

BEURTEILUNG DES SOLTECHNISCHEN SALZABBAUS SOWIE DER AUSWERTE- UND DOKUMENTATIONSVERFAHREN IN DEN FELDERN SULZ UND GROßZINGGIBRUNN VON 1980 BIS HEUTE

HIER: ZUSAMMENFASSENDE SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Dr. Andreas Reitze (Markscheider)

Dr. Fritz Heinz Wilke (Dipl.-Geol.)

31. Oktober 2022

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Aufgabenstellung	3
3.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen aus Beobachtungen an Einzelkavernen	4
3.1	Geologie	4
3.2	Gebirgsmechanik.....	5
3.3	Soltechnik während der Sumpfsolphase	6
3.4	Überwachung der Kavernenentwicklung, Soltechnik	6
3.5	Datenerfassung	8
3.6	Sonarvermessungen	9
3.7	Strategie Blanket, Einstellung und Kontrolle	10
3.8	Bilanzierung Salzproduktion vs. Hohlraumvolumen	10
3.9	Insgesamte Solstrategie	11
3.10	Durchführung und Dokumentation der Kavernenvermessungen	11
3.11	Erfassung und Vorausberechnung von Bodenbewegungen	12
3.12	Durchführung von SOLL-IST-Vergleichen.....	12
3.13	Einbindung der Bewilligungsbehörden.....	12
4.	Literaturverzeichnis	13

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nördliches Konzessionsgebiet der Saline Schweizerhalle (Kanton BL, blau umrandet) mit Lage des aktuellen Solfeldes Grosszinggibrunn (grün) sowie der nicht mehr aktiven Solfelder (rot) der Saline Schweizerhalle. Die beiden jüngsten Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn liegen im Tafeljura, südöstlich des Muttenzer Dorfkerns (GEOTEST AG, 2022-06a) 1

Abbildung 2: Vorgehensweise Soltechnik, Vereinfachte Darstellung in Planung und Durchführung, letztere im ständigen Kreis während der gesamten Dauer des Solprozesses einer Kaverne 7

1. Einleitung

Die Schweizer Salinen AG (SSAG) baut in den Solfeldern Sulz und Großzinggibrunn (GZB) seit 1988 Salz ab, mittels Soltechnik bzw. Lösungsbergbau. Dazu wurden insgesamt 42 Bohrungen abgeteuft, aus denen bis heute etwa 4,4 Mill. t Salz abgebaut wurden, davon 3,1 Mill. t im Solfeld Sulz. Das 2006 in Betrieb genommene Solfeld Großzinggibrunn ist noch aktiv und hat bis Ende 2021 ca. 1,3 Mill. t Salz gefördert.

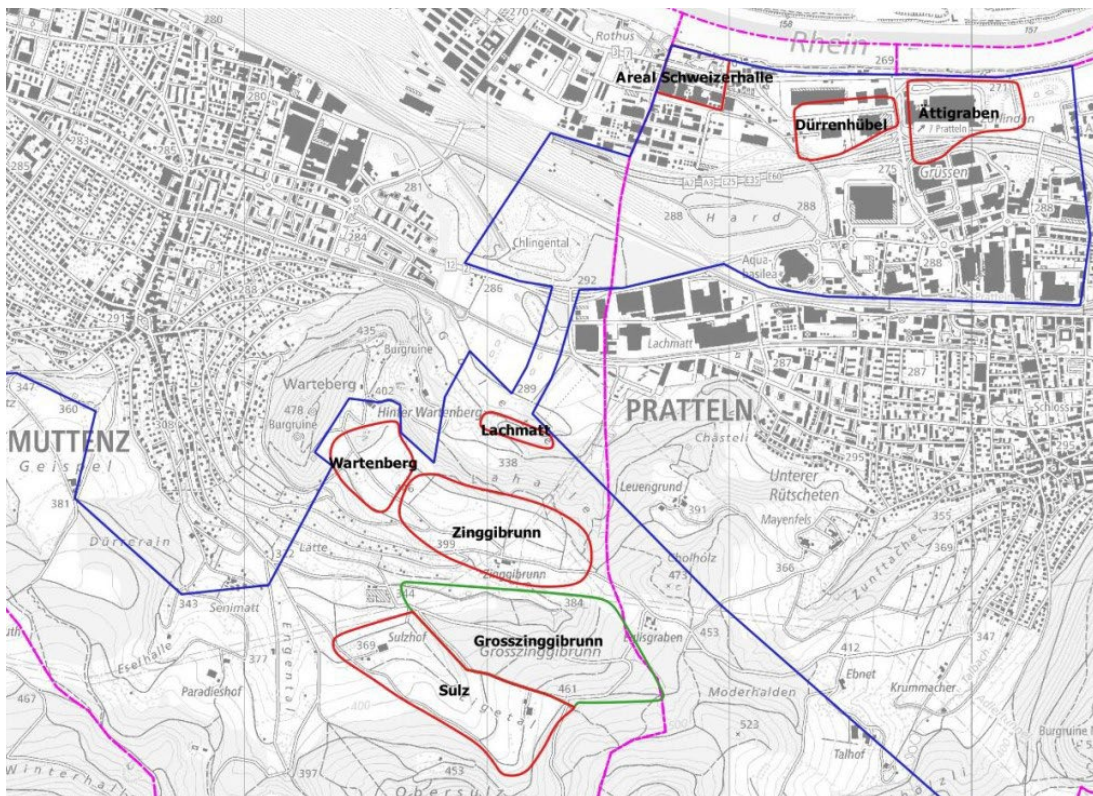


Abbildung 1: Nördliches Konzessionsgebiet der Saline Schweizerhalle (Kanton BL, blau umrandet) mit Lage des aktuellen Solfeldes Grosszinggibrunn (grün) sowie der nicht mehr aktiven Solfelder (rot) der Saline Schweizerhalle. Die beiden jüngsten Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn liegen im Tafeljura, südöstlich des Muttenzer Dorfkerns (GEOTEST AG, 2022-06a).

Ein besonderes Ereignis in diesem Zeitraum ist der 2016 beobachtete Soleaustritt in Form eines Geysirs aus dem Bohrloch einer Kaverne im Solfeld Sulz. Zwei Kavernen (S126, S109) haben sich durch Migration nach außen oberhalb der ursprünglichen Kaverne bewegt. An drei Stellen in beiden Solfeldern wurden Senkungen an der Erdoberfläche in der Größenordnung von 1-3 cm pro Jahr gemessen, die möglicherweise im Zusammenhang mit den Hochbrüchen stehen. Außerdem treten Kavernenverbindungen sowie Undichtigkeiten in Bohrlöchern und Kavernen mit gelegentlichen Verbindungen zum Grundwasser auf.

Parallel zu dem oben genannten Ereignis strebte die Schweizer Salinen AG (SSAG) ein Bewilligungsverfahren für ein neues Solfeld an der Rütihard an. Da die SSAG im Rahmen dieses

Verfahrens auf starken öffentlichen Widerstand stieß wurde der externe unabhängige Experte, Prof. Dr. Simon Löw eingesetzt, um die Sachlage zu bewerten (Löw, 2020). Dieser kam zu dem Schluss, dass zusätzliche geologische Untersuchungen notwendig seien, um zu erkunden, ob im geologisch relativ komplex aufgebauten Gebirge der Rütihard als Teil des Adlerhofgewölbes zukünftig ein sicherer Salzabbau möglich wäre.

Parallel bzw. in Folge des Expertengutachtens (Löw, 2020) wurde im Jahr 2021 gemeinsam mit der Firma GEOTEST AG eine Taskforce eingerichtet, um den komplexen Problemen auf den Grund zu gehen. Primär wurden ursächlich bereits die unzureichende Erfassung von Daten sowie die lange Betriebsgeschichte und deren mangelhafte Dokumentation festgestellt. Im November 2021 wurde eine umfassende Untersuchungskampagne gestartet, die u.a. im Februar 2022 zwei Teilverbrüche in stillgelegten Kavernen zu Tage förderte sowie weitere Abweichungen der Kavernen von ihrem geplanten Zustand.

Das geplante Bewilligungsverfahren für das Solfeld Rütihard wurde für 20 Jahre unterbrochen, damit geologische Fragen geklärt werden können und Unstimmigkeiten zwischen externen Experten und den Salinen ausgeräumt werden können.

Gleichzeitig läuft ein Erweiterungsverfahren der Konzession zum Salzabbau der Schweizer Salinen AG im Kanton Basel-Landschaft. Im Rahmen dieses Prozesses ist eine umfassende Untersuchung aller Kavernen, welche nach Ende der soltechnischen Salzförderung in die Nachsorgephase gebracht werden sollen, geplant. Die Konzessionsverhandlungen wurden für ein Jahr sistiert. In dieser Zeit soll die laufende Untersuchungskampagne abgeschlossen und eine umfassende Risikoanalyse erstellt werden.

Umfassende interne, juristische Abklärungen haben gezeigt, dass die Schweizer Salinen AG gegen keine der offiziellen Auflagen seitens der kantonalen Behörden verstoßen hat. Der Schweizer Salinen AG ist es wichtig zu verstehen, ob, neben der juristischen Sicht, die vorliegenden Abweichungen vom Sollzustand bei Anwendung gemäß heute üblichen soltechnischen Standards hätten vermieden werden können und wie die SSAG ihre operativen Richtlinien und Verfahren noch weiter schärfen kann, um ähnliche Situationen in der Zukunft vollständig auszuschließen.

Anmerkung:

Das hier vorliegende Papier umfasst die Aufgabenstellung sowie die zusammenfassenden Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Der Gesamtbericht wird im Anschluss vorgelegt.

2. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des vorliegenden Expertengutachtens lässt sich wie folgt umschreiben:

- Sichtung aller zur Verfügung gestellten relevanten Dokumente.
- Erfassung der im Laufe der Zeit durch die Schweizer Salinen AG angewandten Methoden und Überwachungstechniken im Lösungsbergbau sowie Einordnung im Vergleich zum üblichen Stand der Technik an vergleichbaren Standorten in Europa.
- Beurteilung der von den Schweizer Salinen ergriffenen Maßnahmen, den neuen Richtlinien und interne Reorganisation hinsichtlich ihrer Zukunftsfähigkeit
- Erstellung eines Vorschlags zur Auswertung und Dokumentation der untertägigen Kavernensituation sowie zur Einbindung der Bewilligungsbehörden

Anfang November 2022 soll dem Verwaltungsrat der Schweizer Salinen AG ein Zustandsbericht über die Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn (GZB) vorgelegt werden. Zielsetzung und Inhalte sind in (GEOTEST AG, 2022-06) erläutert.

Im Wesentlichen sollte sich die Aufgabenstellung in die Ausführungen der Geotest AG vom 10.06.2022 (GEOTEST AG, 2022-06a) einordnen. Dort werden die Ursachen in vier Gruppen unterteilt:

- Geologie
- Technisch (Bohrung und Kavernen)
- Technisch (Betrieb und Überwachung)
- Organisatorisch

Die Autoren des vorliegenden Berichtes konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Soltechnik, d.h. die gesamte Technik und alle Nachbardisziplinen die für den Abbau von Salz mittels Lösungsbergbau notwendig sind. Der Begriff „Soltechnik“ taucht in der obigen Auflistung als Unterpunkt der 2. Kategorie auf. Dies ist bereits ein erster Hinweis darauf, dass die Soltechnik in der Vergangenheit bei der Schweizer Salinen AG zwar in ihren Teildisziplinen angewandt wurde, jedoch keine übergeordnete Bedeutung erfahren hat.

Basierend auf den über 30-jährigen Erfahrungen haben die Autoren die Zusammenhänge in den Solfeldern Sulz und Grosszinggibrunn GZB aus soltechnischer Sicht betrachtet und die zugehörigen Nachbardisziplinen entsprechend integriert. Unter Bezugnahme auf die Regelungen des deutschen Bergrechtes wird die untertägigen Kavernensituation für Teilbereiche der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn (GZB) in eine fachlich korrekte Dokumentation überführt.

Die Ergebnisse derzeit laufender Untersuchungen, umrissen in (GEOTEST AG, 2022-03), liegen noch nicht vor. Diese werden unter anderem Nachweise für Verbindungen zwischen den Kavernen und/oder mit dem Aquifer sowie Aussagen über Integritätsprobleme liefern. Die vorliegende Bewertung bezieht sich ausschließlich und bewusst auf die Erkenntnisse der Soltechnik und bedient sich dabei insbesondere aller durchgeführten Hohlraumvermessungen sowie der Produktionsdaten. Ein Abgleich aller Beobachtungen mit den derzeit durchgeführten weiteren technischen Messungen ist im Anschluss zweifellos sinnvoll.

3. Schlussfolgerungen und Empfehlungen aus Beobachtungen an Einzelkavernen

Im Rahmen dieser Expertise wurde an den Beispielen einiger ausgewählter Kavernen die soltechnische Entwicklungsgeschichte rekonstruiert, um daraus Ursachen für ungeplante Kavernenformen und Kavernenentwicklungen zu ermitteln. Entsprechend der Empfehlung von Geotest (GEOTEST AG, 2022-06) wurde angestrebt, die Ursachen der Fehlentwicklungen den nachfolgenden Kategorien

- I. Geologie
- II. Technisch (Bohrung und Kavernen)
- III. Technisch (Betrieb und Überwachung)
- IV. Organisatorisch

zuzuordnen (vgl. Kap. 0).

In den nachfolgenden Abschnitten wird kurz dargelegt, in welchen Teilbereichen, Disziplinen oder Betriebsphasen mögliche Ursachen zu suchen sind. Gleichzeitig werden Empfehlungen gegeben und/oder Ideen aufgezeigt für mögliche Alternativen in den einzelnen Teilbereichen. Diese basieren auf einer ersten, noch relativ oberflächlichen Betrachtung, ohne dass alle Aspekte und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten vollumfänglich berücksichtigt werden. Eine intensivere Einsichtnahme und austauschende Gespräche mit Mitarbeitern vor-Ort, die fast immer äußerst hilfreich und zielführend sind, können mehr Klarheit schaffen und an einigen Stellen auch zu Optimierungen führen.

3.1 Geologie

Im Vergleich zu anderen europäischen und weltweiten Kavernenbetrieben mit Salz in flacher Lagerung sind die geologischen Verhältnisse in den betrachteten Feldern Sulz und GZB aufgrund der Einflüsse alpiner Tektonik und Störungen in rheinischer Richtung verhältnismäßig anspruchsvoll. Dies wird in den bereits durchgeführten und den gegenwärtig geplanten Untersuchungen (GEOTEST AG, 2022-03) sehr deutlich. Der primäre Schichtenaufbau der Salzformation sowie die Veränderungen durch tektonische Vorgänge spielen eine große Rolle, wobei bekannt ist, dass der untere Teil mit hohen Salzgehalten (90%) weitgehend ungestört ist während der obere Teil durch tektonische Bewegungen stark gestörte Merkmale und Salzgehalte von etwa nur 60% aufweist. Zusätzlich wird die gesamte Salzformation durch jüngere tektonische Vorgänge gestört, gekennzeichnet durch Störungssysteme in meist rheinischer Richtung.

Die auffälligste geologische Erscheinung aller untersuchten Kavernen zeigt die S127 mit ihrer im Horizontalschnitt sichtbaren schlitzartigen Kavernenform. Diese Form passt zu der NNW gerichteten bekannten Vertikalstörung durch das Kavernenfeld. Eine derartige Zone in Streichrichtung der S127 (NNW-SSE) gilt es zukünftig sehr behutsam anzugehen oder sogar komplett auszusparen wenn entsprechende Vorerkundungen dafür Anlass bieten. Dies nicht nur weil Kavernen entlang solcher Störungen nach oben ausbrechen können, wie im Beispiel der S127, sondern auch weil die zementierten Verrohrungen in solchen Bereichen zu Integritätsverlusten neigen und weil die Kavernen möglicherweise in Erstreckung solcher Störungen leichter zu Verbindungen neigen.

Bei den horizontalen Übersolungen in allen Phasen des Kavernenbaus können keine primären geologischen Gründe, z.B. horizontale Lagerklüfte oder leichtlösliche Salze, erkannt

werden, die für eine Entwicklung der Kaverne über die angestrebten maximal zulässigen Dimensionen verantwortlich wäre.

Übersolungen in vertikaler Richtung innerhalb der üblicherweise 10 m mächtigen und zu belassenden Salzscheibe sind bei einer Vielzahl der betrachteten Kavernen zu beobachten. Hier sind die bereits genannten tektonisch stark gestörten Bereiche, wie sie um die S127 auftreten, als geologische Einflussfaktoren zu nennen, die eine kontrollierte Entwicklung der Kavernen bis zur Salzscheibe schwierig machen können. Am Beispiel dieser Kaverne lässt sich belegen, dass diese extrem ungewöhnliche Kavernenform im Dachbereich erst nach Überschreiten der Hangendscheibe auftritt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die jetzt vermeintlich geologisch verursachte Übersolung über das geplante Kavernendach hinaus möglicherweise zunächst technisch und betrieblich initiiert wurde. Die Klärung dieses Sachverhalts bedarf einer eingehenderen historischen Analyse.

Auf die weiteren Vorgänge, die auftreten wenn die als Schutzschicht dienende Salzscheibe zum Teil oder ganz entfernt ist, wird hier nicht näher eingegangen. Die Geologie bestimmt den Prozess, das hangende Material fällt in Blöcken, als Grus oder als „sonstiges Sediment“ in die Kaverne; bei Erreichen einer tragfähigen Schicht stoppt der Vorgang bis die Tragfähigkeit der steifen Platte überschritten ist. Dadurch kann es zu plötzlichen Erdfällen kommen, wie in einer Vielzahl von Beispielen weltweit zu beobachten sind (Réveillère, 2021). Mit wenigen Ausnahmen haben alle Fälle gemeinsam, dass die vorgegebenen Rahmenbedingungen (ausreichender Pfeiler und ausreichende Salzscheibe) nicht eingehalten wurden.

Neben den regionalen geologischen und tektonischen Verhältnissen sind für die eigentliche Kavernensolung bau die kleinräumigen geologischen und mechanischen Gegebenheiten im Meter und Dezimeter-Bereich wichtig, wie z.B.:

- Feststoffverteilung im geplanten Kavernenbereich
- Dichtheit, Integrität (in der Bohrung und im 3 D- Raum)
- Kompaktheit, also die Bindung der Schichten zum jeweils Hangenden
- gebirgsmechanische Parameter und Versuche

Für zukünftige Projekte, also neue Kavernen in neuen und bestehenden Feldern ist abzuwägen, welche Detailuntersuchungen bei jeder Kaverne oder stellvertretend für mehrere Bohrungen/Kavernen notwendig sind und durchgeführt werden sollten, um die soltechnischen Planungen und Durchführungen zu optimieren.

3.2 Gebirgsmechanik

Derzeit gelten für die Felder Sulz und GZB die im Jahre 2005 (Rokahr, R.B., 2005) aufgestellten Auslegungen:

- Max Durchmesser: 75 m (bei Bohrlochabstand 115 m und Mächtigkeit der Oberem Sulfatzone > 45m)
- Salzscheibe: 10 m (kann in der letzten Betriebsphase reduziert werden)

Die Anmerkung, dass die Salzscheibe in der letzten Betriebsphase der Kavernenherstellung reduziert werden kann, hat vermutlich dazu geführt, dass ein Hineinsolen in die Salzscheibe betrieblich zugelassen oder sogar veranlasst wurde. Es ist nicht bekannt ob das

Solen der Salzscheibe aktiv veranlasst wurde oder aufgrund von unzureichendem Blanketmanagement oder aufgrund geologischer Phänomene nicht unter Kontrolle zu bringen war.

3.3 Soltechnik während der Sumpfsolphase

Aus der Analyse der betrachteten Kavernen ist abzulesen, dass geplant war, einen möglichst breiten und flachen Sumpf anzulegen mit den zwei wichtigsten Zielen, ausreichend Platz zu schaffen für Unlösliches und die Ausbeute an Salz zu maximieren. Dies ist gängige Praxis in geologisch ähnlichen Lagerstätten mit geringer Salzmächtigkeit.

Aufgrund der geringen Solstoßhöhe und der Tatsache, dass der Ansolwinkel vorab nicht bekannt ist und von Kaverne zu Kaverne variieren kann, ist eine Berechnung oder Abschätzung des Durchmessers oft mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. In der Folge wurden einige Kavernen bereits frühzeitig hinsichtlich ihres Durchmessers weit übersolt und damit schon frühzeitig Verbindungen zu Nachbarkavernen geschaffen. Weiterhin ist auffällig, dass der sogenannte Ansolwinkel, üblicherweise der Winkel im Sumpf bei der ersten Hohlraumvermessung, der anfangs etwa 45° beträgt und mit abnehmender Höhe zu den Rändern der Kaverne immer flacher wird und nahezu 0° erreicht, also horizontal ist. Die Höhe der Kaverne am Rande beträgt nur wenige Dezimeter, maximal 2-3 m. Berechnungen des Durchmesser aus dem produzierten Salz sind infolgedessen extrem unsicher. Weitere Unsicherheitsfaktoren sind, dass die Hohlraumvermessungen aufgrund des physikalisch bedingten Öffnungswinkels des Ultraschallsignals die weit entfernten Bereiche nur unzureichend erfassen können. Bilanzen aus Salzabbau und echometrischem Volumen passen dann meist nicht, da in solchen Situationen zu wenig Volumen nachgewiesen wird. Allein die Salzgehalte der geförderten Sole könnten einen Anhaltspunkt liefern, einen geeigneten Zeitpunkt zu finden für die Unterbrechung der Sumpfsolphase und einer sonartechnischen Kontrolle. Auf jeden Fall sollte dies zu einem früheren Zeitpunkt stattfinden, als es bei den untersuchten Kavernen der Fall war.

Die Anfangshöhe in der Sumpfsolphase lag, abgelesen aus der Liegendgrenze des Unteren Salzlagers und dem Dach der 1. Hohlraumvermessung, meist zwischen 7 und 10 m. Da die Basiswinkel der Sumpfkaverne, abhängig vom Feststoffgehalt und der Höhe des ersten Solstoßes meist sehr groß sind, wird empfohlen über eine geringere Anfangshöhe (2 - 4 m) nachzudenken. Dies sollte mit einer frühzeitigen Überprüfung der Hohlraumentwicklung um Übersolungen bereits in der Sumpfsolphase und Verbindungen zu Nachbarkavernen zu vermeiden. Zusätzlich können dadurch die Salzausbeute vergrößert und die nachfolgenden Solschritte optimiert werden.

Alle in diesem Abschnitt beschriebenen Probleme, die bereits in der Sumpfsolphase hervorgerufen werden, sind dem Betrieb und der Überwachung als Ursache zuzuordnen und haben folglich keine geologischen Ursachen.

3.4 Überwachung der Kavernenentwicklung, Soltechnik

Nicht nur während der im Kapitel 3.3 beschriebenen Sumpfsolphase, die für die gesamte Kavernenentwicklung äußerst wichtig ist, sondern auch zwischen den Hohlraumvermessungen sollten die produzierten Salzmengen dazu verwendet werden, das Hohlraumvolumen zu prognostizieren. Dadurch können entsprechende soltechnische Maßnahmen wie Rohr- und Blanketstandänderungen rechtzeitig ergriffen werden. Ob und inwieweit dies gesche-

hen ist, kann anhand der vorliegenden Daten nur schwierig nachvollzogen werden, insbesondere weil für die Untersuchungen in diesem Rahmen nur Jahrestonnagen zur Verfügung standen.

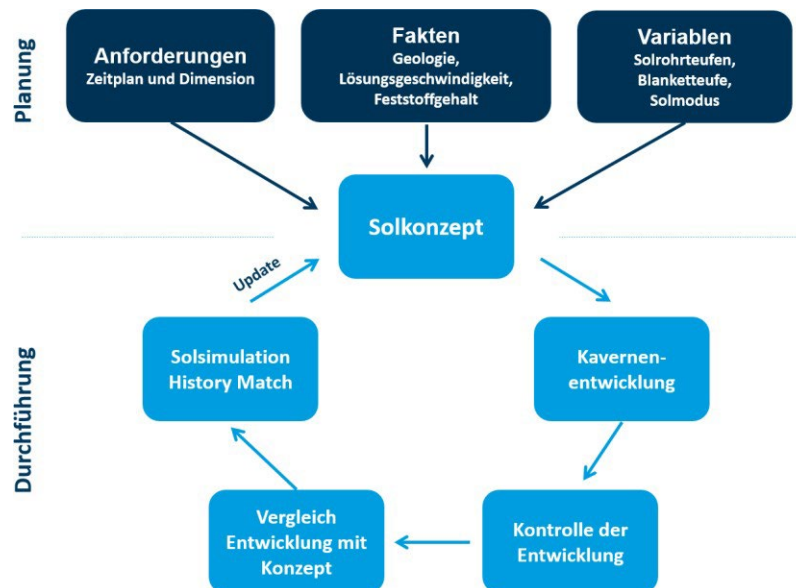


Abbildung 2: Vorgehensweise Soltechnik, Vereinfachte Darstellung in Planung und Durchführung, letztere im ständigen Kreis während der gesamten Dauer des Solprozesses einer Kaverne.

Die grundsätzliche Methodik der soltechnischen Betreuung von Kavernenprojekten wird anhand des „Kreisdiagramms“ (Abbildung 2) veranschaulicht. Es ergibt sich folgender Ablauf, der sich an einer Vielzahl von Solbetrieben bewährt hat, jeweils angepasst an die Besonderheiten der Lokationen und den Anforderungen der Projekte:

1. SOLKONZEPT (initial)
 - Simulation der Kaverne, möglichst bis zur Fertigstellung.
 - Festlegung Rohrstände, Blanketteufen, Solraten, ...
 - Erstellen Bericht oder Tabellen für die nächste Phase
 - Festlegung des nächsten Messtermins und üblicherweise Workover (ggf. mittels Solsimulation, entsprechend Salzabbau, Volumen und Geometrie)
2. KAVERNENENTWICKLUNG
 - Überwachung der Drücke (Blanket, Injektion, Produktion) und der Produktionszahlen (Sole, Wasser), möglichst täglich und in grafischer Form
 - Dokumentation von Workovern (Rohrstände Injektion und Produktion)
 - Dokumentation Blanket-Management (Einstellungen, Messungen, Bewegung von Blanketmedium)
3. KONTROLLE der ENTWICKLUNG
 - Kontinuierlich Überprüfung der Produktionsparameter (siehe 1.)
 - Feststellen von Unregelmäßigkeiten
 - Blanketkontrolle
 - Sonarvermessung (Festlegung der Messteufen, Sonarprogramm), zweckmäßigerweise mit vor-Ort Begleitung

4. VERGLEICH ENTWICKLUNG mit KONZEPT
 - Abgleich Planung und Ergebnisse (z.B. Tabellen, Grafiken)
5. SOLSIMULATION, HISTORY MATCH
 - Simulation der Kavernenentwicklung anhand der historischen Einstellungen und Produktionsdaten
 - Überprüfen Modellergebnis mit Sonarergebnis, gegebenenfalls Anpassung der Parameter
6. SOLKONZEPT (update)
 - Simulation der Kaverne, möglichst bis zur Fertigstellung.
 - Festlegung Rohrstände, Blanketteufen, Solraten, ...
 - Erstellen Bericht oder Tabellen für die nächste Phase
 - Festlegung des nächsten Messtermins und üblicherweise Workover (ggf. mittels Solsimulation, entsprechend Salzabbau, Volumen und Geometrie)

Um die Dauer bis zur Festlegung der Rohrstände nach einer Sonarvermessung möglichst gering zu halten, sollte eine Aktualisierung der Solsimulation bereits während der Salzproduktion durchgeführt werden. Dadurch kann bereits eine Vorstellung zur möglichen Kavernenform vor der Sonarvermessung erstellt werden. Mit Vorliegen des Feldberichtes kann dieser dann mit der prognostizierten Kavernenform verglichen werden, sodass dann in der Regel unverzüglich Entscheidungen getroffen werden können. Bei leichten Abweichungen kann schnell reagiert werden; bei größeren Abweichungen sollten die Ursachen möglichst näher untersucht werden um eine qualifizierte und nachhaltige Entscheidung herbeizuführen.

Anhand der zur Verfügung stehenden Daten kann festgestellt werden, dass eine Vielzahl von Elementen einer soltechnisch fundierten Vorgehensweise im Betrieb vorhanden sind. So gibt es eine konzeptionelle Solplanung zu Beginn nach Abteufen der Bohrung, jedoch fehlen wesentliche Dinge wie z.B. die Modifizierung und Anpassung des Konzepts falls Hohlraumvermessungen nicht die erwarteten Ergebnisse geliefert haben. Die Kavernendatenblätter in den Lebensläufen der Kavernen vermitteln den Eindruck, dass ein einmal festgelegtes Konzept uneingeschränkt bis zum Ende durchgeführt wird und nicht den neusten Ergebnissen angepasst wird. Eine derartig starre Vorgehensweise kann als eine der Ursachen von Unregelmäßigkeiten und ungewünschten Kavernenentwicklungen identifiziert werden.

Eine systematische und nachvollziehbare Abarbeitung der soltechnischen Gewinnung von Sole und Salz entsprechend der Abbildung 2 erscheint in den Feldern Sulz und GZB nur unzureichend erfolgt zu sein.

3.5 Datenerfassung

Die Datenerfassung und Visualisierung von soltechnischen Parametern ist essentiell, insbesondere hinsichtlich einer Grundlage für Entscheidungen des fortzuführenden Solbetriebs und zwecks einer möglichen Rekonstruktion im Fall von ungeplanten Entwicklungen.

Die übermittelten Dateien, Extrakte aus der Bohr-Datenbank wie z.B. „Ereignisse.csv“, „Rohrstand.csv“ usw. belegen, dass bereits vor ca. 20 Jahren eine Datenbank aufgebaut wurde, diese aber nur genutzt wurde um die Daten zu halten. Fehler in den Datenbeständen (z.B. Punkt oder Komma als Dezimaltrennung) deuten darauf hin, dass die Datenbank nicht oder nur wenig genutzt wurde; zumindest wurden die Teufen nicht weiter genutzt,

um daraus Entscheidungen abzuleiten. Gelegentlich wurden fehlerhafte Daten und Datenlücken festgestellt. Visualisierungen und daraus abzuleitende Konsequenzen für den Weiterbetrieb sind daraus offensichtlich nicht gezogen worden.

Die jährlichen Tonnagen jeder Kaverne wurden zur Verfügung gestellt; die Berechnungen aus injiziertem Frischwasser und Dichte der geförderten Sole standen nicht zur Verfügung.

Hinsichtlich des Blanketspiegel-Niveaus wurden in der Tabelle „Rohrstand.csv“ die Teufen der meist vier eingebauten Röhrchen angegeben, dabei jeweils zwei Röhrchen in geringem Abstand zueinander, um einen Spiegel zwischen den beiden Röhrchen einzustellen. Es wurden jedoch keine Angaben gefunden, welches der zwei Blanket-Niveaus letztlich geplant und umgesetzt wurde. Erst die Ergebnisse der Hohlraumvermessungen lassen erkennen, welcher Blanketspiegel realisiert wurde. Gelegentlich passen die Teufen der Blanketröhrchen nicht zu den Ergebnissen der Hohlraumvermessung.

Um die Solhistorie einfacher und plausibler nachvollziehen zu können, wird empfohlen, insbesondere die Injektionsmengen an Frischwasser, die Dichten der Sole und die Drücke regelmäßig zu erfassen. Üblicherweise geschieht dies bei fast allen europäischen Solbetrieben auf Tagesbasis, insbesondere bei den Betrieben die über Betriebsleitsysteme verfügen. Hinsichtlich Soledichten reichen jedoch, abgesehen von der Sumpfsolphase, größere Zeitabstände.

Es wird empfohlen, eine Datenbank aufzubauen, die alle soltechnischen Parameter auf Tagesbasis und die technischen Parameter (Rohrstände, Blanketstände und -volumina, usw.) zum Zeitpunkt der Änderung erfasst. Außerdem sollte die Datenbank eine grafische Aufarbeitung (Visualisierung) umfassen, um sich ändernde und nicht plausible Betriebsparameter schnell erkennen zu können und im Fall von Unregelmäßigkeiten Maßnahmen zu ergreifen.

3.6 Sonarvermessungen

Die Hohlraumvermessungen, als Kernstück der Kontrolle und Visualisierung der untertägigen Hohlräume, dokumentieren zuverlässig, zumeist wenig zweifelhaft, den geometrischen Zustand der Kaverne in Relation zur Salzformation und zum zugelassen gebirgsmechanischen Rahmen. Lediglich bei großen Entfernungen in Kombination mit einer geringen Kavernenhöhe können Bereiche nicht immer zweifelsfrei erfasst werden.

