

---

**Bericht Nr. 2720047.16**

---

**Schweizer Salinen AG, Pratteln 1**

**Muttenz, Solfeldintegrität  
Sulz und Grosszinggibrunn**

**Technischer Bericht Phase 1 – Zustandserhebung durch  
GEOTEST mit Beiträgen von AFRY und DEEP.KBB**

Münchenstein, 9. Dezember 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

<b>Autor(en)</b>	<b>Bearbeitete Themen</b>
GEOTEST Florentin Ladner, Felix Bussmann	Ganzer Bericht und Schlussredaktion
GEOTEST Tobias Brehm, Iman Didari, Moira Arnet	Beilagen 1 bis 4
AFRY Ferne Morales	Aktennotiz – Gebirgsmechanische Modellierungen vom 13.10.22
DEEP.KBB Dr. Markus Perk, Dr. Gelareh Rahimi, Johannes Brüning	Untersuchungen zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz – Zwischenbericht vom 14.10.22
<b>Supervision</b>	<b>Visierte Inhalte</b>
GEOTEST Dr. Peter Spillmann	Vorabzug vom 20.10.22
GEOTEST Felix Bussmann	Version 1 vom 18.11.22
AFRY Peter Kirchhofer	Aktennotiz – Gebirgsmechanische Modellierungen vom 16.01.2023
DEPP.KBB Reinhard Steenken, Raphael Schäfer	Untersuchungen zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz – Zwischenbericht vom 14.10.22
<b>Hinweise</b>	
<p>Vorabzug vom 20.10.22: Intern geprüfter Vorabzug zum Review durch die Schweizer Salinen AG            Version 1 vom 18.11.22: Technischer Bericht mit Beiträgen von AFRY und DEEP.KBB            Version 2 vom 09.12.22: Überarbeitung Störfallbeurteilung            Versionen 3 und 4 vom 09.12.22: Sprachliche Anpassungen</p>	

GEOTEST AG

Felix Bussmann

Florentin Ladner

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	6
1. Einleitung.....	8
2. Qualitätssicherung .....	10
3. Ausgangslage .....	11
3.1 Projektperimeter.....	11
3.2 Produktionsgeschichte Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn .....	12
3.2.1 Solfeld Sulz .....	12
3.2.2 Solfeld Grosszinggibrunn .....	13
3.3 Zustand der Solfelder Sulz im Vorfeld der Messkampagne 2021/2022 .....	14
4. Geologisch-hydrogeologischer Rahmen.....	16
4.1 Geologisch-tektonische Verhältnisse.....	16
4.1.1 Regionalgeologische Übersicht .....	16
4.1.2 Lokale geologische Verhältnisse .....	17
4.1.2.1 Lokalgeologischer Datensatz.....	17
4.1.2.2 Lithostratigraphie.....	17
4.1.2.3 Strukturgeologie .....	21
4.2 Hydrogeologische Verhältnisse .....	24
5. Messkampagne Sulz und Grosszinggibrunn .....	28
5.1 Organisation.....	28
5.2 Arbeitsprogramm und Sicherheitsvorkehrungen .....	28
5.3 Aufwältigungsarbeiten / Work over .....	29
5.4 Messprogramm .....	29
5.4.1 Bohrlochgeophysikalische Messungen (Logging) .....	29
5.4.2 Hohlraumvermessung.....	32
5.5 Überwachung Oberflächendeformationen .....	33
5.5.1 Senkungsmessungen .....	33
5.5.2 Lagemessungen.....	33
5.5.3 Photogrammetrische Vermessung.....	33
6. Untersuchungsergebnisse .....	34
6.1 Übersicht Bohrloch- und Kavernenmessungen .....	34
6.2 Messergebnisse .....	35
6.3 Daten-Prozessierung .....	35
7. Vergleich Ist-Zustand und Soll-Zustand.....	37
7.1 Zugangsbohrungen .....	37
7.1.1 Soll-Zustand .....	37
7.1.2 Ist-Soll-Analyse .....	39

7.1.2.1	Bohrlochkopfdruck und Zusammensetzung des Bohrlochfluids .....	39
7.1.2.2	Integrität der Verrohrung .....	41
7.1.2.3	Güte der Zementanbindung .....	43
7.1.3	Beurteilung Zugangsbohrungen.....	46
7.2	Kavernen .....	47
7.2.1	Soll-Zustand .....	47
7.2.2	Ist-Soll-Analyse .....	48
7.2.2.1	Kavernendurchmesser und Pfeilerbreite .....	48
7.2.2.2	Hangendschwebe .....	49
7.2.2.3	Teilverbrüche von Kavernen .....	50
7.2.2.4	Kavernengeometrie.....	53
7.2.3	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz durch DEEP.KBB.....	54
7.2.4	Beurteilung Kavernen .....	56
7.3	Oberflächendeformationen .....	56
7.3.1	Soll-Zustand.....	56
7.3.2	Ist-Soll-Analyse .....	57
7.3.3	Beurteilung Oberflächendeformationen .....	60
8.	Ursachenanalyse .....	61
9.	Schlussfolgerungen.....	62
9.1	Beurteilung bezüglich Störfall .....	62
9.2	Handlungsoptionen und Massnahmen .....	64
10.	Quellenverzeichnis.....	66

## Beilagenverzeichnis

Beilage 1:	Composite Logs für alle vermessenen Zugangsbohrungen
Beilage 2:	Factsheets für alle vermessenen Kavernen
Beilage 3:	Maximale Kavernenausdehnung
Beilage 4:	Kavernenvermessung mit Salzscheibe
Beilage 5:	Aktennotiz Gebirgsmechanische Modellierungen von AFRY vom 13.10.2022
Beilage 6:	Untersuchungen zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz – Zwischenbericht der DEEP.KBB vom 14.10.22

## Abkürzungsverzeichnis

AG	Kanton Aargau
API	American Petroleum Institute
BHTV	<i>Borehole Televiwer</i> → Bohrlochsonde, welche die Bohrlochwand akustisch abtastet und aufnimmt.
BL	Kanton Basel-Landschaft
CBL	<i>Cement Bond Log</i> → Mittels Cement Bond Logs wird die korrekte Zementation von Tiefbohrungen überprüft.
Fm.	Lithostratigraphische Formation
FWS	<i>Full Waveform Sonic Log</i> → Bohrlochsonde, welche akustische Geschwindigkeitsmessungen aus dem Bohrloch ausführt. Liefert physikalische Eigenschaften der Gesteinsformationen und kann als Cement Bond Log (CBL) ausgewertet werden.
GR	<i>Gamma Ray Log</i> → Messung der natürlichen Gamma-Strahlung im Bohrloch. Dient insbesondere der Bestimmung des Tongehalts der Gesteine.
GZB	Grosszinggibrunn → Flurname in der Gemeinde Muttenz
KW	Kraftwerk
LZRT	Letzte zementierte Rohrtour einer Bohrung.
OPTV	<i>Optical Borehole Televiwer</i> → Bohrlochsonde, welche die Bohrlochwand optisch aufnimmt.
OSZ	«Obere Sulfatzone» der Zeglingen-Fm.
SSAG	Schweizer Salinen AG

## **Zusammenfassung**

### **Ausgangslage und Zielsetzung**

Im Zusammenhang mit der Konzessionsverlängerung im Kanton BL hat die Schweizer Salinen AG ein generelles Nachsorge- und Überwachungskonzept für Salzkavernen am Ende ihrer Betriebszeit ausgearbeitet. Das Solfeld Sulz und Teile des Solfeldes Grosszinggibrunn sind ausser Betrieb und befinden sich aktuell in der Nachsorgephase. Im Rahmen der Nachsorgephase ist der Nachweis zu erbringen, dass die Zugangsbohrungen und die Kavernen sicher und ohne negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt stillgelegt und verwahrt werden können, damit die Nachsorgepflicht für Schweizer Salinen AG erlischt und die unterirdischen Gewerke zurück an den Kanton BL gehen können. Der erste Schritt stellt die Erhebung des Ist-Zustandes und die Analyse der Abweichungen zum Soll-Zustand in den Solfeldern dar. Auf Basis dieser Ist-Soll-Analyse wird beurteilt, ob eine ordentliche Nachsorge eingeleitet werden kann oder ob die Nachsorge hinsichtlich Störfällen angepasst werden muss.

### **Methoden**

Die Ist-Zustandserhebung der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn erfolgte im Rahmen einer umfangreichen Messkampagne (Oktober 2021 bis Juni 2022), welche die Aufwältigung und bohrlochgeophysikalische Vermessung der Zugangsbohrungen und die Hohlraumvermessung der Kavernen umfasste. Auf der Basis der erhobenen Messdaten wurde die Ist-Soll-Analyse für Zugangsbohrungen und Kavernen ausgeführt. Zusätzlich wurde mit Unterstützung von weiteren Fachspezialisten erste gebirgsmechanische Modellrechnungen zur Stabilität der Kaverne S126 und detailliertere Untersuchungen zum Ist-Zustand von Kavernen im Solfeld Sulz vorgenommen. Als flankierende Massnahmen wurde die Überwachung der Oberflächendeformationen weitergeführt.

### **Ergebnisse und Beurteilung**

Im Solfeld Sulz sind Abweichungen zum Soll-Zustand in allen vermessenen Zugangsbohrungen und/oder in den Kavernen feststellbar. Diese Abweichungen sind aktuell mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt verbunden (lokale Chlorid-Belastung im Muschelkalk-Aquifer, anhaltende Oberflächendeformationen), so dass das Solfeld Sulz insgesamt als Störfall beurteilt wird. Hinsichtlich der teilverbrochenen Kaverne S126 weisen die ersten Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellierung darauf hin, dass der Teilverbruch vorläufig zu einem Stillstand gekommen ist.

Im Solfeld Grosszinggibrunn, das teilweise noch aktiv gesolt wird, liegen aktuell nur Daten für die Kavernen vor. Bei den Kavernen bestehen vereinzelte Abweichungen zum Soll-Zustand. Bei den Kavernen S141, S142 und S147 sind die Abweichungen mit negativen Auswirkungen auf den Muschelkalk-Aquifer verbunden und werden deshalb als Störfälle beurteilt. Die anderen Kavernen im Solfeld Grosszinggibrunn können gestützt auf dem aktuellen Kenntnisstand und der vorläufigen Datelage nicht abschliessend beurteilt werden.

### **Ursachen**

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen lassen sich die festgestellten Abweichungen, immer gemessen an einem heutigen Stand der Technik, primär auf technische Fehleinschätzungen bei der Planung und Ausführung, auf Versäumnisse bei der Überwachung und bei der Stilllegung der Zugangsbohrungen und Kavernen zurückführen. Die lokalen geologischen Gegebenheiten haben aus Sicht der Fachspezialisten ebenfalls einen Einfluss auf den Ist-Zustand. Dieser Einfluss ist gemäss den Fachspezialisten technisch beherrschbar, sofern der Lösungsbergbau auf neuem Stand der Technik durchgeführt wird.

### **Handlungsoptionen**

Auf der Basis der durchgeführten Ist-Zustandserhebung der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn sollten in einem nächsten Schritt gezielte Massnahmen zur Minimierung der Abweichungen resp. zur Behebung der Störfälle geprüft und festgelegt werden. Für das weitere Vorgehen werden Sofort-Massnahmen vorgeschlagen, die schnell und temporär zu einer Stabilisierung der Situation führen. Diese Sofort-Massnahmen sollen durch zwischenzeitlich geprüfte und festgelegte Massnahmen abgelöst werden, die langfristig eine ordentlichen Nachsorge der Zugangsbohrungen und Kavernen zulassen. Als Begleitmassnahmen sind die Überwachung des Grundwassers, der Oberflächendeformationen und der Kavernen-Teilverbrüche fortzusetzen.

## 1. Einleitung

Die Schweizer Salinen AG (SSAG) baut südlich von Muttenz und Pratteln (Kanton Basel-Landschaft BL) im Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn triassisches Salz aus der Zeglingen-Formation im Lösungsbergbauverfahren ab. Der bestehende Konzessionsvertrag mit dem Kanton BL läuft Ende 2025 aus. Damit die Salzproduktion im Kanton BL über 2025 hinaus gesichert werden kann, strebt die SSAG eine Konzessionsverlängerung bis 2075 an.

Ein wichtiger Bestandteil der Konzessionsverlängerung stellen die Überwachungs- und Nachsorgepflichten der SSAG für Salzkavernen am Ende ihrer Betriebszeit dar. In diesem Zusammenhang wurde im Mai 2021 dem Kanton BL ein generelles Überwachungs- und Nachsorgekonzept vorgelegt [1] (siehe Quellenverzeichnis Kap. 10), welches Voraussetzungen, Konzepte und Massnahmen für die Verwahrung bzw. für die Nachsorge von Salzkavernen am Ende ihres Lebenszyklus gemäss heutigem Stand der Technik aufzeigt. Im Rahmen dieses generellen Überwachungs- und Nachsorgekonzeptes wurden für den Lebenszyklus von Salzkavernen folgende Phasen eingeführt (Abbildung 1):

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	

Abbildung 1: Phasen im Lebenszyklus einer Salzkaverne (Vorschlag aus [1]).

Das Phasendiagramm in Abbildung 1 zeigt, dass mit Betriebsende der Solbetrieb eingestellt wird und die Nachsorgephase startet. Die Nachsorge startet mit einer Wartephase (Standby) und dient der Feststellung des Zustandes der Zugangsbohrungen und der dazugehörigen Kavernen (dieser Bericht):

- a) Wenn die Zustandserhebung keine Abweichungen zum Soll-Zustand aufweist, dann liegt ein ordentlicher Verlauf der Nachsorge vor. Die Zugangsbohrungen und die Kavernen können nach Einhalten einer Frist dauerhaft verschlossen werden.
- b) Wenn bei der Zustandserhebung Abweichungen zum Soll-Zustand auftreten, die mit negativen Auswirkungen (Schädigung der Bevölkerung oder

der Umwelt) verbunden sind, liegt ein Störfall<sup>1</sup> vor, der zu beheben ist. Erst nach der Behebung des Störfalles können Zugangsbohrungen und Kavernen in eine ordentliche Nachsorge überführt werden und nach Einhalten der Fristen dauerhaft verschlossen werden.

Aktuell befinden sich das gesamte Solfeld Sulz und Teile des Solfeldes Grosszinggibrunn in der Wartephase. Vor diesem Hintergrund hat sich die SSAG dazu entschlossen eine umfangreiche Zustandserhebung bei diesen Solfeldern durchzuführen. Diese Zustandserhebung bildet die erste von drei Phasen mit dem Ziel die Zugangsbohrungen und Kavernen in eine ordentliche Nachsorge überzuführen:

- Phase 1: Zustandserhebung und Analyse der Abweichungen zum Soll-Zustand.
- Phase 2: Festlegen von Massnahmen mit dem Zweck die Zugangsbohrungen und Kavernen dauerhaft verschliessen zu können.
- Phase 3: Umsetzung der in Phase 2 festgelegten Massnahmen.

Der vorliegende Bericht fasst einleitend die Produktionsgeschichte der beiden Solfelder zusammen und zeigt den geologisch-hydrogeologischen Rahmen auf. In den nachfolgenden Kapiteln werden die in den Jahren 2021 und 2022 ausgeführte Messkampagne zur Zustandserhebung beschrieben sowie die Resultate der Phase 1 zusammengestellt. Am Schluss ordnet der Bericht die Solfelder in Bezug auf folgende Fragestellungen ein:

- Erlaubt der Zustand der Solfelder das Einleiten einer ordentlichen Nachsorge oder liegt ein Störfall vor.
- In welcher Art und Weise manifestieren sich die Störfälle und was sind die Ursachen dafür?
- Wenn Störfälle vorliegen, welche Handlungsoptionen resp. Massnahmen sind anzuwenden?

---

<sup>1</sup> Der Begriff Störfall wird nicht im Sinne der Störfallverordnung (StFV 814.012) verwendet.

## **2. Qualitätssicherung**

Die Gesamtkoordination des vorliegenden technischen Berichts erfolgte durch Mitarbeitende des GEOTEST-Standorts Münchenstein BL.

Die fachlichen Beiträge wurden einerseits durch Fachspezialisten der GEOTEST und andererseits durch weitere Spezialisten der Firmen DEEP.KBB (Bad Zwischenahn DE) sowie AFRY (Zürich) verfasst.

Das Dokument hat einen GEOTEST-internen Prozess zur Qualitätssicherung durchlaufen und wurde im Anschluss von Fachspezialisten der SSAG einem Review unterzogen. In der vorliegenden Fassung sind die Rückmeldungen aus dem Review-Prozess bereits berücksichtigt.

### 3. Ausgangslage

#### 3.1 Projektperimeter

Die SSAG gewinnt an ihrem Standort Schweizerhalle (Kanton BL) 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 zurzeit teilweise noch aktive Solfeld des Standorts Schweizerhalle ist das Solfeld Grosszinggibrunn (Muttenz), das 2006 in Betrieb genommen wurde (Abbildung 2). Vor Inbetriebnahme des Solfelds Grosszinggibrunn im Jahr 2006 erfolgte der Salzabbau im Zeitraum von 1982 bis 2019 hauptsächlich im Solfeld Sulz (Muttenz), das heute ausser Betrieb ist.

