



Teil D7

Langzeitsicherheitsnachweis neuer Deponiebereich

Bergwerk Heilbronn der Südwestdeutsche Salzwerke AG

Auftraggeber: **Südwestdeutsche Salzwerke AG**

Bergwerk Heilbronn

Salzgrund 67

74076 Heilbronn

Auftragnehmer: **MMG Mitteldeutsche MONTAN GmbH**

Geseniusstraße 18 b

99734 Nordhausen

Bearbeiter: Dr.- Ing. Thomas Fliß

Dr.-Ing. Alexander Lechner

Dipl.-Geol. Andreas Jonischkeit ¹⁾

¹⁾ *Dipl.-Geol. Andreas Jonischkeit - Geologische Kartierungen und Beratung*

Nordhausen, den 11.12.2025

Herr Dr.- Ing. Thomas Fliß

Geschäftsführer

Herr Dr.-Ing. Alexander Lechner

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Glossar

1	Veranlassung und Aufgabenstellung.....	11
2	Basisinformationen	14
2.1	Geografischer Rahmen – Nachweisgebiet.....	14
2.2	Geologische Verhältnisse	14
2.2.1	Geologischer Überblick.....	14
2.2.2	Strukturgeologischer Überblick	16
2.2.3	Geologische Barriere	21
2.2.4	Aufschlussgrad der Lagerstätte	21
2.2.5	Aufschlussbohrungen über und unter Tage	23
2.2.6	Stratigraphie und Stoffbestand der Schichtenfolge	24
2.2.7	Stoffbestand der Steinsalzlagerstätte	30
2.2.8	Lagerungsverhältnisse.....	35
2.2.9	Tektonische Beanspruchung des Steinsalzlagers.....	38
2.2.10	Geologische Profilschnitte durch das Grubengebäude	40
2.2.11	Geothermische Tiefenstufe.....	41
2.2.12	Regionale seismische Aktivität in Vergangenheit und Gegenwart.....	41
2.2.13	Subrosion, Ausbildung von Erdfällen an der Oberfläche	42
2.2.14	Halokinese.....	45
2.3	Angaben zum Grubengebäude.....	45
2.3.1	Zuschnitt des Grubengebäudes und Lage des neuen Deponiebereiches	45
2.3.2	Sicherheit des Grubengebäudes	49
2.3.2.1	Standesicherheit der Schächte, Strecken, Blindschächte und Abbauräume	49
2.3.2.2	Firstfälle, Stoßabschalungen und Liegendaufbrüche	49
2.3.2.3	Lösungszutritte (Ursache und Herkunft).....	51
2.3.2.4	Gasfreisetzung/-gefährdung und Erdöl-/Erdgasvorkommen.....	52
2.3.2.5	Sicherheitspfeiler zu Deckgebirge/ Flanken/ Basis/ Lösungsnestern/ Bohrungen/ Schächten / Nachbarbergwerken	53
2.3.2.6	Erkundungsbohrungen von über Tage und unter Tage.....	58
2.3.2.7	Abgedämmte oder abzdämmende Teile des Grubengebäudes	58
2.4	Hydrogeologische Verhältnisse	59
2.4.1	Hydrogeologischer Überblick.....	59
2.4.2	Grundwasserstockwerke und Grundwasserbewegung	61

2.4.2.1	Deckgebirge	61
2.4.2.2	Obere Sulfatschichten	64
2.4.2.3	Zwischendolomit.....	64
2.4.2.4	Auslaugungsgesteine am Top des Steinsalzlagers.....	65
2.4.2.5	Steinsalzlager	65
2.4.2.6	Unteren Sulfatschichten.....	66
2.4.3	Durchlässigkeiten und Fließgeschwindigkeiten.....	66
2.4.4	Mineralisation des Grundwassers und Grundwasserchemismus	68
2.4.5	Grundwassernutzung, Schutz- und Vorranggebiete.....	70
2.4.6	Fließ- und Standgewässer.....	73
2.5	Abfallablagerung in der UTD.....	74
2.5.1	Abfallarten und -mengen, Abfallbeschaffenheit.....	74
2.5.2	Ablagerungskonzept und -technik.....	75
2.5.3	Geomechanisches Verhalten der Abfälle	76
2.5.4	Reaktionsverhalten der Abfälle bei Zutritt von Wasser und salinaren Lösungen	77
3	Sicherheitskonzept.....	78
3.1	Standortbezogene Sicherheitsbeurteilung	78
3.2	Standortsicherheitsnachweis in der Ablagerungs- und Stilllegungsphase	78
3.3	Langzeitsicherheitsnachweis	80
3.4	Einflüsse aus planbaren Ereignisabläufen	81
3.5	Einflüsse aus nicht planbaren Ereignisabläufen.....	82
4	Geotechnischer Standsicherheitsnachweis	86
4.1	Analyse und Bewertung der Randbedingungen	86
4.1.1	Geologisch/tektonische und hydrogeologisch/hydrologische Verhältnisse	86
4.1.2	Einwirkungsfaktoren anthropogener Art.....	86
4.1.3	bergbauliche Situation und Betriebserfahrungen	87
4.1.4	Deformations- und Senkungsmessungen sowie markscheiderische Prognosen.....	87
4.1.5	Geotechnische Laborversuche und Materialkennwerte.....	88
4.1.6	Beanspruchungszustand des Pfeilertragsystems.....	90
4.2	Bewertung gebirgsmechanischer Gefährdungssituationen	91
4.3	Sicherheitsplan zum Nachweis der Stand- bzw. Langzeitsicherheit.....	91
4.4	Gebirgsmechanische Modellierung des Beanspruchungszustandes des Gebirges und des Langzeitverhaltens des Einlagerungsbereiches	92
4.4.1	Standortsicherheit und Barriereintegrität in der Betriebsphase.....	92
4.4.2	Standortsicherheit und Barriereintegrität in der Nachbetriebsphase.....	94
4.4.3	Standortsicherheit und Barriereintegrität unter Berücksichtigung seismischer Einflüsse.....	95
4.4.4	Konvergenz des Grubengebäudes und Oberflächenabsenkungen	97

4.5	Geotechnische Messungen während des Einlagerungsbetriebes und zum Betriebsabschluss	98
4.6	Grundsätze für die Verwahrung und für Abschlussbauwerke	99
4.7	Zusammenfassung geotechnischer Standsicherheitsnachweis	100
5	Nachweis der Langzeitsicherheit	102
5.1	Bewertung der natürlichen Barrieren	102
5.1.1	Wirtsgestein.....	102
5.1.2	Nebengestein	102
5.1.3	Deckgebirge	103
5.2	Bewertung von technischen Eingriffen.....	103
5.2.1	Schächte	103
5.2.2	Grubenbaue	103
5.2.3	Übertagebohrungen.....	104
5.2.4	Untertagebohrungen.....	104
5.3	Bewertung der Barrieren.....	104
5.3.1	Abfallbeschaffenheit/ Konditionierung und Art der Einbringung.....	104
5.3.2	Streckendämme	105
5.3.3	Schachtverschlüsse.....	105
5.4	Bewertung von natürlich bedingten Ereignissen	105
5.4.1	Vulkanismus, Diapirismus und Subrosion.....	105
5.4.2	Erdbeben.....	106
5.5	Bewertung von technisch bedingten Ereignissen und Prozessen	107
5.5.1	Undichtwerden von Erkundungsbohrungen	107
5.5.2	Wassereinbruch während der Ablagerungs- und Stilllegungsphase.....	107
5.5.3	Laugen- oder Gaseinbruch während der Ablagerungs- und Stilllegungsphase	107
5.5.4	Versagen der Schachtverschlüsse.....	108
5.5.5	Bergbaubedingte Gebirgsauflockerungen.....	108
5.5.6	Bohrungen oder sonstige Eingriffe in der Nachbetriebsphase.....	109
5.6	Verwahrung der Tageszugänge.....	109
5.7	Zusammenfassung Langzeitsicherheitsnachweis	110
6	Stilllegung der Deponie.....	111
7	Zusammenfassung und Bewertung des Gesamtsystems	112
8	Literaturverzeichnis.....	114

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtslageplan des Bergwerks Heilbronn der SWS AG mit der Lage der Schächte und des neuen Deponiebereichs.....	12
Abbildung 2: Tektonische Regionen in Baden-Württemberg und Auswahl kartierter Störungen sowie überregional wichtige Lineamente (grau unterlegt). Lage der Heilbronner Mulde (rot). Ausschnitt oben links: Süddeutsche Scholle und Lage der Heilbronner Mulde (roter Punkt) [RUPF & NITSCH (2008)]	17
Abbildung 3: Schichtlagerungskarte der Grenzfläche Oberer Muschelkalk / Keuper mit eingezeichneten Störungszonen [nach BRUNNER & HINKELBEIN (2000) und GKV50 LGRB-Viewer Stand 06/2024 aus JONISCHKEIT (2024)]	19
Abbildung 4: Schichtgrenzen Mittlerer Muschelkalk / Unterer Muschelkalk (m/ mm) aus [JONISCHKEIT (2024)].....	20
Abbildung 5: Geologisches Normalprofil der Heilbronner Mulde. In der Skizze des Salinar-Großzyklus ist die Barrierschicht (Obere Sulfatschichten) rot markiert.....	29
Abbildung 6: Übersicht der Strukturen und Phänomene in den Steinsalzschiechten des Mittleren Muschelkalks in der Grube Heilbronn aus: [JONISCHKEIT (2024)]	36
Abbildung 7: Schematische Skizze einer Anhydritkuppe [geändert nach GLA (1997)].....	37
Abbildung 8: Schematischer Längsschnitt durch eine Bändersalzmulde [nach GLA (1997), aus JONISCHKEIT (2013) aus Hansch & Simon (2003)].....	38
Abbildung 9: Geologischer Profilschnitt Nordwest – Südost durch den neuen Deponiebereich in der Heilbronner Mulde [auf Basis JONISCHKEIT (2018)]	40
Abbildung 10: Erdbebenverteilung um den Deponiestandort (roter Stern). Die Symbolgröße skaliert mit der Erdbebenstärke entsprechend der Legende. Offene Kreise stellen die Intensität I0 für Erdbeben dar, für die keine Magnitude angegeben ist. [aus BAISCH (2024)]	41
Abbildung 11: Lageplan und Grundriss des neuen Deponiebereiches.....	48
Abbildung 12: Normalprofil des neuen Deponiebereichs mit zwei charakteristischen Profilen im Südwesten und Nordosten [aus nach JONISCHKEIT (2024)].....	54
Abbildung 13: Räumliche Ausdehnung und Mächtigkeit der Steinsalzschiechten im Raum Heilbronn [aus: JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018), geändert nach LGRB (2000)].....	55
Abbildung 14: Untersuchungsgebiet mit Lage des neuen Deponiebereiches sowie der Gemeinden und Gemeindegrenzen.	60

Abbildung 15: Hydrogeologischer Schnitt der Heilbronner Mulde [LGRB (2000)].	60
Abbildung 16: Grundwasserhöhengleichen der Meißner- und Trochitenkalk-Formation oberhalb / unterhalb der Haßmersheim-Subformation zum 18.09.2000 – 22.09.2000, der neue Deponiebereich ist durch das orange Feld markiert [HYDRAG (2025)]......	68
Abbildung 17: Wasserschutzgebiete sowie Vorbehaltsgebiet zur Sicherung von Wasservorkommen um den neuen Deponiebereich [LUBW (2024)].	72
Abbildung 18: Ablagerungskonzept zum Betrieb des neuen Deponiebereichs [SWS (2022)]	75
Abbildung 19: Entwicklung der Konvergenzraten im Nordfeld Heilbronn.	88
Abbildung 20: Pfeilerstabilität für den Sicherheitsfaktor 2,0 nach einer offenen Standzeit von 37 Jahren - aus [MORGENSTERN, KONIETZKY & FLIß (2024)]	93
Abbildung 21: Barriereintegrität nach 10.000 Jahren für 3,6 m Einbauhöhe Deponiegut.	94
Abbildung 22: Zeitreihe und Spektrum des Modell-Erdbebensignals in Anlehnung an das L'Aquila Beben [MORGENSTERN & KONIETZKY (2022)].....	96
Abbildung 23: Senkung der Tagesoberfläche über dem Deponiebereich in den ersten 100 Jahren nach Auffahrung der Deponiekammern.	97
Abbildung 24: Endsenkungen der Tagesoberfläche über dem Deponiebereich in Abhängigkeit von der Einbauhöhe des Deponiegutes.....	98
Abbildung 25: Schematischer Aufbau eines Streckenverschlusses mit richtungsunabhängiger Dichtwirkung.....	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Generelle stratigrafische Abfolge im Raum Heilbronn.....	25
Tabelle 2:	Stratigrafische Abfolge der im Nachweisgebiet aufgeschlossenen Schichten. Basierend auf: [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)]......	34
Tabelle 3:	Zusammenstellung der Schichtmächtigkeitsangaben für die Schichtenfolge im Mittleren Muschelkalk im Bereich des Bergwerkes Heilbronn, aufgeschlossene Schichtenfolge aus verschiedenen Quellen. Übernommen und ergänzt aus: [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018) und JONISCHKEIT (2024)].	56
Tabelle 4:	Zusammenstellung der Schichtmächtigkeitsangaben für die Steinsalzschieben. [übernommen und ergänzt aus: JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018) und JONISCHKEIT (2024)]......	57
Tabelle 5:	Alte und neue Gliederung des hydrogeologischen Untergrunderbaus im Untersuchungsgebiet aus [aus HYDRAG (2025), nach MU BW (1995), LRGB (2022)].....	62
Tabelle 6:	Brunnenkennzahlen WSG Neckarsulm-Obereisesheim [HYDRAG (2025)].....	70
Tabelle 7:	Brunnenkennzahlen WSG Neckarsulm-Obereisesheim [HYDRAG (2025)].....	71
Tabelle 8:	Brunnenkennzahlen Quellschacht „Kirche Obereisesheim“ [HYDRAG (2025)]	72
Tabelle 9:	Fließgewässer im Untersuchungsgebiet [LUBW (2022)].....	73
Tabelle 10:	Gesteinskennwerte für das Untere Steinsalz aus [FRÜHWIRT (2017)].....	89
Tabelle 11:	Gesteinskennwerte der Oberen Sulfatschichten [FRÜHWIRT (2017) und (2018)]. .	89
Tabelle 12:	Stoffparameter des Abfallmaterials [MORGENSTERN & KONIETZKY (2021)].....	90

Glossar

Abbaukammer: Als Abbaukammer wird ein Unter Tage hergestellter Hohlraum zur Salzgewinnung bezeichnet.

Abbaustoß/ Stoß: Der Abbaustoß bzw. der Stoß ist die seitliche Wand der Abbaukammer bzw. der Streckenauffahrung.

Abbaufirste/ Firste: Als Firste wird die Decke in einer Abbaukammer bzw. Streckenauffahrung bezeichnet.

Abteufen: Unter Abteufen wird das Herstellen eines senkrechten Schachtes zur Erschließung der Lagerstätten verstanden.

Bauhöhe/ Kammerhöhe: Als Bauhöhe wird die Höhe einer Abbaukammer verstanden.

Bergsenkung/ Senkung/ Oberflächensenkungen: Unter dem Begriff Bergsenkung werden Bodenbewegungen der Erdoberfläche zusammengefasst, die aufgrund der untertägigen Bergbautätigkeiten entstehen. Die Senkungen verlaufen beim Abbau von Salzlagerstätten großräumig und gleichmäßig, wodurch sich eine flach auslaufende Senkungsmulde bzw. ein Senkungstrog ausbildet.

Bewetterung: Als Bewetterung wird die Frischluftversorgung unter Tage und die Abführung der Luft nach über Tage bezeichnet.

Exploration: Als Exploration werden Maßnahmen zur Erkundung von Lagerstätten bezeichnet, um die Zusammensetzung und Beschaffenheit sowie die Menge der enthaltenen Rohstoffe zu ermitteln.

Förderung: Unter dem Begriff Förderung wird der Transport der gewonnenen Mineralien unter Tage sowie durch den Förderschacht zusammengefasst.

Grubenfeld: Das Grubenfeld umfasst die Fläche, in deren Grenzen das Recht zur Gewinnung des vorhandenen Rohstoffes besteht.

Grubengebäude: Als Grubengebäude wird die Gesamtheit aller untertägig bergmännisch erstellten Hohlräume eines Bergwerkes zusammengefasst.

Halokinese: Die Halokinese beschreibt den Vorgang eines Salzaufstiegs aus dem Untergrund aufgrund von Dichteunterschieden der Gesteinsformationen, bspw. in Form von Salzstöcken, -sattel oder -kissen.

Hangendes: Unter dem Begriff Hangendes werden die direkt oberhalb der abgebauten Lagerstätten vorhanden geologischen Schichten bezeichnet.

Konvergenz: Als Konvergenz wird die Bewegung der Hohlraumfirste gegenüber der Hohlraumsohle bezeichnet infolge von Deformationen in den Pfeilern der abgebauten Lagerstättenbereiche.

Lagermächtigkeit/ Mächtigkeit: Die Lagermächtigkeit beschreibt die Dicke einer Lagerstätte bzw. eines Salzlagers.

Lagerstätte: Als Lagerstätte werden natürliche Ablagerungen oder Konzentrationen von nutzbaren Stoffen (Mineralien oder Primärenergieträgern) bezeichnet.

Liegendes: Unter dem Begriff Liegendes werden die direkt unterhalb der abgebauten Lagerstätten vorhandenen geologischen Schichten bezeichnet.

Lösungszutritte: Unter Lösungszutritten werden Flüssigkeitszuflüsse ins Grubengebäude zusammengefasst, welche aus fossilen Restlösungen, Zuflüssen aus Liegenden oder Hangenden geologischen Schichten stammen können. Im Falle von Salzlösungen wird auch von Laugenzutritten oder Laugenzuflüssen gesprochen.

Pfeiler/ Feste: Als Pfeiler bzw. Festen werden die nach dem Abbau der Lagerstätte vorhandenen und verbleibenden Gebirgsstrukturen bezeichnet.

Salzhang: Unter einem Salzhang wird die laterale Begrenzung einer Salzlagerstätte verstanden, wobei durch den Zutritt von Süßwässern oder untersättigten Salzlösungen Lösevorgänge am Lagerstättenkörper stattfinden, die eine unterirdische Abtragung der Salzformation zur Folge haben.

Schacht: Unter dem Begriff Schacht wird ein senkrechter/vertikaler Grubenbau verstanden, mit dem eine Lagerstätte von der Tagesoberfläche aus erschlossen wird. Es werden prinzipiell Wetter-, Förder-, Seilfahrt- und Materialschächte unterschieden.

Sediment: Als Sediment wird ein Gestein bezeichnet, das durch Ablagerung auf dem Land oder im Meer gebildet wurde.

Sohle: Als Sohle werden alle in einem gleichen Niveau aufgefahrenen Grubenbaue eines Bergwerkes bezeichnet (bspw. Förder- oder Wettersohle). Weiterhin wird der Boden in den Abbaukammern bzw. den untertägigen Strecken als Sohle bezeichnet.

Subrosion: Unter Subrosion werden Vorgänge und Prozesse zusammengefasst, welche eine unterirdische Auslaugung und Verlagerung von zumeist leichtlöslichen Gesteinsformationen betreffen.

Synsedimentär: Strukturen und Phänomene entstanden während der Ablagerung bzw. Entstehung des Gesteins, also unter den zeitlich gleichen Bedingungen

Syndiagenetisch: Strukturen und Phänomene entstanden während der Entwässerung und Verfestigung des Gesteins

Tepee-structures: Tepee-Strukturen oder auch Tipi-Strukturen (kurz Tipis) sind Sedimentstrukturen, die als Bildungen in einer peritidalen Umgebung interpretiert werden. Tipis entstehen größtenteils durch Verdunstung von Wasser und anschließende Ausfällung von Mineralien im Sediment, was zu Ausdehnung (seitlich) und Beulen (wo zwei Schichten aneinander stoßen) führt und eine tipiähnliche Form bildet.

Teufe: Als Teufe wird der vertikale Abstand der untertägigen Hohlräume zur Tagesoberfläche bezeichnet.

Versatz: Unter dem Begriff Versatz wird die Verfüllung der untertägig infolge der Rohstoffgewinnung geschaffenen Hohlräumen zusammengefasst. Hierbei wird zwischen dem Bergeversatz (Verfüllung mit Bergbaueigenen Rückständen aus der Aufbereitung des gewonnenen Rohstoffes) und dem Versatz mittels bergbaufremden Reststoffen unterschieden.

Wetter/ Grubenwetter: Als Grubenwetter oder Frischwetter wird das im Bergwerk zirkulierende bzw. über Wetterschächte zugeführte Luftvolumen bezeichnet. Hierbei werden Frischwetter (frische Luft welche übertägig angesaugt wird) und Abwetter, (verbrauchte Luft die nach übertage abgeleitet wird) unterschieden.

Wetterfeuchte: Als Wetterfeuchte wird der Feuchtigkeitsgehalt der im Bergwerk vorhandenen bzw. durch die Belüftung der Grubenhohlräume eingetragenen Luftmassen verstanden.

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Südwestdeutsche Salzwerke AG (SWS) betreibt in Baden-Württemberg das Bergwerk Heilbronn-Kochendorf mit den beiden Einzelgruben Heilbronn und Kochendorf. In einem Teilbereich des Bergwerkes Heilbronn wird durch die SWS AG seit 1987 eine abfallrechtlich planfestgestellte Untertagedeponie betrieben. Die Geltungsdauer des Planfeststellungsbeschlusses für diese UTD vom 11. August 1998 endet am 31. Dezember 2028.

Um eine möglichst nahtlose Fortführung des Untertagedeponiebetriebes zu ermöglichen, werden Seitens der SWS AG Planungen für einen neuen Deponiebereich innerhalb der Grube Heilbronn vorangetrieben. Im Rahmen einer Standortauswahl des zukünftigen Ablagerungsbereichs wurden bereits verschiedene Alternativen innerhalb des Bergwerkes untersucht und bewertet. Hierbei konnte ein Standort im Nordosten des Grubenfeldes identifiziert werden, der wesentliche Vorteile aufweist und somit für die Fortführung der Aktivitäten einer UTD ausgewählt wurde [SWS (2022)].

Da für die Planfeststellung der neuen Untertagedeponie hinreichend belastbare Informationen zu den Standortverhältnissen, der Hydrologie, den geologischen Verhältnissen sowie den ingenieur-geologischen und geotechnischen Verhältnissen vorliegen müssen, erfolgen bereits während der bergmännischen Auffahrung erste Erkundungsmaßnahmen im Vorfeld des Planfeststellungsantrags in einem Teilbereich des vorgesehenen Deponiestandortes. Aus diesen Erkundungsmaßnahmen werden repräsentative Erkenntnisse zur Geologie sowie der Geotechnik für den gesamten vorgesehenen Bereich der Untertagedeponie gewonnen und im Rahmen der weiteren Planungen und dem Nachweis der Langzeitsicherheit im Detail begutachtet und bewertet.

Die Grundlage für den Langzeitsicherheitsnachweis zur Deponierung von Abfällen unter Tage sind die Regularien der „Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV)“, Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 3. Juli 2024 (Art. 3 G v. 3.7.2024 Nr. 225) geändert wurden [DepV (2021)]. Die Nachweisführung sowie Inhalt und Gliederung des vorliegenden Langzeitsicherheitsnachweises orientieren sich maßgeblich an Anhang 2 der Deponieverordnung; Anforderungen an den Standort, geologische Barriere, Langzeitsicherheitsnachweis und Stilllegungsmaßnahmen von Deponien der Klasse IV im Salzgestein (zu § 3 Absatz 2, § 10 Absatz 1, § 11 Absatz 2).

Innerhalb des vom Gesetzgeber vorgegebenen Rahmens wird der Nachweis entsprechend den standortspezifischen Gegebenheiten des Bergwerkes und des Deponiebereiches geführt. Im Rahmen der Vorplanungen und der Nachweisführung wurden eine Reihe von Themenschwerpunkten und Sachverhalten identifiziert, welche durch eine aktuelle Begutachtung zu belegen und hinsichtlich der zu gewährleistenden Langzeitsicherheit nachzuweisen sind. Hierzu wurden u.a. die folgenden Gutachten angefertigt und deren Ergebnisse und Erkenntnisse in den Langzeitsicherheitsnachweis integriert.

*Komplexe numerische Standsicherheits- und Deformationsanalyse für den neuen Deponiebereich.
[KONIETZKY, MORGENSTERN & FLIß (2024)]*

Gutachten zum Verschlusskonzept von untertägigen Verbindungsstrecken im neuen Deponiebereich des Steinsalzbergwerkes Heilbronn. [TRIANAFYLLIDIS (2022)]

*Seismologisches Gefährdungsgutachten für den neuen Deponiebereich im Bergwerk Heilbronn
[BAISCH (2024)]*

Stoffgutachten zur Fortführung des Deponiebetriebes im neuen Deponiebereich im Bergwerk Heilbronn. [K-UTEC (2025)]

Fortführung des Deponiebetriebs im neuen Deponiebereich im Bergwerk Heilbronn – Hydrogeologische Untersuchung. [HYDRAG (2025)]

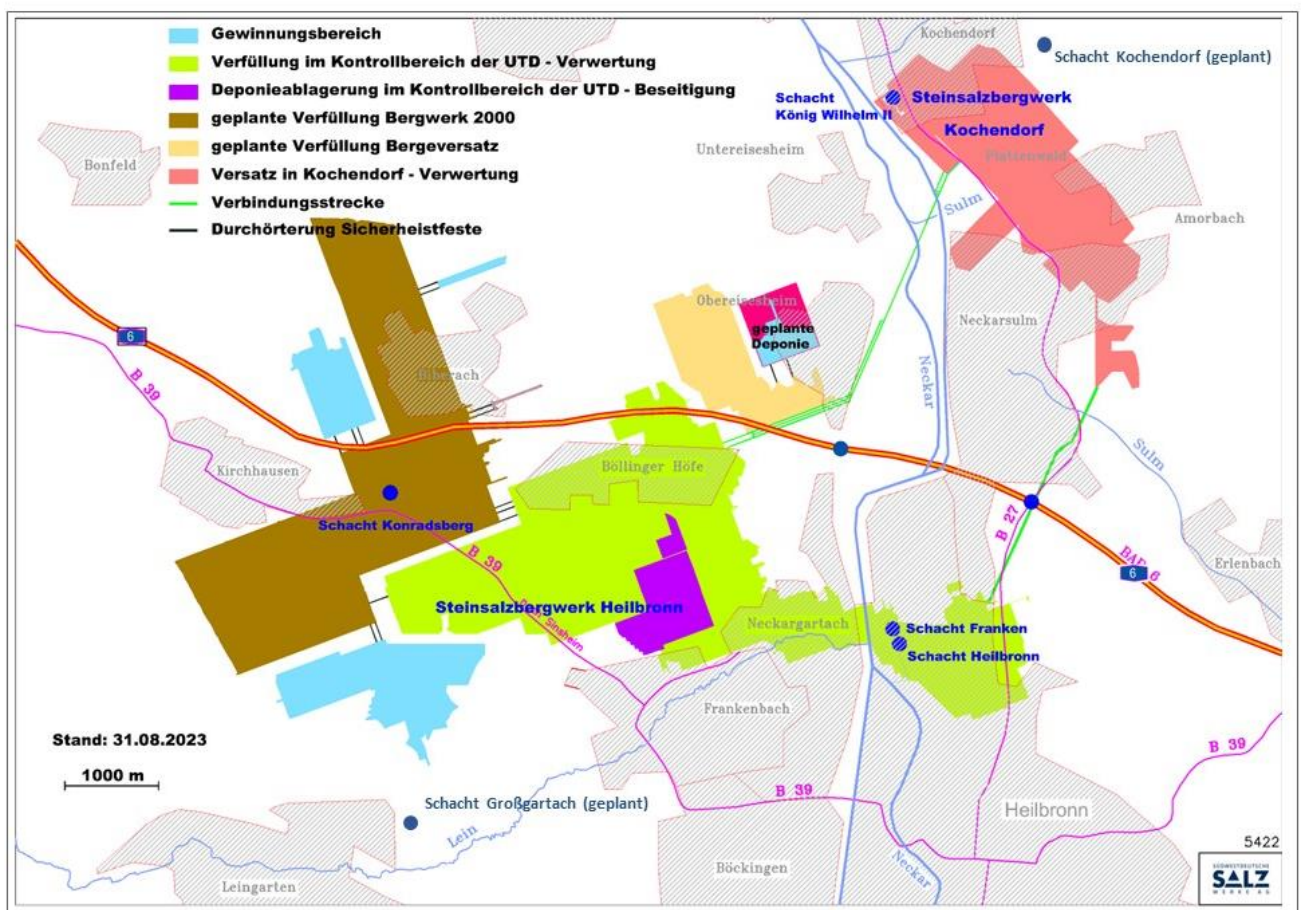


Abbildung 1: Übersichtslageplan des Bergwerks Heilbronn der SWS AG mit der Lage der Schächte und des neuen Deponiebereichs.

Die erläuternden Fachgutachten und Planungen sind als Bestandteile der Antragsunterlagen zur besseren Übersicht wie folgt bezeichnet:

- D1 Stoffgutachten [K-UTEC (2025)]
- D2 Hydrogeologische Basisinformationen [HYDRAG (2025)]
- D3 Geologische Kartierung / Geologisches Gutachten [JONISCHKEIT (2024)]
- D4 Standsicherheitsnachweis [*KONIETZKY, MORGENSTERN & FLIß (2024)*]
- D5 Seismologisches Gutachten [BAISCH (2024)]
- D6 Gutachten Verschlussbauwerke [TRIANTAFYLLIDIS (2022)]

Als Nachweiszeitraum wird in Anlehnung an die Ergebnisse der numerischen Modellrechnungen ein Zeitraum von 20.000 Jahren zu Grunde gelegt. Im Ergebnis dieser Berechnungen wurde der Zeitraum bis zum Erreichen des vollständigen Einschlusses der eingebrachten Abfallstoffe zu ca. 5.000 Jahren ermittelt [(*KONIETZKY, MORGENSTERN & FLIß (2024)*)]. Der Ansatz eines Nachweiszeitraumes von 20.000 Jahren kann damit als abdeckend angesehen werden.

Im Zuge der Auffahrung des neuen Deponiebereiches erfolgten bisher verschiedene geologische Aufnahmen und Dokumentationen [JONISCHKEIT (2024)]. Nach der vollständigen Auffahrung des neuen Deponiebereiches werden die geologischen Verhältnisse final bewertet und eine geologische Abschlussdokumentation angefertigt. Erst nach einer positiven finalen Entscheidung soll mit der Einlagerung der Abfallstoffe im neuen Deponiebereich begonnen werden.

Die Abbildung 1 zeigt einen Übersichtsplan mit der Lage der Tagesschächte des Bergwerkes Heilbronn sowie dem Nachweisgebiet des neuen Deponiebereiches. Die Abbildung enthält zusätzlich die beiden im Rahmen der Realisierung des Projektes SuedLink geplanten Schächte in Großgartach und Kochendorf.

2 Basisinformationen

2.1 Geografischer Rahmen – Nachweisgebiet

Das Grubenfeld Heilbronn befindet sich nördlich bis nordwestlich der Stadt Heilbronn unter den Stadtteilen Frankenbach, Neckargartach, Biberach und Kirchhausen sowie unter dem Neckarsulmer Stadtteil Obereisesheim, wobei der vorgesehene neue Deponiebereich am nordöstlichen Rand der Grube Heilbronn unterhalb von Obereisesheim liegt.

Die maximale Ausdehnung des gesamten Grubenfeldes Heilbronn beträgt derzeit von N nach S etwa 5 km, in WSW-ENE-Richtung ca. 9 km ohne die Auffahrungen des Bergwerks Kochendorf. Das Bergwerk Heilbronn ist über eine alte sowie eine neue Verbindungsstrecke unter Tage mit dem Bergwerk Kochendorf verbunden.

Die bestehenden Abbaue der Grube Heilbronn liegen in einer durchschnittlichen Teufe von etwa 200 m unter Geländeoberkante und steigen am nordwestlichen Rand der Heilbronner Mulde flach nach Norden an. Das Nachweisgebiet umfasst im Wesentlichen den neuen Deponiebereich sowie die umgebenden Sicherheitsfesten gegen das bestehende Grubenfeld (siehe Abbildung 1).

Das signifikante Untersuchungsgebiet für mögliche bergtechnische Einflüsse und Randbedingungen umfasst darüber hinaus auch das angeschlossene Grubenfeld inklusive der vorhandenen und geplanten Schächte sowie der geplanten Maßnahmen zur Verwahrung der im Nahbereich aufgefahrenden Abbaufelder.

Das Untersuchungsgebiet für die Ermittlung und Beschreibung der hydrogeologischen Basisinformationen umfasst im Wesentlichen die Messtischblätter L6720 und L6920 der Baden-Württembergischen Topographischen Karten 1:50.000. Das Untersuchungsgebiet wurde gemäß DepV entsprechend der Grundwasserfließrichtung bzgl. Zustrom- und Abstrombereich des neuen Deponiebereichs sowie in Bezug auf die angrenzenden Wasserschutzgebiete gewählt.

2.2 Geologische Verhältnisse

2.2.1 Geologischer Überblick

Das Grubenfeld des neuen Deponiebereichs liegt nördlich von Heilbronn im nordöstlichen Teil der tektonisch angelegten Heilbronner Mulde, die einen Teil der Fränkischen Mulde darstellt. Der neue Deponiebereich ist dem westlichen struktur- und störungsarmen Bereich der Heilbronner Mulde zuzuordnen, und somit ein Teil des Grubenfeldes Heilbronn mit den größten Steinsalzmächtigkeiten und einer relativ ebenen, ungestörteren Lagerung des Steinsalzlagers. Im Nachweisgebiet nimmt die Steinsalzmächtigkeit von 33 m im Süden auf 10 m im Norden ab, bedingt durch den Anstieg der Schichten nach Norden und Nordosten.

Der neue Deponiebereich wird im Deckgebirge oberhalb des geplanten Deponieareals von einer vermuteten NW-SE streichende Störung berührt. Bei der tektonischen Betrachtung des Untersuchungsgebiets muss aufgrund der Eigenschaft der Steinsalzschieben als Abscher- und Entkoppelungshorizont zwischen tektonischen Bewegungen im Liegenden und im Hangenden unterschieden werden.

Diese Störung kann mit einer gleichsinnigen Störung im Liegenden korreliert werden, wobei diese mit einer Schichtverbiegung bzw. einem Anstieg der Steinsalzschieben im südwestlichen Bereich des neuen Deponiebereichs von SW nach NE in Verbindung gebracht werden kann. Aufgrund der plastischen Deformationseigenschaft der Salzgesteine der Heilbronn-Formation reagieren diese lediglich mit einer Schichtverbiegung, der Schichtverband und die hydraulische Integrität wurden durch die tektonischen Bewegungen nicht zerstört bzw. negativ beeinflusst. JONISCHKEIT (2024)

Im Raum Heilbronn bilden die Oberfläche des Festgesteinsuntergrunds Gesteine des Gipskeupers und des Unteren Keupers (Lettenkeuper), die von bis zu 10 m mächtigem Löss und Lösslehm überdeckt werden. Der Gipskeuper ist hier nur in Resten vorhanden und besteht aus Tonsteinen mit eingeschalteten Karbonatgesteinsbänken. Die Grundgipsschichten sind im Bereich der Gäuflächen vollständig ausgelaugt und liegen meist als verstürzte schluffige Tonsteine vor. Der Untere Keuper (Lettenkeuper) umfasst Dolomitsteine, dolomitische Tonsteine und Sandsteine. Im Liegenden der Keupergesteine stehen die 200 bis 250 m mächtigen Schichten des Muschelkalks an. Der Obere Muschelkalk ist eine Wechselfolge aus Kalksteinen und zwischengelagerten Tonmergelsteinschichten. Die Ablagerungen des Mittleren Muschelkalks bilden einen salinaren Großzyklus. (SIMON 1988)

Dieser salinare Großzyklus des Mittleren Muschelkalks ist im Bereich des Bergwerks Heilbronn-Kochendorf generell durch folgende stratigraphische Abfolge ausgebildet (hangend zu liegend):

- Dolomitgestein (Obere Dolomite)
- Sulfatgestein (Obere Sulfatschichten: Oberer Anhydrit, Oberer Tonanhydrit, Zwischenanhydrit, Zwischendolomit, Unterer Tonanhydrit)
- Steinsalz (Oberes Steinsalz, Bändersalz, Unteres Steinsalz)
- Sulfatgestein (Untere Sulfatschichten)
- Dolomitgestein (Untere Dolomite)

Kalialze wurden in dieser Salinargesteinsfolge nicht abgelagert. Die dolomitischen und tonigen Kalkmergelsteine der Orbicularisschichten mit Einschaltungen von Sulfatgesteinen bilden die Basis des Mittleren Muschelkalks. Darunter setzt mit den Schaumkalkbänken die Kalksteinfazies des Unteren Muschelkalks ein.

Die geologische Barrierschicht gegen die wasserführenden Schichten im Hangenden bilden im Raum Heilbronn die Oberen Sulfatschichten mit einer Mächtigkeit zwischen 40 m und 50 m. In der Heilbronner Mulde stellen sie die Aquifersohle ohne Auslaugungserscheinungen dar. Die Oberen Sulfatschichten sind im gesamten Gebiet der Heilbronner Mulde großflächig und gleichmäßig ausgebildet.

Eine Barriere zum Liegenden unterhalb des Grubengebäudes wird durch die sulfatischen und tonigen basalen Schichten des Mittleren Muschelkalks (Untere Sulfatschichten) dargestellt, welche im Bereich des Nachweisgebietes eine flächendeckende laterale Verbreitung und ausreichende Mächtigkeit aufweisen.

Die Schichtlagerung im neuen Deponiebereich folgt dem generellen Schichteinfallen der Heilbronner Mulde im Gebiet des Bergwerks Heilbronn-Kochendorf von ca. $0,5^\circ$ nach S bis SE. Zu beobachtende markante Gefälle (von N nach S) bzw. Anstiege (von S nach N) dokumentieren vertikale Bewegungen im Liegenden, die zu einer flexurartigen Verbiegung des Steinsalzlagers geführt haben, ohne die internen Strukturen zu zerstören und ohne Auswirkungen auf die Steinsalzmächtigkeit.

Das Bergwerk Heilbronn - Kochendorf ist durch zahlreiche Berichte, Gutachten und Kartenwerke umfangreich geowissenschaftlich, lagerstättenkundlich und bergmännisch dokumentiert (siehe Literaturverzeichnis). Die Steinsalzschichten und insbesondere das Untere Steinsalz ist im neuen Deponiebereich sowie im weiteren Umfeld durch zahlreiche Bohrungen unter und über Tage sowie durch Aufschlüsse unter Tage erkundet. Insgesamt liegt eine sehr umfassende geologische Datenbasis zur Bewertung der Langzeitsicherheit vor.

Der Steinsalzabbau konzentriert sich ausschließlich auf das Untere Steinsalz, wobei die Gesteinsbeschaffenheit und die Ausbildung des Unteren Steinsalzes im gesamten Untersuchungsgebiet als „normal“ und ohne besondere Auffälligkeiten zu charakterisieren ist. Die Mächtigkeit des Unteren Steinsalzes wird durchschnittlich mit 15 m angegeben, maximale Mächtigkeiten sind bis zu 25 m zu beobachten.

2.2.2 Strukturgeologischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet ist kleinmaßstäblich in das nördliche Schichtstufenland von Baden-Württemberg einzuordnen (Abbildung 2). Es liegt im nördlichen Teil des Neckarbeckens, im Heilbronner Becken, nach W in den Kraichgau übergehend und wird im N und E (Kocher-Jagst-Ebenen) sowie im S (Strom- und Heuchelberg) durch die Schichtstufe des Keuperberglands begrenzt.

Im Heilbronner Becken liegt die Steinsalzlagerstätte des Mittleren Muschelkalks in der tektonisch angelegten Heilbronner Mulde, einer Teilmulde am östlichen Rand der Fränkischen Mulde, in der die mesozoischen Ablagerungen in Süddeutschland ihre größte Mächtigkeit erlangten. Struktur-geologisch lässt sie sich in einen östlichen, durch Störungen stärker tektonisch zergliedert, und einen strukturärmeren westlichen Teil gliedern, in welchem der neue Deponiebereich lokalisiert ist. Der westliche Teil der Heilbronner Mulde wird von mächtigen quartären Ablagerungen auf den Gäuhochflächen überdeckt, welche das strukturarme Erscheinungsbild begünstigen.

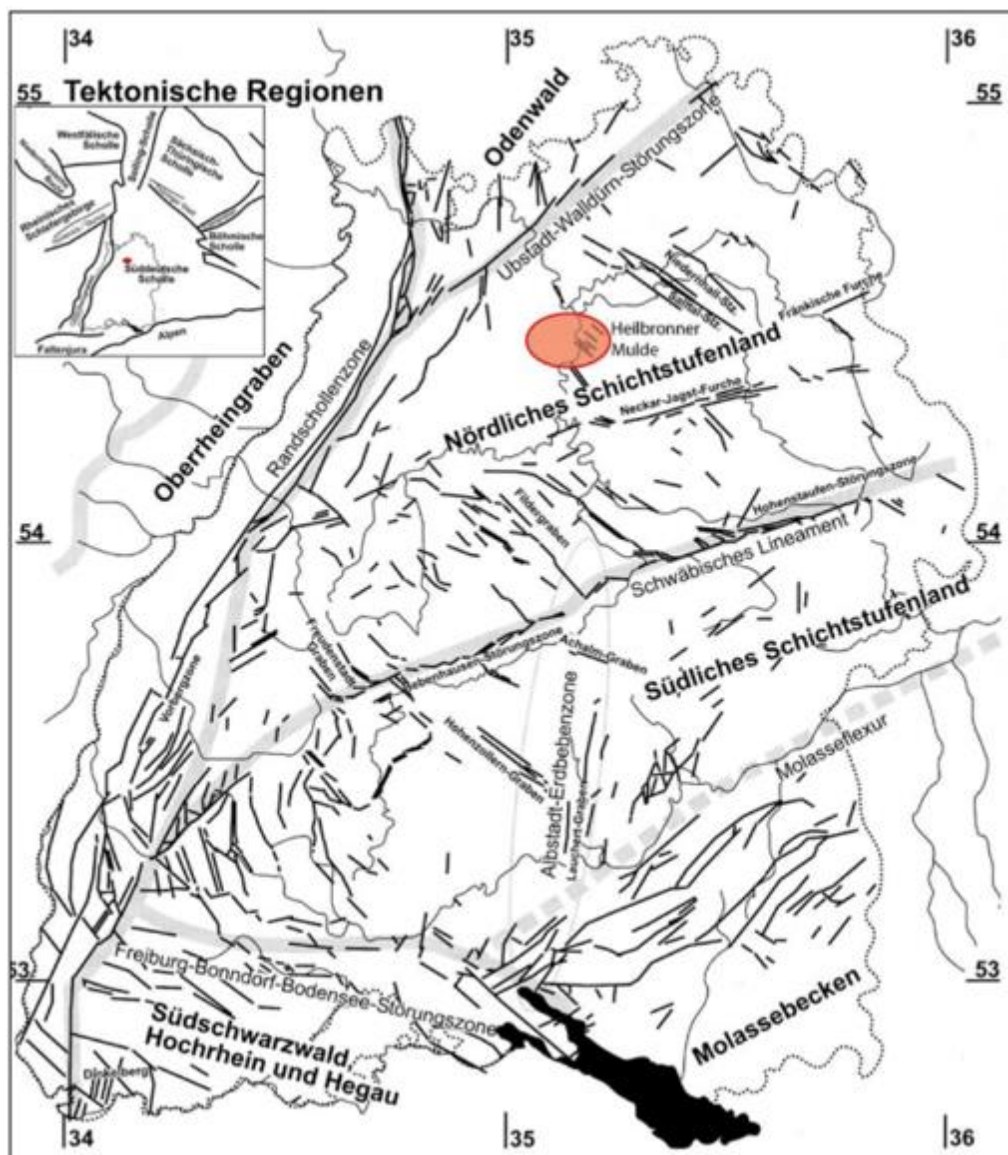


Abbildung 2: Tektonische Regionen in Baden-Württemberg und Auswahl kartierter Störungen sowie überregional wichtige Lineamente (grau unterlegt). Lage der Heilbronner Mulde (rot). Ausschnitt oben links: Süddeutsche Scholle und Lage der Heilbronner Mulde (roter Punkt) [RUPF & NITSCH (2008)]

Im Bereich der Neckartalaue und dem nach Osten anschließenden Keuperbergland treten NW-streichende Störungen mit grabenartigen Einsenkungen auf. Diese bilden im großräumigen Betrachtungsgebiet von S nach N staffelartig aneinandergereihte Störungszonen (vergleiche Abbildung 3):

- Heilbronner Störungszone,
- Neckarsulmer Störungszone sowie
- Kochendorfer Störungszone.

Die Störungen dieser Störungssysteme werden als steil stehende Riedel-Scherflächen im Deckgebirge mit Blattverschiebungskomponenten interpretiert, die über dem Steinsalzlager enden [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)]. Ihre Entstehung wird auf Bewegungen an NNE-SSW orientierten Blattverschiebungen im Basement zurückgeführt, entkoppelt durch die plastisch deformierbaren Salzgesteine des Mittleren Muschelkalks.

