

**Geologische 3D-Modellierung der Steinsalzlagerstätte Braunschweig-Lüneburg:
Ein Beitrag zur nachhaltigen Nutzung einer komplexen Steinsalzlagerstätte**

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

genehmigte Dissertation

von **M.Sc.**

Christian Buxbaum-Conradi

aus Kassel

Berichter: Univ.-Prof. Dr. Bernd Lottermoser
Prof. Dr. rer. nat. Silvio Zeibig

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Oktober 2018

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines von der K+S Aktiengesellschaft in Auftrag gegebenen und finanzierten Forschungsprojektes am *Institute of Mineral Resources Engineering* (vormals *Institut für Bergbaukunde I*) der RWTH Aachen.

Mein herzlicher Dank geht an Herrn Prof. Martens. Zusammen mit den Herren Dr. Rattmann, Dr. Katz und Dr. Randaxhe hat er mich als Geologen in ein Team von Bergbauingenieuren integriert und mir damit ganz neue Perspektiven eröffnet. An dieser Stelle möchte ich mich auch bei allen Kollegen des Instituts herzlich bedanken. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Lottermoser, der die Betreuung der Arbeit übernahm und sie bis zum Ende begleitete.

Besonderer Dank gebührt Herr Prof. Dr. Zeibig (K+S Aktiengesellschaft), und zwar in vielerlei Hinsicht. Vielen Dank für die stete Förderung, für die ersten Überlegungen zur Eröffnung dieses spannenden Forschungsprojektes, für die konsequente Unterstützung und Betreuung, für anregende Kritik und nicht zuletzt für die Begutachtung dieser Arbeit.

Herrn Dr. Barnasch (K+S Aktiengesellschaft) danke ich herzlich für interessante Grubenfahrten und Diskussionen. Besonderer Dank gebührt auch Herrn Dr. Plümacher (K+S Aktiengesellschaft), der mir bezüglich Techniken der Lagerstättenmodellierung wertvolle Hilfestellung gegeben hat und ohne den mir im Wortsinne die Grundlage dieser Arbeit gefehlt hätte. Auch Herrn Jörg Bode, dem Grubenbetriebsleiter des Werkes Braunschweig-Lüneburg gilt mein herzlicher Dank für die konsequente Unterstützung.

Bei Herrn Dr. Strozyk bedanke ich mich herzlich für anregende Diskussionen im Themenbereich Salztektunik.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Frau danken, ohne deren Unterstützung diese Arbeit in dieser Form nicht zustande gekommen wäre.

Kurzzusammenfassung

Das Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg produziert seit rund 100 Jahren innerhalb der intensiv deformierten Salzstruktur des Oberes Allertales. Die bergmännische Gewinnung erfolgte zunächst seit 1923 ausschließlich auf dem Kristallsalz. In jüngster Zeit wird zudem das Schwadensalz, ebenfalls aus der Leine-Folge (Zechstein 3), mit in die Förderung des Bergwerkes einbezogen. Beide Steinsalzhorizonte weisen teilweise erhebliche Qualitätsschwankungen, vor allem in Form von sulfatischen Begleitmineralen wie Anhydrit, auf. Neben dem sogenannten Normalsalz als Grundlage für hochqualitative Produkte wird auch Auftausalz gefördert, an welches weitaus geringere Qualitätsanforderungen gestellt werden. So ist diesbezüglich nur ein Mindestgehalt von 97,5 % statt 98,5 % NaCl einzuhalten.

Ein geologisches 3D-Modell des südlichen Teils der Lagerstätte wurde erstellt, um die Forschungsfrage zu beantworten, ob sich hinter den Qualitätsschwankungen des wichtigsten Abbauhorizontes, dem Kristallsalz, eine Systematik in Form von räumlichen Abhängigkeiten, verbirgt und wie solche Erkenntnisse zu einer besseren Nutzung der Lagerstätte beitragen können. Weiterführend wurde untersucht, ob benachbarte Salzhorizonte für die Förderung von Auftausalz in Frage kommen.

Hierzu wurden die im Untersuchungsgebiet über zwölf Teilsohlen in einer Teufe von ca. 390 bis 570 m aufgeschlossenen Evaporite der Zechsteinfolgen z2 (Staßfurt-Folge) bis z4 (Aller-Folge) in das 3D Modell implementiert. Anhand von über 400 untertägigen Bohrungen, Streckenkartierungen, Georadarmessungen und Interpretationsdaten (Profile und Grundrisse) wurde mittels der Software GOCAD in einem expliziten Modellierungsansatz ein konsistentes geometrisches Modell der wichtigsten stratigraphischen Schichtgrenzen erstellt. Darauf aufbauend wurden die Analysenergebnisse von rund 15.000 Bohrkernproben räumlich und stratigraphisch zugeordnet und geostatistisch ausgewertet. Die dabei betrachteten Kenngrößen zur Qualitätsbestimmung (NaCl-, KCl-, CaSO_4 - und MgSO_4 -Gehalt) wurden anschließend innerhalb eines Blockmodells interpoliert und im kleinen wie im großen Maßstab auf räumliche Abhängigkeiten untersucht.

Die Auswertung des geometrischen Modells führte zur Identifikation der Hauptstrukturelemente, unter anderem einer WNW-ESE streichenden Störung entlang der Salzbasis. Die Vergenz der Faltenstrukturen im Untersuchungsgebiet ist im Westen nach Osten und im Osten nach Westen gerichtet. Die größtenteils NNW-SSE streichenden Sattelstrukturen des Staßfurt-Steinsalzes (z2NA) bzw. die durch vorwiegend mit Einheiten der Leine-Folge (z3) gefüllten Muldenstrukturen verzweigen sich im Einflussbereich der Salzbasisstörung. Vor allem die kompetenten Bruchschollen des Hauptanhydrits (z3AN) sorgen durch lokale Überschiebungs- und Rotationsbewegungen für eine komplexe

Geometrie. Eine Vielzahl sogenannter Klippenstrukturen prägt das Erscheinungsbild des Hauptanhydrits und der gesamten Faltenstrukturen maßgeblich. Diese durch Gipsdiapirismus synsedimentär entstandenen Mächtigkeitsanomalien ragen teilweise über 50 m weit diskordant in das hangende Kristallsalz hinein und haben häufig eine pilzartige Form.

Die Auswertung der Analysenergebnisse innerhalb des Blockmodells ergab klare räumliche Abhängigkeiten der Qualitätsschwankungen. In einem Umkreis von bis zu 50 m um die Klippenstrukturen ist ein erhöhter CaSO_4 -Gehalt zu verzeichnen. In der Nähe der Sattelstrukturen ist häufig ein erhöhter MgSO_4 - und KCl -Gehalt zu beobachten. Besonders auffällig ist eine starke Erhöhung von CaSO_4 -, MgSO_4 - und KCl -Gehalten in der stark eingegengten, parallel zum nordöstlichen Salzrand verlaufenden Muldenstruktur. Weiterhin ist eine Erhöhung des MgSO_4 -Gehalts im Einflussbereich der Salzbasisstörung in Richtung Süden zu verzeichnen. Kristallsalzlager mit einem NaCl -Gehalt von über 99,0 % sind grundsätzlich mit einer gröberen Korngröße assoziiert und stets an die Ostschenkel breiter Muldenstrukturen gebunden. Der wichtigste Faktor für die Anlage dieser qualitativ hochwertigen Bereiche ist vermutlich auf eine Druckschattenposition während der kretazischen Kompression zurück zu führen, sodass NaCl -reiche Lösungen migrierten und es zum Wachstum der Halitkristalle kam. Diese Position wurde schon während der synsedimentären Extension und Anlage der Anhydritklippen, wie auch während der späteren Einfließphase im Zuge der Floßtektonik maßgeblich beeinflusst. Beide vorgenannten Prozesse führten außerdem zu frühzeitigen regionalen Variationen in Form von Verunreinigungen durch Sulfate oder Kalisalze. Fluide waren im System ausreichend vorhanden und sorgten für vorwiegend dynamische Prozesse der Salzdeformation. Relative NaCl -Anreicherungen im Kristallsalz erfolgten mit hoher Wahrscheinlichkeit aus dem liegenden Staßfurt-Steinsalz. Die im Staßfurt-Steinsalz vorhandenen hohen Fluidanteile, vorwiegend aus dem Diageneseprozess der dispers verteilten Gipsaggregate, dienten gemeinsam mit den Metamorphosefluiden des Kaliflözes Staßfurt (z2KSt) als Transportmedium. Große Mengen an gelöstem Kalium, Magnesium und Natrium wurden so in stratigraphisch jüngere Einheiten transportiert.

In Hinblick auf die Nutzung der untersuchten Steinsalzhorizonte konnte festgestellt werden, dass auch eine Auftausalzförderung im Schwadensalz (z3NAh) grundsätzlich in Frage kommt. Anhand einer exemplarischen Abbauplanung konnte die Machbarkeit solcher Abbaue ohne Störung der Kristallsalzgewinnung belegt werden. Weiterhin wurde im Rahmen dieser Arbeit enormes Optimierungspotential im Bereich der Naherkundung identifiziert. Durch Integration von Stoßradarmessungen, eine vermehrte Anwendung von Vollbohrungen und das schräge Ansetzen von Kernbohrungen könnte ein besseres Explorationsergebnis mit mehr Aufschlusspunkten bei teilweise über 90 % weniger Bohraufwand erzielt werden.

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, dass auch komplexeste geologische Strukturen mit vertretbarem Aufwand und großem Nutzen dreidimensional modelliert werden können. Der Prozess der Modellierung konnte auf vielen Ebenen, der Exploration, des Datenmanagements, des geologischen Verständnisses und der strategischen Abbauplanung, zur Identifikation von Ansätzen für eine nachhaltigere Nutzung der Lagerstätte beitragen. Die erkannten räumlichen Abhängigkeiten bezüglich der Zusammensetzung des Steinsalzes, vor allem die Nähe zum Salzrand und die Rolle von großräumigen Druckschatten innerhalb des Salzkörpers, sind für den Betrieb wertvolle neue Informationen zur Qualitätssicherung. Da die erkannten Abhängigkeiten zumeist übergeordneten Prozessen zugeschrieben werden, sind solche Zusammenhänge mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in anderen Salzlagerstätten des Zechstein zu erwarten und können für unterschiedlichste Fragestellungen genutzt werden.

Abstract

For nearly 100 years the rock salt mine *Braunschweig-Lüneburg* produces within the intensively deformed salt structure *Oberes Allertal*. Mining focused exclusively on the *Kristallsalz* since 1923. More recently, the *Schwadensalz*, another rock salt horizon of the *Leine-Folge* (third Zechstein sequence) is partially included in the production. Both horizons are subject to considerable fluctuations in quality, especially in the form of sulfatic accessory minerals like anhydrite. Apart from *Normalsalz*, the basis for high quality salt products, deicing salts with much lower quality requirements are also produced. For deicing salt a minimum content of 97.5 instead of 98.5 % NaCl content is required.

A 3D geological model of the southern part of the deposit has been created in order to answer the following research question: are there spatial dependencies of quality fluctuations within the *Kristallsalz* and how may such insights contribute to a better utilization of the deposit? In addition, it was investigated whether there are adjacent salt horizons with the potential for an additional deicing salt production.

For this purpose, the evaporites of the *Zechstein* z2 (*Staßfurt* sequence) to z4 (*Aller* sequence), which are digested within the study area along twelve sublevels at a depth of about 390 to 570 m, were implemented in the 3D model. Taking the information of over 400 underground drill holes, drift mappings, georadar surveys and interpretation data (profiles and level plans) into account, the software GOCAD was used to create a consistent, geometric model of the most important stratigraphic boundaries. This was done with an explicit modeling approach. Subsequently, the analysis results of around 15,000 drill core samples were spatially and stratigraphically assigned and geostatistically evaluated. The parameters used to determine the quality, NaCl, KCl, CaSO₄ and MgSO₄ were then interpolated within a blockmodel and investigated on a small and large scale concerning spatial dependencies.

Analysis of the 3D geometric model led to the identification of some main structural elements, including a WNW-ESE striking fault along the salt base. Vergence of the fold structures changes from eastward in the west to westward in the east. The anticline structures, made up of the *Staßfurt-Steinsalz* (z2NA) and the syncline structures, mostly containing deposits of the third Zechstein sequence, mainly strike NNW-SSE. However, they bifurcate in the influence area of the subsalt fault, where the state of deformation is strongly affected and complicated by overthrust and rotated stringers of the brittle *Hauptanhydrit* (z3AN). A large number of so-called *Klippenstrukturen* (cliff structures) characterize the appearance of the *Hauptanhydrit* and the entire fold structures. These thickness anomalies were formed by the process of a synsedimentary gypsum diapirism. The structures are often shaped mushroom-like and protrude up to 50 m discordantly into the hanging *Kristallsalz*.