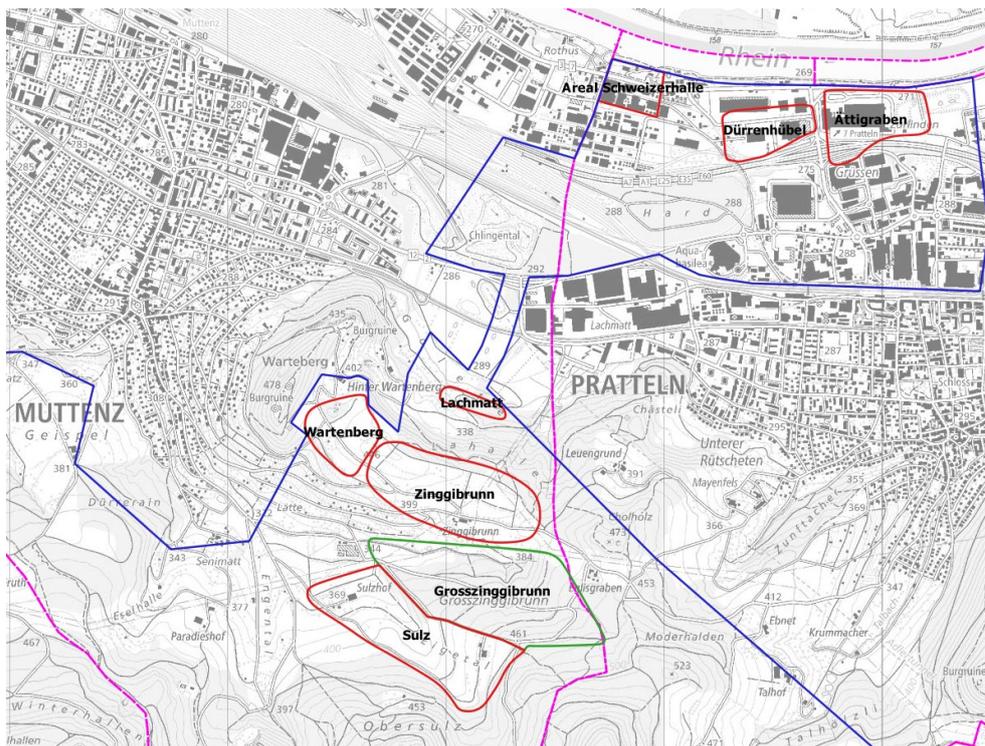


Abbildung 2: Nördliches Konzessionsgebiet der Saline Schweizerhalle (Kanton BL, blau umrandet) mit Lage des aktuellen Solfeldes Grosszinggibrunn (grün) sowie der nicht mehr aktiven Solzfelder (rot) der Saline Schweizerhalle. Die beiden jüngsten Solzfelder Sulz und Grosszinggibrunn liegen im Tafeljura südöstlich des Muttenzer Dorfkerns. Kartenausschnitt nicht massstäblich, Gemeindegrenzen = pink.

Der vorliegende technische Bericht beschreibt den Zustand der beiden Solfelder Sulz (inaktiv) und Grosszinggibrunn (teilweise aktiv).

### **3.2 Produktionsgeschichte Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn**

#### **3.2.1 Solfeld Sulz**

Das inaktive Solfeld Sulz wurde in vier Etappen gebaut und besteht aus insgesamt 25 Produktionsbohrungen resp. Kavernen. Die Salzproduktion wurde 1982 in der Etappe Sulz 1 in Betrieb genommen und endete 2018 in der Etappe Sulz 4 (Abbildung 3). Die Etappe Sulz 1 wurde mittels Drucklaugung, d.h. ohne Stickstoff-Blanket gelaugt. Ab Etappe Sulz 2 wurden zunächst alle Kavernen mit einem Blanket betrieben. Dabei wurden zwischen mehreren Bohrungen, resp. Kavernen Verbindungen festgestellt. Daraufhin wurden die älteren Kavernen der Etappe Sulz 1 und 2 und die jüngeren Kavernen der Etappe Sulz 3 oft quergelaugt, z.T. unter Aufgabe des ursprünglichen Blankets. In einer späteren Produktionsphase wurde dann versucht, die verbundenen Kavernen getrennt zu betreiben [2].

Abbildung 3: 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 [2], Darstellung nicht massstäblich.

### 3.2.2 Solfeld Grosszinggibrunn

Das aktive Solfeld Grosszinggibrunn, welches aus 17 Produktionsbohrungen resp. Kavernen besteht, wurde in zwei Etappen erstellt (Abbildung 4). Gelaugt wurde seit Produktionsbeginn ausschliesslich mittels Blanket-Laugung.

Die Etappe Grosszinggibrunn 1 wurde 2005 erstellt und besteht aus sieben Produktionsbohrungen resp. Kavernen. Die Produktion in Grosszinggibrunn 1 wurde 2006 aufgenommen und dauert bis heute an.

Die Etappe Grosszinggibrunn 2 wurde 2011-2013 erstellt und besteht aus zehn Produktionsbohrungen resp. Kavernen. Die Produktion in Grosszinggibrunn 2 wurde 2015 aufgenommen und dauert ebenfalls bis heute an.

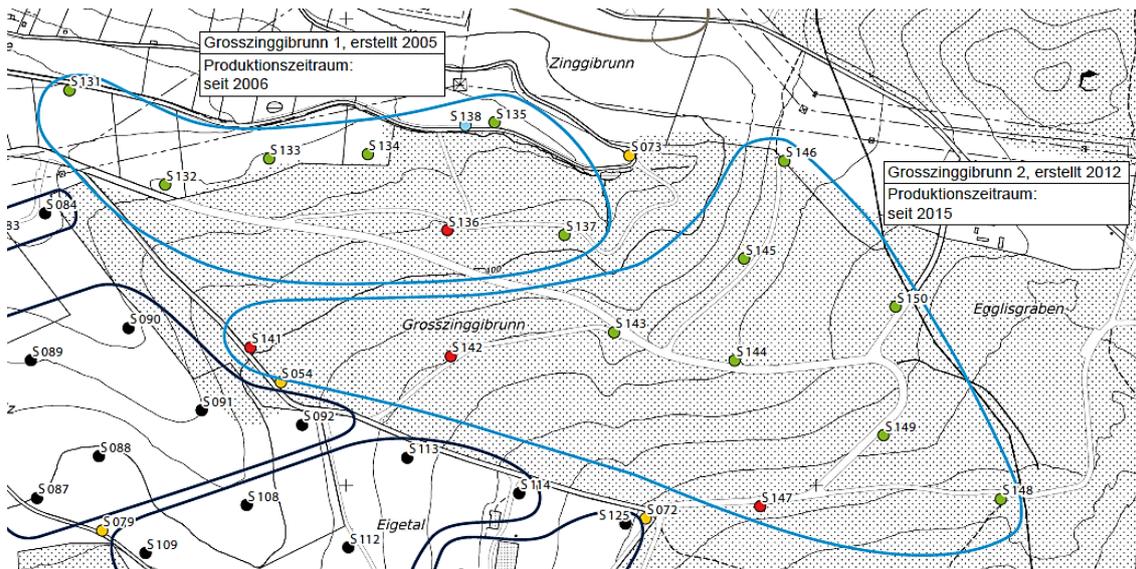


Abbildung 4: Die zwei Etappen des Solfelds Grosszinggibrunn (hellblau umrandet) mit den dazugehörigen Produktionsbohrungen (grün = Bohrloch aktiv, rot = Bohrloch inaktiv, gelb = Sondierbohrung, hellblau = Grundwassermessstelle). Ebenfalls dargestellt sind die östlichsten Bereiche des inaktiven Solfelds Sulz (dunkelblau umrandet) mit den dazugehörigen Produktionsbohrungen. Aus [2], Darstellung nicht massstäblich.

### 3.3 Zustand der Solfelder Sulz im Vorfeld der Messkampagne 2021/2022

Im Vorfeld der Messkampagne 2021/2022 gab es folgende Hinweise und Ereignisse, die erste Rückschlüsse auf den Ist-Zustand des Solfeldes Sulz zulassen:

- Am 13. Juni 2017 kam es bei der Zugangsbohrung S087 zu einem 25-30 m hohen, fontäneartigen Soleaustritt (blow-out), bei dem schätzungsweise 500 m<sup>3</sup> Sole aus der Kaverne an der Oberfläche austraten. Der Untersuchungsbericht zeigte auf, dass der Soleaustritt mit grosser Wahrscheinlichkeit im Zusammenhang mit einem Firstverbruch in der Kaverne stand, bei dem «gefangenes» Stickstoff-Gas (Blanket) freigesetzt wurde und über die Zugangsbohrung an die Oberfläche ausgetreten ist ([3]).
- In Teilen der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn werden seit einigen Jahren anhaltende Senkungen gemessen, welche über den erwarteten Senkungsraten für stabile Kavernen liegen.
- Seit Beginn präziser Lagevermessungen im Jahr 2019 werden an der Geländeoberfläche teilweise signifikante horizontale Bewegungen festgestellt.
- Eine erste Zustandsanalyse ([4]), ausgeführt mit Daten der letzten verfügbaren Hohlraumvermessung, zeigte auf, dass bei Kavernen im Solfeld Sulz teils signifikante Abweichungen zum Soll-Zustand bestehen, und zwar in Bezug auf:
  - o Kavernendurchmesser.
  - o Abstand zwischen benachbarten Kavernen.
  - o Hangendschwebe (Sicherheitsabstand zwischen Kaverne und Deckgebirge).
- In der Kaverne S147 wurde 2018 ein Druckverlust festgestellt. Daraufhin wurde diese Kaverne ausser Betrieb genommen ([2]).
- In den Zugangsbohrungen S141 und S142 wurden 2019 Dichtheitstests (Packertest) durchgeführt. Die Resultate zeigen Undichtigkeiten im Bereich der offenen Bohrungen und/oder Kavernen. Zudem wurde eine Verbindung zwischen S141 (Grosszinggibrunn) und S091 (Sulz) festgestellt. Die S091 wiederum hat eine hydraulische Verbindung zum Muschelkalk-Aquifer ([2]).
- Die Kavernen S142 und S147 (beide Grosszinggibrunn) sind vermutlich hydraulisch mit den Kavernen S113, S114 und S125 (alle Sulz) verbunden ([2]).
- Ein Expertenbericht ([5]) äusserte Zweifel an der Dichtheit der Bohrungen der zweiten Etappe im Grosszinggibrunn.

Das Ziel der Messkampagne 2021/2022 war, diese Vorkenntnisse mit aktuellen Daten zu erhärten und zusätzliche neue Erkenntnisse zu gewinnen, die Aufschluss über die Ursachen und ablaufenden Prozesse in den Solfeldern geben.

## 4. Geologisch-hydrogeologischer Rahmen

### 4.1 Geologisch-tektonische Verhältnisse

#### 4.1.1 Regionalgeologische Übersicht

Die Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn der SSAG liegen auf Muttenzer Gemeindegebiet. Der Projektperimeter liegt tektonisch betrachtet im westlichen Tafeljura<sup>2</sup>, welcher gegen Westen hin durch den Oberrheingraben begrenzt wird.

Der Einfluss des Oberrheingrabens äussert sich im westlichen Tafeljura durch ein dichtes NNE-SSW streichendes Störungsmuster (sogenanntes rheinisches Störungsmuster). Ungefähr östlich einer Linie Stein AG – Läuelfingen BL ist die Störungsdichte im Tafeljura deutlich geringer [6].

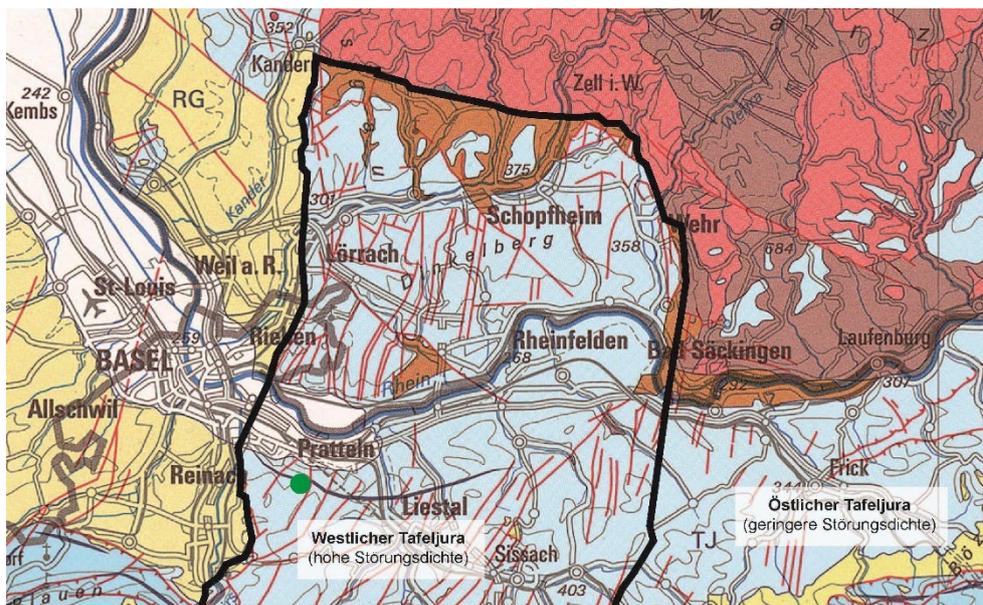


Abbildung 5: Auszug aus der tektonischen Karte der Schweiz (nicht massstäblich), die Lage der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn ist grün markiert. Der Einfluss des Oberrheingrabens äussert sich im westlichen Tafeljura (schwarz umrandet) durch ein dichtes, rheinisch orientiertes Störungsmuster. Östlich einer Linie Stein AG – Läuelfingen BL ist die Störungsdichte im östlichen Tafeljura deutlich geringer. Modifiziert aus [6].

<sup>2</sup> Im Gegensatz zum Faltenjura im Süden sind die mesozoischen Schichten im Tafeljura nicht wesentlich durch den Fernschub der alpinen Orogenese beeinflusst worden und liegen, in flacher Lagerung, (para-) autochthon auf prämesozoischen Gesteinen (permokarbonische Sedimente und kristallines Grundgebirge).

## **4.1.2 Lokale geologische Verhältnisse**

### **4.1.2.1 Lokalgeologischer Datensatz**

Der vorhandene lokalgeologische Datensatz des Gebietes Sulz und Grosszinggibrunn basiert zu weiten Teilen auf Untersuchungen, welche die SSAG im Zusammenhang mit ihrer Explorationstätigkeit vorgenommen hat.

Gut bekannt ist insbesondere die Verteilung, Mächtigkeit und Ausbildung der Steinsalz-Lagerstätte («Salzlager»), welche in der Vergangenheit im Zentrum der Explorationsbemühungen der SSAG stand. Hingegen stehen für die Beurteilung der lokalen strukturgeologischen Verhältnisse sowie des geologischen Aufbaus des Deckgebirges über dem Salzlager Datensätze zur Verfügung, die in ihrer Qualität und ihrem Detaillierungsgrad oft unzureichend sind für ein ausreichendes Verständnis der geologischen Verhältnisse im Projektperimeter. Dieser Umstand wurde von der SSAG erkannt, so dass die jüngsten Explorationsarbeiten deutlich aufwändiger und mit einem zusätzlichen Fokus auf das Deckgebirge ausgeführt wurden [8].

Der lokalgeologische Datensatz basiert zur Hauptsache auf folgenden Untersuchungen:

- Geologische Kartierungsarbeiten: Insbesondere geologischer Atlas 1:25'000 Blatt Arlesheim [7].
- Geologische Aufnahmen Produktionsbohrungen der Solfelder Sulz, Grosszinggibrunn und Zinggibrunn der SSAG und der weiteren Umgebung. In der Vergangenheit wurden diese in der Regel im Bereich des Deckgebirges über dem Salzlager als Meisselbohrungen ausgeführt. Kernstrecken liegen zumeist im Salzlager und nur vereinzelt im Deckgebirge über dem Salzlager vor.
- Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen in den Produktionsbohrungen des Solfelds Grosszinggibrunn.
- Zwischenbericht Bearbeitung Bohrung S84 [8].
- Strukturgeologische und lithofazielle Auswertung der bohrlochgeophysikalischen Logs des Solfelds Grosszinggibrunn Etappe 2 [9].

### **4.1.2.2 Lithostratigraphie**

Die stratigraphische Abfolge setzt im Gebiet Sulz / Grosszinggibrunn unter der quartären Bedeckung in Abhängigkeit der Höhenlage des Bohrstandorts in

unterschiedlichen stratigraphischen Formationen an. In den topographisch höchstgelegenen Bohrungen bilden Gesteine des Opalinustons (Dogger) resp. der Staffelegg-Formation (Lias) die oberste Festgesteinseinheit. In den am tiefsten gelegenen Bohrungen bilden hingegen Gesteine der Klettgau-Formation resp. der Bänkerjoch-Formation (Keuper-Gruppe) die oberste Festgesteinseinheit. Ein lithostratigraphisches Sammelprofil mit den für die Aktivitäten der SSAG relevanten Gesteinsformationen findet sich in Abbildung 6.