Während das Bergwerk Kochendorf von den Störungssystemen der Kochendorfer Störungszone überlagert wird, ist unklar, wie weit sich die Neckarsulmer Störungszone weiter nach NW fortsetzt, wenngleich die struktureologischen Verhältnisse zwischen den beiden Gruben eine solche Möglichkeit andeuten. Eine Überlagerung der Strukturen in den Störungszonen mit Vertikalbewegungen im Liegenden des Steinsalzlagers, die im Zusammenhang mit der Einsenkung der Heilbronner Mulde zu sehen sind, ist wahrscheinlich.

Die Störungszonen im Ostteil der im Mesozoikum tektonisch angelegten Heilbronner Mulde sind geologisch junge Störungssysteme, die sich seit dem Tertiär entwickelt haben. In Abhängigkeit zur Gebirgsspannung (Richtung der horizontalen Hauptspannung) in den jeweiligen geologischen Zeiträumen, entwickelten sich die Riedel-Scherflächen phasenweise zu Dehnungsstrukturen, entlang derer die Gebirgsdurchlässigkeit erhöht war, was wiederum eine temporäre Auslaugung von Teilen des Steinsalzlagers vor etwa einer Million Jahren begünstigte. Seit dieser Zeit haben im Steinsalzlager keine signifikanten Auslaugungen mehr stattgefunden (GLA 1995). Die Störungssysteme der oben genannten Störungszonen werden deshalb mit Gebieten geringerer Steinsalzmächtigkeiten, insbesondere im Grubenfeld Kochendorf in Verbindung gebracht [GLA (1992), GLA (1995), JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

Die Störungen werden als steil stehende Schrägauf- oder Schrägabschiebungen von tiefreichenden Blattverschiebungen mit einem dextralen Relativbewegungssinn interpretiert. Zwischen den Lateralbewegungen an diesen Störungen und den Strukturen und Phänomenen in den Steinsalzschichten, insbesondere den Einmuldungen des Bändersalzes und den Aufwölbungen der Unteren Sulfatschichten besteht kein kausaler Zusammenhang. Die internen Strukturen des Steinsalzlagers sind nach den Kartierbefunden nicht auf tektonische, sondern auf synsedimentäre und syndiagenetische

Prozesse sowie halokinetische Bewegungen zurückzuführen und wurden allenfalls postdiagenetisch tektonisch überprägt. Die Kartierbefunde belegen, dass die Störungen im Deckgebirge offensichtlich über dem Steinsalzlager enden und nicht durch dieses hindurchgehen.

Der nördliche Rand der Kochendorfer Störungszone markiert nordöstlich des Bergwerks Kochendorf einen Salzhang, der südliche Rand dieser Störungszone quert das Bergwerk Kochendorf in einem Bereich niedriger Steinsalzmächtigkeiten. In keinem Fall sind die Störungen dieser Störungssysteme in den noch vorhandenen Steinsalzschiechten unter Tage nachweisbar. Das Salinar kompensiert mögliche Bewegungen aufgrund seiner plastischen Deformationseigenschaften durch großräumige Schichtverbiegungen im Gesamtpaket.

Vereinzelt haben sich externe tektonische Spannungen im Liegenden des Steinsalzlagere in Form von subhorizontalen Scherbewegungen in den untersten 2 - 5 m der Steinsalzschiechten abgebaut ohne dieses vollständig zu durchdringen. Im gesamten Bergwerk Heilbronn-Kochendorf wurden bislang insgesamt vier solcher Scherzonen nachgewiesen. Über diesen subhorizontalen Scherzonen ist das Steinsalz wieder normal ausgebildet.

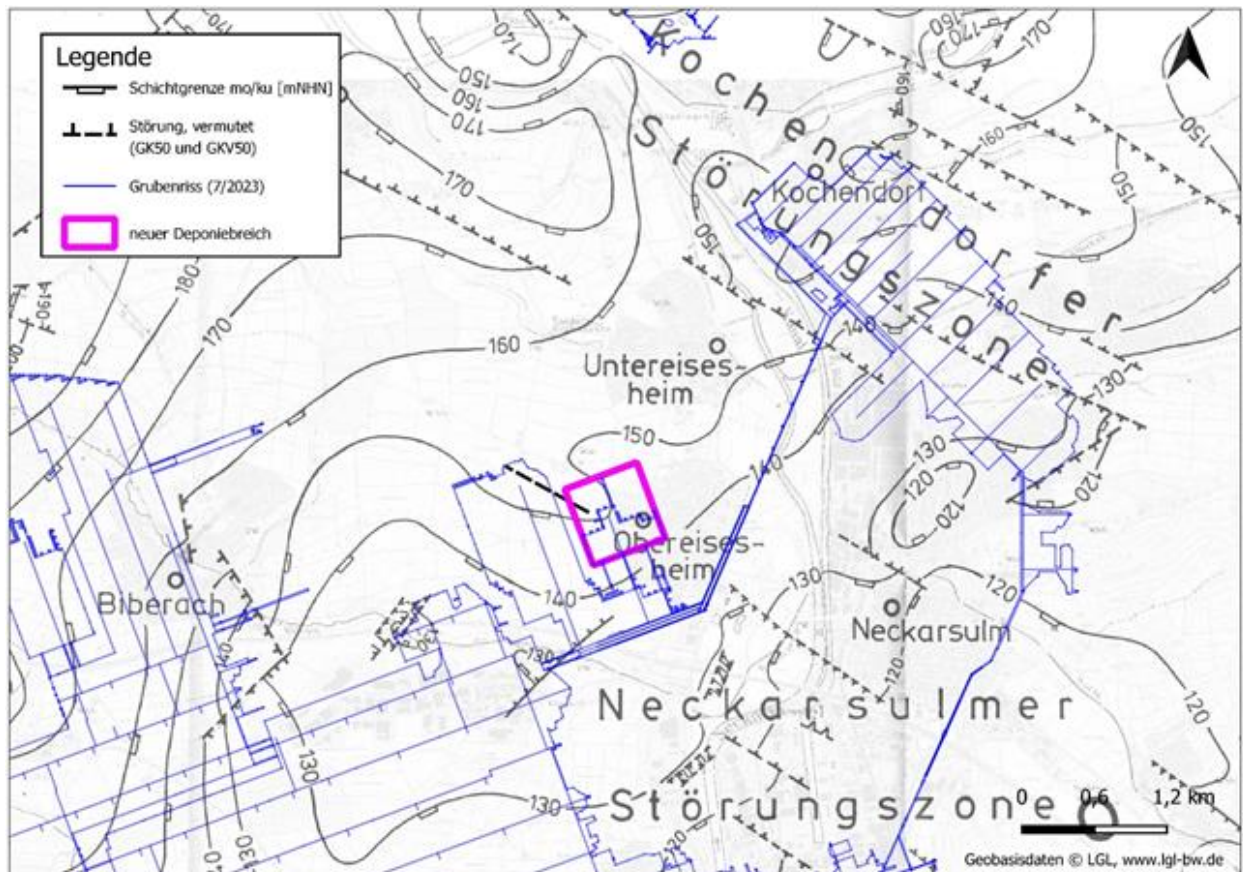


Abbildung 3: Schichtlagerungskarte der Grenzfläche Oberer Muschelkalk / Keuper mit eingezeichneten Störungszonen [nach BRUNNER & HINKELBEIN (2000) und GKV50 LGRB-Viewer Stand 06/2024 aus JONISCHKEIT (2024)]

Das Untersuchungsgebiet selbst liegt im strukturarmen westlichen Teil der Heilbronner Mulde. Das Deckgebirge ist durch Störungen kaum gegliedert, was kein alleiniger Effekt der großflächigen und mächtigen quartären Deckschichten westlich der Neckartalaue ist, sondern das Deckgebirge ist offensichtlich insgesamt weniger zergliedert und ruhiger gelagert (Abbildung 3). Nach den Kartierbefunden gibt es keine Hinweise auf tektonische Störungen innerhalb des Steinsalzlagers.

Die vorliegenden Informationen lassen für den neuen Deponiebereich eine ausreichend hohe Steinsalzmächtigkeit erwarten. Nach aktuellem Stand ist in der südlichen Sicherheitsfeste ein deutlicher Anstieg der Schichten nach Norden bis Nordosten zu erkennen, der im Streichen mit einem gleichsinnigen Anstieg im Nordfeld und in der neuen Verbindungsstrecke zusammenfällt (Abbildung 4). Ansonsten ist innerhalb des neuen Deponiebereichs ein Anstieg der Schichten nach Nordosten bzw. ein Einfallen der Schichten nach SW festzustellen, welches sich nach N abschwächt.

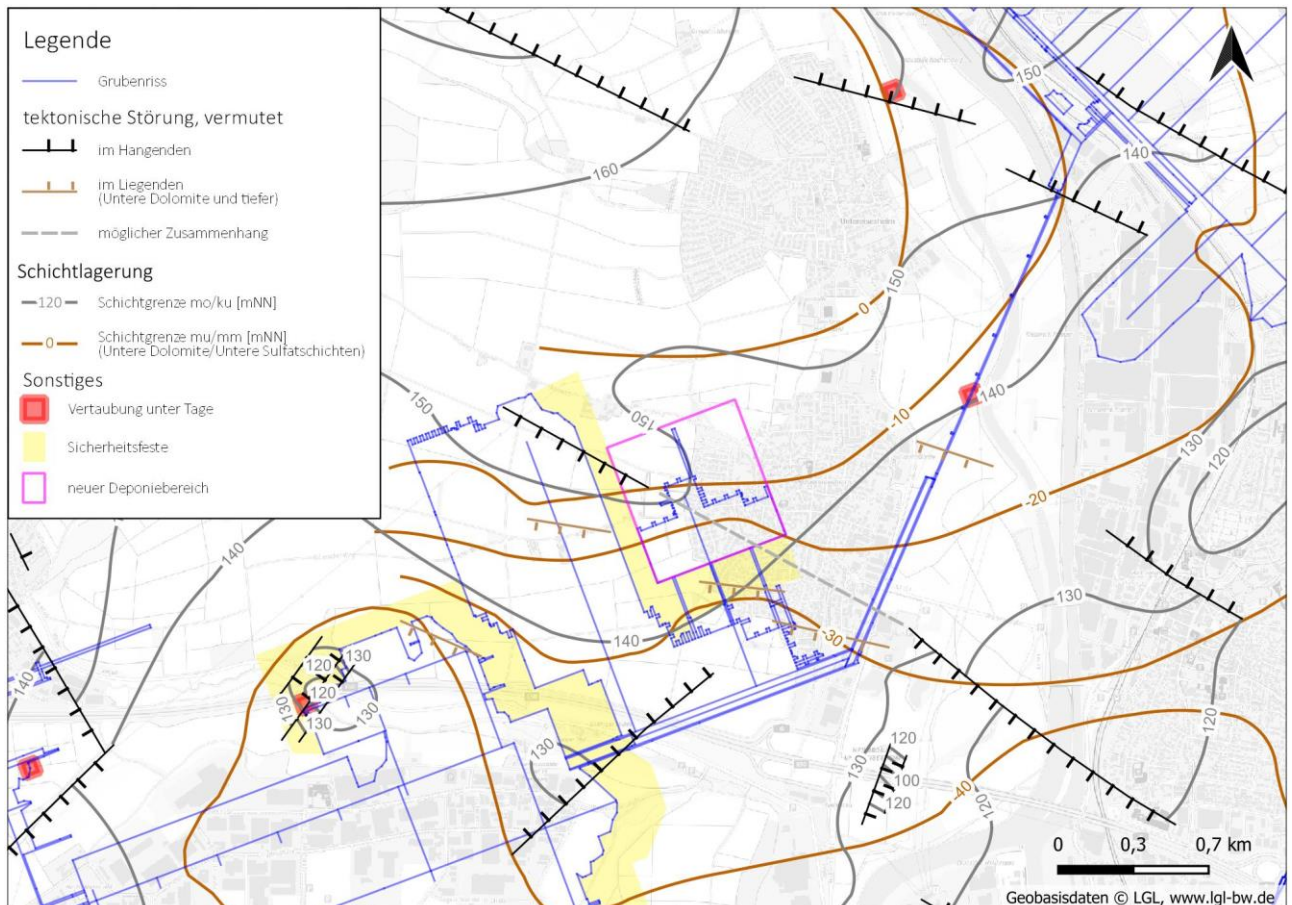


Abbildung 4: Schichtgrenzen Mittlerer Muschelkalk / Unterer Muschelkalk (mu/ mm) aus [JONISCHKEIT (2024)]

2.2.3 Geologische Barriere

Die geologische Barriere (Barriereschicht) gegen Wasserzutritte ins Steinsalz aus dem Hangenden sind im Raum Heilbronn und damit auch im Bereich des Nachweisgebietes (neuer Deponiebereich) die Oberen Sulfatschichten. In der Heilbronner Mulde bilden sie die Aquifersohle und sind nicht ausgelaugt; im Kontakt zu den Oberen Dolomiten (hangender Grundwasserleiter) sind die obersten Bereiche der Oberen Sulfatschichten teilweise angelöst und/oder vergipst. Klüfte sind durch Selbstheilungseffekte geschlossen. Hervorzuheben ist die großflächige und gleichmäßige Ausbildung der Oberen Sulfatschichten im gesamten Gebiet der Heilbronner Mulde; ihre ungestörte Schichtlagerung wird als wesentliches Kriterium für die Integrität der Barrierefunktion angesehen.

Die generelle Schichtenfolge der Oberen Sulfatschichten kann Kapitel 2.2.6 entnommen werden. Die Gesamtmächtigkeit der Oberen Sulfatschichten wird mit durchschnittlich 40 bis 50 m ausgewiesen. Größere Mächtigkeiten gehen meist mit niedrigeren Steinsalzmächtigkeiten einher und erklären sich durch die Rückstandsbildungen des teilweise ausgelaugten Steinsalzlagers. Bei diesen Prozessen handelt es sich nicht um rezente Vorgänge, sondern Abläufe, die im Zusammenhang mit der letzten Auslaugungsphase vor ca. 1 Million Jahren stehen.

Nach den vorliegenden Ergebnissen ist davon auszugehen, dass die Schichtenfolge der Oberen Sulfatschichten ungestört im Schichtverband vorliegt und damit die Barrierefunktion gewährleistet ist. Bei ungestörter Lagerung sind die Oberen Sulfatschichten als wasserundurchlässig zu bezeichnen.

Im Bereich der Bergwerke Heilbronn und Kochendorf gibt es keine Hinweise auf Subrosionserscheinungen in den Oberen Sulfatschichten, welche sie in ihrer Funktion als Barriereschicht beeinflussen könnten (vgl. Kapitel 2.2.13). Unter Einfluss von Vertikalverformungen wurde das Gesamtpaket des Salzlagers plastisch deformiert und verbogen, postdiagenetische tektonische Strukturen konnten sich unter diesen Umständen nicht entwickeln. In gleicherweise wurden die Oberen Sulfatschichten als Teil des Salinars in diese Bewegung eingeschlossen, so dass deren Integrität als Barriereschicht durch die vertikalen Bewegungen nicht beeinträchtigt wurde.

2.2.4 Aufschlussgrad der Lagerstätte

Die beiden Bergwerke Heilbronn und Kochendorf sind durch zahlreiche Berichte, Gutachten und Kartenwerke umfangreich geowissenschaftlich, lagerstättenkundlich und bergmännisch dokumentiert. Grundlage für diese Dokumente bilden umfangreiche Erkundungen durch Bohrungen (übertägig und untertägig, vgl. 2.2.5), Schachtprofile sowie untertägige Kartierungen.

Eine Auswahl an vorhandenen Berichten und Gutachten ist nachfolgend kurz zusammengestellt:

- Geologische Untersuchung der Steinsalzlagerstätte Kochendorf und ihres Umfeldes, 1992 [Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1992)];
- Geologische Untersuchung der Steinsalzlagerstätte Heilbronn, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1995);
- Jonischkeit: Fortführung der Untertagekartierung im Steinsalzbergwerk Heilbronn, [JONISCHKEIT (2001)];
- Geologisches Gutachten zur Einschätzung der geologischen Verhältnisse zwischen den Gruben Heilbronn und Kochendorf in Bezug auf die geplante Auffahrung einer Verbindungsstrecke, 2006 [JONISCHKEIT (2006)]
- Geologisches Gutachten über die Erkundungsbohrungen VB01 und VB02 für die neue Verbindungsstrecke zwischen den Gruben Heilbronn und Kochendorf. [JONISCHKEIT (2007)]
- Geologisch-hydrogeologisches Prognose-Gutachten - Bereich Sicherheitsfeste zur Grube Kochendorf - Durchörterung, Umfahrung und Steinsalzabbau, 2008 [JONISCHKEIT (2008)];
- Geologischer Bericht zum Hangendausbruch in der NW3/90S Grube Heilbronn, 2013 [JONISCHKEIT (2013a)], [JONISCHKEIT (2013b)];
- Geologischer Bericht zur Kartierung im Revier NW3/78-94, Beurteilung der geologischen Verhältnisse unter Berücksichtigung der Langzeitsicherheit der Grube Heilbronn, 2013 [JONISCHKEIT (2013c)], [JONISCHKEIT (2013d)]
- Erkundung der Hangendschichten der Oberen Anhydritregion in den Kammern 90S sowie in der Wetterstrecke auf Höhe der Kammern 88 bis 92, 2013 [SCHICHT 2013];
- Felsmechanische Stellungnahme zur zweiten Ergänzung des Rahmenbetriebsplanes für den Abbau von Steinsalz im Bergwerk Heilbronn 2000 bis 2009, 2005 [NATAU 2005];
- Fortführung der Kartierung der Steinsalzlagerstätte Heilbronn – Bergwerk 2000, 2018 [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)];
- Bericht zur geologischen Kartierung im Grubenfeld Heilbronn neuer Deponiebereich (Stand: 9/2023) [JONISCHKEIT, A. (2024)].

Kartenwerke:

- Schichtlagerungskarte für die Bändersalzbasis, Maßstab 1 : 5 000; 1995 [GLA (1995)];
- Mächtigkeitkarte für das Untere Salz, Maßstab 1 : 5 000; 1995 [GLA (1995)];
- Mächtigkeitkarte für die Steinsalzregion, Maßstab 1 : 25 000; 1992; 1995 [GLA (1992)], [GLA (1995)];

- Mächtigkeitkarte der Steinsalzschichten, digital, Maßstab 1 : 25 000; 2018 [geändert nach LGRB 2001 in JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)];

Normalprofile und Schachtprofile:

- Normalprofil des Salzlagers, 1954 [SCHACHL (1954)];
- Normalprofil des Salzlagers 1958/1973; 1986; 1997 [WILD (1958/1973), BRUNNER et al. (1986), GLA (1997)];
- Normalprofil der unter Tage aufgeschlossenen Schichten, 1995 [GLA (1995)];
- Schacht König Wilhelm II, 1992 [GLA (1992)];
- Schacht Franken, 1977 [ROGOWSKI & WERNER (1977)];
- Schacht Konradsberg, 1999 [RAUSCH & ROGOWSKI (1999)];
- Vorbohrung Schacht Kochendorf [ERCOSPLAN (2020b)];
- Vorbohrung Schacht Großgartach [ERCOSPLAN (2020c)].

Die vollständige geologische Abfolge, insbesondere die Abfolge des Steinsalzlagers, zeigen die Profile der Schächte „Heilbronn“ und „Franken“ sowie „Konradsberg“. Zur Exploration unter Tage werden allgemein sowohl horizontale als auch vertikale Bohrungen zur geologischen Erkundung des Hangenden bzw. der Restsalzmächtigkeit gestoßen. Der bisher aufgefahrene Teil des neuen Deponiebereiches wurde durch JONISCHKEIT (2024) untertägig kartiert und dokumentiert (Stand September 2023).

2.2.5 Aufschlussbohrungen über und unter Tage

Die Salzlagerstätte ist im Bereich des Nachweisgebietes sowie in dessen weiteren Umfeld durch zahlreiche Bohrungen unter und über Tage sowie durch eine Vielzahl an Aufschlüssen unter Tage erkundet [GLA (1995), JONISCHKEIT (2006)].

Im Nachweisgebiet wurden unter Tage zahlreiche Firstbohrungen zur Hangenderkundung bis in die Auslaugungsgesteine über den Steinsalzschichten getrieben. Die Firstkontrollbohrungen (kurze Firstbohrungen) zur Hangenderkundung waren mit einer Ausnahme (zeitlich begrenzter Zulauf von lagerinternen Resten von Laugenansammlungen) trocken ohne Lösungszuflüsse. Diese Bohrungen berühren die hydrologischen Barrierschichten im Hangenden nicht, so dass negative Einflüsse auf die Barrierewirksamkeit grundsätzlich ausgeschlossen werden können.

Die so genannten langen Firstbohrungen zur Erkundung der Lagermächtigkeit (alle im Grubenfeld außerhalb des neuen Deponiebereiches) wurden qualifiziert verfüllt und injiziert. Da diese

Bohrungen die hydrologische Hangendbarriere ebenfalls nicht durchstoßen, sind auch hier negative Einflüsse auf die Barrierewirksamkeit auszuschließen.

Als zusätzliche Aufschlüsse (Bohrungen) seien die Vorerkundungsbohrungen VB01 und VB02 für die neue Verbindungsstrecke [JONISCHKEIT (2007)] zwischen den Bergwerken Heilbronn und Kochendorf erwähnt. Sie liegen zwar nah am Grubenfeld Kochendorf, stimmen aber, abgesehen von den Steinsalzmächtigkeiten, sehr gut mit dem Bohrprofil der Vorbohrung für den Schacht Konradsberg überein. Im Unterschied zum Schacht Konradsberg sind das Obere Steinsalz, das Bändersalz und Teile des Unteren Steinsalzes bereits ausgelaugt. Grund dafür ist unter anderem, dass beide Profile in einem Nordwest-Südost verlaufenden Gebiet liegen, in dem die Schichten bis zu 20 m höher liegen als in der weiteren Umgebung. Trotz des teilweise ausgelaugten Steinsalzlagers dokumentieren die beiden Bohrungen, stellvertretend für alle weiteren Bohrprofile im Bereich des Bergwerks Heilbronn-Kochendorf, die gleichmäßig ausgebildete, weitestgehend eben gelagerte und im Schichtverband erhaltene Schichtfolge der triassischen Ablagerungen.

2.2.6 Stratigraphie und Stoffbestand der Schichtenfolge

Die generelle stratigrafische Abfolge (Schichtenfolge) im Bereich der Heilbronner Mulde geht aus der nachfolgenden Übersicht (Tabelle 1) hervor und wird in folgendem Text zusammenfassend erläutert. Die Beschreibung der stratigrafischen Schichtenfolge sowie des vorzufindenden Stoffbestandes erfolgt vom Liegenden (subsalinärer Untergrund) zum Hangenden (Deckgebirge), wobei der Schwerpunkt beim Steinsalzlager des Salinars liegt.

a) Subsalinärer Untergrund:

- **Unterer Muschelkalk (mu):** Als liegende stratigrafische Einheit ist im Bereich der Heilbronner Mulde der Untere Muschelkalk (mu) zu nennen. Er wird mit Mächtigkeiten zwischen 60 m und 73 m beschrieben und setzt sich aus tonigen Kalksteinen und kalkigen Tonsteinen (Wellenkalk) zusammen. Im Bereich der Grube Heilbronn ist der Untere Muschelkalk (mu) nur durch wenige Bohrungen bekannt. Generell sind nur maximal die oberen 20 m erfasst. Das Einfallen der Grenzfläche mu/mm wird mit 0,5° nach ESE bis E angegeben. Im Bereich des Nachweisgebietes ist der Untere Muschelkalk nicht aufgeschlossen.
- **Mittlerer Muschelkalk (mm):** Der Mittlere Muschelkalk (mm) beginnt im Raum Heilbronn im Liegenden mit den so genannten Orbicularisschichten, welche im Bereich des Nachweisgebietes jedoch nicht aufgeschlossen sind.
- **Orbicularisschichten (Karlstadt-Formation, mmK):** Die ca. 10 m mächtige engständige

Wechsellagerung von teils bituminösen tonigen Kalkmergelsteinen und Dolomitsteinbänkchen wird durch eine etwa 1 m mächtige Anhydritsteinbank (Geislingen-Bank) in einen tonigeren unteren und zunehmend dolomitischen oberen Teil getrennt. Der Bitumenanteil entstand durch fossile Zersetzung von organischem Material (vorw. Algen). Mit zunehmendem Dolomitgehalt gehen sie in die Gesteine der Unteren Dolomite über.

b) Salinar:

- **Untere Dolomite (Karlstadt-Formation, mmK):** Sie stellen sich als 2,5 m bis 3 m mächtige, bankige, tonig-bituminöse Dolomitgesteine dar. Die Unteren Dolomite sind im Bereich des Nachweisgebietes (neuer Deponiebereich) nicht aufgeschlossen.

Tabelle 1: Generelle stratigrafische Abfolge im Raum Heilbronn

Periode	Gruppe	Lithostratigraphie	Folge	Mächtigkeit		
Quartär (q)			Tafullungen	2 - 10 m		
			Hochterassenschotter	ca. 20 m		
Gipskeuper (kmGr)**				125 - 150 m		
Unterkreuper (ku)				22 - 30 m		
Oberer Muschelkalk (mo)				Meißner-Formation (moM)	Frankische Grenzschichten *	4,5 m
					Künzelsau-Schichten	28 m
		Trochitenkalk-Formation (moTK)	Meißner-Schichten	19 - 20 m		
			Spiniferinabank	0,3 m		
			Bauland-Schichten	10,5 m		
			Neckarwestheim-Schichten	12,3 m		
			Haßmersheim-Schichten	7,3 m		
			Zwergfauna-Schichten	6,1 m		
Mittlerer Muschelkalk (mm)	Obere Dolomite (mmD)	Diemel-Formation (mmD)		10,0 m		
	Obere Sulfatschichten (mmSUO)	Heilbronn-Formation (mmH)	Oberer Anhydrit	9,8 m		
			Oberer Tonanhydrit	12,0 m		
			Zwischenanhydrit	8,4 m		
			Zwischendolomit	2,2 m		
			Unterer Tonanhydrit	7,6 m		
	Rückstandsbildungen		0 - 7 m			
	Steinsalzschiefer (mmSSZ)		Oberes Steinsalz	8 - 14 m		
			Bandersalz	ca. 7 m		
			Unteres Steinsalz	10 - 21 m		
Untere Sulfatschichten (mSUU)	Dolomit-Anhydritstein		bis 3 m			
	Grundanhydrit	1 - 2,5 m				
Untere Dolomite Orbicularis-schichten	Karlstadt-Formation (mmK)		2,5 - 3 m			
			ca. 10 m			
Unterer Muschelkalk (mu)				60 - 73 m		

* nur im N von SW-Deutschland (nördlich der Linie Backnang - Schwäbisch Hall).

** im Nachweisgebiet ist der Gipskeuper nur noch in Resten vorhanden und vollständig ausgelagert.

Wie bereits erwähnt, bilden die Unteren Sulfatschichten (Grundanhydrit und Dolomit-Anhydritstein) die Basis des Steinsalzlagers in der Heilbronner Mulde:

- **Grundanhydrit (Untere Sulfatschichten, mmSUU):** Der Grundanhydrit beschreibt sich als etwa 1 m bis 2,5 m mächtiger Anhydritstein. In den oberen Bereichen ist er dicht bis feinkristallin mit eingeschalteten teils tonigen Dolomitsteinlagen; im unteren Teil schalten sich im Übergangsbereich zum Liegenden teils bituminöse und tonige Dolomitsteinbänkchen ein.
- **Dolomit-Anhydritstein (Untere Sulfatschichten, mmSUU):** Der teils bituminöse und tonige Dolomit-Anhydritstein kann durch syndiagenetische Prozesse in den bis zu 6 m hohen Anhydritkuppen (lokale Aufwölbungen der Unteren Sulfatschichten) mehr als 3 m betragen. Er liegt auf dem Grundanhydrit und ist im Bereich der Heilbronner Mulde nicht flächendeckend sedimentiert. Zusammen mit dem Grundanhydrit bildet er die Unteren Sulfatschichten, welche die Basis des Steinsalzlagers darstellen.

Das Steinsalzlager wird in der Heilbronner Mulde von den Steinsalzschiefern gebildet, deren stratigraphische Abfolge dreigliedrig ist in ein Unteres Steinsalz, Bändersalz und Oberes Steinsalz. Der Steinsalzabbau konzentriert sich vorwiegend auf das Untere Steinsalz, weshalb besonders gute Aufschlussverhältnisse zwischen dem Top des Grundanhydrits und den basalen Bereichen des Bändersalzes vorhanden sind.

- **Steinsalzschiefern (mmSSZ):**

Unteres Steinsalz: Die Gesteinsbeschaffenheit und die Ausbildung des Unteren Steinsalzes ist im gesamten Untersuchungsgebiet als „normal“ zu bezeichnen. Bereits SCHACHL (1954) beschrieb für das Untere Steinsalz eine syndiagenetische bis syndiagenetische Entstehung. Demnach wurde es durch Migration von Lösungen größtenteils wieder aufgelöst und dabei die ursprüngliche Schichtung bis auf einzelne Relikte zerstört. Durch Rekristallisation und Einregelung dunkler anhydritischer und dolomitischer Gemengteile entlang bevorzugter Entwässerungsbahnen entstand ein grobspätiges Steinsalz mit einer charakteristischen Vertikalen Streifung. Im Querschnitt erscheint es als Wabenmuster (Polygone), welches unmittelbar unter der Bändersalzbasis am deutlichsten und gleichmäßigsten ausgeprägt ist. Im oberen Abschnitt des Unteren Steinsalzes schalten sich, die für diesen Profilabschnitt typischen **Anhydritsporaden** ein. Sie sind im Untersuchungsgebiet in Form der Anhydritsporadenzone zwar flächig, aber nicht flächendeckend verbreitet. Das Untere Steinsalz ist durchschnittlich 15 m und maximal bis zu 21 m (GLA 1995) mächtig.

Bändersalz: Über dem Unteren Steinsalz folgt diskordant, mit scharfer Grenze das geschichtete Bändersalz. Dabei handelt es sich um eine durchschnittlich 7-9 m

mächtige Wechsellagerung aus grobkörnigem Steinsalzlagen und teils dolomitischen Anhydritlagen. Im Gebiet der Heilbronner Mulde wird das Bändersalz durch zwei mächtigere Anhydritbänke (Ah1 (früher Unt. Zwischenanhydrit) und Ah2 (früher Ob. Zwischenanhydrit)) in ein Bändersalz 1 (früher Unt. Bändersalz), Bändersalz 2 (früher Mittleres Bändersalz) und Bändersalz 3 (früher Ob. Bändersalz) gegliedert. Die Schichtung und Schichtfolge des Bändersalzes ist großflächig sehr gleichmäßig ausgebildet und nur geringen Mächtigkeitsschwankungen unterworfen. Die Anhydritbank 1 hat für den süddeutschen Raum den Charakter eines Leithorizontes.

Oberes Steinsalz: Das Obere Steinsalz wird mit Mächtigkeiten zwischen 8 m und 14 m beschrieben. Das Obere Steinsalz gliedert sich in eine basale Zone mit zahlreichen dunklen Sporaden (durchschnittlich 2,5 m mächtig) und einen Bereich bestehend aus grobkristallinem Steinsalz mit deutlicher vertikaler Streifung (ca. 10 m mächtig). In Beschaffenheit und Ausbildung ist das Obere Steinsalz mit dem Unteren Steinsalz vergleichbar.

Zwischen der Oberfläche des Steinsalzlagers (Salzspiegel) und den Oberen Sulfatschichten schalten sich in Gebieten mit reduzierten Steinsalzmächtigkeiten Auslaugungsrückstände des Steinsalzlagers ein. Die im Schichtverband vorliegenden Auslaugungsgesteine (v.a. Auslaugungsschluffe und -tone im Wechsel mit Anhydritsteinlagen) sind vereinzelt mit Fasergipslagen durchzogen. In den Anhydritlagen können Gipsbildungen auftreten. Obwohl sie ursprünglich im Zuge der Steinsalzsedimentation abgelagert worden sind, werden die Auslaugungsgesteine lithostratigrafisch zu den Oberen Sulfatschichten gestellt.

▪ **Oberer Sulfatschichten (mmSUO):**

Die Oberen Sulfatschichten sind die Barrierschichten (Abbildung 8) und bilden das Hangende des Steinsalzlagers und setzen sich wie folgt zusammen (liegend zu hangend):

- Auslaugungsgesteine des Steinsalzlagers
- Unterer Tonanhydrit (Tonstein, Anhydritstein)
- Zwischendolomit (Dolomitstein)
- Zwischenanhydrit (Anhydritstein)
- Oberer Tonanhydrit (Tonstein, Anhydritstein)
- Oberer Anhydrit (Anhydritstein)

Von den Oberen Sulfatschichten sind im Untersuchungsgebiet nur Auslaugungsgesteine des Steinsalzlagers aufgeschlossen. Die Gesamtmächtigkeit der Oberen Sulfatschichten wird mit 40 m bis 50 m ausgewiesen.

Der Mittlere Muschelkalk (mm) schließt am Top der Oberen Sulfatschichten (mmSUO) mit den Oberen Dolomiten (mmD) ab, mit denen der saline Großzyklus endet. Sie bestehen aus einer Folge von unterschiedlich starken Dolomitsteinbänken mit Einschaltungen aus tonigen Dolomitsteinen, dolomitischen Mergelsteinen, Kalkmergelsteinen und Tonsteinen. Im Unteren Teil sind die Oberen Dolomite häufig stark zerklüftet und verkarstet [GLA (1992)].

Die Oberen Sulfatschichten und Oberen Dolomite des Mittleren Muschelkalks sind Teil des Deckgebirges über dem Steinsalzlager.

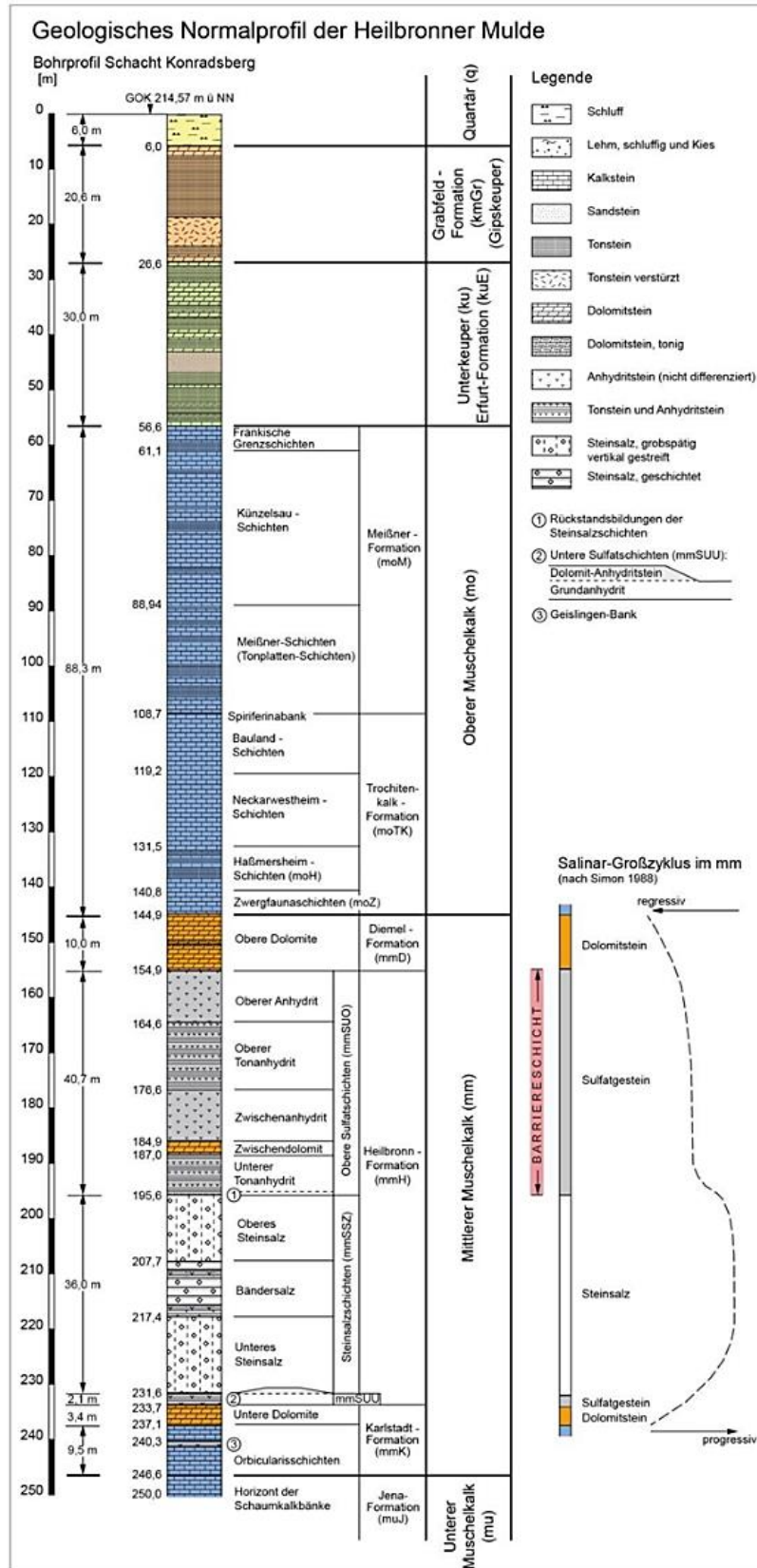


Abbildung 5: Geologisches Normalprofil der Heilbronner Mulde. In der Skizze des Salinar-Großzyklus ist die Barrierschicht (Obere Sulfatschichten) rot markiert.

c) Deckgebirge über dem Salinar

Das Deckgebirge über dem Salinar wird aus Gesteinen des Oberen Muschelkalks (mo), des Unterkeupers (ku) und Gipskeupers (kmGr) sowie aus quartären (q) Ablagerungen aufgebaut.

2.2.7 Stoffbestand der Steinsalzlagerstätte

Die Steinsalzschichten sind Teil der Heilbronn-Formation (mmH) und umfassen die Schichtglieder vom **Unteren Steinsalz** (mmUSZ) über das **Bändersalz** (mmBSZ) bis zum **Oberen Steinsalz** (mmOSZ). Lokal sind im Bereich des Bergwerkes Heilbronn auch Rückstandsbildungen dieser Schichtglieder aufgeschlossen, im neuen Deponiebereich sind aktuell keine Auslaugungsrückstände zu beobachten.

Die Schichtenfolge des Bändersalzes im Bereich der Heilbronner Mulde lässt sich (vom Liegenden zum Hangenden) wie folgt gliedern:

- Bändersalz 1 (mmBSZ1),
- Anhydritbank 1 (mmAh1),
- Bändersalz 2 (mmBSZ2),
- Anhydritbank 2 (mmAh2).

Das Bändersalz 3 (mmBSZ3) ist aus früheren Kartierungen bekannt [bspw. GLA (1997)], wird im neuen Deponiebereich nicht aufgeschlossen. Im Schachtprofil Schacht Konradsberg (verbaut) wurde es mit 1,75 m Mächtigkeit nachgewiesen [Rausch & Rogowski (1999)]. Es wird nach aktuellem Kenntnisstand als Rest des ehemals geschichteten Oberen Steinsalzes interpretiert.

a) Unteres Steinsalz: Das Untere Steinsalz (USZ) ist durchschnittlich 15 m mächtig. In der Regel werden davon 10 - 12 m gewonnen, jedoch im Bereich des Nachweisgebietes lediglich etwa 5 m. Die Schichtung des Unteren Steinsalzes wurde vor der Ablagerung des Bändersalzes durch hydrogeologische Prozesse zerstört. Die zuvor bei der schichtigen Ablagerung angelegten polygonalen Strukturen und Muster (z. B. Trockenrisse) wurden später vermutlich als vertikale Entwässerungsbahnen genutzt und durch die Ausfällung und Ablagerung dunkler Gemengteile akzentuiert, was unter anderem dem Unteren Steinsalz heute seine typisierende vertikale Streifung verleiht. Durch Sammelkristallisation rekristallisierte das ursprünglich fein- bis grobkörnige zu einem grobspätigen Steinsalz. Die wachsenden Steinsalzkristalle erreichten Kantenlängen von mehreren Zentimetern und schoben bei diesem Prozess die dunklen dolomitischen, tonigen und sulfatischen Gemengteile vor sich her. Diese reicherten sich zwischen den Kristallflächen und in den Zwickeln an und verleihen dem Unteren Steinsalz seine graubraune Farbe. Das Untere Steinsalz ist sporadisch von Resten

sulfatischer Ablagerungen durchsetzt, vereinzelt ist eine reliktsche Schichtung erkennbar. Lokal führten die im Steinsalz eingeschlossenen Restlaugen zur Bildung reiner Klarsalze. Dabei sind die dunklen Gemengteile abgesunken und sammelten sich als „Bodensatz“ in Form einer sulfatischen Lage vom Charakter einer dunklen Sporade [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

- **Vertikale Streifung:** Die Vertikale Streifung ist die markanteste, das Untere Steinsalz typisierende Struktur und entspricht einem Längsschnitt (Stoß-Fläche) durch aneinandergereihte Steinsalzpalisaden. Im Querschnitt (First-Fläche) reihen sich die Palisaden zu wabenartigen Mustern aneinander, die in erster Linie an Trockenrisse erinnern. Unter normalen Verhältnissen steht die Vertikale Streifung senkrecht. Für deutlich detailliertere Ausführungen zur Vertikalen Streifung sei auf den Bericht von [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)] verwiesen.
- **Reliktische Schichtung:** Das Untere Steinsalz wurde primär horizontal geschichtet als Bändersalz abgelagert. Davon zeugen Reste einer ehemaligen Schichtung in Relikt-schollen und reliktsch geschichteten Steinsalzpalisaden. In den geschichteten Partien ist das Untere Steinsalz oft grobkörnig und nur wenig rekristallisiert. Die reliktsche Schichtung ist an einem Wechsel von hellen dicken grobkörnigen Steinsalzlagen mit dunklen dünnen Steinsalzlagen mit einem deutlich höheren sulfatischen Anteil, erkennbar [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].
- **Dunkle Sporaden:** Der Begriff dunkle Sporade umfasst ungeschichtete und geschichtete, syngedimentäre sulfatische Einlagerungen im Unteren Steinsalz mit einem wechselnd hohen Anteil an Tonstein, Dolomitstein und Siltstein. Sie treten nur sporadisch auf und sind in der Regel von dunkelgrauer bis schwarzgrauer Farbe. Höhere dolomitische Anteile führen zu einer meist bräunlichen oder grünlichbraunen Farbkomponente. Dunkle Sporaden sind häufig im basalen Teil und der unteren Hälfte des Unteren Steinsalzes anzutreffen. Dabei handelt es sich um Überbleibsel ehemaliger kleinflächiger Ton-, Dolomitstein- und/oder Sulfatgesteinslagen oder Mulden und Spaltenfüllungen im ehemals gebänderten Unteren Steinsalz. Sie sind häufig feingeschichtet und können lagig, keilartig, säulig oder massig ausgebildet sein [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].
- **Mittlerer Anhydrit:** Als Mittlerer Anhydrit wird im Steinsalzlager des Mittleren Muschelkalks eine Anhydritlage aus knauerigen Anhydritkonkretionen bezeichnet, die hauptsächlich im Steinsalzlager am Oberen Neckar (Typuslokalität für den Mittleren Anhydrit) das Untere Steinsalz in ein Oberes und Unteres Zwickelsalz unterteilt. Im Bereich der neuen Deponie schaltet sich, wie auch im Bereich des BW2000 bzw. des

westlich an den Deponiebereich angrenzenden Nordfeldes zu beobachten, im basalen Teil des Unteren Steinsalzes sporadisch eine subhorizontal verlaufende knauerige, knollige Anhydritlage ein, die sowohl in Ausbildung und Gesteinsbeschaffenheit als auch in der Position im Schichtprofil dem beschriebenen Mittleren Anhydrit entspricht.

- **Klarsalz:** Klarsalze sind, wie der Name es sagt, klare Dezimeter- bis Kubikmeter große Steinsalzvorkommen aus reinem NaCl. Sie entstanden durch langsame Ausfällung und Kristallisation des NaCl aus gesättigten Restlaugen, die sich als Laugenblasen angesammelt hatten. Die reinen NaCl-Kristalle erreichen Kantenlängen von zum Teil über 10 cm. Bei diesem Prozess wurde das Steinsalz gereinigt. Die dunklen Gemengteile sanken in der Laugenblase ab und bildeten eine basale anhydritische Lage vom Charakter einer lagigen oder netzartigen Sporade [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)]. Im Bereich der neuen Deponie sind Klarsalze unter normalen Lagerungsverhältnissen ohne besondere Auffälligkeiten zu beobachten. Hinweise auf Vorzugsrichtungen sind nicht erkennbar. In Gebieten mit Bändersalzmulden treten Klarsalze in den Hintergrund.
 - **Anhydritsporadenzone:** Im oberen Unteren Steinsalz treten charakteristische anhydritische Sporaden auf, die sich aus überwiegend knauerigen und knolligen Anhydritkonkretionen zusammensetzen und deshalb als Anhydritsporaden bezeichnet werden. Die Anhydritsporadenzone ist zwar nicht flächendeckend, aber trotzdem großflächig verbreitet und verläuft in der Regel äquidistant parallel zur Basis des Bändersalzes. Sie wird deshalb beim Steinsalzabbau als Orientierungshilfe zur Abschätzung des Abstandes (ca. 2 - 3 m) zur Bändersalzbasis herangezogen.
- b) Bändersalz:** Das Bändersalz (BSZ) liegt diskordant auf dem Unteren Steinsalz und teilt die Steinsalzsichten in ein Unteres und ein Oberes Steinsalz. Das Bändersalz charakterisiert sich als eine gleichmäßig ausgebildete bis zu 11 m mächtige Wechsellagerung aus reinem, mittel- bis grobkörnigem Steinsalz, anhydritisch verunreinigtem Steinsalz und tonigen und dolomitischen Anhydritlagen und -bänken. Es entspricht weitestgehend einer primären Salzablagerung und unterscheidet sich damit deutlich vom grobspätigen Unteren und Oberen Steinsalz. Eine ca. 0,4 m mächtige Anhydritbank 1 (Ah1) im unteren Teil und eine ca. 0,8 m mächtige Anhydritbank 2 (Ah2) im oberen Teil fungieren als Leithorizonte von überregionaler Bedeutung und gliedern das Bändersalz in ein Bändersalz 1, ein Bändersalz 2 und Bändersalz 3. Im Untersuchungsgebiet wurden Teile des Bändersalz am Ende der Kammer Kammer 1E zwischen Ort E und F aufgeschlossen.
- **Bändersalz 1:** 1,4 m bis 2,2 m mächtig. Wechselfolge aus schichtig abgelagertem Steinsalz mit dünnen Anhydritlagen. Im unteren Abschnitt des Bändersalzes 1 (BSZ1) treten meist drei sehr reine Steinsalzlagen im Wechsel mit anhydritischen Steinsalzlagen auf.