Bei einigen Kavernen sind die Abstände zwischen den Hohlraumvermessungen mit über 100.000 t, manchmal sogar über 200.000 t Salzproduktion, eindeutig zu groß. Komplexe Zusammenhänge und ein Verständnis der Kavernenentwicklung können dadurch nur bruchstückhaft nachvollzogen werden. So ist häufig zu beobachten, dass nacheinander erfolgte Hohlraumvermessungen nicht überlappen und der fehlende Zwischenraum somit nie gemessen wurde.

Neben den eigentlichen Hohlraumvermessungen fehlen soltechnische Berichte oder zumindest ein Vermerk oder eine Notiz hinsichtlich der Ergebnisse, eventueller Erkenntnisse und notwendiger Anpassungen und Maßnahmen. Das Fehlen ist ein Indiz dafür, dass aus den Ergebnissen der Hohlraumvermessungen bisher keine oder kaum Erkenntnisse gewonnen und Konsequenzen gezogen wurden.

3.7 Strategie Blanket, Einstellung und Kontrolle

Aus dem Solkonzept, sei es das initiale oder später angepasste, ergibt sich neben der Injektionsteufe die äußerst wichtige Teufe der oberen Begrenzung der aktiven Solung, auch als Blanketteufe oder Blanketlevel bezeichnet. Die von den Schweizer Salinen angewandte Methodik zur Blanketeinstellung und -kontrolle wurde 2007 während der SMRI Tagung in Basel (SMRI, 2007) als technologisch fortgeschrittene Methode vorgestellt.

Bei konsequenter Umsetzung dieser eigentlich verlässlichen Methode sollte es möglich sein, die Blanketniveaus in den beabsichtigten Teufen zu halten. Aus den Aufzeichnungen wird nicht deutlich was dazu geführt hat, dass die Kavernen sich über die zugelassene Begrenzung oberhalb der Salzscheibe bis an die Obergrenze des Unteren Salzlagers entwickelt haben. Mögliche Gründe für das Nichteinhalten des gewünschten Blanketniveaus, insbesondere während der letzten Phase bis zum Erreichen der Hangendscheibe sind

- Integritätsprobleme an den Bohrungen, insbesondere deren Zementierung,
- geologische Inhomogenitäten wie z.B. tektonische Störungen,
- keine ausreichenden Mengen an Blanketmedium.

In allen Fällen sollte das Blanketmesssystem mit den Röhren in der Lage sein, festzustellen, dass kein Stickstoff in gewünschter Teufe vorhanden ist.

Inwieweit der gebirgsmechanische Hinweis, dass zum Abschluss die Salzscheibe gesolt werden kann, eine Rolle gespielt hat, kann für die einzelnen Kavernen nicht nachvollzogen werden. Sollte diese Entscheidung in einigen Fällen getroffen worden sein, würde dem Blanketmesssystem bzw. dem betrieblichen Prozessen zu Unrecht ein Versagen zugeordnet werden.

Insofern kann das Überschreiten des geplanten Blanketniveaus oder Kavernendachs bzw. das Unterschreiten der Salzscheibe, insbesondere während der letzten Betriebsphase, abschließend keiner der Kategorien technisch, geologisch oder betrieblich zugeordnet werden.

3.8 Bilanzierung Salzproduktion vs. Hohlraumvolumen

Hinsichtlich einer groben Abschätzung des ordnungsgemäßen Ablaufs des Solprozesses, einer Plausibilitätsprüfung ist es hilfreich, den Quotienten aus Salzproduktion und Hohlraumvolumen zu ermitteln. In Abhängigkeit des Feststoffgehaltes ist eine Zielgröße von 1,9 t/m³ bis 2,1 t/m³ zu erwarten. Aus den zur Verfügung gestellten Unterlagen ist abzuleiten, dass eine derartige oder vergleichbare Überprüfung nicht erfolgt ist. Nachträgliche Berechnungen im Rahmen der untersuchten Kavernen zeigen oft stark abweichende Werte unter- und oberhalb der genannten Zielgröße. Die Ursachen sind vielfältig, wie z.B.:

- sonartechnisch nicht nachweisbare Hohlräume (Hintersolungen, die von der Messachse aus nicht einsehbar sind), meist im Sumpf- oder Dachbereich (> 1,9- 2,1 t/m³),
- fehlerhafte Mengemessungen (< oder > 1,9-2,1 t/m³),
- Abfluss von teilgesättigter Sole oder Wasser zu Nachbarkavernen oder ins Hangende, in einen Aquifer (> 1,9-2,1 t/m³)
- Zufluss von teilgesättigter Sole oder Wasser aus Nachbarkavernen (< 1,9-2,1 t/m³)

Diese einfache Überschlagsrechnung könnte nach jeder Hohlraumvermessung einen Hinweis liefern, ob mit der Kaverne etwas nicht ordnungsgemäß abläuft; im Anschluss kann dann eine Analyse und Fehlerbehebung erfolgen. Bei bekannten Querverbindungen zwischen Kavernen kann diese einfache Überprüfung auch für das Gesamtsystem verbundener Kavernen angewandt werden.

3.9 Insgesamte Solstrategie

In den vorangegangenen Abschnitten wurde auf zahlreiche Teilaspekte des soltechnischen Salzabbaus eingegangen und Empfehlungen und mögliche Verbesserung vorgeschlagen. Es ist jedoch dringend erforderlich, alle Maßnahmen, soweit sie umgesetzt werden sollen, im Gesamtzusammenhang zu sehen und die jeweiligen Auswirkungen auf andere Teilaspekte zu prüfen.

In diesem Zusammenhang wird auf das Blanketmanagement und das bereits vor 2007 etablierte und nach damaligem Standard fortschrittliche Blanketmesssystem (SMRI, 2007) verwiesen.

Während der Untersuchung der ausgewählten Kavernen ist der Eindruck entstanden, dass die Konzeption des soltechnischen Abbaus sich weitestgehend nach den Möglichkeiten richtet, die das Blanketmesssystem bietet. So werden kleinstufige Solschritte weil ein einmal eingebauter äußerer Solstrang mit festen Blanketröhrchen nicht aufwendig ausgebaut und neu installiert wird, vermutlich um Kosten zu sparen. Gelegentlich werden sogar einzelne Stufen ohne Hohlraumvermessungen gesolt und aufgrund der jeweils geringen Höhen kann es dann leicht zu Übersolungen kommen.

Es wird empfohlen, zunächst die komplette Lebenszeit einer Kaverne zu überdenken und zu planen, ohne auf die Zwänge des Blanketmesssystems Rücksicht zu nehmen, und zu prüfen, ob es möglich ist, die den Abbau auf drei, vier oder maximal fünf Stufen zu reduzieren. Dies führt anfangs, insbesondere während der Sumpfsolphase, zu Mehraufwand. Später jedoch wird der Aufwand aufgrund weniger Workover deutlich reduziert. Inwieweit das operative etablierte Blanketmesssystem weiterhin genutzt werden kann, bleibt zu überprüfen.

3.10 Durchführung und Dokumentation der Kavernenvermessungen

Die Durchführung von Hohlraumvermessungen sollte in engeren Abständen erfolgen, so dass keine „unvermessenen“ Bereiche entstehen. Es wird empfohlen, die Ergebnisse in einem einheitlichen Kartenwerk zu dokumentieren und nach jeder Vermessung zu aktualisieren. Nur so können unerwartete und außergewöhnliche Entwicklungen, vor allem in Hinblick auf Annäherungen zu benachbarten Kavernen, sofort erkannt und potentielle Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

Soweit die Dokumentation gemäß den Anforderungen der in Deutschland geltenden Markscheider-Bergverordnung erfolgt, ist von einer inhaltlich und fachlich geeigneten Dokumentation auszugehen, aus der auch alle für einen ordnungsgemäßen Betrieb relevanten Informationen (z.B. Kavernendimensionen, Aussolgrenzen sowie Abstände zwischen benachbarten Kavernen) abgeleitet werden können.

Zur Umsetzung der sich daraus ergebenden Auswerte- und Darstellungssystematik sind folgende Maßnahmen erforderlich, die bisher nur teilweise oder nicht durchgeführt wurden:

- Darstellung der untertägigen Situation in einem einheitlichen, übergeordneten Koordinatensystem (Lage und Höhe)
- Berücksichtigung der Bohrlochabweichungen
- Umrechnung der Vermessungsergebnisse auf „Karten-Nord“ des verwendeten Koordinatensystems.

3.11 Erfassung und Vorausberechnung von Bodenbewegungen

Bei neuen Solfeldern wird empfohlen, im Vorfeld die zu erwartenden Bodenbewegungen für einen prognostizierten Betriebszeitraum (z.B. 30 Jahre) vorauszuberechnen. Hierfür stehen bewährte Verfahren zur Verfügung.

Eine regelmäßige messtechnische Ermittlung (jährlich) der Bodenbewegungen, insbesondere von Senkung und Horizontalverschiebung, kann durch konventionelle Nivellements und Lagemessungen oder auch durch radarinterferometrische Auswertungen erfolgen. Durch einen Vergleich der messtechnisch ermittelten Werte mit den Ergebnissen der Vorausberechnung können Bereiche identifiziert werden, die ein von der Planung signifikant abweichendes Verhalten aufweisen.

3.12 Durchführung von SOLL-IST-Vergleichen

Durchführen von regelmäßigen Soll-Ist-Vergleichen zum Nachweis der Einhaltung der vorhandenen Grenzparameter und Plandaten. Bei einer festgestellten Verletzung von Kriterien sind geeigneten Maßnahmen einzuleiten.

Nach jeder Kavernenvermessung:

- maximaler Durchmesser,
- Schwebenbedingung,
- Abstand zu den Nachbarkavernen

Nach jeder Vermessung von Bodenbewegungen:

- Abweichung zu den Ergebnissen einer Vorausberechnung

3.13 Einbindung der Bewilligungsbehörden

Zur Erhöhung der Rechtssicherheit könnte das bisher mit den Bewilligungsbehörden praktizierte Genehmigungsverfahren inhaltlich an das im deutschen Bergrecht geregelte Betriebsplanverfahren angepasst werden.

Neben der Beschreibung des Umfangs und der technischen Durchführung des Vorhabens sollten u.a. für die in Solung befindlichen Kavernen die Grenzparameter, der Umfang der Kontrollmaßnahmen (z.B. echometrische Kavernenvermessungen) sowie die zu erstellenden Dokumentationen vereinbart werden.

4. Literaturverzeichnis

- GEOTEST AG. (2022-03). *Weiteres Vorgehen für Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn (BL); Aktennotiz 2720047.9 vom 09.03.2022 (unveröffentlicht).*
- GEOTEST AG. (2022-06). *2720047.13 Muttenz, Bohrfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn, Überlegungen zum «Technischen Bericht - Messkampagne GZB / Sulz».*
- GEOTEST AG. (2022-06a). *Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn; Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung (Vorläufige Beurteilung, unveröffentlicht).*
- Löw, P. D. (2020). *Zusammenfassende Bewertung der Expertenberichte Soleförderung Rütihard» (erstellt für: Trägerschaft der Dialoggruppe zum Projekt Salzabbau auf der Rütihard, Professur für Ingenieurgeologie der ETH Zürich, 19. Oktober 2020).*
- Réveillère, B. J. (2021). *Past Salt Caverns Incidents Database Part 2: Sinkholes, Major Block Falls, Roof Falls, Casing Overstretch, Hydraulic Connections and Unexpectedly Fast Creep.* SMRI Research Report RR2021-3.
- Rokahr, R.B. (2005). *Gebirgsmechanische Auslegung des Solegewinnungsfeldes Grosszinggibrunn.*
- SMRI. (2007). *Practical Aspects of Solution Mining, CLASS PAPERS - SPRING 2007.* Basel, Switzerland.

Zusammenfassende Bewertung der Expertenberichte Soleförderung Rütihard

erstellt für:

Trägerschaft der Dialoggruppe zum Projekt Salzabbau auf der Rütihard

Erstellt durch:

Prof. Dr. Simon Löw

Jasmin Maissen

Professur für Ingenieurgeologie der ETH Zurich

19. Januar 2021

INHALTSVERZEICHNIS

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

1 Einleitung

1.1. Ausgangslage und Auftrag

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

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

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

Der unterzeichnende Experte wurde aufgrund des Entscheides der Dialoggruppe vom 29. August 2019 im Dezember 2019 von der Trägerschaft Dialoggruppe Rütihard¹ beauftragt, diese Aufgaben wahrzunehmen.

1.2. Bearbeitung

Im Zeitraum von Januar bis Juni 2020 erfolgte - trotz Einschränkungen durch die Corona Pandemie - die weitere Bearbeitung aller acht Expertenberichte im Auftrag der Schweizer Salinen AG, sowie die Überprüfung und Bewertung der ersten fünf Expertenberichte durch den unterzeichnenden Experten. Diese Überprüfung basierte neben dem Studium der vorgelegten Berichte auf einer detaillierten Analyse von

¹ Zusammengesetzt aus Einwohnergemeinde Muttenz, Bürgergemeinde Muttenz und der Schweizer Salinen AG

Primärdaten und -Berichten zum Salzabbau im Gebiet der Saline Schweizerhalle. Da das Bohrfeld Grosszinggibrunn heute in Betrieb steht und in einer geologisch vergleichbaren Situation wie die Rütihard liegt, wurden für eine Beurteilung der für die Rütihard geplanten Methoden und resultierenden Risiken auch Datensätze dieses Bohrfeldes analysiert und am 24. Juni 2020 vor Ort begutachtet. Der Trägerschaft wurden in dieser Periode die Resultate der Überprüfung der ersten fünf Expertenberichte zur Kenntnis gebracht.

Am 30. Juni wurden die Medien und die Dialoggruppe Rütihard darüber informiert, dass die Schweizer Salinen aus unternehmerischen Gründen den Entscheid getroffen hatten, das geplante Projekt zur Soleförderung unter der Rütihard per sofort zu sistieren und für mindestens 20 Jahre zurückzustellen. Am 11. August präsentierte der unterzeichnende Experte der Trägerschaft eine Zusammenfassung der dazumal vorliegenden Bewertungen der Expertenberichte sowie seine ersten Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Die Trägerschaft hat im Anschluss an diese Sitzung entschieden, diese Bewertungen, Schlussfolgerungen und Empfehlungen in einem Schlussbericht zu dokumentieren und zu veröffentlichen.

1.3. Verwendete Unterlagen

1.3.1. Berichte der Schweizer Salinen AG

Die verwendeten Unterlagen für die vorliegende zusammenfassende Bewertung der geologischen Risiken und Chancen eines Salzabbaus auf der Rütihard beinhalten die Expertenberichte, welche durch Auftragnehmer der Schweizer Salinen AG für das Projekt Soleförderung auf der Rütihard erstellt wurden. Die nachfolgend gelisteten Expertenberichte 1 bis 5 wurden für die vorliegende Bewertung im Detail geprüft, die Expertenberichte 6 bis 8 wurden gesichtet, aber nicht im Detail geprüft:

1. ExB-1 Bau und technischer Betrieb Soleförderung, DEEP.KBB GmbH, 15.11.2019
2. ExB-2 Regionale Geologie, GEOTEST. Zollikofen, 20. November 2019.
3. ExB-3 Hydrogeologie, GEOTEST. Zollikofen, 22. April 2020.
4. ExB-4 Gebirgsmechanische Bewertung, Institut für Gebirgsmechanik IUB GmbH, 22.10.2019
5. ExB-5 Seismizität, GEOTEST. Zollikofen, 28. Januar 2020.
6. ExB-6 Senkungen und Bergschäden, GEOTEST, 15. Juni 2020.
7. ExB-7 Hanginstabilität / Naturgefahren, GEOTEST, Zollikofen, 01. Mai 2020.
8. ExB-8 Geologische Schadensfälle im Zusammenhang mit Eingriffen in den Untergrund im Grossraum Basel, GEOTEST. Zollikofen, 20. Februar 2020.

Wichtig für den vorliegenden Bericht sind zudem eine große Anzahl weiterer technischer Detailberichte, welche dem unterzeichnenden Experten als vertrauliche Dokumente von der Schweizer Salinen AG zur Verfügung gestellt worden sind:

9. 29 technische Detail-Berichte der Schweizer Salinen AG (vertraulich, nicht zitiert)
10. 15 Bohrberichte (vertraulich, nicht zitiert)
11. 5 umfangreiche Datensätze zur Soleförderung und Überwachung des Kavernenfeldes von Grosszinggibrunn (vertraulich, nicht zitiert)

1.3.2. Allgemeine Literatur

Allgemein zugängliche Literatur wurde für diese Bewertung ebenfalls verwendet. Es wurden internationale Literatur zur Salzförderung und allgemeine Grundlagen zur lokalen Geologie, Seismizität und Hydrogeologie, insbesondere hydrogeologischen Berichten der Universität Basel, welche im Auftrag des Kantons und der Gemeinde Muttenz erstellt worden sind beigezogen. In diesem Schlussbericht zitiert sind:

1. Huggenberger P., Affolter A., Zechner E., Dresmann H. (2009) Stationär kalibriertes Grundwassermodell Muttenz unteres Birstal. Bericht Geologisches Institut Universität Basel, Baugrundarchiv Basel Muttenz-187, pp. 31.
2. Voegeli, S. (2017) Salt Cavern Failure and Sinkhole development. KDHE Geology & Well Technology Section Fall Seminar, August 29 th & 30 th , 2017

2 Geologische Grundlagen

2.1. Bedeutung des geologischen Modells für den Salzabbau

Der Bericht ExB-1 diskutiert in sehr ausführlicher und vollständiger Art und Weise den Stand der Technik für Planung, Bau, Betrieb und Verwahrung von Salzförderkavernen. Der Bericht ExB-1 ist wissenschaftlich und technisch von sehr hoher Qualität. Da in der Schweiz keine behördlichen Vorgaben zu Bau und Betrieb von Kavernen vorliegen und auch keine Bergbaubehörde existiert, nimmt der Bericht ExB-1 Bezug auf Deutsche Regelwerke für Tiefbohrungen und Bergbautätigkeiten². In Abbildung 1 werden die Aktivitäten dargestellt, welche nach heutigem Stand der Technik vor, während und anschließend an die Realisierung eines neuen Kavernenfeldes für die Soleförderung durchgeführt werden (aus ExB-1). Am Anfang der Planung eines neuen Kavernenfeldes stehen die Definition der Projektanforderungen und die Erarbeitung des geologischen Modells. Dieses Modell stellt eine belastbare Beschreibung des lokalen geologischen Untergrundes dar, welche auf Bohrungen, Literaturstudien und geophysikalischen Messungen an der Oberfläche, insbesondere seismischen Messungen, basiert. Anschliessend an die Erarbeitung dieses geologischen Modells erfolgen gebirgsmechanische Untersuchungen zur Auslegung des Kavernenfeldes (Kavernendimensionen und Abstände) und zur Festlegung der Betriebsbedingungen (insb. Sole- und Gasdrucke) während der Soleförderung. Diese gebirgsmechanischen Untersuchungen beinhalten in erster Linie Computersimulationen der langfristigen Stabilität und Verformungen der Kavernen und des umgebenden Gebirges. Diese Berechnungen sollten auf dem lokalen geologischen Modell und repräsentativen felsmechanischen Kennwerten beruhen, und anschliessend mit Langzeitmessungen des tatsächlichen Verhaltens verglichen und kalibriert werden. Solche während und nach dem Solebetrieb

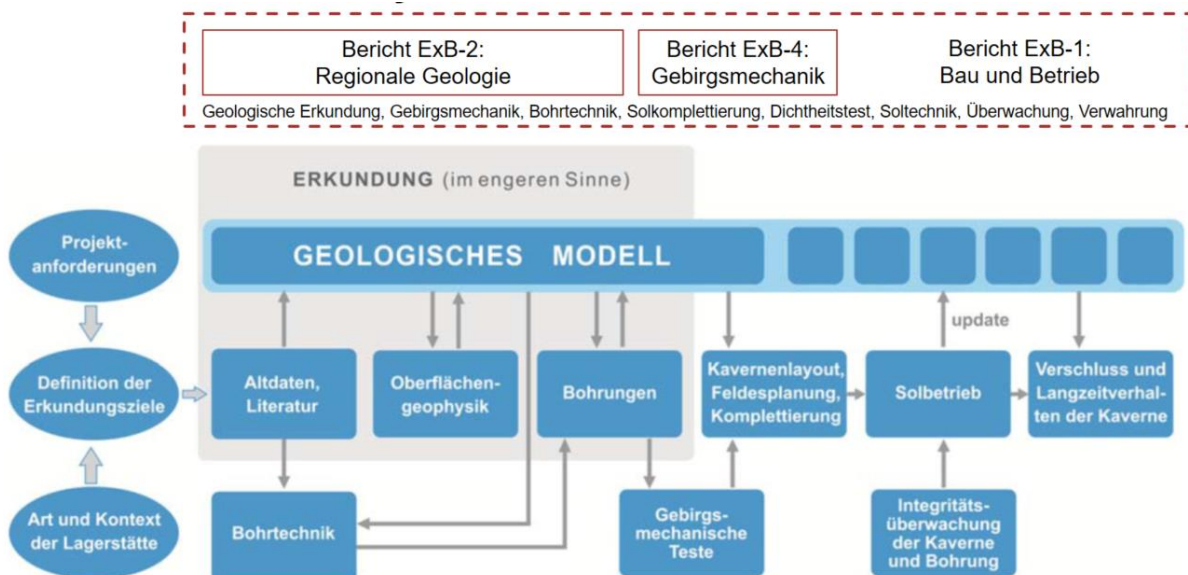


Abbildung 1. Aktivitäten im Lebenszyklus einer Salzkaverne (aus ExB-1, ergänzt)

² 1. Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen (Tiefbohrverordnung -BVOT-). 2006.

2. Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. Technische Regel Bohrungsintegrität. Hannover : s.n., 2017.

3. Oberbergamt in Clausthal-Zellerfeld. Richtlinien über das Verfüllen auflässiger Bohrungen. 1998.

laufenden gebirgsmechanischen Untersuchungen (Integritätsüberwachung in Abbildung 1) beinhalten jährliche Setzungsmessungen an der Oberfläche, Hohlraumvermessungen der Kavernen, einen Vergleich der geförderten Salzmenge mit der Hohlraumentwicklung der Kavernen, und Tests zur Dichtheit der Sohleförderbohrungen. Anschließend an den Betrieb werden die Bohrungen und Kavernen basierend auf einem Verwahrungskonzept verschlossen, welches garantieren muss, dass die Kavernen und Bohrungen auch für lange Zeiträume (mindestens hunderte von Jahren) stabil und dicht bleiben und dadurch keine negativen Einflüsse auf die Umwelt haben können. Abbildung 1 zeigt zusätzlich die Rolle der Expertenberichte 1, 2 und 4 in diesem Lebenszyklus eines Kavernenfeldes. In diesem Diagramm der Abbildung 1 nicht dargestellt sind die Expertenberichte zum Thema Grundwasser, Setzungen, Seismizität, Hanginstabilität und Schadensfälle. Diese Berichte sind spezifisch für das Projekt Rütihard erstellt worden, aufgrund der Bedürfnisse der Dialoggruppe und der gesetzlich vorgeschriebenen Umweltverträglichkeitsprüfung.

2.2. Geologische Verhältnisse auf der Rütihard

Im Bericht ExB-2 werden die regionalen geologischen Verhältnisse umfassend, die lokalen geologischen Verhältnisse auf der Rütihard aber nur punktuell beschrieben. Aufgrund der Zeitplanung im Dialogverfahren beinhaltet der Bericht ExB-2 nur die Resultate der ersten neuen Erkundungsbohrung auf der Rütihard (Bohrung S157). Unter Berücksichtigung der mittlerweile vorliegenden Resultate der zweiten neuen Erkundungsbohrung S156 ergeben sich die folgenden Kernaussagen:

- Das Salzlager der Rütihard befindet sich im Kern oder Nordschenkel des sogenannten Adlerhofgewölbes.
- Die Struktur oberhalb des Salzlagers ist komplex; die Basis des Salzlagers verläuft weitgehend ungefaltet.
- In 6 von 7 Bohrungen auf der Rütihard bewegt sich die Mächtigkeit des Salzlagers zwischen 18 und 65 m und bildet eine ausreichende und relativ homogene Lagerstätte (Bohrung S94 ist ohne Salzlager). Die Bohrungen geben einen guten Eindruck der lokalen Schichtabfolge.
- Das strukturgeologische Wissen im Bereich der Rütihard ist erst in groben Zügen bekannt. Bis anhin wurden nur die Bohrungen S157 und S156 strukturgeologisch ausgewertet, mit überraschenden Resultaten hinsichtlich der Komplexität der lokalen geologischen Verhältnisse.
- Im Bereich der Rütihard ist das räumliche Verständnis zu Vorkommen und Verlauf von möglichen Bruchsystemen und der Achse des Adlerhofgewölbes noch lückenhaft.

Die Bohrungen S157 und S156 weisen auf eine kompliziertere geologische Struktur im Untergrund der Rütihard mit mehreren grösseren Bruchzonen hin. Die ursprünglich geplanten seismischen Messungen (und weitere Bohrungen) auf dem Gebiet der Rütihard würden zu einer substantiellen Verbesserung der Kenntnisse der geologischen Strukturen im Untergrund der Rütihard führen.

Ein schematisches geologisches Profil gemäss den Vorstellungen des unterzeichnenden Experten ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Adlerhofgewölbe verläuft u.U. nicht parallel zur Rütihard und weicht gegen SW ab. Dadurch kommt ein Teil der Rütihard möglicherweise in einen ruhiger aufgebauten Nordschenkel zu liegen. Die Schichtabfolge besteht aus (1) dem Salzlager, (2) der oberen Sulfatzone und dem

darüberliegenden Anhydrit-Dolomit, (3) gefolgt vom Muschelkalk Aquifer der Schinznach-Formation, welcher (4) vom quellbaren Gipskeuper und (5) den quartären Lockergesteinen (Deckenschotter und Löss) überdeckt ist. Wie auch in ExB-1 ausgeführt, ist die Kenntnis der Struktur der Salzsichten in einem geplanten Kavernenfeld für die Planung und Auslegung der Kavernen von grosser Bedeutung, da die Dichtheit der Kavernen nur gewährleistet werden kann, wenn immer genügend dichtes Salz um die Kavernen herum erhalten bleibt. Dies setzt eine genaue Kenntnis der Salzränder und Einschaltungen fremder Gesteine voraus. Es ist aus anderen Gebieten bekannt, dass Kavernen, welche ungenügende Salzmächtigkeiten in der Firste oder den Paramenten aufweisen, nicht mehr dicht sind.

Die Stabilität der Kavernen hängt insbesondere von der Struktur und der Mächtigkeit des Deckgebirges (Obere Sulfatzone, Dolomitzone, Schinznach Formation) ab. Je komplizierter die geologischen Strukturen im Deckgebirge sind, umso schwieriger wird die Ausführung und der Nachweis von langfristig stabilen Kavernen. Die heutigen geologischen Kenntnisse zum Untergrund der Rütihard genügen darum nicht für eine Bewertung potenzieller Umweltauswirkungen und die Kavernenauslegung.

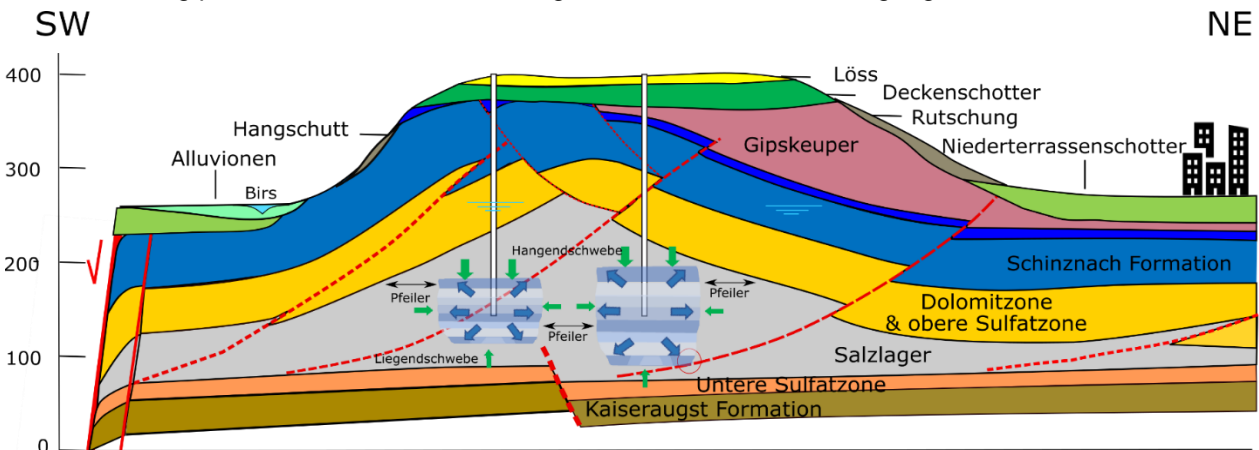


Abbildung 2. Hypothetisches geologisches Modell durch die Rütihard bei Bohrung S157 mit variablen Mächtigkeiten des Salzlagers in einem mit Brüchen durchzogenen Deckgebirge im Adlerhofgewölbe³. Das Adlerhofgewölbe verläuft u.U. nicht parallel zur Rütihard und weicht gegen SW ab.

³ Gründe für die Komplexität der Geometrie des Salzlagers sind (1) unterschiedliche erbohrte Salzmächtigkeiten, (2) mechanisches Verhalten der verschiedenen Lithologien (Salz ist die schwächste Einheit), (3) Strukturmessungen im Salzlager und der Oberen Sulfatzone in den Bohrungen S157/S156, (4) Hinweise auf kompressive Bruchstrukturen im Adlerhofgewölbe aus Feldkartierung, Bohrkernanalysen S157/S156, und Spannungsmessungen, (5) mächtigere Bruchstrukturen im Deckgebirge in den Bohrungen S157/S156.

3 Fundamentale Kriterien für die Bewertung der Umweltverträglichkeit

3.1. Integrität der Kavernen während Betrieb und Verwahrung

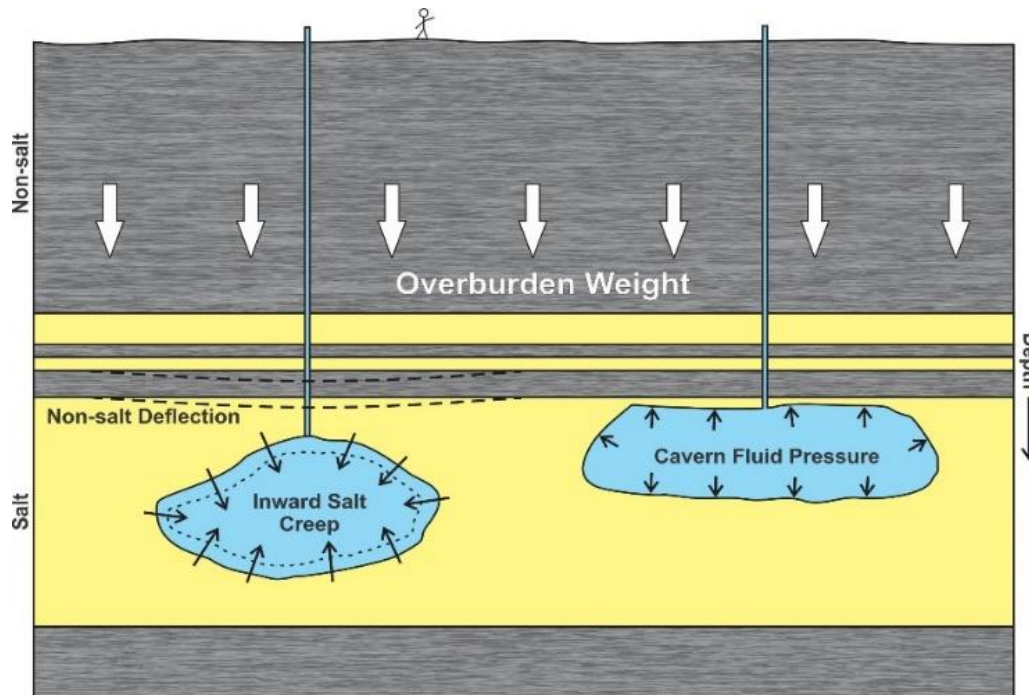


Abbildung 3. Schematischer Schnitt durch den Untergrund eines stabilen Kavernenfeldes (blau = Salzkaverne, gelb = Salzschicht, grau = Deckgebirge (Voegeli 2017))

In Abbildung 3 ist eine mögliche Solekaverne in Salzschichten (gelb) und darüberliegende Deckschichten (grau) schematisch für einfache geologische Verhältnisse dargestellt. Wesentlich für die Beurteilung der Umweltauswirkungen eines Kavernenfeldes ist die Integrität, also die Dichtheit und Stabilität der Kavernen während dem Betrieb und der Verwahrung. Dichtheit bedeutet, dass keine Sole oder Betriebsgas in das Nebengestein oder Deckgebirge entweicht (beide stehen während Betrieb und Verwahrung unter erhöhten Drucken). Stabil bedeutet, dass sich das Salz um die Kavernen zwar bruchlos verformen (kriechen) kann und eine Volumenkonvergenz eintritt (Abbildung 3), aber die Deckschichten über diesen Kavernen ihre Tragwirkungen langfristig gewährleisten können, d.h., dass diese stabil bleiben und nicht teilweise oder vollständig in die Kavernen einbrechen. Wenn eine Kaverne nicht stabil ist, kann in einem ersten Stadium eine relativ dünne Gesteinsschicht einbrechen, die sich dann in Form einzelner Blöcke am Kavernenboden ablagert (A in 4). Es kann sich dadurch eine neue Kavernengeometrie einstellen, die einen stabilen Zustand erreicht. Es ist aber auch möglich, dass sich diese Bruchprozesse weiter in den Deckschichten fortpflanzen, die Kaverne vollständig einstürzt, und mit den Trümmern aus dem eingestürzten Dach der Kaverne gefüllt wird (B in Abbildung 4). Dies ist das für die Experten der Schweizer Salinen AG wahrscheinlichste Szenario für instabile Kavernen. Das ungünstigste Versagensszenario ist ein Fortpflanzen der Brüche bis zur Geländeoberfläche mit einer Bildung eines Einsturztrichters oder Tagbruchs (C in Abbildung 4). In einem wenig besiedelten Raum sind Senkgruben mit geringem Versatz an sich keine dramatische Umweltauswirkung. Welches Szenarium sich einstellen wird, ist nicht immer klar und Brüche und

Bruchschlote können nicht nur spontan, sondern auch um viele Jahre zeitlich verzögert erfolgen. Dies zeigen auch die Bruchschlote im Gebiet der Saline von Riburg.