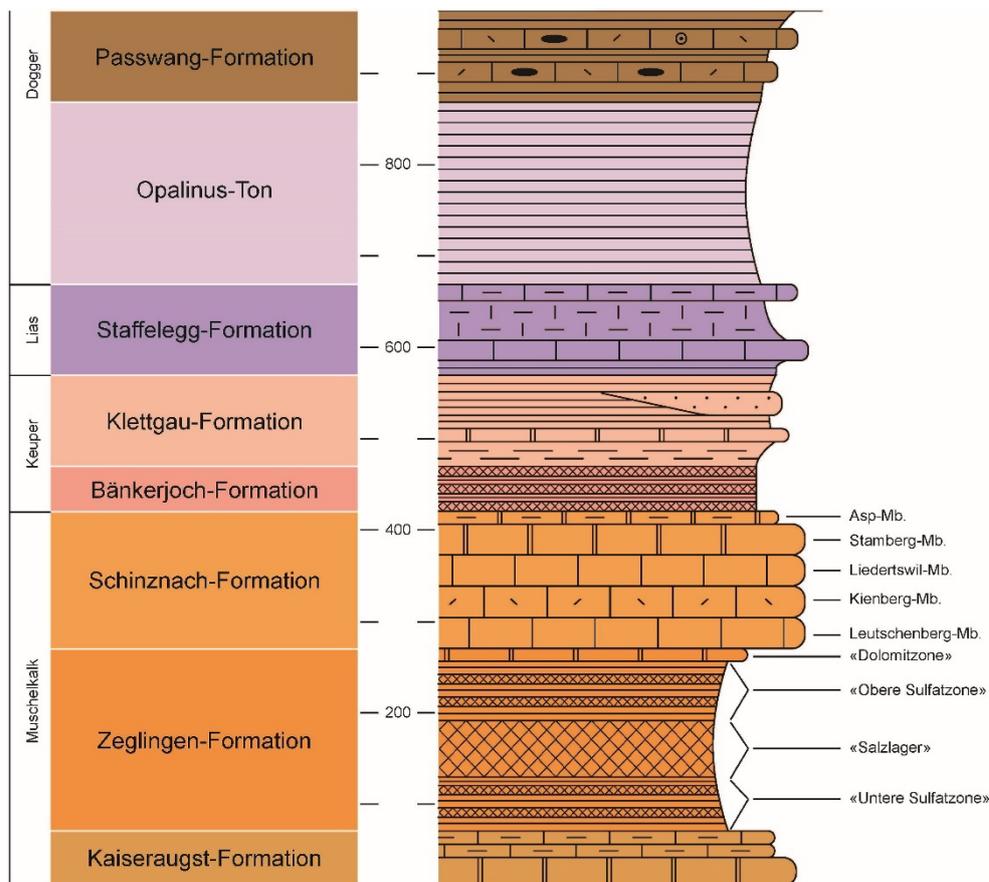


Abbildung 6: Lithostratigraphisches Sammelprofil. Im Bereich der Schinznach- sowie der Zeglingen-Formation ergänzt mit der Einteilung auf Member-Ebene. Modifiziert aus [www.strati.ch](http://www.strati.ch).

Generell zeigt sich zwischen den einzelnen Bohrungen eine gewisse Variabilität in den Mächtigkeiten der einzelnen stratigraphischen Formationen. Die Mächtigkeitsunterschiede sind das Resultat von synsedimentären Prozessen (z.B. synsedimentäre Tektonik) und / oder postsedimentären Prozessen (z.B. tektonische Beanspruchung des Gebirges im Känozoikum). Ein Schichtverzeichnis mit gerundeten Mächtigkeitsangaben für die Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Schichtverzeichnis für die Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn mit gerundeten Mächtigkeitsangaben. Als Basis für die Abschätzung wurde die Bohrung S129 (Etappe 4 Solfeld Sulz) herangezogen.

<b>System/ Periode</b>	<b>Gruppe</b>	<b>Formation</b>	<b>Mächtigkeit [ca. m]</b>
Quartär			10
Jura	Dogger	Opalinuston	60 <sup>1</sup>
	Lias	Staffelegg-Formation	30
Trias	Keuper	Klettgau-Formation	50
		Bänkerjoch-Formation	110
		Schinznach-Formation	90
	Muschelkalk	Zeglingen-Formation (mit Salzlager)	90 <sup>2</sup>
		Kaiseraugst-Formation	40 <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Das Dach des Opalinustons ist in keiner Bohrung der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn erhalten. Die totale Mächtigkeit des Opalinustons in der Sondierbohrung S158 (Gebiet Schauenburg, Pratteln BL) beträgt annähernd 140 m.

<sup>2</sup> Die Mächtigkeit der Zeglingen-Formation ist im Gebiet sehr unterschiedlich, dies aus tektonischen Gründen. In S144 ist die Zeglingen-Formation mind. 145 m mächtig, wovon fast 60 m auf das Salzlager fallen.

<sup>3</sup> Die Bohrungen der SSAG wurden in der Regel bei Erreichen des Dachs der Kaiseraugst-Formation gestoppt. Die Mächtigkeit wurde anhand von Literaturangaben [10] abgeschätzt.

Nachfolgend wird die lithologische Zusammensetzung der mesozoischen Abfolge im Gebiet Sulz / Grosszinggibrunn von oben nach unten kurz beschrieben:

#### Quartäre Ablagerungen

Die quartären Ablagerungen (Hanglehm) sind im Bereich der Solfelder Sulz und Gosszinggibrunn nur wenige Meter mächtig.

#### Jura

Ein wichtiges Merkmal der jurassischen Sedimentation war die deutliche räumliche Gliederung der Ablagerungsräume infolge synsedimentärer Tektonik, was zu grossen lateralen Mächtigkeitsunterschieden der abgelagerten Sedimente führte.

Beim **Opalinuston** (Dogger-Gruppe) handelt es sich um eine monotone Abfolge aus grauem bis dunkelgrauem, siltigem, siltig-mergeligem und feinsandigem Tonstein. Der zumeist deutlich laminierte Tonstein ist oft glimmer- und pyritführend und lagenweise kalkig.

Die im Liegenden des Opalinustons folgende, heterogen aufgebaute **Staffellegg-Formation** (Lias) besteht vorwiegend aus Mergeln und mergeligen Kalken sowie untergeordnet Tonstein und Kalkstein.

#### Trias

In der Obersten Trias kam die **Klettgau-Formation** (Keuper-Gruppe) zur Ablagerung. Diese besteht aus Mergeln und dolomitischen Mergeln sowie untergeordnet Dolomit und Sandstein.

Im Liegenden der Klettgau-Formation folgt die Evaporitserie der **Bänkerjoch-Formation** (Keuper-Gruppe), welche sich aus tonigen Sulfatgesteinen mit einzelnen Dolomit- und Sandsteinbänken zusammensetzt.

Zum Ende der Mittleren Trias wurde die **Schinznach-Formation** (Muschelkalk-Gruppe) abgelagert. Diese besteht zur Hauptsache aus flachmarinen Kalken und Dolomiten.

Unterlagert wird die Schinznach-Formation von der **Zeglingen-Formation** (Muschelkalk-Gruppe), welche auch das Salzlager beinhaltet. Die Zeglingen-Formation besteht aus einer mächtigen Evaporitsequenz (Abbildung 6), die unter lagunären, sabkha-artigen Verhältnissen abgelagert wurde. Unter der im Dach der Zeglingen-Formation anstehenden «Dolomitzone» folgt die in sich heterogen aufgebaute

«Obere Sulfatzone», die das «Salzlager» überlagert. Die «Obere Sulfatzone» kann auf Sub-Member-Ebene weiter unterteilt werden [11] und besteht vorwiegend aus massivem Anhydrit sowie aus Anhydrit-Mergel-Brekzien. Das «Salzlager» im Liegenden der «Oberer Sulfatzone» ist im Gebiet Sulz / Grosszinggibrunn bis ca. 55 m mächtig und besteht in den oberen Abschnitten zur Hauptsache aus Steinsalz mit Tonstein- und Anhydritverunreinigungen. Die untersten Abschnitte des Salzlagers bestehen aus feinkörnigem, praktisch reinem Steinsalz. Gegen die Kaiseraugst-Formation im Liegenden wird die Zeglingen-Formation abgeschlossen von der nur wenige Meter mächtigen «Unteren Sulfatzone», die aus zumeist massigen Sulfaten mit etwas Dolomit und Mergel besteht.

#### 4.1.2.3 Strukturgeologie

Das Gebirge im Projektperimeter wurde seit seiner Ablagerung im Mesozoikum tektonisch stark beansprucht. Es bildet eine komplexe und lokal stark verschuppte, WNW – ESE streichende Antiklinalstruktur [8], die sogenannte Adlerhofstruktur (auch Adlerhofgewölbe genannt). Für die Salzgewinnung ist die Adlerhofstruktur von grosser Bedeutung, da sich darin generell maximale Salzmächtigkeiten befinden.

Das interne Deformationsmuster der Adlerhofstruktur wird von den rheologischen Eigenschaften (spröde, viskos, visko-elasto-plastisch) der Gesteine bestimmt. Neuere Untersuchungen in den Gebieten Grosszinggibrunn und Rütihard (ca. 3 km nordwestlich des Solfelds Grosszinggibrunn), in deren Rahmen Bohrlochwandabildungen im Bereich der Muschelkalk-Gesteine strukturgeologisch ausgewertet wurden, deuten auf folgenden, in Abbildung 7 illustrierten Aufbau der Adlerhofstruktur hin [8]:

- Die untersten Abschnitte des «Salzlagers» der Zeglingen-Fm. sind weitestgehend undeformiert und weisen ein flaches Schichteinfallen ( $1^\circ$  -  $20^\circ$ ) auf. Die Mächtigkeit dieser praktisch undeformierten Zone beträgt je nach Lokalität ca. 5-25 m und zeichnet sich durch feinkristallines, sehr reines Steinsalz aus (Halit-Gehalt  $>80\%$ , oft  $>95\%$ ).
- Über einem flachen, graduell ausgebildeten, duktilen Abscherhorizont (nordvergent) im «Salzlager» sind die Evaporitgesteine der Zeglingen-Fm. tektonisch intensiv verfaltet und teilweise verschuppt, so dass eine deutlich feststellbare tektonische Verdickung im Kern der Antiklinalstruktur resultiert. Das «Salzlager» selbst weist über diesem Abscherhorizont deutlich höhere «Verunreinigungen» mit Mergel und Anhydrit auf als die undeformierten Abschnitte des «Salzlagers» im Liegenden.

- Eine weitere Spannungsentkopplung ist im Dachbereich der evaporitischen Sequenzen, wenig unterhalb der «Dolomitzone» der Zeglingen-Fm., im Bereich einer deutlich ausgeprägten, spröden Überschiebungsbahn nachweisbar. Die eher zu spröder Deformation neigenden Karbonatgesteine der «Dolomitzone» der Zeglingen-Fm. sowie der Schinznach-Fm. spiegeln in ihrer Lagerung die Falte 1. Ordnung wider. Sie sind durch einheitlich verkippte (ca. 10° - 40° Schichteinfallen NNO, ONO, SW) Gesteinspakete charakterisiert, wobei sich das Schichteinfallen ausschliesslich in Bereich von spröden, steilen bis vertikalen Blattverschiebungen ändert. Ähnliche Verhältnisse sind auch in den Keuper- und Lias-Gesteinen im Hangenden zu erwarten, wobei die wenigen vorliegenden Daten für diese Abschnitte noch keine abschliessende Beurteilung zulassen.

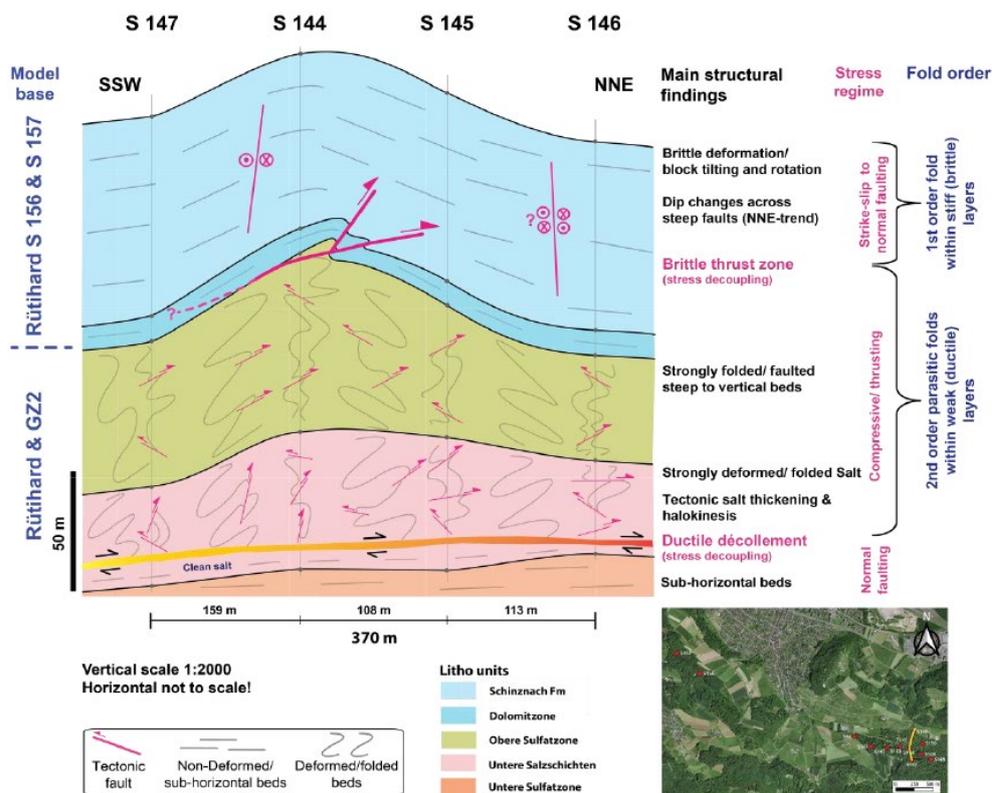


Abbildung 7: Konzeptuelles strukturgeologisches Deformationsmodell der Adlerhofstruktur (aus [8]). Im Bereich der Muschelkalk-Gruppe sind zwei Spannungsentkopplungshorizonte nachweisbar. Das Deformationsmuster wechselt von abschiebend in den untersten Bereichen des «Salzlagers» zu überschiebend in den oberen Abschnitten des «Salzlagers» sowie der «Oberen Sulfatzone» und schliesslich zu blattverschiebend bis abschiebend in den karbonatischen Gesteinen im Hangenden der «Oberen Sulfatzone».

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass die Adlerhofstruktur im Bereich der Muschelkalk-Gruppe durch zwei Spannungsentkopplungshorizonte charakterisiert wird. Das Deformationsmuster wechselt von überschiebend in den oberen Abschnitten des «Salzlagers» sowie der «Oberen Sulfatzone» zu blattverschiebend bis abschiebend in den karbonatischen Gesteinen im Hangenden der «Oberen Sulfatzone» (Abbildung 7 , siehe Kolonne *stress regime*).

## 4.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Im Gebiet der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn sind mehrere wasserführende Stockwerke vorhanden. Ein regional bedeutsamer Grundwasserleiter befindet sich in der Schinznach-Fm. und der Dolomitzone, die zusammen den Muschelkalk-Aquifer bilden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Hydrostratigraphie; wasserführende Horizonte sind blau markiert.

System	Gruppe	Formation	Member (Alte Bezeichnung)	Aquifertyp
Quartär			Rheinschotter (regional) Gehängeschutt-Ablagerungen (lokal)	Porenaquifer
	Dogger	Opalinuston	Opalinuston	Aquiclud
Jura	Lias	Staffelegg-Fm.	Gross Wolf-Mb. (Jurensis-Schichten)	Aquitard
			Rietheim-Mb. (Posidonienschiefer)	Aquitard
			Grünscholz bis Rickenbach-Mb. (Obliqua-/Numismalis-Schichten)	Aquitard
			Frick-Mb. (Obtusus-Tone)	Aquiclud
			Beggingen-Mb. (Arietenkalk)	lokal, Kluftaquifer
Schambelen-Mb. (Insektenmergel)	Aquitard			
Trias	Keuper	Klettgau-Fm.	Belchen-Mb. (Rhät)	Aquitard
			Gruhalde-Mb. (Obere Bunte Mergel)	Aquitard
			Gansingen-Mb. (Gansinger Dolomit)	lokal, Kluftaquifer
	Ergolz-Mb. (Untere Bunte Mergel & Schilfsandstein)	lokal, Porenaquifer		
		Bänkerjoch-Fm.	Gipskeuper	Aquitard
	Muschelkalk	Schinznach-Fm.	Asp-Mb. (Lettenkohle mit Grenzdolomit) Stammberg-Mb. (Trigonodus-Dolomit) Liedertswil-Mb. (Hauptmuschelkalk) Kienberg-Mb. (Hauptmuschelkalk) Leutschenberg-Mb. (Hauptmuschelkalk)	Karst- und Kluftaquifer

		Zeglingen-Fm.	Dolomitzone Obere Sulfatzone Salzlager Untere Sulfatzone	Kluftaquifer Aquitard Aquiclude Aquitard
		Kaiseraugst-Fm.		Aquitard

Im geologischen Profil zeigt sich der Stockwerkbau folgendermassen (Abbildung 8):

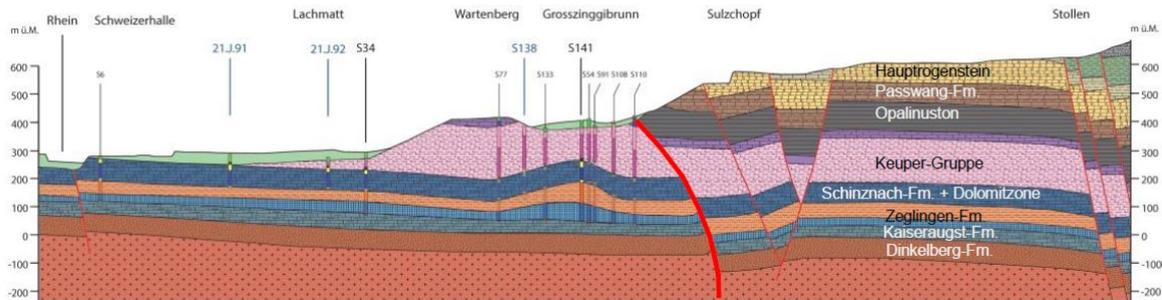


Abbildung 8: Geologisches N-S-Profil (1.5-fach überhöht) durch das Gebiet Grosszinggibrunn mit der Aspenrainstörung (rot) (Profil modifiziert auf der Basis von [7]).

Im Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn zirkuliert oberflächennah Grundwasser in den Gehängeschutt-Ablagerungen sowie in den Bachablagerungen des Riedmattbaches (grüner Horizont im Gebiet Grosszinggibrunn in Abbildung 8).

Nördlich des Wartenberges im Gebiet Lachmatt – Schweizerhalle – Rhein zirkuliert oberflächennah Grundwasser in den Rheinschottern (grüner Horizont im Gebiet Lachmatt – Schweizerhalle - Rhein in Abbildung 8). In Rheinnähe stehen die Rheinschotter in direktem Kontakt mit dem Muschelkalk-Aquifer (Schinznach-Fm. und Dolomitzone).