Im oberen Profilabschnitt treten ebenfalls dünne Steinsalzlagen im Wechsel mit Anhydritlagen auf.

- **Anhydritbank 1:** Die Anhydritbank 1 (Ah1) ist eine 0,3 bis 0,6 m mächtige, feingeschichtete, tonig-dolomitische Sulfatgesteinsbank mit Einschaltungen von Steinsalzlagen bzw. -linsen. Sie liegt im Normalprofil weitestgehend konkordant im Schichtverband auf dem Bändersalz 1 und ist flächendeckend verbreitet. Unter normalen Lagerungsverhältnissen wird die Bank von einem charakteristischen polygonalen Kluftsystem durchzogen. Der Durchmesser einzelner Polygone beträgt 2-3 m. Die Klüfte sind mit rötlichem Fasersalz verheilt, ihre Öffnungsweiten können mehrere Zentimeter betragen [JONISCHKEIT & ZWIEBLER (2018)].
- **Bändersalz 2:** Das Bändersalz 2 (BSZ2) ist im Grubenfeld des Bergwerkes Heilbronn eher selten aufgeschlossen. Aufschlüsse beschränken sich auf tief ins Untere Steinsalz eingesunkene Bändersalzmulden, Pilz-Napf-Strukturen, lokale Hochbrüche und Streckenabschnitte, die das Bändersalzprofil durchfahren haben [JONISCHKEIT & ZWIEBLER (2018)]. Über der Anhydritbank 1 setzt das Bändersalz 2 mit einer gleichmäßigen 1,5 bis 2 m mächtigen Wechsellagerung von sehr reinem Steinsalz-, anhydritischem Steinsalz- und dünnen Anhydritlagen ein. Der mittlere Abschnitt des Bändersalzes 2 ist durch eine ungleichmäßig ausgebildete Zone mit grobspätigem Steinsalz inklusive Vertikaler Streifung gekennzeichnet. Nach oben ist diese Zone durch eine 2 bis 4 cm mächtige, teils zweigeteilte Anhydritlage scharf begrenzt. Die Zone mit ungeschichtetem grobspätigem Steinsalz hebt sich durch ihre dunkelbraunen bis dunkelrötlichbraunen Farbtöne deutlich von den hellgrauen bis weißlichen geschichteten Bändersalzlagen ab. Das obere Drittel des Bändersalzes 2 ist normal geschichtet. Nach oben schalten sich bis zu 8 zunehmend dickere Anhydritlagen ein, die einen Umschlag von einer Steinsalz- in eine Sulfatsedimentation ankündigen, welche schließlich in den Ablagerungen der Anhydritbank 2 kulminieren.
- **Anhydritbank 2:** Die Anhydritbank 2 (Ah2) ist im Nachweisgebiet nicht aufgeschlossen, im südlichen Nachweisgebiet, mit Blick auf die dortigen Steinsalzmächtigkeiten, mit hoher Wahrscheinlichkeit vorhanden. Die feinschichtige Wechselfolge aus dolomitischen und tonigen Sulfatgesteinslagen unterscheidet sich von der Anhydritbank 1 durch einen höheren Dolomitanteil im unteren Teil und Tepee-Strukturen im oberen Teil des Profils. Selten sind mit Fasersalz verheilte Klüfte anzutreffen. Ein polygonales, mit Fasersalz verheiltes Kluftmuster, wie in der Ah1, wurden in der Ah2 nicht beobachtet. Typisch für die Ah2 sind Polygonmuster in den basalen Lagen, die an Trockenrisse erinnern. Der Durchmesser einzelner Polygone beträgt zwischen 50 cm und 100 cm.

Tabelle 2: Stratigrafische Abfolge der im Nachweisgebiet aufgeschlossenen Schichten.
Basierend auf: [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

Periode	Gruppe	Litho- stratigraphie	Folge	Mächtigkeit	Beschaffenheit
Mittlerer Muschelkalk (mm)	Obere Sulfat- schichten (mmSUO)	Heilbronn-Formation (mmH)	Rückstands- bildungen	0 - 7 m	<ul style="list-style-type: none"> Auslaugungsschluffe, Anhydritstein, Fasergipslagen <p>Rückstandbildungen der Steinsalzschiechten (Salzspiegel)</p>
	Steinsalz- schichten (mmSSZ)		Oberes Steinsalz	8 – 14 m	<ul style="list-style-type: none"> grobspätiges Steinsalz mit deutl. Vertikaler Streifung basale Sporadenzone (dolomitisch, tonige und sulfatische Einlagerungen)
			Bändersalz	ca. 7 m	<p>Bändersalz 1</p> <p>Anhydritbank 1 mittel- bis grobkörniges Steinsalz mit dolomit. Anhydritlagen</p> <p>Bändersalz 2</p> <p>Anhydritbank 2</p>
			Unteres Steinsalz	10 – 21 m	<ul style="list-style-type: none"> grobspätiges Steinsalz mit anhydr. + dolomit. Anteilen <p><u>Besonderheiten:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Vertikale Streifung Reliktische Schichtung Dunkle Sporaden Mittlerer Anhydrit Klarsalz Anhydritsporaden (Sporadenzone)
	Untere Sulfat- schichten (mSUU)		Dolomit- Anhydritstein	bis 3 m	toniger Dolomit und Anhydritstein
			Grundanhydrit	1 – 2,5 m	<ul style="list-style-type: none"> Anhydritstein dicht-feinkristallin, bituminöse Ton- und Dolomitsteinlagen

c) Oberes Steinsalz: Das Obere Steinsalz (OSZ) ist ein grobspätiges Steinsalz mit vertikaler Streifung. Besonders im basalen Bereich des Oberen Steinsalzes treten dolomitische, tonige und sulfatische Einlagerungen auf, die lokal gesteinsbildend sein können. [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)] beschreiben aus früheren Kartierberichten, dass Fragmente von rötlichen und grünlichen, feingeschichteten Tonsteinlagen auffallen, bei denen es sich vermutlich um Reste von Muldenfüllungen handelt. Im Nachweisgebiet des neuen Deponiebereiches ist das Obere Steinsalz nicht aufgeschlossen. Mit Abnahme der Gesamtmächtigkeit der Steinsalzschiechten nach N und NE wird das Obere Steinsalz zunehmend ausgelaugt sein.

d) Auslaugungsgesteine der Steinsalzschiechten: Die Auslaugungsgesteine bestehen aus Lösungsrelikten der Steinsalzschiechten. Die Grenzfläche zwischen der Oberfläche der Steinsalzschiechten und den Auslaugungsgesteinen ist eine Lösungsdiskordanz und wird als Salzspiegel bezeichnet. Dieser greift lokal unterschiedlich tief und steil ins restliche Steinsalzlager ein. Im Hangenden des Salzspiegels ist kein Steinsalz mehr vorhanden.

2.2.8 Lagerungsverhältnisse

Bei der Betrachtung der Lagerungsverhältnisse muss unterschieden werden zwischen der Lagerung des gesamten Steinsalzlagers im Schichtverband des Mittleren Muschelkalks und den internen Lagerungsverhältnissen innerhalb der Steinsalzschieften, die im Wesentlichen durch die Einmuldungen des Bändersalzes und Aufwölbungen der Unteren Sulfatschichten bestimmt wird.

In Bezug auf die Lagerungsverhältnisse des gesamten Steinsalzlagers lässt sich Folgendes sagen: Die Schichten im Bereich des Bergwerks Heilbronn fallen generell mit $0,2^\circ$ bis maximal $1,7^\circ$ nach Südosten (SE) ein. Die Schichtlagerung im neuen Deponiebereich folgt damit dem generellen Schichteinfallen in der Heilbronner Mulde im Gebiet des Bergwerks Heilbronn-Kochendorf. Insgesamt ist das Steinsalzlager eben und ruhig gelagert, was sich u.a. in den großen Steinsalzmächtigkeiten widerspiegelt und im Nivellement der Fördersohle, die ungefähr äquidistant zur Basis des Steinsalzlagers verläuft. Markante Anstiege bzw. Gefälle im Nivellement dokumentieren vertikale Bewegungen im Liegenden, die zu einer flexurartigen Verbiegung des Steinsalzlagers geführt haben, ohne die internen Strukturen zu zerstören und ohne Auswirkungen auf die Steinsalzmächtigkeit. Steinsalzmächtigkeitsschwankungen sind fast ausschließlich auf Subrosionsvorgänge zurückzuführen, welche in geologischer Vorzeit (vor etwa 1 Million Jahren) stattgefunden haben. Je stärker das Steinsalz ausgelaugt ist, desto unebener verläuft die Oberfläche des Steinsalzlagers. Die Unebenheiten werden größtenteils durch die ebenfalls im Schichtverband vorliegenden Auslaugungsrückstände ausgeglichen.

Es gibt innerhalb des Steinsalzlagers Vertaubungszonen, in denen das Steinsalzlager in erdgeschichtlichen Zeiträumen vor ca. 1 Mio. Jahren, lokal vollständig ausgelaugt wurde. Im Radius von ca. 300 m kann die Steinsalzmächtigkeit von über 20 m auf 0 m abnehmen [JONISCHKEIT & ZWIEBLER (2018)]. Die im Schichtverband vorliegenden Auslaugungsgesteine weisen auf sehr langsame Auslaugungsprozesse hin. Da auch im Bereich der Vertaubungszonen die Barrierschicht intakt ist, wird angenommen, dass die darüber liegenden Oberen Sulfatschichten plastisch deformiert (verbogen) wurden und mögliche Klüftungen durch Mineralneubildungen verheilten. Für diese Annahme spricht die Beobachtung, dass die Vertaubungszonen trocken sind und lediglich in den Auslaugungsgesteinen Restlaugen angetroffen wurden. In keinem Fall wurden Zuflüsse aus dem Hangenden festgestellt. Im Nachweisgebiet gibt es keine Vertaubungszone.

Sämtliche Kenntnisse über die Lagerungsverhältnisse innerhalb der Steinsalzschieften im Grubenfeld Heilbronn und somit auch im Nachweisgebiet, basieren auf den Ergebnissen der Kartierungen unter Tage.

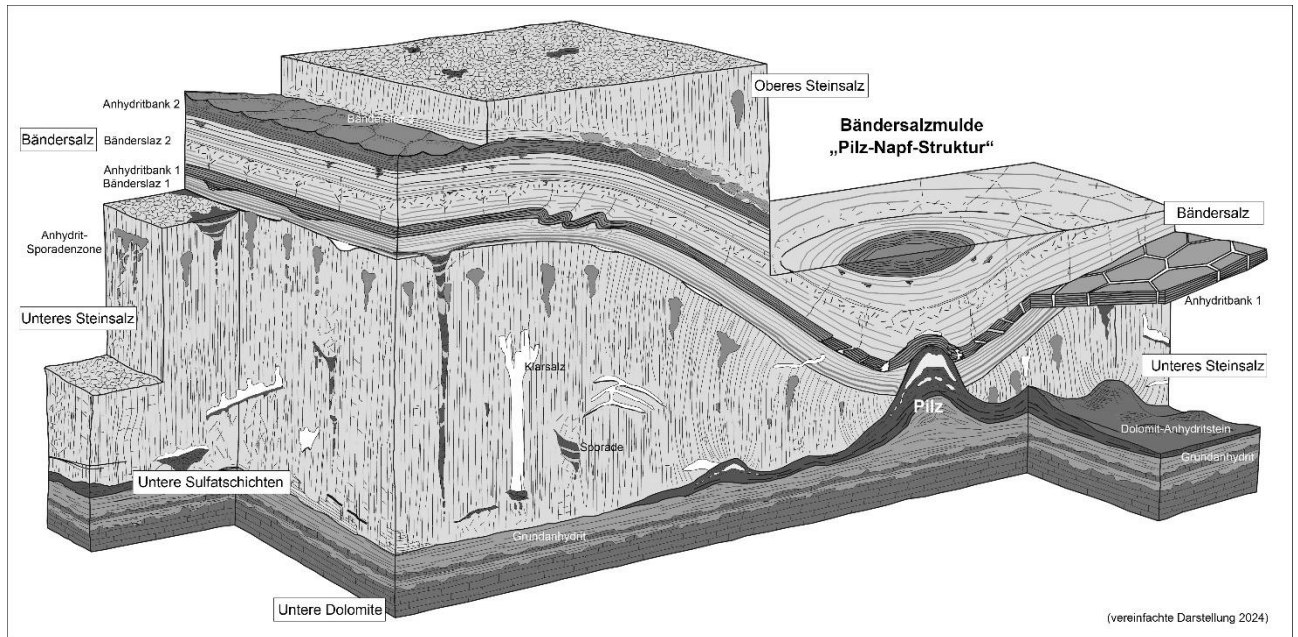


Abbildung 6: Übersicht der Strukturen und Phänomene in den Steinsalzschiefern des Mittleren Muschelkalks in der Grube Heilbronn aus: [JONISCHKEIT (2024)]

Die Lagerungsverhältnisse innerhalb des Steinsalzlagers werden durch Strukturen und Phänomene geprägt, die auf synsedimentäre und syndiagenetische sowie halokinetische (nicht im Sinne von Diapirismus) Prozesse zurückzuführen sind, in denen vertikale Bewegungen (gravitativ, kapillar) dominieren. Folglich waren die internen Lagerungsverhältnisse bei der Entwässerung und Verfestigung weitestgehend abgeschlossen. Danach wurde das Strukturinventar allenfalls vereinzelt tektonisch überprägt aber nicht zerstört. Aufgrund der Dreiteilung der Steinsalzschiefern in ein Unteres Steinsalz, Bändersalz und Oberes Steinsalz werden die Lagerungsverhältnisse in der Regel durch Einmudungen des geschichteten Bändersalzes (Bändersalzmulde, Näpfe) und Aufwölbungen der Unteren Sulfatschichten (Anhydritkuppe, Pilze (Abbildung 7) bestimmt. Näpfe und Pilze treten in der Regel gemeinsam in Erscheinung, was auf einen kausalen Zusammenhang schließen lässt. Die Einmudungen und Aufwölbungen entwickelten sich bereits während der Sedimentation. Im Zuge der Entwässerung der Liegendschichten und des Steinsalzlagers dauerten diese Prozesse bis zum Abschluss der Diagenese an. Im Extremfall treffen Bändersalzmulde und Anhydritkuppe aufeinander und bilden eine so genannte Pilz-Napf-Struktur (Abbildung 6), in der das Untere Steinsalz und Teile des Bändersalzes vollständig fehlen. Sie stellen die markantesten Lagerungsstörungen innerhalb der Steinsalzschiefern dar. Eine lange Firsterkundungsbohrung im Bereich einer Bändersalzmulde und einem Gebiet großer Steinsalzmächtigkeit haben gezeigt, dass die Reduktion des Unteren Steinsalzes durch die Einmudungen des Bändersalzes während der Sedimentationsphase durch Ablagerungen des Oberen Steinsalzes offensichtlich kompensiert wurde.

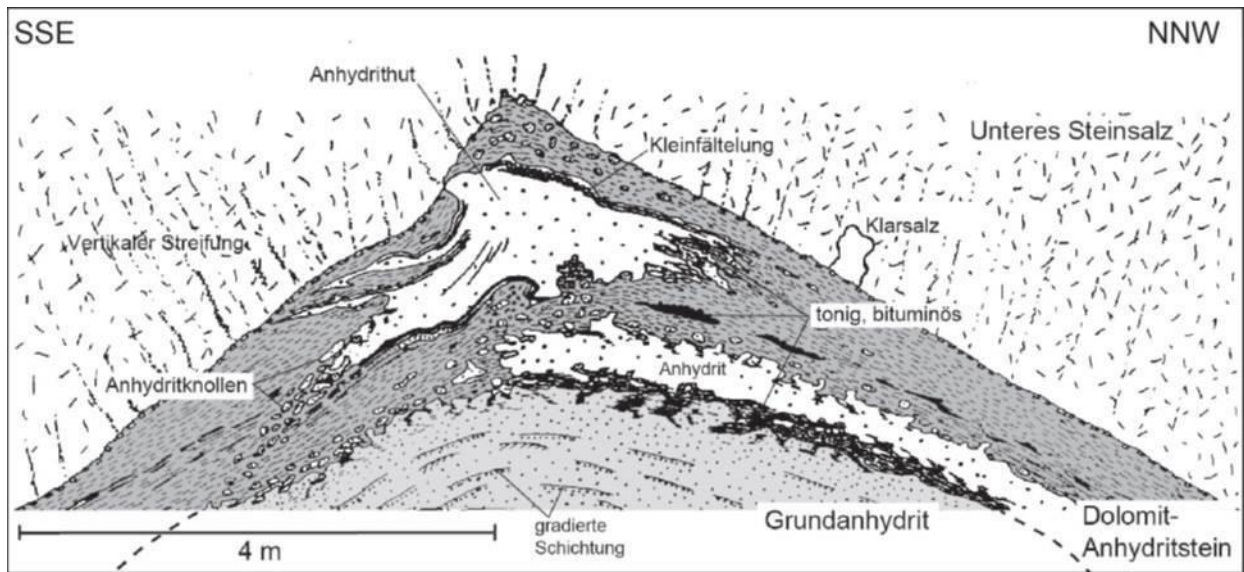


Abbildung 7: Schematische Skizze einer Anhydritkuppe [geändert nach GLA (1997)].

Bei der Betrachtung der Lagerungsverhältnisse und der Mächtigkeitsschwankungen innerhalb der Steinsalzschieben unterscheiden [JONISCHKEIT & ZWIEBLER (2018)] zwischen „normalen Lagerungsverhältnissen“ und „Lagerungsstörungen“. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand werden signifikante Lagerungsstörungen im neuen Deponiebereich nicht erwartet.

Lagerung des Salzspiegels

Als Salzspiegel bezeichnet man die scharfe Grenzfläche zwischen den Steinsalzschieben und dem hangenden Auslaugungsgestein bzw. steinsalzfreien Gebirge. Bis auf wenige Abweichungen ist das Steinsalzlager im Untersuchungsraum sehr gleichmäßig ausgebildet. Aus untertägigen Erkundungen sowie aus dem Nivellement der Grube lässt sich ableiten, dass der Salzspiegel und die Basis des Steinsalzlagers unter normalen Lagerungsverhältnissen in südliche bis südöstliche Richtung einfallen.

Lagerung der Basis des Steinsalzlagers

In den meisten Abbaubereichen des Untersuchungsgebietes verläuft das Nivellement der Fördersohle etwa äquidistant zur Basis des Steinsalzlagers. Demnach ist letztere weitestgehend ruhig und eben gelagert. Die Restmächtigkeit des Steinsalzes im Liegenden der Streckensohlen beträgt bei normalen Lagerungsverhältnissen meist weniger als 2 m. Durch Sohlbohrungen wurde im Nachweisgebiet die Restmächtigkeit des Steinsalzes in der Sohle in regelmäßigen Abständen kontrolliert und protokolliert. Aufschlüsse der Steinsalzbasis sind sehr selten und beschränken sich auf Anschnitte von Anhydritkuppen (Pilze) am Top der Unteren Sulfatschichten. Sie werden vom Sohlennivellement nicht erfasst. Anhydritkuppen treten gehäuft in Gebieten mit Bändersalzmulden

auf, in denen die Mächtigkeit des Unteren Steinsalzes reduziert ist. Die Grenze zwischen den Unteren Sulfatschichten und dem Unteren Steinsalz ist scharf ausgebildet.

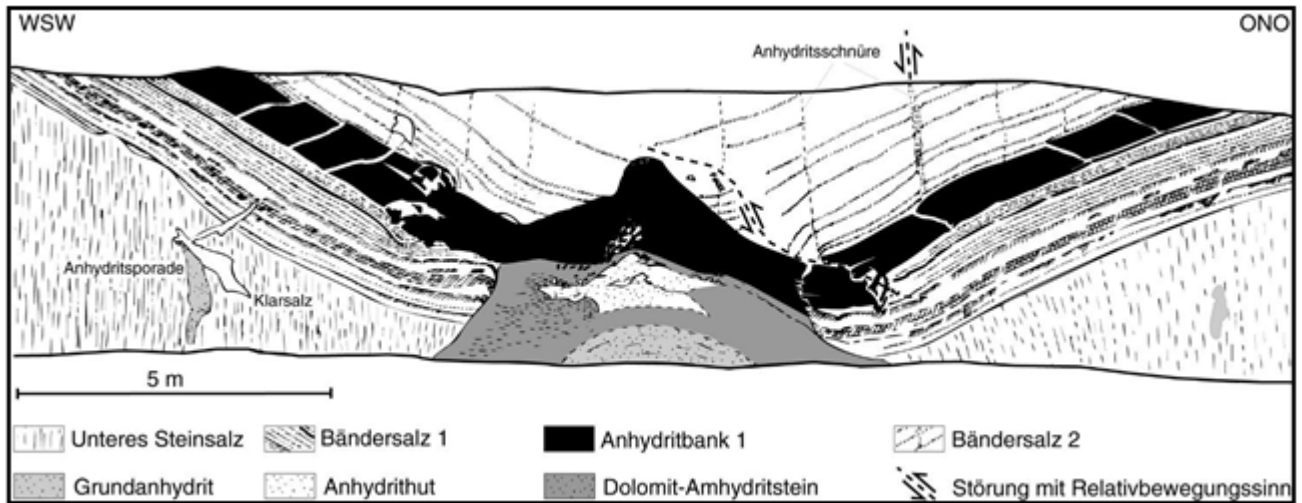


Abbildung 8: Schematischer Längsschnitt durch eine Bändersalzmulde [nach GLA (1997), aus JONISCHKEIT (2013) aus Hansch & Simon (2003)].

Lagerung der Bändersalzbasis

Die Lagerung des Bändersalzes bzw. der Bändersalzbasis ist durch weiträumige, bruchlose Schichtverbiegungen gekennzeichnet, wobei es sich meist um vertikale Absenkungen des Bändersalzes ins Untere Steinsalz handelt, den so genannten Bändersalzmulden (Näpfe). Tief ins Untere Steinsalz eintauchende Bändersalzmulden werden als Lagerungsstörungen innerhalb der Steinsalzsichten bezeichnet. Unter normalen Lagerungsverhältnissen ist das Bändersalz eben und ruhig gelagert. Flache Senken und lokale Vertiefungen auf der Oberfläche des Unteren Steinsalzes wurden zu Beginn der Bändersalzsedimentation ausgeglichen, bevor es zu einer flächendeckenden Bändersalzsedimentation kam. Es liegt diskordant auf dem Unteren Steinsalz.

Nach den geologischen Befunden ist das Bändersalz im neuen Deponiebereich nur im Südwestlichen Teil in der Kammer 1E zwischen Ort E und F aufgeschlossen.

2.2.9 Tektonische Beanspruchung des Steinsalzlagers

Die Salinargesteine im Mittleren Muschelkalk liegen im Schichtverband vor und fungieren wegen ihrer plastischen Verformbarkeit als Abscher- und Entkopplungshorizont. Dadurch können Änderungen in der Gebirgsspannung zu einer bruchlosen Deformation des Steinsalzlagers führen. Außerdem werden in ein und demselben Spannungsfeld tektonische Bewegungen im Liegenden von tektonischen Bewegungen im Hangenden entkoppelt.

Das Fehlen von tektonischen Elementen im Untersuchungsgebiet steht im Einklang mit der insgesamt relativ ebenen und ungestörten Lagerung des Steinsalzlagere.

Im frühen Pliozän (in Mitteleuropa, ca. 3 bis 5 Mio. Jahre) erfolgte eine Verlagerung (Rotation) des vorherrschenden Spannungsfeldes und verursachte dadurch im Miozän eine Drehung der horizontalen Spannung von NNE-SSW nach NW-SE (bis heute bestehend). Die Veränderung des Spannungsfeldes bewirkte nach der Modellvorstellung sinistrale Bewegungen an NNE-SSW streichenden Blattverschiebungen im tieferen Untergrund, bei denen es sich möglicherweise um nördliche Ausläufer der Albstadt-Scherzone handelt (vgl. Kapitel 2.2.2).

Das Steinsalzlager im Mittleren Muschelkalk ist gerade bei horizontaler Scherbeanspruchung als bevorzugter Abscherhorizont im mesozoischen Deckgebirge anzusehen und bewirkt eine Entkopplung dieser Relativbewegungen [REINECKER, J. & SCHNEIDER, G. (2002)]. Im mesozoischen Deckgebirge über den Steinsalzschieben entwickelten sich Riedel-Scherflächen, wie zum Beispiel die Heilbronner und Kochendorfer Störungszone.

Die vorhandenen Strukturen und Phänomene in den Steinsalzschieben des Mittleren Muschelkalks können auf syndiagenetische und halokinetische Prozesse zurückgeführt werden, die lokal eng begrenzt durch tektonische Bewegungen überprägt wurden [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

Im Übergangsbereich des Steinsalzlagere zum Liegenden oder zum Hangenden können deshalb die untersten oder obersten Steinsalzschieben durch tektonische Bewegungen lokal plastisch verformt (deformiert) sein. Im Steinsalzlager der Heilbronner Mulde und damit im Bergwerk Heilbronn-Kochendorf sind Strukturen, die auf eine tektonische Beanspruchung der Steinsalzschieben hinweisen sehr selten [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

„Die weitestgehend intakte Schichtlagerung der Salinargesteine im Mittleren Muschelkalk ist unter anderem auf die plastischen Deformationseigenschaften des Steinsalzlagere zurückzuführen. Horizontal bzw. schichtparallel angreifende Gebirgsspannungen, wie sie im Bereich von Blattverschiebungen auftreten können, werden zum Teil an der Basis der Steinsalzschieben durch Scherbewegungen abgebaut, in Form von schichtparallelen Scherflächen und flachen Überschiebungen. Im Bändersalz können zusätzlich Faltungen auftreten. Im Übergang zum normal gelagerten und ungestörten Unteren Steinsalz ist die Vertikale Streifung unmittelbar über der Scherzone in charakteristischer Weise im Relativbewegungssinn geschleppt. In der [gesamten] Grube Heilbronn gibt es insgesamt vier Aufschlüsse mit tektonischen Strukturen, die auf einen Abbau von Gebirgsspannungen durch schichtparallele Bewegungen an der Grenzfläche Steinsalz-lager/Untere Sulfat-schieben hinweisen [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

Ob es am Top des Steinsalzlagere im Übergangsbereich vom Steinsalzlager zum Hangenden ebenfalls lokal zum Abbau subhorizontaler Scherspannungen gekommen ist, kann aufgrund der

fehlenden Aufschlüsse im Untersuchungsgebiet nicht gesagt werden. Das aufgeschlossene Strukturinventar wurde nicht tektonische überprägt.

2.2.10 Geologische Profilschnitte durch das Grubengebäude

Der geologische Profilschnitt durch das Zentrum des neuen Deponiebereichs zeigt die großräumigen Lagerungsverhältnisse im Deponiebereich und der weiteren Umgebung [JONISCHKEIT (2018)]. Die Lage und Orientierung des Profilschnittes ist der Abbildung 9 zu entnehmen.

Zur Konstruktion des Profilschnittes wurde auf Informationen aus vorhandenen und aktuell überarbeiteten Kartenwerken (bspw. Schichtlagerungskarten, Steinsalzmächtigkeitskarten), Nivellementauswertungen, Firsterkundungs- und Mutungsbohrungen sowie Ergebnissen aus den geologischen Kartierungen unter Tage zurückgegriffen. Aus dem dargestellten Profilschnitt ist die ebene und ungestörte Lagerung des Steinsalzlagers im neuen Deponiebereich gut ersichtlich.

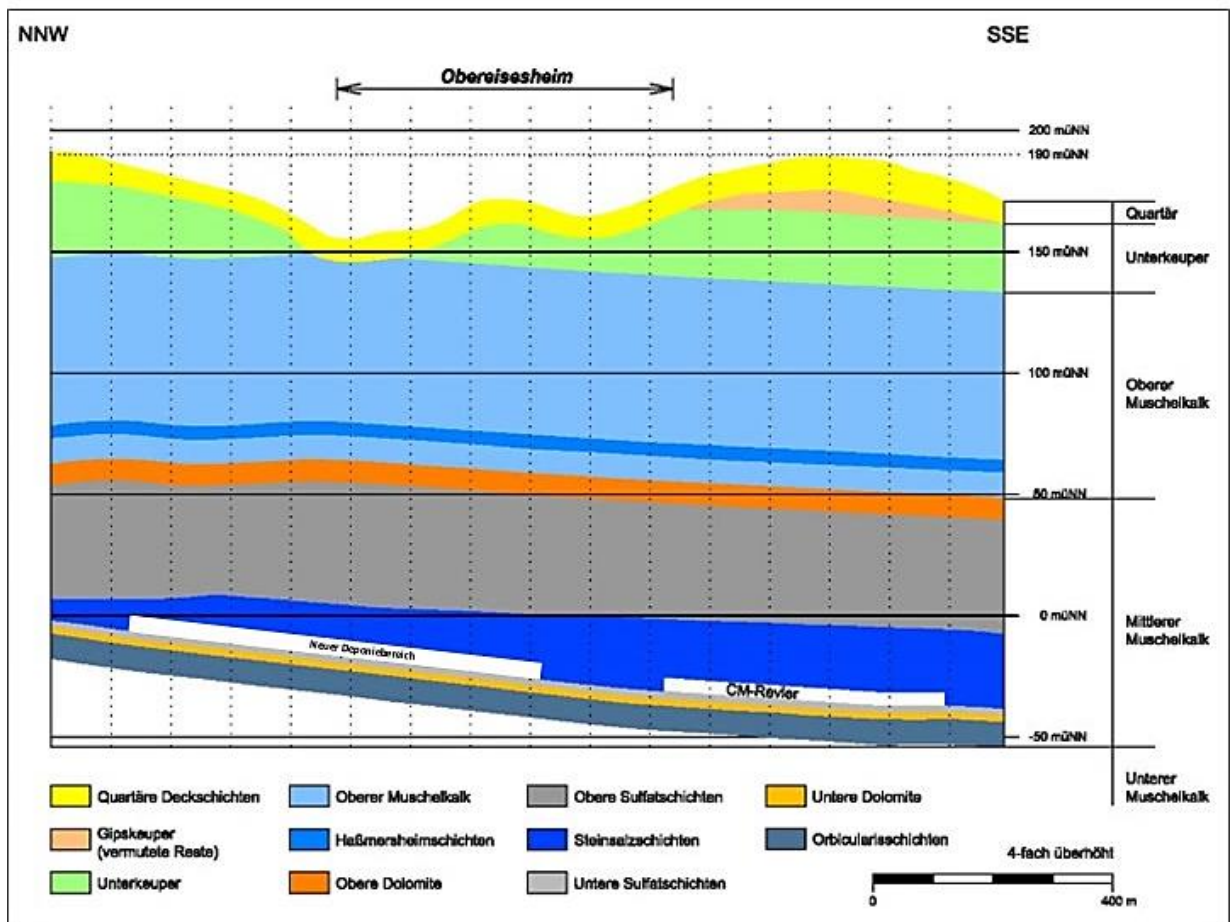


Abbildung 9: Geologischer Profilschnitt Nordwest – Südost durch den neuen Deponiebereich in der Heilbronner Mulde [auf Basis JONISCHKEIT (2018)]

2.2.11 Geothermische Tiefenstufe

Die geothermische Tiefenstufe beschreibt den Anstieg der Erdwärme zur Teufe hin. Im Bereich der Steinsalzlagerstätte Heilbronn liegen normale geothermische Verhältnisse vor (ca. 3°C je 100 m Teufe).

2.2.12 Regionale seismische Aktivität in Vergangenheit und Gegenwart

Das Salzbergwerk Heilbronn inklusive des neuen Deponiebereiches liegt in einer Region mit äußerst geringer Erdbebenaktivität. Das nächstgelegene aufgezeichnete Erdbeben fand am 10.3.1881 im Abstand von ca. 8,5 km zum neuen Deponiebereich statt und hatte eine Intensität $I=4$ [BAISCH (2024) – Teil D5 Antragsunterlage]. Eine relevante Erdbebengefahr kann für den geplanten Standort in Auswertung verschiedener Erdbebenkataloge nicht abgeleitet werden. Der neue Deponiebereich liegt in keiner Erdbebenzone.

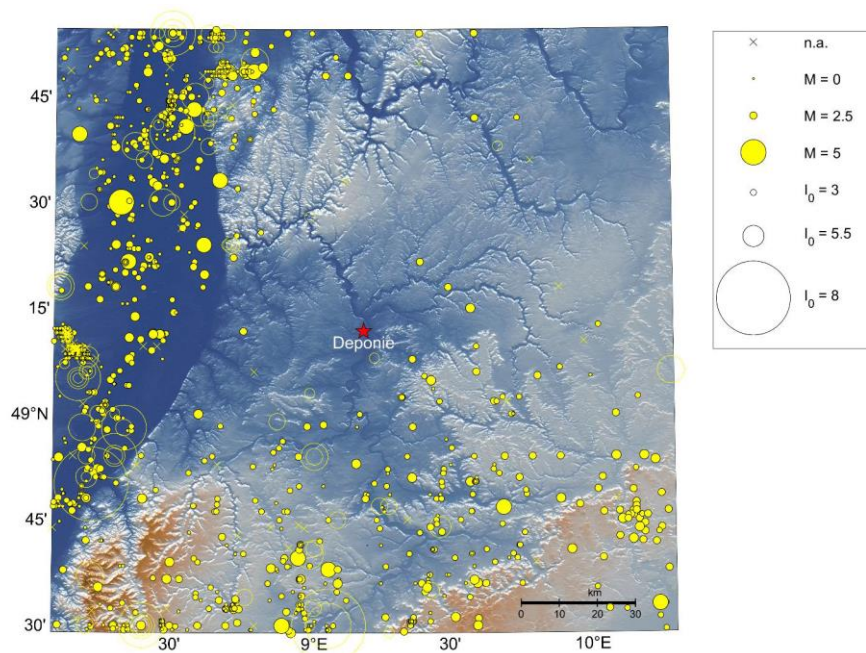


Abbildung 10: Erdbebenverteilung um den Deponiestandort (roter Stern). Die Symbolgröße skaliert mit der Erdbebenstärke entsprechend der Legende. Offene Kreise stellen die Intensität I_0 für Erdbeben dar, für die keine Magnitude angegeben ist. [aus BAISCH (2024)]¹⁾

¹⁾ Datengrundlage sind die Kataloge des LGRB (<https://www.lgrb-bw.de/erdbeben/jahresbulletins>), der BGR und der Karlsruher Katalog. Offensichtlich redundante Einträge wurden entfernt, d.h. wenn sich Zeit und Epizentrum eines Eintrages um weniger als 1 Minute und weniger als 5 km unterscheiden. In diesen Fällen wurde der Katalog des LGRB gegenüber den beiden anderen Katalogen priorisiert. Untergeordnet wurde der BGR Katalog gegenüber dem Karlsruher Katalog priorisiert.

Die Abbildung 10 zeigt die resultierende Erdbebenverteilung im weiteren Umfeld des neuen Deponiebereiches [aus BAISCH (2024)]. Priorisiert wurde dabei der Erdbebenkatalog des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), der die Erdbebenaktivität in Baden-Württemberg seit 1994 zusammenfasst. Für den Zeitraum vor 1994 wurde der Katalog der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) verwendet [Leydecker, G. (2011)], ergänzt durch den Karlsruher Erdbebenkatalog [K.-P. BONJER, K.-P. (1997)].

Im Gutachten BAISCH (2024) wird ein approximativer Ansatz verwendet, um die Rate zu bestimmen, mit der Erdbeben einer gewissen Stärke auftreten können. Dabei werden eine Reihe von vereinfachenden Annahmen getroffen, um abzuschätzen, ab welcher Stärke ein Erdbeben in einer bestimmten Entfernung am geplanten Standort die Intensität 8 erreichen kann. Die mittlere Wiederkehrperiode für das Erreichen bzw. Überschreiten der Intensität 8 durch ein Erdbeben beträgt etwa 31.250 Jahre. Für das Betrachtungsintervall von 20.000 Jahren liegt die Überschreitungswahrscheinlichkeit der Intensität 8 unterhalb der geforderten 99 %. Damit ist die Anforderung der DepV bezüglich der Standortwahl als erfüllt anzusehen [BAISCH (2024)].

2.2.13 Subrosion, Ausbildung von Erdfällen an der Oberfläche

Natürliche Subrosionsvorgänge

Gesteine, die überwiegend aus den Mineralen Steinsalz, Gips (Anhydrit), Calcit oder Dolomit bestehen, sind wasserlöslich, wobei erhebliche Unterschiede bezüglich der Löslichkeit dieser Mineralien bestehen können [WAGENPLAST (2005)]. Die natürliche unterirdische Auflösung (Subrosion) der genannten Gesteine wird durch Grundwasser oder versickerndes Oberflächenwasser verursacht und resultiert meist in der Ausbildung von Karsterscheinungen, wie flächenhaft verlaufende Senken oder abrupt eintretende, engräumige Erdfälle, an der Geländeoberfläche.

Gipskarst

Im Gips- oder Kalkstein konzentrieren sich die Lösungsvorgänge häufig auf Klufflächen oder Schichtfugen. An der Geländeoberfläche deuten oberflächlich abflusslose Bodensenken mit rundlichem Umriss auf Lösungsvorgänge von Gips oder Kalkstein im Untergrund hin (Erdfälle).

Bei mächtigerer Überdeckung liegen die Sulfatgesteine des Mittleren Muschelkalks und des Gipskeupers als Anhydrit vor. Im grundwasserbeeinflussten Bereich wandelt sich der Anhydrit unter Wasseraufnahme und Volumenzunahme in Gips um, gefolgt von der Auflösung des Gipses, die bevorzugt an genannten Klüften und Schichtfugen einsetzt. Die Auslaugungsvorgänge finden zwar fast ausschließlich unterhalb der Erdoberfläche statt (Subrosion), die Überdeckung mit bspw. Verwitterungslehm oder entfestigten Tonsteinen ist dann aber oft nur geringmächtig.

Die Gipslösung schreitet im Gipskeuper nicht nur von oben nach unten fort, sondern findet auch an der Basis des Gipslayers statt, weil der hohlraumreiche Grenzdolomit am Top des Unterkeupers häufig gespanntes Grundwasser führt, das in den Grundgips eindringt und ihn anläst. Im Einflussbereich des Talgrundwassers führte die intensive Auslaugung zur Bildung von breiten, oft sumpfigen Subrosions-Senken und Talverbreiterungen. Im Untersuchungsgebiet ist der Gipskeuper nur in Resten vorhanden und die Grundgipsschichten sind vollständig ausgelaugt.

In Bezug auf die Sulfatgesteine des Mittleren Muschelkalks in der Heilbronner Mulde sind keine Verkarstungsphänomene an der Erdoberfläche bekannt, die auf entsprechende Auslaugungsprozesse hinweisen.

Der Mittlere Muschelkalk streicht außerhalb der Heilbronner Mulde am Hangfuß der Täler des Neckars und einiger seiner Nebenflüsse aus. Durch Auflösung des Gips- und Steinsalzanteils verringerte sich die Mächtigkeit dieser leicht löslichen Gesteine von ursprünglich etwa 65 m auf 30 bis 35 m.

Steinsalzkarst

Die Auflösung von Steinsalz beginnt mit dem Zutritt von Grundwasser, der im humiden Klimabereich weit unterhalb der Geländeoberfläche einsetzt. Im Untersuchungsgebiet werden Steinsalzlager im Mittleren Muschelkalk angetroffen, deren potentielle Auslaugung in großen Tiefen stattfindet. Sind die Deckschichten aus Muschelkalk und Unterkeuper unversehrt und wenig geklüftet, beginnt eine mögliche Auslaugung tiefer als etwa 120 bis 150 m unter der Geländeoberfläche. Dabei können sich weitgespannte Senkungsmulden mit langsamer Senkungsgeschwindigkeit als typische Karstform ausbilden.

Nördlich des Untersuchungsgebietes der Grube Heilbronn, bei Bad Friedrichshall-Jagstfeld, wurden Oberflächensenkungen als Folge der dort über Jahrzehnte betriebenen Solung festgestellt [WAGENPLAST (2005)]. Ähnliches wurde über der Soleförderung bei Heilbronn-Frankenbach gemessen. Auch nach Beendigung der Soleförderung (1960) wurden im Bereich des genannten Solefelds entlang des Leintals (westlich von Heilbronn) Senkungen bis zu 8 mm im Jahr gemessen, die nach [DACHROTH (1983) in WAGENPLAST (2005)] möglicherweise auf natürliche Auslaugung des Steinsalzlagers zurückzuführen sind, welches dort ca. 180 m unter Gelände liegt.

Im Nachweisgebiet selbst sowie im Umkreis von mehr als 3 km wurden keine Solungsanlagen betrieben. Einflüsse auf den Bereich der neuen Deponie können daher ausgeschlossen werden.

Subrosionserscheinungen im Untersuchungsgebiet

Aus den Erkenntnissen der geologischen Untersuchungen des [GLA (1995)] lassen sich Informationen über das Vorhandensein von Subrosionserscheinungen wie z.B. Erdfälle an der Oberfläche entnehmen. Dazu wird auf die Anlage 4 des entsprechenden Berichtes [GLA (1995)]

verwiesen. In dieser sind bei luftbildgeologischen Aufzeichnungen Erdfälle und so genannte Karstwannen kartiert worden. Einige sind im Gelände durch Hohlformen erkennbar und wurden bereits in der TK25, Blatt 6820 Schwaigern erfasst. Weitere wurden durch die Interpretation von punktuellen oder kleinflächigen Grautonunterschieden bestimmt.

Über die Entstehung der Subrosionserscheinungen im näheren Umfeld des Bergwerkes Heilbronn liegen jedoch bislang keine Untersuchungen vor. Im Rahmen der Erarbeitung des Langzeitsicherheitsnachweises des [GLA (1995)] wurden folgende Entstehungsmöglichkeiten diskutiert:

- Gipskarst im Mittleren Muschelkalk und möglicherweise im Gipskeuper (in Bohrungen wurde jedoch keinerlei Gipsführung im Gipskeuper nachgewiesen),
- Verkarstung der oberen Schichten des Oberen Muschelkalkes,
- bankweise Verkarstung im Unteren Keuper (trifft nur für Erdfälle > 5 m Ø zu),
- Suffosion (Oberflächenlösung) der Lössschichten (trifft nur für Erdfälle > 5 m Ø zu).

Für das Untersuchungsgebiet der Neuen Deponie, im Falle möglicher Subrosionserscheinungen umfasst dieses die Tagesoberfläche über dem neuen Deponiebereich und das direkte Umfeld über einige 100 m, können signifikante Subrosionserscheinungen sowie eine Beeinflussung der Barrierschicht (Obere Sulfatschichten) und des Steinsalzlagers durch Subrosionserscheinungen im Deckgebirge daher ausgeschlossen werden.

Bezüglich der Salzauslaugung lässt sich aus der geologischen Vergangenheit folgendes aussagen (aus GLA 1995): Aus dem Alter der Hochterrassenschotter und der älteren Höhenschotter sowie deren Höhenlage ergibt sich, dass seit mindestens 1 Million Jahre der vertikale Abstand zwischen Neckar und Oberfläche des Salzlagers etwa gleich geblieben ist. In diesem Zeitraum hat keine signifikante Auslaugung des Salzlagers von dessen Oberseite her stattgefunden. Auch für die nahe geologische Zukunft (einige 100.000 Jahre) sind nach GLA (1995) keine wesentlich anderen Verhältnisse zu erwarten.

Anhaltende rezente Lösevorgänge sind auf die Bereiche des so genannten Salzhanges im Südwesten bzw. Nordosten der Lagerstätte beschränkt. Hier kommt es durch eine begrenzte Zirkulation von ungesättigten Wässern lokal zur Auflösung des Salzlagers, wobei tiefes, höher konzentriertes und älteres Grundwasser vom unteren Aquiferbereich zur Vorflut aufsteigen kann (GLA 1995).

Über die Wanderungsgeschwindigkeit des im Westen gelegenen Salzhangs nach Osten liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Diese Geschwindigkeit dürfte aber 1 km/100.000 Jahre mit Sicherheit nicht überschreiten (GLA 1995). Aktuell beträgt die Entfernung zum Salzhang mindestens 3.300 m, so dass aus den rezenten Lösevorgängen in diesem Bereich keine negative Beeinflussung

des geplanten Deponiebereiches innerhalb des Nachweiszeitraumes (20.000 Jahre, vergl. Kap. 1) abgeleitet werden kann.