The evaluation of the analysis results within the blockmodel revealed clear spatial dependencies of the quality fluctuations.. Within a radius of up to 50 m around the *Klippenstrukturen*, an increase of the CaSO_4 content is recorded. Increased MgSO_4 and KCl contents are often observed close to anticlines. A strong increase of CaSO_4 , MgSO_4 and KCl content in the narrowed syncline parallel to the north-eastern salt edge is very prominent. Furthermore, an increase in the MgSO_4 content to the south of the study area is noted, corresponding with the area of influence of the fault along the salt base. *Kristallsalz* beds with a NaCl content above 99.0 % are associated with a coarser grain size and are always bound to the eastern limb of syncline structures with a great width. The key factor for the development of these high quality zones is presumably a pressure shadow position during the Cretaceous compression. The migration of NaCl-rich solutions likely led to the growth of giant halite crystals there. These shadow positions were already affected during the synsedimentary extension and development of the *Klippenstrukturen*, as well as the later inflow phase during raft tectonics. Both processes led to early regional impurity variations by sulfates and potash salts. Fluids were sufficiently present in the system and caused predominantly dynamic salt deformation processes. It is very likely, that the additional NaCl of the highly pure beds of *Kristallsalz* originate from the *Staßfurt-Steinsalz*. The high fluid content of this layer, mainly derived from the diagenesis of dispersed gypsum aggregates, together with the metamorphic fluids of the *Kaliflöz Staßfurt* (z2KSt), served as medium of transport. Consequently, substantial amounts of dissolved potassium, magnesium and sodium were carried into stratigraphically younger units.

With regard to the use of the investigated rock salt horizons, it was found that the production of deicing salt is principally also possible from the *Schwadensalz*. The feasibility of mining *Schwadensalz* was demonstrated by means of an exemplary planned mining section. This could be done without restricting the production of *Kristallsalz*. Furthermore, enormous optimization potential was identified for detail exploration. By integrating Radio Echo Sounding (RES) measurements, increasing the use of dry drill jumbos, as well as angularly applied core bores, better exploration results can be achieved. This way, more information can be gained, requiring up to 90 % less drilling effort in some cases.

This work has shown that even the most complex geological structures can be three-dimensionally modeled with a reasonable effort and huge benefit on many levels. Exploration, data management, geological understanding, and strategic mine planning have all benefited highly from the modeling process. Summed up, it has contributed to the identification of key approaches to a more sustainable utilization of the *Braunschweig-Lüneburg* rock salt deposit. The recognized spatial dependencies regarding the composition of the rock salt, especially the proximity to the salt margin and the role of large-scale pressure shadows within the salt body, are valuable new information for quality assurance

purposes. Since the identified dependencies are usually attributed to higher-level processes, such correlations are very likely to be expected in other salt deposits of the Zechstein and can be used for a wide variety of questions.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Kurzzusammenfassung	II
Abstract.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Veranlassung	1
1.2 Arbeitsgebiet und Aufgabenstellung	2
2 Marine Salzlagerstätten	4
2.1 Allgemein	4
2.2 Die Entstehung von marinen Salzlagerstätten	5
2.3 Deformationsmechanismen	7
2.4 Salzstrukturen	10
2.5 Schlussfolgerungen.....	16
3 Der obere Allertalgraben.....	17
3.1 Regionalgeologische Situation	17
3.2 Erkundung der Salzstruktur Oberes Allertal.....	19
3.3 Internbau der Salzstruktur	24
3.4 Stratigraphie und Lithologie.....	28
3.4.1 Staßfurt-Steinsalz (z2NA).....	31
3.4.2 Kaliflöz Staßfurt (z2KSt)	31
3.4.3 Hauptanhydrit (z3AN).....	31
3.4.4 Kristallsalz (z3NAKR)	32
3.4.5 Schwadensalz (z3NAf)	33
3.5 Schlussfolgerungen.....	33
4 Das Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg	34
4.1 Gerechtsame.....	34
4.2 Die Steinsalzlagerstätte Braunschweig-Lüneburg	35
4.3 Abbauverfahren.....	36
4.4 Untertägige Exploration	39
4.5 Förderung und Produkte	41
4.6 Das Untersuchungsgebiet	44

4.7	Schlussfolgerungen.....	45
5	Methodik.....	46
5.1	Geologische 3D-Modellierung der Lagerstätte.....	46
5.2	Datenanalyse und Aufbereitung	46
5.3	Erfassung der Lagerstättengeometrie	49
5.4	Blockmodellerstellung	53
5.4.1	Variographie.....	54
5.4.2	Interpolationsmethode und Auflösung	55
5.4.3	Validierung	58
5.5	Schlussfolgerungen.....	61
6	Ergebnisse	62
6.1	Strukturbau	62
6.1.1	Salzbasis.....	63
6.1.2	Sattelstrukturen.....	64
6.1.3	Muldenstrukturen	67
6.1.4	Hauptanhydrit und Gas-/Salzlösungsvorkommen.....	69
6.1.5	Salzrand und Salzspiegel.....	72
6.1.6	Geometrietypen.....	73
6.2	Wertstoffverteilung	74
6.2.1	Steißfurt-Steinsalz.....	76
6.2.2	Kristallsalz	78
6.2.2.1	Auswertung der nördlichen Kristallsalzlager	81
6.2.2.2	Auswertung der zentralen Kristallsalzlager.....	83
6.2.2.3	Auswertung der südlichen Kristallsalzlager	85
6.2.2.4	Auswertung der Interpolationsergebnisse im Profil.....	86
6.2.2.5	Auswertung der Interpolationsergebnisse im Grundriss.....	91
6.2.3	Schwadensalz	95
6.2.4	Bewertung der untersuchten Steinsalzhorizonte.....	98
6.3	Klassifizierung der Kristallsalzlager	100
6.3.1	Auswahl geeigneter Indikatoren	101
6.3.1.1	Qualitätsparameter.....	101
6.3.1.2	Mächtigkeit.....	110

6.3.1.3	Faltengeometrie	112
6.3.1.4	Sonstige Merkmale	112
6.3.2	Ergebnisse der Klassifizierung	113
6.4	Schlussfolgerungen.....	116
7	Diskussion	117
7.1	Genesemodell	117
7.1.1	Zechstein	117
7.1.2	Obere Trias bis Untere Kreide.....	117
7.1.3	Obere Kreide bis Unteres Tertiär.....	119
7.2	Auswirkungen auf die Ausbildung der Salinargesteine	120
7.2.1	Stäufurt-Steinsalz.....	120
7.2.2	Kristallsalz	124
7.2.2.1	Anhydritklippen.....	124
7.2.2.2	Östlicher Salzrand	126
7.2.2.3	Sattelstrukturen	127
7.2.2.4	Subsalinare Störung.....	127
7.2.3	Schwadensalz	128
7.3	Schlussfolgerungen.....	129
8	Optimierung der Exploration	130
8.1	Hintergrund und Vorgehensweise	130
8.2	Aufwand und Nutzen unterschiedlicher Naherkundungskonzepte	134
8.3	Beprobungsintervalle.....	136
8.4	Einfluss der Bohrspülung auf die Analytik.....	137
8.5	Vorschlag zur zukünftigen Datenerfassung	138
8.6	Konzeptioneller Vorschlag für die zukünftige untertägige Exploration.....	140
8.7	Schlussfolgerungen.....	142
9	Optimierung der Lagerstättennutzung.....	143
9.1	Hintergrund und Vorgehensweise	143
9.2	Bewertung der Abbausituation	144
9.3	Exemplarische Abbauplanung im Schwadensalz	148
9.4	Hinweise zur Verringerung von Abbauverlusten	151
9.5	Schlussfolgerungen.....	155

10	Zusammenfassung	156
11	Ausblick	166
12	Literaturverzeichnis	167
	Abbildungsverzeichnis	179
	Tabellenverzeichnis	183
	Anlagenverzeichnis	184
	Anlagen	186

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Unter den Stichworten Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz existieren im Bereich der Gewinnung mineralischer Rohstoffe unterschiedliche Auffassungen (z.B. DUBIŃSKI, 2013; HILSON und MURCK, 2000; LAURENCE, 2011; MARNIKA et al., 2015; SPACHTHOLZ, 2010). So ist ein nachhaltiges Wirtschaften mit den begrenzten Bodenschätzen dieser Erde generell Konsens, ohne dass jedoch ein allgemeingültiges Konzept für nachhaltiges Handeln existiert (AZAPAGIC, 2004). Hierfür gibt es viele verschiedene Ansätze mit unterschiedlichsten fachspezifischen Indikatoren und Gewichtungen dieser Indikatoren (z.B. CARON et al., 2016; KATZ, 2010; PATEIRO FERNÁNDEZ, 2008; SPUERK et al., 2017). Als ein gängiger Indikator für Ressourceneffizienz im Bergbau gilt der Lagerstättennutzungsgrad (SPUERK et al., 2017). Dieser beschreibt im weiteren Sinne das Verhältnis von ausgebrachten Wertstoffen zu den Gesamtwertstoffen in einer Lagerstätte. Dieses Ausbringen kann und muss auf verschiedenen Ebenen betrachtet werden. So sind die spezifischen Abbauverluste durch das ausgewählte Abbauverfahren ein wichtiger Faktor. Auch die darauf folgende Aufbereitung und entsprechende Ausbringung ist von großer Bedeutung. Am Beginn eines Gewinnungsprozesses stehen jedoch immer die Lagerstättengeologie und deren konkrete Bewertung. Durch Veränderung in den Anforderungen der Qualitätsgrenzen kann sich beispielsweise die Vorratsmenge des bauwürdigen Wertstoffs innerhalb der Lagerstätte vergrößern oder verkleinern und somit auch das Gesamtausbringen signifikant verändern. Diese Qualitätsgrenzen werden durch grobe wirtschaftliche und technische Abschätzungen und Prognosen von Gewinnung, Aufbereitung und Vertrieb ermittelt oder sind schlicht einer bestimmten Produkthanforderung geschuldet. Insgesamt ist so jeder Gewinnungsprozess dynamisch und schon der erste Schritt der Lagerstättenbewertung stark von späteren Teilschritten abhängig. Ansätze für die Erhöhung des Lagerstättennutzungsgrades und somit eine nachhaltigere Nutzung von Rohstofflagerstätten sollten also stets eine gesamtheitliche Betrachtung von der Geologie bis hin zu einem fertigen Produkt und dessen Anforderungen beinhalten.

Mit dem Fokus auf die am Anfang dieser Prozesskette stehenden lagerstättengeologischen Aspekte sind Geometrie und Wertstoffverteilung eines Lagerstättenkörpers die wichtigsten zu betrachtenden Kenngrößen. Diese sind jeweils nur punktuell entsprechend der Explorationsmethode und dem Erkundungsfortschritt bekannt. Das Schätzen in Form von Interpolation oder Simulation wird notwendig, um Planungsgrundlagen für einen möglichen Abbau zwischen den Aufschlusspunkten zu schaffen und eine Gesamtaussage über die Lagerstätte treffen zu können.

Während in vielen rohstoffgewinnenden Betrieben ein Experte auf zweidimensionalen Projektionsebenen (Grundrisse und Profile) diese Aufgabe mittels linearer Methoden erledigt, sind in den letzten zwei Jahrzehnten computergestützte dreidimensionale geologische Modellierungswerkzeuge herangereift, die bei gleichem Input von Daten und Knowhow weitaus realistischere und verlässlichere Ergebnisse erzielen können (z.B. COWAN et al., 2003; MALLET, 2002; TURNER, 2006). Die Art der Lagerstätte spielt hierbei natürlich eine wichtige Rolle. Je komplexer die Geometrie und die Wertstoffverteilung einer Lagerstätte beschaffen sind, desto größer ist auch das Potential, positive Effekte durch die Nutzung einer 3D-Modellierungssoftware zu erzielen und eventuell sogar ganz neue Erkenntnisse über die Lagerstätte zu gewinnen. Gleichzeitig stoßen auch die modernen dreidimensionalen Methoden und deren Anwendbarkeit angesichts sehr komplexer polydeformierter Lagerstätten an ihre Grenzen (z.B. FRANK et al., 2007; LAINE, 2012).