Zwischen den quartären Ablagerungen und dem Muschelkalk-Aquifer sind weitere wasserführende Horizonte im Lias (Beggingen-Mb.) und im Keuper (Gansingen-Mb. und Ergolz-Mb.) vorhanden, die lokal und mit einer geringen Wasserführung auftreten können.

In den Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn wird der regional bedeutsame Muschelkalk-Aquifer vollständig von den Produktionsbohrungen durchbohrt. Im Gebiet

der Solfelder liegt der beobachtete Grundwasserpegel im Muschelkalk-Aquifer verbreitet bei rund 253 m. ü. M.

Das Strömungsfeld im Muschelkalk-Aquifer wird durch folgende hydrogeologische Randbedingungen kontrolliert:

- Im Norden bildet der Rhein den Vorfluter der oben beschriebenen Grundwasservorkommen. 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 auf ca. 245 m ü. M.
- Im Westen bildet die Birs die hydrogeologische Begrenzung. Der Birspegel liegt oberhalb des KW Birswasserfall auf einer Kote von ca. 266 m ü. M. In der nahliegenden kantonalen Grundwassermessstation Asprain (21.J.1) liegt der gemittelte Pegelstand im Muschelkalk-Aquifer deutlich tiefer, auf einer Kote von 253.3 m ü. M.
- Im Osten bildet die Ergolz die hydrogeologische Begrenzung. Dort liegen die grundwasserführenden Schotter in direktem Kontakt mit dem Muschelkalk-Aquifer und weisen eine Kote von ca. 264 m. ü. M (Mittelwasser) auf.
- Im Süden sind die Randbedingungen unbekannt. Der Grund dafür liegt in der vermuteten Aspenrainstörung, welche die grundwasserleitenden Schichten des Muschelkalk-Aquifers versetzt (Abbildung 8). Deren Verlauf im Gelände ist nur teilweise aufgeschlossen ist und es ist nicht bekannt, ob sie stauende oder wasserleitende Eigenschaften aufweist.

Gemäss einer von der Universität Basel durchgeführten Grundwassermodellierung ([12]) sind für das Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn nahezu stagnierende Strömungsverhältnisse im Muschelkalk-Aquifer anzunehmen (Abbildung 9).

Auf der Basis dieser Strömungsverhältnisse kommt GEOTEST im Rahmen einer Gefährdungs- und Risikoanalyse zum Schluss [13], dass die teils hohen Chloridkonzentrationen auf undichte Zugangsbohrungen in den bestehenden Solfeldern zurückzuführen sind. Es stellt sich eine Dichte-getriebene Strömung der hochkonzentrierten Chloridlösungen ein, d. h. die hochkonzentrierte Chloridlösung breitet sich bevorzugt an der Basis des Muschelkalk-Aquifers entlang dem Gefälle der Stauertopographie aus.

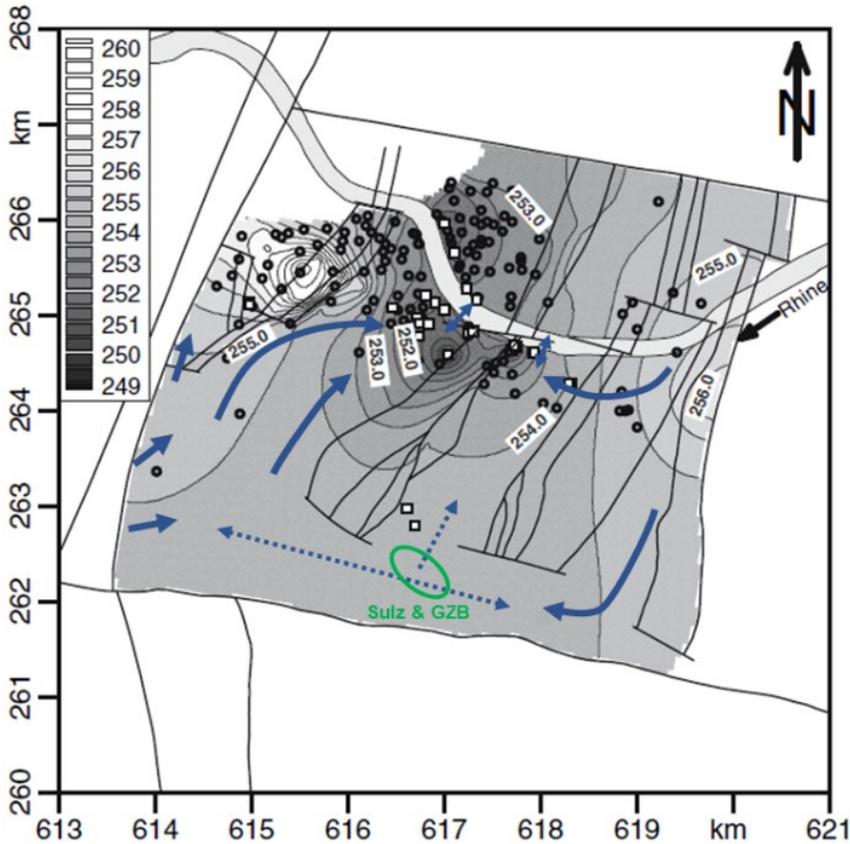


Abbildung 9: Grundwasserfliessrichtungen im Muschelkalk-Aquifer auf der Grundlage von modellierten und kalibrierten Grundwasserpegeln [m ü. M.] am Stichtag 8. August 2003 sowie eigenen Beobachtungen (Punkte: Grundwasserpiezometer; Vierecke: Förderbrunnen). (Quelle: modifiziert nach[12]).

## **5. Messkampagne Sulz und Grosszinggibrunn**

### **5.1 Organisation**

Tabelle 3: Organisation der Messkampagne

Auftraggeber:	Schweizer Salinen AG, Pratteln
Projektleitung:	GEOTEST AG, Münchenstein
Aufwältigung / workover:	Daldrup & Söhne AG, Ascheberg / DE
Bohrlochgeophysik / Logging:	Terratec Geophysical Services GmbH, Heitersheim / DE
Kavernenvermessung:	SOCON Sonar Control Kavernenvermessung GmbH, Giesen / DE
Nivellement und Lage- vermessung	Rapp AG, Basel
Ausführungszeitraum:	Seit Ende Oktober 2021

### **5.2 Arbeitsprogramm und Sicherheitsvorkehrungen**

Das Arbeitsprogramm umfasst die folgenden Tätigkeiten in den Solfeldern Sulz und Grosszinggibrunn:

- 1) Zugänglich machen der Bohrungen (Aufwältigung resp. workover). Öffnen der Zugangsbohrungen und Ausbau der seit der Ausserbetriebnahme der Kavernen in den Zugangsbohrungen verbliebenen Solstränge.
- 2) Bohrlochgeophysikalische Vermessung der Zugangsbohrungen.
- 3) Vermessung der Kavernengeometrien.
- 4) Verschluss der Bohrungen am Bohrlochkopf mit Blindflansch.

Die Ausführung des Arbeitsprogrammes verlangte aufgrund folgender Überlegung und folgendem Ereignis ein Sicherheitskonzept [14]:

- 1) Im Solfeld Sulz wurden die Kavernen teilweise mit einem Stickstoff-Blanket gelaugt. Es konnte deshalb a priori nicht ausgeschlossen werden, dass in den Kavernen Reste von Stickstoff vorhanden sind, welche unkontrolliert während den Aufwältigungsarbeiten resp. den Messarbeiten in die Zugangsbohrung gelangen und einen Soleaustritt (blowout) verursachen.
- 2) Im Juni 2017 kam es im Solfeld Sulz zu einem fontäneartigen Soleaustritt (blowout). Dabei traten schätzungsweise 500 m<sup>3</sup> Sole aus und richteten in der Umgebung der Zugangsbohrung S87 Schäden an (siehe Kapitel 3.3).

Vor diesem Hintergrund wurde ein Sicherheitskonzept erstellt ([14]), das sowohl organisatorische als auch technische Massnahmen umfasst, damit ein unkontrollierter Soleaustritt (blowout) während der Messkampagne verhindert werden kann.

### **5.3 Aufwältigungsarbeiten / Work over**

Die Messkampagne 2021/2022 wurde Ende Oktober 2021 gestartet. Es zeigte sich von Anfang an, dass die Aufwältigungsarbeiten, sprich der Ausbau der verbliebenen Solstränge, mit teilweise grossen technischen Schwierigkeiten verbunden waren. Als Hauptproblem wurden stark deformierte und verbogene Solstränge erkannt, die verklemmt waren, resp. die beim Ziehen abgerissen wurden. Vereinzelt mussten deshalb auch Rohrschneider eingesetzt werden, um die Solstränge stückweise zu schneiden und auszubauen. In der Folge nahmen die Aufwältigungsarbeiten viel mehr Zeit in Anspruch als ursprünglich geplant.

### **5.4 Messprogramm**

#### **5.4.1 Bohrlochgeophysikalische Messungen (Logging)**

In Rücksprache mit der SSAG wurde das bohrlochgeophysikalische Messprogramm festgelegt (Tabelle 4). Folgende Zielsetzungen standen dabei im Fokus:

- Feststellung des Fluid-Pegels und der Zusammensetzung des Bohrlochfluides in der letzten zementierten Rohrtour (LZRT).
- Feststellung von Bohrlochströmungen in der LZRT.
- Feststellung des Zustandes der LZRT hinsichtlich der mechanischen und hydraulischen Integrität (Korrosion, Löcher und Leckagen, Risse, Rohrverbinder, Rohrschuh und Rohrwandstärke).

- Feststellung der Güte der Zementanbindung (cement bond) der LZRT an das Gebirge.
- Feststellung des Bohrlochverlaufes, sofern dieser noch nicht vermessen wurde.

Pro Zugangsbohrung wurden jeweils fünf separate Messfahrten (runs) mit unterschiedlichen Messsonden gefahren. Jede Messfahrt wurde in Kombination mit einem Gamma-Ray Log (GR) gefahren, damit eine Tiefenkontrolle und Tiefenkorrelation zwischen den einzelnen Messfahrten jederzeit gewährleistet sind.

Tabelle 4: Bohrlochphysikalisches Messprogramm.

Run#	Messsonde	Messintervall / Bemerkungen	Zweck
1	Optischer Bohrlochscanner (OPTV)	LZRT / Bereiche, in denen kein oder ein klares Fluid vorhanden ist und die Rohrtourwand gut sichtbar ist	Feststellung des Zustandes hinsichtlich der mechanischen und hydraulischen Integrität der LZRT
2	Fluid Velocity Log (Flow)	LZRT / in Fluid gefüllten Rohrbereichen	Grundlage für die Prozessierung des akustischen Bohrlochimagers (ABI)
3	Akustischer Bohrlochimager (ABI)	LZRT / in Fluid gefüllten Rohrbereichen	Feststellung des Zustandes hinsichtlich der mechanischen und hydraulischen Integrität der LZRT
4	CBL oder Full Wave Sonic (FWS) in Kombination mit Temperatur- und elektrischem Leitfähigkeitslog	LZRT / in Fluid gefüllten Rohrbereichen	Feststellung der Güte der Zementanbindung der LZRT an das Gebirge  Feststellung des Fluidpegels, der Fluidtemperatur und des Fluidtyps in der LZRT

5	Spinner-Flowmeter in Kombination mit Temperatur- und elektrischer Leitfähigkeitsmessung (GFTC)	LZRT / in Fluid gefüllten Rohrbereichen	Feststellung von Bohrlochströmungen in der LZRT  Feststellung des Fluidpegels, der Fluidtemperatur und des Fluidtyps in der LZRT
Opt.	Bohrlochkamera	Auffällige Zonen, die bei vorgängigen Messfahrten identifiziert wurden	Optische Überprüfung auffälliger Zonen
Opt.	Probe-Bailer	Spezifische Entnahmetiefe	Fluidprobenahme für hydrochemische Analysen
Opt.	Bohrlochverlaufsmessung (GYRO)	LZRT	Georeferenzierung des Rohrschuhs und der Kaverne

LZRT: Letzte zementierte Rohrtour (in der Regel 8 5/8" resp. 9 5/8")

Opt.: optional

#### Änderung des Messprogramms während der Messkampagne

Ursprünglich war geplant, die Güte der Zementanbindung mit Hilfe einer Sonde zu messen, welche ein radiales Abbild der Zementanbindung an die LZRT liefert (radial-cement evaluation). Der Vorteil einer radialen Evaluation der Zementanbindung liegt darin, dass die Zementanbindung im Vollkreis (360°) beurteilt werden kann. Die gleiche Sonde hätte auch gleichzeitig die Rohrwandstärke radial vermessen sollen.

Diese Sonde (radial-cement evaluation) wurde wie geplant am Anfang der Messkampagne im Solfeld Sulz eingesetzt. Es wurde jedoch nach den ersten Messfahrten festgestellt, dass diese Sonde nicht in der Lage war ein radiales Abbild der Zementanbindung und eine Angabe zur Rohrwandstärke zu liefern. Nach Rücksprachen mit der Messfirma und dem Hersteller der Sonde wurde als Ursache eine zu starke Dämpfung und Streuung der ausgesendeten Messsignale als Folge von stark verrosteten und korrodierten Stahlrohren erkannt. In der Folge war es nicht möglich, reflektierte Messsignale aus der Rohrtour selbst sowie aus den Bereichen zwischen Rohrtour und Gebirge zu erhalten. Diese Messsonde musste deshalb aus dem Messprogramm genommen werden. Für die Überprüfung der Zementanbindung wurde anstelle dessen ein konventioneller Cement-Bond Log (CBL)

gefahren. Auf die Vermessung der Rohrwandstärke wurde mangels Alternativen verzichtet.

#### 5.4.2 Hohlraumvermessung

Die Hohlraumvermessung von mit Fluid-gefüllten Kavernen zur Form- und Volumenbestimmung erfolgt mit Hilfe von Ultraschallsonden auf der Basis von Laufzeitmessungen. Die Messsonden verfügen über einen dreh- und kippbaren Messkopf mit mehreren Ultraschallsensoren und anderen Sensoren. Das Vermessungsprinzip basiert auf einer punktwisen, azimutalen Abtastung der Kavernenwand (Abbildung 10). Bei der Prozessierung der Messdaten werden die horizontal erfassten und in Kippposition erfassten Messpunkte zusammengefügt zu einem Gesamtbild der Kavernengeometrie, woraus sich das Kavernenvolumen ableiten lässt.

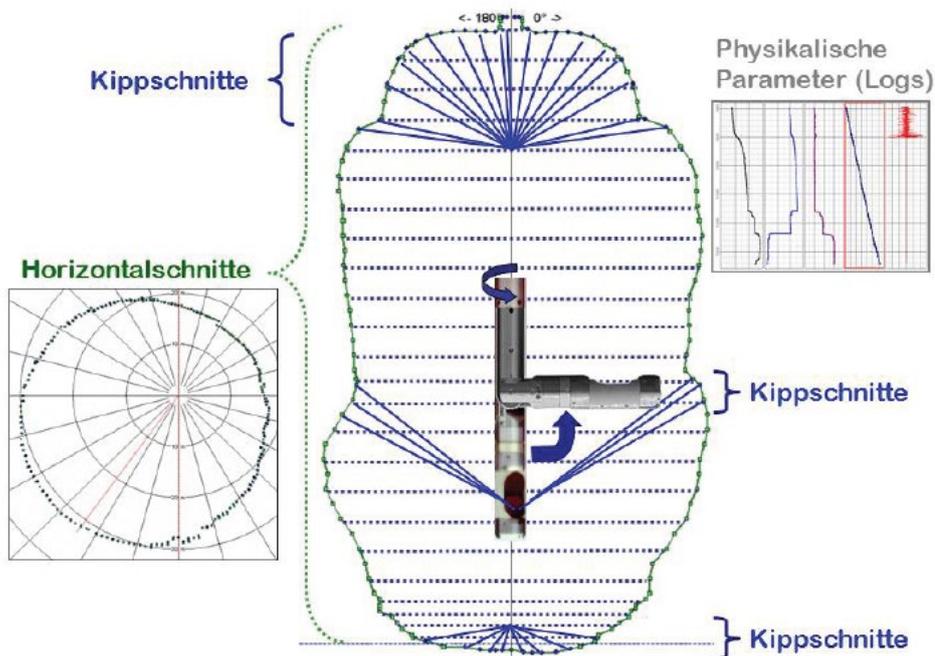


Abbildung 10: Echometrisches Verfahren zum Erfassen der Kavernengeometrie (Figur aus [15]).

Die Zielsetzung der Hohlraumvermessungen war die Erfassung und Darstellung der Geometrie der Einzelkavernen) sowie möglicher Verbindungen zu Nachbarkavernen.

## **5.5 Überwachung Oberflächendeformationen**

### **5.5.1 Senkungsmessungen**

Die SSAG ist verpflichtet, das Senkungsverhalten im Bereich ihrer aktiven und inaktiven Solfelder im Kanton BL in einem jährlichen Intervall zu überwachen. Seit 2001 werden sämtliche Solfelder des Konzessionsgebiets Schweizerhalle vor diesem Hintergrund mittels eines Vermessungskonzepts geodätisch vermessen. Die Messungen werden von der Rapp AG, als Präzisionsnivellements durchgeführt. Die Genauigkeit der Senkungsmessungen liegt knapp unter 1 mm.

Ende 2021 wurde wegen den im Rahmen der bohrlochgeophysikalischen Messkampagne sowie der geodätischen Zeitreihen festgestellten Auffälligkeiten entschieden, das Messintervall im Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn auf vierteljährlich zu verkürzen (in einem reduzierten Messnetz).

### **5.5.2 Lagemessungen**

Im Gebiet Sulz / Grosszinggibrunn werden seit November 2019 ausgewählte Messpunkte des Senkungsmessnetzes jährlich auch in ihrer Lage vermessen (Nullmessung sowie bislang zwei Messungen). Zur Anwendung kommt dabei eine Kombination aus statischen GNSS-Messungen und tachymetrischen Netzmessungen. Aktuell werden 78 Messpunkte in ihrer Lage vermessen. Die Genauigkeit der Lagemessungen liegt knapp unter 3 mm.