2.2.14 Halokinese

Unter dem Begriff Halokinese (Salztektonik) werden Bewegungen in Salzen auf Grund der hohen Auflast (hoher Druck) der Hangendschichten und Dichteunterschieden zwischen den Gesteinen verstanden. Durch die Fließfähigkeit des Salzes können hierdurch beispielsweise Salzkissen, Dome oder Salzstöcke entstehen. Dabei kann das Salz aufsteigen, die Hangendschichten durchstoßen und strukturelle Fallen für Kohlenwasserstoffe wie Erdöl oder Erdgas bilden.

Im Untersuchungsgebiet des Grubenfeldes Heilbronn sind keine Strukturen erkennbar, die auf halokinetische Prozesse im Sinne von Diapirismus (langsamer, dichtebedingter Salzaufstieg im Untergrund) zurückgeführt werden können. Derartige Prozesse können insbesondere aufgrund der geringen Teufenlage ausgeschlossen werden.

2.3 Angaben zum Grubengebäude

2.3.1 Zuschnitt des Grubengebäudes und Lage des neuen Deponiebereiches

Das Grubenfeld des Bergwerkes Heilbronn-Kochendorfs wird durch die folgenden Tagesschächte erschlossen:

Schacht Franken

Koordinaten:	RW 3515340,84	HW 5447942,79
Beginn der Teufarbeiten:	13.03.1971	
Ende der Teufarbeiten:	18.08.1972	
Teufe:	238,2 m	
Höhe Rasenhängebank:	+154,15 m	
Höhe Füllortsohle:	-52,1 m	

Schacht Heilbronn

Koordinaten:	RW 3515417,25	HW 5447782,53
Beginn der Teufarbeiten:	02.04.1884	
Ende der Teufarbeiten:	04.12.1885 (erste Salzförderung)	
Teufe:	213 m (in 1960 Weiterteufen auf 224 m Teufe)	
Höhe Rasenhängebank:	+155,4 m	
Höhe Füllortsohle:	-51,4 m	

Schacht Konradsberg

Koordinaten:	RW 3509993,0	HW 5449390,0
Beginn der Teufarbeiten:	16.05.2003	
Ende der Teufarbeiten:	17.08.2004	
Teufe:	240,55 m	
Höhe Rasenhängebank:	+215,70 m	
Höhe Füllortsohle:	-14,7 m	

Schacht König Wilhelm II

Koordinaten:	RW 35 15346.27	HW 54 53600.84
Beginn der Teufarbeiten:	21.01.1896	
Ende der Teufarbeiten:	29.07.1899	
Teufe:	190,9 m (1971)	

Im Rahmen der Realisierung des SuedLink-Projektes ist das Teufen von zwei weiteren Schächten geplant. Hierbei handelt es sich um einen Schacht im Bereich der Ortslage Kochendorf nordöstlich des Grubenfeldes Kochendorf und einen Schacht im Bereich der Ortslage von Großgartach südwestlich des Grubenfeldes Heilbronn. Die Lage der Schächte ist in Abbildung 1 dargestellt.

Für die Salzgewinnung wurden die folgenden Sohl-niveaus angelegt:

1. Sohle: Erkundungsstrecke am Schacht Heilbronn
 2. Sohle: Wettersohle Anbindung an Schächte
 3. Sohle: Fördersohle Füllorte
- Abstand: > 4 m

Das Grubenfeld Heilbronn liegt in einer durchschnittlichen Teufe zwischen 180 und 250 m und besteht aus den Feldesteilen:

Kontrollbereich:	ca. 48 Mio m ³
Bergwerk 2000:	ca. 28 Mio m ³
Nordfeld:	ca. 4 Mio m ³ (Stand 08/2018)
Südwestfeld:	ca. 3 Mio m ³ (Stand 08/2018)
Seebuckelfeld:	ca. 0,02 Mio m ³ (Stand 08/2018)
Erkundungsstrecke Biberacherfeld:	ca. 0,2 Mio m ³ (Stand 08/2018)

Das Grubenfeld Kochendorf ist über 2 Verbindungsstrecken mit dem Grubenfeld des Bergwerkes Heilbronn verbunden. Das Bergwerk Kochendorf umfasst ein Hohlraumvolumen von ca. 18 Mio. m³. Derzeit sind von diesem Volumen etwa 14 Mio. m³ versetzt, der übrige Teil wird bis zur Betriebseinstellung versetzt. Die beiden Verbindungsstrecken weisen die folgenden Parameter auf:

Verbindungsstrecke (alt)	Durchschlag:	1984
	Streckenbreite:	9,0 m
	Streckenhöhe:	3,0 – 4,0 m
	Querschnitt:	27,0 m ²
	Länge:	ca. 2.600 m
Neue Verbindungsstrecke	Durchschlag:	2010
	Streckenbreite:	8,0 m
	Streckenhöhe:	5,0 m
	Querschnitt:	40,0 m ²
	Länge:	ca. 3.000 m

Im Bereich des Bergwerkes Heilbronn werden die folgenden Abbau- und Streckenparameter realisiert:

B&S Reviere:	Abbaustrecken:	15 m x 5 m = 75 m ²
	Hauptwetterstrecken:	8 m x 5 m = 40 m ²
	Begleitwetterstrecken:	8 m x 5 m = 40 m ²
	Kammern:	15 m x 10 m = 150 m ²
CM-Reviere:	CM- Kammern (Unterschnitt):	14 m x 5 m = 70 m ²
	CM- Kammern:	14 m x 10 m = 140 m ²

Die horizontale Ausdehnung des gesamten Grubengebäudes beträgt:

W-O: ca. 9.100 m

N-S: ca. 5.400 m (Stand: 08/2018) mit einer Grundfläche von ca. 16,5 km².

Der neue Deponiebereich befindet sich im nördlichen Grubenfeld Heilbronn, östlich des Nordfeldes. Zum Nordfeld besteht ein Sicherheitspfeiler von 100 m. Südlich besteht ein 200 m breiter Sicherheitspfeiler mit den Zugangsstrecken zum Deponiebereich.

Für den neuen Deponiebereich ist eine Grundfläche von ca. 447.750 m² und ein Volumen von insgesamt ca. 1,3 Millionen m³ vorgesehen. Der finale Zuschnitt ist dabei abhängig von den angetroffenen geologischen Verhältnissen, insbesondere der Gesamtmächtigkeit des Salzlagers.

Maximal ist die Auffahrung von 24 Kammern geplant¹⁾, woraus sich die folgenden Abmessungen des neuen Deponiebereiches ergeben:

W-O: 636 m

N-S: 704 m

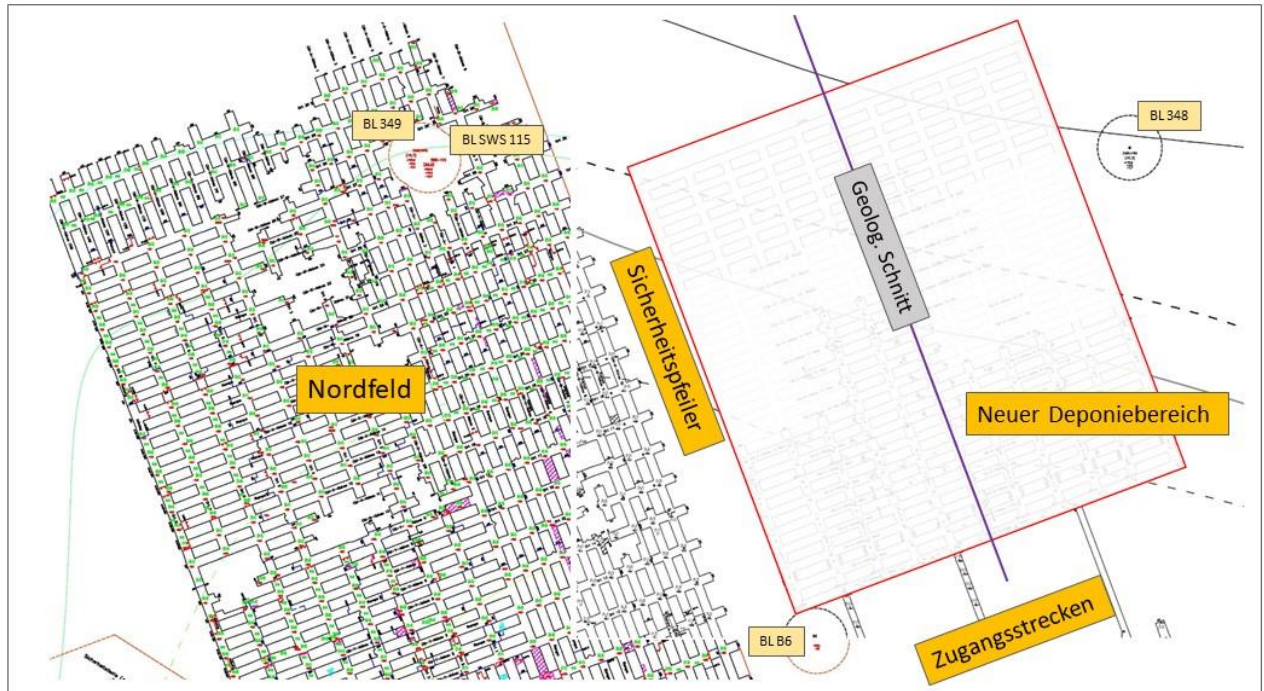


Abbildung 11: Lageplan und Grundriss des neuen Deponiebereiches.

Im Detail ist die Auffahrung der folgenden Deponiekammern vorgesehen (siehe Abbildung 11):

	Flügel West	Flügel Ost
Anzahl Kammern	24 ¹⁾	24 ¹⁾
Flügelbreite O-W (ab Mitte Förderstrecke)	260 m	376 m
Anzahl Querörter pro Kammer	4	6
Festenlänge	3 x 46 m 1 x 59 m	5 x 46 m 1 x 55 m

¹⁾ maximale Anzahl an geplanten Deponiekammern, in der finalen Auslegung des Deponiefeldes in Abhängigkeit der angetroffenen geologischen Verhältnisse (Mächtigkeit des Salzlagere) ggf. geringer. Die geotechnische Modellierung des Deponiefeldes beinhaltet die Abbildung von insgesamt 22 Deponiekammern gemäß der ursprünglichen Planung von ca. 20 östlichen und 24 westlichen Kammern. Die durchgeführten Modellrechnungen können für die geplante Auslegung der Deponie prinzipiell als abdeckend angesehen werden.

2.3.2 Sicherheit des Grubengebäudes

2.3.2.1 Standsicherheit der Schächte, Strecken, Blindschächte und Abbauräume

Die standsichere Dimensionierung der Strecken und Abbaukammern im Bergwerk Heilbronn beruht auf den bewährten Verfahren nach [DREYER (1971)] und [NATAU (1993a), (1997a), (1999), (2001), (2003), (2005)]. Die Methodik wurde seit den 1970'er Jahren entwickelt und fortgeführt, sodass von einem ausreichend erprobten Dimensionierungs- und Nachweisverfahren ausgegangen werden kann. Die Standsicherheitsnachweise umfassen im Einzelnen den Nachweis der Pfeilerstrukturen sowie eine Standsicherheitsabschätzung der Kammerfirsten.

Die Standsicherheitsnachweise basieren auf repräsentativen Materialkennwerten, welche in umfangreichen Versuchsserien mit aufwändigen Großversuchen an originalem Material der Lagerstätte Heilbronn durchgeführt wurden. Den Sicherheitsnachweisen der Pfeilerstrukturen liegt generell ein Sicherheitsfaktor von $S \geq 2,5$ und den Berechnungen zur Firstsicherheit eine Sicherheit von $\eta_F \geq 1,5$ zugrunde.

Die analytisch ermittelten Sicherheitswerte konnten durch die in jüngster Zeit durchgeführten numerischen Modellierungen bestätigt werden [KONIETZKY, H & WEBER, F. (2018), FLIß (2018)]. Weiterhin lassen das zu beobachtende Deformations- und Entfestigungsverhalten der Tragpfeiler keinerlei Rückschlüsse auf zu erwartende Instabilitäten und Einschränkungen der First- und Stoßsicherheit zu.

Die Dimensionierung und Auslegung des Ausbaus und der Füllortbereiche der Tagesschächte erfolgten nach allgemein gültigen Regeln des Standes der Technik. Die Zugangsstrecken und Schachtnahbereiche sind entsprechend langlebig ausgeführt und gesichert. Im Rahmen der gebirgsmechanischen Überwachung werden sämtliche Grubenbereiche mit Konvergenzmessstellen und turnusmäßigen Spannungsmessungen überwacht.

2.3.2.2 Firstfälle, Stoßabschalungen und Liegendaufbrüche

Bergbaubedingt treten unter Tage in der Grube Heilbronn generell und im neuen Deponiebereich verschiedene bergbaubedingte Phänomene auf, die im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises betrachtet werden. Die Gutachten [GLA (1995) und JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)] stellten bereits, in Verbindung mit anderen Berichten zu geologischen UT-Kartierungen, die damals aufgenommenen Ablöser, Abschaltungen und Spalten ausführlich zusammen, beschränkte sich jedoch ausschließlich auf das damalige Grubenfeld des Steinsalzbergwerkes Heilbronn mit dem Kontrollbereich und das Bergwerk 2000.

Abschalungen und Spaltenbildungen

Als Abschalungen werden alle Steinsalzpakete bezeichnet, die sich schalenartig vom Stoß, der Stoßkante oder von den Firsten ablösen. Sie entstehen durch natürliche Konvergenzen, d.h. Gebirgsbewegungen der Firste und der Sohle. Im neuen Deponiebereich treten Abschalungen bevorzugt an den Stoßkanten auf, großflächige Abschalungen konnten im bisher kartierten Gebiet nicht beobachtet werden [JONISCHKEIT (2024)]. Abschalungen an den Firsten treten häufig in Verbindung mit Bändersalzmulden auf.

Sehr selten sind kleinflächige Abschalungen an der Firste im Unteren Steinsalz an Unstetigkeitsflächen, die nach aktuellem Kenntnisstand sehr wahrscheinlich mit fossilen Gaseinschlüssen (Luft und Spurenstoffe) in Zusammenhang stehen und sich durch den Gasdruck im Zuge der Gebirgsentspannung bilden. Ebenso selten sind Abschalungen an der Stoßkante über Anhydritkuppen, die aufgrund der Quellung (nur bei Zufuhr von Fremdwasser) des tonigen Dolomit-Anhydritsteins entstehen können.

Ablöser

Als Ablöser werden alle gelösten Schalen bezeichnet, welche aus den Kammerfirsten hereingebrochen sind (Firstlöser oder Firstablöser). Bevorzugte Ablöseflächen sind Schichtflächen im Bändersalz (tonige Anhydritsteinlagen und Tonsteinlagen). Sehr selten sind kleinflächige Ablöser an Unstetigkeitsflächen im Unteren Steinsalz. Firstablöser sind bergbaubedingte Phänomene und entstehen in erster Linie in Aufschlüssen mit Bändersalzmulden durch Konvergenzen (Abbau von Gebirgsspannungen) und werden teilweise durch eine hohe Wetterfeuchtigkeit begünstigt.

Quellungen, Liegendaufbrüche und Rissbildungen

Beim Eintrag von Fremdwässern (Betriebs- und Kondenswässern) in die Sohle können Quellungen in Bereichen von Anhydritkuppen nicht ausgeschlossen werden. Im Hinblick auf das Quellverhalten von Sulfatgesteinen und die Einflussnahme des Tongehaltes (Zunahme der Quellfähigkeit des Anhydrits bei Anwesenheit von quellfähigen Tonmineralen) lässt sich also ableiten, dass Quellungen in tonigen Sulfatgesteinen, bspw. dem Dolomit-Anhydritstein, durch Feuchtigkeit und ungesättigte Wässer sowie eine optimale Mengenverteilung von quellfähigen Tonmineralen begünstigt werden [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)]. Da in den Anhydritkuppen nur eine begrenzte Menge an Tonstein und Anhydritstein zur Verfügung stehen, sind die Quellungen in den Anhydritkuppen lokal begrenzt ohne signifikante Auswirkungen auf das Pfeilertragsystem. Im massig ausgebildeten Grundanhydrit der Unteren Sulfatschichten wurden keine Quellungen festgestellt.

Spalten treten mit Öffnungsweiten von wenigen mm bis wenigen cm (kleiner 5 cm) bevorzugt an den Firsten in den Orten (Verbindungen zwischen den Kammern) auf. Spaltenbildungen im Tiefpunkt

von Bändersalzmulden weisen auf Abschalungen im Bändersalz und damit ggf. auf bevorstehende Nachfallereignisse hin.

Alle auftretenden Erscheinungen wie Abschalungen, Spalten- und Rissbildungen, Ablöser und Quellungen sind typische bergbau- und konvergenzbedingte Phänomene. Sie treten kleinräumig begrenzt auf und haben daher keinen Einfluss auf die Barrierefunktion der hangenden Oberen Sulfatschichten und wirken sich damit nicht auf die Langzeitsicherheit der Grube Heilbronn und der neu aufgefahrenen Feldesteile des neuen Deponiebereiches aus.

2.3.2.3 Lösungszutritte (Ursache und Herkunft)

In der Unterlage [GLA (1995)] ist die Verbreitung und Ausbildung von Laugen-, Tropf- und Ausblühungsbereichen im Grubenfeld Heilbronn (heutiger Kontrollbereich) bereits ausführlich beschrieben worden. Im Zuge der damaligen untertägigen Kartierung wurden die Zutrittsstellen (Laugenstellen und Tropfstellen) erfasst und klassifiziert. Diese Klassifizierung beruht zudem auf einer historischen Erkundung sowie auf hydrochemischen und isotonenphysikalischen Untersuchungen.

In späteren Nachkartierungen [z.B. JONISCHKEIT (2001)] wurden sowohl neu aufgefundene Lösungszutritte erfasst als auch bereits trockene Zutrittsstellen aus früheren Erkundungen dokumentiert. So genannte Feuchtigkeitsverdachtsflächen (augenscheinlich dunkel verfärbte Flächen, die sich klamm bzw. feucht anfühlen) wurden ebenfalls in die Kartierungen aufgenommen.

Im laufenden Bergwerksbetrieb sowie im Rahmen der aktuell durchgeführten Kartierarbeiten werden weiterhin Laugenzutrittsstellen, Tropfstellen und Ausblühungen erfasst. Für den neuen Deponiebereich sind derzeit keine Laugenzutrittsstellen, Tropfstellen und Ausblühungen zu beobachten [JONISCHKEIT (2024)].

Laugenstellen/Laugenpfützen

In früheren Berichten wurden geogene Laugenzutritte im Niveau der Sohle als Laugenstelle bezeichnet [GLA (1995)]. Im Untersuchungsgebiet des neuen Deponiebereichs sind keine geogenen Laugenstellen festgestellt worden. Alle angetroffenen Laugenansammlungen sind auf betriebliche, also anthropogene, Abläufe zurückzuführen und werden als Laugenpfützen bezeichnet.

Tropfstellen und Ausblühungen

Alle geogenen Laugenzutritte im Bereich des Bergwerkes Heilbronn erfolgen über Tropfstellen und werden aus Restlaugen (fossile Restlaugen aus dem Altpleistozän vor etwa 1 Million Jahren) in den Auslaugungsgesteinen gespeist. Die Tropfstellen sind zudem ausschließlich an Firstbohrungen zur

Erkundung des Salzspiegels bzw. des Hangenden sowie an Ankerungen gebunden. Die Tropfstellen weisen hierbei zumeist sehr kleine Zutrittsmengen auf. Wegen der mikroklimatischen Verhältnisse in den Bohrlöchern sind sie meist über lange Zeit aktiv und trocknen nur selten vollständig ab. Die Aktivität einer Tropfstelle wird durch die Zutrittsmenge, durch vorhandene Krusten bzw. Ausblühungen im Erkundungs- oder Ankerbohrloch sowie durch Bewetterung und Luftfeuchtigkeit beeinflusst.

Geogene Tropfstellen sind meist nur durch die Tropfenbildung und einen feuchten Hof um die eigentliche Tropfstelle gekennzeichnet. Erst über längere Zeiträume entstehen Ausblühungen und Stalaktiten. Um die Stalaktiten herum wachsen zusätzlich Ausblühungen, welche jedoch nur punktuell und nicht flächig mit den Firsten verbunden sind (fallen deshalb hin und wieder ab). Eine aktive Ausblühung, in der Lauge zutrifft, charakterisiert sich durch eine rein weiße Farbe.

Aus hydrogeologischer Sicht und der erwarteten geologischen Hangendausbildung kann für den neuen Deponiebereich das Auftreten geogener Tropfstellen ausgeschlossen werden. Dies wird im Wesentlichen durch eine entsprechend mächtige Anbaubank aus Steinsalz im Firstbereich der Deponiekammern bedingt.

2.3.2.4 Gasfreisetzung/-gefährdung und Erdöl-/Erdgasvorkommen

Untersuchungen zu potentiellen Erdöl- und/oder Erdgasvorkommen konzentrieren sich in Baden-Württemberg auf das Gebiet des Oberrheingrabens und der Molasse in Oberschwaben. In der Region des Mittleren Neckars gab es aufgrund der gegebenen geologischen Verhältnisse keine entsprechenden Prospektionen. Tiefbohrungen in der näheren und weiteren Umgebung der Heilbronner Mulde ergaben keine Hinweise auf erdöl- und/oder erdgashöfliche Gesteinsschichten. Deshalb kann aufgrund der geologischen Verhältnisse im tieferen Untergrund in der Heilbronner Mulde ein Zutritt von Erdöl- und/oder Erdgas in das Grubengebäude vollständig ausgeschlossen werden. Innerhalb des Steinsalzlagers kam es während der Auffahrung in den einzelnen Grubenfeldern vereinzelt zu Ausgasungen aus Spalten im Gestein [GLA (1995)]. Dabei handelte es sich um, kurzzeitige Gasaustritte aus endlichen Gasreservoirs bzw. um die Entleerung von im Steinsalz eingeschlossenen Luftblasen mit Fäulnisgasen. Die fossilen Gaseinschlüsse innerhalb der Lagerstätte sind aufgrund ihres geringen Volumens und ihrer Zusammensetzung für die Stand-sicherheit und Langzeitsicherheit des Bergwerks nicht von Belang.

Im neuen Deponiebereich konnten bisher keine signifikanten Ausgasungen bzw. Hinweise auf fossile Gaseinschlüsse beobachtet werden.

2.3.2.5 Sicherheitspfeiler zu Deckgebirge/ Flanken/ Basis/ Lösungsnestern/ Bohrungen/ Schächten / Nachbarbergwerken

Räumliche Ausdehnung der Lagerstätte

Die Salzgesteine (Salinar) des Mittleren Muschelkalks umfassen die Gesteine von den Unteren Dolomiten bis zu den Oberen Dolomiten. [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)] beschreiben, basierend auf Erkenntnissen bisher durchgeführter geologischer Untersuchungen sowie einschlägiger Literatur [GLA (1992) und (1995), BRUNNER & HINKELBEIN (2000)], dass sich die Beschaffenheit und die Ausbildung der Gesteine des Mittleren Muschelkalks, insbesondere des Steinsalzlagers, im Gebiet der Heilbronner Mulde auf größere Distanzen nicht wesentlich verändern.

Die Steinsalzschiefer sind Teil des Salinars und bilden zusammen mit den Unteren und Oberen Sulfatschiefern die Heilbronn-Formation. Die Heilbronn-Formation umfassen folgende Schichtglieder (liegend zu hangend):

- Untere Sulfatschiefer,
- Unteres Steinsalz,
- Bändersalz,
- Oberes Steinsalz,
- Obere Sulfatschiefer.

Das Bändersalz liegt diskordant über dem Unteren Steinsalz und kann im Bereich der Heilbronner Mulde vom Liegenden zum Hangenden weiter untergliedert werden in:

- Bändersalz 1 (BSZ1),
- Anhydritbank 1 (Ah1),
- Bändersalz 2 (BSZ2),
- Anhydritbank 2 (Ah2),
- Bändersalz 3 (BSZ3).

Das Bändersalz 3 ist aus früheren Kartierungen im Kontrollbereich bekannt [GLA (1997)], wird jedoch durch die Auffahrungen des neuen Deponiebereichs nicht aufgeschlossen [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

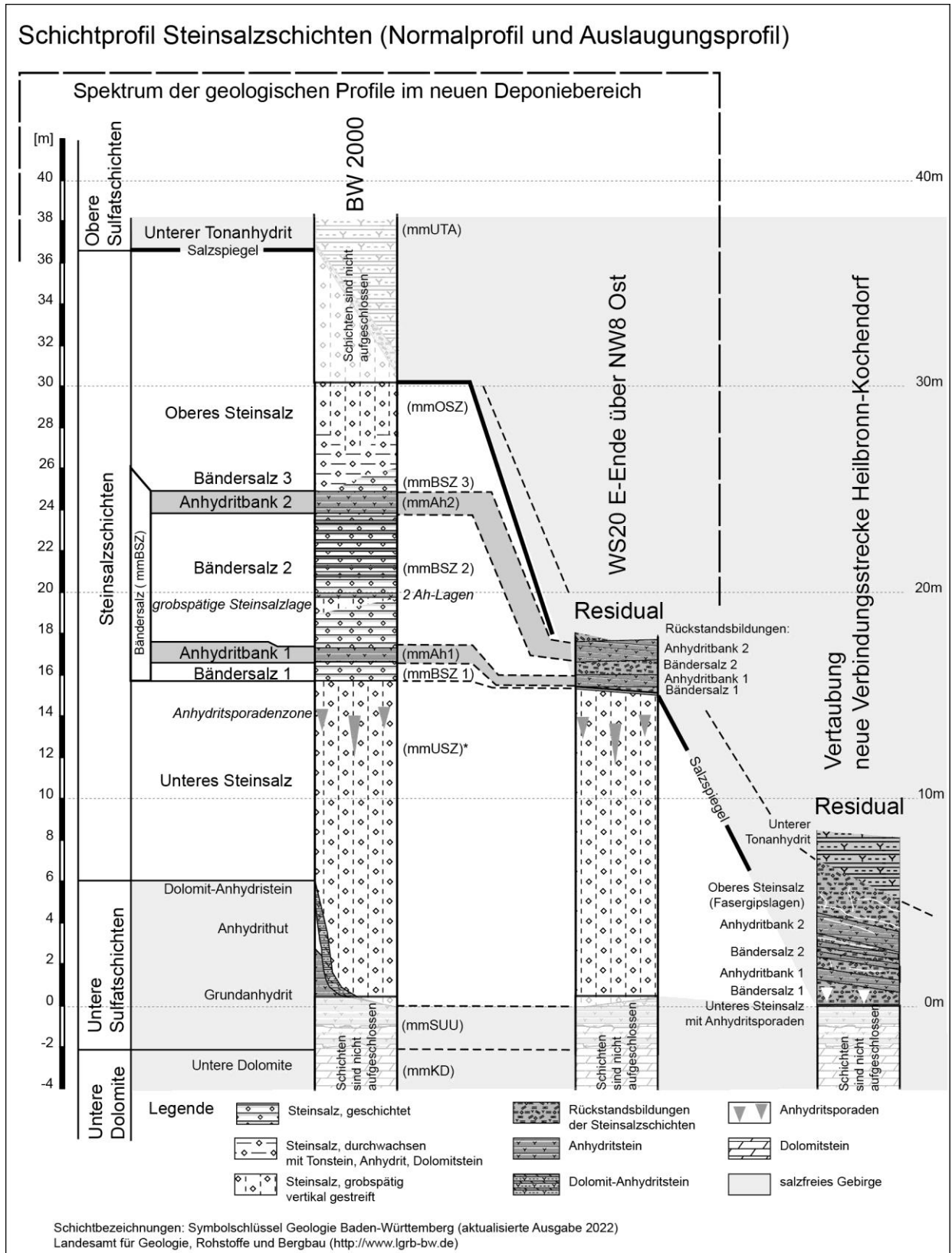


Abbildung 12: Normalprofil des neuen Deponiebereichs mit zwei charakteristischen Profilen im Südwesten und Nordosten [aus nach JONISCHKEIT (2024)].

Die Schichtung und Schichtenfolge des Bändersalzes ist sehr gleichmäßig ausgebildet. Das Bändersalz weist aufgrund seiner Ausbildung auf einen ehemals sehr homogenen, relativ ebenen Ablagerungsraum hin. Das Obere Steinsalz (im Hangenden des Bändersalzes) wird im neuen Deponiebereich nicht aufgeschlossen. Der Schichtaufbau und die Strukturen und Phänomene innerhalb der Steinsalzsichten unterscheiden sich somit im neuen Deponiebereich nicht grundsätzlich von den Kartierergebnissen im Kontrollbereich des Bergwerkes Heilbronn und im Bergwerk Kochendorf.

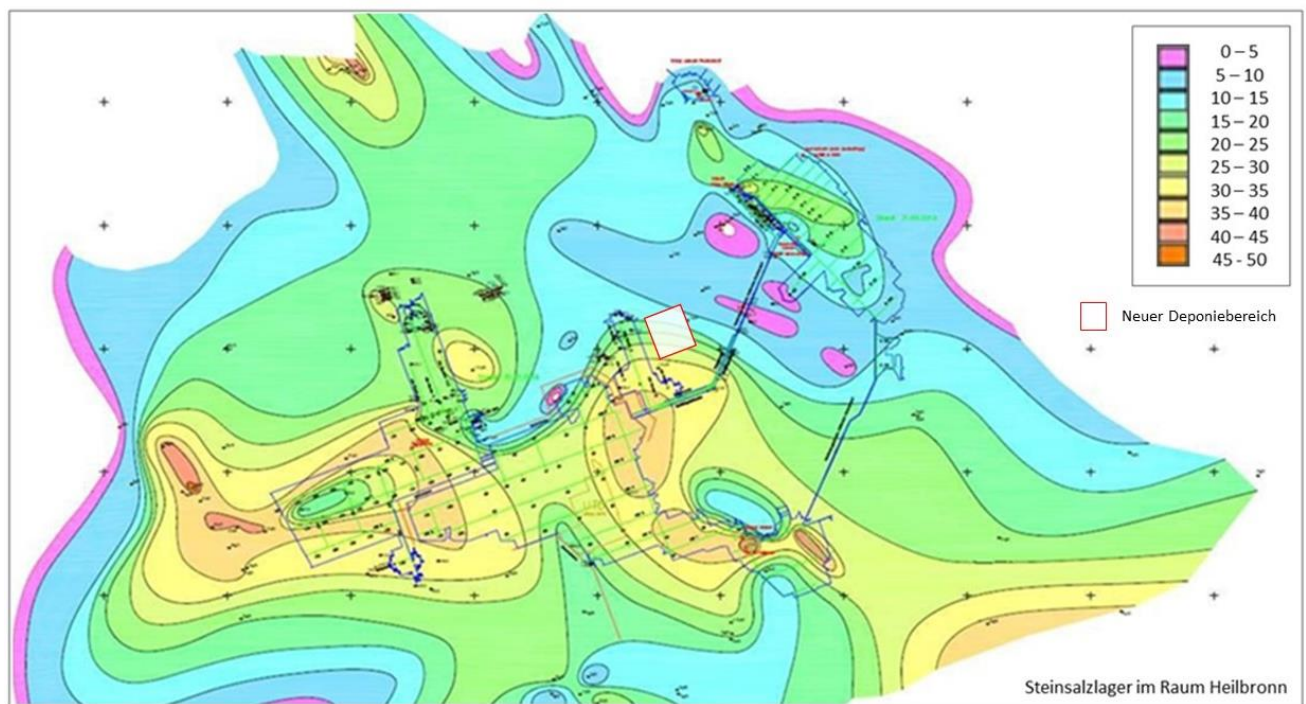


Abbildung 13: Räumliche Ausdehnung und Mächtigkeit der Steinsalzsichten im Raum Heilbronn [aus: JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018), geändert nach LGRB (2000)].

Im Rahmen der Kartierung des neuen Deponiebereichs wurde die digitalisierte Steinsalzmächtigkeitsschichtkarte für den Raum Heilbronn aus dem Jahre 2001 [LGRB (2000)] aktualisiert und fortgeschrieben.

Unverritzte Salzmächtigkeit

Die Mächtigkeit der Schichtenfolge des Mittleren Muschelkalks (mm) und insbesondere der aufgeschlossenen Steinsalzsichten im Bereich des gesamten Steinsalzbergwerkes Heilbronn wurde in zahlreichen Gutachten, Berichten, Schachtaufschlüssen sowie Vorbohrungen zu Schachtaufschlüssen erfasst. In Tabelle 3 sind die Mächtigkeitsangaben für die Schichtenfolge des

Mittleren Muschelkalks (mm) sowie die Mächtigkeitsangaben der Salinarschichten für das Salzbergwerk Heilbronn aus den folgenden Quellen zusammengestellt:

- Normalprofil des Steinsalzlagers SCHACHL (1954)
- Normalprofil des Steinsalzlagers (1958/1973, 1986, 1997) WILD, BRUNNER et al., GLA
- Schacht Franken (GLA 1995) nach ROGOWSKI und WEGENER (1977)
- SCHACHT KÖNIG WILHELM II (GLA 1992) SCHACHL (1952)
- Schacht Konradsberg RAUSCH & ROGOWSKI (1999)
- Geologisches Gutachten (2006) JONISCHKEIT (2006)
- Vorbohrungen VB01 und VB02 (2007) JONISCHKEIT (2007)
- Kartierbericht BW 2000 (2018) JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)

Die Mächtigkeit der Oberen Sulfatschichten bzw. der Barrierschicht schwankt zwischen 40 m und 50 m. Die Untergliederung und die Mächtigkeiten des eigentlichen Steinsalzlagers wurden in allen oben erwähnten Quellen erfasst (vgl. Tabelle 4) in den Vorbohrungen VB01 und VB02 waren die Steinsalzsichten bis auf Reste des Unteren Steinsalzes ausgelaugt. Für das Untersuchungsgebiet sind dabei die, mit Hilfe der aktuell durchgeführten UT-Kartierung [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)], erfassten Schichtmächtigkeiten relevant.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Schichtmächtigkeitsangaben für die Schichtenfolge im Mittleren Muschelkalk im Bereich des Bergwerkes Heilbronn, aufgeschlossene Schichtenfolge aus verschiedenen Quellen. Übernommen und ergänzt aus: [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018) und JONISCHKEIT (2024)].

Geologische Beschreibung		Schichtmächtigkeitsangaben aus Gutachten, Berichten, Schachtaufschlüssen und deren Vorbohrungen								UT-Kartierung		
		Schacht König Wilhelm II 1992	Schacht Franken 1977	Schacht Konradsberg 1999	VB01 2007	VB02 2007	GLA 1995	Jonischkeit 2006	Brunner et al./GLA/Wild '86/'97/'58*'73	Schachl 1954	Jonischkeit (2024)	
Obere Dolomite	Lauffen-Horizont	9,7	-	10	8,5	10,7	-	-	10-20	-	-	
Obere Sulfatschichten	Oberer Anhydrit	-	-	9,8	9,9	9,23	-	-	40	36	-	
	Oberer Tonanhydrit	32,4	-	12	15,52	10,37	-	-			-	
	Zwischenanhydrit	-	-	8,4	5,88	7,28	-	-			-	
	Zwischendolomit	2,05	-	2,2	2,32	3,06	-	-			-	
	Unterer Tonanhydrit	-	-	-	9,63	8,32	-	-			-	
	Rückstandsbildungen	14,6	-	7,6	5,55	5,14	-	-	9-10	-	keine Angabe	
Steinsalzsichten	Oberes Steinsalz	19	12-15	12,15	ausgelaugt	ausgelaugt	7-10	10,5	12-15	4,8	12-15	0-20
	Bändersalz 3		0,8	0,8					1			
	Anhydritbank 2		0,8	0,8					1			
	Bändersalz 2		5	5					6			
	Anhydritbank 1		0,4	0,4					0,5			
	Bändersalz 1		1,5	1,5					1,5	1,4		
	Unteres Steinsalz		15	14,17					5,2	5	10-20	10,8
Untere Sulfatschichten	Dolomit-Anhydritstein	-	-	<3	0,48	-	-	-	-	-	-	
	Grundanhydrit	1,4	1,5-2,5	2,1	-	2,78	-	-	2	2-3	-	
Untere Dolomite	Untere Dolomite	3,35	1,5-3,0	3,4	-	-	-	-	1,5-3,0	2-3	-	
Orbicularisschichten	Obere Orbicularisschichten	-	-	3,2	-	-	-	-	4,5	-	-	
	Geislinger-Bank	-	-	-	-	-	-	-		-		
	Untere Orbicularisschichten	-	-	6,33	-	-	-	-		-		

Die Gesamtmächtigkeit der Steinsalzschieben wird basierend auf den Angaben in den Berichten und Gutachten mit einer Spanne von 26,1 m (geringste Gesamtmächtigkeit) und 50,0 m (größte Gesamtmächtigkeit) angegeben, wobei für die Berechnung der Summe der Mächtigkeiten der Einzelschichten jeweils die größte erfasste Mächtigkeit verwendet wurde. Aus Tabelle 3 kann zudem abgeleitet werden, dass die Mächtigkeiten der Einzelschichten und damit die resultierenden Gesamtmächtigkeiten dennoch nah beieinander liegen [bspw.: Schacht Franken, (GLA 1995), BRUNNER et al., SCHACHL (1954) sowie JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

Tabelle 4: Zusammenstellung der Schichtmächtigkeitsangaben für die Steinsalzschieben.
[übernommen und ergänzt aus: JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018) und JONISCHKEIT (2024)].

Geologische Beschreibung		Schichtmächtigkeitsangaben aus Gutachten, Berichten, Schachtaufschlüssen und Vorbohrungen zu Schachtaufschlüssen									aktuelle UT-Kartierung	
		Schacht König Wilhelm II 1992	Schacht Franken 1977	Schacht Konradsberg 1999	VB01 2007	VB02 2007	GLA 1995	Jonischkeit 2006	Brunner et al./GLA/Wild '86/'97/'58+'73	Schachl 1954	Jonischkeit 2024	
Steinsalzschieben	Oberes Steinsalz	19,0	12-15	12,15			12-15	4,8	12-15	0-20		
	Bändersalz 3		0,8						0,8	1,0	-	
	Anhydritbank 2		0,8						0,8	1,0		
	Bändersalz 2		5,0	9,73	ausgelaugt	ausgelaugt	7-10	10,5	5,0	6,0		
	Anhydritbank 1		0,4						0,4	0,5		
	Bändersalz 1		1,5						1,5	1,5	1,4	
	Unteres Steinsalz		15,0	14,17	5,2	5,0	10-20	10,8	15,0	12-20	33-15	
Gesamtmächtigkeit der Steinsalzschieben:		-	35,5 - 38,5	36,05	-	-	29,0 - 45,0	26,1	35,5 - 38,5	22,0 - 50,0		

Die im Bereich der neuen Deponie durch lange Firstkontrollbohrungen festgestellten Mächtigkeiten der Steinsalzschieben bestätigen die Mächtigkeitsangaben der älteren Gutachten und Berichte sehr gut. Die Steinsalzmächtigkeiten betragen im SW des Nachweisgebiets bis zu 33 m und nehmen nach NE auf 15–20 m ab. Demnach sind im SW noch das Bändersalz und Teile des oberen Steinsalzes vorhanden. Im NE sind unter normalen Lagerungsverhältnissen (ohne Bändersalzmulden) das Obere Steinsalz vollständig und Teile des Bändersalzes teilweise oder vollständig ausgelaugt. Eine Restmächtigkeit des Steinsalzes über den aufgefahrenen Hohlräumen von mindestens 8 m wurde durch die bislang gemachten Firstkontrollbohrungen bestätigt [JONISCHKEIT (2024) Stand 9/2023]. Sofern punktuell oder in einzelnen Bereichen eine geringfügige Unterschreitung vorhanden ist, kann diese im Gesamtkontext vernachlässigt werden.

Die vorhandenen Steinsalzmächtigkeiten zeigen, dass sich die Abfolge der Steinsalzschieben über ein großes Gebiet hinweg gleichmäßig abgelagert hat. Die normale Ausbildung der Schichtfolge und die tektonisch ungestörten Lagerungsverhältnisse werden als Indiz für die Integrität der Barrierschicht (Obere Sulfatschichten) im gesamten Nachweisgebiet und darüber hinaus gewertet. Für die geologische Barrierschicht kann damit eine ausreichende räumliche Ausdehnung und unverritzte Mächtigkeit angenommen werden, so dass die Barrierefunktionen auf Dauer sichergestellt wird [JONISCHKEIT (2024) Stand 9/2023].

2.3.2.6 Erkundungsbohrungen von über Tage und unter Tage

Im Nahfeld des neuen Deponiebereichs sind folgende Tagesbohrungen dokumentiert:

348	Bohrjahr	1970
	Erbohrte Mächtigkeit Salz	10,2 m
	NN-Höhe Bohransatzpunkt	+170,5
	NN-Höhe Hangendes	+2,5
	NN-Höhe Liegendes	-7,7
349	Bohrjahr	1970
	Erbohrte Mächtigkeit Salz	15,7 m
	NN-Höhe Bohransatzpunkt	+181,9
	NN-Höhe Hangendes	+8,4
	NN-Höhe Liegendes	-7,3

Die Lage der Bohrungen ist in Abbildung 11 enthalten. Alle Bohrungen besitzen im Abbauniveau einen Sicherheitspfeiler von 50 m. Aufgrund der vorhandenen Datenlage und verfügbarer Informationen zu den Bohrungen ist dieser Sicherheitspfeiler als ausreichend einzuschätzen.

Die Bohrung SWS-115 liegt unmittelbar neben der SWS-349 und erbrachte eine Salzmächtigkeit von 23,3 m. Durch eine Plausibilitätsprüfung über die erbohrte Salzmächtigkeit gegenüber der SWS-349 [JONISCHKEIT (2021)] konnte das erbohrte Profil der SWS-115 allerdings nicht bestätigt werden.

Die Bohrung B6 existiert an der angegebenen Stelle nicht. Nach einer Plausibilitätsprüfung [JONISCHKEIT (2021)] der Bohrergebnisse durch einen Review der geologischen Schichtprofile und Ansprachen entspricht diese Bohrung den Daten der Bohrung "Im Schlund" im Biberacherfeld. Aus diesem Grund ist die als Bohrung B6 verortete Bohrung südwestlich des geplanten Deponiebereiches innerhalb der Sicherheitsfeste für die Betrachtungen zur Langzeitsicherheit nicht von Belang.

2.3.2.7 Abgedämmte oder abzdämmende Teile des Grubengebäudes

Im Bergwerk Heilbronn kann aus verschiedenen Gründen eine Abdämmung von Teilfeldern erforderlich werden. So kann bspw. im höchst unwahrscheinlichen Falle von unbeherrschbarem Wasserzutritt aufgrund von Gewinnungstätigkeiten das betroffene, aktive Gewinnungsfeld vom

übrigen Grubengebäude an einer jeweils definierten Stelle mittels langzeitsicherem Verschlussbauwerk abgedämmt werden. Momentan liegen keine Randbedingungen vor, die an den genannten Stellen Streckenabdichtungen erforderlich machen.

Im Zuge der Einstellung des Grubenbetriebes des Bergwerkes Heilbronn sind zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit der im Grubenfeld betriebenen UTD- und UTV-Bereiche unter den gegenwärtigen Randbedingungen bzw. nach Aufnahme des Deponiebetriebes im neuen Deponiebereich an folgenden Stellen Streckenabdichtungen erforderlich:

Verbindungsstrecken nach Kochendorf

Sicherheitsfeste Kontrollbereich zum Nordfeld

Sicherheitsfeste Kontrollbereich zum neuen Deponiebereich

Sicherheitsfeste Bergwerk 2000 - Seebuckelfeld

Sicherheitsfeste Bergwerk 2000 – Südwestfeld

2.4 Hydrogeologische Verhältnisse

2.4.1 Hydrogeologischer Überblick

Die hydrogeologischen Basisdaten werden unter anderem in einem aktuellen Gutachten [HYDRAG (2025) Antragsunterlage Teil D 2] zusammengestellt und bewertet. Die hydrogeologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet²⁾ sind durch den geschichteten Aufbau des Gebirges und den mehrfachen Wechsel von Grundwasserleitern und -stauern geprägt. Dies führt zur Ausbildung von mehreren Grundwasserstockwerken im Deckgebirge, die vom Hangenden zum Liegenden in den Oberen Dolomiten des Mittleren Muschelkalks über den Oberen Sulfatschichten enden. Die Grundwasserstockwerke über den Oberen Sulfatschichten stehen miteinander in hydraulischer Korrespondenz.

Die Grundwasser-Fließverhältnisse werden von der Schichtlagerung und tektonischen Strukturen in der Heilbronner Mulde sowie dem Neckar bestimmt, welcher hier als Vorfluter fungiert und die Heilbronner Mulde von S nach N durchfließt. Hauptsächlich in den Randbereichen der Mulde sickert Wasser der Schwerkraft folgend in die stratigrafisch tiefer liegenden Schichten und strömt dem Muldenzentrum und dem Neckar zu [RAUSCH et al. (1995)].