1.2 Arbeitsgebiet und Aufgabenstellung

Die stark deformierten Salzlagerstätten Norddeutschlands gelten als Paradebeispiel für eine sehr komplexe Lagerstättengeometrie (z.B. KUKLA et al., 2008; ZHANG et al., 2013). Dies gilt ebenso für die Kali- und Steinsalzlagerstätte des Werkes Braunschweig-Lüneburg. Als Grundlage dieser Arbeit dient eine Vielzahl an Explorationsdaten des seit über 100 Jahren existierenden Steinsalzbergwerks, welches sich seit über 90 Jahren auf die Produktion von hochwertigem Steinsalz spezialisiert hat. Das Bergwerk liegt in der Nähe von Helmstedt in der Allertal-Störungszone, einem Teilstück eines von Sachsen-Anhalt bis weit nach Niedersachsen verfolgbar tektonischen Lineaments, das mit einer Reihe von kompliziert gebauten Salzstrukturen besetzt ist. Die Entstehungsgeschichte und im Speziellen die internen Deformationsstrukturen dieser Salzstrukturen sind seit über 100 Jahren Gegenstand intensiver Forschung und bis heute kontrovers diskutiert (z.B. BRANDES et al., 2013; JARITZ, 1973; KUKLA et al., 2008; MOHR et al., 2003). Extensive sowie kompressive Deformation haben in Zusammenspiel mit intensiven Salzfließbewegungen und Differenzen der Rheologie einzelner Schichtpakete (Steinsalz, Kalisalze und Anhydrit) ein komplexes Erscheinungsbild der heutigen internen Strukturen erzeugt (BEHLAU und MINGERZAHN, 2001; BEST und ZIRNGAST, 2002; HORN et al., 2016). Entsprechend wurde und wird ein sehr hoher Explorationsaufwand betrieben, um eine kontinuierliche Förderung zu gewährleisten, sodass eine hervorragende Datengrundlage von über 60.000 Bohrmeter und über 15.000 Bohrkernanalysen sowie einer Vielzahl an Streckenkartierungen auf engstem Raum vorliegt. Das Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg eignet sich außerdem sehr gut als Grundlage für eine Studie über die Möglichkeiten zur Erhöhung der Lagerstättennutzung, da hier eine besonders hohe Sensibilität bezüglich spezifischer Produktanforderungen und Aufbereitungsmöglichkeiten vorliegt. Neben dem sehr reinen Kristallsalz der Leine-Folge (Zechstein 3) weist die Lagerstätte weitere relativ reine und ausreichend mächtige

Steinsalzhorizonte auf, die aber aufgrund hoher Produktstandards bzw. fehlender Aufbereitungsmöglichkeiten bisher nicht oder nur in geringen Mengen mit abgebaut werden.

Im Kontext des Spannungsfeldes zwischen Anwendbarkeit und Potential der geologischen 3D-Modellierung stellt sich folgende Forschungsfrage: Sind bisher unbekannte räumliche Abhängigkeiten der Wertstoffverteilung, vor allem des Vorkommens von störenden Begleitmineralen wie Anhydrit, in der komplexen Steinsalzlagerstätte Braunschweig-Lüneburg vorhanden, dessen Kenntnis und Berücksichtigung zu einem besseren Verständnis von Struktur und Genese und somit auch zu einer besseren Nutzung der Lagerstätte führen?

Um dieser Frage nachzugehen, steht am Anfang dieser Arbeit eine umfangreiche Recherche bezüglich der bisherigen Kenntnisse zu Salzlagerstätten und Salztektunik (Kapitel 2) sowie der Regionalgeologie des Oberen Allertals (Kapitel 3). Es folgt eine Beschreibung des Steinsalzbergwerkes Braunschweig-Lüneburg, der bisherigen Kenntnisse der Lagerstätte, der dortigen Abbau- und Explorationstätigkeiten, der Förderzahlen und Produkte sowie eine Detailbeschreibung des für diese Arbeit ausgewählten Untersuchungsgebietes (Kapitel 4). Für dieses Gebiet wurde ein 3D-Lagerstättenmodell mittels der Software GOCAD erstellt, welches in ein geometrisches Modell und ein Eigenschaftsmodell (Blockmodell) zu untergliedern ist (Kapitel 5). Ersteres dient der Abbildung und Auswertung der Lagerstättengeometrie sowie der Identifikation von strukturgeologischen Elementen (Kapitel 6.1), während in dem Blockmodell die Qualitätsverteilungen innerhalb der erzeugten Geometrie abgeschätzt und ausgewertet werden (Kapitel 6.2). Die Identifikation von unterschiedlichen Qualitätstypen des Steinsalzes und das Verknüpfen dieser Typen mit bestimmten geologischen Erscheinungsformen und Geneseprozessen sollen schließlich zu einem besseren Verständnis der Qualitätsschwankungen innerhalb der Lagerstätte führen (Kapitel 6.3). Nachfolgend schließt eine Erläuterung und Diskussion der erkannten räumlichen Abhängigkeiten mit einem aktualisierten Genesemodell der Lagerstätte ab (Kapitel 7). Auf Basis neuer geologischer Erkenntnisse sowie anderweitig identifiziertem Verbesserungspotential steht am Ende der Arbeit das Ziel, Ansätze für ein effizienteres Explorations- (Kapitel 8) und Abbaukonzept (Kapitel 9) zu ermitteln und zu bewerten. Im Rahmen dessen werden verschiedene Explorationsszenarien und eine exemplarische Abbauplanung, die jeweils zu einer effizienteren Nutzung der Lagerstätte beitragen können, vorgestellt. Auf die Zusammenfassung der Arbeit (Kapitel 10) folgen im Rahmen eines Ausblicks (Kapitel 11) Hinweise für eine sinnvolle Weiterführung dieser Forschung und die mögliche Adaption der gewonnenen Erkenntnisse und des erarbeiteten Ansatzes auf andere Lagerstätten.

2 Marine Salzlagerstätten

2.1 Allgemein

Die zahlreichen Salzlagerstätten des Zentraleuropäischen Beckens (ZEB) haben in ganz unterschiedlicher Weise einen praktischen Nutzen. Sie sind zum einen interessant als Lieferant für Steinsalz und unterschiedliche Kalisalze aus Bergwerken oder Solungsbetrieben. Zum anderen dienen sie als Zwischenspeicher für Erdöl und Erdgas sowie teilweise auch als Deponie für chemisch-toxische und radioaktive Abfälle (GELUK, 1998, 2000; HUNSCHE und SCHULZE, 1994; WARREN, 2006). Mit ihrer Eigenschaft, unter typischen geologischen Bedingungen fließfähig zu sein, sind Salzgesteine ein wichtiger Faktor für die dynamische Entwicklung vieler sedimentärer Beckensysteme (z.B. URAI et al., 2008; KUKLA et al., 2008; ZHANG et al., 2013). Die abdichtende Wirkung und Salzfließbewegungen als Initialprozess zur Formierung einer Falle machen Salzgesteine zu einem sehr wichtigen Faktor für die Entstehung einer Vielzahl von Erdöl- und Erdgaslagerstätten sowie von Metallerzlagerstätten (GELUK et al., 2000; WARREN, 2006). Entsprechend dieser Bedeutung für das geologische Verständnis und den mannigfaltigen Anwendungen sind Salzgesteine und deren Eigenschaften Gegenstand intensiver Forschung. In Deutschland bezog sich diese zuletzt vor allem auf die Nutzung von Salzlagerstätten als potentiellies Endlager für radioaktive Abfälle.

Generell findet die Forschung bezüglich Salzgesteinen und Salztektonik auf unterschiedlichsten Ebenen und in diversen Fachgebieten statt. Im großen Maßstab – auf der Ebene von Sedimentbecken – werden Salzstrukturen unter anderem mittels 3D-Seismik untersucht, um beispielsweise Rückschlüsse auf salztektonische Prozesse und neuerdings auch auf deren interne Deformationsstrukturen ziehen zu können (z.B. DOOLEY et al., 2015; JACKSON et al., 2015; RATH et al., 2016; SCHECK et al., 2003a, 2003b; STROZYK et al., 2012, 2014; VAN GENT et al., 2011). Im kleineren Maßstab erfolgt die Naherkundung einzelner Kali- und Steinsalzlagerstätten als Rohstoffquelle oder potentiellies Endlager für radioaktive Abfälle in Form von Erkundungsbohrungen und untertägiger Auffahrung, um unter anderem den Internbau deformierter Salzlagerstätten sowie entsprechende Deformationsprozesse und deren Auswirkungen besser verstehen zu können (z.B. BEHLAU und MINGERZAHN, 2001; BIEHL et al., 2014; BORNEMANN et al., 2008; HORN et al., 2016). Des Weiteren sind Experimente zum Lösungs-, Druck- und Kriechverhalten unterschiedlicher Salzgesteine sowie Analog-Experimente und die numerische Modellierung unterschiedlicher Beanspruchungssituationen ein sehr wichtiger Forschungsbereich, um verschiedene Deformationsprozesse, deren Funktionsweise und Geschwindigkeit sowie resultierende Strukturen besser verstehen zu können (z.B. BRUN und FORT, 2004; CARTER et al., 1993; FUCHS et al., 2014; HUNSCHE und SCHULZE, 1994; SCHENK und URAI, 2004; SCHENK et al.,

2006; SPIERS et al., 1990; URAI et al., 1986; ZULAUF et al., 2009, 2010, 2011). Die Betrachtung auf mikroskopischem Maßstab, also auf Ebene einzelner Kristallkörner bis hin zu intragranularen Strukturen ist besonders wichtig, da in der Regel eine Extrapolation der Erkenntnisse über die wirkenden Mechanismen auf dieser Ebene auf Fragestellungen in größerem Maßstab erfolgt (URAI et al., 2008). Entsprechend werden im folgenden Kapitel, aufbauend auf einer Kurzbeschreibung zur Entstehung von marinen Salzlagerstätten, die wichtigsten Erkenntnisse zu Deformationsprozessen, die für die Salztektunik relevant sein können, zusammengefasst und anschließend das heutige Verständnis der Prinzipien der Salztektunik erläutert.

2.2 Die Entstehung von marinen Salzlagerstätten

Evaporite, zu denen auch Salzgesteine gehören, haben ihren Ursprung in einem durch die Wärme der Sonne angetriebenen Verdunstungsprozess einer gesättigten Lösung an der Oberfläche oder in Oberflächennähe (WARREN, 2006). Die zunehmende Sättigung der Lösung führt zu einer aufeinanderfolgenden Ausfällung verschiedener Minerale entsprechend ihrer Löslichkeit. Im Falle mariner Salzlagerstätten steht am Anfang der Ausscheidung typischerweise ein Ca- oder Ca-Mg-Karbonat (Kalzit oder Aragonit), gefolgt von Ca-Sulfat (Gips oder Anhydrit). Darauf folgt die Ausfällung von Na-Chlorid (Halit) sowie von Mg-Sulfaten (u.a. Kieserit) und schließlich der K-Chloride (Sylvin, Kainit oder Carnallit) und der Mg- bzw. Mg-Ca-Chloride (Bischoffit oder Tachhydrit) (OKRUSCH und MATTHES, 2014).

Der Begriff „Salz“, mit dem pauschal Salzgesteine gemeint sind, wird in der Fachliteratur zur Salztektunik meist als Überbegriff für alle Gesteine genutzt, die hauptsächlich aus dem Mineral Halit bestehen (HUDEC und JACKSON, 2007). Tatsächlich sind neben Halit in marinen Salzlagerstätten etwa 50 Haupt- und Nebenminerale nachgewiesen (OKRUSCH und MATTHES, 2014). Außer dem Mineral Halit enthält polykristallines Steinsalz Verunreinigungen in Form von Mischkristallen, Sekundärmineralphasen sowie Fluiden in intragranularen Einschlüssen, auf Korngrenzen und in Poren. Die Halitkristalle können Durchmesser zwischen 0,01 mm und mehreren Dezimetern aufweisen (URAI et al., 2008).

Salzgesteine erhalten je nach Anteil der unterschiedlichen Sekundärminerale ihren Namen. So ist ein Halitit (Steinsalz) ein annähernd monominerales, kristallines Salzgestein aus Halit. Es ist generell das häufigste Salzgestein. Ein Sylvinit hingegen besteht vorwiegend aus Halit und Sylvin, während ein Carnallitit aus Carnallit und Halit besteht (OKRUSCH und MATTHES, 2014). Neben seiner hohen Löslichkeit besitzt Steinsalz gegenüber anderen Gesteinen weitere besondere physikalische Eigenschaften, vor allem in Bezug auf Dichte, thermische Leitfähigkeit und Viskosität (Abbildung 2.1).