### **5.5.3 Photogrammetrische Vermessung**

Im März 2021 wurde ein ca. 6 km<sup>2</sup> grosses Gebiet rund um die Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn erstmalig mittels Vermessungsdrohne befliegen. Im Januar 2022 wurde das ursprüngliche Gebiet erneut befliegen und gegen Osten um 4 km<sup>2</sup> erweitert. Im Rahmen dieser photogrammetrischen Vermessung werden dereinst Differenzhöhenmodelle erstellt sowie Verschiebungsmessungen mittels «feature tracking» durchgeführt.

## 6. Untersuchungsresultate

### 6.1 Übersicht Bohrloch- und Kavernenmessungen

Tabelle 5: Verfügbare (grün) und nicht verfügbare (rot) Bohrlochmessdaten für die Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn (Stand Ende Juli 2022).

BohrID	Socon	ABI	CBL	Flow	Tem/Sal	OPTV	Video	H2O-Probe	Gyro	Status
S080										mit Zement verfüllt
S081										
S082										
S083										zugänglich, noch nicht vermessen
S084										Flansch (8-Loch), unbekannt
S085										
S086										
S087										Aufbohren RS, noch nicht vermessen
S088										
S089										
S090										
S091										
S092										
S108										abgerissener Solstrang, kein Zugang
S109										Teilverbruch, nicht zugänglich
S110										zugänglich, noch nicht vermessen
S111										
S112										abgerissener Solstrang, kein Zugang
S113										abgerissener Solstrang, kein Zugang
S114										mit Zement verfüllt
S125										
S126										Teilverbruch
S127										
S128										
S129										
S131										Überdruck
S132										zugänglich, noch nicht vermessen
S133										zugänglich, noch nicht vermessen
S134										Überdruck
S135										Überdruck
S136										Zugang unbekannt, nicht vermessen
S137										zugänglich, noch nicht vermessen
S141										
S142										zugänglich, noch nicht vermessen
S143										zugänglich, noch nicht vermessen
S144										zugänglich, noch nicht vermessen
S145										zugänglich, noch nicht vermessen
S146										zugänglich, noch nicht vermessen
S147										Zugang unbekannt, nicht vermessen
S148										zugänglich, noch nicht vermessen
S149										zugänglich, noch nicht vermessen
S150										zugänglich, noch nicht vermessen

Im Solfeld Sulz konnten per Ende Juli 2022 15 von insgesamt 25 Zugangsbohrungen mit der Firma Terratec vermessen werden. Die Firma SOCON konnte 13 von insgesamt 25 Kavernen vermessen.

Im Solfeld Grosszinggibrunn wurde per Ende Juli 2022 eine von insgesamt 17 Zugangsbohrungen von der Firma Terratec vermessen (die prozessierten Daten liegen noch nicht vor). Die Firma SOCON konnte 11 von insgesamt 17 Kavernen vermessen.

## **6.2 Messresultate**

Die Messresultate der Zugangsbohrungen wurden durch die Firma Terratec geliefert. Pro vermessene Zugangsbohrung wurden folgende Dokumente und Daten abgegeben:

- Messbericht.
- Rohdaten (Las-Files).
- Prozessierte Daten (WCL-Files).

Die abgegebenen Dokumente und Daten befinden sich digital auf dem mitgelieferten Datenträger.

Die Messresultate der Kavernen wurden von der Firma SOCON geliefert. Pro vermessene Kaverne wurden folgende Dokumente und Daten abgegeben:

- Messbericht inkl. Auswertung der prozessierten Daten.
- Rohdaten (Dat-Files).

Die abgegebenen Dokumente und Daten befinden sich digital auf dem mitgelieferten Datenträger.

## **6.3 Daten-Prozessierung**

Die gelieferten Messdaten wurden durch die GEOTEST prozessiert, damit sie für die Ist-Soll-Analyse eingesetzt werden konnten.

Für die Zugangsbohrungen wurden die Messdaten und Auswertungen zusammengefasst und als Übersichtdiagramm (Beilage 1) dargestellt.

Die Kavernendaten wurden mit Hilfe der Bohrlochverlaufsmessungen georeferenziert und in die Programme MOVE (Software für geologische 3D-Modellierungen) und GIS (Geographische Informationssoftware) geladen. In MOVE wurden die

Kavernendaten mit dem bestehenden, geologischen 3D-Modell «Schweizerhalle» verschnitten, um für jede Kaverne den Grundriss und die Lage in geologischen Schnitten darzustellen (Beilage 2). Im GIS wurden die Kavernendaten verwendet, um für die Solfelder insgesamt die Kavernenumrisse (Beilage 3) und den Abstand der Kaverne zum Deckgebirge, der als Hangendschwebe bezeichnet wird, (Beilage 4) darzustellen.

## **7. Vergleich Ist-Zustand und Soll-Zustand**

### **7.1 Zugangsbohrungen**

#### **7.1.1 Soll-Zustand**

Der Soll-Zustand einer Zugangsbohrung gemäss heutigem Stand der Technik wurde im Rahmen der Expertenberichte für die geplante Soleförderung Rütihard durch die Firma DEEP.KBB beschrieben ([15]). Die Integrität der Bohrung soll während des Bohrprozesses, der Betriebsphase und der Nachsorgephase gewährleistet sein. Eine Bohrung gilt als integer, wenn die in ihr enthaltenen flüssigen oder gasförmigen Medien in jedem Betriebszustand sicher beherrscht werden. Es sind Massnahmen zur Vorsorge gegen Gefahren für Leben und Gesundheit, Sachgüter, Natur und Umwelt zu treffen. 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» ([15]). In der Schweiz existiert kein solcher Leitfaden. Allerdings werden im Rahmen der Bohrbewilligungen jeweils Auflagen durch die Bewilligungsbehörden gemacht, die sich an der in Deutschland geltenden Richtlinie orientieren.

Gemäss heutigem Stand der Technik sind bei der Planung und Dimensionierung einer Zugangsbohrung folgende Anforderungen zu erfüllen ([15]):

- Die Integrität des Bohrlochs ist in der Bohr- und Betriebsphase zu gewährleisten.
- Die Bohrung ist so auszulegen, dass sie nach der Betriebsphase wieder stillgelegt und integer verschlossen werden kann (Nachsorgephase).
- Die einzelnen Bohrlochsektionen sind gegeneinander zu isolieren.
- Die Bohrung ist gegen nutzbare Grundwasserleiter zu isolieren, um eine Kontamination mit Spülung oder Sole auszuschliessen.
- Die Bohrung und ihre Einbauten sind so zu dimensionieren, dass diese allen auftretenden mechanischen Ansprüchen bezüglich Innen- und Aussen- druck sowie Abstreiffestigkeit der Rohrverbinder standhalten.

Bei der Ausführung einer Bohrung wird gemäss heutigem Stand der Technik folgender genereller Ablauf eingehalten ([15], vgl. Abbildung 11):

- 1) Bohren der jeweiligen Sektion.
- 2) Einbau einer Stahlrohrtour (Futterrohe).

- 3) Vollständige Zementation der Rohrtour durch Einpressen von Zement-  
schlamm in den Zwischenraum (Ringraum) zwischen Rohrtour und Bohr-  
lochwand (Gebirge) bis zur Erdoberfläche.

Es werden API-normierte (American Petroleum Institute) Materialien und Rohr-  
dimensionen und Zusammensetzungen der Zementschlämme (API Class A bis  
B) eingesetzt.

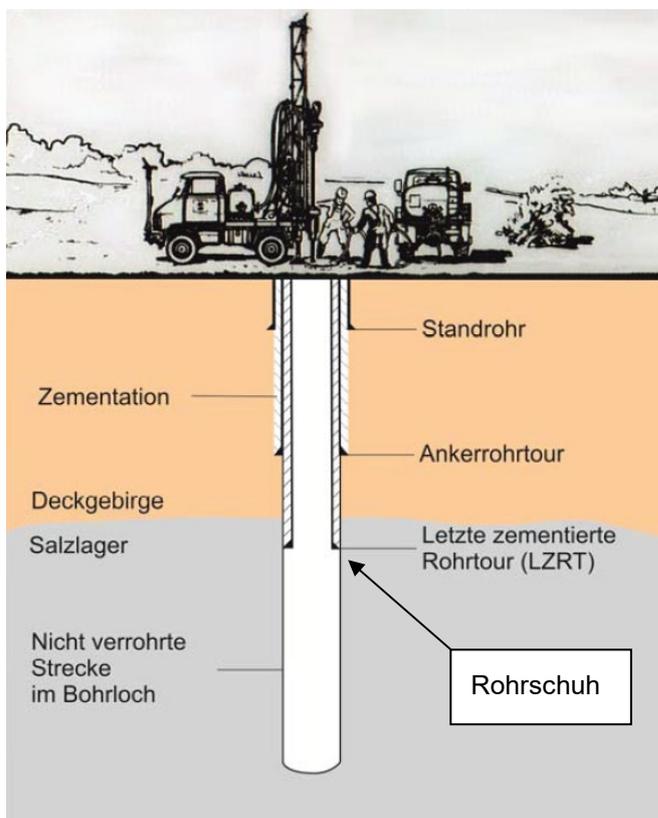


Abbildung 11: Schematischer Bohrlochausbau (aus [15]).

Nach dem Abteufen der Zugangsbohrung wird bei der letzten zementierten Rohrtour (LZRT) der Zementmantel zwischen Rohr und Formation mittels Messungen (Cement-Bond-Log (CBL) überprüft. Auf Basis dieser Messungen erfolgt eine Einschätzung der Dichtheit der Bohrung.

Ausserdem ist nach Abteufen der Bohrung und vor dem Beginn der Solung die Dichtheit der LZRT einschliesslich des Rohrschuhs (Abbildung 11) mit einem Test nachzuweisen, um sicherzustellen, dass die in der Bohrung zirkulierenden Medien nicht in das Gebirge entweichen können ([15]).

Bei Produktionsende werden Zugangsbohrungen und Kavernen in die Nachsorgephase überführt. Die wichtigsten Ziele dabei sind [15]:

- Gewährleistung der Langzeitstandsicherheit (Vermeidung der Entwicklung von Kavernenverbrüchen, Tagbrüchen, Gebirgsschlägen usw.)
- Begrenzung der Konvergenz und dadurch induzierte Oberflächensenkungen auf marginale, bergschadenkundlich nicht relevante Werte auch unter Berücksichtigung grosser Zeiträume
- Schutz des Grundwassers vor austretender Sole aus der Salzformation
- Minimierung der Nachsorgeaufwendungen.

Die Nachsorgephase endet, wenn ein Zustand erreicht ist, welcher die Einstellung der Überwachung erlaubt.

Damit eine ordentliche Nachsorgephase eingeleitet werden kann, sind folgende Voraussetzungen notwendig [15]:

- Die Zugangsbohrung ist vollständig mit Sole gefüllt und es besteht ein konstanter (Über-)Druck am Bohrlochkopf.
- Die Dichtheit von Verrohrung und Zementstrecke ist gegeben.
- Das Senkungsgeschehen bewegt sich entsprechend der Senkungsprognose.

### **7.1.2 Ist-Soll-Analyse**

Die Ist-Soll-Analyse für die Zugangsbohrungen basiert auf der Auswertung der Messresultate aus den Solfeldern Sulz und Grosszinggibrunn, die im Rahmen der Messkampagne 2021/2022 erhoben wurden. Die Resultate des Ist-Zustandes sind in der Beilage 1 zusammengefasst.

#### **7.1.2.1 Bohrlochkopfdruck und Zusammensetzung des Bohrlochfluids**

Mit Ausnahme der Zugangsbohrung S129, die vollständig mit Sole gefüllt ist und unter einem Überdruck von ca. 5 bar steht, waren alle 15 vermessenen Zugangsbohrungen drucklos und wiesen einen freien Fluidpegel auf. Die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit zeigt auf, dass ein Teil der Zugangsbohrungen keine Stratifizierung in der Zusammensetzung des Bohrlochfluids aufweist, während ein zweiter Teil der Bohrungen eine Stratifizierung zeigt (vgl Tabelle 6 und Tabelle 7):

Tabelle 6: Zugangsbohrungen ohne Stratifizierung im Solfeld Sulz (einheitliche Fluidzusammensetzung).

Bez.	Bohrlochfluid (el. Leitfähigkeit [mS/cm], Dichte [g/cm <sup>3</sup> ])	Fluidpegel [m.ü.M.]	*Frischwasser- Pegel [m.ü.M]
S129	Sole (> 250 mS/cm, ρ <sub>Sole</sub> ~ 1.2 g/cm <sup>3</sup> )	~ 5 bar (Überdruck)	-
S91, S109, S111, S126, S128	Sole (> 250 mS/cm, ρ <sub>Sole</sub> ~ 1.2 g/cm <sup>3</sup> )	232 - 245	278 - 294
S85	Stark verdünnte Sole (15 mS/cm, ρ <sub>Sole</sub> ~ 1.0 g/cm <sup>3</sup> )	275	275
S87	Frischwasser (< 5 mS/cm, ρ ca. 1.0 g/cm <sup>3</sup> )	276	276

\*Der Frischwasser-Pegel wird unter Anwendung folgender Formel ([16]) aus dem Fluidpegel berechnet und dient der Vergleichbarkeit:

$$h_{FW} = \left( \frac{\rho_{Sole}}{\rho_{FW}} \right) \cdot h_{Fluid}$$

- $h_{FW}$  Frischwasser-Pegel [m.ü.M.]
- $\rho_{Sole}$  Dichte Sole [g/cm<sup>3</sup>] entspricht ca. 1.2 g/m<sup>3</sup> (abgeschätzt aus dem Druck-Gradient)
- $\rho_{FW}$  Dichte Frischwasser [g/cm<sup>3</sup>] entspricht ca. 1 g/m<sup>3</sup>
- $h_{Fluid}$  gemessener Fluid-Pegel [m.ü.M.]

Tabelle 7: Zugangsbohrungen im Solfeld Sulz mit Stratifizierung (zweigeteilte Fluidzusammensetzung).

Bez.	Bohrlochfluid	Fluidpegel [m.ü.M.]	Sole-Pegel [m.ü.M.]
S086 S088 S090 S092	Frischwasser (< 5 mS/cm) über Sole (> 250 mS/cm)	253 - 260	148 - 201
S089 S125 S127	Verdünnte Sole (15 - 250 mS/cm) über Sole (> 250 mS/cm)	248 - 254	167 - 181

Geht man davon aus, dass ursprünglich alle Kavernen und Zugangsbohrungen im Solfeld Sulz am Ende ihrer Produktion mit Sole aufgefüllt worden sind, dann muss bei allen drucklosen Zugangsbohrungen, die ein anderes Bohrlochfluid als Sole beinhalten, vermutet werden, dass Leckagen / Undichtheiten in der Bohrung oder in der Kaverne vorhanden sind. Im Solfeld Sulz ist das bei 14 von 15 der untersuchten Zugangsbohrungen der Fall.

Die Vermutung wird durch die Tatsache gestärkt, dass sich bei den stratifizierten Zugangsbohrungen (Tabelle 7) ein Fluidpegel einstellte, der mit dem Grundwasserspiegel im Muschelkalk-Aquifer (rund 254 m ü.M.) vergleichbar ist. Bei diesen Bohrungen ist deshalb die Existenz einer hydraulischen Verbindung zwischen Zugangsbohrung, resp. Kaverne und dem Muschelkalk-Aquifer anzunehmen.

### 7.1.2.2 Integrität der Verrohrung

Im Solfeld Sulz gibt es in 12 von 15 vermessenen Zugangsbohrungen direkte oder indirekte Hinweise auf eine fehlende hydraulische und mechanische Integrität in der LZRT. Direkte Hinweise manifestieren sich zum Beispiel in Form von Löchern, Rissen, offenen Rohrverbindungen, stark deformierten Rohren und abgerissenen Rohrschuhen. Indirekte Hinweise manifestieren sich aus der Analyse der

Bohrlochströmungen, die nur dann auftreten, wenn es Leckagen / Undichtheiten in der LZRT oder der Kaverne gibt (Tabelle 8).

Tabelle 8: Integrität der Zugangsbohrungen im Solfeld Sulz.

Bez.	Bohrlochströmungen	Integritätsverlust der LZRT
S85, S89, S129	Keine Strömungen detektierbar.	Keine direkten Hinweise festgestellt.
S88, S109, S111	Keine Strömungen detektierbar.	Löcher, offene Rohrverbindungen, deformierte Rohre, abgerissener Rohrschuh in S109.
S86, S90	Lokale Zu- und Abflüsse.	Löcher, offene Rohrverbindungen, deformierte Rohre.
S87, S91, S92, S125, S126, S127 S128	Vertikale Abwärtsströmungen in die Kaverne detektiert.	Löcher, offene Rohrverbindungen, deformierte Rohre, abgerissener Rohrschuh in S87, S126 und S128.

Hervorzuheben ist der Nachweis von abwärts gerichteten Bohrlochströmungen in sieben Zugangsbohrungen (Tabelle 8). Solche Strömungen treten ausschliesslich in undichten Verrohrungen und Kavernen auf, was auf unkontrollierte Solungsprozesse in den Kavernen schliessen lässt. Die gemessenen Strömungsraten liegen im Bereich von 0.36 bis 3.6 m<sup>3</sup>/h. Im Vergleich dazu liegen die Solraten im Betrieb bei rund 25 m<sup>3</sup>/h, was um den Faktor 7 – 70 höher ist. Vor diesem Hintergrund wird die unkontrollierte Solung in diesen Kavernen als stetiger, aber langsamer Prozess bewertet.

Die Ursachen für den Integritätsverlust der LZRT dürften auf verschiedene Faktoren zurückzuführen sein:

- Die visuelle Begutachtung der Rohrinneiseite der LZRT zeigte, dass alle vermessenen Zugangsbohrungen im Solfeld Sulz stark korrodiert sind. Die Korrosionsphänomene manifestieren sich in Form von verschmutzten und rostigen Rohren, die eine beginnende Lochfrass- und Spaltkorrosion zeigen. Die Löcher und Risse sind das Resultat einer fortgeschrittenen Beschädigung durch die stark korrosiv wirkende Sole.