²⁾ *Das Untersuchungsgebiet für die Ermittlung und Beschreibung der hydrogeologischen Basisinformationen wurde gemäß DepV entsprechend der Grundwasserfließrichtung bzgl. Zustrom- und Abstrombereich des neuen Deponiebereichs sowie in Bezug auf die angrenzenden Wasserschutzgebiete festgelegt.*

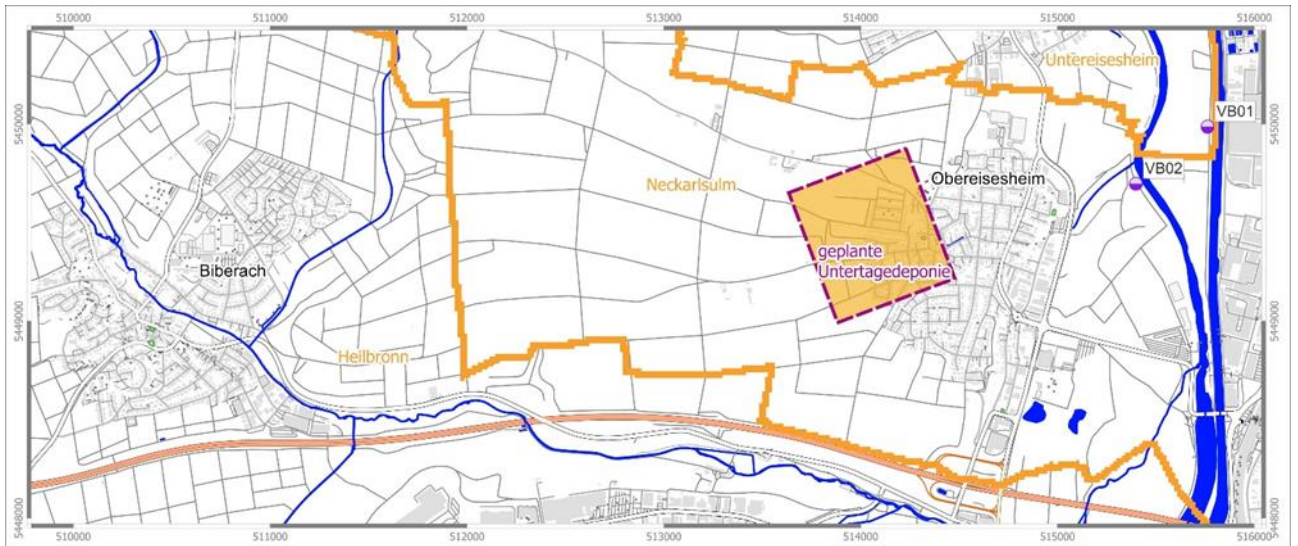


Abbildung 14: Untersuchungsgebiet mit Lage des neuen Deponiebereiches sowie der Gemeinden und Gemeindegrenzen.

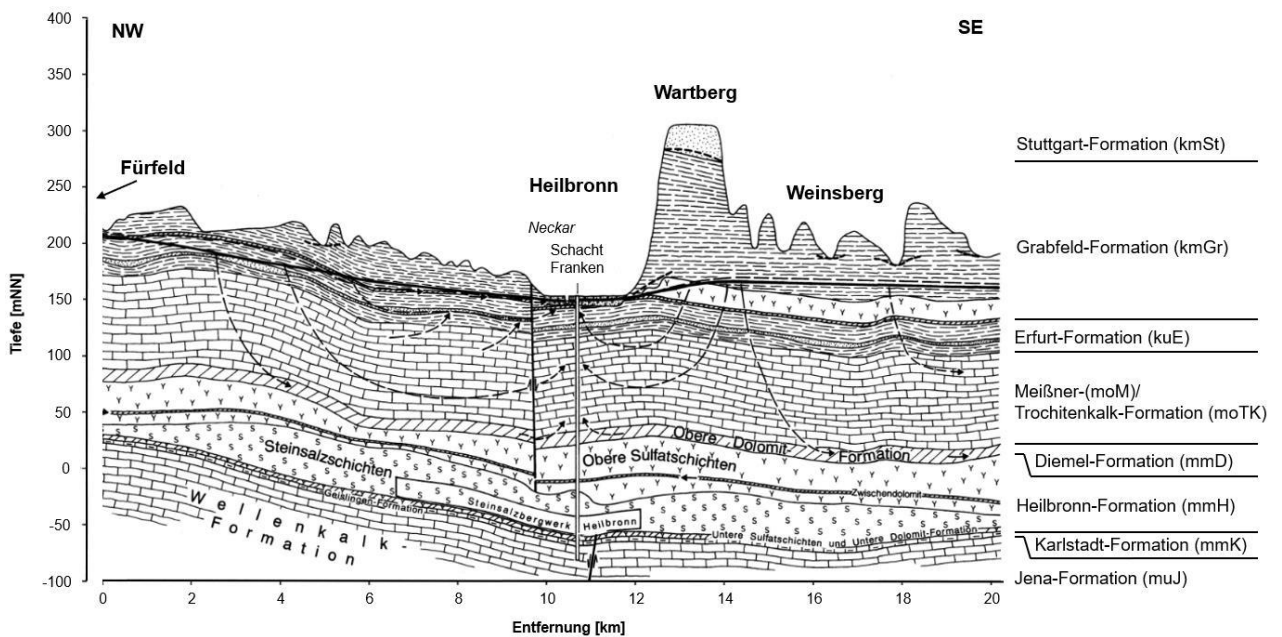


Abbildung 15: Hydrogeologischer Schnitt der Heilbronner Mulde [LGRB (2000)].

„Dies hat zur Folge, dass das Grundwasser in den Festgesteinsgrundwasserleitern in großen Teilen der Heilbronner Mulde und insbesondere im Untersuchungsgebiet als gespanntes Grundwasser vorliegt und im Muldentiefsten, wo es in tektonischen Störungszonen (Heilbronner Störungszone)

dem nach oben abfallenden Druckgradienten folgend bis in die Neckarkiese aufsteigen könnte.“
[JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)]

Die Gäuhochflächen westlich der Neckar-Talaue werden über den Böllinger Bach, die Lein sowie deren Zuflüsse in Richtung E in den Neckar als Vorfluter entwässert.

Eine generelle Gliederung der geologischen Haupteinheiten sowie die entsprechend zugehörigen hydrogeologischen Einheiten für den Raum der Heilbronner Mulde ist in Abbildung 15 dargestellt.

2.4.2 Grundwasserstockwerke und Grundwasserbewegung

2.4.2.1 Deckgebirge

Die Grundwasserleiter über den Oberen Sulfatschichten (Barriereschicht über dem Steinsalzlager) gliedern sich in Porengrundwasserleiter der Talfüllungen und Hochterrassenschotter (Quartär) vom Hangenden zum Liegenden in die Kluft- bis Karstgrundwasserleiter der Festgesteine des Keupers (Gipskeuper und Unterkeuper) und der Karstgrundwasserleiter des Oberen Muschelkalks sowie der Oberen Dolomite des Mittleren Muschelkalks (Trias).

Quartär

Talfüllungen in den Flusstälern

Die quartären Talfüllungen bestehen aus 2 m bis 8 m mächtigen fluviatilen Ablagerungen, welche sich aus sandigen, schluffig-tonigen Kiesen zusammensetzen, welche im allgemeinen Transmissivitäten zwischen 1×10^{-2} und 1×10^{-3} m²/s aufweisen [GLA (1995)]. Teilweise sind organische, stark tonige Altarmfüllungen anzutreffen. Überlagert werden diese Ablagerungen von Auelehm. Die hydrogeologische Charakterisierung dieser Ablagerungen wird als Lockergesteine mit oberflächennahen Porengrundwasserleitern vorgenommen. Das Grundwasser der Talkiese erneuert sich durch Uferfiltration, durch Zuflüsse von den Talhängen sowie aus den lateral und an der Sohle anstehenden Festgesteinsgrundwasserleitern der Keuperschichten sowie durch Grundwasserneubildung auf den Talaueflächen [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

Hochterrassenschotter im Zentralbereich der Heilbronner Mulde

Diese sind im Mittel ca. 20 m mächtig. Bereichsweise treten sie als bis zu 40 m mächtige fluviatile Schotter, bestehend aus sandigen Kiesen auf. Hydrogeologisch werden die Hochterrassenschotter als Lockergesteine mit oberflächennahen Porengrundwasserleitern charakterisiert. Die Grundwasserneubildung erfolgt bei den Hochterrassenschottern sowohl über die bis zu 10 m mächtige Lösslehmauflage als auch hauptsächlich über Zuflüsse aus Grundwasserleitern des Unterkeupers [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

Tabelle 5: Alte und neue Gliederung des hydrogeologischen Untergrundaufbaus im Untersuchungsgebiet aus [aus HYDRAG (2025), nach MU BW (1995), LRGB (2022)]

Geologische Einheit				GW-Leiter / -Geringleiter
Untergruppe	Horizont / Fazies / Subformation (Synonym)	Formation (Synonym)		
Mittelkeuper	Obere Bunte Estherienschichten	Obere Grabfeld- Formation	Grabfeld-Formation (Gipskeuper)	Grundwassergeringleiter
	Graue Estherienschichten			
	Horizont der Malachitbänke			
	Untere Bunte Estherienschichten			
	Engelhofen-Horizont	Mittlere Grabfeld- Formation		Grundwasserleiter
	Mittlerer Gipshorizont mit Tonsteinlagen			Grundwassergeringleiter
	Bleiglanzbänke			Grundwasserleiter
	Dunkelrote Mergel	Untere Grabfeld- Formation		Grundwassergeringleiter
	Entringen-Sulfat			Grundwasserleiter
	Bochingen-Horizont			Grundwasserleiter
	Grundgipsschichten			Grundwassergeringleiter
Unterkeuper	Grenzdolomit	Oberer Lettenkeuper	Erfurt-Formation	Grundwasserleiter
	Grüne Mergel			
	Linguladolomit mit Sandstein			
	Oberer Anoplophoradolomit			
	Untere Anoplophoradolomit			
	Anthrakonitbank			
	Pflanzenschiefer-Sandstein	Unterer Lettenkeuper		
	Süddeutscher Hauptsandstein			
	Dolomitsteinbänke mit Estherienton			
	Basisschicht			
Oberer Muschelkalk	Wimpfen-Subformation (Fränkische Grenzschichten)	Meißner-Formation	Trochitenkalk- Formation	Grundwasserleiter
	Künzelsau-Subformation			
	Tonplatten-Subformation			
	Blauland-Subformation	Oberer Trochitenkalk		Grundwasserleiter
	Neckarwestheim-Subformation	Unterer Trochitenkalk		Grundwassergeringleiter
	Haßmersheim-Subformation			Grundwasserleiter
	Kraichgau-Subformation (Zwergfauna-Schichten)			
Mittlerer Muschelkalk	Obere Dolomite	Diemel-Formation	Grundwasserleiter	
	Leingarten-Subformation (Obere Sulfatschichten)	Heilbronn-Formation	Grundwassergeringleiter (im Nachweisgebiet nicht wasserführend)	
	Kochendorf-Subformation (Steinsalzschiefer)			
	Jagstfeld-Subformation (Untere Sulfatschichten)			

Keuper

Schilfsandstein und höherer Mittelkeuper

Sedimentäre Folge von Sandsteinen und Tonsteinen. Die Sandsteine des Schilfsandstein bilden Porengrundwasserleiter; die Tonsteine der Bunten Mergel und des Schilfsandsteins stellen Geringleiter dar. Gesteine des Schilfsandsteins und höheren Mittelkeupers sind im Nachweisgebiet vollständig abgetragen.

Gipskeuper

Die Einheit des Gipskeupers beschreibt sich als eine 125 m bis 150 m mächtige sedimentäre Schichtenfolge (außerhalb der Heilbronner Mulde) bestehend aus Tonsteinen, Sulfatgestein (Gips) und Karbonatgesteinsbänken. Die hydrogeologische Charakterisierung kann wie folgt beschrieben werden: Wechselfolge Kluft- bis Karstgrundwasserleiter (Karbonatgesteinsbänke mit schichtiger Grundwasserführung) und Grundwassergeringleiter (Tonsteine). Die Sulfatgesteine sind teilweise verkarstet (Sulfatkarst), unter den Gäuflächen ausgelaugt.

Der Gipskeuper ist im Untersuchungsgebiet bis auf wenige Reste unter den Gäuhochflächen vollständig abgetragen und die Sulfatgesteine sind nach aktuellem Kenntnisstand vollständig ausgelaugt [GLA (1992) und GLA (1995)].

Unterkeuper

Der Unterkeuper bildet eine 10 m bis 35 m mächtige sedimentäre Folge. Diese besteht aus meist dolomitischen Karbonatbänken und Sandsteinen in Wechsellagerung mit Tonsteinen. Hydrogeologische Charakterisierung: Schichtig gegliederter Kluftgrundwasserleiter mit bereichsweiser Verkarstung der Karbonatbänke. Ergiebiger Grundwasserleiter im Bereich der Gäuflächen.

Muschelkalk

Oberer Muschelkalk (mo) und Obere Dolomite des Mittleren Muschelkalks (mm)

Die hydrogeologische Einheit des Muschelkalks über der Barrierschicht untergliedert sich in den Oberen Muschelkalk und die Oberen Dolomite des Mittleren Muschelkalks. Der 85 bis 90 m mächtige Obere Muschelkalk besteht aus einer Wechselfolge von Kalk- und Tonmergelsteinen. Die Oberen Dolomite bestehen aus Dolomit und Mergel, mit einer Mächtigkeit von ca. 25 m.

Die geklüfteten und zum Teil verkarsteten Karbonatgesteine des Mittleren und Oberen Muschelkalks zählen im Untersuchungsgebiet zu den für die Steinsalzlagerstätte hydrogeologisch bedeutsamen Festgesteinsgrundwasserleitern. Der Obere Muschelkalk und die Oberen Dolomite des Mittleren Muschelkalks bilden einen Kluft- und Karstgrundwasserleiter. Die Kalksteine und Dolomitsteine (Karbonatgesteine) sind bereichsweise verkarstet und durch dünne, gering wasser-durchlässige Tonmergelsteinhorizonte getrennt. Durch die ca. 8 m mächtigen tonigen

Haßmersheim-Schichten wird dieser Grundwasserleiter in einen unteren und oberen Teil getrennt [RAUSCH et al. (1995)]. Während die oberen Schichten im Mittel eine Transmissivität von $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ aufweisen, besitzen die unteren Bereiche dieses Grundwasserleiter (Zwergfaunaschichten und Obere Dolomitregion) etwas höhere Transmissivitäten von etwa $7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ [GLA (1995)].

Das Grundwasser dieser Schichtglieder wird im Randbereich der Heilbronner Mulde neu gebildet und fließt von dort im Schichtfallen dem zentralen Bereich der Heilbronner Mulde zu. Im Untersuchungsgebiet ist das Grundwasser im Muschelkalk gespannt, was ein Einsinken von Wässern aus dem Unterkeuper weitestgehend verhindert [RAUSCH et al. (1995)]. Die Oberen Dolomite (mmD) grenzen im Liegenden an die Oberen Sulfatschichten.

2.4.2.2 Obere Sulfatschichten

Die Oberen Sulfatschichten (früher Obere Anhydritregion) stellen die Basisschicht (Aquifersohle) für den hangenden Grundwasserleiter dar [GLA (1995)]. In der Heilbronner Mulde sind die Oberen Sulfatschichten nicht ausgelaugt; nur im Kontakt zum hangenden Grundwasserleiter (Obere Dolomite) sind die obersten Schichten der Oberen Sulfatschichten teilweise angelöst und/oder vergipst [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)].

Die Oberen Sulfatschichten fungieren als natürliche Barriere gegen Wasserzutritte aus den hangenden Grundwasserleitern ins Steinsalzlager und verhindern so eine vollständige Auslaugung [nach JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)]. Für die Oberen Sulfatschichten gilt bei ungestörter Lagerung, welche im Bereich des Untersuchungsgebietes vorliegen, grundsätzlich eine geringe bis nicht vorhandene Durchlässigkeit (wasserundurchlässig).

2.4.2.3 Zwischendolomit

Im unteren Drittel der Oberen Sulfatschichten schaltet sich der Zwischendolomit ein, welcher auf Grund seiner Gesteinsbeschaffenheit als gering wasserleitend eingestuft wird. Er kann also Reste von Wässern enthalten, die im frischen Aufschluss lokal zu temporären Zuflüssen führen können [GLA (1992)].

Für den Bereich des benachbarten Bergwerkes Kochendorf sind Laugenzutritte aus dem Zwischendolomit bekannt und dokumentiert. Umfassende Untersuchungen haben ergeben [GLA (1992 und 1995)], dass es sich bei den Lösungen im Zwischendolomit um fossile Laugen handelt, die keinen Anteil am rezenten Grundwasserumsatz haben und mit den Grundwasserstockwerken über den Oberen Sulfatschichten hydraulisch nicht in Verbindung stehen. Die Beobachtung der geringen Zulaufraten zeigte eine kontinuierliche Abnahme, was prinzipiell auf ein Auslaufen eines begrenzten Reservoirs schließen lässt.

Im Nachweisgebiet des neuen Deponiebereiches existieren keine Hinweise auf eine Lösungsführung im Zwischendolomit. Die Wahrscheinlichkeit eines Laugenzutritts aus dem Zwischendolomit wird daher als sehr gering eingeschätzt. Treten dennoch Zuläufe aus dieser Struktur auf, so ist von einem begrenzten Reservoirvolumen auszugehen, welches mit entsprechenden Maßnahmen bewirtschaftet werden kann³⁾.

2.4.2.4 Auslaugungsgesteine am Top des Steinsalzlagers

Die Auslaugungsgesteine am Top des Steinsalzlagers bestehen aus schluffig-tonigen Rückstandsbildungen der Steinsalzsichten, in welche Sulfatgesteinslagen des ausgelaugten Bändersalzes eingeschaltet sind [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)]. In den Auslaugungsgesteinen können sich Restlaugen befinden, weshalb sie für die Steinsalzsichten und das gesamte Grubengebäude von Bedeutung sind.

Nach [GLA 1995 und JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)] sind die im Raum Heilbronn auftretenden Schwankungen der Steinsalzmächtigkeit vorrangig auf die Auslaugungen des Steinsalzes zurückzuführen. Die Mächtigkeit und das Vorkommen der Auslaugungsgesteine (Rückstandsbildungen) stehen in direktem Zusammenhang mit dem Auslaugungsgrad und der Reinheit des Steinsalzes. „Je geringer die Auslaugung und je reiner das Steinsalzpaket ist, desto geringmächtiger sind die Rückstandsbildungen“.

Sämtliche geogenen Laugenzutritte im Bergwerk Heilbronn werden von Restlaugen aus den Auslaugungsgesteinen über dem Steinsalzlager gespeist. Im neuen Deponiebereich konnten bisher keine geogenen Laugenzuflüsse festgestellt werden. Die Restlaugen stehen weder mit dem Zwischendolomit noch mit den Grundwasserstockwerken über den Oberen Sulfatschichten in einer hydraulischen Verbindung.

2.4.2.5 Steinsalzlager

Das Steinsalzlager liegt im Untersuchungsgebiet in rund 200 m Tiefe und fällt flach nach SE ein. Die 40 m bis 50 m mächtigen Sulfatgesteine der Oberen Sulfatschichten liegen über dem Steinsalzlager und werden bei ungestörter Lagerung als wasserundurchlässig angesehen. Sie nehmen am Grundwasserabfluss der Aquifere im Hangenden praktisch nicht Teil.

³⁾ *Umfassende Untersuchungen im Bergwerk Heilbronn-Kochendorf haben ergeben, dass es sich bei den Lösungen im Zwischendolomit um fossile Wässer, aus ca. 90 % Dolomit bestehend, handelt, die keinen Anteil am rezenten Grundwasserumsatz haben und mit den Grundwasserstockwerken über den Obere Sulfatschichten hydraulisch nicht in Verbindung stehen. Dieser Umstand kann in erster Linie aus den unterschiedlichen Druckniveaus abgeleitet werden, mit 6 bar ist der Druck im Zwischendolomit weniger als halb so groß, wie er bei der existierenden Grundwasseroberfläche sein müsste, nämlich 13-15 bar (GLA 1992).*

2.4.2.6 Unteren Sulfatschichten

Aufgrund der Erkenntnisse von [JONISCHKEIT & ZWIEßLER (2018)] kann das unverritzte Liegende des Steinsalzlagers als trocken bezeichnet werden. Das Eindringen von Salzlösungen in die Liegenden Schichten wie Untere Dolomite oder Orbicularisschichten kann bei intakten Lagerungsverhältnissen der Unteren Sulfatschichten ausgeschlossen werden. Der Grundanhydrit übernimmt hierbei die Barrierefunktion.

2.4.3 Durchlässigkeiten und Fließgeschwindigkeiten

Kapitel 2.4.2 behandelte die Grundwasserstockwerke und die Grundwasserbewegung im Raum Heilbronn. Dabei wurde auch auf die Durchlässigkeit der einzelnen Grundwasserleiter eingegangen. Nachfolgend werden diese Erkenntnisse kurz zusammengefasst dargestellt.

- Porengrundwasserleiter (Quartär): Durchlässigkeiten ca. $2,5 \cdot 10^{-3}$ m/s, mittlere Transivität ca. $7,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s
- Kluft- bis Karstgrundwasserleiter (ku, mo, Top mm):
 - Schilfsandstein (km2): sehr gut wasserdurchlässig (durch Klüftigkeit), jedoch nur gering wasserführend.
 - Gipskeuper (km1): gering wasserdurchlässig. Schichtwasser kann in klüftigen Karbonatgesteinsbänken auftreten.
 - Unterer Keuper (ku): schichtig aufgebauter Grundwasserleiter. Wechsellagerung von klüftigen Dolomit- oder Sandsteinen (gut wasserdurchlässig) und Tonsteinschichten (gering wasserdurchlässig). Mittlere Transivität ca. $7,7 \cdot 10^{-4}$ m²/s
 - Oberer Muschelkalk (mo) + Top mm: Durchlässigkeiten zwischen $3 \cdot 10^{-4}$ m²/s und $7 \cdot 10^{-4}$ m²/s (Grenzbereich mo/mm) wasserdurchlässig. Mehrere Grundwasserstockwerke. Im Bereich des Vorfluters (Neckar) kann das Grundwasser des Muschelkalks auf Grund des höheren Drucks in hangende Grundwasserleiter aufsteigen.
 - Mittlerer Muschelkalk (mm):
 - Obere Dolomite (mmD): wasserdurchlässig. Werden zusammen mit den Grundwasserstockwerken des Oberen Muschelkalks behandelt.
 - Obere Sulfatschichten (mSUO): geringe Durchlässigkeit und geringe Wasserführung im oberen Bereich der Oberen Sulfatschichten. Abgesehen vom Zwischendolomit sind die übrigen Bereiche der Oberen Sulfatschichten wasserundurchlässig.

Zwischendolomit (mmZWD): relativ gering wasserdurchlässig, Wasservorkommen ist vom hangenden Grundwasserleiter (mo/mm) hydraulisch getrennt (intakte Barrierschicht, Verheilung von Klüften).

Steinsalzsichten (mmSSZ): keine Wasserführung.

Untere Sulfatschichten (mmSUU): geringe Gebirgsdurchlässigkeit und geringe Ausdehnung von auftretenden Laugenvorkommen; unbeeinflusste Gebirgsdurchlässigkeit $<10^{-8}$ m/s.

- Untere Dolomite (mmKD): siehe *
- Orbicularisschichten (mmOR): siehe *
- Unterer Muschelkalk (mu): siehe *

* *Zur Abschätzung der Wasserdurchlässigkeit der Gesteine unterhalb der Sohle (Untere Dolomite (mmKD), Orbicularisschichten (mmOR) sowie Unterer Muschelkalk (mu)) liegen nur begrenzte Informationen vor. Hydraulische Packertests in der Erkundungsbohrung Kochendorf [ERCOSPLAN (2020)] ergaben für den Liegendbereich der Salzlagerstätte kf-Werte von $1,34 \cdot 10^{-12}$ m/s, was nach der DIN 18130 als sehr schwach durchlässig einzustufen ist und den prinzipiellen hydraulischen Anforderungen an eine Barrierefunktion entspricht. Im Untersuchungsgebiet wurden keine geogenen Laugen aus dem Liegenden kartiert.*

Hinsichtlich Gaspermeabilitäten können Salzgesteine prinzipiell als gasdicht charakterisiert werden. Die nachweisbaren Gaspermeabilitäten von Steinsalz liegen im Falle von intakten und ungestörten Zuständen deutlich unter 10^{-20} m² [POPP et al. (2015)]. Das Salzlager der Heilbronner Lagerstätte im neuen Deponiebereich kann aufgrund der moderaten Belastungssituation des Pfeilertragsystems prinzipiell als lösungs- bzw. gasdicht angesehen werden.

Grundsätzlich laufen die Grundwasserbewegungen und Strömungen in den Grundwasserleitern des Schilfsandstein, des Gipskeupers, des Unteren Keupers sowie des Oberen Muschelkalks (einschließlich der Oberen Dolomite des Mittleren Muschelkalks) ab.

Die übergeordneten Fließrichtungen des Grundwassers werden von den vorhandenen Wasserscheiden beeinflusst. Nordwestlich und südöstlich des Steinsalzbergwerkes Heilbronn tritt eine Wasserscheide auf. Die Grundwasserströmung zwischen den Wasserscheiden erfolgt generell in Richtung Vorfluter (Neckar).

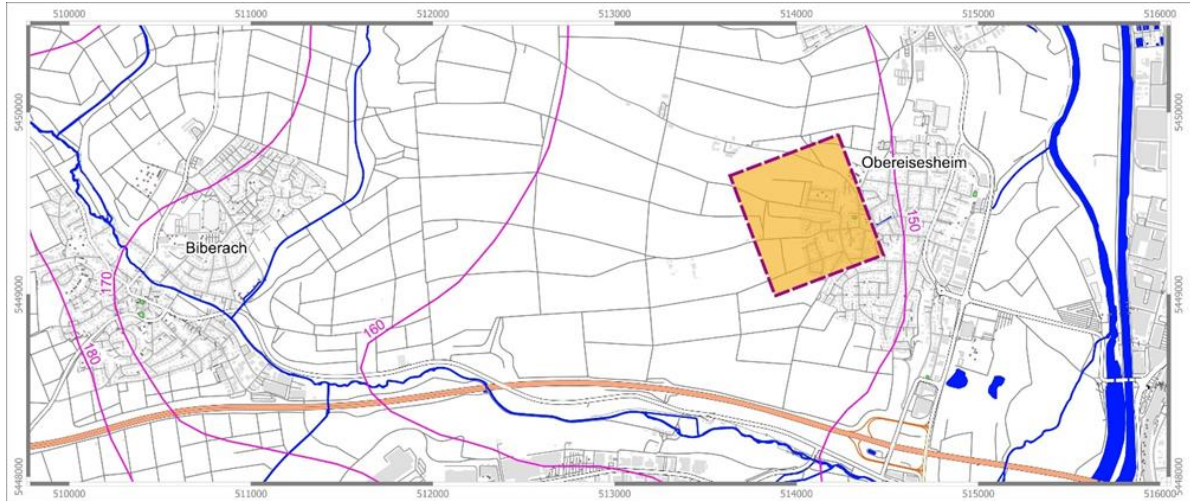


Abbildung 16: Grundwasserhöhengleichen der Meißner- und Trochitenkalk-Formation oberhalb / unterhalb der Haßmersheim-Subformation zum 18.09.2000 – 22.09.2000, der neue Deponiebereich ist durch das orange Feld markiert [HYDRAG (2025)].

So genannte Grundwasseroberflächen und Grundwasserdruckflächen treten im Grundwasserleiter des Oberen Muschelkalks mit den Oberen Dolomiten des Mittleren Muschelkalks auf. Weitere Grundwasseroberflächen treten in den Tonsteinen des Gipskeupers sowie in den Schilfsandsteinen auf.

2.4.4 Mineralisation des Grundwassers und Grundwasserchemismus

Quartär

Beide Deckschichten Quartäre Talfüllungen und Hochterrassenschotter beinhalten überwiegend hydrogenkarbonatische, hydrogenkarbonatisch-sulfatische bzw. sulfatisch, normal erdalkalische Wässer. Der unterschiedliche Chemismus ist auf Zuflüsse aus dem Oberen Muschelkalk, dem Unterkeuper und dem Gipskeuper (Mittelkeuper) zurückzuführen [HYDRAG (2025)].

Keuper

Die rund < 50 bis 115 m mächtige Mittlere bis Untere Grabfeld-Formation (vorwiegend Grundwassergeringleiter), welche sich vor allem aus Tonsteinen und Sulfatgesteinen zusammensetzt, wird durch die Kluft- bis Karstgrundwasserleiter des ca. 2 m mächtigen Engelhofen-Horizonts, bestehend aus Dolomitbänken, der rund 2 m mächtigen Bleiglanzbanke sowie des ca. 5 m mächtigen Bochingen-Horizonts, jeweils vorwiegend aus Anhydritbänken bestehend, durchbrochen. Grundsätzlich ist die Funktion des Grundwasserleiters hier abhängig vom Verwitterungsgrad der Grabfeld-Formation. Verwitterte Bereiche sind eher als schichtig gegliederte Grundwasserleiter ausgebildet, während

unverwitterte Bereiche überwiegend GW-Geringleiter sind mit zwischengeschobenen Grundwasserbänken. Die Wässer der Grabfeld-Formation sind von der Auslaugung der Sulfatgesteine geprägt und vor allem hydrokarbonatisch, erdalkalisch dominiert [HYDRAG (2025)].

Die Erfurt-Formation, bestehend aus 10 – 35 m mächtigen Dolomitsteinen mit Ton- und Schluffsteinen sowie Quarzsandsteinen, ist einer der bedeutendsten Festgesteinsgrundwasserleiter im Untersuchungsgebiet mit einer mittleren Transivität von $7,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ und einer Brunnenförderung von ca. 15 l/s. Dieses Grundwasserstockwerk steht, neben einem geringen Zufluss aus den darüberliegenden GW-Leiter der Grabfeld-Formation, auch in Verbindung mit dem darunterliegenden Oberen Teil des Tiefen Karstgrundwasserstockwerks. Die Wässer der Erfurt-Formation haben überwiegend einen hydrokarbonatischen Charakter [HYDRAG (2025)].

Muschelkalk

Die rund 46 - 51 m mächtige Meißner-Formation, welche aus Kalksteinen in Wechsellagerung mit geringmächtigen Tonmergelsteinen besteht, bildet zusammen mit der durchschnittlich ca. 25 m mächtigen Oberen Trochitenkalk-Formation, bestehend aus Kalksteinen, den Oberen Teil des Tiefen Karstgrundwasserstockwerks. Dieses Grundwasserstockwerk besitzt eine mittlere Transivität von $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ und einer Brunnenförderung von ca. 10 l/s. Die Basis dieser Formation bilden die ca. 10 m mächtige Haßmersheim-Schichten, welche den Oberen Teil des Tiefen Karstgrundwasserstockwerks vom Unteren Teil (Unterer Trochitenkalk und Untere Dolomite) durch geringdurchlässige Wechselfolgen von Tonmergelstein mit Trochitenkalkbänken trennen. Das Tiefe Karstgrundwasserstockwerk Unten entwässert aufgrund der dort herrschenden gespannten Grundwasserverhältnisse überwiegend hydrogenkarbonatisch-sulfatische und normal erdalkalische Wässer ins Tiefe Karstgrundwasserstockwerk Oben [HYDRAG (2025)].

Unterhalb der Haßmersheim-Schichten bildet der durchschnittlich ca. 25 m mächtige untere Teil des Trochitenkalk-Formation, bestehend aus bioturbaten Kalksteinen, zusammen mit der darunterliegenden Diemel-Formation, bestehend aus durchschnittlich ca. 10 m mächtigen dolomitischen Kalk- und Mergelsteinen, den Unteren Teil des Tiefen Karstgrundwasserstockwerks. Hier liegen durchgängig gespannte Grundwasserverhältnisse vor, sodass aufgrund der Potentialunterschiede von +0,1 bis +0,2 m der Untere Teil des Tiefen Karstgrundwasserstockwerks in den Oberen Teil des Tiefen Karstgrundwasserstockwerks entwässert. Dieses Grundwasserstockwerk bildet vielfach ebenfalls einen der bedeutendsten Grundwasserleiter mit einer mittleren Transivität von $7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ und einer Brunnenförderung von ca. 15 l/s im Untersuchungsgebiet aus. Die zunehmende Mineralisation des Unteren Teils des Tiefen Karstgrundwasserstockwerks wird durch den Kontakt zum Salinar des Mittleren Muschelkalks begründet. In Abhängigkeit von der Lage und der strukturgeologischen Beschaffenheit des jeweiligen Untersuchungsgebiets sind die Wässer im Unteren Teil des Tiefen Karstgrundwasserstockwerks in Abhängigkeit vom Grad der Auslaugung

der Salzgesteine vor allem hydrogenkarbonatisch-sulfatisch, normal erdalkalisch und sulfatisch-chloridisch dominiert [HYDRAG (2025)].

Die an der Basis des Unteren Teils des Tiefen Karstgrundwasserstockwerks angrenzende Heilbronn-Formation (Muschelkalksalinar), bestehend aus ca. 40 - 50 m mächtigen Sulfatgesteinen und bis zu 40 m mächtigen Steinsalzschiechten, nimmt dagegen nicht am Grundwasserabfluss der höher liegenden Aquifere teil. Dies zeigen Untersuchungen von Tropfwasser aus den Sulfatgesteinschichten oberhalb der Steinsalzschiechten im Bergwerk Kochendorf, welches nach isotopenhydrologischen Altersdatierungen älter als 50.000 Jahre ist, während die Wässer aus dem Tiefen Karstgrundwasserstockwerk isotopenhydrologisch jüngere, mittlere Verweilzeiten von einigen Jahren bis mehrere Jahrzehnte aufweisen [HYDRAG (2025)].

Der Zwischendolomit der Oberen Sulfatschichten wird als gering wasserführend eingestuft, wobei es sich hier um fossile Lösungen handelt. Lösungsanalysen aus dem Zwischendolomit des benachbarten Bergwerkes Kochendorf können aufgrund ihres Alters als geogene Wässer eingeordnet werden [GLA (1996)]. Die Beobachtung von Zuläufen aus diesem Horizont im Grubenfeld Kochendorf zeigten eine kontinuierliche Abnahme, was prinzipiell auf ein Auslaufen eines begrenzten Reservoirs schließen lässt und die Genese dieser Lösungen bestätigt.

2.4.5 Grundwassernutzung, Schutz- und Vorranggebiete

Im Untersuchungsgebiet bestehen sechs Wasserschutzgebiete (WSG) unterschiedlicher Größe, wovon drei WSG direkt an den neuen Deponiebereich der Untertagedeponie angrenzen und im weiteren Verlauf näher betrachtet werden. Verschiedene Flächen im Zustrombereich des neuen Deponiebereichs werden gemäß dem Regionalplan 2020 der Region Heilbronn-Franken als Vorbehaltsgebiet zur Sicherung von Wasservorkommen ausgewiesen (siehe Abbildung 17).

Tabelle 6: Brunnenkennzahlen WSG Neckarsulm-Obereisesheim [HYDRAG (2025)]

Brunnen	Seitzentor	Schmalwiesen
Flurstück	3360	3775
Brunnentiefe	32 m	42,4 m
erschlossener Aquifer	kuE, moM	kuE, moM
Gw-Entnahmemengerechte		
- täglich	1,8 l/s	1,7 l/s
- max. / d	155 m ³	147 m ³
- Jahr (2022)	24.430 m ³	10.793 m ³

Im Osten des Gebiets liegt das WSG Neckarsulm mit 153,44 ha, im Süden das WSG Böllingerbachtal mit 289,89 ha und im Nordwesten das WSG Neckarsulm-Obereisesheim mit 236,1 ha Fläche. Bezogen auf die Grundwasserfließrichtung liegt das WSG Böllingerbachtal nebenstromig und wird deshalb nicht weiter betrachtet. Daher werden nur die Wasserschutzgebiete Neckarsulm-Obereisesheim und Neckarsulm aufgrund deren Lage oberhalb bzw. im Abstrombereich des neuen Deponiebereichs betrachtet [HYDRAG (2025)].

Das Wasserschutzgebiet Neckarsulm-Obereisesheim, welches zur öffentlichen Wasserversorgung die beiden Tiefbrunnen „Seitzentor“ und „Schmalwiesen“ betreibt, umfasst eine Fläche von 236,1 ha und erstreckt sich über die Gemarkungen Ober- / Untereisesheim, Wimpfen und Biberach [LRA HN (1999)]. Die beiden Tiefbrunnen auf der Gemarkung Obereisesheim entnehmen Grundwasser aus Schichten des Unterkeuper (Erfurtformation - kuE) und dem oberen Hauptmuschelkalk (Meißner-Formation moM). In Tabelle 6 sind die Brunnenkennzahlen für das WSG Neckarsulm-Obereisesheim zusammengestellt.

Im Wasserschutzgebiet Neckarsulm werden zur öffentlichen Wasserversorgung 13 Brunnen, 8 Flachbrunnen (Brunnen 1 – 8) und 5 Tiefbrunnen (Schachtbrunnen P1 und P2 [TB Freibadbrunnen], Brunnen IV [TB1 außer Betrieb], Brunnen XI [TB2] und Brunnen XII [TB3]) betrieben. Das WSG erstreckt sich über die Gemarkungen Obereisesheim und Neckarsulm. Die zwei Tiefbrunnen P1 und P2 im Freibad entnehmen Grundwasser aus Schichten der Meißner-Formation (moM) / Trochitenkalk-Formation (moTK), die zwei Tiefbrunnen TB2 und TB3 aus den Schichten der Erfurt-Formation (kuE) / Meißner-Formation (moM) und die 8 Flachbrunnen aus den Schichten der unteren Grabfeld- (kmGr) / Erfurt-Formation (kuE) (HYDRAG [2025]).

In Tabelle 7 sind die Brunnenkennzahlen des WSG Neckarsulm zusammengestellt worden.

Tabelle 7: Brunnenkennzahlen WSG Neckarsulm-Obereisesheim [HYDRAG (2025)]

Brunnen	Flachbrunne n 1 - 8	TB Freibad P1	TB Freibad P2	TB 2	TB 3
Flurstück	1268/1, 1331, 1333, 1335	1403	1403	1268/1	1345
Brunnentiefe	Ø 7 m	74 m	74 m	46,5 m	46,5 m
erschlossener Aquifer	kmGr, kuE	moM, moTK	moM, moTK	kuE, moM	kuE, moM
Gw-Entnahmemengerechte - Jahr (2022)	85.462 m ³	23.236 m ³	24.192 m ³	98.134 m ³	9.514 m ³

Zwischen den beiden Wasserschutzgebieten Neckarsulm und Neckarsulm-Obereisesheim liegt zudem ein Quellschacht an der Kirche Obereisesheim, welcher sich auf der Gemarkung Obereisesheim erstreckt. Der Quellschacht fördert Grundwasser aus Schichten der unteren Grabfeld- (kmGr) / Erfurt-Formation (kuE) [HYDRAG (2025)]. Die Brunnenkennzahlen dieses Quellschachtes sind in Tabelle 8 enthalten.

Tabelle 8: Brunnenkennzahlen Quellschacht „Kirche Obereisesheim“ [HYDRAG (2025)]

Brunnen	Quellschacht
Flurstück	28
erschlossener Aquifer	kmGr, kuE
Gw-Entnahmemengerechte	2,9 l/s
- täglich	53.949 m ³
- Jahr (2022)	

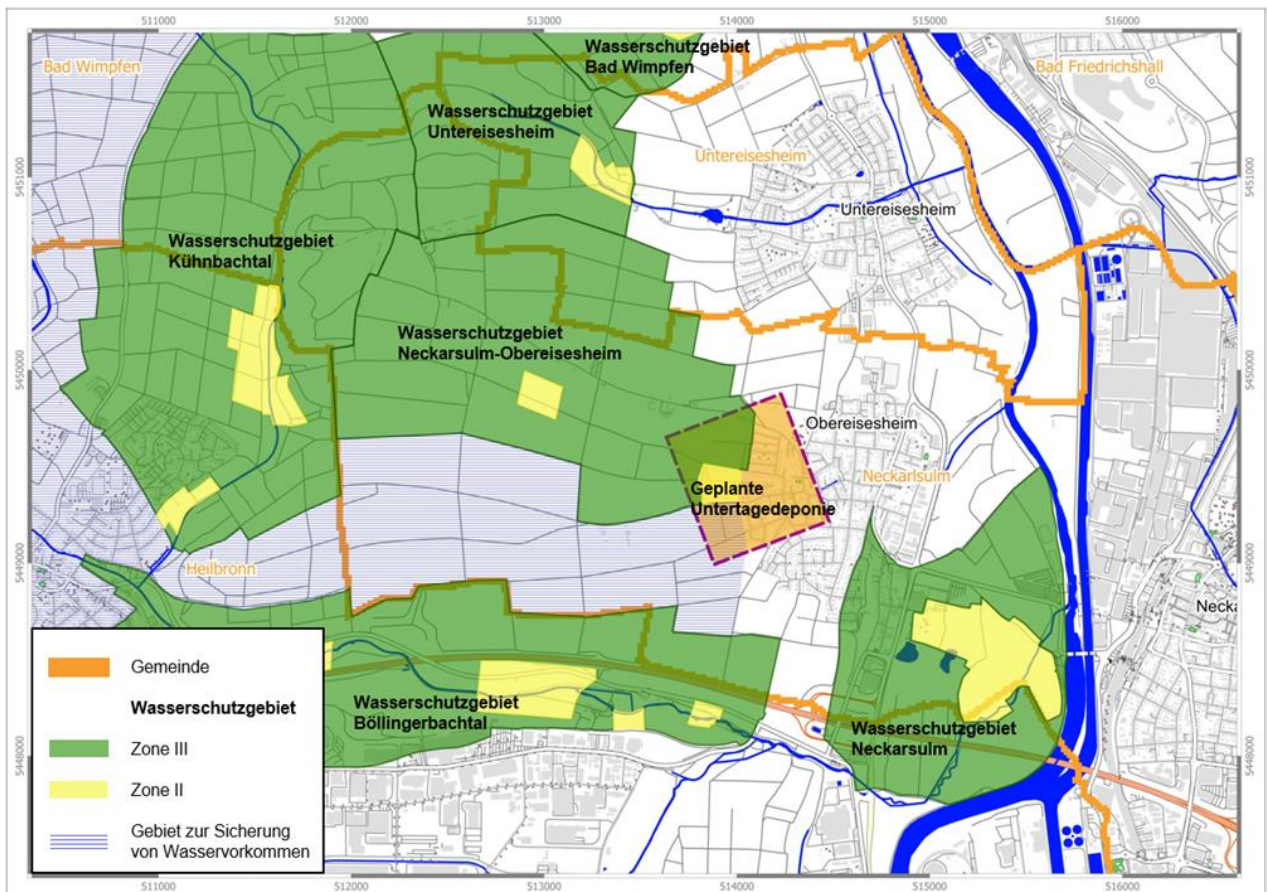


Abbildung 17: Wasserschutzgebiete sowie Vorbehaltsgebiet zur Sicherung von Wasservorkommen um den neuen Deponiebereich [LUBW (2024)].

Das Salzbergwerk Heilbronn wie auch der geplante Deponiebereich sind prinzipiell durch die Barrierschichten im Hangenden der Lagerstätte von den grundwasserführenden Deckgebirgsbereichen getrennt. Aus diesem Grunde berühren die Tätigkeiten im Rahmen der Salzgewinnung bzw. die geplanten Maßnahmen zur Deponierung den Schutzzweck des Wasserschutzgebietes nicht. Eine Beeinträchtigung des WSG durch die Untertagedeponie kann damit ausgeschlossen werden [HYDRAG (2025)].

2.4.6 Fließ- und Standgewässer

Das Untersuchungsgebiet wird durch den Neckar etwa zwischen km 109 und km 103 von Süd nach Nord durchquert. Durch Begradigung, Kanalisierung und Stauhaltungen entsprechen der Flusslauf und die Wasserstände heute nicht mehr den natürlichen Verhältnissen. Der Neckar ist als Bundeswasserstraße für Großmotorgüterschiffe bis zu km 203 schiffbar.

Im Norden des Untersuchungsgebiets fließen die Klinge, der Kressgraben, der Morschbach (Mersch), der Mühlbach und der Töppelsgraben, Gewässer II. Ordnung, bevor diese in den Neckar münden. Direkt östlich des geplanten neuen Deponiebereiches fließt der Riedgraben, ein Gewässer II. Ordnung und mündet ebenfalls in den Neckar. Im Süden des Untersuchungsgebiets verläuft der Böllinger Bach. Dieser ist ein Gewässer II. Ordnung und nimmt von Osten nach Westen zahlreiche kleinere Gewässerläufe auf, bevor er in den Neckar mündet [HYDRAG (2025)].

Tabelle 9: Fließgewässer im Untersuchungsgebiet [LUBW (2022)]

Fließgewässer	Länge [km]
Klinge	0,541
Kressgraben	2,047
Morschbach (Mersch)	1,73
Mühlbach	2,764
Töppelsgraben	1,948
Riedgraben	0,487
Böllinger Bach	17,102
Seebuckelgraben	0,6
Michelbach	3,281
Kühnbach	4,207
Allmendgraben	1,239
NN-RD6	0,836
Wächtelesgraben	1,201

2.5 Abfallablagerung in der UTD

2.5.1 Abfallarten und -mengen, Abfallbeschaffenheit

Die Abfälle, die in der UTD beseitigt werden sollen, stammen aus industriellen Prozessen und können ein hohes Schadstoffpotential aufweisen [SWS (2021)]. Dabei handelt es sich beispielsweise um folgende Materialien:

- Abfälle mit hohen Schwermetallgehalten aus der Glasindustrie, dem Metallrecycling oder Stahlwerken,
- Salzhaltige Abfälle wie cyanidhaltige Härtesalze,
- Quecksilberhaltige Abfälle,
- Revisionsrückstände aus Müllheizkraftwerken,
- Filterstäube aus Müllheizkraftwerken und Sonderabfallverbrennungsanlagen,
- Abfälle aus Altlastensanierungen mit hohen Schwermetallgehalten.