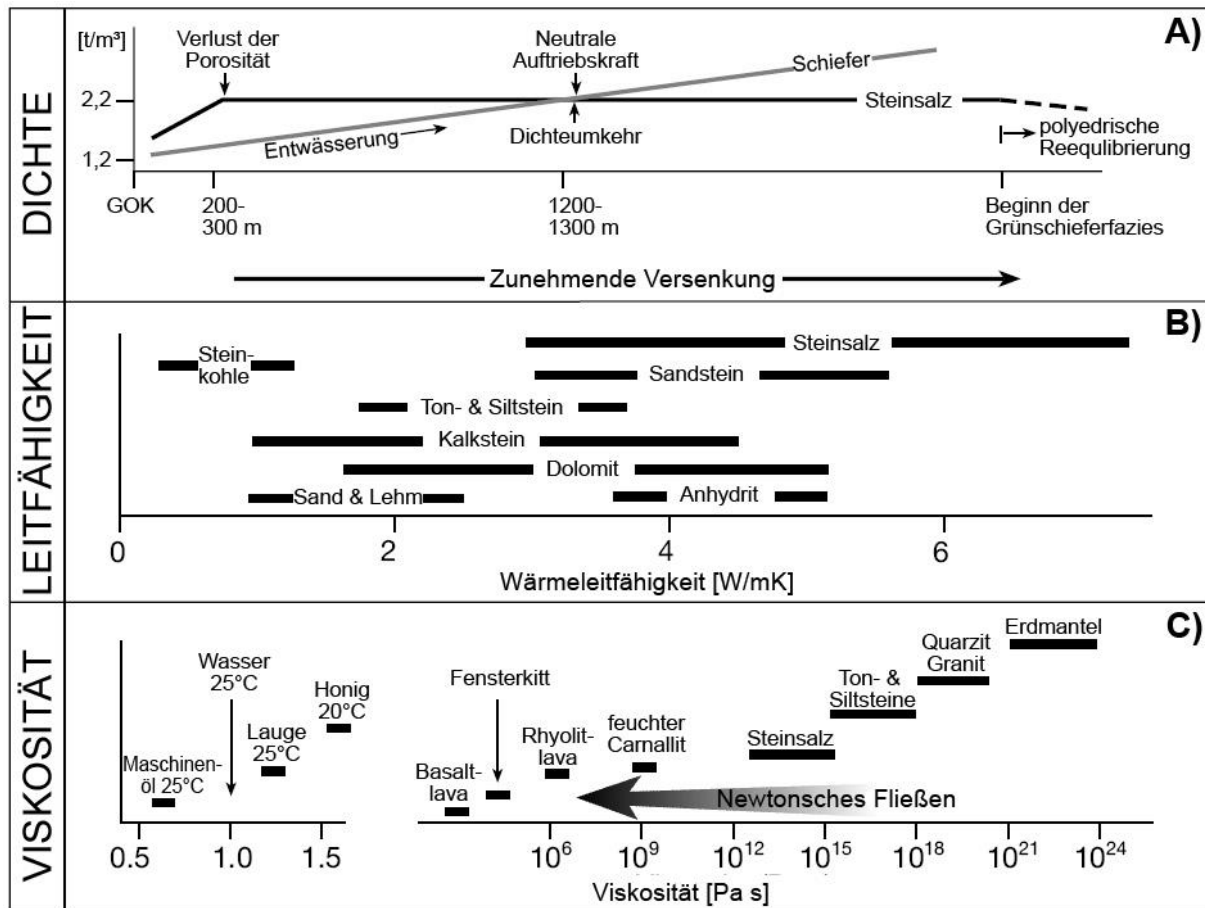


Abbildung 2.1: Die physikalischen Eigenschaften von Steinsalz im Vergleich zu anderen Gesteinen, A) Dichteänderungen einhergehend mit der Versenkung, B) thermische Leitfähigkeit, C) Viskosität (nach WARREN, 2006).

Die wichtigste Eigenschaft ist die sehr niedrige Viskosität. Diese ist eine Kenngröße, welche den Fließwiderstand eines Fluides repräsentiert und anhand des Quotienten aus Scherspannung und Scherverformung gemessen wird. Kaum ein anderes Gestein weist eine ähnlich niedrige Viskosität auf. In Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur variiert die Viskosität zwischen 10^{18} Pas in trockenem Halit und 10^8 Pas in feuchtem Carnallit (WARREN, 2006). Bei ungewöhnlich hohen Verformungsraten, z.B. während eines untertägigen Gewinnungsprozesses oder des Durchschlags einer magmatischen Intrusion durch einen Salinarkörper, neigt Salz zur Bruchdeformation (HUDEC und JACKSON, 2007). Im Normalfall, bei typischen geologischen Bedingungen, weisen die meisten Evaporite ein plastisches Deformationsverhalten auf, das dem eines unter Druck stehenden Pseudofluids ähnelt (WEIJERMARS et al., 1993).

Bei zunehmender Versenkung und Verdichtung verliert Steinsalz ab einer Tiefe von 100 m bis 200 m seinen effektiven Porenraum und hat entsprechend eine sehr geringe Permeabilität. Die sich in diesem Tiefenbereich einstellende relativ geringe Dichte von etwa 2,2 t/m³ bleibt bis in eine Tiefe von 6 km bis 8 km annähernd konstant. Andere Sedimentgesteine hingegen, wie beispielsweise Tonschiefer, weisen, einhergehend mit zunehmender Entwässerung und Kompaktion, in größeren Versenkungstiefen meist eine

zunehmende Dichte auf (WARREN, 2006). Überlagert solch ein Tonschiefer eine Steinsalzschiefer, ist ab einer Versenkungstiefe von etwa 1,3 km der Punkt der sogenannten Dichteumkehr erreicht: Ab dieser Tiefe ist das zuvor schwerere Steinsalz leichter als der unmittelbar überlagernde Tonschiefer und erfährt bei zunehmender Tiefe eine positive Auftriebskraft (WARREN, 2006). Zu einer weiteren Dichteabnahme von Steinsalz kann es in großen Versenkungstiefen durch thermische Expansion kommen, die nicht durch die druckbedingte Volumenabnahme kompensiert werden kann (JACKSON und TALBOT, 1994). Dieser Effekt wird durch die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz verstärkt. Theoretisch ist so innerhalb von Salzkörpern mit einer Viskosität von höchstens 10^{16} Pas und einer Mächtigkeit von mindestens 2,9 km eine thermisch induzierte Konvektion möglich (WARREN, 2006).

Die Diagenese der entsprechend ihrer Löslichkeit ausgeschiedenen chemischen Sedimente führt zu einer klassischen Evaporitabfolge von Kalkstein bzw. Dolomit, Anhydrit, Steinsalz und verschiedenen Kalisalzen, meist in Form von wenige Meter mächtigen Flözen. Diese Abfolge ist jedoch abhängig von der Position innerhalb des Sedimentationsraums und kann auch durch zwischenzeitliche Verdünnung, zum Beispiel auf Grund von einer Meerestransgression, umgekehrt sein. Neben Zufluss und Verdunstungsrate sind das Paläorelief, relative Meeresspiegelschwankungen und die tektonischen Rahmenbedingungen wichtige Faktoren für den sehr dynamischen Entstehungsprozess mächtiger mariner Salzlagerstätten (WARREN, 2010). Eine wiederholte Transgression kann zu der Entstehung von mehreren sich überlagernden Eindampfungssequenzen führen, welche häufig durch tonige Sequenzen voneinander getrennt sind. Diese sogenannten Salztone können die bis dato vorhandenen Salzablagerungen bei erneuter Transgression vor Wiederauflösung schützen. So besteht beispielsweise der europäische Zechstein mit einer mittleren Mächtigkeit von etwa 1500 m aus insgesamt sieben Salinarzyklen mit einer Gesamtsalzmächtigkeit von etwa 1200 m (BEER, 1996).

2.3 Deformationsmechanismen

In unterschiedlichen Laborversuchen zum Kriechverhalten von Steinsalz bei Temperaturen, welche für die Salztektonek relevant sind, wurden als wirksame Deformationsmechanismen in der Regel eine Kombination aus Versetzungskriechen im Zusammenspiel mit fluid-unterstützter dynamischer Rekristallisation sowie dem Prozess der Drucklösung in Verbindung mit Gleitbewegungen entlang von Korngrenzen beobachtet (TER HEEGE et al., 2005b). Unter bestimmten Bedingungen sind auch bruchdeformative Prozesse in Form von inter- und intrakristallinen Mikrorissbildung und plastischer Kornformveränderung zu beobachten (z.B. PEACH et al., 2001; POPP et al., 2001; SCHULZE et al., 2001). In Abbildung 2.2 sind schematisch alle bekannten Deformationsprozesse dargestellt, die im

Temperaturbereich von 20 °C bis 200 °C unter bestimmten Bedingungen wirksam sein können (URAI et al., 2008). In welchem Ausmaß welcher Prozess wirkt, hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. Wichtige Variablen sind Temperatur, Umgebungsdruck, Korngröße, Verunreinigungen durch Mischkristalle oder Sekundärmineralphasen und nicht zuletzt die Feuchtigkeit (URAI et al., 2008).

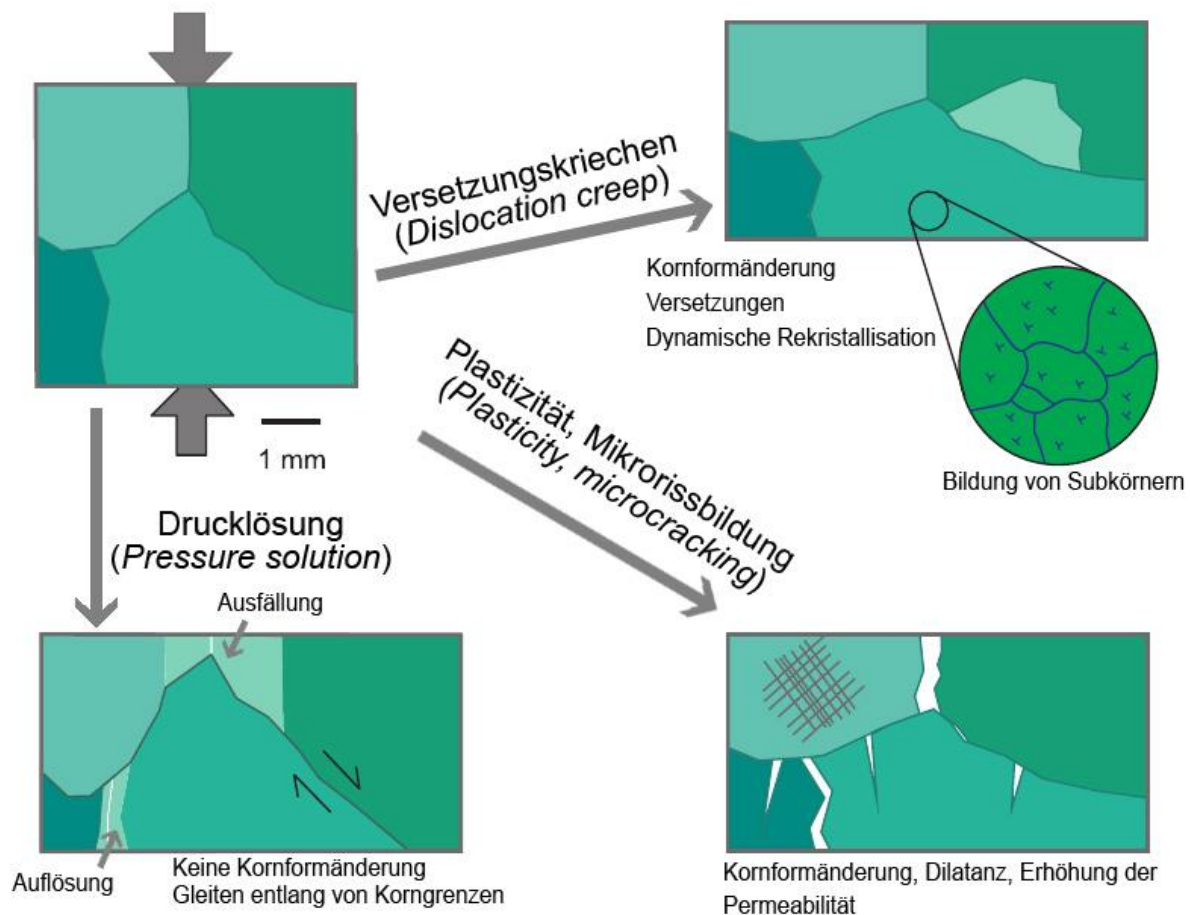


Abbildung 2.2: Deformationsmechanismen und wichtigste mikrostrukturelle Beobachtungen für Steinsalz im Temperaturbereich von 20 °C bis 200 °C (nach URAI et al., 2008).