- Die beschädigten Rohrverbindungen sind vermutlich auf eine starke mechanischen Beanspruchung der LZRT durch Zug- und/oder Torsionskräfte zurückzuführen.
- Die abgerissenen Rohrschuhe dürften ebenfalls das Resultat einer starken mechanischen Beanspruchung sein. Möglicherweise erstreckte sich in diesen Fällen die Kaverne bereits bis über das Dach des Salzlagers in das überliegende Deckgebirge hinein (fehlende Salzscheibe). Dadurch wurde der Rohrschuh freigelegt und von niederbrechenden Gesteinsschichten mitgerissen.

### 7.1.2.3 Güte der Zementanbindung

Die CBL-Daten, zusammen mit Angaben zu den Strömungen sind in Tabelle 9 tabellarisch zusammengefasst:

Tabelle 9: Zusammenfassung der CBL-Auswertung mit Angaben zu Strömungsverhältnissen.

Bez.	Rohrschuh der LZRT	TC gemäss Einbauschema	TC gemäss CBL	Zementstrecke gemäss CBL	Zu- und Abflüsse
S085	301.35 m	273 m	190 m	111.35 m	-
S086	296.55 m	230 m	175 m	121.55 m	225 - 232 m
S087	323 m (abgerissen)	k.A.	165 m	158 m	142 - 320 m
S088	(*) 328.45 m	312 m	236 m	92.45 m	-
S089	294.99 m	279 m	191 m	103.99 m	-
S090	(*) 275.80 m	247 m	155 m	120.8 m	175.8 - 181 m
S091	292.50 m	263 m	174 m	118.5 m	160.4 - 187.5 m
S092	325.00 m	k.A.	217 m	108 m	226.5 – 233.4 m
S109	348.6 m (abgerissen)	110 m	211 m	137.6 m	-
S111	361.0 m	340 m	?	?	-
S125	(*) 390.4 m	225 m	301 m	89.4 m	217.6 – 384.0 m

S126	328.7 m (abgerissen)	280 m	247.5 m	81.2 m	240 – 310 m
S127	368.5 m	234 m	291 m	77.5 m	317.7 – 364.1 m
S128	371.1 m (abgerissen)	267 m	260 m	111.1 m	286.7 – 356.2 m
S129	(*) 384 m	328 m	?	?	-

(\*) gemäss CBL-Log schlechte Zementanbindung im Bereich des Rohrschuhs

Aus der Auswertung ergibt sich folgende Beurteilung der Güte der Zementanbindung:

- Die CBL-Messungen aus dem Solfeld Sulz zeigen mehrheitlich eine über mehrere Dekameter vorhandene Zementanbindung. Bemerkenswert ist die Feststellung, dass das Top Zement (TC) gemäss CBL-Messungen in 14 von 15 Zugangsbohrungen deutlich höher liegt und die Zementstrecke also länger ist als das TC gemäss Einbauschema.
- In keiner Zugangsbohrung ist die LZRT bis an die Erdoberfläche zementiert worden.
- In neun von 15 Zugangsbohrungen wurden Leckagen (keine hydraulische Integrität) detektiert, obwohl die CBL-Interpretation eine gute Zementanbindung angibt.
- In 8 von 15 Zugangsbohrungen ist zum heutigen Zeitpunkt das Ende der LZRT gemäss CBL-Messung nicht zementiert (freihängendes Rohr oder abgerissener Rohrschuh). In diesen Fällen fehlt die Zementation im Übergangsbereich zwischen der LZRT und der Kaverne.

Die Güte der Zementanbindung liefert im Allgemeinen auch Hinweise zur Dichtheit der Zementation. Die Auswertung der CBL-Daten und der hydraulischen Daten zeigte, dass eine gute Zementanbindung gemäss CBL nicht gleichbedeutend ist mit einer dichten Zementation der LZRT. Entsprechend wird festgestellt, dass eine gute Zementanbindung eine notwendige, aber nicht ausreichende Bedingung für eine dichte Zementation der LZRT ist. Vor diesem Hintergrund ist die Dichtheit der Zementation der LZRT insgesamt als kritisch, weil mit Unsicherheiten behaftet, zu beurteilen. Die folgenden Überlegungen zum umgesetzten Bohr- und Verrohrungsschema in allen Zugangsbohrungen der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn führen diese Feststellung weiter aus.

Das in den Solfeldern Sulz und Grosszinggibrunn umgesetzte Bohr- und Verrohrungsschema zeigt, dass die letzte Bohrsektion jeweils von der Basis der Bänkerjoch-Fm resp. vom Top der Schinznach-Fm. bis in das Dach des Salzlagers

abgeteuft wurde (Abbildung 12). In der Schinznach-Fm. kam es beim Bohrvorgang zu massiven, zumeist vollständigen Spülungsverlusten [vgl. Lebensläufe und Bohrprofile der Schweizer Salinen AG], weil diese Schichten stark verkarstet, zerklüftet und wasserführend sind (Muschelkalk-Aquifer). Diese Spülungsverluste wurden beim Bohren bis in das Dach des Salzlagers mitgenommen (Bohren mit «verlorener» Spülung), was aus bohrtechnischer Sicht wie auch später aus Sicht der Zementation ungünstig ist. Die bohrtechnischen Auswirkungen sind im Folgenden aufgelistet:

- Ungenügender Austrag von Bohrspülung und Bohrklein während des Bohrens.
- Erschwerte Spülbarkeit der LZRT vor Einbau und Zementation.
- Vermischung von Frischwasser aus dem Muschelkalk-Aquifer mit dem eingepumptem Zementschlamm beim Zementieren der LZRT.
- Verunreinigung des eingepumpten Zementschlamm durch nicht ausgetragenes Bohrklein.
- Inkaufnahme von erheblichen Zementverlusten.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass diese ungünstigen Bedingungen die Qualität und damit die Dichtheit der Zementation beeinträchtigt haben.

Das aktuell von der SSAG umgesetzte Bohr- und Verrohrungsschema sieht für die verkarstete, zerklüftete und wasserführende Schinznach-Fm. eine eigene Bohr- und Verrohrungsstrecke vor (Abbildung 12 rechts). Die LZRT umfasst dann nur noch die Obere Sulfatzone sowie die obersten Abschnitte des Salzlagers. Die Vorteile liegen auf der Hand:

- Da die Schinznach-Fm. und die Obere Sulfatzone in getrennten Bohrsektionen gebohrt und zementiert werden, ist der Muschelkalk-Aquifer von der Oberen Sulfatzone und vom Salzlager getrennt. Die Obere Sulfatzone kann dann ohne Spülverluste gebohrt, gespült und zementiert werden (einfach verrohrt und zementiert), ohne dass zufließendes Frischwasser aus dem Muschelkalk-Aquifer oder in der Bohrung zurückgebliebenes Bohrklein die Zementation beeinträchtigt.
- Im Endausbau ist die Schinznach-Fm. (Muschelkalk-Aquifer) zweifach verrohrt und zementiert (redundante Sicherheitsbarriere).
- Die Kontrolle der Zementationsausführung der LZRT wird erleichtert.

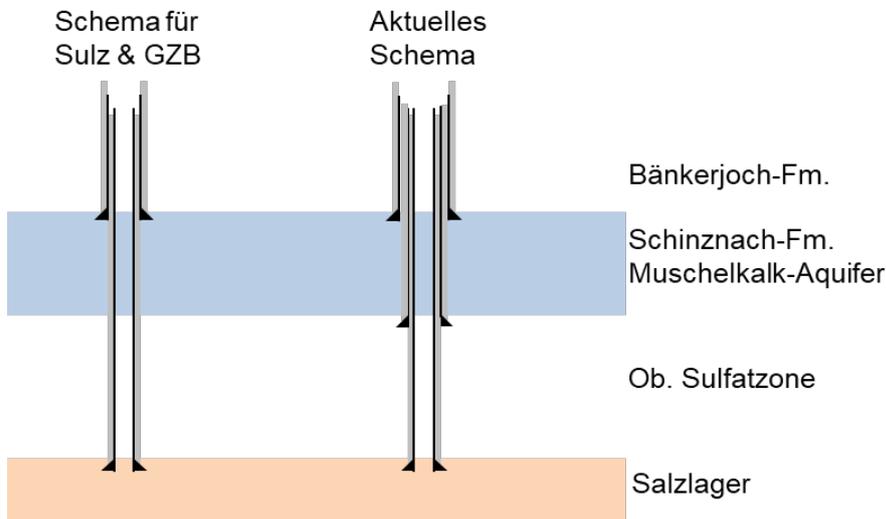


Abbildung 12: Schematischer Vergleich zwischen dem Bohr- & Verrohrungsschema für die Zugangsbohrungen im Sulz und Grosszinggibrunn und einem Schema, das aktuell umgesetzt werden soll.

### 7.1.3 Beurteilung Zugangsbohrungen

Wir beurteilen den Zustand der im Solfeld Sulz untersuchten Zugangsbohrungen mehrheitlich als schlecht. In den meisten Zugangsbohrungen ist die Integrität der Verrohrung aufgrund von Löchern, Rissen, verbogenen Rohren, offenen Rohrverbindungen und abgerissenen Rohrschuhen nicht gegeben. Aufgrund der verbreiteten Korrosion, den Schäden am Rohrmaterial und den teils offenen Rohrverbindungen ist die mechanische Festigkeit der Verrohrungen beeinträchtigt.

Die Zementanbindung ist zwar mehrheitlich gut. Die Dichtheit der Zementation ist aber lokal nachweislich nicht vorhanden und muss insgesamt angezweifelt werden.

Der Zustand der Zugangsbohrungen weist negative Abweichungen zum Soll-Zustand auf. Aus unserer Sicht sind diese Abweichungen so gravierend, dass die Zugangsbohrungen im Solfeld Sulz einen Störfall darstellen.

Der Zustand der Zugangsbohrungen im Solfeld Grosszinggibrunn kann aufgrund fehlender Messungen nicht beurteilt werden.

## 7.2 Kavernen

### 7.2.1 Soll-Zustand

Der Soll-Zustand von Kavernen im Schichtsalz gemäss heutigem Stand der Technik wurde im Rahmen der Expertenberichte Soleförderung Rütihard durch die Firma DEEP.KBB beschrieben [15]. Generell muss bei einer Kaverne im gesamten Lebenszyklus (Betriebs- und Nachsorgephase) die Stabilität gewährleistet sein. Wesentliche Elemente für die Stabilität einer Kaverne sind in Abbildung 13 dargestellt:

Die wesentlichen Anforderungen sind:

- Die Langzeitstabilität der Haupttragelemente des umgebenden Gebirges, das aus der Salz-Hangendschwebe, der Salz-Liegendschwebe und den umgebenden Pfeilern besteht.
- Die Konturstabilität einer Kaverne, so dass sich kein progressiver Scherbruch an der Kavernenwand ereignet.

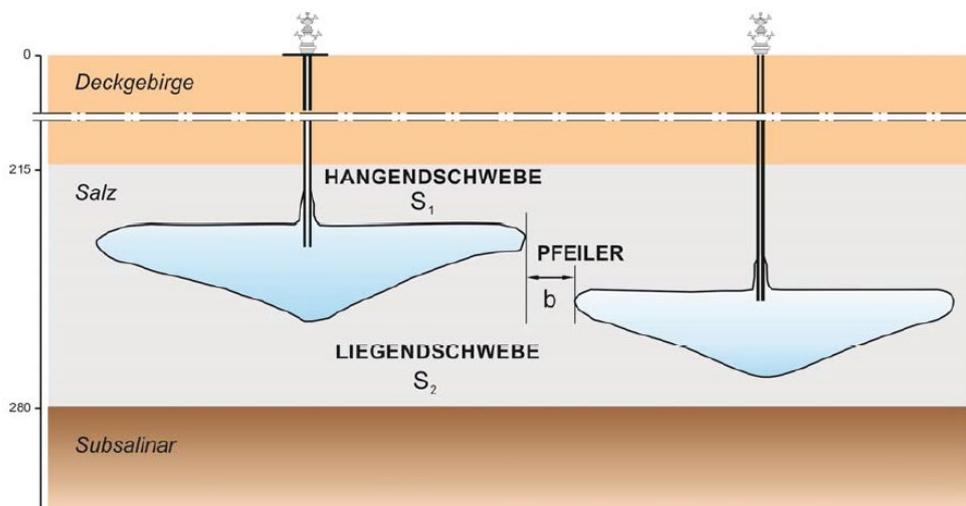


Abbildung 13: Haupttragelemente des umgebenden Gebirges ([15]).

Die dabei einzuhaltenden Abmessungen der Haupttragelemente werden mit Hilfe von gebirgsmechanischen Berechnungen festgelegt. Diese Abmessungen sind gemäss [17], [19] und [19]:

- Kavernendurchmesser: 75 m.
- Hangendschwebe: 10 m.

- Bohrlochabstand: 115 m (ergibt eine Pfeilerbreite von 40 m).
- Kavernengeometrie: ein nach unten zugespitzter Zylinder.

## **7.2.2 Ist-Soll-Analyse**

Die Ist-Soll-Analyse für die Kavernen basiert auf der Auswertung von Messresultaten aus den Solfeldern Sulz und Grosszinggibrunn, die im Rahmen der Messkampagne 2021/2022 erhoben wurden. Die Resultate werden in folgenden Beilagen zusammengefasst:

- Beilage 2
- Beilage 3
- Beilage 4

### **7.2.2.1 Kavernendurchmesser und Pfeilerbreite**

Die Beurteilung der Kavernendurchmesser und Pfeilerbreiten erfolgt auf den gemessenen Ausdehnungen der Kavernen in den Solfeldern Sulz und Grosszinggibrunn (Beilage 3). In diesem Plan ist die maximale Ausdehnung als Kontourlinie (blau für Messresultate aus der Messkampagne 21/22 und grau für ältere Messresultate) dargestellt. Die maximal erlaubten Durchmesser (75 m, rot) und Bohrlochabstände (115 m, grün) sind bezogen auf den Rohrschuh der LZRT eingezeichnet. Eine Ausnahme stellt die Zugangsbohrung S108 dar, für die keine Bohrlochverlaufsmessungen vorliegen. Dort sind die Sicherheitspuffer bezogen auf den Bohrlochansatzpunkt an der Oberfläche angegeben.

Im Solfeld Sulz weisen alle Kavernen mit Ausnahme von S92 einen Durchmesser auf, der grösser ist als 75 m. Teilweise ist der Kavernendurchmesser sogar grösser als 115 m; teilweise sind zwischen benachbarten Kavernen gar keine Pfeiler mehr vorhanden. Die Kavernengruppen S85 – S86 – S89 – S90, S87 – S88 und S109 – S110 – S111 wurden in der Vergangenheit bewusst quergelaugt.

Im Solfeld Grosszinggibrunn sind die Durchmesser der inaktiven Kavernen S132 und S135 zu gross. Die anderen inaktiven Kavernen weisen konforme Durchmesser auf. Bei den aktiven Kavernen im Grosszinggibrunn weisen die S131, S137, S145 und S149 einen zu grossen Durchmesser auf. Die anderen aktiven Kavernen im Grosszinggibrunn zeigen teilweise präferentielle Wachstumsrichtungen mit sektoriell zu grossen Ausdehnungen (S143, S146, S150).

Folgende Ursachen sind aus unserer Sicht, immer gemessen am heutigen Stand der Technik, für die Abweichungen zum Soll-Zustand verantwortlich:

- Die Tiefenbereiche / Solschritte mit zu grossen Kavernendurchmessern wurden offensichtlich zu lange gesolt. Es muss vermutet werden, dass die kontinuierliche Überwachung der Hohlraumentwicklung im Betrieb resp. die daraus zu ziehenden Anpassungen (z.B. mittels Massenbilanzierung und/oder regelmässigen Hohlraumvermessungen) nicht konsequent umgesetzt wurden.
- Die Planung der Anordnung der Zugangsbohrungen im Solfeld wurde unter der Annahme eines vertikalen Bohrlochverlaufs durchgeführt. Die Bohrlochverlaufsmessungen zeigen allerdings, dass die Zugangsbohrungen in den meisten Fällen einen oft deutlich gekrümmten Bohrlochpfad aufweisen. Diese Krümmung wurde bei der Umsetzung nicht berücksichtigt, so dass teilweise der erforderliche Abstand zwischen benachbarten Kavernen auf Niveau Rohrschuh bereits zu Laugungsbeginn verletzt wurde.
- Die Distanzen zwischen den Bohransatzpunkten sind bereichsweise deutlich kleiner als 115 m, z.B. im nordwestlichen Teil des Solfelds Sulz.

#### 7.2.2.2 Hangendschwebe

Die Beurteilung der Hangendschwebe erfolgt auf der Basis der Hohlraumvermessungen und dem Schichteinfallen des Top Salzlagers gemäss dem geologischen 3D-Modell der SSAG. Die Mächtigkeit der Hangendschwebe wurde für jeden Messpunkt berechnet und dargestellt (Beilage 4). Auf dem Plan bedeuten blaue Punkte eine negative Hangendschwebe, d.h. die Kaverne erstreckt sich ins Deckgebirge (Obere Sulfatzone); rote Punkte zeigen eine Hangendschwebe von 0 – 5 m an; orange Punkte von 5 – 10 m an und grüne Punkte von mehr als 10 m an.