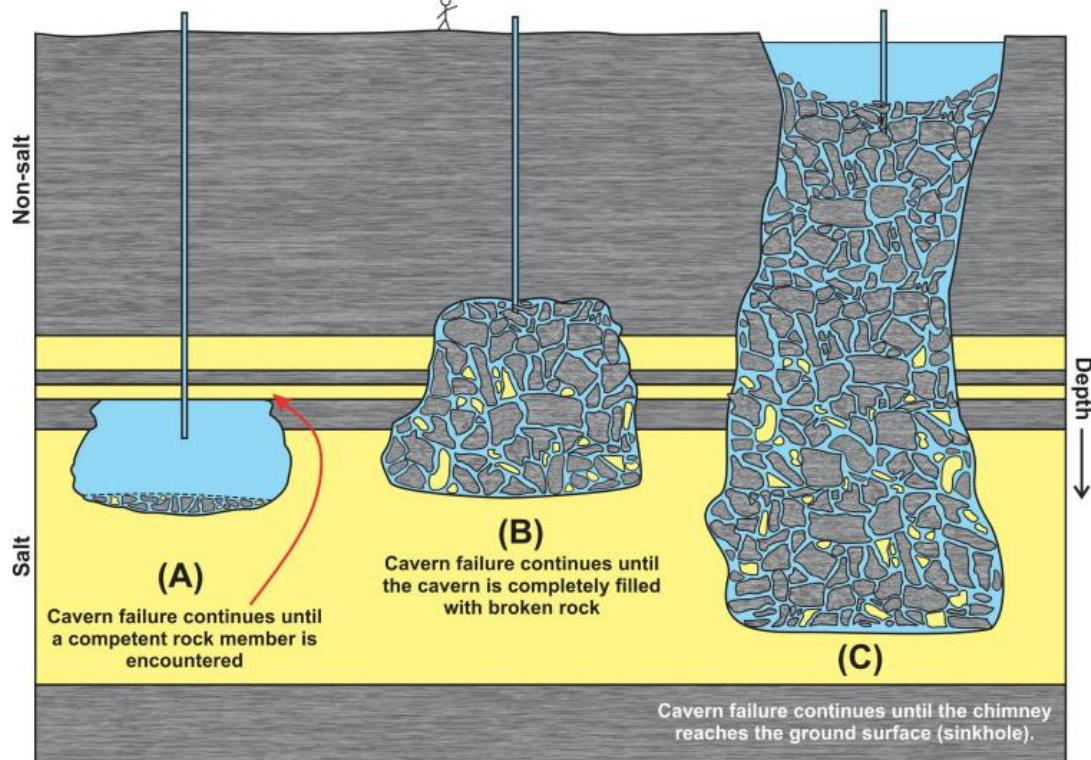


Abbildung 4. Instabile Kaverne mit Verbrüchen. Der Verbruch im Untergrund dauert an bis: **(A)** der Bruchschlot kompetentes (tragfähiges) Gestein erreicht. **(B)** die Kaverne und der Bruchschlot sich vollständig mit gebrochenem Gestein gefüllt haben. **(C)** der Bruchschlot die Oberfläche erreicht, was zu einer Senkgrube (Tagbruch) führt. Die Entwicklung von Bruchschloten kann spontan oder verzögert erfolgen (Voegeli 2017)

3.2. Dichtheit der Produktionsbohrungen während Betrieb und Verwahrung

Das zweite zentrale Kriterium für die Langzeitsicherheit und die Bewertung der Umweltauswirkungen ist die Dichtheit der Bohrungen. In Abbildung 5 ist ein Schema der geplanten Produktionsbohrungen auf der Rütihard dargestellt. Im Bohrschema ist zu sehen, dass die Bohrung im unteren Teil für die Erstellung der Kavernen offen ist. Die anderen Teile der Bohrung sind durch mehrfache einzementierte Stahl-Verrohrungen von den umgebenden geologischen Schichten getrennt. Es ist wichtig, dass keine Sole oder Gase aus der Kaverne in eine überliegende Schicht oder bis and die Oberfläche zirkulieren können.

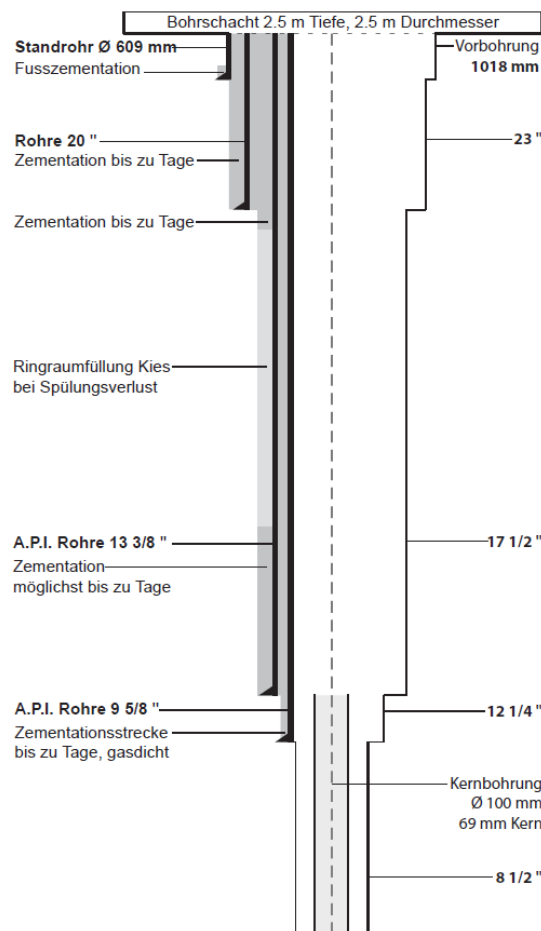


Abbildung 5. Bohrschema Produktionsbohrung Rütihard (ExB-1)

In den folgenden Kapiteln 4 und 5 wird die Integrität von Kavernen und Dichtheit von Bohrungen im Adlerhofgewölbe im Detail erläutert und diskutiert, basierend auf den Expertenberichten der Schweizer Salinen AG und bisheriger Erfahrungen im Kavernenfeld Grosszinggibrunn.

Mit Modellrechnungen werden für die lokalen geologischen Verhältnisse die Geometrie von stabilen Kavernen, die Auslegung der Kavernenfelder und die Betriebsdrucke ermittelt. Die Solekavernen haben im Idealfall eine Zylinderform mit einem trichterförmigen Sumpf⁵ (Abbildung 6) und werden in hexagonalen Feldern angeordnet (Abbildung 7). In den gebirgsmechanischen Modellrechnungen werden der stabile Durchmesser (d in Abbildung 7), die Kavernenhöhe, die Mächtigkeit der Hangend- und Liegendschwabe (Abbildung 2) sowie die Abstände zwischen Kavernen (A in Abbildung 7), respektive die notwendige Breite der stützenden Pfeiler (B in Abbildung 7) ermittelt. Da die Stabilität und Dichtheit der Kavernen auch abhängig ist von den Wasser-, Sole- und Blanket-Drucke innerhalb der Kaverne, werden mit diesen Modellrechnungen auch die notwendigen Betriebsdrucke ermittelt. Es ist wichtig, dass diese Berechnungen auf lokalen Daten beruhen, und die lokale Geologie, Spannungen, Bruchstrukturen und felsmechanischen

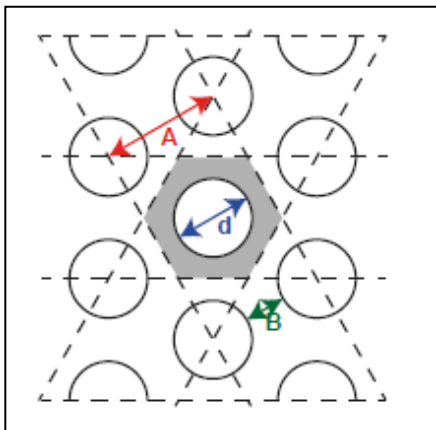


Abbildung 7. Geometrie eines hexagonalen Kavernenfeldes (Gruner 2014)

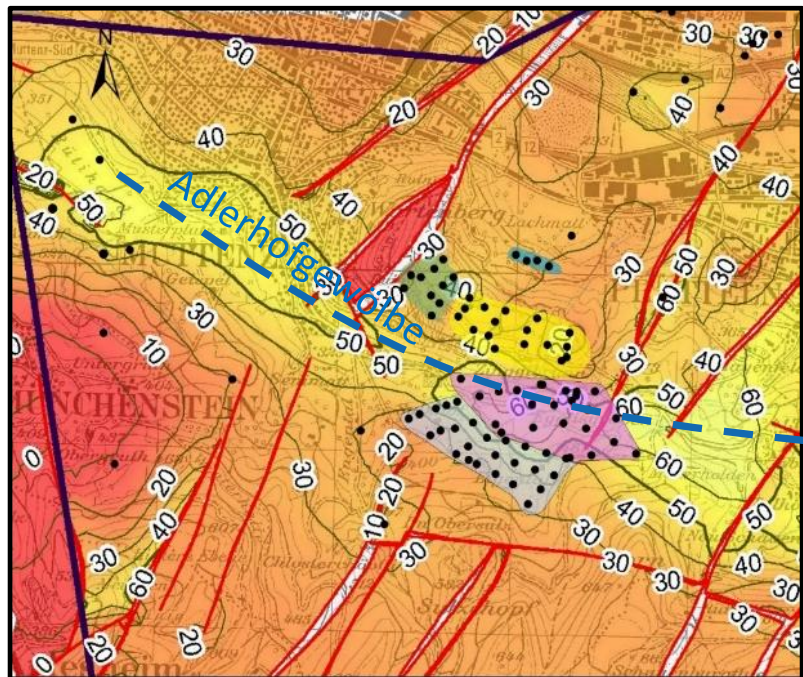


Abbildung 8. Ungefährer Verlauf des Adlerhofgewölbes und interpolierte Salzmächtigkeiten von 0 m (rot) bis 60 m (gelb) im Gebiet Muttenz/Münchenstein/Pratteln (Schweizer Salinen AG). Bisherige Bohrfelder Sulz (grau), Grosszinggibrunn (lila), Zinggibrunn (gelb) und Wartenberg (grün)

Eigenschaften der einzelnen Schichten berücksichtigen. Für die Rütihard liegen bisher keine gebirgsmechanischen Modellrechnungen, sondern nur Plausibilitätsbetrachtungen vor (ExB-1, ExB-4). Die heutige Auslegung des Kavernenfeldes der Rütihard basiert auf dem Kavernenfeld von Grosszinggibrunn. In der Karte der Salzmächtigkeiten im Gebiet Muttenz-Münchenstein-Pratteln sind die bisherigen Bohrungen auf der Rütihard und in den Kavernenfeldern Grosszinggibrunn, Sulz, Zinggibrunn, Wartenberg und Lachmatt zu sehen (Abbildung 8). Sowohl die Rütihard, wie auch das Kavernenfeld Grosszinggibrunn liegen in der gleichen Faltenstruktur, dem sogenannten Adlerhofgewölbe (blau gestrichelte Linie in Abbildung 8). Auch wenn es heute keine detaillierten geologischen Untersuchungen gibt, weder im Gebiet

⁵ Feststoffe im Salzgestein, die sich nicht im Wasser lösen, setzen sich im unteren Bereich der Kaverne als „Sumpf“ ab.

der Rütihard noch in Grosszingbrunn, kann man grundsätzlich davon ausgehen, dass die geologische Situation in den beiden Gebieten ähnlich ist. Die bestehenden gebirgsmechanischen Modellrechnungen werden in den Expertenberichten (ExB-1 und ExB-2) auf die Rütihard übertragen und darum im Folgenden diskutiert. Grosszinggibrunn stellt seit dem Jahr 2006 das aktuelle Sohleförderungsfeld der Saline Schweizerhalle dar.

4.2. Gebirgsmechanische Modellrechnungen

In den letzten und heute gültigen gebirgsmechanischen Modellrechnungen für Grosszinggibrunn (IUB, 2013) werden sehr einfache geologische Lagerungsverhältnisse angenommen (Abbildung 6 unten), bestehend aus horizontal gelagerten, konstant mächtigen Schichten der unteren Sulfatzone, dem Salzlager und der oberen Sulfatzone. Die Materialkennwerte wurden an Bohrkernproben von Grosszinggibrunn hergeleitet und berücksichtigen nur intakte Proben (keine natürlichen Bruchstrukturen). Mit diesem Modell wurden verschiedene Szenarien analysiert, insbesondere Kavernen mit unterschiedlichen Durchmessern (von 75–100m), unterschiedlichen Höhen (35–60m) und unterschiedlichen Schwebemächtigkeiten. Schliesslich wurden auch Stabilitäts-Berechnungen für ein Kavernenfeld mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Kavernen und unterschiedlichen Betriebsdrücken durchgeführt. Die Modellrechnung von IUB aus dem Jahr 2013 zeigen:

- Bei Verlust eines stützenden Innendruckes (atmosphärischer Druck) ist ein schlotartiger Kollaps innerhalb weniger Monate zu erwarten. Allerdings ist im Gebiet von Grosszinggibrunn ein derartiges Szenario sehr unwahrscheinlich, da die Kavernen in der Regel unter dem Grundwasserspiegel liegen und eine luftgefüllte Kaverne in dieser Tiefe kaum denkbar ist.
- Für sehr einfache geologische Verhältnisse und unter der Annahme eines konstanten Innendruckes ist ein Versagen der Tragfähigkeit der Kavernen bei einem Durchmesser von 100 m (oder mehr) oder bei einer Salzscheibe von 5 m (und weniger) nach einer Standzeit von 5–20 Jahren zu erwarten. Es ist darum notwendig, eine ausreichend dicke Salzscheibe zu belassen und den Durchmesser der Kavernen auf 75 m zu begrenzen.

Es bestehen heute keine Modellrechnungen für Zeiträume nach einer Betriebsphase von 10–20 Jahren. Für die anschliessende Verwahrung von mindestens mehreren 100 Jahren fehlen ein standortspezifisches technisches Konzept und der Nachweis der Integrität der Kavernen. Dieser Nachweis sollte mit Modellen erfolgen, welche validiert und geeicht sind und die reale Gebirgsstruktur bis zur Oberfläche abbilden. Wie auch in ExB-4 erläutert, entsprechen die heute vorliegenden Modellrechnungen nicht diesen Anforderungen.

Die Modellresultate von IUB (2013) erscheinen grundsätzlich plausibel, wenn sie mit den heute vorliegenden Beobachtungen im Kavernenfeld Grosszinggibrunn und Sulz verglichen werden (Kapitel 4.3). Es ist heute aber nicht abzuschätzen, welche Auswirkungen die nachweislich vorhandenen Abweichungen der lokalen Geologie von den stark vereinfachenden geologischen Modellannahmen haben. Wichtige Faktoren, welche vermutlich die Stabilität der Kavernen beeinflussen sind (1) Unregelmässigkeiten in der Mächtigkeit des Salzlagers und der Hangendscheibe, (2) Deckschichten welche tektonisch gefaltet oder/und durch Brüche versetzt und geschwächt sind, (3) natürliche Lösungs- und Verkarstungserscheinungen, (4) vom Modell abweichende Gebirgsspannungen.

4.3. Kavernenintegrität in Grosszinggibrunn

Die einzelnen Soleförderbohrungen in Grosszinggibrunn sind die modernsten aktiven Bohrungen der Soleförderung der Schweizer Salinen AG. Weil die geologische Situation in den Gebieten Rütihard und Grosszinggibrunn ähnlich ist und in letzterem moderne Fördermethoden angewendet werden, können aus Beobachtungen von Grosszinggibrunn auch Rückschlüsse über die Stabilität und Integrität der Kavernen auf der Rütihard abgeleitet werden. In Abbildung 9 sind die einzelnen Kavernenfelder, Produktionsbohrungen und Sondierbohrungen dargestellt (Stand 14.1.2021). Heute (September 2020) sind von 17 Produktionsbohrungen in Grosszinggibrunn vier Bohrungen in Reparatur: S136 (vermutlich undichte Zementation des Rohrschuhs), S141, S142, S147 (vermutlich Verbindung zu alten Bohrungen im Bohrfeld Sulz; in Abklärung).

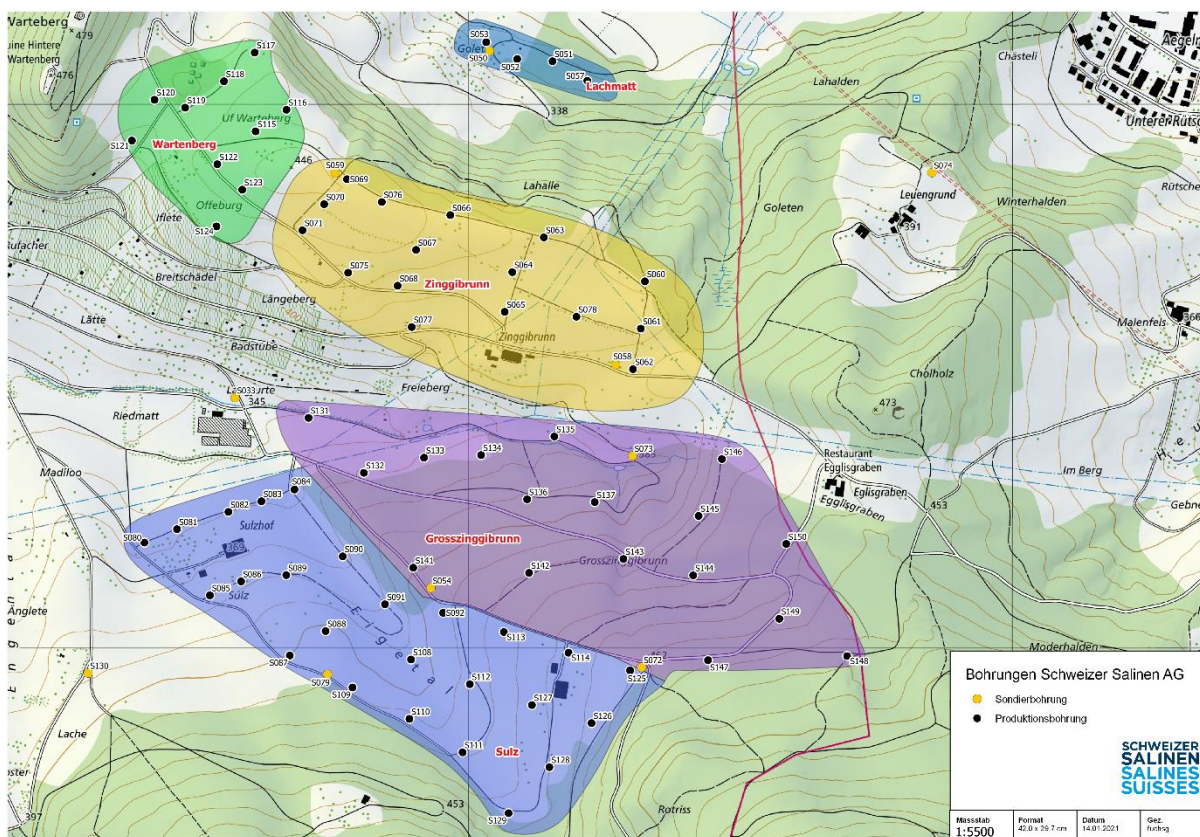


Abbildung 7. Soleförderungsfelder Grosszinggibrunn, Zinggibrunn, Sulz, Wartenberg und Lachmatt mit Sondier- und Produktionsbohrungen (Schweizer Salinen AG, 14. Januar 2021)

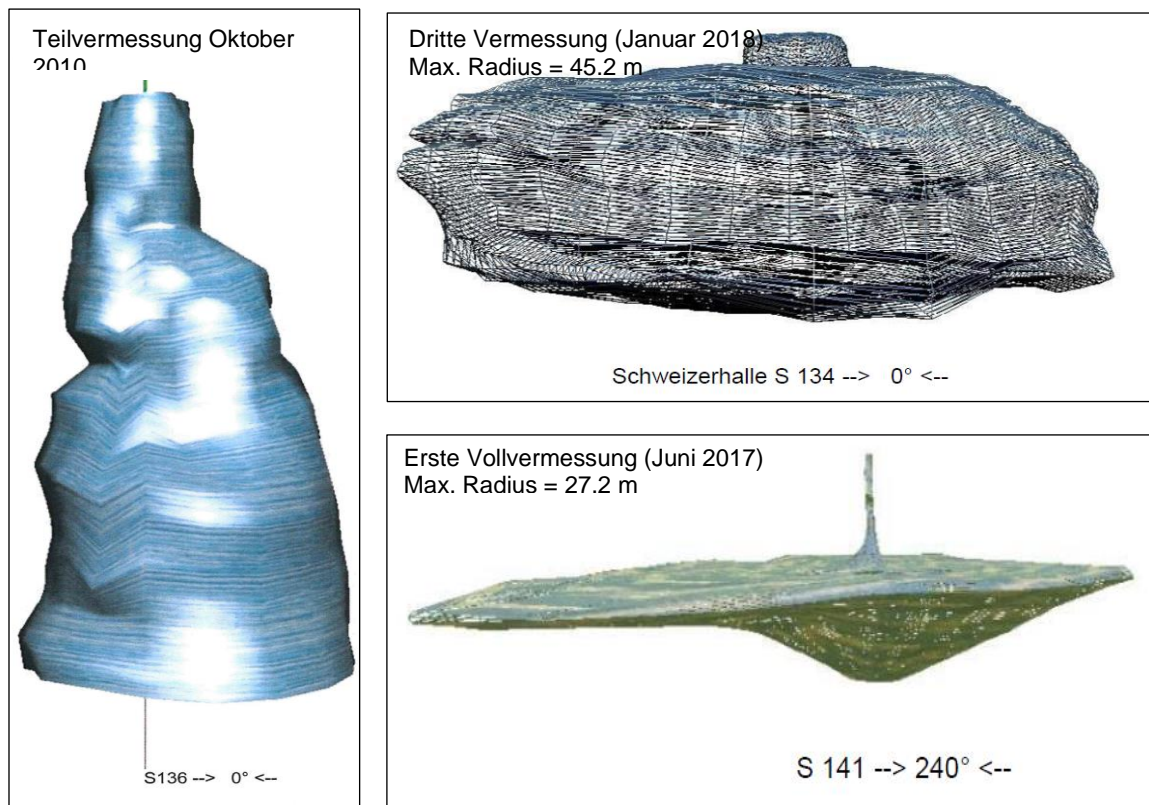


Abbildung 8. Hohlraumvermessungen von Soleförderkavernen in Grosszinggibrunn. Schweizer Salinen AG

Im Kavernenfeld von Grosszinggibrunn wird ein echometrisches Verfahren zur Hohlraumvermessung angewendet. Ausgewählte Resultate solcher Vermessungen sind in Abbildung 10 dargestellt. Bei der Bohrung S134 wurde eine Kaverne mit mittlerem Radius von 36 m und einem maximalen Radius von 45.2 m gesolt (Auslegungsradius (37.5 m)). Diese Kaverne weist zwar nicht die ideale Geometrie auf, also keine vertikalen Ränder und kein horizontal ebenes Dach, kommt aber der Auslegung im Vergleich zu anderen Kavernen in Grosszinggibrunn relativ nahe. Die ebenfalls in Figur 10 dargestellte Bohrung S141 ist eine Bohrung in Reparatur. Zum Zeitpunkt der Vermessung (Juni 2017) war diese Kaverne in der Anfangssolphase (Sumpfsolphase), wobei sich schon hier eine sehr asymmetrische Ausbildung der Kaverne zeigte. Kaverne S136 weicht stark von der Sollgeometrie ab, mit einem maximalen Radius von nur maximal 11.29 m und einer Höhe von 30 m. In den Kavernenhohlraum von S136 konnte nicht eingefahren werden, da die Sonde in der Verrohrung einklemmte. Die bestimmungsmässige Auslegung der Kavernen wird im Gebiet von Grosszinggibrunn trotz moderner Sole- und Überwachungsverfahren oft nicht erreicht.

Die Setzungen im zentralen und südlichen Bereich von Grosszinggibrunn (sowie im südlichen Teil von Sulz) liegen seit mehreren Jahren im Bereich von 15–40 mm/Jahr und in der letzten jährlichen Wiederholungsmessung im Jahr 2019 im Bereich von 20–26 mm/Jahr. Diese Setzungen betragen deutlich mehr als die erwarteten mittleren Senkungsraten von 5–7 mm/Jahr im Zentrum eines stabilen Kavernenfeldes während der aktiven Solung (ExB-4, ExB-6). Der unterzeichnende Experte vermutet darum, dass aufgrund komplexer geologischer Verhältnisse schon heute im Gebiet Grosszinggibrunn/Sulz lokal Kavernenverbrüche stattfinden (Stadium A und B, Abbildung 4). Andere Erklärungen dafür sind nach GEOTEST AG (EXB-6) Rutschungen und Abnahme der Bodenfeuchte.

4.4. Dichtigkeit der Bohrungen in Grosszinggibrunn

Die Dichtigkeit von Bohrungen nach ihrer Zementation wird mittels mehrstufigen Dichtigkeitstests mit Sole und Blanketgas bestimmt. In diesen Tests werden die ausgebauten Bohrungen vor der Solung in mehreren Stufen und Ruhephasen mit einem erhöhten Druck (von z.B. 10 bar) beaufschlagt. Anschliessend wird der Druckabfall während mindestens einem Tag kontinuierlich erfasst. Bei dichten Bohrungen sollte dieser Druckabfall einen mittleren Wert von 0.02 bar/Stunde nicht überschreiten (ExB-1). Ein schnelles Abfallen ist ein Hinweis darauf, dass die Bohrungen nicht dicht sind. Die Schweizer Saline AG hat sowohl für Grosszinggibrunn (2003, Anhang 7) wie auch für Rütihard denselben Grenzwert von 0.02 bar/Stunde festgelegt. Die Tests wurden bis Februar 2006 (Bohrung S137) mit analogen Druckaufzeichnungen und anschliessend mit genauer digitaler Druckaufzeichnung ausgeführt.

Im Rahmen des vorliegenden Mandats wurden von der ETH alle Dichtigkeitstests der jüngsten Bohrungen, welche in den Jahren 2006 bis 2013 in Grosszinggibrunn durchgeführt wurden (S131-S150), ausgewertet. Diese Auswertung zeigt, dass in 75% der Bohrungen die geforderte Dichtigkeit nicht nachgewiesen werden konnte und dass die Grenzwerte teilweise massiv (>100%) überschritten wurden.

Druckabfälle von mehr als 0.02 bar/Stunde können Ursachen in einer nicht regelkonformen Testdurchführung, in einer undichten oder schlecht zementierten Verrohrung, oder in einer ungenügenden Dichtigkeit des Salzlagers haben. Der Unterzeichnende ist der Ansicht, dass die teilweise undichten Bohrungen in Grosszinggibrunn auch eine Folge der komplizierten geologischen Verhältnisse im Adlerhofgewölbe sein könnte. Dies könnte auch den Sole/Gas-Austritt in der Bohrung S87 vom Kavernenfeld Sulz (13. Juni 2017) erklären.

5 Risiken eines Salzabbaus auf der Rütihard

5.1. Grundwässer in der Umgebung der Rütihard

Gemäss ExB-3 und der Gewässerschutzkarte des Kantons BL finden sich auf der Rütihard keine nutzbaren oder schützenswerten Grundwasservorkommen. Meteorwasser wird über ein Drainagesystem in den Rhein und die Birs abgeleitet. Wenig Wasser tritt an Quellen in den nördlichen und östlichen Hängen der Rütihard aus und wird dort teilweise gefasst. Auf der anderen Seite finden sich sehr wichtige genutzte Grundwasservorkommen im Gebiet zwischen Muttenz und Pratteln, insbesondere NE der Bahngeleise im Gebiet Hard-Schweizerhalle. Hier werden aus den Rheinschottern aus 70 Bohrbrunnen jährlich 60 Mio. m³ Wasser gefördert. Die Rheinschotter stehen hier in einer direkten hydraulischen Verbindung mit dem darunter liegenden Muschelkalk-Aquifer der Schinznach-Formation (Figur 7). Auf der Südwestseite der Rütihard bilden die Birsschotter einen weiteren wichtigen geschützten Grundwasserleiter für die lokale Grundwasserversorgung.

GEOTEST stellt in ExB-3 einen einfachen hydrogeologischen Schnitt von Südwest nach Nordost, d.h. aus dem Gebiet der Birsschotter durch die Rütihard bis in das Gebiet der Rheinschotter, dar (Abbildung 11). Der Profilschnitt enthält die gering durchlässigen Gesteine der Unteren Sulfatzone und des Salzlagers (orange), die Obere Sulfatzone (ocker), die Schinznach-Formation mit dem regionalen Muschelkalkaquifer (blau), den Gipskeuper (rosa) und die quartären Sedimente (Schotter und Löss, grün). Aufgrund von Porenwasserdruck-Messungen in Pegeln des Muschelkalks NE und SW der Rütihard wird vermutet, dass es unter der Rütihard im Muschelkalk-Aquifer eine Verbindung zwischen dem Birs- und dem Rheinschotter gibt. Diese hydraulische Verbindung hängt stark von der geologischen Struktur des Adlerhofgewölbes ab, insbesondere dem Niveau der Oberen Sulfatzone. Die Druckpegel (hydraulischen Potenziale) im Muschelkalk bei der Rütihard liegen deutlich tiefer als jene der angrenzenden Birsschotter. Dies deutet auf einen möglichen Grundwasserfluss von der Birs in Richtung Rütihard (und Schweizerhalle) hin.

Laut GEOTEST (ExB-3) und dem Unterzeichnenden, bestehen folgende wichtigen Wissenslücken über die Grundwasserverhältnisse im Gebiet Rütihard:

- Regionale Grundwasserpotentialverteilung, Fliessrichtung und Fliessgeschwindigkeit im Muschelkalk Aquifer, insb. im Abstrombereich der Rütihard
- Struktureller Aufbau des Deckgebirges (Klüfte und Störzonen und deren hydrogeologischen Eigenschaften).
- Hydraulische Eigenschaften der Oberen Sulfatzone selbst und der hydraulischen Verbindung zum höher gelegenen Muschelkalk-Aquifer.
- Lokal auftretende Subrosionsprozesse im Dach des Salzlagers.