Dilatanz stellt eine unelastische Volumenzunahme durch inter- und intragranulare Mikrorissbildung dar. Einhergehend mit plastischen Kornformänderungen ist dieser Prozess schon bei Zimmertemperatur und einer relativ niedrigen Effektivspannung zu beobachten (PEACH und SPIERS, 1996; PEACH et al., 2001). Dieser Deformationsmechanismus wirkt bei relativ niedrigem effektivem Umgebungsdruck (URAI et al., 2008) und kann zu einer enormen Erhöhung der Permeabilität führen (z.B. POPP et al., 2001). Ebenfalls bereits bei Raumtemperatur, aber in Verbindung mit höheren effektiven Umgebungsdrücken tritt innerhalb von feuchtem grobkörnigem Steinsalz der Prozess des Versetzungskriechens in Kombination mit dynamischer Rekristallisation ein (CARTER et al., 1993; SCHENK und URAI, 2004; SCHENK et al., 2006). Während des Versetzungskriechens bilden sich typischerweise Subkörner (PENNOCK et al., 2005, 2006). Sind geringe Mengen an Fluiden entlang der Korngrenzen vorhanden, kommt es durch den Prozess der fluid-unterstützten

Korngrenzmigration zu einer beschleunigten Versetzungsauslöschung (SCHENK und URAI, 2004; SCHENK et al., 2006).

Während die mit dem Versetzungskriechen einhergehende fluid-unterstützte Korngrenzmigration einen Auflösungs-Ausfällungs-Transfer über Korngrenzen hinweg beinhaltet, ist der Prozess der Drucklösung mit einem tatsächlichen Massentransfer um Korngrenzen herum verbunden (URAI et al., 2008). Die Drucklösung ist einer der wichtigsten Deformationsmechanismen in der oberen kontinentalen Kruste (GRATIER et al., 2013) und geht besonders schnell in feuchtem Steinsalz vonstatten (z.B. GRATIER, 1993). In Anwesenheit einer geringen Menge nicht gesättigter Lösung gehen einzelne Kristalle entlang unter hoher Spannung stehender Korngrenzen in Lösung. Nach der Diffusion des gelösten Materials innerhalb der Fluidphase entlang des Korngrenzennetzwerkes kommt es zur Ausfällung an Korngrenzen, welche unter niedriger Normalspannung stehen (SCHUTJENS und SPIERS, 1999). Die Differenz des chemischen Potentials zwischen dem Bereich der Auflösung und dem Bereich der Ausfällung gilt generell als treibende Kraft für diesen Prozess. Die Geschwindigkeit der Diffusion ist in einer eingeschlossenen, unter Druck stehenden Fluidphase generell langsamer als in einem freien Fluid, das einen großen Porenraum oder offene Klüfte füllt. In solch einem System können die gelösten Bestandteile über Kilometer transportiert werden. Im Fall einer eingeschlossenen Fluidphase hingegen ist die Größe und Ausdehnung derselben ein maßgeblicher Faktor, der den Prozess der Drucklösung bestimmt. Je nach Situation liegt die Massentransferdistanz im Bereich von Mikro- bis Kilometern (GRATIER et al., 2013). In der Regel ist Drucklösung in Steinsalz begleitet von Gleit- und Rotationsbewegungen einzelner Kristalle und kann zur Kompaktion von porösem Steinsalz und zu einer Verformung nichtporöser Aggregate führen (SPIERS et al., 1990).

Nur wenn ausreichend Fluide vorhanden sind, kann dynamische Rekristallisation oder Drucklösung stattfinden, sodass die Kriechfestigkeit entsprechend stark reduziert wird. TER HEEGE et al. (2005b) beobachteten an trockenem synthetischem Steinsalz (< 5 ppm H₂O) ausschließlich Versetzungskriechen in Verbindung mit Subkornbildung. Schon wenig feuchtes Steinsalz hingegen (> 9 ppm H₂O) deformierte in Form einer Kombination aus Drucklösung und Versetzungskriechen. Ein oszillierendes Spannungs-Verformungs-Verhalten wurde beobachtet, das sich durch das Auftreten von fluid-unterstützten Korngrenzwanderungen erklären lässt, die der jeweils erreichten Verfestigung entgegenwirkten (TER HEEGE et al., 2005b, 2005a).

Alle genannten Prozesse wurden auch anhand von Mikrostrukturen in natürlich deformierten Steinsalzproben als wichtige und wirksame Prozesse identifiziert (z.B. SCHLÉDER und URAI, 2007; SCHLÉDER et al., 2008). Diese Mikrostrukturen können Informationen über das zuletzt herrschende Spannungsfeld liefern (TALBOT, 1992). Salzkristalle können sich in einem

fließenden Salzkörper bis zu einem Längen/Breiten-Verhältnis von 4 bis 5 senkrecht zu der Hauptspannungsrichtung verformen. Ab diesem kritischen Längen/Breiten-Verhältnis führt der Prozess der Drucklösung zur Bildung neuer Kristalle, sodass das gespeicherte Deformationsgedächtnis nur relativ kurz und auf den letzten wirkenden Spannungszustand begrenzt ist (WARREN, 2006). Für einen besseren Überblick über die vergangenen Deformationsmechanismen und deren Spannungszustände müssen übergeordnete Verformungsmarker, wie beispielsweise die primäre Schichtung, Einschlüsse oder Gangstrukturen betrachtet werden (TALBOT und JACKSON, 1987).

Die Kristallgröße ist bei extrusivem Steinsalz mit im Mittel 0,5 mm viel geringer als bei sekundärem Steinsalz, welches sehr große Korndurchmesser von 1 dm bis 3 dm aufweisen kann. Die mittlere Korngröße der meisten Steinsalzvorkommen liegt zwischen 2 mm und 20 mm (URAI et al., 2008). Innerhalb eines Diapirs sind kleinere Korngrößen eher im Bereich von Scherzonen zu beobachten. Größere, in der Regel idiomorph kubische Kristalle sind hingegen in Bereichen, in denen Druckschatten herrscht, vorzufinden wie beispielsweise neben mitgeschleppten oder boudinierten Gesteinsbrocken (TALBOT und JACKSON, 1987).

Aus der großen Anzahl an Daten aus experimentellen Kriechversuchen mit natürlichem Steinsalz geht hervor, dass sich zwischen unterschiedlichen Steinsalzproben die Kriechfestigkeit um einen Faktor größer als 100 unterscheiden kann, obwohl die Orte der Probenahme teilweise nur wenige Meter voneinander entfernt sind (z.B. HUNSCHE und HAMPEL, 1999; HUNSCHE und SCHULZE, 1994). HUNSCHE et al. (1996) führen diese Unterschiede vor allem auf Verunreinigungen, häufig in Form von Anhydrit und Polyhalit, zurück, wobei nicht die Gesamtmasse dieser Verunreinigungen, sondern Art, Anzahl und mikroskopische Verteilung der Partikel ausschlaggebend ist. Entsprechend ist jede feste intrakristalline Verunreinigung eine Störung im Kristallgitter und somit ein Hindernis für den Prozess des Versetzungskriechens. Intensität und der Abstand zwischen den jeweiligen Hindernissen sind entsprechend wichtige Einflussgrößen (HUNSCHE und SCHULZE, 1994).

2.4 Salzstrukturen

Salztektonik umfasst alle Formen der Deformation von Salzgesteinen oder anderen niedrig viskosen Evaporiten, die vorwiegend durch Fließbewegungen gekennzeichnet sind. Diese Fließbewegungen sind verantwortlich für einige der komplexesten und visuell eindrucksvollsten geologischen Niedrigtemperatur-Deformationsstrukturen (WARREN, 2006). Salzstrukturen werden vorwiegend durch ihre äußere Gestalt beschrieben und benannt. Abbildung 2.3 zeigt eine Vielzahl möglicher Salzstrukturtypen. Einige Strukturen wie Salzlücken, Salzmauern, Salzwalzen und Salzüberschiebungen stellen langgestreckte Körper dar, andere, wie Salzkissen und Salzstöcke sind eher oval bis kreisförmig ausgebildet. Einige Strukturen verengen sich und andere weiten sich nach oben aus. Wieder andere wie

Diapieren, ordnete jedoch eine dichtebedingte Auftriebskraft als treibende Kraft ein, welche in Kombination mit der Rayleigh-Taylor-Instabilität, einer hydrodynamischen Instabilität an der Grenzfläche zweier unterschiedlich schwerer Fluidphasen, zu einem Durchbruch des Deckgebirges führen kann, und prägte so den Begriff der Halokinese (TRUSHEIM, 1957, 1960). Obwohl dieses Konzept die Scherfestigkeit des Deckgebirges vernachlässigte, dominierte es in den folgenden Dekaden das Verständnis der Salztektunik und wurde durch Überlegungen zum genetischen Zusammenhang einzelner Salzstöcke und der Zusammenfassung zu einzelnen Salzstockfamilien (SANNEMANN, 1968) sowie möglichen tektonischen Initialbewegungen (z.B. JARITZ, 1973; 1980) ergänzt. Auf Grund des beobachteten starken Einflusses der Scherfestigkeit des Deckgebirges auf das Diapirwachstum konnte sich dieses Konzept eines fluidartigen Deckgebirges in den späten 1980er Jahren schließlich nicht weiter halten. Seither wird als maßgebliche treibende Kraft der differentiale Belastungsdruck des Deckgebirges gesehen (HUDEC und JACKSON, 2007).

Das Wachstum von Diapieren ist gekennzeichnet durch tektonische Prozesse, passiven Diapirismus sowie allochthone Platznahme (KUKLA et al., 2008). Damit Salzmassen grundsätzlich eine Platznahme innerhalb des Deckgebirges in Form eines Diapirs vollziehen können, muss zuerst das dortige Gestein entfernt oder versetzt werden. Dies kann durch Extension und Platznahme zwischen getrennten Verwerfungsblöcken, durch Kompression und Platznahme im Hangenden einer Aufschiebung, durch Erosion (beispielsweise des Scheitels einer Antiklinalstruktur) sowie durch aktives auftriebsbedingtes Durchbrechen in Form von Anheben, Rotieren und Aufschultern geringmächtiger Deckgebirgsschichten erfolgen. Wenn ein Diapir einen Durchbruch bis an die Oberfläche vollzogen hat, tritt meist der Prozess des passiven Diapirismus ein, nämlich eine kontinuierliche Aufstiegsbewegung parallel zur umgebenden Sedimentation (HUDEC und JACKSON, 2007).

Generell entstanden die meisten Diapirstrukturen während Extensionsphasen, entweder unter Einbezug des Subsalinars oder entkoppelt nur das Deckgebirge betreffend (JACKSON und VENDEVILLE, 1994). HUDEC und JACKSON (2007) sehen deshalb in regionaler Extension den wichtigsten primären Auslöser für Salzdiapirismus und sehen diese These durch den Fakt unterstützt, dass häufig ganze Serien von Abschiebungen auf die tiefen Flankenbereiche von Salzdiapiren zulaufen und somit deren frühextensionale Geschichte widerspiegeln. Extensionsbewegungen ohne Einbezug der Salzbasis werden auch „thin skinned tectonics“ genannt (VENDEVILLE und JACKSON, 1992a, 1992b). Als Extrem dieses Deformationstypus wird die sogenannte Floßtektonik betrachtet, bei welcher sich synsedimentäre Grabenstrukturen öffnen und zu einem Auseinanderbrechen des Deckgebirges in mehrere Blöcke führen, welche auf einer entkoppelnden Schicht, in diesem Fall Salz, hangabwärts gleiten (BEST, 1996; DUVAL et al., 1992; THIEME und ROCKENBAUCH, 2001). Dabei kommt es meist zu einem lokalen extensiven Regime im Bereich der

auseinanderdriftenden Blöcke und einem kompressiven Regime in tieferen Bereichen, wo Blöcke aufeinander gleiten (PENGE et al., 1999). Die einzelnen Blöcke, auch Flöße genannt, sind typischerweise durch muldenartige, asymmetrisch ausgebildete Depotzentren gekennzeichnet, die mit jüngeren synkinematischen Sedimenten gefüllt sind (VENDEVILLE und JACKSON, 1992b). Solche Erscheinungsformen wurden deshalb in der Vergangenheit fälschlicherweise häufig als subrosionsbedingte Grabenstruktur wahrgenommen (VENDEVILLE und JACKSON, 1992a).

In aktuellen Studien wird für die meisten Salzstrukturen im Zentraleuropäischen Becken (ZEB) von einer tektonisch bedingten Entkopplung und strukturell bedingten Initialbewegungen ausgegangen (z.B. HANSEN et al., 2007; MAYSTRENKO et al., 2013; MOHR et al., 2003; SCHECK et al., 2003b). Durch die mehrphasige tektonisch-sedimentäre Entwicklung des ZEB, in der regional auf Phasen der Extension und Transversalverschiebungen eine intensive Kompressionsphase, bedingt durch die alpidische Orogenese, folgte, sind viele Salzstrukturen in einem extensiven Regime angelegt und in einem kompressiven Regime überprägt worden (KLEY et al., 2008; KUKLA et al., 2008).