Im Solfeld Sulz wird das heutige Kriterium der Hangendschwebe (mindestens 10 m) mehrheitlich verletzt. Besonders gravierend ist die Situation in den Kavernen S90 und S109 (Teilverbruch vermutet, vgl. Kap. 7.2.2.3), S125 und S126 (Teilverbruch nachgewiesen) sowie S127 und S128. Dort ist keine Hangendschwebe mehr vorhanden und das Kavernendach kommt in das Deckgebirge (Obere Sulfatzone) zu liegen. Generell fällt weiter auf, dass die Hangendschwebe insbesondere im Süd-Sektor der betroffenen Kavernen reduziert ist. Bei anderen Kavernen hingegen wird das Kriterium der Mächtigkeit der Hangendschwebe lediglich lokal im Bereich des Kavernenhalses nicht eingehalten.

Im Solfeld Grosszinggibrunn ist die Hangendschwebe lediglich bei der Kaverne S134 stark reduziert. Die anderen Kavernen verfügen über eine ausreichende Hangendschwebe.

Folgende Ursachen sind aus unserer Sicht, immer gemessen am heutigen Stand der Technik, für die Abweichungen zum Soll-Zustand zu nennen:

- Der letzte Solschritt wurde zu lange gesolt resp. zu wenig engmaschig überwacht, so dass sich das Kavernendach in die Obere Sulfatzone ausbreiten konnte.
- Bei der letzten Soletappen im Sulz wurde das geneigte Schichteinfallen des Salzdaches ungenügend berücksichtigt.
- Vermutlich gab es bei einigen Kavernen auch Dichtheitsprobleme beim Rohrschuh der LZRT, so dass das Stickstoff-Blanket entweichen konnte und sich die Kaverne in erster Linie entlang der Bohrung nach oben entwickelt hat.

### **7.2.2.3 Teilverbrüche von Kavernen**

Im Rahmen der Messkampagne 2021/2022 wurden im Solfeld Sulz zwei teilverbrochene Kavernen detektiert:

#### Bohrung / Kaverne S109

Die Bohrung ist 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 (Abbildung 14). Die Höhe des Verbrauchs kann aufgrund der fehlenden Befahrbarkeit nicht ermittelt werden.



Abbildung 14: Videoaufnahme (axial nach unten) 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. Bohrlaufaufnahme: Terratec Geophysical Services GmbH.

#### 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, welcher anstelle der Kaverne vermessen wurde (vgl. Abbildung 15). Sein 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). Der Hohlraum ist mit (Gips-, Anhydrit-, Calcit- und Halit-) gesättigtem Wasser gefüllt und aufgrund seiner Erstreckung bis in die Dolomitzone mit dem Muschelkalk-Aquifer verbunden.

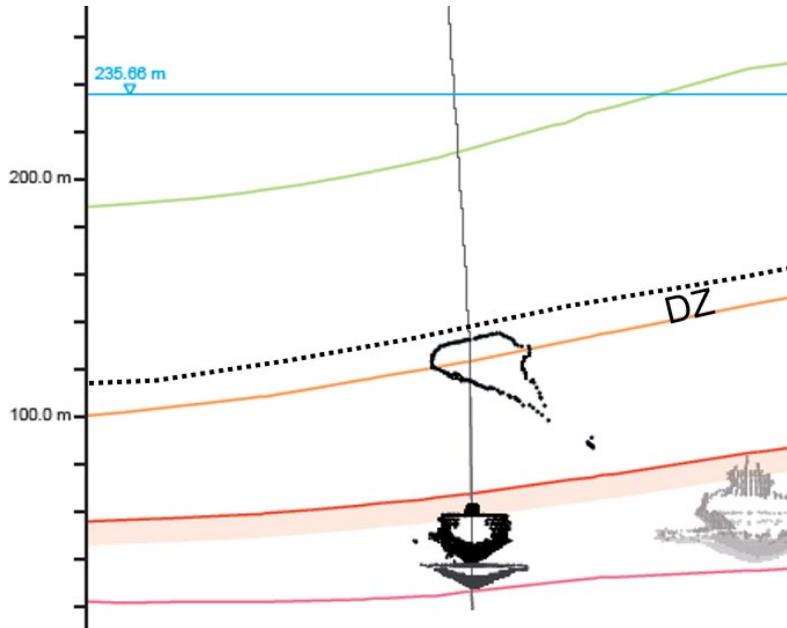


Abbildung 15: S-N-Profil (nicht massstäblich) durch die Kaverne S126. Unten ist die letzte durchgeführte Hohlraumvermessung der ursprünglichen Kaverne sichtbar, diese war zum Zeitpunkt der Messung bis fast in das Dach des Salzlagers (rote Linie) gesolt. Der durch den Kaverneteilverbrauch entstandene und vermessene Hohlraum ist oben dargestellt. Er reicht vermutlich bis in das Dach der Dolomitzone («DZ»). Am rechten Bildrand ist die benachbarte Kaverne S125 angedeutet.

Um ein Verständnis zur zeitlichen Entwicklung der Verbrauchprozesse in S126 zu erhalten, wurde sechs Wochen nach der Entdeckung des neu entstandenen Hohlraums eine Folgevermessung vorgenommen. Dabei wurde im Firstbereich des Hohlraums eine laterale Erweiterung des Hohlraums nachgewiesen.

Die Ursachen und die involvierten Prozesse für diese Teilverbrüche von Kavernen werden gegenwärtig mit Hilfe von gebirgsmechanischen Modellrechnung untersucht [20].

#### Erste Ergebnisse und vorläufige Schlussfolgerungen

Im Auftrag der Schweizer Salinen AG führt die AFRY gebirgsmechanische Modellierungen durch mit dem Ziel den Teilverbruch der Kaverne S126 modelltechnisch nachzubilden und eine Prognose abzugeben, ob sich aus diesem Teilverbruch ein Tagbruch entwickeln kann. Der Auftrag, die Grundlagen und Annahmen, die Methodik sowie die ersten Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellierung sind in der Aktennotiz AFRY vom 13.10.2022 aufgeführt (Beilage 5). Die ersten Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellierungen zeigen folgendes:

- Mit den angenommenen, vereinfachten Annahmen resultieren mit dem Modell für die Kaverne S126 Instabilitäten. Aktuell wurden verschiedene Ausgangszustände, Abbausequenzen und Spannungsverhältnisse untersucht.
- Die durchgeführten gebirgsmechanischen Modellrechnungen zeigen für variierende in-situ Spannungsverhältnisse und Kaverneninnendrucke einen Stillstand des Teilverbruchs unterhalb des Hauptmuschelkalks. Dieses Ergebnis deckt sich mit der aktuellen Situation insofern, dass aufgrund des geologischen Schichtaufbaus, der aufgrund von totalen Spülungsverlusten während des Bohrens in diesem kritischen Bereich mit Unsicherheiten behaftet ist, das derzeitige Ende des Teilverbruchs ebenfalls in der Dolomitzone resp. an der Basis der Schinznach-Fm. angenommen wird.
- Die Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellierungen werden plausibilisiert durch einfache Verfüllungsberechnungen, die abhängig vom Auflockerungsfaktor eine Ende des Teilverbruchs im Bereich des Gips-Keupers (Auflockerungsfaktor 1.1) resp. im Hauptmuschelkalk der Schinznach-Fm. (Auflockerungsfaktor 1.2) prognostizieren.

Die ersten Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellierung weisen darauf hin, dass der Teilverbruch zu einem Stillstand gekommen ist. AFRY wird die Ergebnisse noch verifizieren, damit diese vorläufige Schlussfolgerung weiter erhärtet werden kann.

Rein qualitativ lässt sich allerdings bereits jetzt feststellen, dass diese Teilverbrüche durch beeinträchtigte resp. fehlende Haupttragelemente der Kavernen initiiert wurden. Das weitere Hochwandern der Verbrüche ist die Folge einer kontinuierlichen Entfestigung des Deckgebirges durch Wasser- und Soleeinfluss, der durch undichte Bohrungen verstärkt wird.

#### **7.2.2.4 Kavernengeometrie**

Ausgehend von der Idealform einer Kaverne (Zylinder mit zugespitztem Kegel an der Basis) werden aufgrund der Hohlraumvermessungen folgende Feststellungen gemacht:

- Im unteren Bereich des Salzlagers, wo die Kavernensolung gestartet wird, gelang es in praktisch allen Fällen die Idealform einer Kaverne zu erreichen. Die Kavernensolung verlief nach Plan.

- Hier wird vermutet, dass die hohe Salzreinheit und die horizontale Schichtlagerung im unteren Teil des Salzlagers Ursache für den planmässigen und somit kontrollierten Solprozess sind.
- Die Abweichungen zum Soll-Zustand treten insbesondere dann auf, wenn die Kaverne in den oberen Teil des Salzlagers hochgezogen wird.
- Hier wird vermutet, dass neben rein den eigentlichen Solbetrieb betreffenden Faktoren auch geologische Faktoren die Kavernenform im oberen Teil des Salzlagers beeinflussen:
  - o Im oberen Teil des Salzlagers nimmt die Salzreinheit ab. Das Salzlager ist teilweise durch Anhydrit- und Mergellagen verunreinigt.
  - o Der obere Teil des Salzlagers ist regional tektonisch stark beansprucht. Die Schichtlagerung im Salz ist deformiert und verfaltet. Lokal beeinflussen zusätzlich prominente Trennflächen wie Klüfte und Brüche die Kavernengeometrie, was sich in einer präferentiellen Wachstumsrichtung der Kaverne äussert.

### **7.2.3 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz durch DEEP.KBB**

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 ([21] resp. Beilage 6).

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 History Match 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 Über-

einstimmung der simulierten initiale Sumpfsolkavernen mit Vermessungsdaten. Daraus lässt sich ableiten, dass die Planung und der Bau von Kavernen in diesem Teufenbereich mittels Solsimulationen gut vorher-gesagt 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.

#### **7.2.4 Beurteilung Kavernen**

Wir beurteilen den Ist-Zustand der im Solfeld Sulz untersuchten Kavernen mehrheitlich als schlecht. In den meisten Kavernen im Solfeld Sulz werden, immer gemessen am heutigen Stand der Technik, die gebirgsmechanischen Vorgaben für die Haupttragelemente der Kavernen verletzt. Die Auswirkungen davon sind, dass im Solfeld Sulz teilverbrochene Kavernen und anhaltende Oberflächendeformationen beobachtet werden. Beides sind zudem eindeutige Hinweise darauf, dass die Integrität der Kavernen beeinträchtigt ist. Aus unserer Sicht ist der Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz so gravierend, dass sie insgesamt einen Störfall darstellen.

Im Vergleich zum Solfeld Sulz ist der Ist-Zustand im Solfeld Grosszinggibrunn für die Kavernen besser. Die Hangendschwebe ist nur in S134 verletzt. Allerdings gibt es im Grosszinggibrunn einige Kavernen mit zu grossen Durchmessern und präferentiellen Wachstumsrichtungen, die auf geologische Einflüsse zurückzuführen sind. Aus unserer Sicht ist deshalb eine differenzierte Beurteilung der Kavernen zulässig.

### **7.3 Oberflächendeformationen**

#### **7.3.1 Soll-Zustand**

Als Folge der Hohlrumbaueung im Untergrund sind über Solfeldern grundsätzlich Oberflächendeformationen zu erwarten. An der Geländeoberfläche bildet sich ein flacher Senkungstrog, wobei sich die Lage des Senkungszentrums im Schwerpunkt des Salzabbaus befindet.

Im Rahmen der Planung des Bohrfeldes Grosszinggibrunn wurde 2006 eine numerische Senkungsberechnung für das benachbarte Solfeld Sulz durchgeführt, wobei das Modell anhand geodätisch ermittelter Senkungsmessungen (Präzisionsnivelements) kalibriert wurde [21]. Die Senkungsvorausberechnung kam zum Ergebnis, dass am Ende einer 20-jährigen Betriebszeit im Zentrum des Senkungstroges Senkungen in der Grössenordnung von 10 cm resp. ca. 5 mm pro Jahr zu erwarten sind. Vom Senkungszentrum nach aussen nehmen die Senkungsbeträge rasch ab (Abbildung 16). Eine für die Solfeldplanung Rütihard (Gemeinde MuttENZ) durchgeführte analytische Senkungsvorausberechnung kam auf vergleichbare maximale Senkungsraten [23], wobei die prognostizierten Senkungsraten aufgrund der vergleichbaren Tiefenlage der Kavernen sowie der vergleichbaren geologischen

Verhältnisse in einer ersten Näherung auch auf das Solfeld Grosszinggibrunn übertragbar sind.

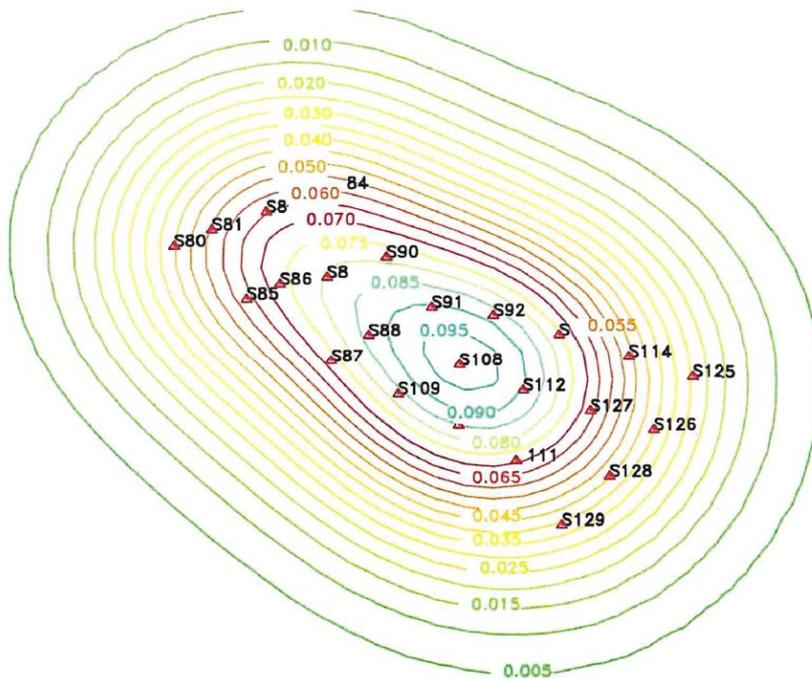


Abbildung 16: Numerisch ermittelter Senkungstrog nach 20 Jahren Betriebszeit für das Solfeld Sulz [21]. Dargestellte Einheit = m.

Neben vertikalen Deformationskomponenten (z.B. Senkung, Schiefstellung) treten über einem Kavernenfeld auch horizontale Deformationskomponenten (z.B. Verschiebungen, Zerrungen, Pressungen) auf [23]. Die Verschiebungen sind in das Zentrum der Senkungsmulde gerichtet.

### 7.3.2 Ist-Soll-Analyse

Die mittels den jährlichen Präzisionsnivellements zwischen 2002 und 2022 gemessenen Senkungen sind in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Isolinen der im Bereich des Solfelds Sulz zwischen 2002 und 2022 (Messperiode 20 Jahre) gemessene Senkungen [cm]. Die in Abbildung 18 dargestellten Messpunkte sind grün unterstrichen. Das dargestellte Koordinatennetz weist eine Intervalllänge von 100 m auf.

Wie die Messungen zeigen, bildet sich das Senkungsmaximum im Bereich der Solkaverne S112 aus. Es wurde in 20 Jahren eine maximale Senkung von rund 20 cm gemessen, was gemittelt einer Senkungsrate im Zentrum des Senkungstrogens von ca. 1 cm pro Jahr entspricht. Somit lässt sich feststellen, dass die gemessene maximale Senkung rund doppelt so gross ist wie numerisch vorausberechnete.

Betrachtet man den Senkungsverlauf von ausgesuchten Messpunkten über die Zeit (Abbildung 18), so fällt eine starke Beschleunigung der Senkungsbewegung in den Etappen 3 und 4 des Solfeldes Sulz seit ca. 2014 auf. Während die Senkungsrate im Zentrum des Senkungstrogens in der Periode 2002 bis 2013 ca. 4 mm pro Jahr betrug, so hat sich diese Rate seit 2014 auf etwa 12 mm pro Jahr verdreifacht. Zusätzlich zeigt sich tendenziell eine erneute Senkungsbeschleunigung seit ca. 2017. Es lässt sich somit feststellen, dass die gemessenen Senkungen deutlich über den prognostizierten Senkungen liegen.

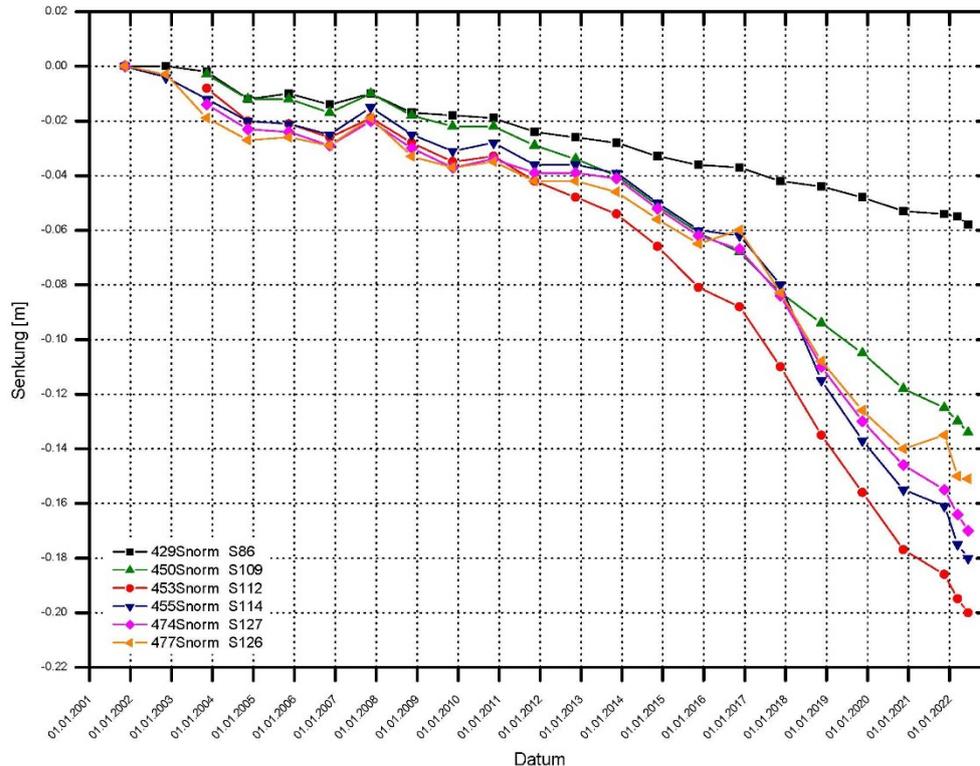


Abbildung 18: Zeit-Senkungs-Diagramm für ausgewählte Messpunkte im Solfeld Sulz im Zeitraum 2002 bis 2022 (Hinweis: Bei den letzten zwei Messungspunkten im Jahr 2022 handelt es sich um zusätzliche Vermessungen mit einer tieferen Genauigkeit.)