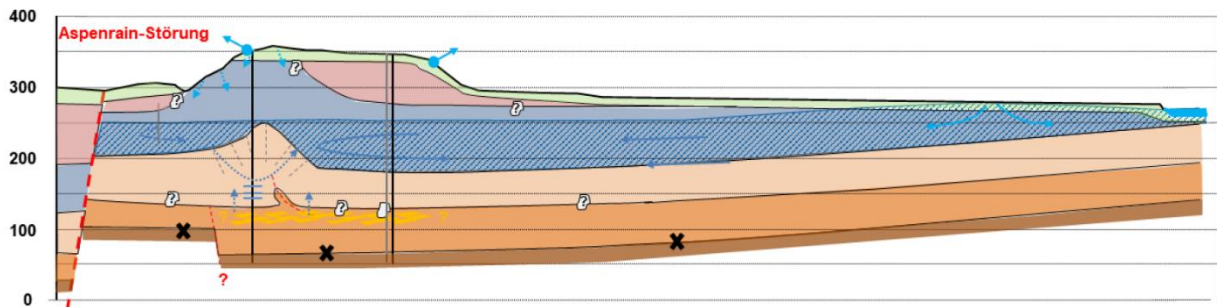


Abbildung 9. Hydrogeologischer Modellschnitt durch die Rütihard bei Bohrung S157, nach GEOTEST (EXB-3)

Ein Teil dieser Wissenslücken wurde in der kürzlich abgeteufte Bohrung S156 untersucht. So ergaben hydraulische Tests der Sondierbohrung S156 für die jeweiligen Formationen typische hydraulische Durchlässigkeiten: sehr gering bis nahezu undurchlässige Werte ($K = 3.3 \cdot 10^{-12} - 8.4 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$) im Steinsalz, sehr geringe Werte ($K = 7.0 - 8.7 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$) in der Oberen Sulfatzone, hohe Werte ($K = 2.3 - 6.9 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) im Bereich des geklüfteten und verkarsteten Muschelkalk-Aquifers.

Die Grundwasserfließverhältnisse nördlich und östlich der Rütihard (dem vermuteten Abstrombereich) sind sehr komplex und abhängig von der Grundwasserbewirtschaftung im Raum Hard-Schweizerhalle. Die Universität Basel unter der Leitung von Prof. Huggenberger hat in den letzten 20 Jahren diese Grundwasserfließverhältnisse intensiv mit Modellrechnungen untersucht. Die 3-dimensionalen Modelle erfassen die Lockergesteine und die Festgesteine bis zum Muschelkalk-Aquifer und wurden mit Daten aus

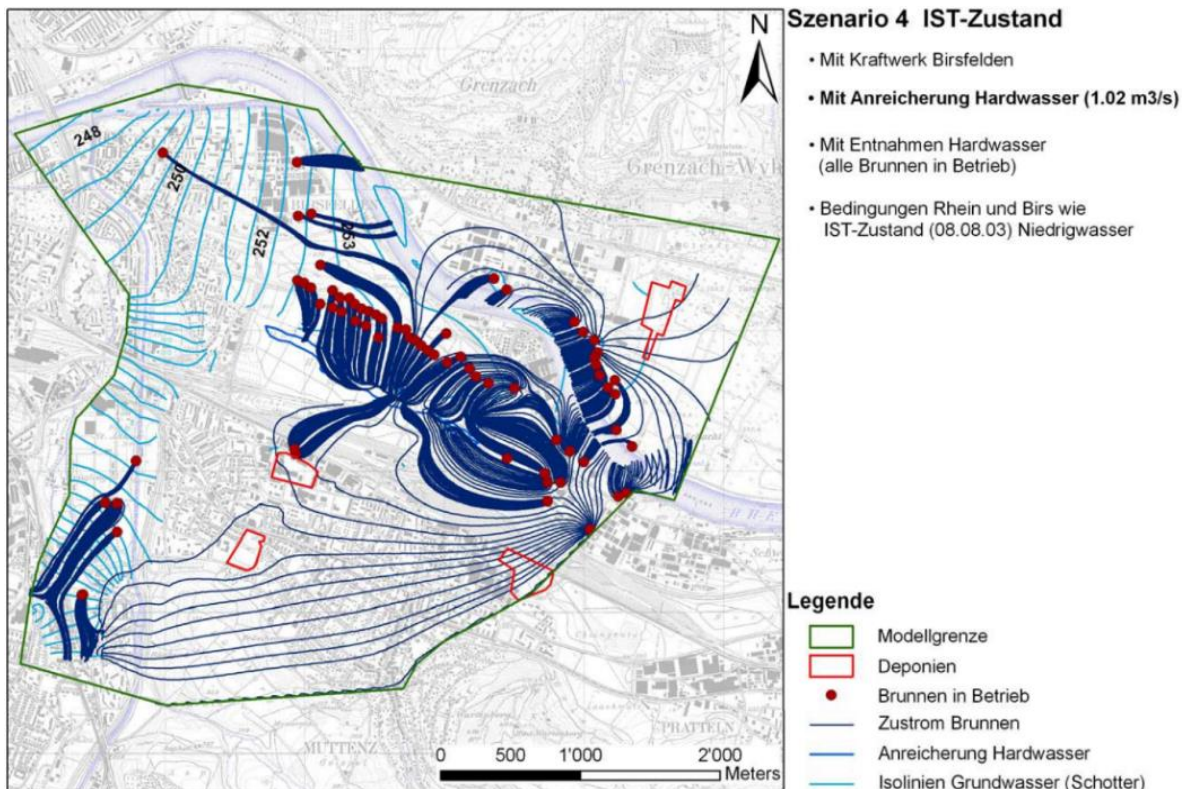


Abbildung 10. Simulierte Strömungslinien zu wichtigen aktiven Pump-Brunnen im Birs- und Rheintal. Berechnet mit einem kalibrierten Grundwassermodell entsprechend Grundwasserständen vom 8. August 2003 (aus Huggenberger et al. 2009)

Messpegeln kalibriert. Trotzdem weisen die Modellresultate immer noch grössere Unsicherheiten bezüglich der hydraulischen Durchlässigkeiten auf (insb. von tektonischen Brüchen und geklüfteten/verkarsteten Festgesteinen).

Abbildung 12 zeigt exemplarisch eine Aufsicht auf die Grundwasserströmungen im Gebiet der Rütihard sowie ihrem potenziellen Zufluss- und Abstromgebiet. Nach diesem Modell strömen die tieferen Grundwässer aus dem Muschelkalk-Aquifer der Rütihard in Richtung der Pumpbrunnen von Schweizerhalle. Ohne Anreicherung Hardwasser und Kraftwerk Birsfelden ergeben sich noch deutlich stärkere Abflüsse aus der Rütihard in Richtung Schweizerhalle.

5.2. Potenzielle Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse

Auch deformiertes Salz in einer möglicherweise komplizierten Struktur wie dem Adlerhofgewölbe und seinen Bruchstrukturen ist dicht, solange es nicht durch Zwischenlagen mit natürlichen Verunreinigungen (von anderen Mineralien wie Tonen, Anhydrit und Dolomit) unterbrochen wird. Solange die Kavernen integer und die Soleförderbohrungen dicht sind, sind darum keine negativen Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse zu erwarten.

Zum heutigen Zeitpunkt fehlt der Nachweis der Stabilität der geplanten Kavernen im Gebiet der Rütihard, sowohl für die Phasen des Betriebs als auch des Nachbetriebs (Verwahrung). Die Beobachtungen im Gebiet von Grosszinnggibrunn deuten zudem schon heute auf teilweise undichte Bohrungen und potenziell instabile Kavernen hin (Kapitel 4). Verbrüche von Kavernen bis auf das Niveau des Muschelkalks könnten zu einer dauerhaften Versalzung des Grundwassers in diesem Aquifer führen, falls Grundwasser aus dem Muschelkalk durch den Verbrauch in Evaporitschichten gelangt und diese längerfristig durchströmt. Welche qualitativen Auswirkungen auf die Grundwasserversorgung im Abstromgebiet damit verbunden wären, kann heute nicht ohne spezielle Modellrechnungen beurteilt werden (die Muschelkalkwässer werden stark mit Schottergrundwasser verdünnt). Auch andere negative Szenarien einer Auswirkung auf die Grundwasserverhältnisse sind denkbar, aber in ihren potenziellen Auswirkungen vermutlich weniger risikoreich. Dazu gehören Hebungen auf der Rütihard aus quellendem Anhydrit der Oberen Sulfatzone, oder Gasaustritte durch Leckagen des Blankets entlang undichter Bohrungen.

5.3. Potenzielle Auswirkungen an der Geländeoberfläche

Wie in Bericht ExB-6 (Senkungen und Bergschäden) beschrieben, sind die erwarteten Setzungen aus dem bestimmungsmässigen Betrieb und der Volumenkonvergenz meist so klein, dass daraus – insbesondere in unbebautem Gebiet – wenig oder keine Schäden an der Geländeoberfläche resultieren. Die intensivsten differentiellen Setzungen (Verkippungen) werden auf den Rändern des Rütihard-Plateaus, d.h. in unbebautem Gebiet erwartet. Hier sind primär Drainageleitungen von Setzungen betroffen. Schäden an Drainageleitungen müssen in diesem Gebiet vermieden werden, da ansonsten ein Potenzial für eine Reaktivierung natürlicher Rutschungen am NE Hang der Rütihard gegeben ist. Geringe Zerrungen und Schäden sind gemäss ExB-6 nur für Gebäude am NE Rand der Rütihard zu erwarten.

Die grössten Risiken für Schäden an der Geländeoberfläche bestehen für Abweichungen vom bestimmungsmässigen Betrieb, d.h. im Falle grösserer Verbrüche der Kavernen während Betrieb und Verwahrung. In diesem Fall sind grössere differentielle Setzungen und horizontale Verformungen zu erwarten. Die räumliche Ausdehnung dieser Geländeformungen muss sich dann auch nicht mehr auf

den Nahbereich der Rütihard beschränken, da unkontrollierte Lösungserscheinungen undichter Kavernen auch einzelnen Stör- oder Schwächezonen folgen können.

Es ist nicht zu erwarten, dass sich durch langfristige Verbrüche von Kavernen Änderungen in der seismischen Aktivität im Einflussgebiet der Rütihard ergeben.

5.4. Massnahmen zur Risikominderung

Wesentlich für eine sichere Soleförderung sind belastbare lokale geologische und gebirgsmechanische Modelle, systematische Dichtheitstests der Soleförderbohrungen, sowie eine umfangreiche Überwachung der Förderparameter, der Betriebsdrucke, der Kavernenentwicklung und der Verformungen an der Geländeoberfläche. Die räumliche Entwicklung, Dichtheit und Stabilität einer Soleförderkaverne kann heute mittels aufwändiger Messungen (Drucktests, tägliche Probenahmen, monatliche Massenbilanzierung, jährliche Sonarvermessung aller aktiven Kavernen) im Detail nachverfolgt und überprüft werden. Die Dichtheit der Bohrungen kann (und muss) durch systematische Drucktests mit Sole und Gas sowie durch eine geophysikalische Vermessung der Bohrloch-Zementation nachgewiesen werden. Die im Bericht ExB-1 im Detail beschriebene Vorgehensweise für die Rütihard stellt auf umfassende Weise den heutigen Stand der-Technik dar. Dieser Stand kommt im aktuellen Soleförderungsgebiet Grosszinggibrunn nur teilweise zur Anwendung.

Für die langfristige Verwahrung der Soleförderkavernen stehen grundsätzlich verschiedene Konzepte zur Verfügung. Wesentlich für den Nachweis der Stabilität und Dichtheit sind neben lokationsspezifischen gebirgsmechanischen Modellrechnungen und Verwahrungskonzepten, messtechnische Nachweise des Stillstandes der Kavernenkonvergenz und der Dichtheit der Bohrungen (ExB-1).

6 Schlussbemerkungen und Empfehlungen

Die Salzvorkommen auf der Rütihard sind von hoher Qualität und zeigen eine Mächtigkeit von 18 bis 65 Meter. Aufgrund der vorhandenen Reserven und bestehenden Förderanlagen im Gebiet Sulz/Grosszinggibrunn ist ein Salzabbau auf der Rütihard wirtschaftlich interessant.

Die Untersuchungen und Expertenberichte zum Projekt Rütihard, welche im Auftrag der Schweizer Salinen AG von verschiedenen Firmen ausgeführt und erstellt wurden, sind umfangreich und von hoher Qualität. Die Schweizer Salinen AG hat dem unterzeichnenden Experten zusätzlich sehr umfangreiche Primärberichte und Datensätze zeitgerecht zur Verfügung gestellt.

Der heutige Salzabbau im Gebiet Grosszinggibrunn erfolgt in einem ähnlichen geologischen Kontext wie auf der Rütihard: beide Gebiete liegen grundsätzlich in der gleichen geologischen Struktur, im sogenannten Adlerhofgewölbe. Obwohl die heutigen Erkundungs- und Überwachungs-Massnahmen von Grosszinggibrunn von den geplanten Massnahmen auf der Rütihard abweichen, lassen sich aus den bisherigen Erfahrungen potenzielle Erschwernisse für ein Projekt Rütihard ableiten, welche vom unterzeichnenden Experten insbesondere auf die heute nicht im Detail bekannten geologischen Verhältnisse zurückgeführt werden.

Für eine abschliessende Beurteilung der Risiken eines Salzabbaus auf der Rütihard fehlen umfassendere geologische Untersuchungen zur Struktur des Untergrundes sowie Nachweise der mittel- und langfristigen Integrität der geplanten Kavernen. Die bisherigen Modellrechnungen gehen von sehr einfachen geologischen Verhältnissen aus und zeigen nur für die Betriebsphase von 10 bis 20 Jahren stabile Verhältnisse auf. Es ist heute davon auszugehen, dass mit zunehmender Komplexität der lokalen, geologischen Verhältnisse dichte und stabile Bohrungen sowie Kavernen schwierig zu realisieren sind und der Nachweis der Integrität mit Modellrechnungen deutlich weniger belastbar wird. Sowohl für Sulz/Grosszinggibrunn wie Rütihard fehlt heute ein lokationsspezifisches Verwahrungskonzept.

Der Experte geht davon aus, dass im bestimmungsmässigen Betrieb (mit stabilen Kavernen und dichten Bohrungen) der Salzabbau keine negativen Auswirkungen auf das Grundwasser, die (spürbare) Seismizität und die natürlichen Hanginstabilitäten hat. Die grössten langfristigen Risiken eines Salzabbaus auf der Rütihard betreffen nach dem unterzeichnenden Experten negative Auswirkungen auf die Grundwasserqualität im Gebiet Muttenz - Schweizer Halle, ausgelöst durch grössere Kavernenverbrüche. Weitere Risiken instabiler Kavernen betreffen die räumliche Ausdehnung von Verformungen (Setzungen, Zerrungen) an der Geländeoberfläche, welche im Falle instabiler Kavernen und undichter Bohrungen deutlich in das Siedlungsgebiet von Muttenz hineinreichen könnte.

Für eine weitere Evaluation einer möglichen Soleförderung auf der Rütihard empfiehlt der unterzeichnende Experte folgende Erkundungen und Massnahmen:

1. Detaillierte Erkundung der geologischen/gebirgsmechanischen Verhältnisse im Gebiet Sulz/Grosszinggibrunn und Rütihard mit zusätzlichen Bohrungen und Seismik
2. Überprüfung (Validierung) und Kalibrierung neuer gebirgsmechanischer Modelle für den Betrieb von Grosszinggibrunn und Rütihard mit Langzeit-Messreihen und Rückrechnungen von früheren Schadensfällen

3. Durchführung von Modellrechnungen zur langfristigen (z.B. 500 Jahre) Integrität von Kavernen im Adlerhofgewölbe unter Berücksichtigung der lokalen Geologie/Geomechanik
4. Entwicklung von lokationsspezifischen Verwahrungskonzepten für die Kavernenfelder im Adlerhofgewölbe (Sulz/Grosszinggibrunn und Rütihard)
5. Detail-Untersuchung der Ursachen von erhöhten Leckagen von Bohrungen und Setzungen in Grosszinggibrunn
6. Modellierung möglicher Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität im Abstrombereich der Rütihard im Schadensfall (Verbruch der Kavernen, Leckagen entlang Bohrungen)
7. Aufbau eines umfassenden Monitoringsystems für die Grundwasserqualität im Abstromgebiet der Kavernenfelder im Adlerhofgewölbe

Zürich, den 19. Oktober 2020 (Bericht mit vertraulichen Figuren/Tabellen)

Zürich, den 19. Januar 2021 (Bericht ohne vertrauliche Figuren/Tabellen)



Prof. Dr. Simon Löw

Bericht Nr. 2720047.10

Schweizer Salinen AG, Pratteln 1

**Muttenz, Solfeldintegrität
Sulz/Grosszinggibrunn**

**Solfeld Sulz:
Gefährdungs- und Risikoanalyse
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung
(Vorläufige Beurteilung)**

Münchenstein, 18. August 2022

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

2720047.10

Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn
Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung
(Vorläufige Beurteilung)

GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE

Autor(en)	Bearbeitete Themen
Felix Bussmann	Kapitel 1, 2, 3, 4, 5
Florentin Ladner	Kapitel 1, 3, 6
Moira Arnet	Kapitel 6
Supervision	Visierte Inhalte
René Brinkmann	Ganzer Bericht
Hinweise	
Entwurf vom 27.06.2022 Überarbeiteter Version vom 18.08.2022	

GEOTEST AG

Felix Bussmann

Florentin Ladner

Inhaltsverzeichnis

1.	Präambel: Einordnung der Gefährdungs- und Risikoanalyse.....	5
2.	Einleitung.....	7
2.1	Ausgangslage	7
2.2	Veranlassung für die Gefährdungs- und Risikoanalyse.....	8
2.3	Perimeter und Zielsetzung	11
2.4	Methodik.....	11
3.	Literatur und Datensätze	12
4.	Ist-Zustand Solfeld Sulz	14
4.1	Entwicklung Oberflächendeformationen	14
4.1.1	Senkungen	14
4.1.2	Verschiebungen	16
4.1.3	Visuelle Beurteilung	17
4.2	Zwischenresultate zum Zustand der Produktionsbohrungen	17
4.3	Zwischenresultate Kavernengeometrien und Kavernenentwicklungen	17
4.4	Vorläufiges Fazit Ist-Zustand Solfeld Sulz	19
5.	Oberflächendeformationen.....	21
5.1	Einleitung und Grundlagen	21
5.1.1	Betrachtungssperimeter.....	21
5.1.2	Stabilität von Kavernen im Schichtsalz	22
5.1.3	Analyse bekannter Tagbrüche über Salzkavernen weltweit	24
5.1.4	Tagbruch Kaverne R31 (Solfeld Neuland, Saline Riburg)	24
5.1.5	Konzeptuelle Überlegungen zur Entwicklung von Tagbrüchen.....	26
5.2	Gefährdungs- und Risikoanalyse «Oberflächendeformationen»	28
5.2.1	Schutzgüter und Schutzobjekte	28
5.2.2	Risikoanalyse	28
5.2.2.1	Gefährdung	28
5.2.2.2	Risiko	29
5.2.2.3	Risikobeurteilung Szenario 1 «Status-quo».....	30
5.2.2.4	Risikobeurteilung Szenario 2 «Tagbruch»	31
5.2.2.5	Schlussfolgerung Risikoanalyse Oberflächendeformationen	32
6.	Grundwasser	33

6.1	Einleitung und Grundlagen	33
6.1.1	Betrachtungssperimeter	33
6.1.2	Geologisch-hydrogeologischer Rahmen	33
6.1.2.1	Geologie und Tektonik	33
6.1.2.2	Hydrostratigraphie	34
6.1.3	Lokale Hydrogeologie im Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn	36
6.1.4	Regionale Strömungsverhältnisse im Muschelkalk- Aquifer	37
6.1.4.1	Grundwasserneubildung	37
6.1.4.2	Strömungsverhältnisse im Muschelkalk-Aquifer	38
6.2	Transport hoch konzentrierter Chloridlösungen im Grundwasser	39
6.2.1	Hydrochemische Hinweise für hoch konzentrierte Chloridlösungen im Betrachtungssperimeter	41
6.2.1.1	Räumliche Verteilung der Chlorid-Konzentrationen	41
6.2.1.2	Tiefenverteilung der Chlorid-Konzentrationen	43
6.2.1.3	Chlorid-Konzentrationen in den Produktionsbohrungen Solfeld Sulz	44
6.3	Konzeptuelles hydrogeologisches Modell	45
6.4	Gefährdungs- und Risikoanalyse «Grundwasser»	48
6.4.1	Schutzgüter	48
6.4.2	Risikoanalyse	49
6.4.2.1	Gefährdung	49
6.4.2.2	Risiko	49
6.4.2.3	Risikobeurteilung Szenario 1 «Status-quo»	50
6.4.2.4	Risikobeurteilung Szenario 2 «Tagbruch»	51
6.4.2.5	Schlussfolgerung Risikoanalyse Grundwasser	53
6.5	Grundwassermonitoring	54

Anhang

Anhang 1: Hydrochemische Wasseranalysen Sulz, 2021 / 2022

Anhang 2: Hydrogeologischer Plan mit Schutzgüter und Stauertopographie der Oberen Sulfatzone.

1. Präambel: Einordnung der Gefährdungs- und Risikoanalyse

Die vorliegende Gefährdungs- und Risikoanalyse gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 werden die Ausgangslage im Solfeld Sulz sowie Veranlassung und Rahmendbedingungen für die Erarbeitung der vorliegenden Gefährdungs- und Risikoanalyse dargelegt.

Die für die Gefährdungs- und Risikoanalyse herangezogenen Grundlagen und Datensätze sind in Kapitel 3 aufgelistet.

In Kapitel 4 wird der Ist-Zustand des Solfelds Sulz, soweit aktuell bekannt, illustriert. Es handelt sich dabei um eine **vorläufige Beurteilung** Stand Sommer 2022. Hervorzuheben ist, dass durch die laufende Messkampagne im Solfeld Sulz sowie durch weitere, parallellaufende Arbeiten (z.B. gebirgsmechanische Modellierungen) das Wissen bezüglich des Zustands des Solfelds Sulz ständig erweitert wird.

In den Kapiteln 5 und 6 folgt schliesslich eine **vorläufige** Gefährdungs- und Risikoanalyse für die beiden Gefährdungsbilder (1) Oberflächendeformationen und (2) Grundwasserversalzung. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Eine Gefährdungsanalyse gibt Antworten auf die Frage: **«Was kann passieren?»**. Dabei steht die Identifikation möglicher Gefährdungsbilder im Zentrum, wobei im vorliegenden Fall auf die beiden oben genannten Gefährdungsbilder (1) Oberflächendeformationen und (2) Grundwasserversalzung fokussiert wird.
- Für beide Gefährdungsbilder haben wir **zwei Szenarien** definiert:
Szenario 1: «Status quo»
Szenario 2: «Tagbruchereignis im Solfeld Sulz»
Die beiden Szenarien stellen die logischen Endpunkte der zukünftigen Entwicklung im Solfeld Sulz dar. Die Szenarien sind in ihrer Natur hypothetisch aber gleichzeitig realistisch.
- Eine Risikoanalyse gibt schliesslich Antworten auf die Frage: **« Was darf passieren?»**. Die etablierten Gefährdungsbilder werden in diesem Schritt hinsichtlich ihrer Risiken bewertet und hinsichtlich ihrer Tragbarkeit beurteilt. Einerseits wird mit geeigneten Szenarien das Spektrum möglicher Ereignisse abgedeckt und andererseits wird die Wahrscheinlichkeit sowie das Schadensausmass dieser Ereignisse bestimmt.

Das vorliegende Dokument beantwortet somit nicht die Frage, ob und wann im Bereich des Solfelds Sulz ein Tagbruchereignis stattfinden wird. Diese Frage kann frühestens nach Vorliegen der Resultate der laufenden Messkampagnen sowie der gebirgsmechanischen Modellierungen zuverlässig beantwortet werden.

Die Gefährdungs- und Risikoanalyse soll vielmehr ein **Instrument für die aktuelle und zukünftige Massnahmenplanung** im Zusammenhang mit der beabsichtigten Nachsorge des Solfelds Sulz sein. Es werden darin auch unwahrscheinliche Ereignisse gedanklich durchgespielt, solange diese als relevant taxiert werden. Ziel ist es, durch die anvisierten Massnahmen das verbleibende Risiko auf ein für alle relevanten Stakeholder akzeptables Niveau zu bringen (Abbildung 1).

Die vorliegende Gefährdungs- und Risikoanalyse stellt einen vorläufigen Stand dar, welcher von der GEOTEST AG im Auftrag und unter Mitwirkung der Schweizer Salinen AG erarbeitet wurde. Sie sollte unter Einbezug weiterer relevanter Stakeholder spätestens vor Beginn der eigentlichen Solfeld-Nachsorge aktualisiert werden.

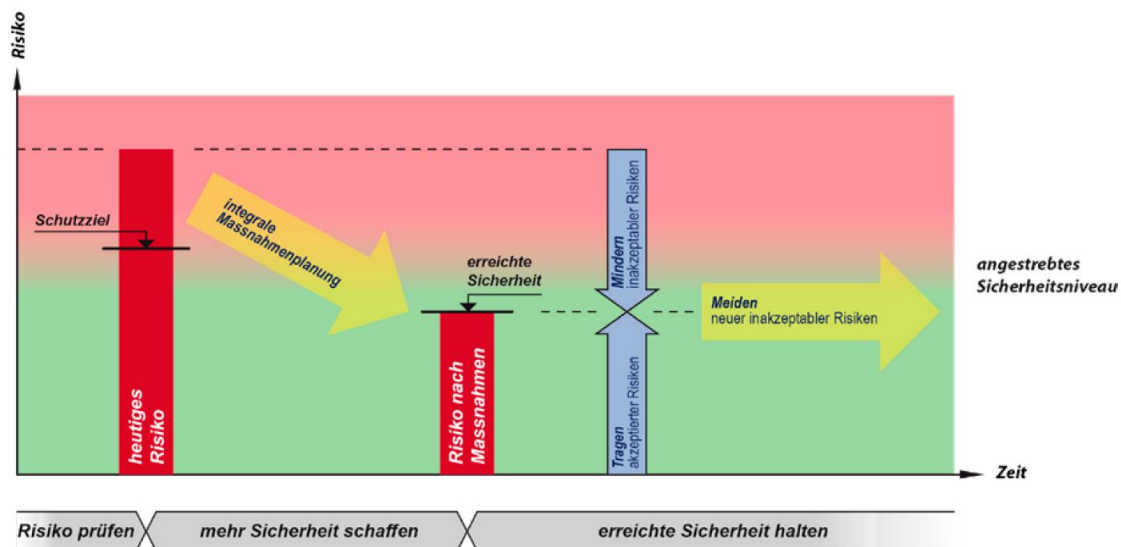


Abbildung 1: Ablauf und Ziel einer integralen Massnahmenplanung: Inakzeptable Risiken durch geeignete Massnahmen mindern und akzeptable Risiken als Gesellschaft tragen. Aus [1].

2. Einleitung

2.1 Ausgangslage

Die Schweizer Salinen AG (SSAG) gewinnt an ihrem Standort Schweizerhalle (Kanton Basel-Landschaft) Salz im Lösungsbergbauverfahren (*solution mining*). Für den Salzabbau entwickelt die SSAG dabei Solfelder, die in der Regel in mehreren Etappen erschlossen werden, wobei eine Etappe jeweils aus mehreren Produktionsbohrungen besteht.

Das aktuelle Solfeld des Standorts Schweizerhalle ist das Solfeld Grosszinggibrunn (Muttenz), das 2006 in Betrieb genommen wurde (Abbildung 2). Vor Inbetriebnahme des Solfelds Grosszinggibrunn erfolgte der Salzabbau im Zeitraum von 1982 bis 2019 hauptsächlich im Solfeld Sulz (Muttenz).

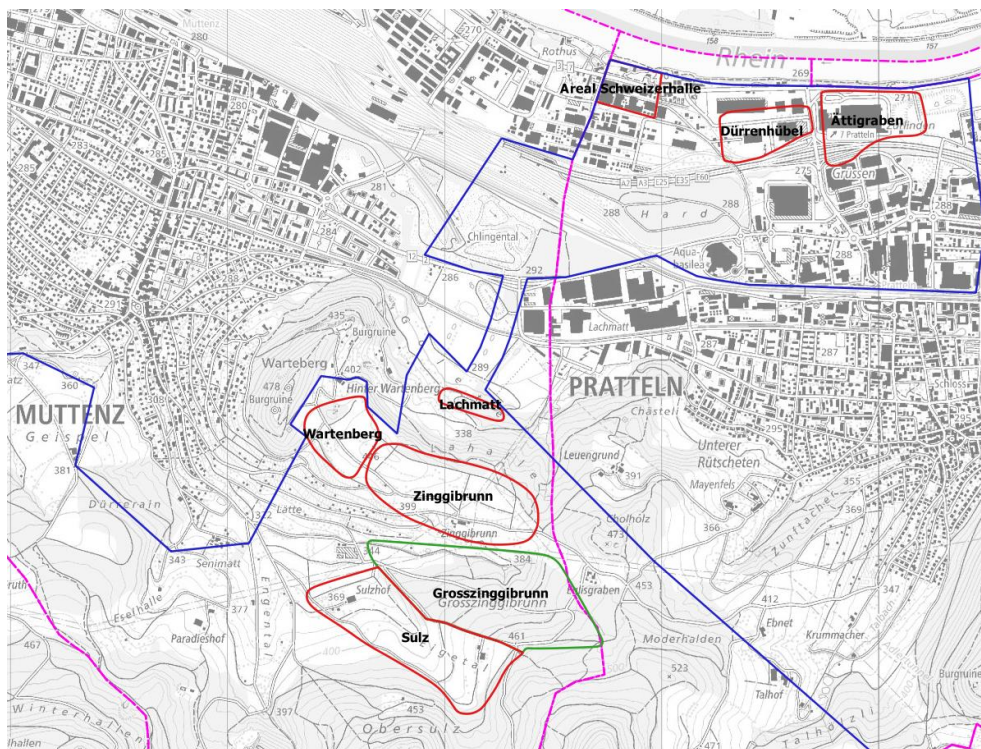


Abbildung 2: Nördliches Konzessionsgebiet der Saline Schweizerhalle (Kanton BL, blau umrandet) mit Lage des aktuellen Solfeldes Grosszinggibrunn (grün) sowie der nicht mehr aktiven Solfelder (rot) der Saline Schweizerhalle. Die beiden jüngsten Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn liegen im Tafeljura südöstlich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

Im Zusammenhang mit der im Kanton Basel-Landschaft anstehenden Konzessionsverlängerung wurde erstmals ein «generelles Überwachungs- und Nachsorgekonzept für die Solfelder der SSAG im Kanton Basel-Landschaft» erarbeitet [1] und mit den zuständigen Behördenstellen abgestimmt. Im Kern lehnt sich der in dem Konzept entwickelte Ansatz stark an das in der Schweiz etablierte Vorgehen im Deponiewesen an. Er unterteilt die Salzgewinnung in die Phasen (1) Planung- und Erkundung, (2) Bau, (3) Betrieb und (4) Nachsorge (Abbildung 3).

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

Abbildung 3: Phasen der Salzgewinnung gemäss [1].

Um ein erstes Solfeld im Kanton Basel-Landschaft in die Nachsorgephase zu überführen, wurde beschlossen, den Ist-Zustand der Produktionsbohrungen und Kavernen des Solfelds «Sulz» im Rahmen einer umfangreichen Messkampagne zu erfassen (bohrlochgeophysikalisches *well-integrity logging* sowie Kavernenvermessung mit Ultraschall).

2.2 Veranlassung für die Gefährdungs- und Risikoanalyse

Das Solfeld Sulz wurde in vier Etappen gebaut und besteht aus insgesamt 25 Produktionsbohrungen resp. Kavernen. Die Salzproduktion wurde in der Etappe Sulz 1 1982 in Betrieb genommen und endete in der Etappe Sulz 4 2019 (Abbildung 4). Die Etappe Sulz 1 wurde noch mittels Drucklaugung, d.h. ohne Stickstoff-Blanket gelaugt. Ab Etappe Sulz 2 wurden zunächst alle Kavernen mit einem Stickstoff-Blanket betrieben. Jedoch wurden in der Betriebsphase zwischen mehreren Bohrungen / Kavernen Verbindungen festgestellt. Daraufhin wurden die früheren Kavernen der Etappen Sulz 1 bis Sulz 3 oft quergelaugt, z.T. unter Aufgabe des ursprünglichen Stickstoff-Blankets. In einer späteren Produktionsphase wurde dann versucht, die verbundenen Kavernen so weit wie möglich getrennt zu betreiben [3].