Während die äußeren Konturen von Salzstrukturen vor allem dank moderner Seismik hervorragend exploriert werden können, ist der innere Aufbau dieser Strukturen meist nur durch Aufschlüsse in Bergwerken näher bekannt und beschrieben und bis heute nur wenig verstanden (WARREN, 2006; STROZYK et al., 2012, 2014). RICHTER-BERNBURG (1980, 1987) stellte bei dem Versuch einer Klassifizierung und Systematisierung von Bergwerksaufschlüssen fest, dass die internen Deformationsstrukturen kaum einer erkennbaren Gesetzmäßigkeit folgen und individuell gestaltet sind, selbst bei dem Vergleich von äußerlich sehr ähnlich erscheinenden Salzstrukturen. Neben den Randbedingungen zur Strukturentwicklung selbst ist einer der Gründe hierfür der heterogene Aufbau einer Salzformation. Diese ist in der Regel nicht aus einer reinen Steinsalzschiefer aufgebaut, sondern beinhaltet außerdem Tone, Karbonate, Sulfate und anderen Chloride, die entweder in Form von sekundären Mineralphasen oder in klar voneinander abgetrennter Schichtung vorliegen. Während die Karbonate (z.B. Dolomit) und Sulfate (z.B. Anhydrit) viel kompetenter als Steinsalz sind und bei Bedingungen, die zu Salzfließbewegungen führen, spröde reagieren, sind zusätzlich häufig noch andere K- und Mg-Salze, wie beispielsweise Carnallit vorhanden. Diese nehmen zwar volumetrisch viel weniger anteiligen Platz ein, weisen aber eine vielfach geringere Kriechfestigkeit auf. Gemeinsam mit dem beigesteuerten Kristallwasser durch Metamorphose von Carnallit kann eine solche Schicht eine sehr wichtige Rolle bei der Gesamtstrukturentwicklung einnehmen (URAI et al., 2008).

RICHTER-BERNBURG (1980, 1987) berichtet von isoklinalen und überkippten Falten in Salzlücken und Spaltintrusionen, sodass teilweise die stratigraphisch älteren Einheiten von oben in jüngere Einheiten eintauchen. Im Diapirstadium eröffnet sich schließlich die Möglichkeit der Faltenbildung in allen nur denkbaren Formen und Richtungen. Eine Vorhersage der internen Strukturen, ohne diese tatsächlich von innen betrachtet zu haben sieht RICHTER-BERNBURG (1987) als unmöglich an. Auch heute trifft diese Aussage noch zu (JACKSON und HUDEC, 2017; WARREN, 2016). Seither hat sich allerdings eine Vielzahl von Autoren mit unterschiedlichen Fragestellungen beschäftigt, um die internen Deformationsstrukturen in natürlichen Salzstrukturen besser zu verstehen.

Einige wichtige Fortschritte und neue Erkenntnisse gab es beispielsweise im Bereich der Interpretation hochauflösender moderner 3D-Seismik. Ist eine ausreichend mächtige Schicht innerhalb eines Salzkörpers mit einem ausreichend hohen Kompetenzkontrast zu diesem vorhanden, kann diese Schicht eine interpretierbare Reflektion erzeugen (GELUK et al., 2000; VAN GENT et al., 2011). Ist jedoch in einem Bereich keine Reflektion vorhanden, kann dies auf ein Nichtvorhandensein der Schicht oder auf ein zu steiles Einfallen dieser Schicht hinweisen. Entsprechend stellen sich Interpretationen gerade im Bereich von gefalteten und boudinierten Blöcken als erschwert dar. Dennoch konnten VAN GENT et al. (2011), STROZYK et al. (2012; 2014) und RATH et al. (2016) im niederländischen Zechstein viele interessante interne Deformationsstrukturen sowie anomal mächtige Bereiche identifizieren und unterschiedlichen Prozessen zuordnen. Dies gelang auch JACKSON et al. (2015) im brasilianischen Santos-Becken, die den Vorteil der großflächigen Datenverteilung der neuen 3D-seismischen Methode gegenüber Bergwerksaufschlüssen betonen.

Auch im Bereich der Analog-Modellierung konnten seit den späten 1980er Jahren einige Fortschritte erzielt werden. JACKSON und TALBOT (1989) betrachteten die internen Deformationsstrukturen von pilzartig geformten Diapiren, identifizierten vor allem Sichel- und Tauchfalten und stellten fest, dass der Rand einer solchen Struktur immer mit der stratigraphisch ältesten Einheit besetzt ist. BRUN und MAUDUIT (2009) untersuchten die internen Deformationsstrukturen von sogenannten Salzwälzen, Strukturen, die im Bereich von stattfindender Floßtektonik zwischen zwei Flößen entstehen, und konnten klar wirbelartige Bewegungszellen beobachten, die das laminare Fließen stark beeinflussen und zu passiven Faltungen führen. ZULAUF et al. (2009) betrachteten das Deformationsverhalten einer in einer Steinsalzmatrix eingebetteten Anhydritlage mittels Computertomographie und beobachteten vor allem Boudinierung und ein Bruchversagen des Anhydrits. In einer zweiten Experimentreihe wurde der Einfluss von Fluiden in diesem experimentellen Aufbau betrachtet (ZULAUF et al., 2010). Es wurde hydraulische Rissbildung durch zu den Korngrenzen migrierte Fluideinschlüsse beobachtet. NaCl-Lösung migrierte entlang neu geformter Mikrorisse und entlang der Steinsalz-Anhydrit-Begrenzung und rekristallisierte in

den sogenannten *neck-domains* im Druckschatten zwischen zwei *Boudins*. Es konnte ein Zusammenhang zwischen Anzahl und Größe der Anhydrit-*Boudins* und der Schichtmächtigkeit bewiesen werden (ZULAUF et al., 2011). DOOLEY et al. (2015) versuchten die von JACKSON et al. (2015) mittels 3D-Seismik interpretierten Salzstrukturen im Santos-Becken (Brasilien) anhand physikalischer Analog-Modellierung nachzubilden. Dabei stellten sie fest, dass die wichtigsten auf 3D-Seismik erkennbaren internen Deformationsstrukturen auch ohne laterale Verkürzung und Kompression, allein durch von differentiellm Überlagerungsdruck induzierte Fließbewegungen erzeugt werden können. Dichteinversion innerhalb des Salzkörpers kann dabei eine wichtige Rolle spielen und Strukturen erzeugen, die typischerweise auf regionale Kompression zurückgeführt werden.

Einige interessante Beobachtungen wurden außerdem im Bereich der computergestützten numerischen Modellierung gemacht. KOYI (2001) zeigte die Effekte des Mitschleppens von Anhydritblöcken in einem Salzdiapir und die Möglichkeit des späteren Absinkens dieser Blöcke in einem inaktiven Diapirstadium auf. CHEMIA (2008) und CHEMIA und KOYI (2008) untersuchten dieses Phänomen weiterführend. Sie identifizierten mögliche Kontrollfaktoren, die Einfluss auf die Bereitstellung einer ausreichend großen Menge Salz haben, um Anhydritblöcke aufwärts zu transportieren oder statisch entgegen einer Absinkbewegung zu halten, und testeten diese anhand numerischer Modelle. BURCHARDT et al. (2011, 2012) untersuchten weiterführend das Deformationsverhalten in und um absinkende Anhydritblöcke und beobachteten in den Ergebnissen ihrer numerischen Modelle intensive Salzfließbewegungen, sekundäre Faltenbildung und Abscherungszonen um die absinkenden Blöcke, besonders über und entlang den Randbereichen dieser Blöcke. LI et al. (2012) untersuchten die Dynamik von spröde deformierenden Evaporitsequenzen innerhalb eines Salzkörpers während einer Phase des passiven Diapirismus und beobachteten unter anderem eine Abhängigkeit der fortschreitenden Boudinierung von dem sich durch die Boudinierung ändernden Salzfließbewegungen. Als Resultat der vertikalen Komponente der Salzfließbewegungen rotierten und verbogen sich einzelne Blöcke.

JACKSON und HUDEC (2017) fassen die heutigen Erkenntnisse zu den internen Deformationsstrukturen von Salzdiapiren und Salzmauern zusammen und nennen drei wichtige Einflussgrößen für deren Komplexität. Erstens handelt es sich um eine dreidimensionale fortschreitende Verformung. Zweitens kann eine Unterteilung in voneinander durch Scherzonen getrennte Bewegungszellen mit unterschiedlicher Wirbelgeschwindigkeit vorliegen. Drittens kann eine erneute Faltung der primären Fließfalten erfolgen. In Kombination ergeben diese Faktoren interne Strukturen, die zu den Komplexesten der Strukturgeologie zählen.

2.5 Schlussfolgerungen

Eine Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren und Prozesse bedingen die Entstehung und Deformation von Salzlagerstätten. Der rheologische Kontrast einzelner Schichten innerhalb der Salinarabfolge, die Verfügbarkeit von Fluiden und deren Einfluss auf die Verformungsprozesse und -geschwindigkeit, mögliche Wegsamkeiten für diese Fluide und die tektonischen Rahmenbedingungen im allgemeinen sind wichtige Parameter, um die Genese der heute vorliegenden sehr komplexen Salzstrukturen zu verstehen.

3 Der obere Allertalgraben

3.1 Regionalgeologische Situation

Der obere Allertalgraben, auch Allertal(-Störungs)zone oder Allertallineament genannt (BEST und ZIRNGAST, 2002), ist am nordöstlichen Rand des Subherzynen Beckens gelegen, welches auf einer Länge von 100 km und einer Breite von 50 km etwa NW-SE gerichtet zwischen Harz und Flechtlinger Höhenzug verläuft (Abbildung 3.1). Großräumig lässt sich das Subherzyne Becken dem südlichen Teil des Zentraleuropäischen Beckens zuordnen,

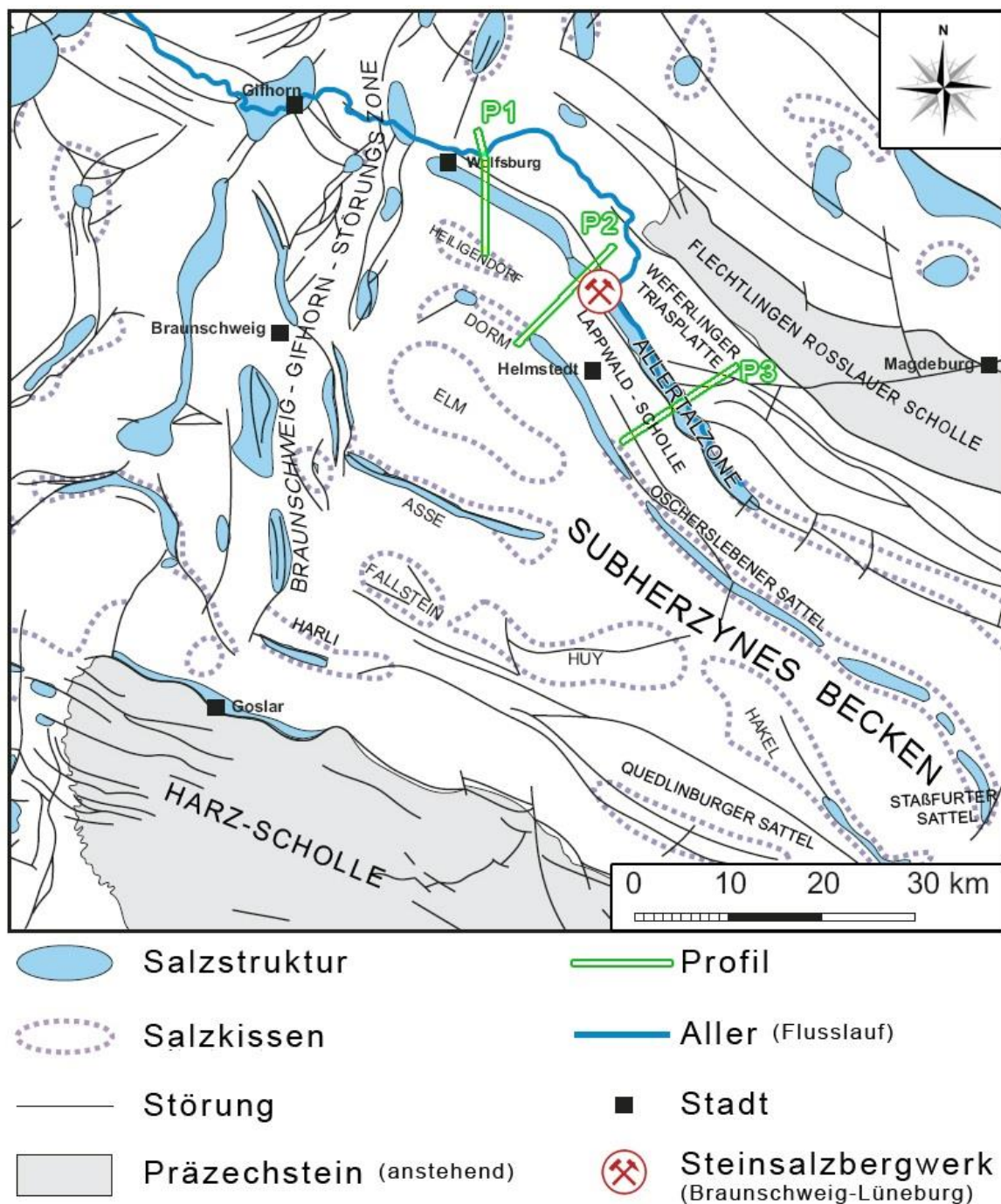


Abbildung 3.1: Strukturgeologische Übersichtskarte des Subherzynen Beckens (nach BEST und ZIRNGAST, 2002 und BREWITZ et al., 2008).

welches sich von der Nordsee bis hin zu den polnischen Niederungen erstreckt. Der Allertalgraben ist Teil eines komplexen Beckensystems, welches sich im Anschluss an die variszische Orogenese zu formieren begann und durch eine mehrphasige tektonische Entwicklung gekennzeichnet ist (BRANDES et al., 2013; KLEY et al., 2008; SZEDER, 2003).