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Fortführung der UTD-Aktivitäten im neuen Deponiebereich wurde ein aktualisiertes Stoffgutachten zur Beurteilung möglicher Reaktionen bzw. Reaktionsmechanismen der vorgesehenen Abfallarten erstellt (Antragsunterlage Teil Sicherheit und Geotechnik D 1, K-UTEC (2025)), welches die Annahmen und Vorgaben des Stoffgutachtens von 1998 vor dem Hintergrund des aktuellen rechtlichen Rahmens an die neuen Erkenntnisse aus Wissenschaft und Forschung anpasst und fortschreibt.

Das Stoffgutachten schlägt Stoffgruppen für die Einlagerung der Abfälle vor. Die Stoffgruppen werden von der SWS vor Inbetriebnahme der UTD definiert, um sicherzustellen, dass sicherheitsgefährdende Reaktionen der Abfälle untereinander ausgeschlossen und nur miteinander verträgliche Abfälle gemeinsam in eine Deponiekammer abgelagert werden.

Die in der UTD einzulagernden Abfälle müssen die Vorgaben nach § 6 und § 7 DepV erfüllen und für die gefahrlose Ablagerung im Salzgestein untereinander sowie mit dem Ablagerungsmedium verträglich sein. Bevor neue Abfälle in die UTD aufgenommen werden, wird eine Eignungsprüfung durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Anforderungen gemäß § 7 DepV sowie die internen Annahmebedingungen der SWS AG grundsätzlich eingehalten werden. Auf der Grundlage dieser Prüfergebnisse werden alle sicherheitsrelevanten Parameter für die Annahme und Ablagerung der Abfälle festgelegt, wie zum Beispiel die Zuordnung der Abfälle zu einer Stoffgruppe, die Verpackung oder Parameter für die Annahmekontrolle.

2.5.2 Ablagerungskonzept und -technik

Die einzulagernden Abfälle werden in verpackter Form per Bahn- oder LKW-Anlieferung (z. B. in Big Bags oder Spannringdeckelfässern) in Heilbronn angenommen und in der UTD abgelagert. Aktuell wird ein Teil der für die UTD angelieferten Abfälle in der Konditionierungsanlage in Bad Friedrichshall-Kochendorf von der SWS oder in einer Partneranlage konditioniert, verpackt und über öffentliche Straßen zur Deponieannahme im Werk Heilbronn transportiert.

Nach der Anlieferung der Abfälle erfolgt eine Annahmekontrolle mit einer Identitätsprüfung des angelieferten Abfalls inklusive Entnahme einer Rückstellprobe sowie eine Plausibilitätsprüfung der Anlieferpapiere. Zudem erfolgt eine Kontrolle der Gebinde auf Sauberkeit, Standsicherheit und korrekte Beschriftung. Gegebenenfalls wird für einzelne Abfallgruppen ein zusätzliches definiertes Freigabeverfahren (z. B. Gasmessungen, pH-Wert-Bestimmung) für die Ablagerung unter Tage durchgeführt.

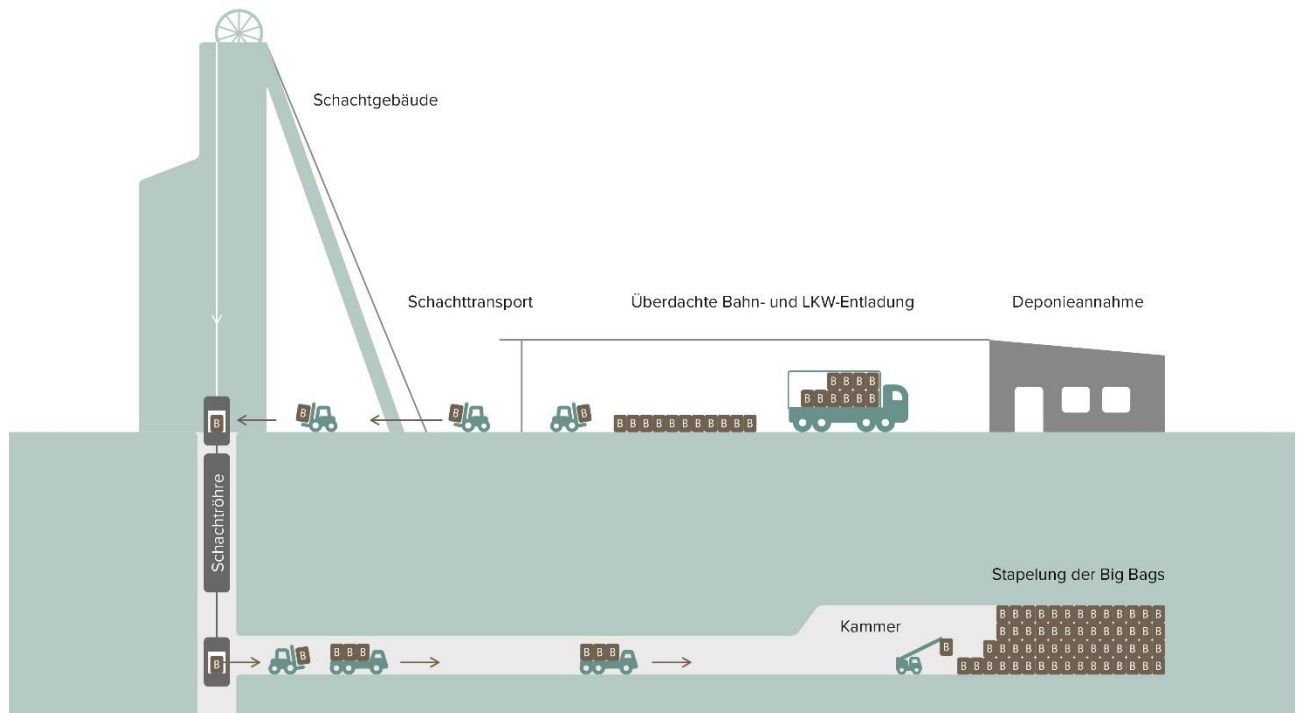


Abbildung 18: Ablagerungskonzept zum Betrieb des neuen Deponiebereichs [SWS (2022)]

Nach erfolgreicher Annahmekontrolle wird die Anlieferung in der elektronischen Betriebsdatenerfassung dokumentiert und mit der Stoffgruppe des Abfalls beschriftet und der Abfall zur Förderung nach Untertage freigegeben. Die Förderung nach unter Tage erfolgt primär über den Schacht „Franken“, in Ausnahmefällen über den Schacht „König Wilhelm II“. Die Abfallgebilde werden gemäß den Vorgaben des Technischen Betriebsablaufes (Teil C der Antragsunterlagen) auf der Transportetage des Schachtfördergefäßes nach unter Tage verbracht und über eine festgelegte,

vom Salzgewinnungsbetrieb getrennte Deponiestrecke mittels Pritschen-LKW's zur Untertage-deponie transportiert.

Die Einlagerung der Abfallstoffe im neuen Deponiebereich erfolgt anhand der Empfehlungen aus dem Stoffgutachten in den hierfür vorgesehenen Deponiekammern. Hierbei werden nur Abfälle in einer Kammer gemeinsam abgelagert, welche auf Grundlage des Stoffgutachtens bzw. nachfolgender Bewertungen derselben Stoffgruppe zugeordnet sind. Die Bewirtschaftung der Ablagerungskammern richtet sich nach einem Ablagerungsplan, welcher Herrichtungsarbeiten (u. a. Firstsicherung, Installation der Kammerbewetterung, Installation von Mess- und Warneinrichtungen) sowie den Betrieb und den Abschluss der Ablagerung in einer Kammer regelt und regelmäßig angepasst wird sowie bei Bedarf fortgeschrieben wird.

Die abzulagernden Gebinde werden von den Transportfahrzeugen entnommen und beginnend am Kammerende dicht an dicht abgesetzt (siehe Abbildung 18). Die Stapelung der Gebinde erfolgt in der Regel drei- bis vierlagig in Abhängigkeit der jeweiligen Gebindehöhe. Im Bedarfsfall können einzelne Abfallstoffe im Anschluss an die Ablagerung mit Aufbereitungsrückständen, bspw. Bergeversatz (Restsalze aus der eigenen Aufbereitung) abgedeckt werden.

Der Einbauort der Abfälle wird im Betriebstagebuch dokumentiert. Aus den erfassten Daten wird ein Abfallkataster nach den Vorgaben der Deponieverordnung erstellt und die Rückverfolgbarkeit jeder Anlieferung gewährleistet.

2.5.3 Geomechanisches Verhalten der Abfälle

Zur Überwachung und Begleitung des bisherigen Deponiebetriebes und verschiedener Versatzmaßnahmen im Bergwerk Heilbronn - Kochendorf wurde 1992 ein wissenschaftliches Versuchsbegleitprogramm unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Natau initiiert [NATAU (1993)]. Dieses Programm beinhaltete unter anderem In Situ Messungen und Untersuchungen, wie beispielsweise:

- Konvergenzmessungen,
- Lastplattenversuche,
- Festenquerdehnungsmessungen,
- Festenspannungsmessungen,
- Versatzspannungsmessungen.

Eine Auswertung der Messergebnisse konnte zeigen, dass die langfristig zu erwartenden Barrierebeanspruchungen sowie die sich einstellenden Oberflächensenkungen in der Nachbetriebsphase im zulässigen Bereich liegen.

Eine numerische Modellrechnung für den Deponiebereich und den erwarteten Abfallmaterialien ergab ein Endmaß der Oberflächensenkungen von ca. 0,75 m nach Erreichen eines stabilen Gleichgewichtszustandes nach etwa 5.000 Jahren [MORGENSTERN, KONIETZKY & FLIß (2024)].

Die Eigenschaften der eingebrachten Abfallstoffe werden systematisch überwacht und entsprechend geprüft, wobei neben der analytisch-chemischen Zusammensetzung auch die erreichbaren Volumenkompressionen für einzelne Stoffgruppen ermittelt und mit den Soll-Werten verglichen werden.

2.5.4 Reaktionsverhalten der Abfälle bei Zutritt von Wasser und salinaren Lösungen

Für die Ablagerung in der neuen UTD werden anhand verschiedener Abfalleigenschaften Stoffgruppen definiert, welche in verschiedenen Bereichen der Deponie getrennt abgelagert werden, um unerwünschte Reaktionen zu verhindern. Im Stoffgutachten (K-UTEK (2025)) werden insgesamt sieben Stoffgruppen sowie eine optionale Stoffgruppe für Einzelprojekte empfohlen.

Bei Aufnahme neuer Abfälle in die UTD wird eine entsprechende Eignungsprüfung durchgeführt, um die Einhaltung der Anforderungen gemäß § 7 DepV sowie der internen Annahmebedingungen der SWS AG sicherzustellen. Auf Basis der Eignungsprüfungen werden die Abfälle einer Stoffgruppe zugeordnet, die Verpackung festgelegt und Parameter für die Annahmekontrolle bestimmt.

Das Reaktionsverhalten der Abfälle wurde insbesondere im Hinblick auf ein mögliches Gasbildungspotenzial eingehend über Versuchsreihen in externen Laboreinrichtungen und verschiedene gutachterliche Stellungnahmen durch die MPA Stuttgart untersucht und bewertet [MPA Stuttgart (2004a – d)], so dass kritische Reaktionspfade ausgeschlossen werden können.

Die Begutachtungen zielten insbesondere auf Wasserstoffbildungspotenziale im Schüttgut ab, während die Big Bags mit den konditionierten Filterstäuben als Wasserstoff-neutral betrachtet werden. Durch die Konditionierung wird zwar die H₂-Bildung angestoßen, wobei diese im Big Bag jedoch in der Regel nach 24 Stunden spätestens aber nach 72 Stunden abgeklungen ist. Daher werden die Big Bags für die UTD 3 Tage nach der Konditionierung offen stehen gelassen, und erst danach verschlossen, wenn die H₂-Bildung abgeschlossen ist. Dies belegen stichprobenartige H₂-Messungen an den Big Bags.

3 Sicherheitskonzept

3.1 Standortbezogene Sicherheitsbeurteilung

Die Ablagerung der Abfallstoffe im neuen Deponiebereich des Bergwerkes Heilbronn erfolgt nach dem Prinzip des vollständigen und dauerhaften Einschlusses. Die Abfälle werden durch ein Multi-barrierensystem, bestehend aus den vorhandenen geologischen Schutzschichten und den nach Betriebsschluss geplanten geotechnischen Barrieren dauerhaft von der Biosphäre getrennt.

Das Sicherheitskonzept umfasst neben dem Nachweis der Standsicherheit während der Ablagerungs- und Stilllegungsphase einen Langzeitsicherheitsnachweis über den Nachweis der Integrität bzw. der Funktionalität der geologischen und geotechnischen Barrieren. Der Bewertungszeitraum für die Langzeitsicherheit endet mit dem Zeitpunkt, zu welchem ein quasistationärer Gleichgewichtszustand im Verbundsystem Wirtsgestein - Deponiegut erreicht wird.

Als mögliche Gefährdungsszenarien werden neben dem Versagen des Pfeilertragsystems und damit verbunden einer möglichen Verletzung der Integrität der Barrierehorizonte weitere Szenarien unter Ansatz von Erdbebeneinwirkungen mit extrem geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie fiktiver Einwirkungsfaktoren untersucht.

Der neue Deponiebereich ist vom aktiven Gewinnungsbetrieb durch Sicherheitsfesten getrennt, so dass eine wechselseitige Beeinflussung von Steinsalzgewinnung und Abfalleinlagerung im laufenden Grubenbetrieb ausgeschlossen werden kann. Die vorhandenen Zugangsstrecken können bei Bedarf jederzeit mit Verschlussbauwerken verschlossen werden.

Nach Einstellung des Deponiebetriebes werden die Zugangsstrecken zur Deponie mit langzeitstabilen Verschlussbauwerken dauerhaft abgedichtet und vom übrigen Grubenfeld getrennt. Die Verfüllung und Abdichtung der vorhandenen Tagesschächte nach Beendigung des Grubenbetriebes wird nach dem Stand der Technik unter Einsatz entsprechend geeigneter und langzeitstabiler Baustoffe durchgeführt. In den Zugangsstrecken zu den beiden im Rahmen des SuedLink-Projektes errichteten Schächten in Kochendorf und Großgartach sind langzeitstabile Streckenabdichtungen zur dauerhaften Abtrennung dieser Schächte vom Grubenfeld vorgesehen.

3.2 Standsicherheitsnachweis in der Ablagerungs- und Stilllegungsphase

Die Dimensionierung sämtlicher Abbaukammern im Bergwerk Heilbronn basiert auf einem bewährten analytischen Nachweisverfahren nach [NATAU (1993a) und NATAU (1997)], wobei die Standsicherheit des Pfeilertragsystems sowie die Standfestigkeit der Kammerfirsten bewertet und nachgewiesen werden. Die Methodik wurde seit den 1970'er Jahren entwickelt und fortgeführt, sodass von einem ausreichend erprobten Dimensionierungs- und Nachweisverfahren ausgegangen werden kann. Das Sicherheitsniveau der analytischen Dimensionierungsverfahren konnte durch

verschiedene Materialuntersuchungen und numerische Modellierungen bestätigt werden [FLIß (2018)]. Die Standsicherheitsnachweise basieren auf repräsentativen Materialkennwerten, welche durch umfangreiche Versuchsserien an originalem Material der Lagerstätte Heilbronn ermittelt wurden.

Die Sicherheit eines Einzelpfeilers kann über den geostatischen Teufendruck und den Lastfaktor ermittelt werden. Für den neuen Deponiebereich wird nach dem dargestellten Verfahren eine Sicherheitszahl von $S \geq 2,5$ ausgewiesen⁴⁾. Die zu Grunde liegenden Sicherheitszahlen nach [NATAU (1993a) und (1997)] gewährleisten die Bergbausicherheit für die Dauer der Betriebsphase uneingeschränkt.

$$P_b = \beta_D [1 + A(K - C)^N]$$

P_b	Systemfestigkeit in [MN/m ²]
β_D	Druckfestigkeit (einaxial) in [MN/m ²]
$A = 0,619$	Material- und Einspannungsparameter
$N = -0,668$	Exponent
$C = 0,081$	Brikettierfaktor
	Formfaktor

$$K = \frac{H}{2B_F} \cdot \left(1 + \frac{B_F}{L}\right)$$

H	Pfeilerhöhe in [m]
B_F	Pfeilerbreite in [m]
L	Pfeilerlänge in [m]

Die Bestimmung der Firstsicherheit nach [NATAU (2005)] beruht auf dem Ansatz eines Grenzgleichgewichtes in Anlehnung an DIN 4017.

$$V_b = B_p \cdot c_r \cdot N_c$$

V_b	Hangendbruchlast in [MN]
$c_r = 0,7c$	reduzierte technische Kohäsion in [MN/m ²]
N_c	Tragfähigkeitsbeiwert $N_c = f(\phi)$

⁴⁾ Bedingt durch die, gegenüber den regulären Abbaukammern reduzierte Bauhöhe der Deponiekammern, ist im Pfeilertragsystem der neuen Deponie ein deutlich höheres Sicherheitsniveau vorhanden.

Die Sicherheitszahl für Kammerfirsten ergibt sich wie folgt:

$$\eta = V_b \cdot L^{-1}$$

η Sicherheitszahl der Kammerfirste [-]

$L_P = P_P \cdot B_P$ Pfeilerlast in [MN / m]

$P_P = P_V \cdot a_f^{-1}$ mittlere vertikale Pfeilerspannung [MN / m²]

Für den Bereich der neuen Deponiebereich wird nach dem dargestellten Verfahren eine Sicherheitszahl von $\eta_F \geq 1,8$ ausgewiesen. Die zu Grunde liegende Sicherheitszahl nach NATAU (1997) gewährleistet für die Dauer der Betriebsphase uneingeschränkt die Bergbausicherheit.

Mit den numerischen Modellrechnungen [MORGENSTERN, KONIETZKY & FLIß (2024)] wird für das Pfeilersystem sowie die Kammerfirsten ein minimaler Sicherheitsfaktor von 2,0 nachgewiesen. Der analytische Ansatz von NATAU kann damit bestätigt werden, wobei das höhere Sicherheitsniveau der numerischen Modellierungen auf zusätzliche Konservativitäten bei den analytischen Berechnungen hinweist.

3.3 Langzeitsicherheitsnachweis

Im Abschnitt 3.2 wird die Dimensionierung und der Nachweis der Standsicherheit während der Betriebs- und Stilllegungsphase dargestellt und erläutert. Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit und damit den vollständigen und dauerhaften Einschluss der eingelagerten Abfallstoffe ist zusätzlich ein Nachweis über die Integrität der Barrierschichten unter den über die Betriebsphase der Deponie hinauslaufenden Senkungen, Verformungen und Spannungsumlagerungen zu führen.

Der Nachweis der Langzeitstabilität umfasst prinzipiell den Nachweis einer ausreichenden Pfeilerstabilität über einen Nachweiszeitraum von 20.000 Jahren. In diesem Zeitraum kann sicher davon ausgegangen werden, dass bei einer Verfüllung der Abbaukammern ein vollständiger Einschluss der eingebrachten Versatzmaterialien erfolgen wird und sich damit ein mechanisch stabiler Gleichgewichtszustand einstellt. Während des gesamten Nachweiszeitraumes sind barriere-schädigende Zustände auszuschließen und damit die Integrität des Barrierehorizontes der Oberen Sulfatschichten sicher nachzuweisen. Unter barriere-schädigenden Zuständen wird im Wesentlichen eine Überschreitung der zulässigen Dehnung bzw. das Überschreiten der vorhandenen Material-Zugfestigkeit der Gesamtheit der Barrierschicht verstanden.

Für Nachweisführungen wird allgemein auf numerische Modellrechnungen zurückgegriffen, bei denen unter Ansatz von Materialeigenschaften und den geometrischen sowie geologischen Randbedingungen eine komplexe mechanische Berechnung des Systems Abfallstoffe – Pfeilertragsystem – Barrierschichten erfolgt. Aus den Ergebnissen dieser Berechnungen gehen neben der

Beanspruchung der Barrierschichten weiterhin die sich einstellenden Senkungen und Zerrungen der Tagesoberfläche hervor.

3.4 Einflüsse aus planbaren Ereignisabläufen

Als planbare Ereignisabläufe werden Ereignisse und Prozesse zusammengefasst, die während der Betriebsphase der Deponie eintreten bzw. ablaufen können und für die entsprechende Sicherungsprozeduren und Abwehrmaßnahmen geplant sind. Hierzu zählen neben dem Ablagern des Abfallmaterials und dem Betrieb des Deponiebereiches auch der Verschluss der Zugangsstrecken nach Einstellung des Deponiebetriebes. Der gesamte Deponiebereich ist vom aktiven Gewinnungsbetrieb durch entsprechend dimensionierte Sicherheitsfesten abgetrennt, wodurch jegliche wechselseitige Beeinflussungen von Steinsalzgewinnung und Abfallablagerung im laufenden Grubenbetrieb während der Betriebsphase des Bergwerkes ausgeschlossen werden können.

Des Weiteren sind der Deponiebetrieb und die Salzgewinnung durch entsprechende Betriebsabläufe organisatorisch wie auch räumlich strikt voneinander getrennt. Die Salzgewinnung im angrenzenden Baufeld wurde beendet und es erfolgt planmäßig eine Verfüllung mittels Bergeversatz.

Für den Gruben- und auch für den Ablagerungsbetrieb existieren hinsichtlich Gefährdungssituationen wie bspw. Brand- oder anderweitige Havarieereignisse entsprechende Schutzkonzepte und Abwehrmaßnahmen, die eine Beeinflussung der abgelagerten Abfallstoffe ausschließen.

Die Ablagerung der Abfallstoffe wird durch ein Qualitätsmanagement begleitet und entsprechend den Vorgaben kontrolliert und dokumentiert. Signifikante Abweichungen von den charakteristischen Materialparametern werden auf diese Weise vermieden, so dass die durchgeführten Nachweisrechnungen und Prognosen in jedem Fall ihre Gültigkeit behalten. Im Rechenmodell wurden darüber hinaus zusätzliche Sicherheiten auf Seiten der angesetzten Volumenkompaktion der Abfallstoffe (Betrachtung bis zu 30 % Endkompaktion unter maximaler Gebirgslast) und einer Reduktion der Verfüllhöhe (Betrachtung von Verfüllhöhen zwischen 3,6 m und 4,8 m) angesetzt.

Im Bedarfsfall können die vorhandenen Zugangsstrecken jederzeit mit Verschlussbauwerken verschlossen werden, so dass eine vollständige und dauerhafte Trennung gewährleistet wird. Die bestehenden Verschlusskonzepte wurden hierfür entsprechend den geometrischen Verhältnissen angepasst. Nach Beendigung des Deponiebetriebes werden die Zugangsstrecken zur Deponie in jedem Fall mit langzeitstabilen Verschlussbauwerken dauerhaft abgedichtet und vom übrigen Grubenfeld getrennt.

Neben der Abdichtung der Zugangsstrecken werden nach Einstellung des gesamten Grubenbetriebes die vorhandenen Tagesschächte nach dem Stand der Technik verfüllt und unter Einsatz entsprechend geeigneter langzeitstabiler Baustoffe abgedichtet.

Zur Abwehr möglicher Gefährdungen der Tagesschächte Franken und Heilbronn im Falle von Hochwasser- bzw. Starkregenereignissen existieren verschiedene Notfallkonzepte („Notfallkonzept Wasserzutritt“ und „Notfallkonzept bei Hochwasser“), welche in die Gesamtnotfallkonzepte der SWS AG für den übertägigen und untertägigen Betrieb integriert sind. Über ein Frühwarnsystem bei erhöhten Pegelständen und der Auslösung von Hochwasseralarm ab dem HQ50 Wert (Überschreitung des Pegels bei einem 50 jährlichen Hochwasser) mit entsprechenden Abdichtungs- und Verschlussmaßnahmen kann ein Wasserzutritt über die Tagesschächte ausgeschlossen werden.

Aus den möglichen planbaren Ereignisabläufen gehen keine Zustände oder Prozessabläufe hervor, die den vollständigen Einschluss der Abfallstoffe gefährden können.

3.5 Einflüsse aus nicht planbaren Ereignisabläufen

Als nichtplanbare Ereignisabläufe werden u.a. Einflüsse und Störfälle definiert, die nach Beendigung der Ablagerungsphase bis zum vollständigen Einschluss auftreten können. Neben diesen Vorgängen werden auch Lösungszutritte in Form von Tropfstellen aus dem Hangendbereich oder Wasserzutritt in aktiven Gewinnungsbereichen während der Betriebsphase als nicht planbare Ereignisabläufe klassifiziert.

Für die Betriebsphase der Deponie können die folgenden Szenarien als nicht planbare Ereignisabläufe dargestellt werden:

- Zutrittsszenario im Deponiebereich in Form von Tropfstellen aus dem Hangendbereich (Zwischendolomit) und
- Zutritt von Lösungen in aktiven Gewinnungsbereichen des Bergwerkes Heilbronn

Die aus dem Bereich des Zwischendolomits möglicherweise zutretenden Lösungen können prinzipiell als geogene Wässer eingeordnet werden [GLA (1996)]. Die Beobachtung von Zulaufzonen bisher im Bereich des Bergwerkes Kochendorf aufgetretener Lösungszutritte aus dem Zwischendolomit zeigten eine kontinuierliche Abnahme, was auf ein Auslaufen eines begrenzten Reservoirs schließen lässt (vergleiche Abschnitt 2.4.2.3). Die bisher beobachteten Zutrittsraten aus dem Zwischendolomit können als beherrschbar eingeschätzt werden, so dass für die abgelagerten Abfälle kein Risiko abgeleitet werden kann.

Die aktiven Gewinnungsbereiche des Grubenfeldes Heilbronn sind über entsprechende Sicherheitsfesten vom übrigen Grubenfeld getrennt. In den Durchörterungen der Sicherheitsfesten können jederzeit langzeitstabile Streckenabdichtungen errichtet werden, um im Fall eines unkontrollierbaren Lösungszutritts diesen Feldesteil vom Grubenfeld sicher abtrennen zu können. Eine Gefährdung

des vollständigen Einschlusses des Deponiebereiches als Folge eines Wasserzutritts in aktiven Gewinnungsbereichen kann daher ausgeschlossen werden.

Das an die Deponie angrenzende Baufeld kann gegen das Grubenfeld Heilbronn (Kontrollbereich der UTD) sowie gegen das Grubenfeld Kochendorf über die Errichtung von langzeitstabilen Streckenverschlussbauwerken abgetrennt werden. Hierzu existieren Maßnahmenpläne seitens des Betreibers mit entsprechenden Sicherheitsfesten in der Strecke des Kontrollbereichs der aktuellen UTD Richtung Kochendorf sowie eine Sicherheitsfeste der Grube Kochendorf in Richtung Heilbronn. Der Zugang zu den Dammlokalationen zur Abtrennung des geplanten Deponiebereiches ist damit jederzeit gegeben, da die Wahrscheinlichkeit eines größeren Wasserzutrittes in beiden Feldesteilen Heilbronn und Kochendorf gleichzeitig als unwahrscheinlich einzuschätzen ist. Für die Errichtung der langzeitstabilen Streckendämme zur Abtrennung der geplanten Deponie während der aktiven Betriebsphase sind eine Reihe von begleitenden Maßnahmen, wie bspw. Einrichtung einer entsprechenden Notwasserhaltung sowie ggf. ein Teilversatz des Deponiefeldes mit Bergeversatz, zu realisieren. Diese Maßnahmen werden im Bedarfsfall geplant und angewandt.

Auf der Basis hypothetischer Annahmen können für die Nachbetriebsphase der Deponie die folgenden nicht planbaren Ereignisse abgeleitet werden:

- Wasserzutritt im Deponiebereich
- Wasserzutritt im angeschlossenen Grubengebäude.

Hierzu kommen bspw. hypothetische Verletzungen der geologischen Barrierschichten sowie Ereignisse und Ereignisabläufe im angeschlossenen Grubenfeld mit seinen Tageszugängen sowie Verbindungsstrecken in benachbarte Grubenfelder in Betracht.

Einem Wasserzutritt im Bereich der Deponie selbst bzw. im angeschlossenen Grubenfeld während der Nachbetriebsphase wird primär mit einer wirksamen und dauerhaften Abdichtung der Zugangsstrecken begegnet. Das konzipierte Dichtungssystem [TRIANAFYLLIDIS (2022)] ist in der Lage, die Zugangsstrecken richtungsunabhängig gegen einen angenommenen maximal möglichen hydrostatischen Druck abzudichten. Dadurch können diese Dichtungsbauwerke in Verbindung mit den Sicherheitsfesten um den Deponiebereich sowohl den Deponiebereich gegen das angeschlossene Grubenfeld abschotten als auch das Grubenfeld gegen den Deponiebereich. Der Deponiebereich mit den abgelagerten Abfällen bleibt somit dauerhaft vom Grubenfeld getrennt, Vorgänge und Ereignisabläufe bleiben jeweils auf die Deponie bzw. das Grubenfeld beschränkt.

Neben den betrachteten hypothetischen Szenarien können während der Nachbetriebsphase anthropogene Einwirkungen auf die natürlichen und technischen Barrieren, bspw. durch das Niederbringen von Übertagebohrungen oder das Abteufen neuer bzw. Aufwältigen alter Schächte

nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Durch einen ordnungsgemäßen Abschluss der Gewinnungsarbeiten und der Versatzmaßnahmen im Bergwerk Heilbronn sowie dem Verschluss der Zugangsstrecken und Tagesschächte mit zugehörigen Dokumentationen und Kenntlichmachungen kann das Risiko derartiger Vorgänge auf ein Minimum reduziert werden.

Unter den aktuellen Gegebenheiten und den existierenden Regularien (bspw. Genehmigungsverfahren zur Neuen Deponie, Rahmenbetriebsplan, etc.) sowie der erforderlichen Genehmigung und notwendigen Dokumentation sämtlicher untertägiger Aktivitäten und Arbeiten kann das Risiko eines unbeabsichtigten Anbohrens der Grubenhohlräume inklusive des Deponiebereiches als äußerst gering eingestuft werden.

Mit fortschreitender Zeit und insbesondere mit Blick auf die relativ langen Nachweiszeiträume liegt der Fokus zur Vermeidung unbeabsichtigter Bohrungen in den Deponiebereich vor allem auf der Fortführung der bewährten Genehmigungspraxis durch entsprechende Behörden bzw. Genehmigungsinstanzen. Unter Voraussetzung, dass diese Randbedingungen auch weiterhin Bestand haben werden, kann das Risiko eines unbeabsichtigten Anbohrens der Grubenhohlräume inklusive des Deponiebereiches auch während der Nachbetriebsphase als äußerst gering eingestuft werden.

Für den Fall, dass nach einer Zeit von mehreren 100 Jahren nach Betriebsschluss der Deponie und dem Verschließen der Grubenfelder des Bergwerkes der Deponiebereich durch eine Bohrung aufgeschlossen wird, sind als nicht planbare Ereignisabläufe zum einen eine Bohrung nach gegenwärtigem Stand der Technik und zum anderen eine Bohrung ohne besondere Sicherungsvorkehrungen und Ausbaumaßnahmen als relevant zu betrachten.

Im Falle einer Bohrung nach dem aktuellen Stand der Technik ist ein vollständiges Fluten des Deponiebereiches als unwahrscheinlich anzusehen. Ein Abfließen möglicherweise eingedrungener Lösungen in Richtung des Grubenfeldes Heilbronn wird durch die vorhandenen Sicherheitspfeiler und die in den ehemaligen Zugangsstrecken zur Deponie verbauten langzeitstabilen Streckenabdichtungen wirksam und dauerhaft verhindert.

Als Folge des Lösungszutrittes sind verschiedene Reaktionen im gefluteten Deponiebereich zu erwarten und eine Gasbildung ist nicht auszuschließen. Die Gasphase wird nach Erreichen eines gewissen Druckniveaus über Wegsamkeiten durch die Zugänge der Bohrung in Richtung der Tagesoberfläche entweichen. Für eine kontrollierte Entgasung über die Bohrung ist geeignetes Equipment verfügbar, das entstehende Gas kann gefasst und ggf. weiterführend behandelt werden. Nach einem Abklingen der Gasemission ist eine langzeitsichere Verwahrung der Bohrung möglich, wodurch die Integrität der hydrologischen Barriere wieder hergestellt werden kann.

Für eine Bohrung ohne besondere Sicherungsvorkehrungen und Ausbaumaßnahmen mit beispielsweise ungeeigneter Bohrlochverrohrungen oder mangelhaftem Monitoring im Hinblick auf Spülungsverluste würde sich der Ablauf eines möglichen Anbohrens des Deponiebereich deutlich komplexer gestalten.

Unter diesen Bedingungen stellt das anzunehmende vollständige Aufsättigen bzw. Fluten des Deponieraumes hinsichtlich der Gewährleistung der Langzeitsicherheit und eines vollständigen Einschlusses der eingelagerten Abfallstoffe einen Worst-Case dar. Ein Abfließen der eingedrungenen Lösungen in Richtung des Grubenfeldes Heilbronn wird auch unter diesem Szenario durch die vorhandenen Sicherheitspfeiler und die in den ehemaligen Zugangsstrecken zur Deponie verbauten langzeitstabilen Streckenabdichtungen wirksam und dauerhaft verhindert.

Das eingedrungene Wasser wird zu einer geringfügigen Auflösung der vorhandenen Pfeilerstruktur führen, was aus gebirgsmechanischer Sicht nicht zu einer signifikanten Schwächung des Pfeilertragssystems führen wird. Die Standsicherheit des Deponiebereiches kann unter diesen Randbedingungen weiterhin als gegeben angesehen werden.

Als Folge der Aufsättigung des Porenraumes sind verschiedene Reaktionen im Deponiebereich und die Freisetzung eines Gasvolumens zu erwarten, welches über die Bohrung in Richtung der Tagesoberfläche entweichen kann. Des Weiteren würde sich schrittweise eine konzentrierte chloridische Salzlösung hoher Dichte und mit hohem pH-Wert ausbilden, in der sich eine Vielzahl von Gefahrstoffen, wie z.B. Schwermetalle, Nitrite, Nitrate, Cyanide anreichern (K-UTEC 2024b).

Über die Installation entsprechenden Equipments zur Gas- bzw. Lösungsfassung sowie einer weiterführenden Behandlung der Austrittsmedien am Bohrlochkopf können die Risiken auf ein tolerables Minimum reduziert werden. Die Bohrung kann in diesem Fall nach Abklingen des Gasbildungspotenzials mit geeigneten Maßnahmen langzeitsicher verschlossen werden, wodurch die Integrität der hydrologischen Barriere wieder hergestellt werden kann. Im Falle der Aufwältigung bereits verfüllter Schächte entsteht für den Deponiebereich keine Gefährdung, solange die Abdichtungen der Zugangsstrecken nicht von Eingriffen betroffen sind. Ein Risiko für die abgelagerten Abfälle ausschließlich aus der Aufwältigung bereits verfüllter Schächte kann nicht abgeleitet werden.

4 Geotechnischer Standsicherheitsnachweis

4.1 Analyse und Bewertung der Randbedingungen

4.1.1 Geologisch/tektonische und hydrogeologisch/hydrologische Verhältnisse

Die geologisch/ tektonischen und hydrogeologisch/ hydrologischen Verhältnisse können aufgrund des langjährigen Betriebes des Bergwerkes Heilbronn-Kochendorf allgemein als gut erkundet ohne signifikante Kenntnislücken eingeschätzt werden. Bei der Lagerstätte handelt es sich prinzipiell um ein flach gelagertes Steinsalzvorkommen. Im geplanten Deponiebereich sind keine besonderen geologisch / tektonischen Elemente zu erwarten. Da die Auffahrung des neuen Deponiebereiches gegenwärtig realisiert wird, werden hierzu derzeit vorläufige und keine abschließenden Feststellungen getroffen. Die Auffahrung der Deponiekammern wird durch geologische Aufnahmen und geotechnische Messungen umfassend begleitet. Nach Abschluss der Auffahrung des Deponiebereiches erfolgt eine finale Aufnahme und Bewertung der geologisch / tektonischen Verhältnisse. Erst nach der Bestätigung der prognostizierten geologischen und gebirgsmechanischen Verhältnisse ist die Nutzung des Bereiches zur Deponierung von Abfallstoffen geplant.

Das im neuen Deponiebereich anstehende Steinsalz als Wirtsgestein ist als standfestes Salzgestein mit einem guten Verständnis über das mechanische Verhalten und einer großen Datenbasis für Modellrechnungen einzustufen. Fundierte Prognosen über Standfestigkeiten und Verformungszustände sind unter Nutzung etablierter Berechnungsverfahren und der verfügbaren Datenbasis für die Betriebsdauer und Langzeitbetrachtungen möglich.

Der Deponiebereich wird im Hangenden und im Liegenden durch ausreichend mächtige und lateral aushaltende wasserundurchlässige Schichten eingeschlossen. Für die Barrierschichten existiert ebenfalls ein gutes Verständnis über das mechanische Verhalten und es ist eine ausreichende Datenbasis zur Modellierung dieser geologischen Strukturen verfügbar. Damit kann die Integrität dieser Barrierschichten und der vollständige Einschluss der abgelagerten Abfallstoffe modelltechnisch prognostiziert und sicher nachgewiesen werden.

Unter diesen Randbedingungen ist der Nachweis der geotechnischen Standsicherheit sowie des vollständigen Einschlusses des Deponiegutes auf Basis einer numerischen Modellierung über die Betriebsphase sowie die Nachbetriebsphase zulässig.

4.1.2 Einwirkungsfaktoren anthropogener Art

Unter anthropogenen Einwirkungen auf die natürlichen und technischen Barrieren werden, während der Nachbetriebsphase bspw. das Niederbringen von Übertagebohrungen oder das Abteufen neuer bzw. Aufwältigen alter Schächte betrachtet (Human Intrusion).

4.1.3 bergbauliche Situation und Betriebserfahrungen

Die möglichen bergbaulichen Situationen wurden allgemein für das Bergwerk Heilbronn-Kochendorf unter Abschnitt 2.3.2 beschrieben. Mit den vorhandenen Betriebserfahrungen und dem angewandten geotechnischen Monitoring ist es möglich, sicherheitsrelevante Phänomene frühzeitig zu erkennen und ggf. entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, um Risiken und Gefährdungen wirksam auszuschließen.

Für den neuen Deponiebereich sind gegenwärtig keine besonderen bergbaubedingten Phänomene, wie bspw. übermäßige Pfeiler- und Hangenddeformationen bzw. Konturentfestigungen oder -Instabilitäten festzustellen und aus geologisch-gebirgsmechanischer Sicht auch nicht zu erwarten. Sollten dennoch bergbaubedingte Phänomene und Situationen auftreten, die bergbausicherheitsrelevante Relevanz besitzen, so ist über das angewandte geotechnische Monitoring eine frühzeitige Identifikation derartiger Vorgänge und das Einleiten entsprechender Maßnahmen möglich.

4.1.4 Deformations- und Senkungsmessungen sowie markscheiderische Prognosen

Im Bergwerk Heilbronn-Kochendorf wurden seit Beginn der Konvergenzmessungen 1990 mehr als 200 Konvergenzmessstellen installiert. Damit wird ein flächendeckendes Monitoring über die auflaufenden Verformungen des Pfeilertragsystems sowie der Firstkonturen möglich. Die Berichterlegung erfolgt jährlich mit umfassender Auswertung entsprechend den einzelnen Feldesteilen [PEYSA (2023)].

Da für den geplanten Deponiebereich derzeit noch keine belastbaren Messwerte vorliegen, werden zur Bewertung des aktuellen Verformungsgeschehens die verfügbaren Messwerte des westlich der Deponie gelegenen Nordfeldes herangezogen. Hierbei ist zu beachten, dass das im Nordfeld angewandte geometrische Grundsystem sowie die Gewinnungsmethode mit der geplanten Deponie vergleichbar sind, die Kammerhöhen im Regelquerschnitt des Deponiebereiches allerdings nur eine Höhe von 5,2 m aufweisen und damit bereichsweise nur halb so hoch wie im Nordfeld, bei gleicher Festenbreite. Es ist deshalb mit deutlich geringeren Konvergenzraten im Deponiebereich zu rechnen.

Zur Bewertung der auftretenden Konvergenzen im Nordfeld werden 18 Messstellen und insgesamt 120 Messwerte seit 2010 betrachtet. Die Abbildung 19 zeigt die Entwicklung der Konvergenzraten im Bereich des Nordfeldes Heilbronn. Die Abbildung enthält die Mittelwerte der einzelnen Messstellen sowie eine Ausgleichsgerade über einen Potenzansatz.

Nach den numerischen Modellrechnungen streben die Verformungsraten im Pfeilertragsystem sowie im Deckgebirgsbereich nach etwa 5.000 Jahren gegen einen stationären Endzustand.

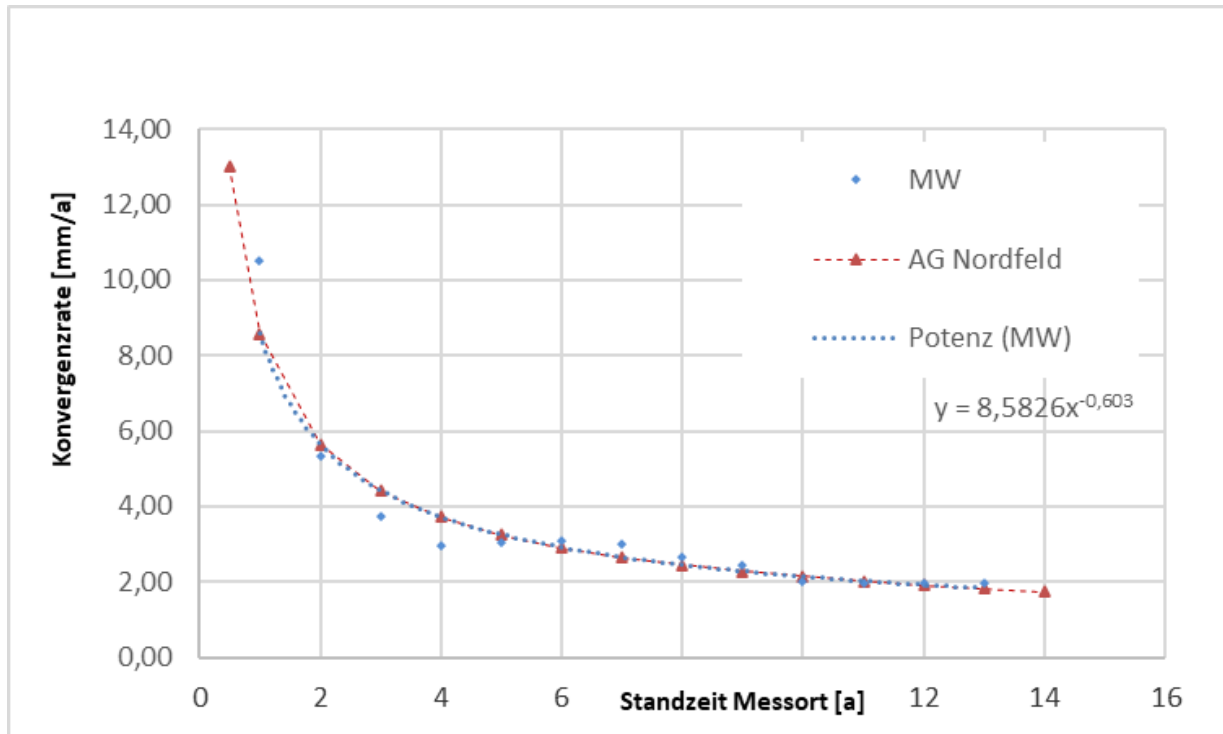


Abbildung 19: Entwicklung der Konvergenzraten im Nordfeld Heilbronn.

4.1.5 Geotechnische Laborversuche und Materialkennwerte

Die verfügbare Datenbasis zu Materialkennwerten für das Bergwerk Heilbronn-Kochendorf umfasst einen Datenpool über Kennwerte der aufgeschlossenen geologischen Schichten sowie des Barrierehorizontes im Hangenden. Die Materialparameter basieren auf umfangreichen Materialprüfungen an entnommenen originalen Proben aus dem Salzgestein der Lagerstätte sowie den Barrierschichten oberhalb des Salzlagers. Über Materialparameter der einzubringenden Deponiematerialien existiert aus den betriebsbegleitenden Materialprüfungen ein umfassender Datenpool, so dass hinsichtlich der Materialeigenschaften allgemein auf eine fundierte Parameterbasis für die Modell- und Nachweisrechnungen zurückgegriffen werden kann.

Die Gesteinsparameter für das Steinsalzlager wurden anhand von Kernbohrungen am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg mittels ein- und triaxialen Druckversuchen, Spaltzugversuchen sowie ein- und triaxialen Kriechversuchen ermittelt. Die ermittelten Festigkeits- und Verformungskennwerte konnten hierbei die bereits vorhandene Datenbasis zu den vorkommenden Steinsalzhorizonten in der Grube Heilbronn ergänzen und bestätigen. In Tabelle 10 sind die ermittelten Stoffparameter für die Steinsalzproben zusammengefasst.