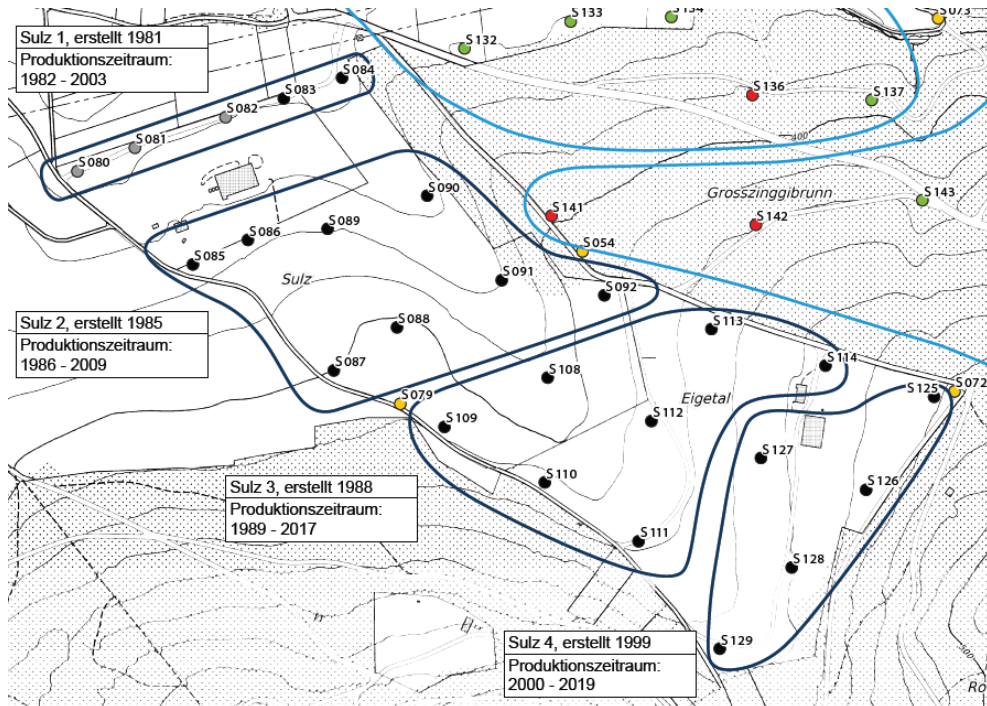


Abbildung 4: Die vier Etappen des Solfelds «Sulz (dunkelblau umrandet) mit den dazugehörigen Produktionsbohrungen (grau = Bohrung verfüllt, schwarz = Bohrung im Stand By Modus, gelb = Sondierbohrung). Ebenfalls dargestellt sind die westlichsten Bereiche des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn (hellblau umrandet) mit den dazugehörigen Produktionsbohrungen (grün = Bohrung aktiv, rot = Bohrung inaktiv). Aus [3].

Im Rahmen einer ersten Zusammenstellung und Auswertung vorhandener Daten zum damalig bekannten Zustand der Produktionsbohrungen sowie insbesondere zu den Kavernengeometrien («Factsheets Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn») vom Mai 2021 [4] wurden in mehreren Produktionsbohrungen und Kavernen signifikante Abweichungen von deren Ist-Zustand zum Soll-Zustand festgestellt. Hervorzuheben ist hierbei jedoch, dass die damals analysierten Kavernenvermessungen in der Regel um das Jahr 2012 und somit deutlich vor dem Produktionsende der beiden Etappen Sulz 3 und Sulz 4 durchgeführt wurden. Die aus Kavernenintegritätsüberlegungen relevantesten Abweichungen zum Soll-Zustand betrafen (1) die Mächtigkeit resp. das Nicht-Vorhandensein der Salzschwebe im Kavernen-Hangenden, (2) die laterale Ausdehnung der einzelnen Kavernen, (3) die verbleibenden Pfeilmächtigkeiten zwischen benachbarten Kavernen sowie (4) das generelle Vorhandensein von miteinander verbundenen Einzelkavernen zu sogenannten «Galeriekavernen».

Parallel zu den geometrischen Auswertungen wurden im Rahmen der jährlich durchgeführten Senkungsmessungen (Präzisionsnivelements) im Bereich des

Solfelds Sulz seit einigen Jahren lokal Senkungen nachgewiesen, die deutlich über den durch analytische Berechnungen vorausgesagten Deformationsbeträgen lagen. Erhöhte Senkungsbeträge können darauf hindeuten, dass im Gebirge Prozesse auftreten, die nicht mehr allein durch zu erwartende Spannungumlagerungen im Gebirge erklärt werden können, die im Umfeld der Kavernen infolge der Kavernenkonvergenz¹ auftreten, sondern dass neben visko-elasto-plastischen auch bruchhafte Prozesse im Untergrund auftreten.

Infolge der oben dargelegten Feststellungen wurde seitens SSAG beschlossen, eine erste Beurteilung der Stabilität der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn vornehmen zu lassen [5]. Die auf Basis der Factsheets [4] und unter Zuhilfenahme verschiedener Beurteilungsansätze vorgenommene, semi-quantitative Beurteilung kam zum Schluss, dass die Langzeitsicherheit der meisten Kavernen im Solfeld Sulz aufgrund potenzieller Firstbrüche nicht gegeben ist. Infolge eines Firstbruchs kann an der Geländeoberfläche ein ausgeprägter Senkungstrog bis hin zu einer Kraterbildung (Erdfall resp. Tagbruch) mit einem abrupten Abbruch an der Geländeoberkante auftreten.

Gegenüber dieser Eingangsanalyse hat sich die Datengrundlage zum Ist-Zustand des Solfelds Sulz aufgrund der aktuell (Frühsommer 2022) noch laufenden Messkampagne verbessert. Die bislang erhobenen zusätzlichen Daten zum Zustand der Produktionsbohrungen und der stillgelegten Salzkavernen akzentuieren jedoch die in [5] gemachte gebirgsmechanische Erstbeurteilung weiter. Insbesondere wurden bereits zwei kollabierte Salzkavernen (S109 und S126) nachgewiesen, in denen sich kaminartige Verbrüche im Hangenden der ursprünglichen Kavernen progressiv entwickeln. Somit weist der aktuelle Wissenstand auf einen allgemein schlechten Zustand des Solfelds Sulz hin [6]. Die dafür verantwortlichen Prozesse laufen weiter und sind momentan nicht unter Kontrolle. Es stehen zwei Gefährdungsbilder im Fokus:

1. Starke Oberflächendehformationen bis hin zu Tagbrüchen (kaminartiger Verbruch bis an die Geländeoberfläche).
2. Versalzung des Muschelkalk-Aquifers infolge undichter oder kollabierter Salzkavernen und/oder undichter Produktionsbohrungen.

¹ Kavernenkonvergenz: Als Folge der Hohlraumschaffung ändert sich der Gebirgsspannungszustand. Im Falle von Steinsalz, dessen gebirgsmechanisches Verhalten von visko-elasto-plastischen Eigenschaften bestimmt wird, führt diese Zustandsänderung zu einem Kriechen des umgebenden Salzes. Das Salzkriechen führt dazu, dass das Kavernenvolumen mit der Zeit kontinuierlich abnimmt. Dieser Prozess wird als Konvergenz bezeichnet.

2.3 Perimeter und Zielsetzung

Die beiden Gefährdungsbilder (1) starke Oberflächendehformationen und (2) Grundwasserversalzung sollen für den Untersuchungsperimeter Solfeld Sulz im Rahmen einer Gefährdungs- und Risikoanalyse untersucht werden.

Es sollen für beide Gefährdungsbilder Szenarien gebildet werden. Darüber hinaus sollen die möglichen Auswirkungen der für die beiden Prozesse gebildeten Szenarien auf Anthro- und Geosphäre unter Berücksichtigung der jeweiligen Eintretenswahrscheinlichkeit abgeschätzt werden.

Abschliessend sollen im Rahmen der Gefährdungs- und Risikoanalyse für beide Gefährdungsbilder sinnvolle Überwachungsmassnahmen definiert werden.

2.4 Methodik

Die vorliegende Gefährdungsanalyse stützt sich zum einen auf den zur Verfügung stehenden Messdaten der SSAG sowie des Kantons Basel-Landschaft ab. Zudem werden anhand von Literaturangaben Analogieschlüsse gemacht und auf die Situation im Solfeld Sulz übertragen. Vereinzelt werden Szenarien auf der Basis von bekannten Faustformeln und analytischen Berechnungsansätzen hergeleitet.

3. Literatur und Datensätze

- [1] Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS (2014): Integrales Risikomanagement – Bedeutung für den Schutz der Bevölkerung und ihrer Lebensgrundlagen.
- [2] GEOTEST AG (2021): Generelles Überwachungs- und Nachsorgekonzept für die Solfelder der Schweizer Salinen AG im Kanton Basel-Landschaft (unveröffentlicht).
- [3] Schweizer Salinen AG (2020): Grosszinggibrunn, Sulz: Undichtigkeiten und Verbindungen zwischen Kavernen – aktueller Kenntnisstand (Aktennotiz, unveröffentlicht).
- [4] GEOTEST AG (2021): Factsheets Solkavernen der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn (Arbeitsdokumente Schweizer Salinen AG, Stand 21.05.2021, unveröffentlicht).
- [5] DEEP.KBB (2021): Beurteilung der Stabilität der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn der Schweizer Salinen AG – Eingangsanalyse 2021 (unveröffentlicht).
- [6] GEOTEST AG (2022): Weiteres Vorgehen für Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn (BL); Aktennotiz 2720047.9 vom 09.03.2022 (unveröffentlicht).
- [7] GEOTEST AG (2020): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-6 Senkungen und Bergschäden (unveröffentlicht).
- [8] Rapp Infra AG (2022): Senkungsmessung Gebiet Wartenberg, Muttenz, Pratteln – Technischer Bericht 2021 (unveröffentlicht).
- [9] Rapp Infra AG (2022): Lage-Überwachungsmessung Muttenz Gebiet Eigental, Sulz, Grosszinggibrunn – Technischer Bericht Messung 2021 (unveröffentlicht).
- [10] DEEP.KBB (2019): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-1 Bau und technischer Betrieb Soleförderung (unveröffentlicht).
- [11] Institut für Gebirgsmechanik GmbH (2019): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-4 Gebirgsmechanik (unveröffentlicht).
- [12] Bérest, P. (2017): Cases, causes and classifications of craters above salt caverns. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 100 (2017) 318-329.
- [13] Warren, J. K. (2016): Evaporites – A Geological Compendium (Second Edition).
- [14] Minkley, W. (2018): Expert Judgement Sinkhole over Solution-Mined Cavern Field Dow Brazil S/A Mineracao (unveröffentlicht).

- [15] Hauber, L. (1987): Geologischer Bericht über den Einsturztrichter im Neu-land (Gde. Rheinfelden) vom 6.12.1986 (unveröffentlicht).
- [16] Voegeli, S. (2017): Salt Cavern Failure and Sinkhole Development (KDHE Geology & Well Technology Section Fall Seminar (unveröffentlicht).
- [17] GEOTEST AG (2019): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-2: Regionale Geologie (unveröffentlicht).
- [18] GEOTEST AG (2019): Expertenbericht Soleförderung Rütihard. ExB-3: Hydrogeologie (unveröffentlicht).
- [19] GEOTEST AG (2019): Muttenz, Sondierbohrung Rütihard – Geologie und Stratigraphie Sondierbohrung S157 (unveröffentlicht).
- [20] GEOTEST AG (2020): Muttenz, Sondierbohrung Rütihard – Geologie und Stratigraphie Sondierbohrung S156 (unveröffentlicht).
- [21] Regierungspräsidium Freiburg (2008): INTERREG III A Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim. Endbericht.
- [22] Spottke, I., Zechner, E., Huggenberger, P. (2005): The southeastern border of the upper rhine graben: a 3D geological model and its importance for tectonics and groundwater flow. Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.) 94: 580 – 593.
- [23] Zechner, E., Epting, J. (2021): Physikalische, hydrochemische und Isotopen-Untersuchungen an Tiefengrundwasserproben von 2020 aus Muttenz und Pratteln: Hydrogeologische Auswertung und Empfehlungen. BGA BL-188 (unveröffentlicht).
- [24] Post, V. & Simmons, C.T. (2022): Variable-Density Groundwater Flow. Published by the Groundwater Project.
- [25] Zidane, A. et al. (2014): Simulation of rock salt dissolution and its impact on land subsidence. Hydrology and Earth System Sciences, 18.
- [26] GEOTEST AG (2022): Muttenz, Bohrfeldintegrität Sulz / Grosszinggibrunn. Vorgehenskonzept Grundwassermonitoring für die Solfelder Grosszinggibrunn / Sulz (unveröffentlicht).

4. Ist-Zustand Solfeld Sulz

Verschiedene, aktuell (Juni 2022) laufende Messkampagnen tragen zu einer kontinuierlichen Verbesserung des Wissensstands bezüglich des Ist-Zustands des Solfelds Sulz bei. Hervorzuheben sind dabei insbesondere folgende Kampagnen:

- Seit 2002, jährlich durchgeführte **Senkungsmessungen** (Präzisionsnivelements, bislang 20 Folgemessungen; in einfacherer Konfiguration reicht die Datenreihe bis 1985 zurück).
- Seit 2019, jährlich durchgeführte **Lagemessungen** (statische GNSS-Messungen, bislang zwei Folgemessungen).
- Seit 2021, jährlich durchgeführte **photogrammetrische Vermessungen** (Drohnenbefliegungen, bislang eine Folgemessung, gemessene Deformationen noch unterhalb der Auflösungsgrenze der Methode).
- Seit Herbst 2021, **Zustandserhebung Produktionsbohrungen und Kavernen** Solfeld Sulz (Kavernenvermessungen durch SOCON Sonar Control sowie *cased hole loggings* durch Terratec Geophysical Services), Messkampagne sollte Ende 2022 beendet sein.

Die resultierenden vorläufigen Erkenntnisse zum Ist-Zustand des Solfelds sind in den nachfolgenden Kapiteln zusammengefasst.

4.1 Entwicklung Oberflächendeformationen

4.1.1 Senkungen

Für das Solfeld Sulz wurde 2006 eine numerische Vorausberechnung der zu erwartenden Senkungen durchgeführt. Gemäss den Resultaten aus den Modellrechnungen ist im Zentrum des durch den Lösungsbergbau induzierten Senkungstrog nach 20 Jahren Betriebszeit eine kumulative maximale Senkung von ca. 10 cm zu erwarten. Dies entspricht einer maximalen Senkungsrate von ca. 5 mm/a [7].

Die in der aktuellen Messkonfiguration seit 2002 jährlich durchgeführten Senkungsmessungen zeigen seit ca. 2015 (örtlich auch bereits seit ca. 2011) in den Solfeldetappen Sulz 2, Sulz 3 und Sulz 4 an zahlreichen Orten eine deutliche Zunahme der Senkungsrate. Exemplarisch kann die Zunahme der Senkungsrate am Fixpunkt 472S abgelesen werden, der im Bereich des Bohrplatzes der Produktionsbohrung S112 liegt (Abbildung 5). Die für den Zeitraum 2016 – 2021 gemittelte, jährliche Senkungsrate beläuft sich auf ca. 18 mm/a, was mehr als dem Dreifachen der numerisch simulierten, maximalen Senkungsrate entspricht.

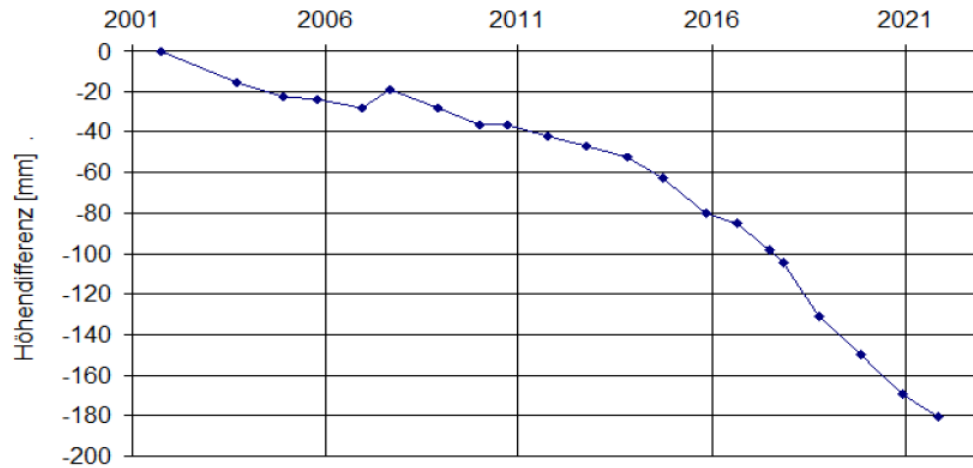


Abbildung 5: Senkungsverlauf für den Messpunkt 472S, der im Bereich der Produktionsbohrung S112 (Sulz 3) liegt. Seit ca. 2015 ist eine deutliche Zunahme der Senkungsrate erkennbar. Die gemittelte jährliche Senkungsrate für den Zeitraum 2016 - 2021 beträgt ca. 18 mm/a. Aus [8].

Eine Beschleunigung der Senkungsraten wird in den Solfeldetappen Sulz 2, Sulz 3 und Sulz 4 seit ca. 2015 praktisch flächig beobachtet. Das heisst, dass seit ca. 2015 an vielen Messpunkten Senkungen > 10 mm/a und an vereinzelt Messpunkten Senkungen > 20 mm/a nachgewiesen werden.

Bemerkenswert ist, dass im Rahmen der letzten Folgemessung im Dezember 2021 an zwei unmittelbar benachbarten Messpunkten (479S und D1, Sulz 4, in der Nähe des Bohrplatzes der Produktionsbohrung S126) signifikante Hebungen gemessen wurden (Abbildung 6). Die Hebungsraten belaufen sich auf 37 mm/a und 48 mm/a.

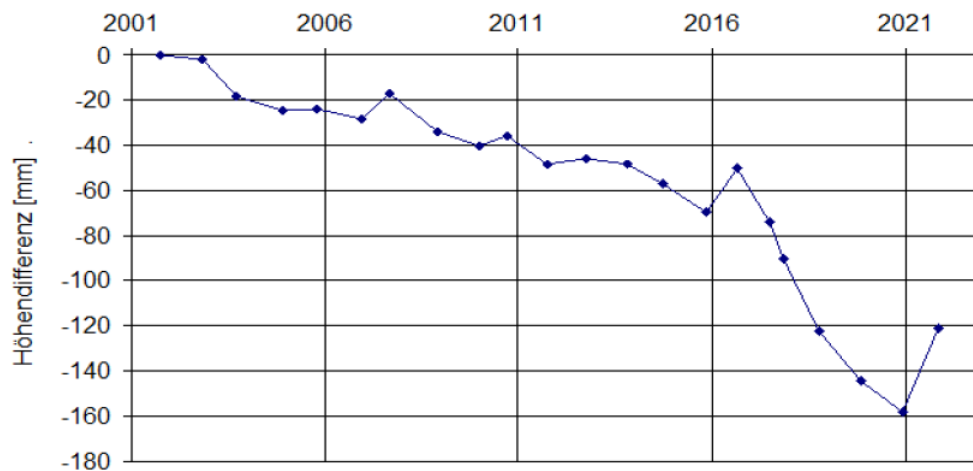


Abbildung 6: Senkungsverlauf für den Messpunkt 479S, der im Bereich der Produktionsbohrung S126 (Sulz 4) liegt. Von 2016 – 2020 war nach einer kurzfristigen Hebung eine deutliche Zunahme der Senkungsrate erkennbar. Im Rahmen der letzten Folgemessung im Dezember 2021 wurde eine Hebungsrates von 37 mm/a ermittelt. Aus [8].

4.1.3 Visuelle Beurteilung

Das Solfeld Sulz weist eine ausgeprägte Topografie aus. Aufgrund der Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen ist die Geländeoberfläche zudem unruhig und einem steten Wandel unterworfen.

Visuell können an der Geländeoberfläche bislang keine Anzeichen für übermäßige Deformationen festgestellt werden (keine Gebäuderisse, keine Geländestufen o.ä.).

4.2 Zwischenresultate zum Zustand der Produktionsbohrungen

Im Rahmen der aktuell laufenden *cased-hole logging* Kampagne sind bis dato 12 der insgesamt 25 Produktionsbohrungen untersucht worden. Die bis anhin ausgewerteten Logs lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die letzte zementierte Rohrtour (LZRT, 8 5/8" resp. 9 5/8") ist oft über weite Strecken stark korrodiert. Teilweise sind Lochfrasskorrosion und Spaltkorrosion erkennbar.
- Vereinzelt sind Verrohrungen abgerissen und in die Kavernen gefallen.
- Es gibt Hinweise auf ungenügende Zementation und damit verbundenem *flow behind casing*.
- Es finden vertikale Fluidströmungen («Frischwasser») in die Kavernen statt, die in den Kavernen zu Nachsoleffekten führen können.

Aufgrund der Beobachtungen ist davon auszugehen, dass die mechanische und hydraulische Integrität der Produktionsbohrungen bei den meisten Bohrungen stark beeinträchtigt resp. nicht gegeben ist (Leckagen). Der Ist-Zustand ist nur vereinzelt akzeptabel, generell schlecht bis vereinzelt sogar besorgniserregend. Erschwerend hinzu kommt die Tatsache, dass die bestehenden Bohrungslebensläufe teilweise unvollständig sind.

4.3 Zwischenresultate Kavernengeometrien und Kavernenentwicklungen

Die aus Kavernenintegritätsüberlegungen relevantesten Abweichungen der Ist-Geometrien der Kavernen zu deren Soll-Zustand betreffen (1) die Mächtigkeit resp. das Nicht-Vorhandensein der Salzscheibe im Kavernen-Hangenden, (2) die laterale Ausdehnung der einzelnen Kavernen, (3) die verbleibenden Pfeilmächtigkeiten zwischen benachbarten Kavernen sowie (4) das generelle Vorhandensein von miteinander verbundenen Einzelkavernen zu sogenannten «Galeriekavernen» [4].

Im Rahmen der laufenden Zustandserhebungen (*cased hole logging* und Kavernenvermessung) wurden im Januar und Februar 2022 Teilverbrüche in zwei Kavernen entdeckt.

Bohrung / Kaverne S109

Die Bohrung ist aktuell nur noch bis in eine Teufe von 349 m befahrbar, der Rohrschuh der LZRT lag gemäss Ausbauprotokoll bei 356.2 m. Der unterste Teil der LZRT ist abgerissen.

Videoaufnahmen zeigen in einer Teufe von 349 m lose Blöcke. Die Höhe des Verbruchs kann aufgrund der fehlenden Befahrbarkeit nicht ermittelt werden.



Abbildung 8: Videoaufnahme (axial nach unten, unterhalb des Rohrschuhs) vom 17.02.2022 der Produktionsbohrung S109 in einer Teufe von 349 m. Es sind lose Blöcke zu erkennen, woraus sich ein Teilverbruch der ursprünglichen Kaverne ableiten lässt. Der unterste Teil der LZRT ist abgerissen. Bohrlochaufnahme: Terratec Geophysical Services.

Bohrung / Kaverne S126

Ein deutlich grösserer Kavernenteilverbruch wurde in S126 festgestellt. Das aktuelle Rohrende der LZRT liegt bei ca. 330 m, der ursprüngliche Rohrschuh lag bei 391 m, somit fehlen gut 60 m der LZRT.

Bei 330 m ist die Vermessungssonde in einen grossen Hohlraum eingefahren, dessen Volumen beträgt ca. 25'400 m³. Das Dach des Hohlraums ist gegen S geneigt

und befindet sich im Dachbereich der evaporitischen Zeglingen-Formation (Dolomitzone und Obere Sulfatzone, Abbildung 9). Der Hohlraum ist mit (Gips-, Anhydrit-, Calcit- und Halit-) gesättigtem Fluid gefüllt und aufgrund seiner Erstreckung bis in die Dolomitzone mit dem Muschelkalk-Aquifer verbunden.

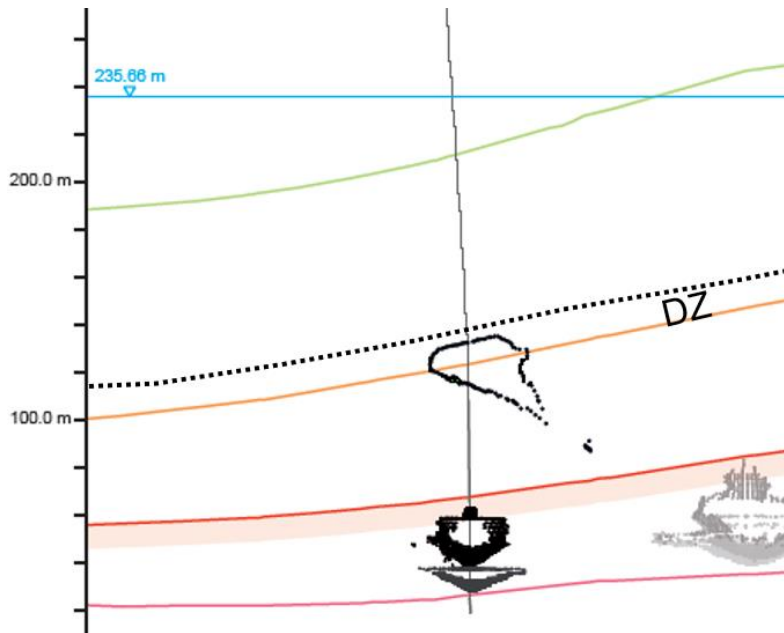


Abbildung 9: S-N-Profil (nicht massstäblich) durch die Kaverne S126. Unten ist die letzte durchgeführte Hohlraumvermessung der ursprünglichen Kaverne sichtbar, diese war zum Zeitpunkt der Messung bis fast in das Dach des Salzlagers (rote Linie) gesolt. Der durch den Kavernenteilverbruch entstandene und vermessene Hohlraum ist oben dargestellt. Er reicht vermutlich bis in das Dach der Dolomitzone («DZ»). Am rechten Bildrand ist die Kaverne S125 angedeutet.

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

4.4 Vorläufiges Fazit Ist-Zustand Solfeld Sulz

Aufgrund der bis dato vorliegenden Resultate kann folgendes vorläufiges Fazit zum Ist-Zustand des Solfelds Sulz gezogen werden.

- Die Produktionsbohrungen sind generell in einem schlechten und teilweise besorgniserregenden Zustand.
- Die Kavernengeometrien entsprechen in mehreren Aspekten nicht den bergsmechanischen Vorgaben.

- Die im Untergrund ablaufenden Prozesse sind noch nicht vollständig verstanden.
- Es treten Prozesse auf (z.B. ungewollte Nachsolung), die kontinuierlich weiterlaufen und aktuell nicht unter Kontrolle sind.
- Es können daraus zwei Gefährdungsbilder abgeleitet werden:
 1. Starke Oberflächendehformationen bis hin zu Tagbrüchen (kaminartiger Verbruch bis an die Geländeoberfläche).
 2. Versalzung des Muschelkalk-Aquifers infolge undichter oder kollabierter Salzkavernen und/oder undichter Produktionsbohrungen.

5. Oberflächendeformationen

5.1 Einleitung und Grundlagen

In den folgenden Kapiteln werden konzeptuelle Überlegungen hinsichtlich der Stabilität von Kavernen im Schichtsalz vermittelt sowie aus der Fachliteratur bekannte Analogiebeispiele eingeführt. Anschliessend wird auf dieser Basis in Kapitel 0 eine Gefährdungs- und Risikoanalyse «Oberflächendeformationen» vorgenommen.

5.1.1 Betrachtungsperimeter

Der Betrachtungsperimeter «Oberflächendeformationen» umfasst das gesamte Solfeld Sulz sowie einen 100 m breiten Puffer um die äussersten Produktionsbohrungen (Abbildung 10). Der 100 m breite Puffer wird aufgrund eines möglichen Kavernenradius von 50 m plus 50 m Sicherheitszuschlag festgelegt.

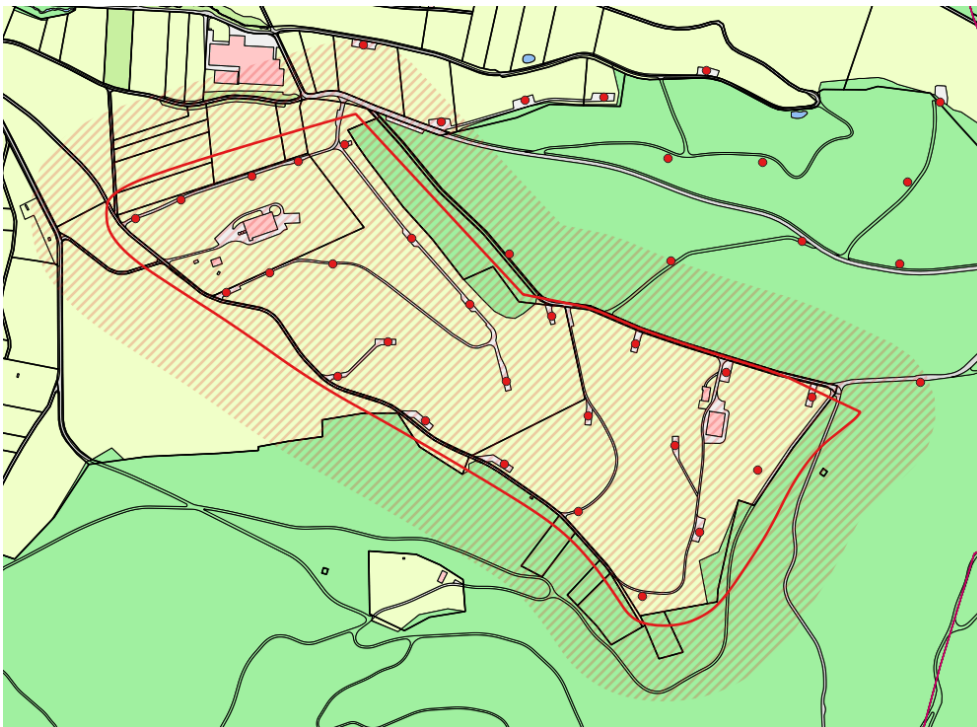


Abbildung 10: Der Betrachtungsperimeter «Oberflächendeformationen» (rot, schraffiert, nicht massstäblich). Das Solfeld Sulz ist rot umrandet, Gemeindegrenzen sind lila dargestellt.

5.1.2 Stabilität von Kavernen im Schichtsalz

Eine schematische Darstellung des Lösungsbergbauverfahrens mit der Nomenklatur der wichtigsten Haupttragelemente des die Kavernen umgebenden Gebirges findet sich in Abbildung 11.

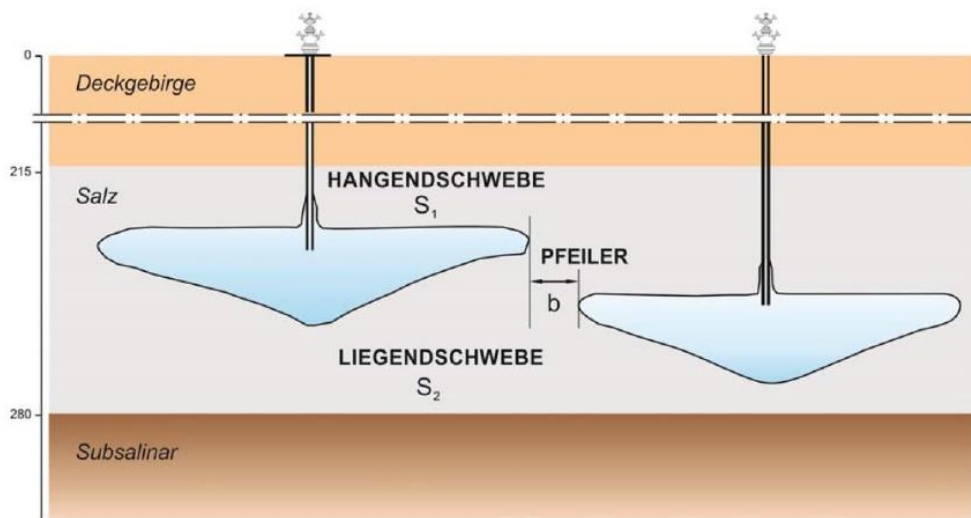


Abbildung 11: Schema Lösungsbergbau und Nomenklatur der wichtigsten Haupttragelemente des die Kavernen umgebenden Gebirges. Aus [10].

