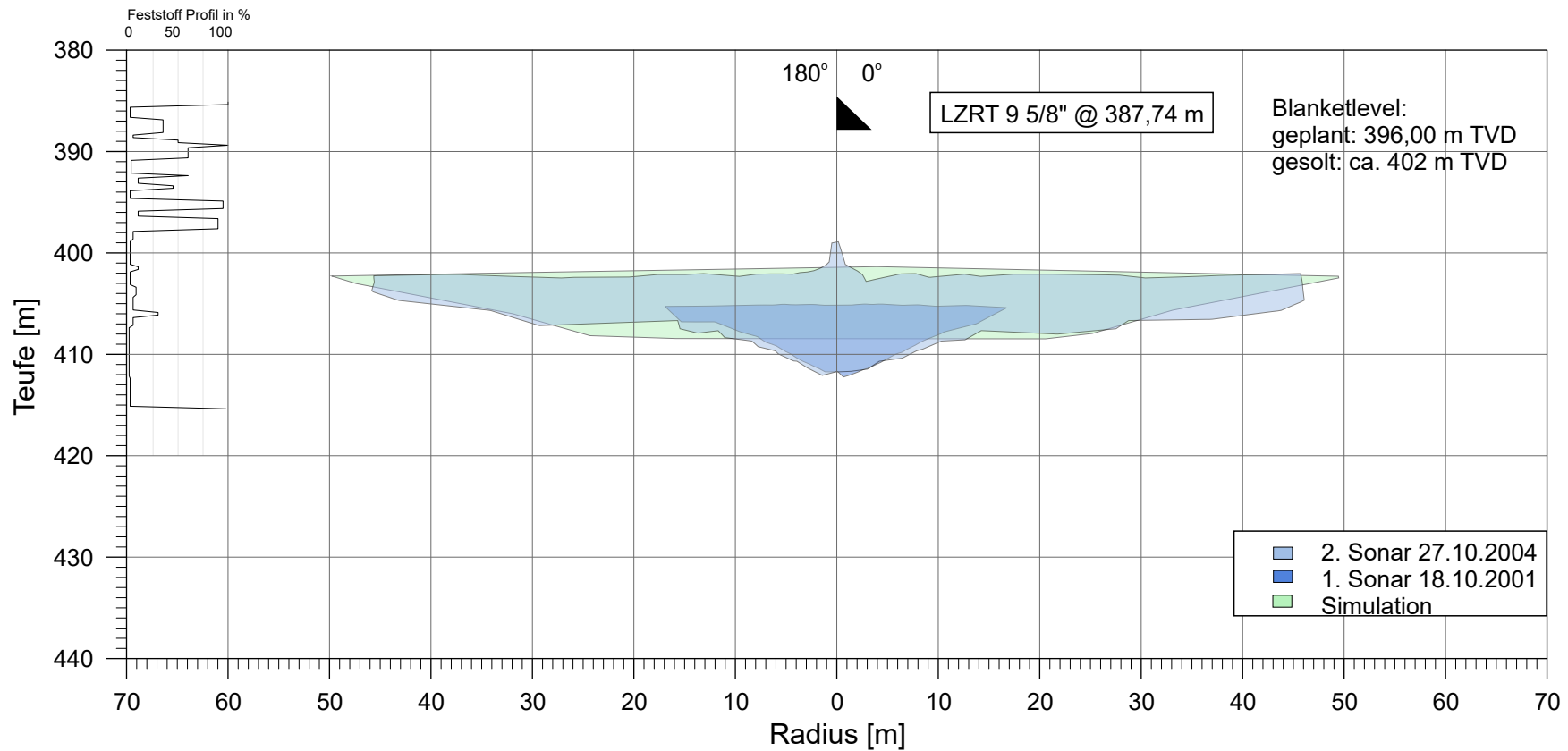


Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP

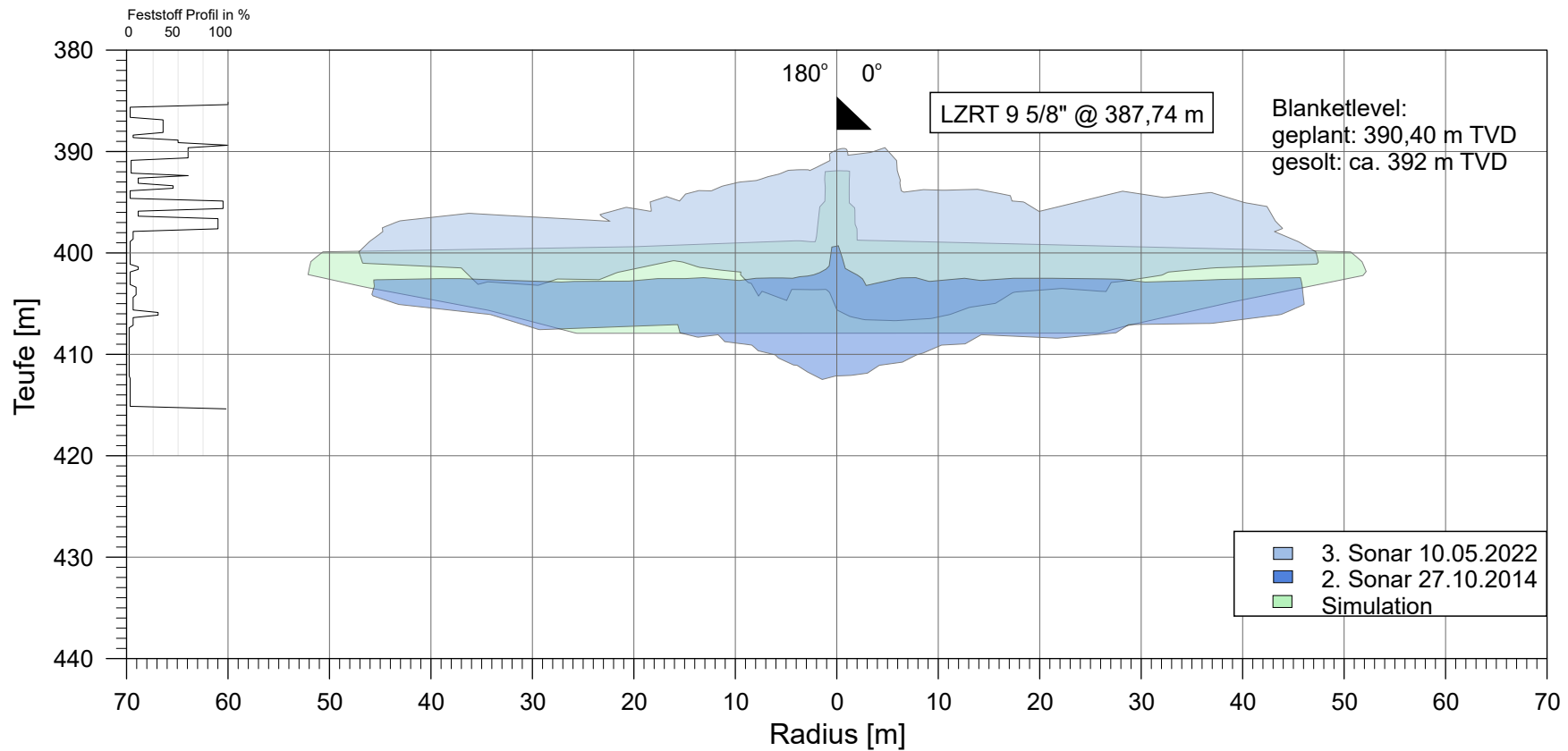
# Untersuchungen zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz



## Anlage 9: History Match der S129 zur Sonarvermessung 2004



Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP



Projektnr.:	PN4613-882373	Datum:	10.10.2022
Dateiname:	220930 Anlagen Bericht rev00.cdr	Erstellt von:	GR/MP