Tabelle 10: Gesteinskennwerte für das Untere Steinsalz aus [FRÜHWIRT (2017)]

Parameter		Wert
Dichte	kg/m ³	2.150
Reibungswinkel	°	38,2
Kohäsion	MPa	5,3
Spaltzugfestigkeit	MPa	1,0
E-Modul	GPa	25,0

Zur Ermittlung von Materialkennwerten der Oberen Sulfatschichten wurde auf vorhandenes Kernmaterial verschiedener Erkundungsbohrungen zurückgegriffen. Dabei wurde Probematerial aus folgenden Bohrungen verwendet:

Vorbohrung Schacht Konradsberg

Kernbohrungen Ro7817/B3

Kernbohrungen Ro7817/B4

Kernbohrungen Ro7817/B5

Die entnommenen Kernproben wurden analog zu den Salzproben am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg mittels ein- und triaxialen Druckversuchen, Spaltzugversuchen sowie ein- und triaxialen Kriechversuchen geprüft und untersucht.

Die ermittelten Kennwerte entsprechen einem kompakten Sulfatgestein mit einem relativ geringen Anteil an Trenn- und Schwächeflächen sowie geringen Anteilen an Tonmineralen. Da die Oberen Sulfatschichten in größeren Teilen allerdings Tonanteile von bis zu 80 % enthalten können, sind die hier ermittelten mechanischen Kennwerte statistisch eher als obere Grenzwerte anzusehen und zu interpretieren. Die laborativ ermittelten Festigkeits- und Verformungskennwerte der Oberen Sulfatschichten wurden daher unter Einbeziehung zusätzlicher Datensätze (Probematerial aus der Grube Hüttenheim als vergleichbares Material) von Materialparametern entsprechend angepasst und in verschiedenen Modellrechnungen kalibriert [FLIß (2018)].

Tabelle 11: Gesteinskennwerte der Oberen Sulfatschichten [FRÜHWIRT (2017) und (2018)].

Parameter		Konradsberg	Hüttenheim
Dichte	kg/m ³	2.750	2.570
Reibungswinkel	°	34,11	-
Kohäsion	MPa	18,11	-
Spaltzugfestigkeit	MPa	5,04	5,13
E-Modul	GPa	40,17	38,95

Für die Versatzeigenschaften werden in den Modellrechnungen labortechnisch ermittelte Eigenschaften aus der betrieblichen Eigenüberwachung zum Ansatz gebracht. Im Rahmen der betrieblichen Eigenüberwachung der Einlagerungsprozesse erfolgten an verschiedenen Materialien Lastsetzungsversuche bis zur prognostizierten maximalen vertikalen Belastung aus dem Gebirgsdruck. Aus den ermittelten Last-Setzungs-Kurven der durchgeführten Kurzzeitversuche wurde über eine Extrapolation das Langzeitverhalten der untersuchten Materialien abgeschätzt und in den Eingangsparametern berücksichtigt. Auf diese Weise wird für einen Versatzblock die maximal mögliche Kompaktion ermittelt und konservativ in den Berechnungen angesetzt.

Im angrenzenden CM-Revier wird der eingebrachte Bergversatz mit einer maximalen Volumenkompaktion von 25 % und unter Ansatz eines angenommenen Firstspaltes von 3,5 m als WORST CASE Fall modelliert. Auf diese Weise erfolgt zum Nachweis der Barriereintegrität eine stark konservative Simulation der Verhältnisse im CM-Revier.

Tabelle 12: Stoffparameter des Abfallmaterials [MORGENSTERN & KONIETZKY (2021)]

Parameter		Wert
Dichte	kg/m ³	1.500
Reibungswinkel	°	10
Dilatanz	°	0
Zugfestigkeit	Pa	100
E-Modul	GPa	0,5
Querdehnzahl	-	0,25

4.1.6 Beanspruchungszustand des Pfeilertragsystems

Das Grundlayout des Pfeilertragsystems im Deponiebereich bildet ein regelmäßiges Kammer-Pfeiler-System mit Durchhieben in verschiedenen Abständen. Nach der Dimensionierung gemäß NATAU besitzt das Tragpfeilersystem im Deponiebereich eine Sicherheit $S > 2,5$ und Sicherheiten im Bereich der Kammerfirsten von $S > 1,8$ (vergleiche Abschnitt 3.2). Mit den numerischen Modellrechnungen können für das Tragwerk Pfeiler und Firste Sicherheiten von $S > 2,0$ ausgewiesen werden.

Die ausgewiesenen Sicherheiten entsprechen den Vorgaben für das Bergwerk Heilbronn und gewährleisten einen sicheren Betrieb. Grenz- und Versagenszustände im Bereich der neuen Deponie können ausgeschlossen werden.

4.2 Bewertung gebirgsmechanischer Gefährdungssituationen

Aus der Analyse der Randbedingungen können prinzipiell die folgenden gebirgsmechanischen Gefährdungssituationen abgeleitet werden:

- Pfeilerversagen im Tragsystem,
- Firstversagen in den Deponiekammern,
- Seismische Einwirkungen auf das Pfeilertragsystem,
- Übermäßige Verformungen im Pfeilertragsystem,
- Gefährdung der Integrität der Barrierschichten durch induzierte Deformationen des Pfeilertragsystems.

Die Bewertung dieser Gefährdungssituationen erfolgt auf Basis der Ergebnisse aus den numerischen Modellrechnungen [MORGENSTERN & KONIETZKY (2021)].

4.3 Sicherheitsplan zum Nachweis der Stand- bzw. Langzeitsicherheit

Der Sicherheitsplan basiert prinzipiell auf der standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung (Abschnitt 3.1) und den abgeleiteten Gefährdungssituationen. Die dargestellten Gefährdungssituationen stellen in erster Linie Beeinflussungen der Barrierschichten dar, aus denen Risiken für die Integrität dieser Barrieren und damit für die Gewährleistung des vollständigen Einschlusses der eingelagerten Abfallstoffe hervorgehen. Die rechnerischen Nachweisrechnungen umfassen daher primär den Nachweis der Integrität der Barrieren unter den definierten Randbedingungen und beinhalten die folgenden Einzelnachweise und Darstellungen:

- Standsicherheit und Barriereintegrität in der Betriebsphase
- Standsicherheit und Barriereintegrität in der Nachbetriebsphase
- Standsicherheit und Barriereintegrität unter Berücksichtigung seismischer Einflüsse
- Konvergenz des Grubengebäudes und Oberflächenabsenkungen

Die Standsicherheits- und Integritätsbetrachtungen basieren dabei auf einer umfassenden gebirgsmechanischen Modellierung des Beanspruchungszustandes des Gebirges und des Langzeitverhaltens des Einlagerungsbereiches. Die Betrachtung von nicht planbaren Ereignisabläufen erfolgt über fundierte Argumentationslinien und konservativen Annahmen.

4.4 Gebirgsmechanische Modellierung des Beanspruchungszustandes des Gebirges und des Langzeitverhaltens des Einlagerungsbereiches

4.4.1 Standsicherheit und Barriereintegrität in der Betriebsphase

Zur Bewertung des Beanspruchungszustandes der Gebirgsstrukturen und des Langzeitverhaltens des Ablagerungsbereiches wurde ein numerisches Modell des Deponiebereiches generiert und unter verschiedenen Beanspruchungszuständen und Randbedingungen betrachtet und berechnet. Das Modell besteht aus einem Längsschnitt durch den Deponiebereich sowie einem 3D-Detailmodell im Zentrum der geplanten Deponie. (Antragsunterlage Teil Sicherheit und Geotechnik D 4)

Der Modellschnitt umfasst 22 Deponiekammern⁵⁾ und überspannt den zentralen Teil des geplanten Deponiebereiches in NNW – SSE Richtung. Das südlich des Deponiebereiches gelegene reguläre Abbaufeld wird in die Schnittgeometrie entsprechend mit einbezogen und nach Abschluss der Betriebsphase der Deponie als versetzt betrachtet (siehe Abbildung 11).

Für das Deponiegut wurden maximale Volumenkompressionen zwischen 22 % und 30 % variiert, für den angesetzten Bergeversatz im südlich der neuen Deponie gelegenen Feldesteil wurde eine maximale Volumenkompression von 25 % angesetzt.

Die geometrischen Modellparameter basieren auf dem geplanten Grundriss des neuen Deponiebereiches, der geologische Aufbau orientiert sich am geologischen NNW-SSE Schnitt über den geologischen Aufbau des Salzlagers und des Deckgebirges (vergleiche Abbildung 9).

Für die durchgeführten 2D- und 3D-Modellrechnungen wurden die auf der Finite Differenzen Methode (FDM) basierenden Softwareprogramme FLAC2D™ und FLAC3D™ verwendet. Diese Programmsysteme entsprechen, insbesondere im Hinblick auf Langzeitsimulationen geologischer Aufgabenstellungen, dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. [K-UTEC (2021)]

Zur Modellierung der einzelnen Gebirgshorizonte wurde auf verschiedene Materialgesetze zurückgegriffen. Die Darstellung der Steinsalzsichten und der Barrierschicht der Oberen Sulfatschichten erfolgte mithilfe eines Burgers-Mohr-Creep-Modells (burgers-mohr), um deren visko-elasto-plastisches Verhalten real zu simulieren. Die übrigen geologischen Einheiten wurden mithilfe des Mohr-Coulomb-Modells (mohr) modelliert, da diese ein elasto-plastisches Verhalten besitzen. Für das Versatzmaterial kommt ein Double-Yield Gesetz zur Anwendung, welches plastische volumetrische Kompaktion sowie Scher- und Zugversagen abbilden kann. [MORGENSTERN, KONIETZKY & FLIß (2024)]

⁵⁾ Die geotechnische Modellierung des Deponiefeldes beinhaltet die Abbildung von insgesamt 22 Deponiekammern gemäß der ursprünglichen Planung von ca. 20 östlichen und 24 westlichen Kammern.

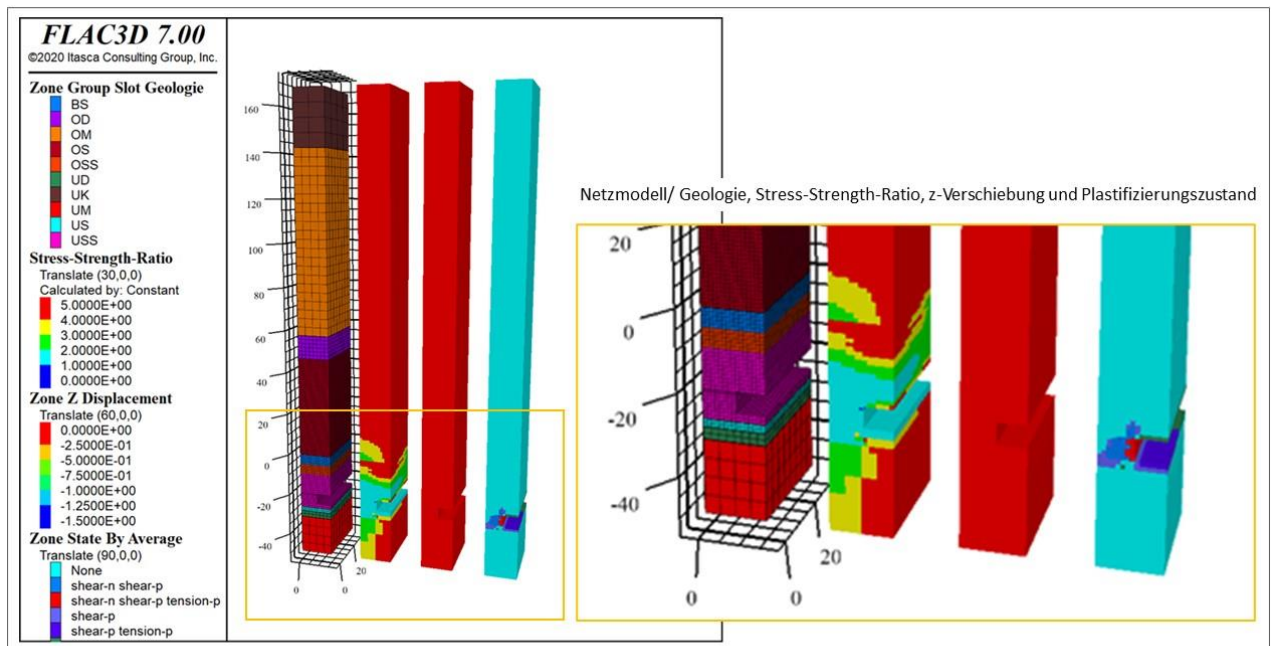


Abbildung 20: Pfeilerstabilität für den Sicherheitsfaktor 2,0 nach einer offenen Standzeit von 37 Jahren - aus [MORGENSTERN, KONIETZKY & FLIß (2024)]

Die Standsicherheit des Kammer-Pfeiler-Systems wurde in den einzelnen Modellierungsschritten durch die $c-\phi-\sigma_t$ Reduktionsmethode untersucht. Die $c-\phi-\sigma_t$ -Reduktion ist ein etabliertes Verfahren und hat sich zur Bestimmung von Sicherheitsfaktoren im Bereich der numerischen Modellierung geotechnischer Themenstellungen bewährt. Dabei werden die Parameter Kohäsion, Reibungswinkel und Zugfestigkeit aller Modellzonen um einen Faktor reduziert und das Modellgleichgewicht berechnet. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich das Modell im Grenzzustand befindet und kein Gleichgewichtszustand mehr erreichbar ist, d.h. die modellierte Struktur wird instabil. Über eine weiterführende Iteration wird der Sicherheitswert entsprechend präzisiert. [MORGENSTERN, KONIETZKY & FLIß (2024)]

In den durchgeführten Modellrechnungen wurden verschiedene Materialeinbauhöhen zwischen 3,6 m und 4,8 m mit konservativen Annahmen zum Kompressionsverhalten der Stoffe betrachtet und das gesamte Modell über einen Zeitraum von 20.000 Jahren berechnet. Bereits nach 5.000 Jahren war der Hauptteil der Senkungen abgeschlossen. Als offene Standzeit wurden unter Berücksichtigung eines Sicherheitspuffers 100 Jahren angenommen.

Für die Firstkonturen und das Pfeilertragssystem konnte während der Betriebsphase ein Sicherheitsfaktor von $S > 2,0$ ermittelt werden (Abbildung 20). Damit kann die Standsicherheit des Pfeilertragssystems sowie der Firststrukturen nachgewiesen werden, selbst ohne jeden Versatz erfährt der untersuchte Pfeiler innerhalb einer möglichen Betriebsdauer nur eine partielle Plastifizierung. Die

Standsicherheit der geplanten Deponiekammern kann damit über die Betriebsphase im unversetzten Zustand für einen mittelfristigen Zeitraum über mehrere 100 Jahre und darüber hinaus im verfüllten Zustand dauerhaft nachgewiesen werden. Die Barrierschicht erfährt in den Berechnungen keinerlei Plastifizierung, wodurch ein rein elastisches Materialverhalten und somit schädigungsfreie Zustände bestätigt werden können. Die Integrität der Barrierschicht ist uneingeschränkt über den Betrachtungszeitraum nachweisbar.

4.4.2 Standsicherheit und Barriereintegrität in der Nachbetriebsphase

Hinsichtlich der Standsicherheit und Barriereintegrität in der Nachbetriebsphase können basierend auf den Ergebnissen der durchgeführten numerischen Modellrechnungen für den neuen Deponiebereich die folgenden Aussagen abgeleitet werden. [MORGENSTERN, KONIETZKY & FLIß (2024)]

Durch 3D-Modellierung kann die Standsicherheit der geplanten Deponiekammern über die Betriebsphase im unversetzten Zustand für einen mittelfristigen Zeitraum über mehrere 100 Jahre und darüber hinaus im verfüllten Zustand dauerhaft nachgewiesen werden.

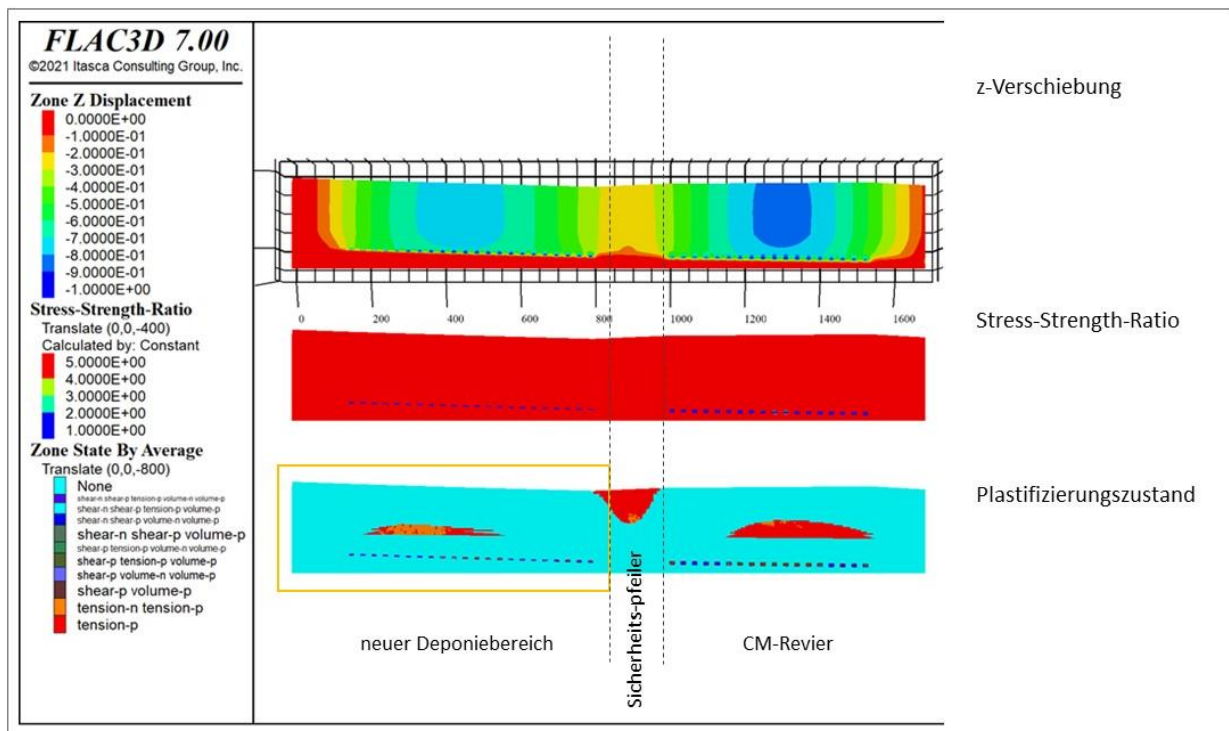


Abbildung 21: Barriereintegrität nach 10.000 Jahren für 3,6 m Einbauhöhe Deponiegut.

Die Barriere zur Gewährleistung eines vollständigen Einschlusses erfährt in den Berechnungen ausschließlich elastische Beanspruchungen und keinerlei Plastifizierungen. Die Integrität der

Barriereschicht bleibt somit über den gesamten Betrachtungszeitraum und darüber hinaus vollständig ohne Schädigungen erhalten (vergleiche Abbildung 21).

Die durchgeführte 2D-Simulation betrachten einen Zeitraum von 20.000 Jahren bis zum Erreichen eines stabilen mechanischen Gleichgewichtes. Der Hauptteil der Deformationen im Deponiebereich und der Senkungen der Tagesoberfläche ist bereits nach etwa 5.000 Jahren abgeschlossen.

Die zu erwartenden Firstsenkungen in den Deponiekammern bewegen sich nach 50 Jahren zwischen 0,005 und 0,011 % je nach Lage der Kammer im Baufeld. Nach 100 Jahren werden zwischen 0,0075 und 0,016 % prognostiziert. Die betrachtete Variation der Füllhöhe in den Kammern zeigt dabei keinen signifikanten Einfluss auf die sich einstellenden Konvergenzraten.

Für den zentralen Bereich des Deponiefeldes werden für eine Verfüllhöhe von 4,8 m an der Tagesoberfläche maximale Senkungen von 0,75 m ermittelt. Die maximal ermittelte Schiefstellung liegt bei ca. $0,10^\circ$ im Übergangsbereich zum südlich angrenzenden CM-Baufeld. Sowohl Senkungen, wie auch die Schiefstellungen liegen im zulässigen Bereich.

4.4.3 Standsicherheit und Barriereintegrität unter Berücksichtigung seismischer Einflüsse

Zur Bewertung der Standsicherheit und Barriereintegrität unter Berücksichtigung seismischer Einflüsse wurde das numerische Modell zum Nachweis der Standsicherheit während der Betriebs- und Nachbetriebsphase um eine dynamische Simulation erweitert und entsprechend angepasst [MORGENSTERN & KONIETZKY (2022)].

Die Nachweisführung baut auf der DIN 4149 auf und beinhaltet sowohl ein entsprechendes synthetisches als auch ein reales Erdbebensignal mit sehr konservativen Ansätzen. Nach DIN 4149 wird für ein spezifisches Gebiet in Deutschland ein synthetisches Erbebensignal zur Bemessung von Bauwerken definiert. Aus diesen Randbedingungen werden zur Simulation einer synthetischen Systemanregung die Modellparameter abgeleitet und auf das Modell übertragen.

Neben dem synthetischen Signal nach DIN 4149 wurde das Modell mit einem realen Erdbebensignal mit vergleichbarem Frequenzgang und vergleichbarer Schwinggeschwindigkeit beaufschlagt. Hierzu wurde auf das L'Aquila Beben von 2009 zurückgegriffen, welches am 07.04.2009 um 17:47 Uhr UTC mit dem Hypozentrum südöstlich von L'Aquila (IT) in einer Tiefe von 15,7 km und mit einer Magnitude von 5,5 MW auftrat und zu erheblichen Zerstörungen führte. Als konservative Annahme wurde aus den verfügbaren Seismogrammen der Kanal mit der höchsten Amplitude und einer maximalen Schwinggeschwindigkeit von 0,03 m/s ausgewählt. Die Abbildung 22 zeigt das Modellsignal zur Simulation des L'Aquila Bebens.

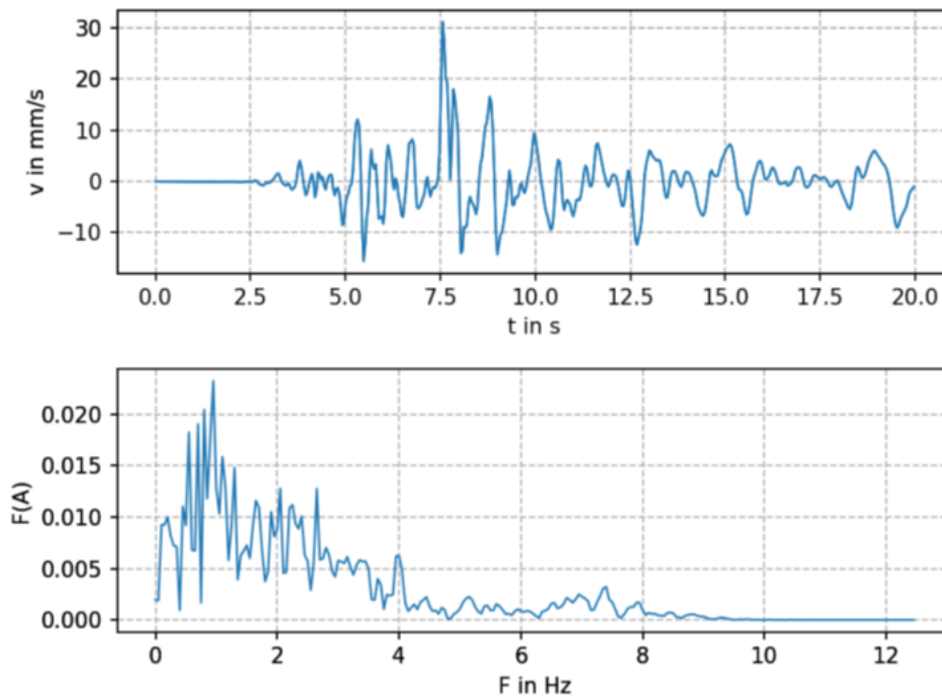


Abbildung 22: Zeitreihe und Spektrum des Modell-Erdbebensignals in Anlehnung an das L'Aquila Beben [MORGENSTERN & KONIETZKY (2022)].

Die Applikation der seismischen Signale erfolgt in den Simulationen gleichzeitig in x- und z-Achse einmal etwa 7 Jahre nach Beginn der Auffahrung der Deponie und zum anderen am Ende des Betrachtungszeitraumes nach 20.000 Jahren. Für den Deponiebereich werden verschiedene Verfüllgrade zwischen 3,6 m und 4,8 m betrachtet.

Die seismischen Signale wurden als zeitabhängige Geschwindigkeitssignale in den Boden des Modells eingespeist und die Reaktion des Gesamtmodells untersucht und bewertet. Dabei zeigt sich, dass in keinem der untersuchten Fälle ein Pfeilerversagen durch die dynamische Anregung zu beobachten war. Die Modellvariante mit der offenen Standzeit stellt hierbei den statisch ungünstigsten Fall dar, da in den drei untersuchten Verfüllszenarien der Versatz eine stützende Wirkung auf die Pfeilerkontur ausübt. Weiterhin zeigt die Modellierung, dass es auch nach 20.000 Jahren zu keiner Beeinträchtigung der Modellstabilität und damit des vollständigen Einschlusses des neuen Deponiebereiches kommen kann. Die dynamische induzierten Zusatzspannungen liegen maximal bei zwischen 0,5 bis 1 MPa und erreichen damit etwa $\pm 10\%$ der statischen Sekundärspannungswerte.

Aus den durchgeführten dynamischen Modellrechnungen kann geschlussfolgert werden, dass ein Erdbeben oder ein vergleichbares dynamisches Ereignis die Standsicherheit des Deponiebereiches sowie die Integrität der Barrierschichten nicht beeinträchtigen kann.

4.4.4 Konvergenz des Grubengebäudes und Oberflächenabsenkungen

Aus den durchgeführten numerischen Modellrechnungen können für die Auffahrungen im neuen Deponiebereich jährliche Konvergenzraten je nach Lage der Kammer im Baufeld zwischen 0,005 und 0,011 % der ursprünglichen Kammerhöhe nach einer Standzeit von 50 Jahren ermittelt werden. Nach 100 Jahren werden Werte zwischen 0,0075 und 0,016 % prognostiziert, wobei die betrachtete Variation der Füllhöhe in den Kammern keinen signifikanten Einfluss auf die sich einstellenden Konvergenzraten darstellt. In Abbildung 23 sind die Senkungen der Tagesoberfläche in den ersten 100 Jahren nach Auffahrung der Deponiekammern dargestellt.

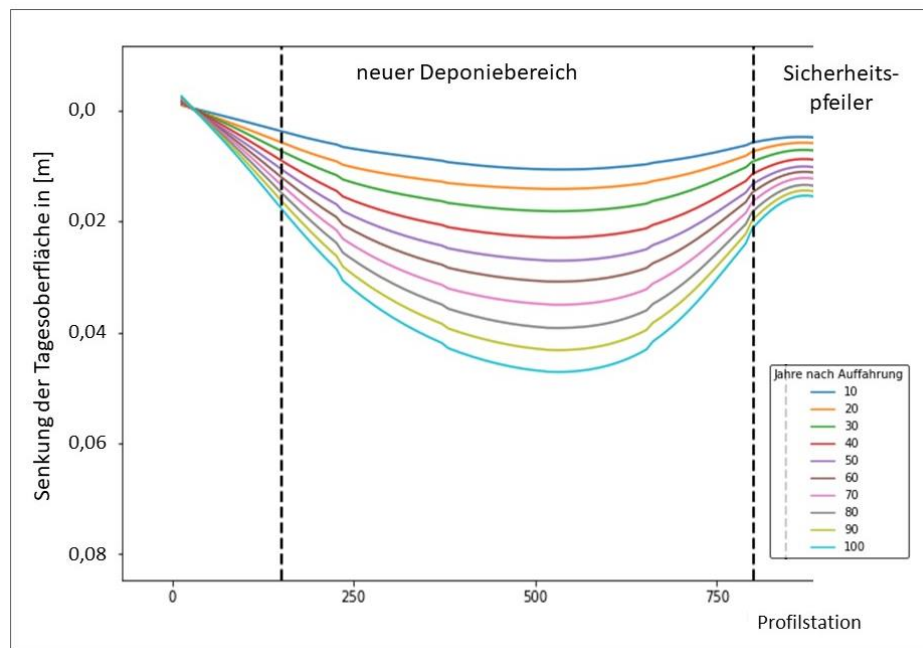


Abbildung 23: Senkung der Tagesoberfläche über dem Deponiebereich in den ersten 100 Jahren nach Auffahrung der Deponiekammern.

Für den zentralen Bereich des Deponiefeldes werden für eine Verfüllhöhe von 3,6 m an der Tagesoberfläche maximale Senkungen (im Endzustand) von 1,40 m ermittelt. Die maximal ermittelte Schiefstellung liegt bei ca. $0,10^\circ$ im Übergangsbereich zum südlich angrenzenden CM-Baufeld. Die Abbildung 24 zeigt hierzu die prognostizierten Endsenkungen der Tagesoberfläche.

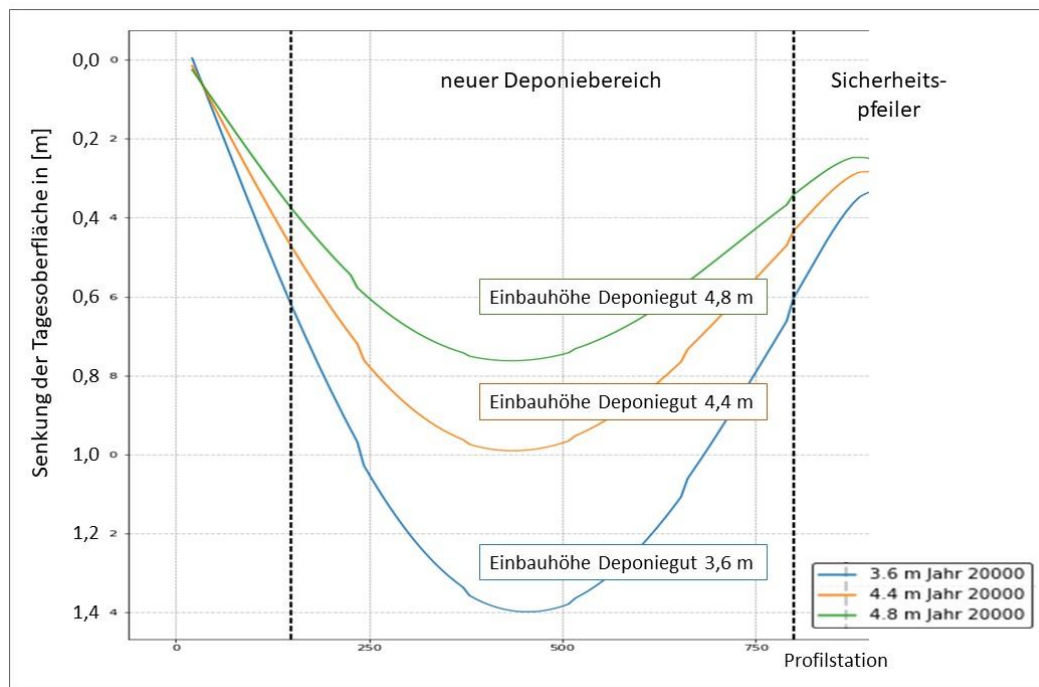


Abbildung 24: Endsenkungen der Tagesoberfläche über dem Deponiebereich in Abhängigkeit von der Einbauhöhe des Deponiegutes.

4.5 Geotechnische Messungen während des Einlagerungsbetriebes und zum Betriebsabschluss

Im Salzbergwerk Heilbronn-Kochendorf werden seit 2008 neben der Messung von Pfeilerquerdehnungen regelmäßig Spannungsmessungen mittels Hydraulic Fracturing vorgenommen und entsprechend ausgewertet [u.a. STÄUBERT (2017), FLIß & MÜLLER (2020)]. Das angewandte Messverfahren findet seit fast 30 Jahren eine breite Anwendung im deutschen Salzbergbau sowie dem Verahrungs- und Entsorgungsbergbau.

Die im Bergwerk Heilbronn abgebauten Steinsalzhorizonte des Mittleren Muschelkalks können mit dem Verfahren hinsichtlich Spannungsverteilung und Entfestigungsverhalten in Abbaupfeilern und Sicherheitsfesten gebirgsmechanisch sicher bewertet und abbaudynamische Veränderungen messtechnisch belegt werden.

Das gebirgsmechanische Monitoring des Bergwerkes Heilbronn beinhaltet neben den Hydrofrac-Messungen die folgenden Maßnahmen:

- 4-jährliches Hauptsenkungsnivellement über den Grubenfeldern des Bergwerkes Heilbronn,
- flächendeckender Betrieb untertägiger Konvergenzmessstellen und jährliche Bewertung der untertägigen Konvergenzmessungen,

- Kontrollbefahrungen und Dokumentation des Grubenzustandes (Beweissicherung),
- Kontrollierende Hydrofracmessungen im Rahmen einer geotechnischen Überwachung.

Zur gebirgsmechanischen Überwachung des Deponiebereiches während des Einlagerungsbetriebes werden in bewährter Form Konvergenzmessstellen und ggf. Pfeilerquerdehnungsmessstellen eingerichtet. Auf diese Weise können die prognostizierten Hangendabsenkungen überwacht und verifiziert werden. Des Weiteren sind im Bereich des Deponiefeldes Hydrofrac-Messungen zur Ermittlung der gebirgsmechanischen Ruhedrucke zu verschiedenen Zeitpunkten zu Beginn und am Abschluss der Deponiephase vorgesehen, um die modelltechnisch getroffenen Annahmen zur Sekundärspannungsverteilung im Pfeilertragsystem zu verifizieren.

4.6 Grundsätze für die Verwahrung und für Abschlussbauwerke

Zur Gewährleistung eines sicheren und dauerhaften Einschusses der abgelagerten Deponiematerialien wird es nach dem Betriebsschluss der Deponie erforderlich, die Zugangsstrecken zur Deponie mittels langzeitfunktionsfähiger Dammbauwerke zu verschließen. Die drei Zugangsstrecken wurden bereits in einem geeigneten geologischen Horizont sowie unter Beachtung geometrischer Anforderungen und Randbedingungen, bspw. Abstand der Streckenauffahrungen untereinander, aufgefahren. Die Strecken durchstoßen den südlichen 200 m breiten Sicherheitspfeiler des Deponiebereiches. Im Bereich der Zugangsstrecken sind keine gebirgsmechanischen Auffälligkeiten bzw. geologischen Besonderheiten zu beobachten. Zum Einbau der vorgesehenen Dichtungsbauwerke steht damit innerhalb des Sicherheitspfeilers ausreichend Platz zur Verfügung. Selbst für den sehr unwahrscheinlichen Fall, dass nach Einbau des Dichtungssystems ein fehlerhafter Materialeinbau/ unzureichende Materialeigenschaften nachgewiesen werden können, besteht prinzipiell die Möglichkeit, ein zweites Dichtungssystem innerhalb des vorhandenen Barrierepfeilers zu errichten [TRIANAFYLLIDIS (2022)].

Die geplanten Abschlussbauwerke sind in der Lage, die Zugangsstrecken richtungsunabhängig gegen einen angenommenen maximal möglichen hydrostatischen Druck abzudichten. Auf diese Weise können diese Dichtungsbauwerke sowohl den Deponiebereich gegen das angeschlossene Grubenfeld abschotten als auch das Grubenfeld gegen den Deponiebereich. Durch diese Systemauslegung wird einem angenommenen hypothetischen Lösungszutritt im Bereich der Deponie entgegengewirkt, so dass eine Beeinflussung des Grubenfeldes auch im Fall von nicht planbaren Ereignisabläufen wirksam ausgeschlossen werden kann.

Durch die Materialauswahl und die Funktionalität der Einzelkomponenten wird die geforderte Langzeitabdichtung sicher gewährleistet. Als langzeitstabiles Dichtelement ist eine entsprechend

dimensionierte Bentonitsektion vorgesehen, in welcher über Äquipotenzialsegmente eine gleichmäßige Benetzung des Bentonites sichergestellt wird. Die statische Systemauslegung sieht zur Ableitung des hydrostatischen Druckes Schotterwiderlager als Langzeitkomponenten und spezielle Salzbetonwiderlager als Kurzzeitkomponenten vor.

Basierend auf verschiedenen Dichtungskonzepten für das Bergwerk Heilbronn [IBeWa (1997), KIT (2007), KIT (2018), ITT (2022)] wurde für die Zugangsstrecken zur Deponie unter den gegebenen Randbedingungen ein Dichtungssystem entworfen und mechanisch / hydraulisch bemessen [TRIANTAFYLLIDIS (2022)]. Die Abbildung 25 zeigt einen schematischen Aufbau des Dichtungssystems mit den vorgesehenen geometrischen Abmessungen der Einzelkomponenten.

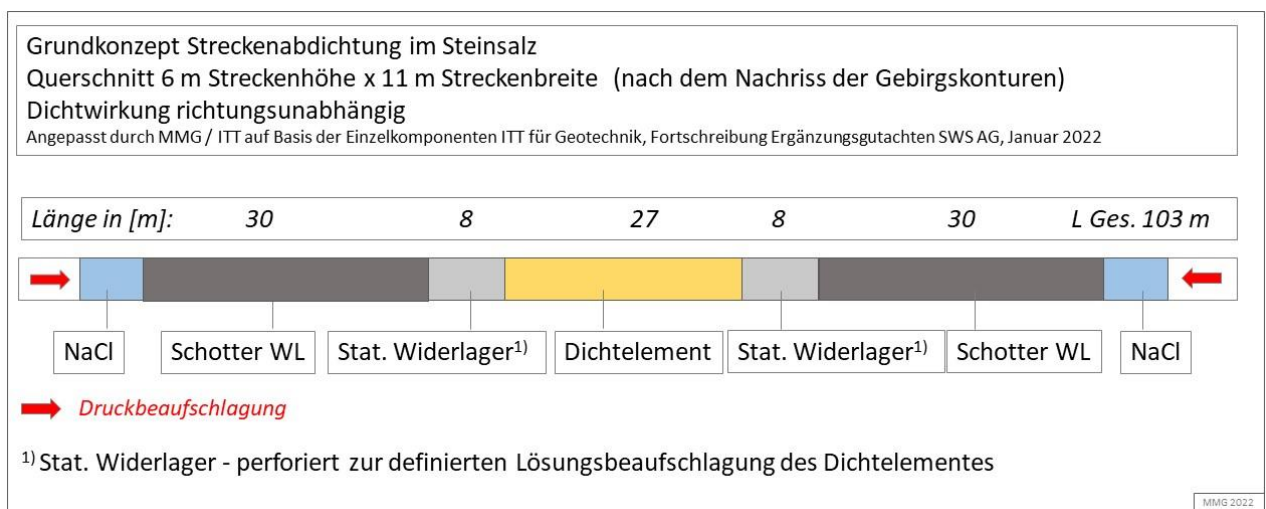


Abbildung 25: Schematischer Aufbau eines Streckenverschlusses mit richtungsunabhängiger Dichtwirkung.

4.7 Zusammenfassung geotechnischer Standsicherheitsnachweis

Die im Rahmen des geotechnischen Standsicherheitsnachweis durchgeführten Berechnungen, Betrachtungen und numerischen Modellierungen können unter den gegebenen Randbedingungen einen vollständigen und dauerhaften Abschluss der Abfälle von der Biosphäre sicher belegen.

Während der Erstellung der Deponiekammern sowie der Betriebsphase der Deponie ist die Standsicherheit der Auffahrungen vollumfänglich gewährleistet. Im Deponiebereich selbst, wie auch an der Tagesoberfläche sind keine unzulässigen Deformationen und Verformungen zu erwarten, welche die Funktionsfähigkeit des Bergwerkes beeinträchtigen können.

Das Tragverhalten des Kammer-Pfeiler-Systems weist ausreichende Sicherheiten auf, um Verbrüche und unzulässige Pfeilerdeformationen auch während der Nachbetriebsphase ausschließen zu können. Eine Beeinträchtigung der Barriereintegrität und damit eine Gefährdung des

vollständigen Einschlusses kann unter sämtlichen anzunehmenden Randbedingungen über den Betrachtungszeitraum von 20.000 Jahren und aufgrund des erreichten Gleichgewichtszustandes auch darüber hinaus ausgeschlossen werden.

Mit den durchgeführten dynamischen Modellrechnungen zur Berücksichtigung seismischer Einflüsse kann die Standsicherheit des neuen Deponiebereiches sowie die Integrität der Barrierschichten auch unter Erdbebeneinwirkungen oder vergleichbarer dynamischer Ereignisse nachgewiesen werden.

Die eingebrachten Abfälle bewirken auf längere Sicht eine Stabilisierung des Pfeilertragsystems. Ein vollständiger Einschluss dieser Materialien wird nach etwa 5.000 Jahren erreicht. Die ermittelten Konvergenzraten sowie Absenkungen der Tagesoberfläche können als verträglich eingestuft werden.

5 Nachweis der Langzeitsicherheit

5.1 Bewertung der natürlichen Barrieren

5.1.1 Wirtsgestein

Das Steinsalzlager im geplanten Deponiebereich, bestehend aus Unterem Steinsalz und dem auflagernden Bändersalz, stellt eine kompakte Struktur dar, welche frei von Klüften und anderweitigen Störungsstrukturen ist. Das Steinsalz weist dabei neben seinen mechanischen Materialfestigkeiten allgemein sehr geringe Lösungs- und Gaspermeabilitäten auf, so dass eine Eignung als Barrierematerial bestätigt werden kann [IBeWa (1997) und POPP et al. (2015)].

Im Multibarrierensystem der geplanten Deponie bildet das Steinsalz primär die Sicherheitsfesten um den Deponiebereich, um diesen sicher vom anschließenden Grubenfeld des Bergwerks Heilbronn im Westen und Süden abzutrennen. Die Sicherheitsfesten besitzen im Westen eine Breite von 100 m und im Süden von 200 m. Die Breite dieser Sicherheitsfesten entspricht den zugelassenen Festenbereichen zur Abtrennung von UTD bzw. UTV Bereichen (100 m) bzw. durchörterten Festenbereichen (200 m), in welchen nach Betriebsschluss entsprechende Streckenabdichtungen zur Abtrennung des Deponiebereiches einzubauen sind.

Mit den vorgesehenen Sicherheitsfesten um den Deponiebereich kann die Sicherheit des Deponiebetriebes sowie der vollständige Einschluss der eingebrachten Abfallstoffe nach Betriebsschluss der Deponie dauerhaft gewährleistet werden.

5.1.2 Nebengestein

Die Hangend- und Liegendbarriere der neuen Deponie stellen die Oberen und Unteren Sulfatschichten (Barrierefunktion des Grundanhydrits) dar. Die großflächige und gleichmäßige Ausbildung der Oberen und Unteren Sulfatschichten sowie die des Bändersalzes weisen auf einen sehr ebenen und homogenen Sedimentationsraum zu Zeiten des Mittleren Muschelkalks im süddeutschen Raum hin. Die Barrierschichten sind lateral weiträumig aushaltend und weisen eine ausreichende Mächtigkeit sowie entsprechend geringe Permeabilitäten auf, wodurch die Eignung dieser Strukturen als hydrologische Barriere nachgewiesen werden kann.

Die geologischen Barrierehorizonte der Oberen und Unteren Sulfatschichten können die Sicherheit des Deponiebetriebes sowie den vollständigen Einschluss der eingebrachten Abfallstoffe nach Betriebsschluss der Deponie unter den anzunehmenden Randbedingungen dauerhaft gewährleisten.

5.1.3 Deckgebirge

Das Deckgebirge über dem Salinar wird aus Gesteinen des Oberen Muschelkalks, des Unterkeupers und Gipskeupers sowie aus quartären Ablagerungen gebildet. Die hydrogeologischen Verhältnisse des Deckgebirges sind durch einen geschichteten Aufbau und den mehrfachen Wechsel von Grundwasserleitern und -stauern geprägt, was zur Ausbildung von mehreren Grundwasserstockwerken im Deckgebirge führt.

Die Basisschicht (Aquifersohle) der hangenden Grundwasserleiter stellen die Oberen Sulfatschichten dar. In der Heilbronner Mulde sind die Oberen Sulfatschichten nicht ausgelaugt; sie fungieren als natürliche Barriere gegen Wasserzutritte aus den hangenden Grundwasserleitern ins Steinsalzlager. Die Oberen Sulfatschichten sind bei ungestörter Lagerung grundsätzlich als wasserundurchlässig zu betrachten, wodurch ein sicherer Abschluss der Grubenauffahrungen des geplanten neuen Deponiebereiches gegen das wasserführende Deckgebirge gewährleistet wird.

5.2 Bewertung von technischen Eingriffen

5.2.1 Schächte

Die Lagerstätte wurde im Bereich des Grubenfeldes Heilbronn durch insgesamt 3 Schächte aufgeschlossen. Dabei handelt es sich um die Schächte Heilbronn, Franken und Konradsberg. Im Bereich des verbundenen Grubenfeldes Kochendorf befindet sich der Schacht König Wilhelm II.

Die Schächte durchörtern die geologische Hangendbarriere vollständig. Zur Endverwahrung der Schächte nach Betriebseinstellung und Stilllegung des Bergwerkes sind entsprechend langzeitstabile Schachtverschlüsse als geotechnische Barrieren zur Ertüchtigung der geologischen Barriere im Hangenden zu errichten.

Im Zuge der Errichtung der Suedlink Stromtrasse ist das Teufen von zwei weiteren Schächten, dem Schacht Großgartach südwestlich des Grubenfeldes Heilbronn und dem Schacht Kochendorf nordwestlich des Grubenfeldes Kochendorf geplant. Auch diese Schächte sind nach Betriebseinstellung entsprechend langzeitsicher zu verwahren und mit Schachtverschlüssen als geotechnische Barrieren zu versehen.