Für die nachfolgenden Erläuterungen sind einführend einige Definitionen notwendig. Ein «**Senkungstrog**» ist ein Trog an der Geländeoberfläche, der sich über jedem Hohlraum im Untergrund mit der Zeit entwickelt. Das vertikale Profil eines Senkungstrogs ist nur wenig ausgeprägt, mit geringen Neigungen an den Trogrändern von lediglich wenigen mm/m. In Einzelfällen geben Stauchwülste oder Zerrspalten an der Erdoberfläche Hinweise zu Diskontinuitäten bei den mit den Senkungen assoziierten horizontalen Verschiebungen [12].

Ein «**Erdfall**» (auch **Tagbruch** oder **Kraterbildung**) wird durch die abwärts gerichtete Verschiebung eines Gebirgsblocks (Kolbenmodell) oder die horizontal einwärts zu einer zentralen Öffnung hin gerichtete Verschiebung von kohäsionslosem Material (Sanduhrmodell) gebildet. Bei einem Erdfall treten scharfe Diskontinuitäten in den vertikalen Deformationsbeträgen von mehreren Metern auf, welche an der Erdoberfläche zu der Bildung von charakteristischen Geländestufen führen [12].

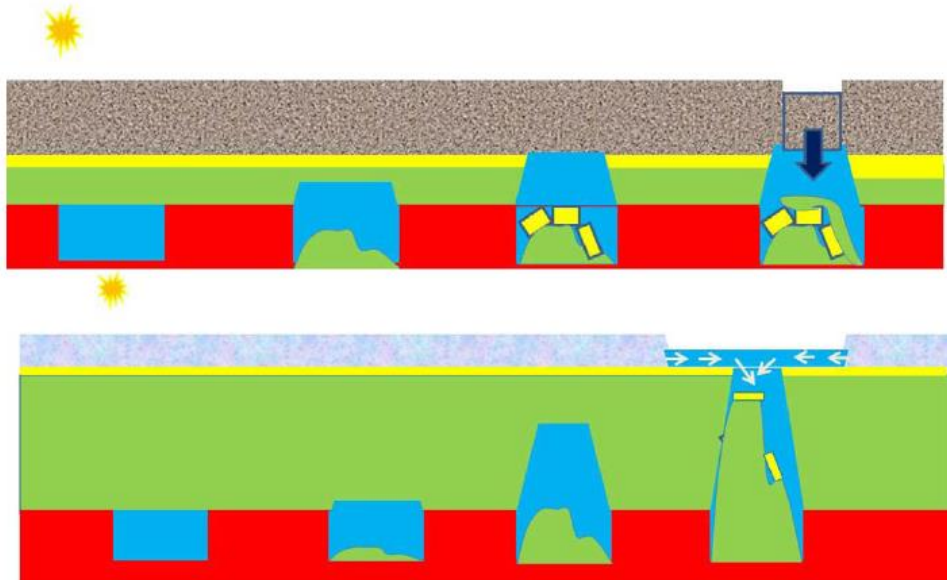


Abbildung 12: Kategorisierung von Erdfällen (Kraterbildung). Kolbentyp (oben) und Sanduhrty (unten). Aus [12].

Grundsätzlich kann über einer dicht verschlossenen Kaverne im Salzgestein kein Erdfall eintreten. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass eine ausreichend mächtige Sicherheits-Salzschebe im Hangenden der Kaverne vorhanden ist (Abbildung 11), die auch bei einem sich durch die einsetzende Konvergenz aufbauendem Überdruck in der verschlossenen Kaverne und druckgetriebener Perkolations² ihre mechanische Integrität bewahrt und ihr Tragverhalten langfristig aufrechterhält [11].

Erdfälle sind jedoch aus vielen Gebieten mit unterirdischem Rohstoffabbau bekannt (siehe z.B. [11], [12], [13]), auch aus Gebieten wo Steinsalz im Lösungsbergbauverfahren gewonnen wird. Dabei folgt die Entstehung von Erdfällen über Kavernen grundsätzlichen geomechanischen Versagensabläufen [14]:

1. Im Salzlager wird ein Hohlraum mit ausreichend resp. zu grosser Spannweite gesolt.
2. Die Salz-Sicherheitschwebe im Hangenden der Kaverne verliert ihre Integrität, wird weggesolt oder stürzt in die Kaverne.

² Druckgetriebene Perkolations: fluiddruck-getriebene Generierung von hydraulischen Fließwegen entlang von Diskontinuitäten im mikro- und makroskopischen Massstab im Salzgebirge (Korn Grenzen, Schichtflächen), wenn die Fluiddrucke innerhalb der Kaverne die minimale Gebirgsspannung übersteigen; siehe ExB-4 Gebirgsmechanische Bewertung.

3. Das Deckgebirge kann den unter Soledruck stehenden Hohlraum im Salz-lager nicht mehr bruchfrei überspannen.
4. Im geklüfteten Deckgebirge über dem Hohlraum setzt unter der Wirkung des herrschenden Sole- bzw. Kluftwasserdrucks der Prozess des Blockabgleitens ein (kaminartige Verbrüche).

5.1.3 Analyse bekannter Tagbrüche über Salzkavernen weltweit

Weltweit sind zahlreiche Tagbrüche über Salzkavernen im Schichtsalz bekannt und geomechanisch untersucht worden. Im Rahmen einer solchen Aufarbeitung wurde erkannt, dass als Ursache solcher Tagbrüche in der Regel das Hochsolen der Kaverne bis zum Dach des Salzlagers, d.h. der Verlust einer Salz-Sicherheits-schwebe im Hangenden der Kaverne, anzusehen ist [12]. Dadurch wird das Deckgebirge im Hangenden des Salzlagers durch die gesättigte Sole aufgeweicht resp. verwittert und es kommt im Bereich der Kavernenfirste zu kaminartigen Teilverbrüchen. Diese Prozesse laufen verhältnismässig langsam ab.

Die Analyse bekannter Tagbrüche über Schichtsalzkavernen lässt somit die Schlussfolgerung zu, dass dem Stehenlassen einer Salz-Sicherheitsschwebe im Kavernenhangenden eine entscheidende Bedeutung für die langfristige Kavernenstabilität zukommt.

5.1.4 Tagbruch Kaverne R31 (Solfeld Neuland, Saline Riburg)

Am 6. Dezember 1986 ereignete sich im Solfeld Neuland der Saline Riburg direkt neben der Kantonsstrasse zwischen Rheinfelden und Möhlin ein Tagbruch (Abbildung 13). Der dabei entstandene Erdtrichter hatte eine Fläche von rund 7'200 m² bei einer maximalen Absenkung der Geländeoberfläche von bis zu 6 m [15].



Abbildung 13: Erdfall / Tagbruch über der Solkaverne R31 der Saline Riburg (Rheinfelden) vom 6. Dezember 1986. Quelle: Neue Fricktaler Zeitung.

Der Salzabbau in der Produktionsbohrung R31 erfolgte seinerzeit durch das aus heutiger Sicht überholte Drucklaugungs-Verfahren. Dabei wurde Frischwasser für den Solprozess unter Druck in die Laugungskaverne verpresst. In der Produktionsbohrung R31 führte dies zu einer unkontrollierten lateralen Ausdehnung der Kaverne in nordwestlicher Richtung.

Die zu grosse Ausdehnung sowie das Fehlen einer Salz-Sicherheitsschwebe sorgten dafür, dass das darüber liegende Deckgebirge die Kaverne nicht länger ohne Bruchbildung überspannen konnte. Infolgedessen kam es zur Ausbildung von Druck-Entlastungsklüften und zur Abnahme des Kavernendruckes in der stillgelegten Produktionsbohrung R31. Dies hatte einen Stabilitätsverlust der Kaverne zur Folge, der schliesslich zum Tagbruch führte. Dabei kam es zu einem zapfenartigen Absacken des über dem Hohlraum liegenden Deckgebirges, welches als Block und mit relativ scharfer räumlicher Ausdehnung absackte (Abbildung 14). Gleichzeitig wurde Sole aus der Kaverne, entlang neu entstandener Wasserwegsamkeiten (Klüfte im Deckgebirge), in den Grundwasserleiter im Hangenden der Kaverne verdrängt.

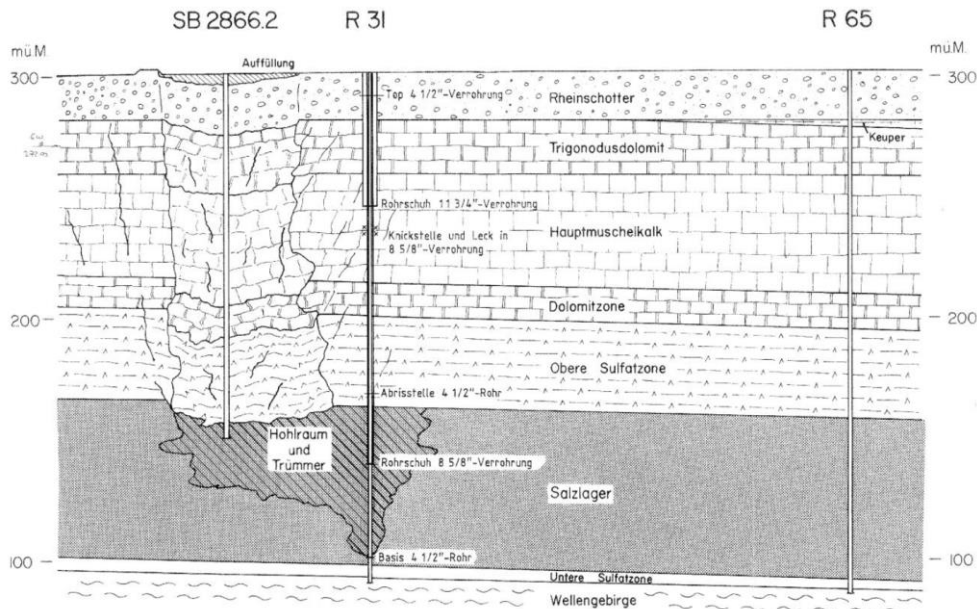


Abbildung 14: Geologisches Profil durch den Tagbruch über der Solkaverne R31 des Solfelds Neuland (Saline Riburg). Aus [15].

Das Beispiel des Tagbruchs R31 zeigt klare Gemeinsamkeiten mit den in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Ereignissen:

- Eine **zu grosse Firstspannweite** sowie eine **fehlende Salz-Sicherheits-schwebe** zusammen mit einem ungünstigen Trennflächengefüge in den kompetenten Abschnitten des Deckgebirges sind die Hauptursachen für den Einsturz der Kaverne.
- Die resultierende Kraterbildung kann dem **Kolbentyp** zugeordnet werden. Das Deckgebirge über dem Kavernenverbruch ist als **weitestgehend intakter Block** in den Hohlraum gesackt.

5.1.5 Konzeptuelle Überlegungen zur Entwicklung von Tagbrüchen

Bevor ein Tagbruch eintritt, migrieren instabile Solkavernen durch progressive, kaminartige Verbrüche nach oben. Es bildet sich über der ursprünglichen Kaverne ein sogenannter Kamin (Bruchschlot) aus (Abbildung 15).

Die Kavernenmigration dauert so lange an bis

- der Kamin kompetentes / tragfähiges Gebirge erreicht,
- Kaverne und Kamin vollständig mit Gesteinstrümmern gefüllt sind oder
- der Kamin die Geländeoberfläche erreicht und dort einen Krater bildet [16].

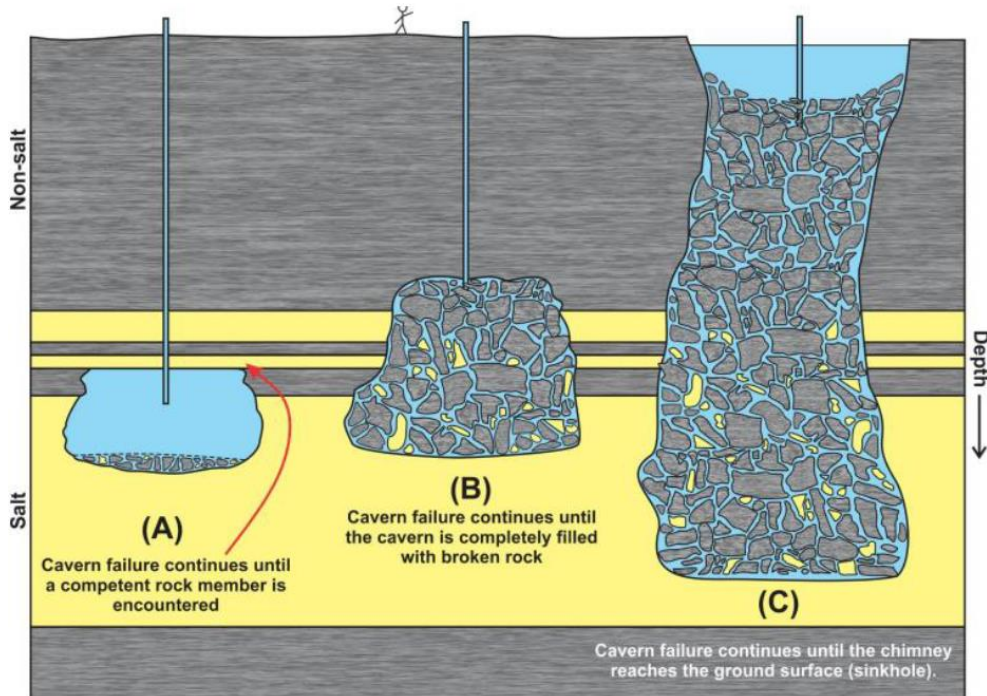


Abbildung 15: Kavernenmigration durch kaminartige Verbrüche bei instabilen Solkavernen. Der Verbruch dauert an bis: (A) der Kamin kompetentes / tragfähiges Gebirge erreicht, (B) Kaverne und Kamin vollständig mit Gesteinstrümmern gefüllt sind oder (C) der Kamin die Geländeoberfläche erreicht und dort einen Krater bildet. Aus [16].

Durch die progressive Bruchbildung erfährt das Deckgebirge eine Auflockerung durch Erhöhung des Hohlraum-/Porenanteils. Wie oben beschrieben, dauern die Verbruchprozesse so lange an, bis der entstehende Hohlraum vollständig mit Gesteinstrümmern aufgefüllt ist. Um abzuschätzen, ob sich der kaminartige Verbruch bis an die Geländeoberfläche fortsetzen wird, müssen folgende Randbedingungen bekannt sein: (1) Kavernenvolumen, (2) Form des Bruchschlots (abhängig von den rheologischen Eigenschaften des Deckgebirges) und (3) Auflockerungsfaktor des Deckgebirges.

5.2 Gefährdungs- und Risikoanalyse «Oberflächendeformationen»

5.2.1 Schutzgüter und Schutzobjekte

Im Betrachtungsperimeter Abbildung 10 befinden sich hinsichtlich der Prozesse Oberflächendeformationen und Tagbruch folgende Schutzgüter bzw. Schutzobjekte:

- Südlichste Bereiche des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn der SSAG.
- Inaktives Solfeld Sulz der SSAG.
- Bestehende erdverlegte Leitungen (Frischwasser, Sole, Stickstoff, Strom) der SSAG.
- Stickstoff-Tank der SSAG beim Eigentahof.
- Pumpstation der SSAG an der Zinggibrunnstrasse.
- Liegenschaft Eigentahof inkl. Ökonomiegebäude.
- Liegenschaft Sulzhof.
- Hochspannungsfreileitungen und -masten.
- Verschiedene Strassen und Wege, insbesondere Strasse zum Sulzchopf.
- Öffentliche Quellen 21.4.A, 21.6.A, 21.7.A und 21.5.E und private Quellen 21.8.F, 21.10.E und 21.11.E

5.2.2 Risikoanalyse

5.2.2.1 Gefährdung

Die Risikoanalyse wird bezogen auf die genannten Schutzgüter ausgeführt und basiert auf der folgenden Gefährdung (Tabelle 1).

Tabelle 1: Gefährdungsanalyse Oberflächendeformationen.

Gefährdungsbild	Gefährdungsursachen	Schadensbild / Wirkung
Hohe Spannungsumlagerungen im Untergrund des Solfelds Sulz und dadurch stark erhöhte Oberflächendeformationen (Subsidenz) mit Senkungsraten >> 10 mm/a (lineare Deformationen) bis hin zu Kraterbildungen (nicht-lineare Deformationen).	<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhte Konvergenzraten in den stillgelegten Solkavernen infolge von Leckagen (Druckaufbau in den Kavernen nicht möglich). - Kaminartige Teilverbrüche über Solkavernen. 	Verschiedenartige Bergschäden (hervorgerufen z.B. durch Senkungen, Schiefstellungen, Krümmungen, Zerrungen, Pressungen etc.).

5.2.2.2 Risiko

Ausgehend von der Gefährdung wird das Risiko für die genannten Schutzobjekte bzw. Schutzgüter anhand zweier hypothetischer Szenarien beurteilt:

- Szenario 1: Status-quo
 Dieses Szenario beschreibt den seit ca. 2015 gemessenen Zustand der Oberflächendeformationen im Betrachtungsperimeter wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Es werden praktisch flächig linear ablaufende Oberflächendeformationen mit Senkungsraten von oft > 10 mm/a und vereinzelt > 20 mm/a nachgewiesen.
- Szenario 2: Tagbruch mit Kraterbildung
 Dieses Szenario beschreibt ein oder mehrere Tagbruchereignisse im Betrachtungsperimeter, bei denen an der Geländeoberfläche scharfe Diskontinuitäten in den vertikalen Deformationsbeträgen von mehreren Metern resultieren, welche an der Erdoberfläche zu der Bildung von charakteristischen Geländestufen führen.

Die Risikobeurteilung erfolgte im Rahmen von GEOTEST-intern geführten Diskussionen und Abwägungen mit Hilfe einer 4x4-Risikomatrix unter Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit und der Auswirkungen.

Eintretenswahrscheinlichkeit	4 sicher	1 / 4	2 / 4	3 / 4	4 / 4
	3 sehr wahrscheinlich	1 / 3	2 / 3	3 / 3	4 / 3
	2 wahrscheinlich	1 / 2	2 / 2	3 / 2	4 / 2
	1 unwahrscheinlich	1 / 1	2 / 1	3 / 1	4 / 1
		1 unbedeutend	2 moderat	3 bedeutend	4 schwerwiegend
		Auswirkungen			

Grün = geringes Risiko Akzeptable Situation. Keine weiteren bzw. zusätzlichen Massnahmen erforderlich.

Gelb = mittleres Risiko Zusätzliche Überwachungsmaßnahmen notwendig.

Rot = hohes Risiko Nicht akzeptable Situation. Integrale Massnahmenplanung erforderlich (Überwachungsmaßnahmen und Massnahmen zur Kontrolle der Gefährdung).

Abbildung 16: Verwendete 4x4-Risikomatrix.

5.2.2.3 Risikobeurteilung Szenario 1 «Status-quo»

Es wird bei Szenario 1 davon ausgegangen, dass im Bereich des Solfelds Sulz Oberflächendeformationen in der Grössenordnung der aktuell gemessenen Raten auftreten. Beurteilt wird die Wahrscheinlichkeit von negativen Auswirkungen sowie das Schadensausmass auf die definierten Schutzobjekte, jedoch nicht die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses Szenarios.

Schutzobjekt / Schutzgut	Beurteilung	A*	W*	Risiko
Aktives Solfeld Grosszinggibrunn (südlichste Teile)	Bei anhaltend hohen Subsidenzraten auch im Bereich von aktiven Produktionsbohrungen können einzelne Komponenten des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn Schaden nehmen (z.B. Leitungen für verschiedene Medien, Produktionsbohrungen etc.). Dies kann die Salzproduktion bedeutend einschränken.	2	2	mittel 2 / 2
Inaktives Solfeld Sulz	Bei anhaltend hohen Subsidenzraten können die zu verwahrenden inaktiven Produktionsbohrungen des Solfelds Sulz weitere Schäden erleiden (insbesondere Deformationsschäden an Verrohrungen).	2	2	mittel 2 / 2
Erdverlegte Leitungen der SSAG (Wasser, Sole, Stickstoff, Strom)	Bei anhaltend hohen Subsidenzraten können die erdverlegten Leitungen Schäden nehmen, so dass deren Funktionstüchtigkeit eingeschränkt ist. Bei Leitungen, die ausser Betrieb sind, ist die Auswirkung daraus unbedeutend. Falls die Leitungen für den Betrieb des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn notwendig sind, so sind die Auswirkungen bedeutend. Die Leitungen (insbes. Hauptsoleleitung) werden aktuell bereits überwacht.	3	2	mittel 3 / 2
Stickstoff-Tank der SSAG beim Eigentalhof	Bei grossen differentiellen Senkungen im Bereich des Stickstoff-Tanks können Schiefstellungen eintreten. Wir gehen aber nicht davon aus, dass dies zu Schäden an der Anlage führt. Der Stickstoff-Tank wird mittels Nivellement periodisch überwacht.	1	2	gering 1 / 2
Pumpstation der SSAG an der Zinggibrunnstrasse	Die bislang im Bereich der Pumpstation gemessenen Senkungsraten sind < 10 mm und auch die horizontalen Verschiebungen sind gering. Schäden an der Pumpstation sind bei diesem Szenario unwahrscheinlich.	1	1	gering 1 / 1
Liegenschaft Eigentalhof	Bei der Liegenschaft Eigentalhof sind die seit 2015 gemessenen Senkungen insgesamt hoch, aber flächenhaft gesehen gleichmässig (nur geringe differentielle Bewegungen). Bislang sind keine Schäden an der Gebäudesubstanz bekannt.	2	1	gering 2 / 1
Liegenschaft Sulzhof	Bei der Liegenschaft Sulzhof sind die Senkungen bislang < 10 mm/a. Schäden an der Gebäudesubstanz sind keine bekannt.	2	1	gering 2 / 1
Hochspannungsfreileitungen und -masten	Fünf Masten befinden sich in den nördlichsten Abschnitten des Betrachtungsperimeters. Die dort gemessenen Deformationen sind gering und flächenmässig einheitlich (nur geringe differentielle Senkungen). Massgebliche Schäden an den Leitungsmasten sind demnach unwahrscheinlich.	1	1	gering 1 / 1

Verschiedene Strassen und Wege, insbesondere Strasse zum Sulzchopf	Die im Betrachtungsperimeter liegenden Strassen und Wege weisen mehrheitlich ein deutliches Gefälle auf. Insbesondere die Deformationskomponenten Schiefstellung, Zerrung, Pressung und Krümmungsveränderungen können zu Schäden an den bestehenden Strassen und Wegen führen (z.B. Veränderungen von Quergefällen und damit verbunden Verschlechterung des Regenwasserabflusses, Risse in der Strassendecke, Verformung der Bitumendecke, Reissen oder Stauen von Kanalrohren etc.). Im aktuellen Zustand sind örtlich Schäden an Strassen und Wegen sehr wahrscheinlich.	1	3	mittel 1 / 3
Öffentliche und private Quellen	Aufgrund der ausgeprägten Geländetopografie sind keine schädlichen Auswirkungen auf die Quellschüttungen zu erwarten. Da die räumliche Ausdehnung der Fassungsbauwerke klein ist, sind auch da keine signifikanten Schäden zu erwarten.	1	1	gering 1 / 1

A = Auswirkungen (1 = unbedeutend, 2 = moderat, 3 = bedeutend, 4 = schwerwiegend)

W = Eintretenswahrscheinlichkeit (1 = unwahrscheinlich, 2 = wahrscheinlich, 3 = sehr wahrscheinlich, 4 = sicher)

5.2.2.4 Risikobeurteilung Szenario 2 «Tagbruch»

Es wird bei Szenario 2 davon ausgegangen, dass im Bereich des Solfelds Sulz ein oder mehrere Tagbruchereignisse stattfinden. Beurteilt wird die Wahrscheinlichkeit von negativen Auswirkungen sowie das Schadensausmass auf die definierten Schutzobjekte, jedoch nicht die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses Szenarios.

Schutzobjekt / Schutzgut	Beurteilung	A*	W*	Risiko
Aktives Solfeld Grosszinggibrunn (südlichste Teile)	Ein oder mehrere Tagbruchereignisse im Solfeld Sulz können sich direkt auf die südlichsten Teile des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn ausdehnen oder für den Betrieb des Solfelds wichtige Anlagen zerstören. Ein Einstellen des Solfelds Grosszinggibrunn wäre bei einem Tagbruchereignis zumindest kurzfristig wahrscheinlich.	4	2	gross 4 / 2
Inaktives Solfeld Sulz	Ein oder mehrere Tagbruchereignisse im Solfeld Sulz würden die betroffenen Produktionsbohrungen zerstören. Dies hätte insbesondere Auswirkungen auf die langfristige Verwahrung der Bohrungen.	2	4	gross 2 / 4
Erdverlegte Leitungen der SSAG (Wasser, Sole, Stickstoff, Strom)	Ein oder mehrere Tagbruchereignisse im Solfeld Sulz würde mit grosser Wahrscheinlichkeit erdverlegte Leitungen der SSAG zerstören. Bei Leitungen, die ausser Betrieb sind, ist die Auswirkung daraus unbedeutend. Falls die Leitungen für den Betrieb des aktiven Solfelds Grosszinggibrunn notwendig sind, so sind die Auswirkungen auf den Produktionsbetrieb bedeutend.	3	3	gross 3 / 3
Stickstoff-Tank der SSAG beim Eigentalhof	Ein Tagbruchereignis im Bereich des Stickstoff-Tanks würde diesen wahrscheinlich komplett zerstören. Die Auswirkungen wären hingegen moderat.	2	2	mittel 2 / 2
Pumpstation der SSAG an der Zinggibrunnstrasse	Ein Tagbruchereignis im Bereich der Pumpstation würde die Anlage signifikant schädigen. Ein Weiterbetrieb der Produktion im Solfeld Grosszinggibrunn wäre zumindest mittelfristig nicht möglich.	3	3	gross 3 / 3

Liegenschaft Eigentahof	Ein Tagbruchereignis im Bereich der Liegenschaft Eigentahof würde diesen komplett zerstören. Die Auswirkungen wären bedeutend.	3	4	gross 3 / 4
Liegenschaft Sulzhof	Ein Tagbruchereignis im Bereich der Liegenschaft Sulzhof würde diese komplett zerstören. Die Auswirkungen wären schwerwiegend.	4	4	gross 4 / 4
Hochspannungsfreileitungen und -masten	Ein Tagbruchereignis im Bereich der Leitungsmasten würde diese sehr wahrscheinlich gebrauchsuntauglich machen. Die Auswirkungen beurteilen wir als bedeutend.	3	3	gross 3 / 3
Verschiedene Strassen und Wege, insbesondere Strasse zum Sulzchopf	Ein Tagbruchereignis würde Strassen und Wege im Kraterbereich sowie die darunter verlaufenden Leitungsstränge sehr wahrscheinlich vollständig zerstören. Die Auswirkungen wären moderat.	2	3	mittel 2 / 3
Öffentliche und private Quellen	Ein Tagbruchereignis im Bereich einer Quelfassung würde diese sehr wahrscheinlich zerstören. Da für keine der Quellen eine Schutzzone ausgeschieden ist, beurteilen wir die Auswirkungen als moderat.	2	3	gross 2 / 3

A = Auswirkungen (1 = unbedeutend, 2 = moderat, 3 = bedeutend, 4 = schwerwiegend)

W = Eintretenswahrscheinlichkeit (1 = unwahrscheinlich, 2 = wahrscheinlich, 3 = sehr wahrscheinlich, 4 = sicher)

5.2.2.5 Schlussfolgerung Risikoanalyse Oberflächendeformationen

Die für die beiden Szenarien «Status-quo» (Szenario 1) und «Tagbruch» (Szenario 2) vorgenommene Risikoanalyse ist nachfolgend tabellarisch zusammengefasst:

Schutzobjekt / Schutzgut	Risiko Szenario 1	Risiko Szenario 2
Aktives Solfeld Grosszinggibrunn (südlichste Teile)	mittel	gross
Inaktives Solfeld Sulz	mittel	gross
Erdverlegte Leitungen der SSAG (Wasser, Sole, Stickstoff, Strom)	mittel	gross
Stickstoff-Tank der SSAG beim Eigentahof	gering	mittel
Pumpstation der SSAG an der Zinggibrunnstrasse	gering	gross
Liegenschaft Eigentahof	gering	gross
Liegenschaft Sulzhof	gering	gross
Hochspannungsfreileitungen und -masten	gering	gross
Verschiedene Strassen und Wege, insbesondere Strasse zum Sulzchopf	mittel	mittel
Öffentliche und private Quellen	gering	gross

Die Risikoanalyse zeigt die bedeutenden Unterschiede zwischen den beiden hypothetischen Szenarien. Während die Risiken für die definierten Schutzobjekte für Szenario 1 bei Etablierung gezielter Überwachungsmassnahmen im akzeptablen Rahmen bleiben, so resultieren unter der Annahme von Szenario 2 praktisch für alle Schutzobjekte nicht akzeptable Risiken. Das Szenario 2 Tagbruch gilt es daher unter allen Umständen zu vermeiden.

6. Grundwasser

6.1 Einleitung und Grundlagen

In den folgenden Kapiteln wird, ausgehend von den massgeblichen Grundlagen, ein konzeptuelles hydrogeologisches Modell entwickelt. Dieses konzeptuelle Modell bildet dann die Basis für die Gefährdungs- und Risikoanalyse.

6.1.1 Betrachtungsperimeter

Der Betrachtungsperimeter umfasst ein Gebiet mit folgenden hydrogeologischen Randbedingungen:

- Im Norden bildet der Rhein den Vorfluter. Beim KW Augst liegt der Rheinpegel auf einer Kote von ca. 261 m ü. M. Nach der Staustufe KW Augst bis zum KW Birsfelden liegt die Rheinkote auf ca. 255 m ü. M. Nach dem KW Birsfelden liegt die Rheinkote auf ca. 245 m ü. M.
- Im Westen bildet die Birs die hydrogeologische Begrenzung. Der Birspegel liegt auf einer Kote von ca. 263 m ü. M. In der nahliegenden kantonalen Grundwassermessstation Asprain (21.J.1) liegt der gemittelte Pegelstand im Muschelkalk-Aquifer auf einer Kote von 253.3 m ü. M.
- Im Osten bildet die Ergolz die hydrogeologische Begrenzung. Dort liegen die wasserführenden Schotter in direktem Kontakt mit dem Muschelkalk-Aquifer und weisen eine Kote von ca. 264 m. ü. M (Mittelwasser) auf.

Gegen Süden ist die Abgrenzung weniger eindeutig zu vollziehen. Der Grund dafür ist einerseits die vermutete Aspenrainstörung (Kapitel 6.1.2.1), deren Verlauf im Gelände nur teilweise aufgeschlossen ist und bei der unbekannt ist, inwiefern sie eine stauende oder durchlässige Charakteristik aufweist. Weiter im Südwesten wird der östliche Hauptgraben-Randbruch des Oberrheingrabens erreicht. Auch hier sind die hydraulischen Eigenschaften dieser markanten Nord-Süd-streichenden Bruchstruktur grösstenteils unbekannt.

6.1.2 Geologisch-hydrogeologischer Rahmen

6.1.2.1 Geologie und Tektonik

Der Betrachtungsperimeter liegt im Bereich von zwei grosstektonischen Einheiten (ausführliche Darstellung der regionalen Geologie in [17]):

- Östlicher Hauptgraben-Randbruch des Oberrheingrabens (Rheintalflexur).
- Dinkelberg-Tafeljurascholle, welche eine stark tektonische Zergliederung des Gebirges aufweist (Horst-Graben-Strukturen) (Abbildung 17).

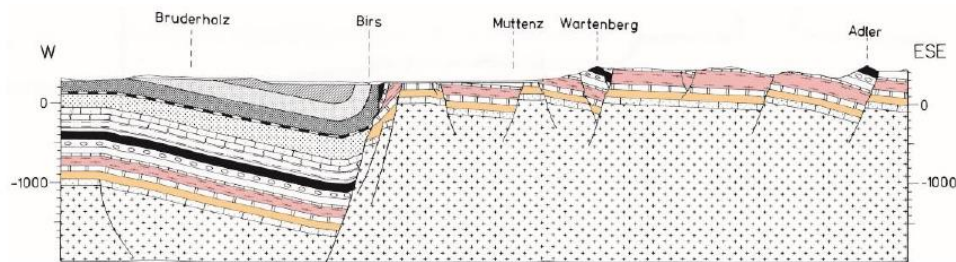


Abbildung 17: Geologisches Querprofil W-ESE durch die Rheintalflexur und die östlich anschließende Dinkelberg-Tafeljurascholle. Orange = Kaiseraugst- und Zeglingen Fm.; Rosa: Keuper-Gruppe (Profil modifiziert nach Gürlé et al. (1987)).