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 (Abbildung 19).

Eine Interpretation der bisherigen Verschiebungsmessungen ist aus verschiedenen Gründen schwierig (ausgeprägtes Geländere relief, oberflächliche Prozesse wie z.B. flachgründige Rutschungen etc). Überraschenderweise sind die gemessenen Verschiebungen mehrheitlich 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 Verschiebungsvektoren hingegen eher in den Hang hinein. Ob das gemessene Verschiebungsmuster, dem durch den Salzabbau zu erwartenden Verschiebungsmuster entspricht, sollte im Rahmen einer analytischen Nachrechnung der Geländedeformationen abgeklärt werden.

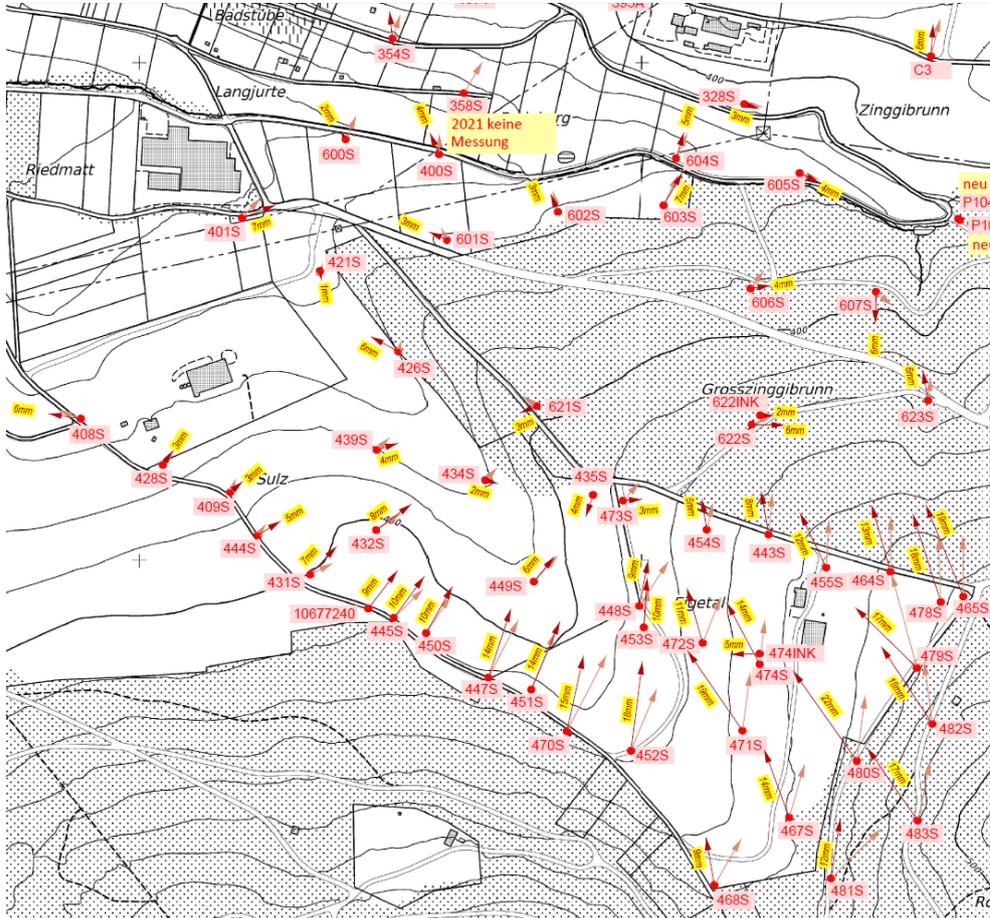


Abbildung 19: Gemessene Verschiebungsvektoren 2019 – 2020 (rosa) und 2019 – 2021 (rot) im Bereich des Solfelds Sulz (Karte nicht massstäblich). Die gemessene Verschiebung für die bislang zweijährige Messperiode beträgt im Bereich des Solfelds Sulz zumeist 2 – 22 mm. Nördlich an das Solfeld Sulz angrenzend zeigen die Bewegungsvektoren in den Gegenhang hinein.

Die mittels zweimaliger Drohnenbefliegung bislang durchgeführten photogrammetrischen Vermessungen liefern aufgrund des zu kurzen Beobachtungszeitraums noch keine signifikanten Deformationsresultate.

### 7.3.3 Beurteilung Oberflächendeformationen

Die gemessenen Senkungsraten und Senkungsbeträge liegen deutlich über den prognostizierten Werten. Dies ist mit grosser Wahrscheinlichkeit auf (1) zu grosse und teilweise verbundene Kavernen, (2) fehlende Salzsweben und (3) fehlenden Druckaufbau in den Kavernen zurückzuführen. Aufgrund der gebietsweise deutlichen Abweichung der gemessenen Oberflächendeformationen zu den prognostizierten Werten liegt für die beiden Solfelder diesbezüglich ein Störfall vor.

## 8. Ursachenanalyse

Auf der Basis der durchgeführten Ist-Soll-Analyse liegen die Ursachen für die Abweichungen zum Soll-Zustand, immer gemessen am heutigen Stand der Technik, primär bei Planungsfehlern, bei inadäquater Ausführung der Zugangsbohrungen, bei Versäumnissen in der Überwachung des Solbetriebes sowie in der teils sehr langen Wartephase nach Produktionsende:

- In der Planungsphase wurden die gebirgsmechanischen Vorgaben (z.B. Abstände Bohransatzpunkte) nicht konsequent umgesetzt. Zudem wurden die oft krummen Bohrlochverläufe nicht antizipiert, so dass die Kavernen noch näher zueinander zu liegen kommen. Ebenfalls nicht antizipiert wurde die präferentielle Entwicklung von Kavernen entlang von bestehenden geologischen Diskontinuitäten (z.B. Brüche).
- In der Bauphase (Bohren) wurde ein Bohrkonzzept umgesetzt, das aus heutiger Sicht zu wenig Sicherheiten und Barrieren für die LZRT vorsah.
- Für die Betriebsphase wird festgestellt, dass sich die Kavernen erwartungsgemäss entwickelt haben, solange der Solprozess im unteren, horizontal geschichteten Bereich des Salzlagers stattfand. Sobald sich die Kavernen in den oberen, stark deformierten und teilweise mit Anhydrit und Mergel verunreinigten Bereich des Salzlagers entwickelten, nahmen die Abweichungen zum Soll-Zustand signifikant zu. Diese Abweichungen zeigen sich in Form von (1) zu grossen Kavernengeometrien, die teils ein präferentielles Wachstum entlang von geologischen Strukturen haben, (2) von Niederbrüchen und (3) vom Verlust der Hangendschwebe bis zu teilverbrochenen Kavernen. Offensichtlich hat in der Betriebsphase keine ausreichende Überwachung der Solprozesse stattgefunden, damit frühzeitig auf diese Abweichungen hätte reagiert werden können.
- Für die Wartephase wird festgestellt, dass bei einigen Zugangsbohrungen und Kavernen im Solfeld Sulz die Wartephase schon sehr lange dauert (fünf Jahre und mehr). In der langen Wartephase, in der sich kein ausreichender und stabilisierender Kaverneninnendruck hat aufbauen können, führten die Leckagen / Undichtheiten zu Fluidströmungen in den Zugangsbohrungen sowie zwischen den Kavernen und beschleunigten auf diese Weise die Schwächung der LZRT. Dadurch wird die Destabilisierung der Kavernen und des Deckgebirges vorangetrieben, was sich in anhaltenden Oberflächendeformationen, in teilverbrochenen Kavernen und einer Chloridbelastung des Muschelkalk-Aquifer manifestiert.

## **9. Schlussfolgerungen**

### **9.1 Beurteilung bezüglich Störfall**

Die Abbildung 20 fasst die Beurteilung bezüglich Störfall zusammen. Ein Störfall tritt dann ein, wenn die festgestellten Abweichungen in der Zugangsbohrung und / oder in der Kaverne negative Auswirkungen haben. Beurteilt werden die Auswirkungen auf das Grundwasser (Muschelkalk-Aquifer), die Auswirkungen auf die Oberflächendehformationen und ob ein Teilverbruch der Kaverne vorliegt.

Auf Basis der vorliegenden Ist-Soll-Analyse kommen wir zum Schluss, dass das Solfeld Sulz ein Störfall darstellt. Die festgestellten Abweichungen zum Soll-Zustand betreffen die Zugangsbohrung und / oder die Kaverne. Die Abweichungen haben negative Auswirkungen auf das Grundwasser (Muschelkalk-Aquifer) und die gemessenen Oberflächendehformationen liegen mehrheitlich über der Prognose.

Im Solfeld Grosszinggibrunn sind Abweichungen zum Soll-Zustand in Form von teils zu grosse Kavernendurchmesser resp. fehlende Hangendschwebe, welche die Kavernenstabilität negativ beeinflussen, feststellbar. Die Zugangsbohrungen im Solfeld Grosszinggibrunn können nicht abschliessend beurteilt werden, da aktuellen Messdaten ausstehend sind. Gestützt auf dem aktuellen Kenntnisstand und der vorläufigen Datenlage werden die Kavernen S141, S142 und S147 (siehe Kapitel 3.3) als Störfälle beurteilt, weil negative Auswirkungen auf den Muschelkalk-Aquifer vorhanden sind. Die anderen Kavernen im Solfeld Grosszinggibrunn werden gestützt auf dem aktuellen Kenntnisstand und der vorläufigen Datenlage nicht abschliessend beurteilt werden.

Solfeld Sulz		S085	S086	S087	S088	S089	S090	S091	S092	S108	S109	S110	S111	S112	S113	S114	S125	S126	S127	S128	S129
Integrität Zugangsbohrungen	Hydraulisch	ja																			
	Mechanisch	nein	nein	ja																	
Integrität Kavernen	Hydraulisch	ja																			
	Mechanisch	ja																			
Auswirkungen auf die Umwelt	Grundwasserbindung	ja																			
	Senkungsprognose übersch.	nein	nein	ja																	
	Teilverbruch Kaverne	nein																			
Störfall	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Solfeld Grosszinggibrunn		S131	S132	S133	S134	S135	S136	S137	S141	S142	S143	S144	S145	S146	S147	S148	S149	S150			
Integrität Zugangsbohrungen	Hydraulisch	ja																			
	Mechanisch	ja																			
Integrität Kavernen	Hydraulisch	ja																			
	Mechanisch	ja																			
Auswirkungen auf die Umwelt	Grundwasserbindung	ja																			
	Senkungsprognose übersch.	ja																			
	Teilverbruch Kaverne	ja																			
Störfall	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	

Abbildung 20: Zusammenfassende Beurteilung der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn

## 9.2 Handlungsoptionen und Massnahmen

Wir definieren zum jetzigen Zeitpunkt generelle Handlungsoptionen und Massnahmen. Wenn sich alle Beteiligten (SSAG, Behörden und Fachspezialisten) auf ein generelles Vorgehen verständigt haben, werden konkrete Massnahmen zur Behebung der vorliegenden Störfälle definiert.

Grundsätzlich müssen sämtliche Handlungsoptionen und Massnahmen darauf ausgerichtet werden, die festgestellten Prozesse und die damit verbundenen negativen Auswirkungen (Oberflächendehformationen, progressiver Verbruch von Kavernen, Verunreinigung des Muschelkalk-Aquifers durch Sole) so schnell wie möglich einzudämmen und zu eliminieren.

Die Handlungsoptionen und Massnahmen werden durch den teilweise schlechten Zustand der LZRT eingeschränkt. Es wird deshalb empfohlen, die Handlungsoptionen und Massnahmen zusammen mit Fachspezialisten festzulegen, damit keine zusätzlichen Schäden entstehen, welche die Handlungsoptionen einschränken könnten.

Für das weitere Vorgehen schlagen wir folgende Optionen als Sofort-Massnahmen vor, um kurzfristig eine Verbesserung der Situation zu erreichen (Abbildung 21):

- Temporäres Verschliessen der Zugangsbohrungen im Bereich des Rohrschuhes mithilfe von Packern oder Verschlussstopfen zur Eindämmung von Fluidströmungen und im Besten Falle zum Aufbau eines Kavernendruckinnendruckes.
- Installation eines zusätzlichen Schutzrohres oder von Reparaturoelementen zur Abdichtung von Leckagen in der LZRT.

Als langfristige Massnahmen zum Verschliessen der Zugangsbohrungen und Kavernen schlagen wir vor folgende Optionen vor:

- Verfüllung der Zugangsbohrung und Stilllegung der Kaverne gemäss Stand der Technik [1].
- Verfüllung der Kaverne und der Zugangsbohrung mit einem geeigneten Feststoff. Hierbei ist zu bemerken, dass die Feststoffverfüllung von Kavernen ein aktuelles Forschungsfeld des Solution Mining Research Institute (SMRI) darstellt und es deshalb noch keine konsolidierten Empfehlungen gibt.



Abbildung 21: Massnahmenplan für das weitere Vorgehen.

Unabhängig von Sofort-Massnahmen und langfristigen Massnahmen sind umgehend Überwachungsmassnahmen umzusetzen:

- Redundante Überwachung der Oberflächendeformationen.
- Mikroseismische Überwachung zwecks Erkennung und Lokalisierung von bruchhaften Prozessen im Bereich der Kavernen.
- Grundwassermonitoring mit dem Ziel die Ausbreitung von hochkonzentrierter Chloridlösung zu überwachen.

## 10. Quellenverzeichnis

- [1] GEOTEST AG (2021): Generelles Überwachungs- und Nachsorgekonzept für die Solfelder der Schweizer Salinen AG im Kanton Basel-Landschaft.
- [2] Schweizer Salinen AG (2020): Grosszinggibrunn, Sulz: Undichtigkeiten und Verbindungen zwischen Kavernen – aktueller Kenntnisstand (Akttenotiz inkl. Plan Sulz, GZB: Verbindungen Bohrlöcher (19.09.22), unveröffentlicht).
- [3] GEOTEST (2018): MuttENZ, Aufarbeitung Sole-Austritt Sulzhof (Bohrloch S87) – Schlussbericht vom 9. August 2018.
- [4] GEOTEST (2021): MuttENZ, Bohrfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn, Phase 1. Beschreibung der Tabelle zur Kavernenbeurteilung.
- [5] Löw, S., Maissen, J. (2020): Zusammenfassende Bewertung der Expertenberichte Soleförderung Rütihard. Erstellt für: Trägerschaft der Dialoggruppe zum Projekt Salzabbau auf der Rütihard – Version vom 19. Oktober 2020.
- [6] Nagra (2008): Technischer Bericht 08-04, Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager, Geologische Grundlagen.
- [7] Bitterli, P. & Fischer, H. (1984): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000, Blatt 80 Arlesheim (LK 1067) inkl. Erläuterungen. Herausgeber: swisstopo.
- [8] Pfirter, U. (1982): Zwischenbericht Bearbeitung Bohrung S84 (Projekt Adlerhof).
- [9] Gregorczyk Geologie (2022): Geologische Analyse von Bohrlochdaten im Solfeld Grosszinggibrunn 2 sowie Vergleich mit Rütihard (S156 und S157) und Sulz 1 (S84) (Bericht, unveröffentlicht).
- [10] Jordan, P. (2016): Reorganisation of the Triassic stratigraphic nomenclature of northern Switzerland: overview and the new Dinkelberg, Kaiseraugst and Zeglingen formations. *Swiss Journal of Geosciences*, 109:241-255, DOI 10.1007/s00015-016-0209-4.
- [11] Widmer, T. (1991): Zur Stratigraphie und Sedimentologie der Anhydritgruppe (Mittlere Trias) in der Region Liestal-Arisdorf (Baselland, Nordwestschweiz). *Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, Lieferung 79*.
- [12] 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.
- [13] GEOTEST (2022): MuttENZ, Solfeldintegrität Sulz / Grosszinggibrunn. Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung (vorläufige Beurteilung).
- [14] GEOTEST (2021): MuttENZ, Bohrfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn, Sicherheitskonzept Messkampagne 2021.

- [15] DEEP.KBB (2019): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. Bau und technischer Betrieb Soleförderung.
- [16] Fetter, C.W. (2001). Applied Hydrogeology. Fourth Edition.
- [17] Dreyer, W. (1980): Gutachten zur Dimensionierung von Solegewinnungskavernen im Salzareal Eigental.
- [18] Rokahr, R. (2005): Gebirgsmechanische Auslegung des Solegewinnungsfeldes Grosszinggibrunn.
- [19] IUB GmbH Institut für unterirdisches Bauen (2013): Gutachterliche Stellungnahme zum Bruchverhalten der Kavernen beim Überschreiten der Auslegungsdaten.
- [20] AFRY (2022): Aktennotiz – Gebirgsmechanische Modellierungen.
- [21] DEEP.KBB (2022): Untersuchungen zum Ist-Zustand der Kavernen im Solfeld Sulz – Zwischenbericht.
- [22] Rokahr, R. (2006): Prognose der zu erwartenden Oberflächensetzungen des Kavernenfeldes Grosszinggibrunn auf der Grundlage numerischer Berechnungen.
- [23] GEOTEST (2020): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. Senkungen und Bergschäden.