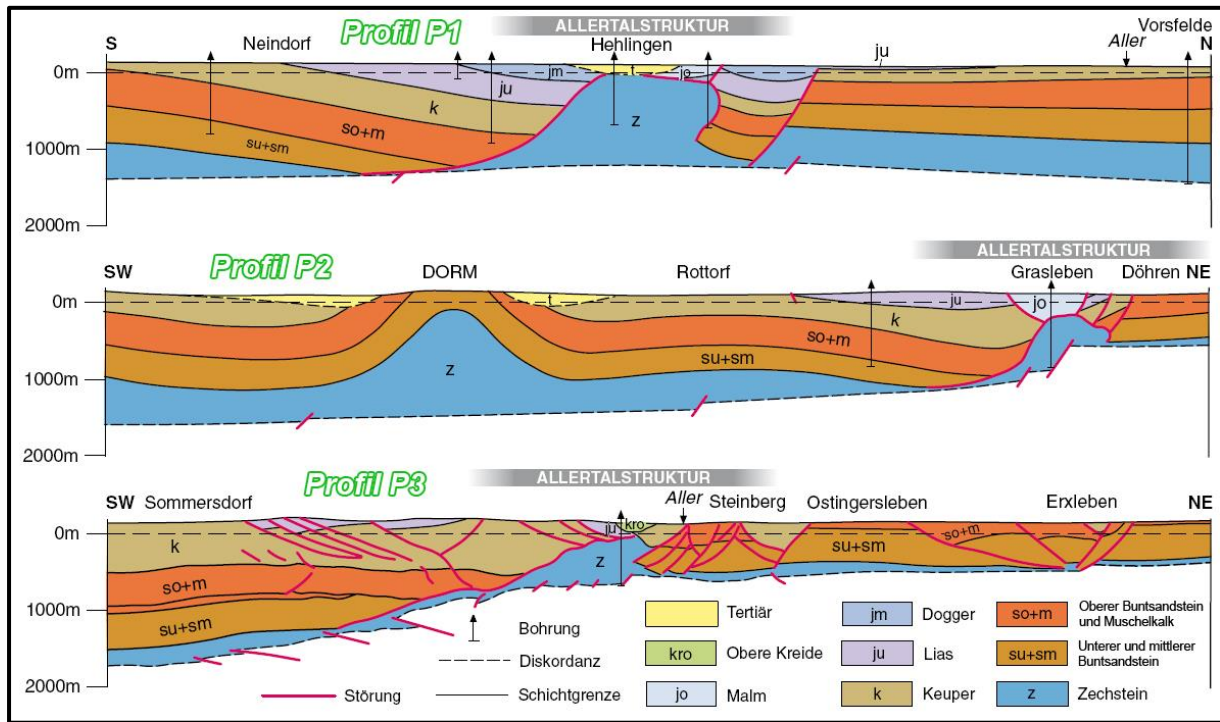


Abbildung 3.2: Profildarstellungen im Bereich der Allertalstruktur. Position der Profile sind der Abbildung 3.1 zu entnehmen (aus BEST und ZIRNGAST, 2002).

Wie das Norddeutsche und Ostdeutsche Becken, wird auch das Subherzyne Becken von zahlreichen zechsteinzeitlichen Salzstrukturen dominiert (BRANDES et al., 2013). Das Subherzyne Becken lässt sich in insgesamt sechs etwa parallel streichende 7 km bis 15 km breite Blöcke unterteilen, welche jeweils durch schmale, lang-gestreckte Salzstrukturen voneinander getrennt sind. Diese sind das Allertallineament, der Strukturzug Beienrode-Staßfurt, die Asse-Heeseberg-Struktur, der Ascherslebener Sattel und der Strukturzug Harli-Quedlinburger Sattel. Teilweise sind auf besonders breiten Blöcken auch Salzkissen ausgebildet wie beispielsweise Elm, Fallstein oder Huy. Alle diese Zechstein-zeitlichen Salzstrukturen weisen mehr oder weniger ein parallel zum beckenbegrenzenden paläozoischen Grundgebirge gerichtetes herzynisches Streichen auf. Im Kontrast dazu steht die NNE-SSW streichende Braunschweig-Gifhorner Störungszone, welche ebenfalls von zahlreichen Salzstrukturen besetzt ist. Diese stellt die westliche Begrenzung des Subherzynen Beckens dar (Abbildung 3.1). Die Beckenachse des Subherzyns steigt von dort Richtung Südosten an (BEST und ZIRNGAST, 2002). Insgesamt weist das Becken einen stark asymmetrischen Querschnitt auf. So fällt die präsalinare Basis des Rotliegend von ihrem Ausstrich im Bereich des Flechtlinger Höhenzuges in Richtung Harznordrandstörung flach ein und ist dort in etwa in 3000 m Tiefe anzutreffen. Das mesozoische Deckgebirge weist im

Vergleich zum Subsalinar deutliche Einengungsstrukturen auf, beispielsweise im Bereich der Dorm-Struktur (Abbildung 3.2).

Sub- und Suprasalinar erscheinen weitgehend tektonisch entkoppelt (BEST und ZIRNGAST, 2002). Die Allertalstruktur liegt in einer Art strukturellem Übergangsbereich von Salzrücken bzw. -kissen, vornehmlich im Bereich der Subherzynen Senke, und Salzdiapiren Richtung Norden im Bereich des Norddeutschen Beckens (JUBITZ et al., 1991).

Die Salzstruktur des Oberen Allertals liegt zwischen den tektonischen Einheiten der Lappwald-Scholle im Südwesten und der Weferlinger Triasplatte im Nordosten und sitzt einer vielfach gegliederten Sockelfuge auf. BEST und ZIRNGAST (2002) bezeichnen die Struktur als „salzgefüllte Spalte im postpermischen Deckgebirge“ mit einer Breite von ca. 2,5 km an der Basis und etwa 1,5 km im Salzspiegelbereich bei einer vertikalen Erstreckung von ca. 400 bis 600 m im Raum Morsleben (Abbildung 3.2, Profil 3).

3.2 Erkundung der Salzstruktur Oberes Allertal

Die ersten geowissenschaftlichen Untersuchungen bezüglich der Salzstruktur des Oberen Allertals reichen mittlerweile über 100 Jahre zurück. Schon während seiner Arbeiten zur geologischen Kartierungen des Gebietes (Blätter Helmstedt und Weferlingen) verfasste SCHMIERER (1909) einen Aufsatz zur Tektonik des Allertals und ordnete seine Beobachtungen in das damalige Verständnis einer Salzaufwölbung und Überschiebungstektonik ein, die er zeitlich dem Eozän zuwies. Zu dieser Zeit war das Gebiet des Allertals bereits durch über 50 Tiefbohrungen und insgesamt zwölf bis in das Zechsteinsalinar reichende Schächte erkundet, jedoch bezüglich Tektonik und Genese sehr umstritten (SCHACHL, 1991). Entsprechend hatte KIRSCHMANN (1913) eine andere Auffassung zur Entstehung der Salzstruktur. Anhand seiner Untersuchungen der Lagerungsverhältnisse von Deckgebirge und Salinar der Lagerstätte Bartensleben vermutete er eine triaszeitliche Entstehung entlang einer Flexur, die zu einer ausreichenden Auflockerung des Deckgebirges und entsprechenden Druckunterschieden geführt habe, sodass es zu einem auf der Auftriebskraft basierten Einfließen der Salzmassen entsprechend der Theorie von ARRHENIUS und LACHMANN (1912) gekommen sei. LACHMANN (1913) bestätigte grundsätzlich die von KIRSCHMANN (1913) erkannte wichtige Rolle der relativ ebenen und tiefen Lage der Salzbasis und deren wahrscheinliche Funktion als Flexur (KIRSCHMANN, 1913) oder Überschiebung (SCHMIERER, 1909), sodass es zur Ausbildung einer Schwächezone im Deckgebirge und so zu einem Salzaufstieg gekommen sei. In den folgenden Jahren setzte sich jedoch entgegen diesen Beobachtungen die Theorie einer rein tektonischen Entwicklung nach STILLE (1925) und einem durch tangentialen Druck bedingten Aufwölben und Aufpressen der Salzstrukturen durch. WOLDSTEDT (1924) analysierte alle bis dato durchgeführten Arbeiten innerhalb des Subherzynen Beckens und fand sowohl gegen eine

rein tektonische als auch gegen eine vorwiegend Auftriebskraft-bedingte Entstehung einige Widersprüche. Er vermutete, dass der Salzaufstieg isostatisch durch den Druck der überlagernden Sedimente hervorgerufen wurde und erklärte die beobachteten Phänomene anhand der Verkipfung der subherzynen Basis in Richtung SW und eines Zusammenschiebens einzelner Schollen in dieser Richtung.

Während die Erkundung des Deckgebirges durch das Vorhandensein von Quarzsanden und Kalksteinen im Raum Walbeck mehr oder weniger durchgängig seit Anfang des 20. Jahrhunderts stattfand, gab es von Mitte der 30er bis Anfang der 50er Jahre keinen weiteren Erkenntniszuwachs bezüglich der Kali- und Steinsalzlagerstätten des oberen Allertals (ZEIBIG und BECKER, 2002).

Das Bedürfnis, die Entstehungsprozesse besser zu verstehen, erwuchs aus der Entscheidung der damaligen Deutschen Demokratischen Republik (DDR) im Jahr 1972, den bis 1970 Steinsalz produzierenden Standort Morsleben als Endlager für radioaktive Abfälle einzurichten. Es folgte eine geowissenschaftliche Analyse durch das Zentrale Geologische Institut (ZGI) der DDR. Ab 1983 wurden umfangreiche Bohrprogramme durchgeführt und mündeten 1991 in einer ersten Publikation zur Strukturentwicklung der Salinarstruktur Oberes Allertal durch JUBITZ et al. (1991). Sie plädierten für ein Modell eines dreiphasigen Diapirismus, der von einer Anlage der Struktur während des Buntsandsteins in Form eines freiliegenden Salzhorstes ausgeht, aus dem sich während des Oberen Keupers der Spaltendiapir entwickelte. Ein zweiter Diapirimpuls sei dem Oberen Jura und das dritte Diapistadium der kretazischen Kompressionstektonik zuzuordnen. Die eigentliche Platznahme des Diapirs während der Trias konnte von JUBITZ et al. (1991) jedoch noch nicht ausreichend erklärt werden.

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) gab nach der Wiedervereinigung Deutschlands eine umfangreiche Studie bezüglich des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Auftrag. Die durch die BGR durchgeführten Arbeiten umfassen fast alle möglichen Disziplinen der Geologie und Geophysik, der Paläontologie, Salztektunik, Hydrogeologie bis hin zur Felsmechanik (BEST und ZIRNGAST, 2002). Im Rahmen dieser Studie erstellte BEST (1996) mit Hilfe der Oberflächengeologie, der Ergebnisse von über 400 Explorations- und Deponiebohrungen sowie einer ersten Interpretation von reflexionsseismischen Messergebnissen ein Modell zur Entstehung der Salzstruktur, das als SW-NE-Schnitt den gegenwärtigen strukturellen Zustand von Grund-, Neben- und Deckgebirge wiedergibt (Abbildung 3.3).