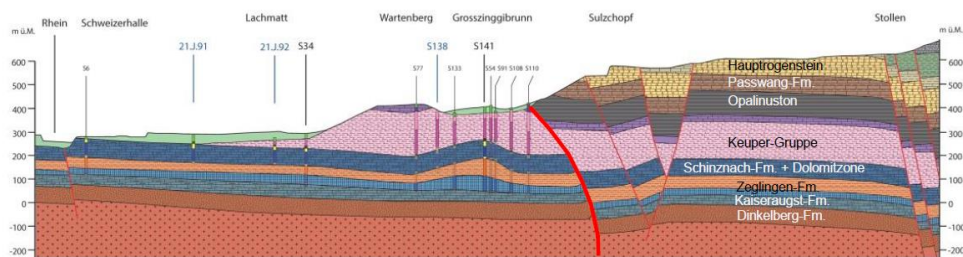


Abbildung 18: Geologisches Längsprofil N-S (1.5-fach überhöht) mit der Aspenrainstörung (rot hervorgehoben) südlich der Solfelder Sulz & Grosszinggibrunn (Profil modifiziert auf der Basis von Bitterli-Brunner & Fischer (1988)).

In N-S-Profil (Abbildung 18) treten als dominante strukturelle Elemente das Adlerhofgewölbe (Antiform im Bereich der Solfelder Sulz & Grosszinggibrunn) sowie südlich davon die Aspenrainstörung in Erscheinung. Die Schichten der Schinznach-Fm. und Dolomitzone (Muschelkalk-Aquifer) liegen im Gebiet Schweizerhalle direkt unter den quartären Rheinschottern und fallen generell leicht nach Süden ein.

6.1.2.2 Hydrostratigraphie

Die folgende

Tabelle 2 zeigt die hydrostratigraphischen Einheiten im Betrachtungsperimeter. Wasserführende Members sind blau markiert (ausführliche Darstellung der regionalen Hydrogeologie in [18]).

Tabelle 2: Hydrostratigraphie im Betrachtungsperimeter.

System	Gruppe	Formation	Member (Alte Bezeichnung)	Aquifertyp	
Quartär			Rheinschotter (regional) Gehängeschutt-Ablagerungen (lokal)	Porenaquifer	
	Dogger	Opalinuston	Opalinuston	Aquiclude	
Jura	Lias	Staffelegg-Fm.	Jurensis-Schichten	Aquitard	
			Posidonienschiefer	Aquitard	
			Obliqua-/Numismalis-Schichten	Aquitard	
			Obtus-Tone	Aquiclude	
			Arietenkalk	Kluftaquifer	
			Insektenmergel	Aquitard	
Trias	Keuper	Klettgau-Fm.	Belchen-Mb. (Rhät)	Aquitard	
			Gruhalde-Mb. (Obere Bunte Mergel)	Aquitard	
			Gansingen-Mb. (Gansinger Dolomit)	Kluftaquifer	
			Ergolz-Mb. (Untere Bunte Mergel & Schiffsandstein)	Porenaquifer	
			Bänkerjoch-Fm.	Gipskeuper	Aquitard
	Muschelkalk	Schinznach-Fm.		Asp-Mb. (Lettenkohle mit Grenzdolomit)	Karst- und Kluft-aquifer
Stammberg-Mb. (Trigonodus-Dolomit)					
Liedertswil-Mb. (Hauptmuschelkalk)					
Kienberg-Mb. (Hauptmuschelkalk)					
			Leutschenberg-Mb. (Hauptmuschelkalk)		
	Zeglingen-Fm.		Dolomitzone	Kluftaquifer	
			Obere Sulfatzone	Aquitard	
			Salzlager	Aquiclude	
			Untere Sulfatzone	Aquitard	
		Kaiseraugst-Fm.		Aquitard	

Im Betrachtungsperimeter bilden die quartären Rheinschotter sowie die Schinznach-Fm. zusammen mit der Dolomitzone der Zeglingen-Fm. (Schinznach -Fm. und Dolomitzone der Zeglingen-Fm. bilden den sogenannten «Muschelkalk-Aquifer») bedeutsame, regionale Grundwasserleiter. In Rheinnähe liegen teilweise quartäre Rheinschotter in direktem Kontakt mit der Schinznach-Fm. und sind hydraulisch verbunden.

6.1.3 Lokale Hydrogeologie im Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn

Im Gebiet der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn zirkuliert Grundwasser oberflächennah in den Gehängeschutt-Ablagerungen sowie in den Bachablagerungen des Riedmattbaches. Die oberflächennahe Wasserzirkulation wird durch ein Drainage-System, das ab den 1950er Jahren erbaut wurde, beeinflusst (Abbildung 19). Zurzeit liegen keine Angaben zum Zustand resp. zur Wirksamkeit der Drainageleitungen vor.

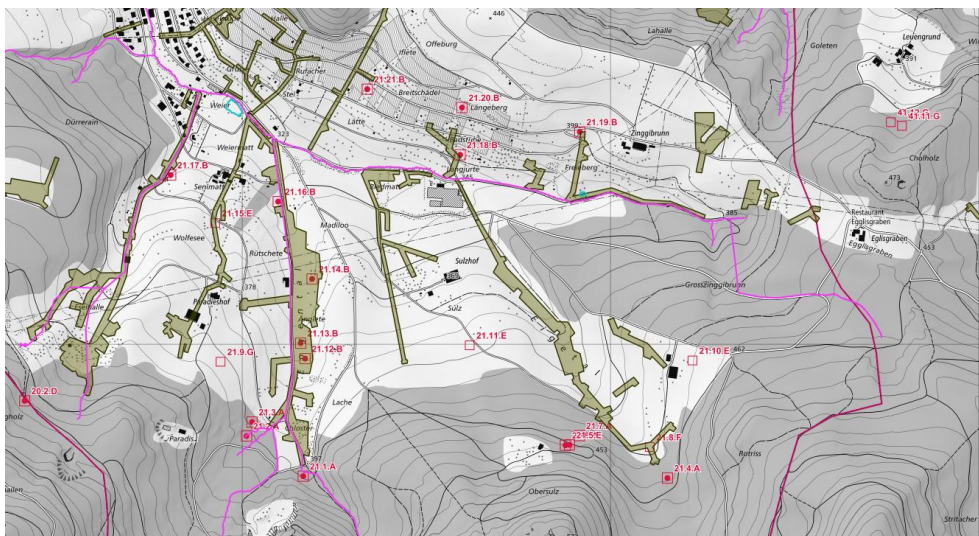


Abbildung 19: Gewässernetz (violett), Drainageflächen (braun) und Quellen (rot) im Gebiet Sulz und GZB (Quelle: GeoView BL).

Im Gebiet Sulz und Grosszinggibrunn bestehen mehrere Quellen (Abbildung 19). Nach längeren Regenperioden erweist sich insbesondere die Eigentalquelle 21.4.A (unmittelbar südlich des Solfeldes Sulz) als sichtbar ergiebig. Das Wasser fliesst dann oberflächlich in Richtung Solfeld Sulz, wo es auf der Westseite über einen Strassengraben talabwärts geleitet wird oder im Solfeld Sulz versickert resp. drainiert wird.

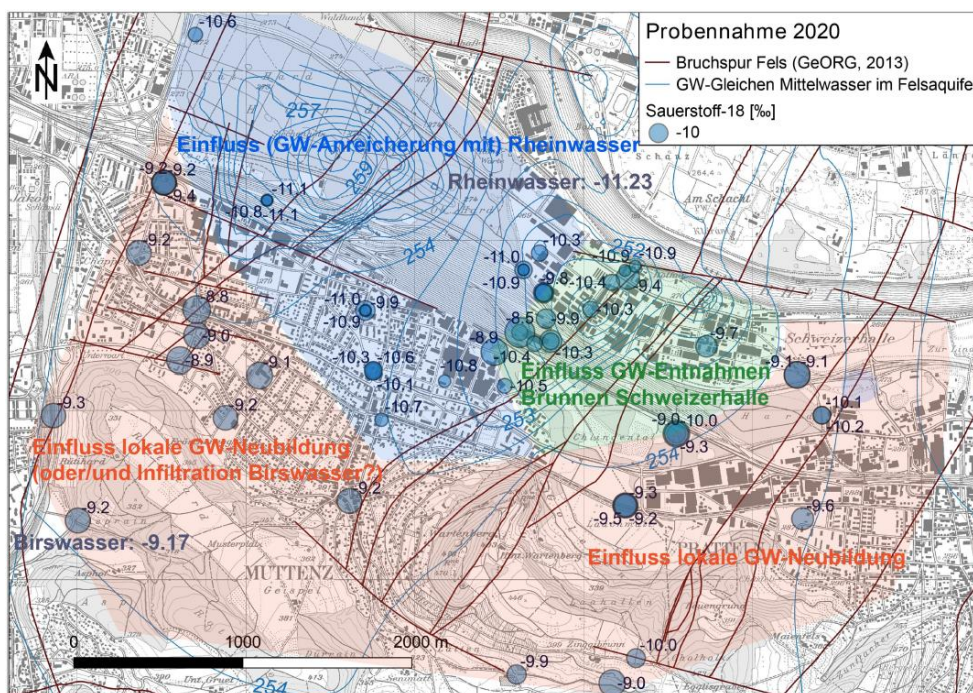
In der Tiefe treten wasserführende Horizonte in der Staffelegg-Fm. sowie Klettgau-Fm. mit einer geringen Ergiebigkeit auf.

Eine ergiebige Wasserführung tritt in der Schinznach-Fm. und der Dolomitzone der Zeglingen-Fm. auf.

6.1.4 Regionale Strömungsverhältnisse im Muschelkalk-Aquifer

6.1.4.1 Grundwasserneubildung

Gemäss BGA BL-188 ([23]) erfolgt die **Grundwasserneubildung** im Muschelkalk-Aquifer wie in Abbildung 20 dargestellt.



die Neubildung massgelblich auf Zuflüsse aus dem Ergolztal und dem Rhein zurückzuführen sein.

- 3) Ebenfalls zur lokalen GW-Neubildung dürfte die Versickerung von Meteorwasser im ganzen Betrachtungsperimeter beitragen.

Der **Grundwasserabfluss** im Muschelkalk-Aquifer erfolgt im Betrachtungsperimeter

- 1) im Norden über abschnittsweise stattfindende Exfiltration in den Rhein.
- 2) über Grundwasserentnahmen im Gebiet Schweizerhalle (grüner Bereich in Abbildung 20) und Muttenz.

6.1.4.2 Strömungsverhältnisse im Muschelkalk-Aquifer

Die regionalen Strömungsverhältnisse im Muschelkalk-Aquifer werden durch die hydrogeologischen Randbedingungen (siehe Kapitel 6.1.1) und die diversen Grundwassernutzungen (Entnahme, Anreicherung) innerhalb des Betrachtungsperimeters bestimmt. Aus diesen Randbedingungen ergibt sich folgendes regionales Strömungsfeld im Muschelkalk-Aquifer (Abbildung 21, modifiziert aus [22]):

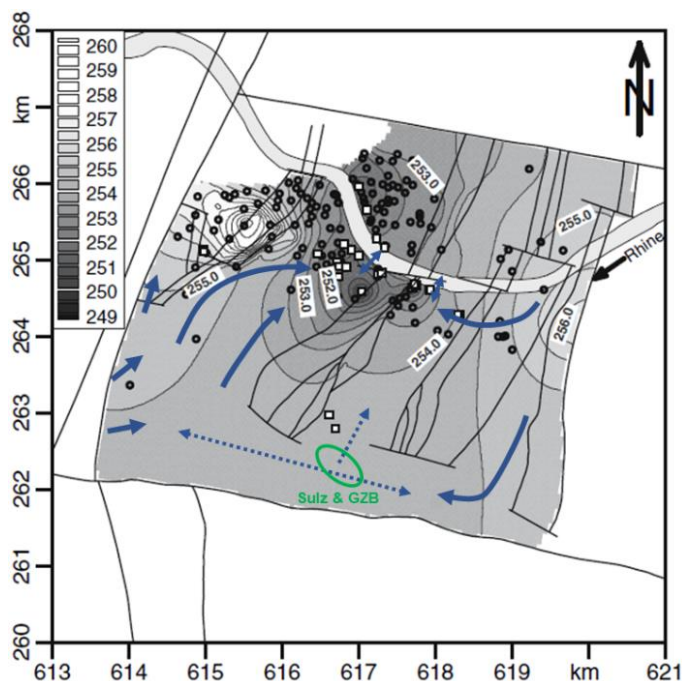


Abbildung 21: Grundwasserfließrichtungen im Muschelkalk-Aquifer auf der Grundlage von modellierten und kalibrierten Grundwasserpegeln [m ü. M.] am Stichtag 8. August 2003 sowie eigenen Beobachtungen (Punkte: Grundwasserpiezometer; Vierecke: Förderbrunnen). Quelle: modifiziert nach [22].

- Im Westen fließt Grundwasser aus dem Birstal in den Betrachtungsperimeter. Ein Teil davon fließt westlich des «Grundwasserberges» im Gebiet Muttenzer Hard in Richtung Rhein. Der andere Teil fließt östlich des «Grundwasserberges» in Richtung der Förderbrunnen im Gebiet Schweizerhalle zu.
- Im Osten fließt ein Teil des Grundwassers durch die Cholholzgaben-Struktur in Richtung der Förderbrunnen im Gebiet Schweizerhalle. Der andere Teil fließt südwärts ausholend in Richtung der Solfelder Sulz & GZB zu.
- Im Gebiet der Solfelder Sulz & GZB bis Rütihard weisen die gemessenen Grundwasserpegel im Muschelkalk-Aquifer auf flache Strömungsgradienten mit nahezu stagnierenden Strömungsverhältnissen hin.

6.2 Transport hoch konzentrierter Chloridlösungen im Grundwasser

Die Dichte des Wassers steigt mit der gelösten Ionenkonzentration an (Abbildung 22, aus [24]).

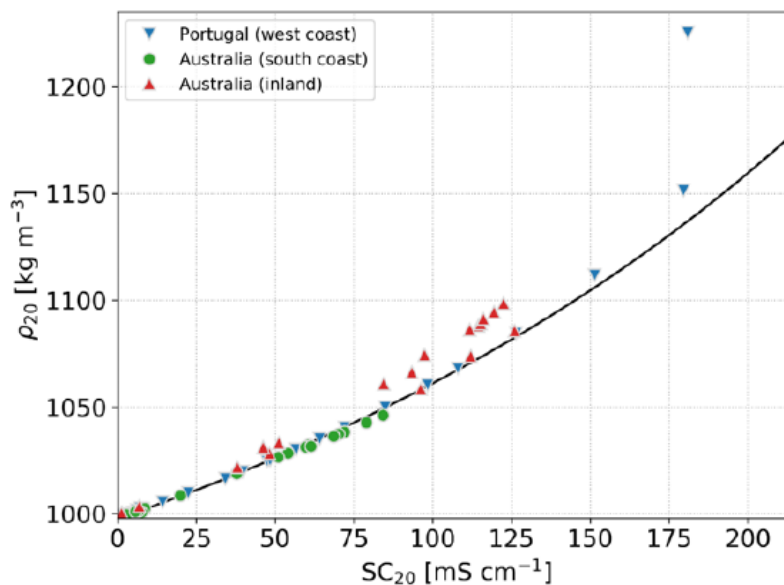


Abbildung 22: Die Dichte (ρ_{20}) von Wasser aufgetragen gegen die elektrische Leitfähigkeit (SC_{20}). Frischwasser weist eine Dichte von ca. $1'000 \text{ kg/m}^3$ auf; Sole (=gesättigte NaCl-Lösung) weist eine Dichte von ca. $1'200 \text{ kg/m}^3$ auf.

Eine numerische Simulation des Transportes von Chloridlösungen verschiedener Konzentrationen bzw. Dichten im Grundwasser ist in der folgenden Abbildung 23 (aus [24]) dargestellt:

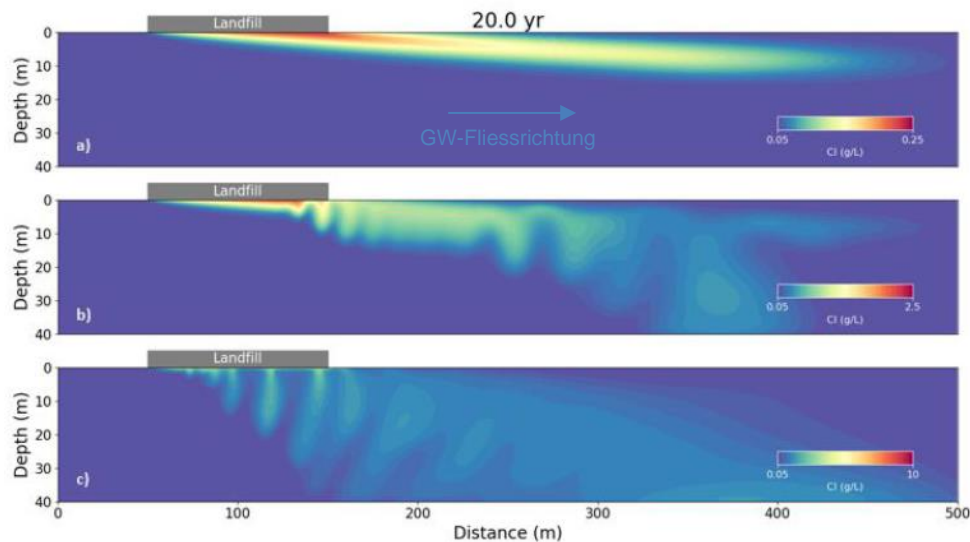


Abbildung 23: Ausgehend von einer Deponie (landfill) wird Chlorid in einen Grundwasserleiter ausgewaschen: A) Chloridkonzentration 250 mg/l (niedrige Dichte); B) Chloridkonzentration 2'500 mg/l (mittlere Dichte); C) Chloridkonzentration 10'000 mg/l (hohe Dichte). Die Bilder zeigen die Verteilung der Chloridkonzentrationen nach 20 Jahren in einer Distanz bis max. 500 m. Die animierte Version befindet sich unter <https://www.youtube.com/watch?v=8xZmSvZix0>.

Es zeigt sich, dass Chloridlösungen mit unterschiedlichen Dichten unterschiedlich im Grundwasser transportiert werden.

- Bei niedriger Dichte / Konzentration resultiert eine schmale und relativ scharf begrenzte Chloridfahne in Fließrichtung. Die maximalen Konzentrationen nehmen in Fließrichtung aufgrund hydrodynamischer Dispersion ab.
- Bei mittlerer und hoher Dichte / Konzentration nimmt die Mächtigkeit der Chloridfahne signifikant in Fließrichtung zu. Die vertikale Ausbreitungskomponente der Fahne aufgrund der höheren Dichten / Konzentrationen dominiert zunehmend den Transport. Dadurch wird einerseits ein immer grösserer Bereich im Grundwasserleiter kontaminiert, andererseits wird durch Mischprozesse die Chlorid-Konzentration «verschmiert». In der animierten Version ist zudem ersichtlich, dass sich die Chloridfahne horizontal entlang des Stauerhorizontes ausbreitet, sobald sie den Stauer erreicht hat.

Im Falle von Sulz und GZB gelangt, in Analogie dazu, hoch konzentrierte Chloridlösung aus den Kavernen in den Muschelkalk-Aquifer. Beim Absinken der Lösung verdünnt sich die Konzentration der Lösung aufgrund von Diffusions- und Mischprozessen. Im Endeffekt kommt es zu einem advektiven Transport von verdünnter Chloridlösung an der Aquiferbasis, einer Misch- resp. Übergangszone und dem

eigentlichen Frischwasser-Aquifer im Hangenden. Je nach Ausprägung (Neigung und Orientierung) der Stauertopographie unterscheiden sich die Fließrichtungen der gravitativ getriebenen konzentrierten Chloridlösungen vom hydraulischen Potential getriebenen Frischwasser-Aquifer. Während sich im Frischwasser-Aquifer die Fließrichtungen immer in Richtung des niedrigsten hydraulischen Potentials einregeln, breitet sich Sole in Richtung der fallenden Topografie des Stauers aus. Dabei kann sie sich in lokalen Senken kumulieren. Die höchsten Chlorid-Konzentrationen sind demnach im Bereich der Chlorid-Quellen selbst (Solfelder) und in Senken der Stauertopographie entlang des Ausbreitungspfades zu erwarten.

6.2.1 Hydrochemische Hinweise für hoch konzentrierte Chloridlösungen im Betrachtungsperimeter

Einleitend wird auf die Wegleitung Grundwasserschutz verwiesen, die Indikatorwerte für die Grundwasserqualität vorgibt. Für Chlorid wird ein Indikatorwert von <40 mg/l angegeben. Erfüllt ein genutztes oder zur Nutzung vorgesehenes Grundwasser diesen Wert nicht und ist die Überschreitung nicht geogen bedingt, sind gemäss Artikel 47 GSchV die Art, das Ausmass und die Ursache der Verunreinigung zu ermitteln und die notwendigen Massnahmen zu treffen.

6.2.1.1 Räumliche Verteilung der Chlorid-Konzentrationen

Eine regionale Übersicht der gemessenen Chlorid-Konzentrationen liefert die Abbildung 24 (aus [23]). Generell lässt sich feststellen, dass im Vergleich mit anderen Regionen in der Schweiz erhöhte Chlorid-Konzentrationen gemessen werden. Diese erhöhten Werte sind auf geogene (natürliche Laugung von salzhaltigen Gesteinen) und / oder anthropogene Laugungsprozesse (z.B. Salzlösungsbergbau, Deponien) zurückzuführen. Weiter ist feststellbar, dass die Chlorid-Gehalte im Westen (Muttenz, Muttenzer Hard) generell tiefer sind als im Osten (Pratteln). Hohe Chlorid-Werte werden im Gebiet Schweizerhalle gemessen; die höchsten Chlorid-Werte werden im Gebiet des Solfeldes Zinggibrunn gemessen.

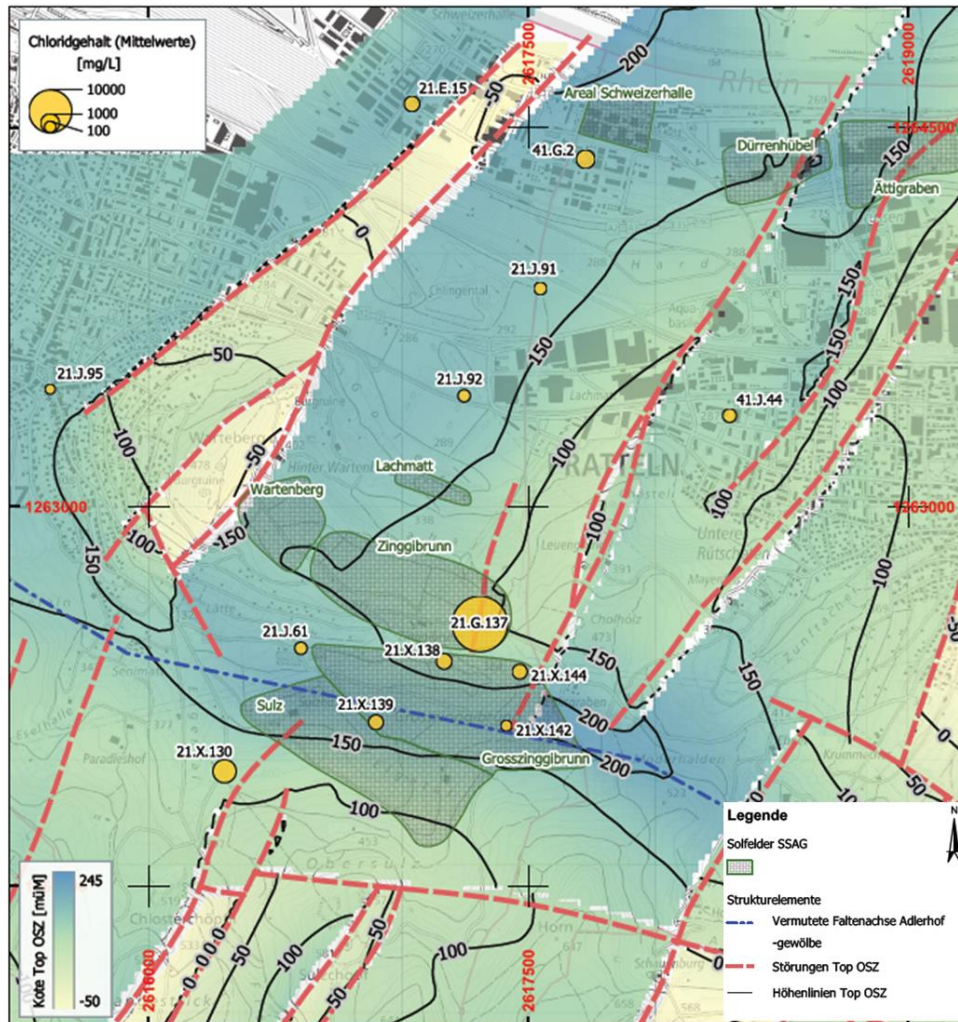


Abbildung 25: Verteilung der Chloridgehalte (Mittelwerte) und Stauertopographie der Oberen Sulfatzone.

6.2.1.2 Tiefenverteilung der Chlorid-Konzentrationen

Für einige Messstellen liegen ausserdem Analysedaten aus unterschiedlichen Tiefen vor. Die Verteilung der Chlorid- resp. Sulfat-Konzentrationen mit der Tiefe zeigt folgendes Bild (Abbildung 26):

- Alle dargestellten Messstellen zeigen eine graduelle Zunahme der Chlorid- und Sulfatkonzentrationen mit der Tiefe.
- Ausnahmen stellen die Messstellen 21.X.144 und 21.G.137 dar, die eine abrupte Zunahme im untersten Bereich aufweisen.
- Diese letztgenannten Messstellen zeigen eine im Verhältnis zur Sulfat-Konzentration stark erhöhte Chlorid-Konzentration.

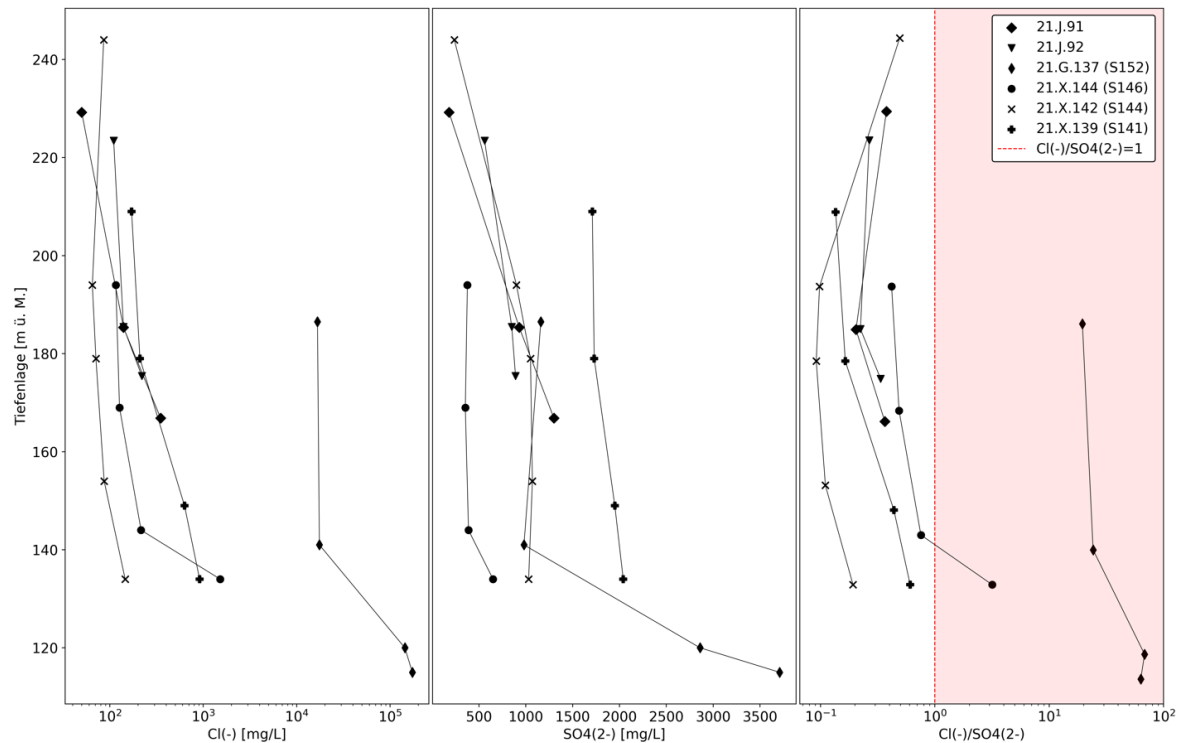


Abbildung 26: Tiefenverteilung der Chlorid- und Sulfatkonzentration (Spalte 1 und Spalte 2) sowie das Verhältnis Cl-SO₄ für die angegebenen Messstellen.

6.2.1.3 Chlorid-Konzentrationen in den Produktionsbohrungen Solfeld Sulz

Im Rahmen der Messkampagne 2021 / 2022 wurden aus den Produktionsbohrungen im Solfeld Sulz tiefenabgestufte Grundwasserproben entnommen (Bailer-Proben) und hydrochemisch analysiert (siehe Anhang 1). In den Produktionsbohrungen zeigt sich eine Abhängigkeit der Chlorid-Konzentrationen mit der Tiefe: Je tiefer die Probe entnommen wurden, desto höher wird die Chlorid-Konzentration, die Leitfähigkeit und die Dichte. Folgende Spanneiten wurden festgestellt:

- Chlorid-Konzentrationen (min / max): 180 / 191'000 mg/l
- elektrische Leitfähigkeiten (min / max): 2'000 / 264'000 μ S/cm
- Dichten (min / max): 0.998 / 1.203 g/ml

6.3 Konzeptuelles hydrogeologisches Modell

Auf der Basis der vorangegangenen Kapitel sowie der ersten Resultate der Messkampagne wurde folgendes konzeptuelles hydrogeologisches Modell entwickelt:

Ausgangslage

Aufgrund teilverbrochener Kavernen und Leckagen in den Bohrungen gelangt hochkonzentrierte Chloridlösung («Sole») aus den Salzkavernen in den Muschelkalk-Aquifer (Abbildung 27 und Abbildung 28). Für die anderen Solfelder Grosszinggibrunn, Zinggibrunn, Wartenberg und Lachmatt ist davon auszugehen, dass vergleichbare Prozesse stattfinden.

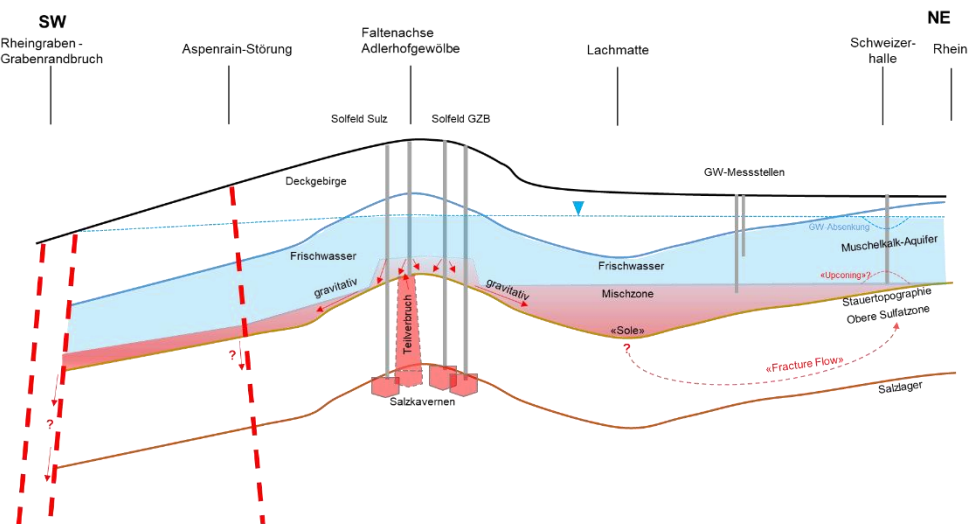


Abbildung 27: Konzeptuelles hydrogeologisches Modell für die Ausbreitung von hochkonzentrierter Chloridlösung im Muschelkalk-Aquifer im Bereich des Adlerhofgewölbes.