5.2.2 Grubenbaue

Der neue Deponiebereich ist vom Grubenfeld durch eine Sicherheitsfeste abgetrennt, welche westlich der Deponie 100 m und südlich davon 200 m aufweist. Bei den benachbarten Grubenfeldern handelt es sich um mittels Continuous Miner aufgefahrene Abbaureviere, in denen der Salzabbau vollständig zum Erliegen gekommen ist und in denen bereits mit Versatztätigkeiten (Bergeversatz)

begonnen wurde. Eine negative Beeinflussung des Deponiebereiches durch benachbarte Grubenbaue kann somit ausgeschlossen werden.

5.2.3 Übertagebohrungen

Eine Gefährdung des vollständigen Einschlusses der abgelagerten Abfälle infolge eines Lösungszutritts über Übertagebohrungen kann ausgeschlossen werden, da im Bereich der geplanten Deponie selbst keine Übertagebohrungen vorhanden sind. Die im benachbarten Nordfeld existierende Bohrung SWS-349 weist, wie auch alle anderen Erkundungsbohrungen im Grubenfeld, einen Sicherheitspfeiler mit einem Radius von 50 m auf. Es besteht damit zwischen der jeweiligen Bohrlochachse und dem Grubengebäude eine ausreichende Barriere aus intaktem Salzgestein, wodurch eine hydrologische Gefährdung ausgeschlossen werden kann. Die Bereiche der Bohrungen zeigen weder über- noch untertage besondere Auffälligkeiten.

5.2.4 Untertagebohrungen

Im Zuge der Auffahrung des Deponiebereiches werden in regelmäßigen Abständen Firstbohrungen zur Hangenderkundung gestoßen. Diese Bohrungen werden maximal bis zur Hangendgrenze des Salzlagers gestoßen und berühren die hydrologische Barriere im Hangenden nicht⁶⁾. Negative Auswirkungen auf die Barriereintegrität können daher ausgeschlossen werden.

5.3 Bewertung der Barrieren

5.3.1 Abfallbeschaffenheit/ Konditionierung und Art der Einbringung

Das mechanische Verhalten der konditionierten Abfallstoffe gewährleistet eine effiziente Stützwirkung und damit eine Begrenzung der untertägigen Deformationen und übertägigen Senkungen. Das Einbauverfahren und die Konditionierung gewährleisten die In-Situ Zieleigenschaften.

Der Ansatz einer einhüllenden Spannungs-Dehnungs-Kurve für das Verhalten der abgelagerten Abfallstoffe stellt einen strikt konservativen Ansatz zur Berücksichtigung des Kompaktionsverhaltens der einzubringenden Abfallstoffe dar, wobei dieser Ansatz auf umfassenden Erfahrungen der laborativen Einbaubegleitung und einem umfangreichen Datenpool über die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Abfallstoffe basiert. Die einhüllende Kurve widerspiegelt nicht das reale Materialverhalten, die ermittelten Senkungen und Hangenddeformationen werden damit z.T.

⁶⁾ *Im neuen Deponiebereich werden die Firstbohrungen nicht bis zur Hangendgrenze gestoßen, es erfolgt nur der Nachweis der geforderten Steinsalzmächtigkeit.*

deutlich überschätzt. Hinsichtlich der Gewährleistung der geomechanischen Eigenschaften können die getroffenen Annahmen in den durchgeführten Berechnungen für den Betrieb der Deponie als abdeckend angesehen werden, so dass die turnusmäßigen Materialprüfungen auf die Ermittlung der Abfallzusammensetzung beschränkt werden können. Auf geomechanische Eignungstests kann verzichtet werden, sofern sich die vorgesehenen Abfallstoffe nicht grundlegend verändern.

5.3.2 Streckendämme

Das Multibarrierensystem zum vollständigen Einschluss der Abfälle sieht die Abdichtung der drei Zugangsstrecken nach Einstellung des Deponiebetriebes vor. Die technische Machbarkeit dieser langzeitfunktionsfähigen Streckenverschlüsse wurde in einem Gutachten (Antragsunterlage Teil Sicherheit und Geotechnik D 6) geprüft und nachgewiesen. Das Gutachten basiert auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik für derartige Bauwerke. Die geologisch/ geotechnischen Bedingungen im Bereich der Sicherheitsfeste lassen den Einbau des konzipierten Dichtungssystems zu. Es wird eingeschätzt, dass das Konzept eine langzeitsichere Abtrennung des Deponiebereiches vom Grubenfeld des Bergwerkes Heilbronn sicher gewährleistet.

5.3.3 Schachtverschlüsse

Der neue Deponiebereich wird nicht direkt durch einen Tagesschacht erschlossen, der Verschluss der Tagesschächte stellt damit neben dem Verschluss der Zugangsstrecken eine weitere technische Barriere im Multibarrierensystem dar.

Für den langzeitsicheren Verschluss von Tagesschächten existiert ein erprobter Stand der Technik [BRA (2007)], welcher in späteren Konzept- und Auslegungsplanungen entsprechend zu berücksichtigen und gegebenenfalls angepasst wird.

5.4 Bewertung von natürlich bedingten Ereignissen

5.4.1 Vulkanismus, Diapirismus und Subrosion

Im Raum Heilbronn gibt es keine Hinweise auf vulkanische Aktivitäten, weder während der Sedimentationsphasen bzw. Absenkungsphasen (Fränkische Senke) seit dem Permokarbon (vor ca. 300 Mio Jahren) bis in den Jura, noch während der Abtragungsphasen mit Beginn der Anhebung der Süddeutschen Scholle und der Einsenkung des Oberrheingrabens sowie der Absenkung der Heilbronner Mulde. Eine Beeinflussung der Barrierschichten und des Steinsalzlagers durch vulkanische Aktivitäten kann ausgeschlossen werden.

Im Bereich des Grubenfeldes Heilbronn und dessen Nahfeld sind keine Strukturen zu beobachten, die auf halokinetische Prozesse im Sinne von Diapirismus (langsamer, dichtebedingter Salzaufstieg im Untergrund) hinweisen. Eine diesbezügliche Beeinflussung der Barrierschichten und des Steinsalzlagere kann ausgeschlossen werden.

Im Nachweisgebiet kann weiterhin eine Beeinflussung der Barrierschichten und des Steinsalzlagere durch Subrosionserscheinungen im Deckgebirge ausgeschlossen werden (vergl. Abschnitt 2.2.13).

5.4.2 Erdbeben

Das Salzbergwerk Heilbronn inklusive des geplanten Deponiestandortes liegt in einer Region mit äußerst geringer Erdbebenaktivität. Der Deponiestandort liegt in keiner klassifizierten Erdbebenzone, eine relevante Erdbebengefahr kann in Auswertung verschiedener Erdbebenkataloge nicht abgeleitet werden.

Im Seismologischen Gutachten (BAISCH (2024), s. Teil D5 der Antragsunterlagen) wird ein approximativer Ansatz verwendet, um die Rate zu bestimmen, mit der Erdbeben einer gewissen Stärke auftreten können. Dabei werden eine Reihe von vereinfachenden Annahmen getroffen, um abzuschätzen, ab welcher Stärke ein Erdbeben in einer bestimmten Entfernung am Deponiestandort die Intensität 8 erreichen kann. Die mittlere Wiederkehrperiode für das Erreichen bzw. Überschreiten der Intensität 8 durch ein Erdbeben beträgt etwa 31.250 Jahre. Für das Betrachtungsintervall von 20.000 Jahren liegt die Überschreitenswahrscheinlichkeit der Intensität 8 unterhalb der geforderten 99 %. Damit ist die Anforderung der DepV bezüglich der Standortwahl als erfüllt anzusehen [BAISCH (2024)].

Für die zusätzliche Bewertung eines Worst Case Falles, dass ein Erdbebenereignis den Deponiebereich mit einer Bruch- bzw. Versatzfläche tangiert, wurde statistisch eine Auftretensrate von $1,1 \times 10^{-7}$ 1/Jahr ermittelt. Dieser Wert entspricht einer Wahrscheinlichkeit von $2,2 \times 10^{-3}$ 1/20.000 Jahre, dass innerhalb von 20.000 Jahren ein derartiges Erdbebenereignis auftreten kann.

Aufgrund der ermittelten geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten von Erdbebenereignissen und unter Berücksichtigung, dass bereits nach ca. 5.000 Jahren der vollständige Einschluss der eingebrachten Abfallstoffe erfolgt ist, wird das Risiko, dass die Langzeitsicherheit der Deponie durch ein Erdbeben beeinträchtigt werden könnte, als vernachlässigbar bewertet.

5.5 Bewertung von technisch bedingten Ereignissen und Prozessen

5.5.1 Undichtwerden von Erkundungsbohrungen

Im Deponiebereich existieren keine Erkundungsbohrungen, die im Nahbereich um die geplante Deponie vorhandenen Erkundungsbohrungen weisen einen ausreichenden Sicherheitspfeiler auf. Die untertägigen Bohrungen zur Hangenderkundung enden an der Hangendgrenze des Salzlagers und damit weit unter der Oberkante der Barrierschichten.

5.5.2 Wassereinbruch während der Ablagerungs- und Stilllegungsphase

Ein Wassereinbruch während der Ablagerungs- und Stilllegungsphase im Deponiebereich wäre nur möglich im Falle eines massiven Versagens der hydrologischen Barrierschicht im Hangenden. Einem derartigen Szenario wird durch die sichere Dimensionierung des Pfeilertragsystems und damit der Begrenzung der Hangenddeformationen auf zulässige Werte wirksam entgegengewirkt. Ein Verlust der Barriereintegrität kann unter den gegebenen Randbedingungen ausgeschlossen werden.

Für das benachbarte Grubenfeld können ebenfalls Wassereinbrüche als Folge eines Integritätsverlustes der Hangendbarriere ausgeschlossen werden, da auch hier eine entsprechend standsichere Dimensionierung angewandt wurde, welche eine unzulässige Beanspruchung der Hangendbarriere ausschließt. Zusätzlich besteht hier die Möglichkeit Verschlussbauwerke in die Zugangsstrecken einzubauen.

Zur Abwehr möglicher Gefährdungen der Tagesschächte Franken und Heilbronn durch Hochwasserereignisse des in unmittelbarer Nähe liegenden Neckars existieren verschiedene Notfallkonzepte („Notfallkonzept bei Hochwasser“), welche in die Gesamtnotfallkonzepte der SWS AG für den übertägigen und untertägigen Betrieb integriert sind. Über ein Frühwarnsystem bei erhöhten Pegelständen und eine Auslösung von Hochwasseralarm ab dem HQ50 Wert (Überschreitung des Pegels bei einem 50 jährlichen Hochwasser) mit entsprechenden Maßnahmen kann ein Wasserzutritt über die Tagesschächte ausgeschlossen werden.

Die übrigen Tagesschächte Konradsberg, König Wilhelm II sowie die zukünftigen SuedLink-Schächte wurden bzw. werden hinsichtlich des Risikos eines möglichen Wasserzutritts in Folge von Hochwasser/ Starkregen untersucht. Eine Gefährdung der Schachtstandorte liegt nicht vor.

5.5.3 Laugen- oder Gaseinbruch während der Ablagerungs- und Stilllegungsphase

Für den Bereich des benachbarten Bergwerkes Kochendorf sind Laugenzutritte aus dem Zwischendolomit bekannt und dokumentiert. Die in geringen Mengen zutretenden Lösungen können aufgrund

des Alters als geogene Wässer eingeordnet werden [GLA (1992 und 1995)]. Die Beobachtung der Zulaufdaten zeigt eine kontinuierliche Abnahme, was prinzipiell auf ein Auslaufen eines begrenzten Reservoirs schließen lässt.

Im Bereich des Bergwerksfeldes Heilbronn sind keine Zutritte aus dem Zwischendolomit dokumentiert. Die Wahrscheinlichkeit eines Laugenzutritts aus dem Zwischendolomit wird daher als sehr gering eingeschätzt. Treten dennoch Zuläufe aus dieser Struktur auf, so ist von einem begrenzten Reservoirvolumen auszugehen, welches mit entsprechenden Maßnahmen bewirtschaftet werden kann.

Innerhalb des Steinsalzlagers kam es während der Auffahrung in den einzelnen Grubenfeldern vereinzelt zu Ausgasungen aus Spalten im Gestein (GLA 1995), wobei im Wesentlichen kurzzeitige Gasaustritte aus endlichen Gasreservoirs bzw. die Entleerung von im Steinsalz eingeschlossenen Gasblasen aus Faulgasen zu beobachten waren. Diese fossilen Gaseinschlüsse innerhalb der Lagerstätte sind aufgrund ihres geringen Volumens und ihrer Zusammensetzung für die Standortsicherheit und Langzeitsicherheit des Bergwerks nicht von Belang. Im neuen Deponiebereich konnten bisher keine signifikanten Ausgasungen bzw. Hinweise auf fossile Gaseinschlüsse beobachtet werden.

5.5.4 Versagen der Schachtverschlüsse

Für die Planung und Ausführung von Schachtverschlusssystemen existiert ein anerkannter Stand der Technik sowie eine Reihe von Richtlinien zur Gestaltung derartiger Verwehrkonzeptionen. Zum Nachweis der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit sind eine Reihe von Nachweisverfahren verfügbar, durch die auch eine Langzeitfunktionsfähigkeit der Schachtverschlusssysteme sicher belegt werden kann. Das Risiko eines Versagens von Schachtverschlüssen wird daher als vernachlässigbar eingeschätzt.

5.5.5 Bergbaubedingte Gebirgsauflockerungen

Als bergbaubedingte Gebirgsauflockerungen werden plötzliche Senkungen bzw. Erschütterungen im Hangendbereich des Salzlagers infolge eines seismischen Ereignisses bzw. eines Bruchvorganges oder allmähliche Senkungen infolge der Abbautätigkeit angesehen. Bei diesen Vorgängen ist von einem mehr oder weniger starken Einfluss auf die Hangendbarriere auszugehen, wobei die Integrität der Barriere und damit der vollständige Einschluss der eingelagerten Abfallstoffe beeinträchtigt werden kann.

Für das Salzbergwerk Heilbronn können plötzliche Absenkungen als Folge von Gebirgsschlägen aufgrund des mechanischen Verhaltens des Wirtsgesteins Steinsalz, dem Einbringen von Versatzmaterial und der Anwendung umfassender Monitoringmaßnahmen ausgeschlossen werden. Eine Verletzung der Barrierintegrität und damit die Gefährdung des vollständigen Einschusses als Folge derartiger Vorgänge kann ausgeschlossen werden.

Die allmählich ablaufenden Senkungsprozesse als Folge der Deformationen im Pfeilertragsystem liegen unterhalb der zulässigen Grenzwerte, so dass eine Beeinträchtigung der Funktion der geologischen Barrierschicht ausgeschlossen werden kann.

5.5.6 Bohrungen oder sonstige Eingriffe in der Nachbetriebsphase

Unter Eingriffen in die natürlichen und technischen Barrieren während der Nachbetriebsphase (Human Intrusion), sind bspw. das Niederbringen von Übertagebohrungen oder das Abteufen neuer bzw. Aufwältigen alter Schächte zu betrachten.

Durch einen ordnungsgemäßen Abschluss der Gewinnungsarbeiten und der Versatzmaßnahmen im Bergwerk Heilbronn sowie dem Verschluss der Zugangsstrecken und Tagesschächte mit zugehörigen Dokumentationen und Kenntlichmachungen können die Risiken für die Langzeitsicherheit minimiert werden.

Im Falle einer Tagesbohrung nach Stand der Technik bzw. auch ohne besondere Sicherungsvorkehrungen und Ausbaumaßnahmen in den Deponiebereich ist mit geeigneten Maßnahmen prinzipiell eine dauerhafte Verwahrung der Bohrung und die Wiederherstellung der Integrität der hydrologischen Barriere möglich und realisierbar, wodurch Risiken auf ein tolerables Minimum reduziert werden können.

5.6 Verwahrung der Tageszugänge

Zum Verschluss der Tagesschächte wird ebenfalls ein entsprechend redundantes Dichtungssystem eingebaut, welches die Schachtröhren dauerhaft gegen zutretende Süßwässer aus dem Deckgebirge abdichtet. Für den Verschluss von Tagesschächten existiert ein erprobter Stand der Technik, welcher in späteren Konzeptplanungen entsprechend zu berücksichtigen und gegebenenfalls anzupassen ist.

5.7 Zusammenfassung Langzeitsicherheitsnachweis

Mit den vorhandenen natürlichen Barrieren im Wirtsgestein und im Hangenden und im Liegenden kann ein vollständiger und dauerhafter Einschluss der deponierten Abfälle gewährleistet werden. Die Barriereintegrität kann unter allen betrachteten Szenarien, inklusive dem Ansatz seismischer Einwirkungen nachgewiesen werden. Die induzierten Verformungen der Barrierschichten durch die Erstellung der Deponiekammern wie auch die zusätzlichen Belastungen im Pfeilertragsystem durch seismische Anregungen liegen im zulässigen Bereich ohne Schädigungen der Barrieren hervorzurufen.

Die vorhandenen technischen Eingriffe, wie Schächte, Grubenbaue sowie Über- und Untertagebohrungen stellen keine Risiken für den vollständigen Einschluss dar. Hinsichtlich der technischen Eingriffe existieren entsprechende Abdichtungskonzepte bzw. sind Sicherheitsfesten vorgesehen, um einen vollständigen und dauerhaften Einschluss der deponierten Abfallstoffe sicher zu gewährleisten. Die Beanspruchung der natürlichen Barrieren durch bergbaubedingte Gebirgsauflockerungen liegt im zulässigen Bereich, so dass die Integrität der natürlichen Barrieren durch Beeinflussungen aus der Auffahrung des Deponiebereiches nicht gefährdet werden kann.

Die Konzepte der vorgesehenen technischen Barrieren basieren jeweils auf dem Stand der Technik und können aufgrund der Wirkungsweise und der Baustoffauswahl eine langzeitsichere Funktion gewährleisten. Für die langzeitsichere Abdichtung der Zugangstrecken zum neuen Deponiebereich wurde das bestehende Dammkonzept entsprechend angepasst (siehe Teil D6 der Antragsunterlagen). Die Tagesschächte im angeschlossenen Grubengebäude werden nach Einstellung des Grubenbetriebs gemäß den Anforderungen vollständig verfüllt und dauerhaft gesichert.

Die betrachteten Risiken aus natürlich bedingten Ereignissen, wie Vulkanismus, Diapirismus, Subrosion und Erdbeben können als vernachlässigbar bewertet werden. Die Bewertung von möglichen Erdbebeneinwirkungen erfolgte durch ein separates seismologisches Gutachten (siehe Teil D5 der Antragsunterlagen) sowie über eine numerische Modellrechnung unter Berücksichtigung von Erdbebenbelastungen.

Mit der Bewertung anthropogener Ereignisse und Prozesse konnten keine Einflüsse identifiziert werden, welche den vollständigen Einschluss der deponierten Abfälle gefährden können. Zur Bewertung wurden alle relevanten standortspezifischen Randbedingungen und Einflussfaktoren technischer Natur herangezogen. Für den Fall anthropogener Einwirkungen können die verbleibenden Restrisiken durch einen ordnungsgemäßen Abschluss der Gewinnungsarbeiten und der Versatzmaßnahmen im Bergwerk Heilbronn sowie dem Verschluss der Zugangstrecken und Tagesschächte mit zugehörigen Dokumentationen und Kenntlichmachungen minimiert werden.

6 Stilllegung der Deponie

Nach Betriebsschluss und vor Beginn der Abschlussmaßnahmen des Deponiebereiches werden entsprechende geotechnische Abschlussmessungen und Dokumentationen durchgeführt. Auf Basis dieser Messwerte und Beobachtungen können die getroffenen Annahmen und Randbedingungen des Langzeitsicherheitsnachweises abschließend validiert und ggf. angepasst werden.

Nach Beendigung des Deponiebetriebes werden die Zugangstrecken mittels langzeitstabiler Streckenabdichtungen verschlossen und vom aktiven Bereich des Bergwerkes abgetrennt. Das Dichtungssystem ist hierbei auf den maximal möglichen hydraulischen Druck bemessen. Eine Weiterführung des Grubenbetriebs ist danach uneingeschränkt möglich.

Die Tagesschächte im angeschlossenen Grubengebäude werden nach Einstellung des Grubenbetriebs gemäß den Anforderungen vollständig verfüllt und gesichert. Die Konzeption hierfür basiert auf den geologischen/ geotechnischen Randbedingungen und den Anforderungen an die Langzeitstabilität der zu errichtenden Schachtabdichtungen. Der Entwurf der Verfüllsäule der Schächte, die Qualitätssicherung und die Maßnahmen nach Abschluss der Schachtverfüllung orientiert sich am Stand der Technik zum Zeitpunkt der Umsetzung. Zum heutigen Zeitpunkt wären dies die aktuellen Hinweise des Leitfadens für das Verwahren von Tagesschächten [BR Arnsberg (2007)]. Die obertägigen Schachtabdeckungen werden abgesperrt, dauerhaft gekennzeichnet und mit einer Revisionsöffnung versehen.

Die gesamten Verfüllmaßnahmen der Tageszugänge werden entsprechend dokumentiert und mit der Abschlussdokumentation gemäß den Anforderungen der DepV (2024) der zuständigen Bergbehörde übergeben.

7 Zusammenfassung und Bewertung des Gesamtsystems

Mit den dargelegten Untersuchungen, Begutachtungen und numerischen Berechnungen konnte der Langzeitsicherheitsnachweis zur Deponierung von Abfällen unter Tage für den neuen Deponiebereich im Bergwerk Heilbronn auf der Basis der Regularien der Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV)“ [DepV (2024)] geführt werden.

In einer umfassenden und fachübergreifenden Bewertung des Gesamtsystems Abfall – Pfeilertragssystem – Barrierschichten/ Sicherheitspfeiler konnten für die Betriebsphase der Deponie und die Stilllegungs- bzw. Nachbetriebsphase keine Zustände und Ereignisabläufe identifiziert werden, welche die Barriereintegrität und damit den vollständigen Einschluss der deponierten Abfallstoffe gefährden können.

Zur Ermittlung hinreichend belastbarer Informationen zu den Standortverhältnissen, der Hydrologie sowie den geologischen und geotechnischen Randbedingungen im vorgesehenen Deponiebereich, erfolgen bereits während den bergmännischen Auffahrungen erste Erkundungsmaßnahmen im Vorfeld des Planfeststellungsantrags in einem Teilbereich des Nachweisgebietes. Aus diesen Erkundungsmaßnahmen werden repräsentative Erkenntnisse zur Hydrologie und Geologie sowie der Geotechnik gewonnen und im Rahmen der weiteren Planungen im Detail begutachtet und bewertet.

Bisher sind aus den Erkundungsergebnissen keinerlei Hinweise auf geologische Störungen und Anomalien sowie Abweichungen von getroffenen Prognosen abzuleiten. Es erfolgt eine permanente geologische Begleitung der bergmännischen Arbeiten zur Erstellung des Deponiebereiches inklusive entsprechender Aufnahmen und Kartierungen. Die abschließende Eignung des Deponiebereiches wird nach Abschluss sämtlicher Auffahrungen und einer finalen Begutachtung und umfassenden Bewertung festgestellt. Mit der Ablagerung der Abfallstoffe im neuen Deponiebereich wird erst nach einer positiven Entscheidung begonnen.

Die Ablagerung der Abfallstoffe wird durch ein Qualitätsmanagement begleitet und entsprechend den Vorgaben kontrolliert und dokumentiert. Relevante Abweichungen von den charakteristischen Materialparametern der deponierten Abfallstoffe werden auf diese Weise vermieden und damit die fortlaufende Gültigkeit der durchgeführten Nachweisrechnungen und Prognosen gewährleistet.

Im Bedarfsfall kann der Deponiebereich jederzeit durch Verschluss der Zugangsstrecken vom Grubengebäude des Bergwerkes Heilbronn abgetrennt werden. Das bestehende Verschlusskonzept gewährleistet eine vollständige und dauerhafte Abdichtung der drei Zugangsstrecken, wobei im Bedarfsfalle auch eine redundante Systemauslegung möglich ist.

Nach Betriebsschluss der Deponie wird ein Abschlussgutachten über sämtliche Messungen und durchgeführte geologische Aufnahmen sowie Beobachtungen angefertigt. Mit diesen Daten wird eine Verifikation der Annahmen und Bestätigung der Langzeitprognosen ermöglicht.

Die Zugangsstrecken zum Deponiebereich werden abschließend gemäß dem Verschlusskonzept und nach dem Stand der Technik langzeitstabil verschlossen und vom übrigen Grubenfeld abgetrennt. Nach Einstellung des Grubenbetriebes werden zur Endverwahrung der Schächte entsprechend langzeitstabile Schachtverschlüsse als geotechnische Barrieren zur Ertüchtigung der geologischen Barriere errichtet.

Auftretenden Risiken aus der Betrachtung planbarer Ereignisabläufe wird durch verschiedene betriebliche Sicherheitskonzepte sowie einem entsprechend ausgelegten Dichtungssystem in den Zugangsstrecken begegnet, welches den Deponiebereich hinsichtlich der Wirkungsweise richtungsunabhängig vom Grubenfeld dauerhaft und langzeitstabil abtrennen kann. Wechselseitige Beeinflussungen von Steinsalzgewinnung und Abfalleinlagerung im laufenden Grubenbetrieb während der Gewinnungsphase können auf diese Weise ausgeschlossen werden, so dass weder aus dem Normalbetrieb noch aus den möglichen planbaren Ereignisabläufen keine Zustände oder Prozessabläufe hervorgehen, die den vollständigen Einschluss der Abfallstoffe gefährden können.

Risiken aus nicht planbaren hypothetischen Ereignisabläufen wird in erster Linie durch die richtungsunabhängig wirkenden langzeitstabilen Dichtungssystem in den Zugangsstrecken entgegengewirkt. Der Deponiebereich mit den abgelagerten Abfällen bleibt somit dauerhaft vom Grubenfeld getrennt, so dass Vorgänge und Ereignisabläufe jeweils auf die Deponie bzw. das Grubenfeld beschränkt bleiben. Für die Betrachtung anthropogener Einwirkungen können die verbleibenden Restrisiken durch einen ordnungsgemäßen Abschluss der Gewinnungsarbeiten und der Versatzmaßnahmen im Bergwerk Heilbronn sowie dem Verschluss der Zugangsstrecken und Tagesschächte mit zugehörigen Dokumentationen und Kenntlichmachungen minimiert werden, so dass das verbleibende Restrisiko als tolerierbar angesehen werden kann.

Damit wird sämtlichen Anforderungen gemäß der [DepV (2024)] vollumfänglich entsprochen und der vollständige und dauerhafte Abschluss der eingelagerten Abfallstoffe sicher gewährleistet.

8 Literaturverzeichnis

- BAISCH, S. (2024): Seismologisches Gefährdungsgutachten für die Deponie im Bergwerk Heilbronn. Q-con GmbH, Bad Bergzabern 26.06.2024.
- Bezirksregierung Arnsberg (2007): Leitfaden für das Verwahren von Tagesschächten. Bezirksregierung Arnsberg, Abt. Bergbau und Energie in NRW vom 05.12.2007
- BRUNNER, H. & HINKELBEIN, K. (2000): Erläuterungen zum Blatt Heilbronn und Umgebung. - Geol. Kt. Baden-Württ. 1 : 50 000, 292 S., 68 Abb., 6 Tab., 11 Beil.; Freiburg i. Br.
- DepV (2024): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV)“, " Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), geändert zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 9. Juli 2021 und den Änderungen aus 07/2024. (BGBl. I S. 2598)
- DREYER, W. (1971): Mithilfe an der Lösung gebirgsmechanischer Probleme des Salzbergwerkes Kochendorf. - TU Clausthal, 22.07.1971.
- ERCOSPLAN (2020a): Ergebnisse der geowissenschaftlichen Untersuchungen zu den untertägigen Erkundungsbohrungen in der Grube Kochendorf. ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH Erfurt 15.12.2020
- ERCOSPLAN (2020b): Bohr- und bohrbegleitende Arbeiten und Ergebnisse der geowissenschaftlichen Untersuchungen zur Erkundungsbohrung Kochendorf. ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH Erfurt 10.01.2020
- ERCOSPLAN (2020c): Bohr- und bohrbegleitende Arbeiten und Ergebnisse der geowissenschaftlichen Untersuchungen zur Erkundungsbohrung Großgartach. ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH Erfurt 06.01.2020
- FRÜHWIRT, T. (2017): Laborbericht über die Ergebnisse von Gesteinsphysikalischen Laborversuchen. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Professur für Gebirgs- und Feldmechanik/Felsbau. 21.12.2017
- FRÜHWIRT, T. (2018): Laborbericht über die Ergebnisse von Gesteinsphysikalischen Laborversuchen. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Professur für Gebirgs- und Feldmechanik/Felsbau. 23.01.2018
- FLIß, T. (2018): Erläuterungsbericht über Standsicherheits- und Deformationsanalysen in ausgewählten Feldesteilen im Steinsalzbergwerk Heilbronn. K-UTEC Sondershausen, 27.09.2018.
- FLIß, T. & MÜLLER, B. (2020): Beweissicherung im Bergwerk Heilbronn-Kochendorf der Südwestdeutschen Salzwerke AG - Gebirgsmechanische Komplexanalyse 2019 - K-UTEC Sondershausen, 30.06.2020.

- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1992): Geologische Untersuchung der Steinsalzlagerstätte „Kochendorf“ und ihres Umfeldes. Freiburg i. Br., (unveröffentlichter Bericht zum Gutachten des GLA, AZ.: 1097.03/91-4762).
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg [STRAYLE, G.; WERNER, W.; SIMON, T.; JONISCHKEIT, A.; BRUNNER, H.; ROGOWSKI, E. u. a.] (1995): Geologische Untersuchung der Steinsalzlagerstätte „Heilbronn“. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br., September 1995. (Protokolle, Analysen, Bericht Hydroisotop), AZ.: 2085.01/94-4764).
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1997): Bericht zu sedimentologischen Aufnahmen ausgewählter Aufschlüsse in der Salinar- Formation des Mittleren Muschelkalks in den Steinsalzbergwerken Heilbronn und Kochendorf. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br., Unveröffentlichter Bericht, AZ.: 2085.01/94-4764).
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1996): Gutachterliche Stellungnahme (zur Beurteilung von Messdaten für die Tropfstellen 32/XV, 14/X West, 10/X West und 21/X West. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg Az4877.01/95-4764.
- HANSCH, W. & SIMON, T. [Hrsg.] (2003): Das Steinsalz aus dem Mittleren Muschelkalk Süddeutschlandsmuseo 20: Heilbronn (Städtische Museen Heilbronn).
- HYDRAG (2025): Fortführung des Deponiebetriebs in neuem Deponiebereich im Bergwerk Heilbronn - Hydrogeologische Untersuchung. HYDRAG Karlsruhe Juni 2025.
- IBeWa (1997): Räumliche und stoffliche Erweiterung der UTD Heilbronn sowie Errichtung und Betrieb einer übertägigen Konditionierungsanlage, Teil D7: Gutachten Verschlussbauwerke Verbindungsstrecke/Sicherheitsfeste, IBeWa- Ingenieurpartnerschaft, Freiberg, 22.Mai 1997.
- ITT (2022): Fortschreibung des Ergänzungsgutachtens zum Verschlusskonzept von untertägigen Verbindungstrecken im Steinsalzbergwerk der Süddeutschen Salzwerke AG, ITT Geotechnik ISU mBH und Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (IMM, KIT), Karlsruhe, Januar 2022.
- JONISCHKEIT, A. (2001) Fortführung der Untertagekartierung im Steinsalzbergwerk Heilbronn 2000/2001 Bericht des LGRB. 15.02.1995.
- JONISCHKEIT, A. (2001): Fortführung der Untertagekartierung im Steinsalzbergwerk Heilbronn 2000/2001. - Bericht des Büros R. Hinkelbein: 3 S.; 14 Abb., 2 Tab., 6 Taf., 2 Anl.; Filderstadt (im Auftrag der Südwestdeutschen Salzwerke AG, Heilbronn, unveröff.).
- JONISCHKEIT, A. (2006): Geologisches Gutachten zur Einschätzung der geologischen Verhältnisse zwischen den Gruben Heilbronn und Kochendorf in Bezug auf die geplante Auffahrung einer

- Verbindungsstrecke. - Bericht des Büros R. Hinkelbein, Filderstadt (im Auftrag der Südwestdeutschen Salzwerke AG, Heilbronn). 2006.
- JONISCHKEIT, A. (2007): Geologisches Gutachten über die Erkundungsbohrungen VB01 und VB02 für die neue Verbindungsstrecke zwischen den Gruben Heilbronn und Kochendorf der Südwestdeutschen Salzwerke AG Heilbronn.– Bericht des Büros R. Hinkelbein: Filderstadt (im Auftrag der Südwestdeutschen Salzwerke AG, Heilbronn, unveröff.)
- JONISCHKEIT, A. (2008): Geologisch-hydrogeologisches Prognose-Gutachten - Bereich Sicherheitsfeste zur Grube Kochendorf - Durchörterung, Umfahrung und Steinsalzabbau. Bericht des Büros R. Hinkelbein, Filderstadt (im Auftrag der Südwestdeutschen Salzwerke AG, Heilbronn). 08.02.2008.
- JONISCHKEIT, A. (2013a): Geologischer Bericht Hangendausbruch in der NW3/90S, Grube Heilbronn. Bericht des Büros R. Hinkelbein, Filderstadt (im Auftrag der Südwestdeutschen Salzwerke AG, Heilbronn). 26.01.2013.
- JONISCHKEIT, A. (2013b): Informationen zur Bezeichnung Hangendausbruch und Firstablöser in den Gruben Kochendorf und Heilbronn. - Büro R. Hinkelbein, Filderstadt, 03.02.2013.
- JONISCHKEIT, A. (2013c): Geologischer Bericht zur Kartierung einzelner Kammern im Revier NW3 Kammern 78-94 und Beurteilung des Firstfalls in der NW3/90S im Kontext zu den geologischen Lagerungsverhältnissen Grube Heilbronn.- Bericht des Büros R. Hinkelbein, Filderstadt (im Auftrag der Südwestdeutschen Salzwerke AG, Heilbronn). 06.06.2013.
- JONISCHKEIT, A. (2013d): Geologischer Bericht zur Kartierung im Revier NW3 / 78-94. Beurteilung der geologischen Verhältnisse unter Berücksichtigung der Langzeitsicherheit Grube Heilbronn. - Bericht des Büros R. Hinkelbein, Filderstadt (im Auftrag der Südwestdeutschen Salzwerke AG, Heilbronn). 11.10.2013.
- JONISCHKEIT, A. & ZWIEßLER, R. (2018): Fortführung der Kartierung der Steinsalzlagerstätte Heilbronn, Bergwerk 2000. - Geologisches Gutachten des Büros R. Hinkelbein, Filderstadt (im Auftrag der Südwestdeutschen Salzwerke AG, Heilbronn). 19.05.2018.
- JONISCHKEIT, A. (2018): Geologischer Profilschnitt durch den Bereich der Neuen Deponie. Dipl.-Geol. Andreas Jonischkeit – Kartierung, Strukturgeologie & Beratung Stuttgart
- JONISCHKEIT (2021): Plausibilitätsprüfung Lage und Bohrprofil der Bohrungen SWS-115, SWS-349 und B6.
- JONISCHKEIT, A. (2024): Bericht zur geologischen Kartierung im Grubenfeld Heilbronn neuer Deponiebereich - Teil D3 der Antragsunterlagen (Stand: 9/2023) Dipl.-Geol. Andreas Jonischkeit – Kartierung, Strukturgeologie & Beratung Stuttgart 18.04.2024

- KONIETZKY, H & WEBER, F. (2018): Stellungnahme zum kritischen Versatzzeitraum zur Gewährleistung der Barriereintegrität. – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik. 08. Juli 2018
- KIT (2007): Untertagedeponie Heilbronn - Ergänzungsgutachten zum Verschlusskonzept von untertägigen Verbindungsstrecken. - TH Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik und Forschergruppe Feuchtemesstechnik, Soil Moisture Group, Juli 2007
- KIT (2018): Ergänzungsgutachten zum Verschlusskonzept von untertägigen Verbindungsstrecken zwischen Untertagedeponie Heilbronn und Salzbergwerk Kochendorf - Südwestdeutsche Salzwerke AG Heilbronn. TH Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Karlsruhe im Mai 2018.
- K-UTEC (2021): Geotechnische Modellierung zum Nachweis der Langzeitsicherheit der „Neuen Deponie“ im Steinsalzbergwerk Heilbronn. Fliß, Lechner K-UTEC AG Salt Technologies Sondershausen; Konietzky, Morgenstern Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Professur für Gebirgs- und Feldmechanik/Felsbau. Sondershausen 21.06.2021
- K-UTEC (2024): Stoffgutachten zur Fortführung des Deponiebetriebes im neuen Deponiebereich im Bergwerk Heilbronn. K-UTEC AG Salt Technologies Sonderhausen, 25.04.2024.
- KUTEC (2024b): Mögliche Reaktionen nach Wasserzutritt im neuen Deponiebereich der UTD Heilbronn. K-UTEC AG Salt Technologies Sonderhausen, 21.05.2025.
- K.-P. BONJER, K.-P. (1997): „n rift.34 catalogue“, Geophysical Institute, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany, Internalreport, 1997.
- LEYDECKER, G. (2011): Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008. Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers, 2011. [Online]. Verfügbar unter: http://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510959891/Geologisches_Jahrbuch_Reihe_E_Heft
- LGRB (2000): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:50000; Erläuterungen zum Blatt Heilbronn und Umgebung, erstellt durch Horst Brunner und Knut Hinkelbein. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i.Br. 2000).
- LGRB (2022): Symbolschlüssel Geologie Baden-Württemberg - Verzeichnis Geologischer Einheiten (aktualisierte Ausgabe 2022), Hrsg. vom Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. – 1 Tab.; Freiburg i. Br. (<http://www.lgrb-bw.de>)

- LRA HN (1999): Verordnung zum Schutz des Grundwassers im Einzugsgebiet der Wasserfassungen Seitzentor und Schmalwiesen der Stadt Neckarsulm auf Gemarkung Obereisesheim. Landratsamt Heilbronn, 30. Dezember 1999.
- LUBW (2022): <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/> Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Stand 15.12.2022).
- LUBW, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2024): LUBW-Homepage: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/> (Stand 13.05.2024)
- MORGENSTERN, KONIETZKY & Fliß (2024): Geotechnische Modellierung zum Nachweis der Langzeitsicherheit des geplanten neuen Deponiebereiches im Steinsalzbergwerk Heilbronn. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik Professur für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau; Mitteldeutsche MONTAN GmbH Nordhausen 09-2024.
- MORGENSTERN & KONIETZKY (2022): Bericht zur Abschätzung der Stabilität der UTD bei dynamischen Ereignissen. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Professur für Gebirgs- und Feldmechanik/Felsbau. 01.07.2022
- MPA Stuttgart (2004a): Ermittlung des Wasserstoffbildungspotenzials von alkalisch reagierenden Schüttgütern für Versatzzwecke unter Tage. Materialprüfanstalt Stuttgart, Otto-Graf-Institut Universität Stuttgart. 10.05.2004
- MPA Stuttgart (2004b): Auswirkung von Wasserstoffemissionen aus Schüttgütern auf die Wettersituation unter Tage. Materialprüfanstalt Stuttgart, Otto-Graf-Institut Universität Stuttgart. 10.05.2004
- MPA Stuttgart (2004c): Wetterführung im Versatzbereich. Materialprüfanstalt Stuttgart, Otto-Graf-Institut Universität Stuttgart. 10.05.2004
- MPA Stuttgart (2004d): Risikoabschätzung des Versatzes wasserstoffaktiver Schüttgüter im Versatzbergwerk Kochendorf. Materialprüfanstalt Stuttgart, Otto-Graf-Institut Universität Stuttgart. 10.05.2004
- MU BW (1995): Hydrogeologische Kartierung Baden-Württemberg; Heilbronner Mulde – Erläuterungen mit 12 Karten, erstellt durch Geologisches Landesamt Baden- Württemberg Freiburg i. Br. und Landesanstalt für Umwelt-schutz Baden-Württemberg Karlsruhe, Freiburg i.Br. 1995.
- NATAU, O. (1993a): Felsmechanisches Gutachten zur Fortführung des Steinsalzabbaus im Nord-westfeld der Grube Heilbronn der Südwestdeutsche Salzwerke AG, - Universität Karlsruhe, April 1993.

- NATAU, O. (1993b): Gutachterliche Analyse zur Fortführung der Versatzeinbringung in einer Ertüchtigungsphase im Grubenfeld Kochendorf der Südwestdeutsche Salzwerke AG – 1. Zwischenbericht - Universität Karlsruhe, Oktober 1993
- NATAU, O. (1997a): Räumliche und stoffliche Erweiterung der Untertagedeponie Heilbronn sowie Errichtung einer übertägigen Konditionierungsanlage. Teil D.5: Geotechnischer Stand-sicherheitsnachweis der geplanten Erweiterung der Untertagedeponie Heilbronn unter Berücksichtigung der Langzeitsicherheit - Universität Karlsruhe, Februar 1997.
- NATAU, O. (1999): Felsmechanisches Gutachten zum Rahmenbetriebsplan für den Abbau von Steinsalz im Bergwerk Heilbronn 2000 bis 2009. - Universität Karlsruhe, Mai 1999.
- NATAU, O. (2001): Felsmechanisches Gutachten zum Rahmenbetriebsplan für den Abbau von Steinsalz im Bergwerk Heilbronn 2000 bis 2009. Ergänzungsband für geringmächtige Salz-schweben. - Universität Karlsruhe, August 2001.
- NATAU, O. (2003): Felsmechanische Stellungnahme zur Ergänzung des Rahmenbetriebsplanes für den Abbau von Steinsalz im Bergwerk Heilbronn 2000 bis 2009. - Universität Karlsruhe, Mai 2003.
- NATAU, O. (2005): Felsmechanische Stellungnahme zur zweiten Ergänzung des Rahmenbetriebs-planes für den Abbau von Steinsalz im Bergwerk Heilbronn 2000 bis 2009. Universität Karlsruhe, Dezember 2005.
- PEYSA, S. (2023): Erläuterungsbericht Konvergenzen 2022. Südwestdeutsche Salzwerke AG 27.01.2023.
- REINECKER, J. & SCHNEIDER, G. (2002): Zur Neotektonik der Zollernalb: Der Hohenzollerngraben und die Albstadt-Scherzone. – Jber. Mittl. Oberrhein. Geol. Ver., N.F.84, 391-417, 8. Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- POPP, T.; MINKLEY, W.; WIEDEMANN, M.; SALZER, K. & DÖRNER, D. (2015): Gas pressure effects on salt – large scale in-situ test Merkers. Proceedings of the Conference on Mechanical Behavior of Salt, Saltmech VIII, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City, SD, USA.
- RAUSCH, R. & ROGOWSKI, E. (1999): Geologisches, hydrogeologisches und geotechnisches Gutachten über die Vorbohrung für den dritten Schacht Heilbronn der Südwestdeutschen Salzwerke AG. Freiburg i. Br. (unveröff. Bericht des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Az.: 0761.01/99-4764)
- ROGOWSKI, E. & WEGENER, W. (1977): Über den neuen Schacht FRANKEN der Süd-westdeutschen Salzwerke AG.- Jh. geol. Landesamt Bad.-Württ., 19, S. 59-80, Freiburg i. Br.

- RUPF, I. & NITSCH, E. (2008): Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse. – LGRB-Informationen, 21, S. 1–81, 10 Beil.
- SCHACHL, E. (1952): Das Muschelkalksalz in Kochendorf, Heilbronn und Stetten/Hohenzollern..-Jber. U. Mitt. oberrh. geol. Ver., 34, 1. Aufl., S. 30-41, 1 Abb., 1 Taf., Stuttgart.
- SCHACHL, E. (1954): Das Muschelkalksalz in Südwestdeutschland.- Neues Jb. Geol. u. Paläont., Abh., 98: 309 -394, 41 Abb., 1 Tab., 5 Taf.; Stuttgart.
- SCHICHT, Th. (2013): Erkundung der Hangendschichten der Oberen Anhydritregion in den Kammern 90S (120 m) sowie in der Wetterstrecke 7 auf Höhe der Kammern 88 bis 92 (130 m). 2013. K-UTEC Sondershausen, 05.09.2013.
- SIMON, T.; RAUSCH, R.; SWOBODA, F. & KOLOKOTRONIS, V. (1995): Heilbronner Mulde. - Hydrogeologische Karte Baden-Württ., Erl.: - XII Kte.; Freiburg i. Br. U. Karlsruhe (GLA und LfU)
- STÄUBERT, A. (2017): Beweissicherung im Bergwerk Heilbronn-Kochendorf der Südwestdeutschen Salzwerke AG - Gebirgsmechanische Komplexanalyse 2016 / 2017 - K-UTEC Sondershausen, 28.12.2017.
- SWS (2021): Fortführung des Deponiebetriebs in neuem Deponiebereich im Bergwerk Heilbronn - Projektbeschreibung für die Vorantragskonferenz und zur Abstimmung des Untersuchungsrahmens für den UVP-Bericht (Scoping). Südwestdeutsche Salzwerke AG 20.10.2021.
- TRIANTAFYLLIDIS (2022): Gutachten zum Verschlusskonzept von untertägigen Verbindungsstrecken im neuen Deponiebereich des Steinsalzbergwerkes Heilbronn der Südwestdeutsche Salzwerke AG. Prof. Dr.- Ing. habil., Dr. h. c. Th. Triantafyllidis, ITT GEOTECHNIK Karlsruhe, im Dezember 2022
- WAGENPLAST, P. (2005): Ingenieurgeologische Gefahren in Baden-Württemberg. – LGRB – Informationen 16, Freiburg i. Br. 2005