Eintrag von hochkonzentrierter Chloridlösung

Im hydrogeologischen Konzeptmodell wird angenommen, dass der Eintrag von hochkonzentrierter Chloridlösung hauptsächlich durch anthropogene Prozesse (Lösungsbergbau der Schweizer Salinen AG) erfolgt. Der Eintrag von Chlorid findet mit grosser Wahrscheinlichkeit auch über geogene Prozesse (Subrosion) statt. Da sich dieser Anteil derzeit nicht quantifizieren lässt, werden geogene Einträge im Sinne einer konservativen Annahme nicht berücksichtigt.

Der Soleeintrag kann permanent erfolgen, wenn aufgrund einer teilverbrochenen Salzkaverne ein direkter hydraulischer Kontakt besteht oder wenn aufgrund

kontinuierlicher Kavernenkonvergenz permanent Sole aus der Kaverne in den Muschelkalk-Aquifer gedrückt wird (Abbildung 27).

Der Soleeintrag kann auch impulsartig erfolgen, wenn aufgrund eines Teilverbrauches einer Kaverne Sole impulsartig in den Muschelkalk-Aquifer gelangen kann.

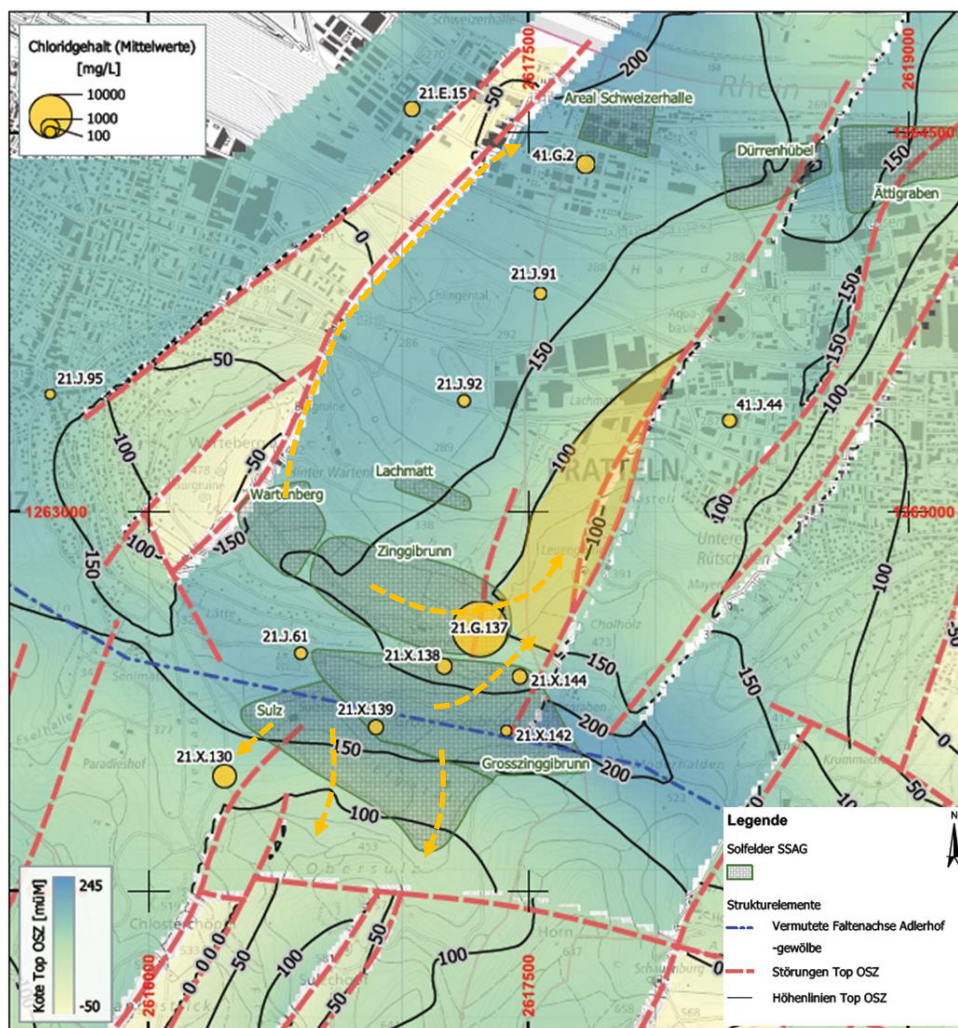


Abbildung 28: Vermuteter Transport (gestrichelte Pfeile) von hoch konzentrierter Chloridlösung ausgehend von den Solfeldern der Schweizer Salinen AG und Kulmination in der Senke im Gebiet Lachmatt (orange eingefärbter Bereich).

Transport, Kumulation und Verdünnung

Aufgrund der Stauertopographie (= Dach Obere Sulfatzone) im Bereich des Adlerhofgewölbes breitet sich die Sole ausgehend vom Solfeld Sulz bevorzugt in Richtung Süden resp. Südosten aus (Abbildung 27 und Abbildung 28). Inwiefern Störzonen wie z.B. die Aspenrainstörung und der Grabenrandbruch des Rheingrabens die Sole in tieferliegende Grundwasserstockwerke ableitet, ist unbekannt.

Die Sole aus den Solfeldern Grosszinggibrunn und Zinggibrunn breitet sich gravitativ bevorzugt in Richtung Nordosten aus (Abbildung 27 und Abbildung 28). Im Gebiet Lachmatte kann sie sich in einer lokalen Senke in der Stauertopographie ansammeln. Inwiefern rheinisch orientierte Brüche im Norden des Adlerhofgewölbes zum Sole-Transport beitragen (z.B. entlang des Wartenberg-Grabens), ist derzeit nicht schlüssig zu beantworten.

Sowohl im Süden wie auch im Norden des Adlerhofgewölbes findet permanent eine Grundwasserneubildung (Zuflüsse von Frischwasser) statt, welche die ausgetretene Sole verdünnen (Abbildung 27).

«Upconing» im Gebiet Schweizerhalle

Im Gebiet Schweizerhalle kann es durch die grossen Entnahmemengen und Grundwasser-Absenkungen zu einem Ansaugen von an Chlorid angereicherterem tieferliegendem Grundwasser kommen («upconing») (Abbildung 27). Einen vergleichbaren Mechanismus wird in [25] als Ursache für erhöhte Chlorid-Konzentrationen im Gebiet Schweizerhalle numerisch simuliert.

6.4 Gefährdungs- und Risikoanalyse «Grundwasser»

6.4.1 Schutzgüter

Im Betrachtungsperimeter befinden sich aus Sicht des Grundwassers folgende Schutzgüter (Anhang 2):

- Regional bedeutendes Felsgrundwasser im Muschelkalk-Aquifer.
- Regional bedeutendes Lockergesteinsgrundwasser in den Rheinschottern, in den Ergolzschottern und in den Birsschottern.
- Grundwasserschutz-Areale und Grundwasserschutzzonen:
 - o Grundwasserschutzareal GWSA Hardwald (Gde. Pratteln).
 - o Grundwasserschutzzonen Löli-Remeli (Gde. Pratteln).
 - o Grundwasserschutzzonen Hardwald (Gde. Muttenz).
 - o Grundwasserschutzzonen im Birstal (Jakobsmatten, Ehinger, Hofmatt und Welschmatt).
- Brauchwasser-Brunnen resp. Trinkwasserbrunnen ohne Schutzzonen:
 - o Förderbrunnen für Brauchwasser im Gebiet Schweizerhalle (CABB, Novartis, IKEA, Firestone, Schweizer Salinen AG).
 - o Förderbrunnen für Trinkwasser in den Gde. Muttenz & Pratteln (ohne rechtsgültige Schutzzonen).
- Lokal vorhandenes Hanggrundwasser, kommunizierend mit dem Lockergesteinsgrundwasser des Riedmattbächlis.
- Lokale Quellen (ohne rechtsgültige Schutzzonen).
- Lokale Quellen (mit rechtsgültigen Schutzzonen in den Kantonen BL und SO).
- Oberflächengewässer:
 - o Riedmattbach im Gebiet Sulz / Grosszinggibrunn.

6.4.2 Risikoanalyse

6.4.2.1 Gefährdung

Die Risikoanalyse wird bezogen auf die genannten Schutzgüter ausgeführt und basiert auf der folgenden Gefährdung (Tabelle 3):

Tabelle 3: Gefährdungsanalyse Grundwasser.

Gefährdungsbild	Gefährigungsursache	Schadensbild / Wirkung
Austreten von hochkonzentrierter Chloridlösung (Sole) aus den Kavernen in den Muschelkalk-Aquifer im Gebiet der Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn.	<ul style="list-style-type: none"> - Teilverbrochene Salzkarvenne mit hydraulischem Kontakt zum Muschelkalk-Aquifer. - Leckagen in Bohrungen und Kavernen mit hydraulischem Kontakt zum Muschelkalk-Aquifer. 	Versalzung / Kontamination des Muschelkalk-Aquifers.

6.4.2.2 Risiko

Ausgehend von der Gefährdung wird das Risiko für die genannten Schutzgüter anhand von zwei Szenarien beurteilt:

- Szenario 1: Status-quo
 Dieses Szenario umfasst den **bis dato bekannten Zustand** in den Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn mit den bekannten Eintritten von hochkonzentrierter Chloridlösung (Sole) in den Muschelkalk-Aquifer. Es berücksichtigt zudem die bereits bestehende regionale Chlorid-Belastung in den beprobten Messstellen.
- Szenario 2: Tagbruch
 Dieses Szenario umfasst ein oder mehrere Tagbruchereignisse, bei denen grössere Volumina an hochkonzentrierter Chloridlösung (Sole) in den Muschelkalk-Aquifer gelangen. Bei diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass Sole nicht nur in den Muschelkalk-Aquifer gelangt, sondern dass Sole auch obertägig austritt.

Die Risikobeurteilung erfolgte im Rahmen von GEOTEST-intern geführten Diskussionen und Abwägungen mit Hilfe einer 4x4-Risikomatrix unter Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit und der Auswirkung (Abbildung 29).

Eintretenswahrscheinlichkeit	4 sicher	1 / 4	2 / 4	3 / 4	4 / 4
	3 sehr wahrscheinlich	1 / 3	2 / 3	3 / 3	4 / 3
	2 wahrscheinlich	1 / 2	2 / 2	3 / 2	4 / 2
	1 unwahrscheinlich	1 / 1	2 / 1	3 / 1	4 / 1
		1 unbedeutend	2 moderat	3 bedeutend	4 schwerwiegend

Auswirkungen

- Grün = geringes Risiko** Akzeptable Situation. Keine weiteren bzw. zusätzlichen Massnahmen erforderlich.
- Gelb = mittleres Risiko** Zusätzliche Überwachungsmassnahmen notwendig.
- Rot = hohes Risiko** Nicht akzeptable Situation. Integrale Massnahmenplanung erforderlich (Überwachungsmassnahmen und Massnahmen zur Kontrolle der Gefährdung).

Abbildung 29: Verwendete 4x4 Risikomatrix.

6.4.2.3 Risikobeurteilung Szenario 1 «Status-quo»

Bei diesem Szenario wird vom aktuellen Zustand (Sommer 2022) in den Solfeldern Sulz & GZB ausgegangen. Beurteilt wird die Wahrscheinlichkeit von negativen Auswirkungen sowie das Schadensausmass, die bis dato feststellbar sind.

Schutzgut	Beurteilung	A*	W*	Risiko
Muschelkalk-Aquifer lokal im Gebiet Sulz und GZB	In der GW-Messstelle 21.G.137 werden bereits heute an der Basis des Muschelkalk-Aquifers sehr hohe Chlorid-Konzentrationen festgestellt. Aufgrund der teilverbrochenen Kavernen im Sulz muss davon ausgegangen werden, dass auch hier die Aquiferbasis mit Chlorid belastet ist. Die Auswirkung werden als moderat beurteilt, weil die Belastung lokal und insbesondere an der Basis auftritt.	2	4	hoch
Lockergesteins-aquifer Rheinschotter (Schweizerhalle)	In den Rheinschottern werden bereits heute teilweise erhöhte Chlorid-Konzentrationen festgestellt. Die Auswirkungen sind moderat. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	2	1	gering
Lockergesteins-aquifer Birstal	Für das GW-Vorkommen sind bis dato keine Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
Lockergesteins-aquifer Ergolzthal	Für das GW-Vorkommen sind bis dato keine zusätzlichen Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
GW-Schutzareal Hardwald (Gde. Pratteln)	Das GW-Schutzareal liegt sowohl im hydraulischen wie topographischen Abstrombereich der Solfelder Sulz & GZB. Die Auswirkungen sind heute moderat. Eine Veränderung der Situation ist aufgrund der Nähe zu den Solfeldern wahrscheinlich.	2	2	mittel

GW-Schutzzonen Löli-Remeli (Gde. Pratteln)	Die Brunnen liegen nicht im direkten Abstrombereich. Bis dato sind keine direkten Auswirkungen ausgehend von den Solfeldern nachgewiesen. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
GW-Schutzzonen Hardwald (Gde. Muttenz)	Die Brunnen liegen nicht im direkten Abstrombereich. Bis dato sind keine direkten Auswirkungen ausgehend von den Solfeldern nachgewiesen. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
GW-Schutzzonen im Birstal	Bis dato sind keine Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
Lokales Hanggrund- wasser und Quellen im Sulz und GZB	Bis dato sind keine Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering
Oberflächengewässer Riedmattbach	Bis dato sind keine Auswirkungen bekannt. Eine Veränderung der Situation wird als unwahrscheinlich beurteilt.	1	1	gering

A = Auswirkungen (1 = unbedeutend, 2 = moderat, 3 = bedeutend, 4 = schwerwiegend)

W = Eintretenswahrscheinlichkeit (1 = unwahrscheinlich, 2 = wahrscheinlich, 3 = sehr wahrscheinlich, 4 = sicher)

6.4.2.4 Risikobeurteilung Szenario 2 «Tagbruch»

Es wird bei Szenario 2 davon ausgegangen, dass im Bereich des Solfelds Sulz ein oder mehrere Tagbruchereignisse stattfinden. Beurteilt wird die Wahrscheinlichkeit von negativen Auswirkungen sowie das Schadensausmass auf die definierten Schutzobjekte, jedoch nicht die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses Szenarios.

Schutzgut	Beurteilung	A*	W*	Risiko
Muschelkalk-Aquifer lokal im Gebiet Sulz und GZB	Im Falle eines Tagbruches käme es sicher zu bedeutenden Auswirkungen (sehr hohe lokale Chloridbelastung).	3	4	hoch
Lockergesteins- aquifer Rheinschotter (Schweizerhalle)	Im Falle eines Tagbruches käme es wahrscheinlich zu bedeutenden Auswirkungen (hohe Chloridbelastung).	3	2	mittel
Lockergesteins- aquifer Birstal	Für das GW-Vorkommen sind die Auswirkungen und die Eintretenswahrscheinlichkeit aufgrund des konzeptuellen Modells unsicher. Stand heute wären im Falle eines Tagbruches die Auswirkungen bedeutend, aber unwahrscheinlich.	3	1	mittel
Lockergesteinsaquifer Ergolztal	Für das GW-Vorkommen sind die Auswirkungen und die Eintretenswahrscheinlichkeit aufgrund des konzeptuellen Modells unsicher. Stand heute wären im Falle eines Tagbruches die Auswirkungen bedeutend, aber unwahrscheinlich.	3	1	mittel
GW-Schutzareal Hardwald (Gde. Pratteln)	Im Falle eines Tagbruches wären bedeutende Auswirkungen (sehr hohe Chloridbelastung) sehr wahrscheinlich.	3	3	hoch
GW-Schutzzonen Löli-Remeli (Gde. Pratteln)	Für die GW-Brunnen Löli-Remeli wären die Auswirkungen schwerwiegend; die Eintretenswahrscheinlichkeit ist allerdings unwahrscheinlich.	4	1	mittel

GW-Schutzzonen Hardwald (Gde. Muttenz)	Für die GW-Schutzzonen Hardwald (Hardwasser AG) wären die Auswirkungen schwerwiegend. Die Eintretenswahrscheinlichkeit ist allerdings unwahrscheinlich.	4	1	mittel
GW-Schutzzonen im Birstal	Für die GW-Schutzzonen im Birstal wären die Auswirkungen schwerwiegend. Die Eintretenswahrscheinlichkeit ist allerdings unwahrscheinlich.	4	1	mittel
Lokales Hanggrundwasser und Quellen im Sulz und GZB	Im Falle eines Tagbruches wären die Auswirkungen aufgrund von Sole, die an die Oberfläche gelangt, bedeutend und wahrscheinlich.	3	2	mittel
Oberflächengewässer Riedmattbach	Im Falle eines Tagbruches wären die Auswirkungen aufgrund von Sole, die an die Oberfläche gelangt, bedeutend und wahrscheinlich.	3	2	mittel

A = Auswirkungen (1 = unbedeutend, 2 = moderat, 3 = bedeutend, 4 = schwerwiegend)

W = Eintretenswahrscheinlichkeit (1 = unwahrscheinlich, 2 = wahrscheinlich, 3 = sehr wahrscheinlich, 4 = sicher)

6.4.2.5 Schlussfolgerung Risikoanalyse Grundwasser

Die für die beiden Szenarien «Status-quo» (Szenario 1) und «Tagbruch» (Szenario 2) vorgenommene Risikoanalyse ist nachfolgend tabellarisch zusammengefasst:

Schutzobjekt / Schutzgut	Risiko Szenario 1	Risiko Szenario 2
Muschelkalk-Aquifer lokal im Gebiet Sulz und GZB	hoch	hoch
Lockergesteinsaquifer Rheinschotter im Gebiet Schweizerhalle	gering	mittel
Lockergesteinsaquifer Birstal	gering	mittel
Lockergesteinsaquifer Ergolzthal	gering	mittel
GW-Schutzareal Hardwald (Gde. Pratteln)	mittel	hoch
GW-Schutzzonen Löli-Remeli (Gde. Pratteln)	gering	mittel
GW-Schutzzonen Hardwald (Gde. Muttenz)	gering	mittel
GW-Schutzzonen im Birstal	gering	mittel
Lokales Hanggrundwasser und Quellen im Sulz und GZB	gering	mittel
Oberflächengewässer Riedmattbach	gering	mittel

Die Risikoanalyse zeigt, dass im **Szenario 1** (Status-quo) lokal im Gebiet Sulz und GZB ein hohes Risiko für eine Chlorid-Belastung des Grundwassers im Muschelkalk-Aquifer besteht. Diese hohe Risiko ist nicht akzeptable und erfordert Überwachungsmassnahmen und Massnahmen zur Kontrolle der Gefährdung (Umsetzung des Überwachungs- und Nachsorgekonzeptes). Aufgrund des besonderen Schutzstatus sind für das GW-Schutzareal Hardwald zusätzliche Überwachungsmassnahmen zu planen und umzusetzen. Für die übrigen Schutzobjekte / Schutzgüter besteht im Status quo ein geringes Risiko, das keine weiteren bzw. zusätzlichen Überwachungsmassnahmen durch die Schweizer Salinen AG erfordert.

Im Falle des **Szenarios 2** (Tagbruch) besteht für die Schutzobjekte / Schutzgüter ein mittleres bis hohes Risiko. Für die Solfelder Sulz & GZB ist das Risiko nicht akzeptabel und es sind zwingend Überwachungsmassnahmen und Massnahmen zur Kontrolle der Gefährdung auszuführen. Konkret heisst das, dass die Umsetzung des vorliegenden Grundwassermonitoring-Konzeptes (siehe folgendes Kapitel 5.5) wie auch des Überwachungs- und Nachsorgekonzeptes zur sicheren Verwahrung von Kavernen und Bohrungen in den Solfeldern Sulz und Grosszinggibrunn (Zustandserhebung Solfelder Sulz und Grosszinggibrunn, Ursachenanalyse, erste

Massnahmenkonzepte und Handlungsoptionen zwecks Stabilisierung der Solfelder (er) vorangetrieben werden muss.

6.5 Grundwassermonitoring

Auf Basis des konzeptuellen hydrogeologischen Modells wurde ein Grundwasserüberwachungskonzept erarbeitet [26] mit dem Ziel im Zu- und Abstrombereich ausreichend Grundwasserüberwachungsmessstellen zu haben und im Speziellen den Soletransport im «gravitativen Abstrombereich» der Solfelder zu überwachen.

Das Konzept umfasst im wesentlichen folgende Punkte (Abbildung 30):

- Ausbau der bestehenden Bohrung S156 auf der Rütihard zu einer GW-Überwachungsmessstelle (im Westen der Solfelder Sulz und GZB).
- Ausbau der Erkundungsbohrung EX-22-01 im Gebiet Aspenrain / Schauenburg zu einer GW-Überwachungsmessstelle (im Osten der Solfelder Sulz und GZB).
- Erstellung von drei neuen GW-Überwachungsmessstellen im Umkreis der Solfelder Sulz und GZB.
- Aufbohren der bestehenden, alten Sondierbohrungen S56 und S130 und Ausbau zu GW-Überwachungsmessstellen.
- Überwachung des Riedmattbächli.

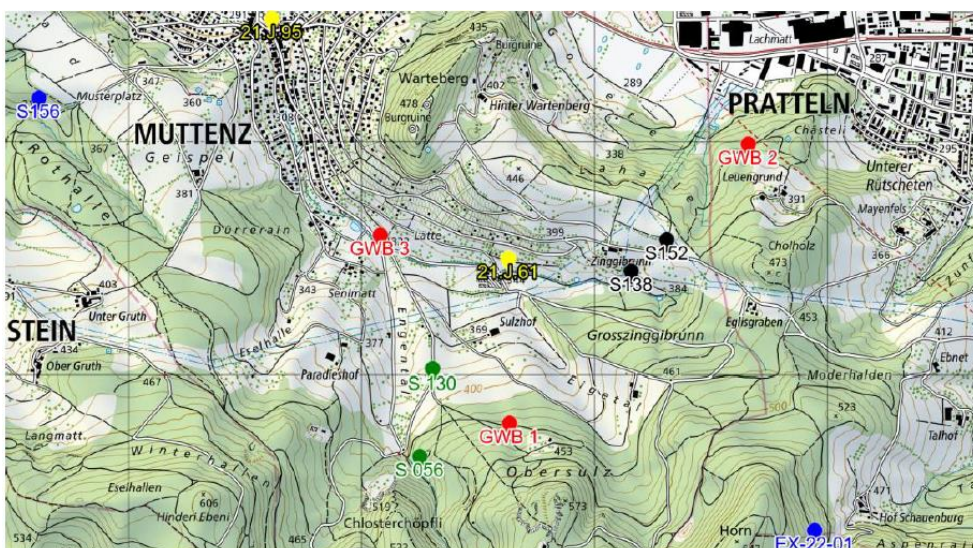


Abbildung 30: Vorschlag für Grundwassermessstellen zur Überwachung der Solfelder Sulz und GZB. Rot: Neue GW-Messstellen. Blau: Ausbau zu GW-Messstellen. Gelb: Bestehende GW-

2720047.10

Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn
Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung
(Vorläufige Beurteilung)

GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE

Messstellen (Kanton BL). Schwarz: Bestehende GW-Messstellen (Salinen AG). Grün: GW-Messstellen, die aufgebohrt und ausgebaut werden müssen.

Die GW-Überwachungsmessstellen werden mit Messsonden ausgerüstet, die kontinuierlich den GW-Pegel, GW-Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers überwachen. Diese kontinuierliche Überwachung wird ergänzt durch eine jährlich stattfindende Grundwasserprobenahme für hydrochemische Analysen. Es wird empfohlen diese Überwachung mit der bereits bestehende Grundwasserüberwachung des Kantons BL (Amt für Umwelt und Energie) abzustimmen.

2720047.10

Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn
Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung
(Vorläufige Beurteilung)

GEOTEST GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE

Anhang 1: Hydrochemische Wasseranalysen Sulz, 2021 / 2022

Schweizerhalle, 17.03.2022

Untersuchungsbericht Nr. 14211/22/4-010

Betrifft:

Bearbeitet von: FS, LM
LJ -

Sonderuntersuchung der Wasserproben aus Bohrlöchern (J. Pietsch)

Untersuchungsauftrag:

Untersuchung diverser relevanter Parameter in Wasserproben aus den Bohrlöchern Grosszinggibrunn und Sulz

Analysenergebnisse:

Siehe folgende Seiten

LABOR

Geht an: Labor CA
Geologie (G. Fuchs)
Geologie (J. Pietsch)

Probenahme	S 087	S 087	S 087	S 088	S 088	S 088	S 089	S 089	S 090	S 090	S 090
Datum	04.02.2022	04.02.2022	04.02.2022	08.04.2022	08.04.2022	08.04.2022	18.03.2022	18.03.2022	21.03.2022	21.03.2022	21.03.2022
Tiefe (m)	125	315	324	155	190	290	160	295	155	250	276
Probemenge (l)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
pH (-log H ⁺)	7.43	7.41	6.72	5.97	7.06	6.52	6.36	6.49	8.02	6.45	6.69
Leitfähigkeit (20° C, mS/cm)	2	2	211	4	6	232	150	215	3	238	237
Dichte (20° C, g/ml)	0.998	0.998	1.163	0.999	1.001	1.200	1.098	1.203	1.000	1.197	1.197
m-Wert (mmol/l)	6.69	6.74	4.98	0.61	5.47	4.09	0.27	4.31	2.03	3.79	4.20
Gesamthärte (° f.H.)	84	85	413	134.8	273.2	293.0	134.9	332.9	49.6	332.8	317.1
Carbonathärte (° f.H.)	33	34	25	3.0	27.4	20.5	1.4	21.6	39.5	313.9	296.1
Nichtcarbonathärte (° f.H.)	51	51	388	131.8	245.8	272.5	133.5	311.3	10.1	18.9	21.0
Bor (mg/l)	0.33	0.33	1.32	0.24	0.35	1.36	0.23	0.87	0.24	0.88	0.90
Calcium (mg/l)	217	218	1568	334.5	750.5	1115.0	525.7	1308.0	119.2	1307.0	1244.0
Eisen (mg/l)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	13.87	< 0.05	0.13	2.43	0.08	< 0.05	1.16	< 0.05
Kalium (mg/l)	9.6	4.2	55.2	11.6	9.1	59.5	35.2	39.4	7.8	38.9	37.0
Magnesium (mg/l)	72.9	72.8	51.0	124.1	207.5	34.6	8.4	14.3	48.0	15.0	15.0
Natrium (g/l)	0.07	0.05	107.5	0.4	0.5	135.3	56.3	124.7	0.35	130.3	127.6
Phosphat (mg/l)	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15
Strontium (mg/l)	14.4	14.6	18.4	5.7	17.7	10.0	5.0	7.9	1.7	7.9	7.9
Sulfat (mg/l)	376.0	379.2	4448.0	357.2	710.0	3928.0	1512.0	3539	190.3	3510.0	3500.0
Chlorid (g/l)	0.18	0.15	149.2	1.3	2.0	187.6	83.5	189.7	0.65	183.5	179.7
(Natriumchlorid)	0.30	0.25	246.0	2.1	3.3	309.2	130.6	296.7	1.07	302.5	296.2

Probenahme	S 109	S 109	S 114	S 125	S 125	S 125	S 126	S 127	S 127	S 127	S 128
Datum	16.03.2022	16.03.2022	01.02.2022	15.02.2022	15.02.2022	15.02.2022	01.02.2022	08.04.2022	08.04.2022	08.04.2022	14.02.2022
Tiefe (m)	185	348	90	208	300	391	331	210	320	368	250
Probemenge (l)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
pH (-log H ⁺)	5.89	6.21	6.08	6.15	5.44	6.47	6.75	7.13	6.57	6.42	6.31
Leitfähigkeit (20° C, mS/cm)	219	221	182	183	225	248	233	51	148	228	254
Dichte (20° C, g/ml)	1.198	1.204	1.112	1.104	1.156	1.201	1.175	1.022	1.082	1.202	1.177
m-Wert (mmol/l)	0.31	2.71	0.33	0.75	0.17	4.21	2.25	1.77	0.56	4.01	0.28
Gesamthärte (° f.H.)	281.2	321.0	290.0	168.4	220.5	332.3	597	204.6	333.0	338.6	160.9
Carbonathärte (° f.H.)	1.5	1.5	2.0	3.8	0.8	21.1	11	8.9	2.8	20.1	1.4
Nichtcarbonathärte (° f.H.)	279.7	319.5	288.0	164.6	219.7	311.2	586	195.7	330.2	318.5	159.5
Bor (mg/l)	0.58	1.42	0.31	0.33	0.41	0.82	3.47	0.64	0.76	1.65	1.76
Calcium (mg/l)	1109.0	1236	1131	650.8	855.9	1300.0	1841	749.2	1279.0	1305.0	634.1
Eisen (mg/l)	30.2	18.1	20.1	7.6	19.6	14.9	0.09	4.04	20.76	0.37	1.98
Kalium (mg/l)	39.0	61.2	65.2	22.6	31.9	39.9	132.4	11.8	22.9	60.6	134.2
Magnesium (mg/l)	9.8	29.4	16.9	13.9	16.0	17.9	333.1	42.1	32.4	30.1	5.8
Natrium (g/l)	122.4	125.7	74.7	67.9	100.9	129.1	114.2	12.8	49.4	138.1	108.8
Phosphat (mg/l)	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15
Strontium (mg/l)	5.5	9.7	11.0	5.2	5.7	8.0	64.1	7.1	9.4	22.3	3.7
Sulfat (mg/l)	5290	5734	2181.0	1787.0	2643.0	3699.0	3640.0	2008.0	3530.0	3918.0	6217.0
Chlorid (g/l)	183.8	189.6	103.7	95.4	147.4	188.6	166.2	19.1	72.5	188.3	160.6
(Natriumchlorid)	303.0	312.5	171.0	157.2	242.9	311.0	273.9	31.5	119.5	310.4	264.8

Probenahme	S 128	S 128									
Datum	14.02.2022	14.02.2022									
Tiefe (m)	360	371									
Probemenge (l)	1.0	1.0									
pH (-log H ⁺)	6.39	6.44									
Leitfähigkeit (20° C, mS/cm)	264	261									
Dichte (20° C, g/ml)	1.203	1.202									
m-Wert (mmol/l)	3.38	4.19									
Gesamthärte (° f.H.)	320.3	326.5									
Carbonathärte (° f.H.)	16.9	20.89									
Nichtcarbonathärte (° f.H.)	303.4	305.6									
Bor (mg/l)	1.68	1.70									
Calcium (mg/l)	1234.0	1258.0									
Eisen (mg/l)	27.33	2.58									
Kalium (mg/l)	60.1	58.3									
Magnesium (mg/l)	28.9	29.3									
Natrium (g/l)	123.9	127.2									
Phosphat (mg/l)	< 0.15	< 0.15									
Strontium (mg/l)	21.5	22.2									
Sulfat (mg/l)	3848.0	3763.0									
Chlorid (g/l)	188.6	191.1									
(Natriumchlorid)	311.0	315.0									

2720047.10

Muttenz, Solfeldintegrität Sulz/Grosszinggibrunn
Solfeld Sulz: Gefährdungs- und Risikoanalyse
Oberflächendeformationen und Grundwasserversalzung
(Vorläufige Beurteilung)

GEOTEST GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE

Anhang 2: Hydrogeologischer Plan mit Schutzgüter und Stauertopographie der Oberen Sulfatzone.

Legende

Solfelder Sulz/GZB

- Produktionsbohrung

Quellen / Pumpwerke

- aktiv
- inaktiv
- Pumpwerk, öffentlich
- Quellen

Grundwasserschutz

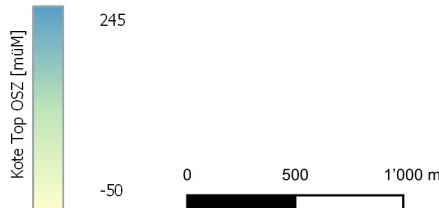
- ▨ Grundwasserschutzbereich Au (unterirdisch)
- ▨ Grundwasserschutzzonen (S1, S2, S3)
- ▨ Grundwasserschutzareal (GSA)

Geologie

- ▨ Vermuteter Verlauf der Aspenrainstörung

Top Stauertopographie (Ob. Sulfatzone)

- Höhenlinien [müüM]
- - - Störungen



GEOTEST

GEologen / Ingenieure /
Geophysiker /
Umweltfachleute

Auftrag : MuttENZ, Bohrfeldintegrität Sulz/GZB Nr. 2720047.1

Gefährdungsanalyse Grundwasser

Grundwasserschutz und Stauertopographie

1:35'000