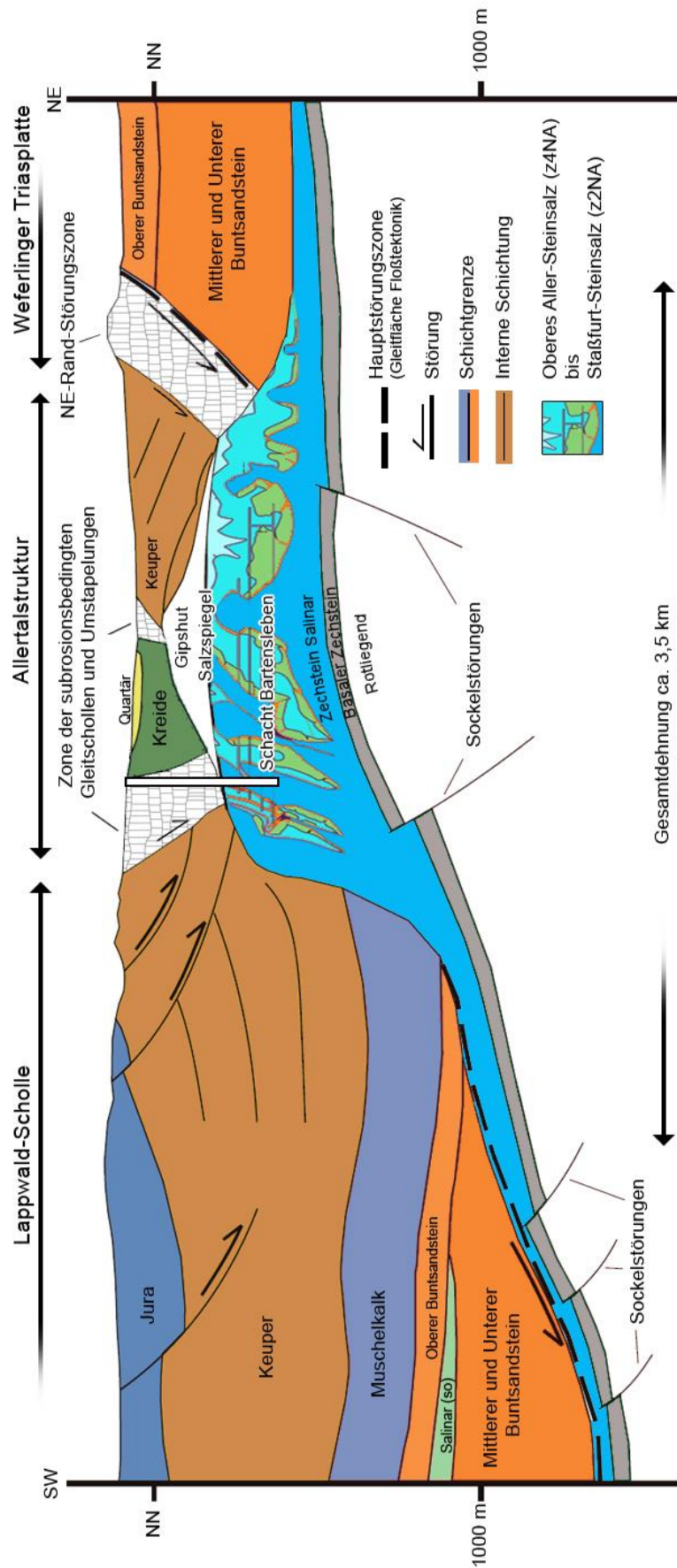


Abbildung 3.3: Schematischer geologischer Schnitt durch die Struktur „Oberes Allertal“ in der Höhe von Schacht Bartensleben (nach BEST, 1996 und BEHLAU und MINGERZAHN, 2001).

Die Beobachtung, dass die Salzstruktur in der Regel etwa 1,5 km breit ist, Unterer und Mittlerer Buntsandstein jedoch auf etwa 3,5 km fehlen, führte zu Zweifeln am bisherigen Modell einer mehrphasigen Diapirentwicklung im Sinne Trusheims (1960) und Sannemanns (1968) (BEST und ZIRNGAST, 2002). In zwei direkt südwestlich der Salzstruktur abgeteuften Tiefbohrungen wurde unterhalb des Rötsalinars unmittelbar basaler Zechstein angetroffen (JUBITZ et al., 1991). Die internen Reflektoren des Unteren und Mittleren Buntsandstein laufen in diesem Bereich spitzwinklig gegen das Zechsteinsalinar, was BEST (1996) zu dem Schluss kommen ließ, dass kein synsedimentäres Auskeilen dieser Schichtpakete vorliegt, wie von JUBITZ et al. (1991) angenommen, sondern ein tektonisches Auseinanderdriften. BEST (1996) geht demnach von einer während des Keupers entstandenen Abrissfläche des Buntsandsteinpakets aus, welche mit der NE-Rand-Störungszone der Weferlinger Triasplatte korrespondiert (Abbildung 3.3). Er verknüpfte die Beobachtungen mit den zu der Zeit jüngst erschienen Publikationen zu Analogexperimenten der Salztektonik in Randbedingungen der extensionalen „thin skinned tectonics“ (z.B. VENDEVILLE und JACKSON, 1992a, 1992b) und prägte erstmals den Begriff der Floßtektonik im deutschsprachigen Raum in Anlehnung an ähnliche Beobachtungen von DUVAL et al. (1992) am afrikanischen Kontinentalhang.

In Abbildung 3.3 wird die Keuper-zeitliche Trennung der Deckgebirgsschichten durch die Mächtigkeitszunahme des Keupers in Richtung Salzstruktur besonders deutlich. Die NE-Rand-Störungszone stellt den oberen Teil der Gleitfläche dar, entlang welcher das mesozoische Schichtpaket der Lappwald-Scholle gravitativ in Richtung Südwesten abglitt und das erste Einströmen von Zechsteinsalz in den Strukturbereich ermöglichte (BEST, 1996). Im Zuge der oberkretazischen Inversionstektonik kam es im Subsalinar durch kompressive Beanspruchung zu keilartigen Auspressungen entlang vormals als Abschiebung fungierender Störungsbahnen („positive flower structure“, Abbildung 3.3). Nach BEST (1996) kam es durch die Einengung zu einem erneuten Salzzufluss des bis dato unter der Lappwald-Scholle verbliebenen Zechsteinsalzes und, entsprechend einem weiteren Salzaufstieg in der Struktur, möglicherweise sogar zu einem Oberflächenausritt und massiven Salzverlusten. Im Vergleich des noch vorhandenen Salzvolumens mit der hypothetischen Primärmächtigkeit gehen BEST und ZIRNGAST (2002) davon aus, dass fast drei Viertel des mobilen Salzes im Bereich Morsleben gelöst wurde bzw. der bis heute andauernden Subrosion zum Opfer fiel.

Das Entstehungsmodell der Floßtektonik nach BEST (1996) und der Strukturentwicklung nach BEST und ZIRNGAST (2002) steht grundsätzlich im Einklang mit den bekannten regionaltektonischen Deformationsphasen, die in Abbildung 3.4 dargestellt sind. Demnach fand eine ausgeprägte Extensionsphase von der späten Trias bis zur frühen Kreide in ganz Norddeutschland statt (KOCKEL, 2003; LOHR, 2007; SCHECK und BAYER, 1999; SCHECK-

WENDEROTH und LAMARCHE, 2005). WNW-ESE streichende Abschiebungen resultierten aus diesem Spannungsregime im niedersächsischen Becken (LOHR, 2007) und triggerten dort den Salzdiapirismus (MOHR et al., 2005).

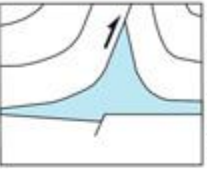
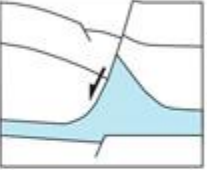
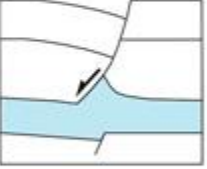
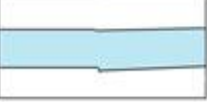
Känozoikum	Tertiär	Hauptspannung	Schematische Entwicklung der Diapirstrukturen
	Kreide	 NNE-SSW Kompression	 Inversion mit intensiver Strukturprägung, Salzaufpressung sowie Internfaltung und Überschiebung
Mesozoikum	Kreide	 NE-SW Extension	 Weiteste Trennung der Deckgebirgsschollen und Bildung von Randsenken
	Jura		 Trennung der Deckgebirgsschollen und Einstömen des Salzes
	Trias	 E-W Extension	 Primäre Mächtigkeitsunterschiede
Paläozoikum	Trias	 NNE-SSW Extension	
	Perm	 E-W Extension	
		 E-W Transtension	

Abbildung 3.4: Zeitliche Zuordnung der Hauptspannungsfelder und Entstehung der Salzstrukturen im Subherzynen Becken (modifiziert nach BRANDES et al., 2013; LOHR, 2007; KLEY et al., 2008 und SIPPEL et al., 2009).

Dies ist ebenso für das Subherzyne Becken und die Anlage der vorhandenen Diapire, der Allertalstruktur, der Bleienrode-Staßfurt-Struktur und des Quedlinburger Sattels anzunehmen. Die Entstehung der Salzkissen im Subherzynen Becken (z.B. Fallenstein und Huy) hingegen wird der kretazischen Inversion und dem Prozess einer entkoppelten Faltung des mesozoischen Deckgebirges (kompressionale „thin skinned tectonics“) zugerechnet (BRANDES et al., 2013; KLEY et al., 2008). Paläostress-Analysen durch BRANDES et al. (2013) anhand von Klüften, Störungen, Rutschungen und Stylolithen unterstützen diese Annahme. Sie konnten so feststellen, dass das Spannungsfeld im Bereich der Salzkissenstrukturen lokal teilweise stark gestört ist und die Spannungsvektoren um bis zu 90° vom regionalen Trend abweichen. Die kretazische Kompression führte also zur Überprägung, Internfaltung und Überschiebung der vorhandenen Salzstrukturen einerseits und zur Anlage von neuen Salzstrukturen zwischen den bis dato vorhandenen Diapiren andererseits.

3.3 Internbau der Salzstruktur

Erste Beschreibungen zum Internbau der Salzlagerstätte Oberes Allertal anhand von Grubenaufschlüssen fanden unter anderem durch BECK (1911) und KIRSCHMANN (1913) in den Gruben Walbeck und Burbach statt. BECK (1911) beschrieb ostvergente Sattelstrukturen, deren Scheitel teilweise fehlten. Er beobachtete boudinierte Anhydrit- und Tongesteine, welche selten auch plastische Deformation in Form von Biegungen und Quetschungen aufwiesen. Er interpretierte Störungen im Salzkörper und identifizierte ein abgequetschtes Kaliflöz Staßfurt fälschlicherweise als Kaliflöz der heutigen Leine-Folge. KIRSCHMANN (1913) fasste seine und die Beobachtungen von BECK wie folgt zusammen: „Die Innentektonik des Ekzems lässt alle Forschungen nach einer Regelmäßigkeit oder Gesetzmäßigkeit ergebnislos enden“ (S. 22).

Nach über 100 Jahren Bergbau im Oberen Allertal hat sich das Verständnis bezüglich des inneren Aufbaus vor allem auf Grund der höheren Aufschlussdichte etwas gewandelt. Intensive Untersuchungen und umfangreiche Beschreibungen fanden unter anderem zuletzt durch BEHLAU und MINGERZAHN (2001) im Bereich des ERAM und durch ZEIBIG und BECKER (2002) im Bereich des Steinsalzbergwerks Braunschweig-Lüneburg statt. Des Weiteren untersuchten HORN et al. (2016) in Braunschweig-Lüneburg diverse makroskopische Strukturen sowohl plastischer als auch spröder Deformation. BEST und ZIRNGAST (2002) folgerten aus den Ergebnissen ihres Strukturmodells und den Ergebnissen von BEHLAU und MINGERZAHN (2001), erstmals konkrete Zusammenhänge zwischen der tektonischen Entwicklung und dem Internbau der Struktur herstellen zu können.

Das heutige Erscheinungsbild der internen Deformationsstrukturen ist ein Produkt aus Fließfalten, bedingt durch den Salzaufstieg, und kompressive Faltung, dargestellt durch NW-SE bis NNW-SSE, also mehr oder weniger parallel zur Hauptstruktur, streichende Faltenachsen (BEST und ZIRNGAST, 2002). Die Sättel sind im Kern aus den Einheiten der Staßfurt-Folge, maßgeblich dem Staßfurt-Steinsalz (z2NA) und Kaliflöz Staßfurt (z2KSt), aufgebaut, während die Mulden aus den Einheiten der Leine-Folge (z3) und untergeordnet auch der Aller-Folge (z4) gebildet werden. Die Faltenachsen tauchen teilweise in Streichrichtung ab und setzen komplett aus. Darauf folgt häufig das leicht versetzte Einsetzen neuer Strukturelemente im Sinne einer En-échelon-Faltung. Dies ist vor allem im zentralen und östlichen Teil der Salzstruktur der Fall (BEHLAU und MINGERZAHN, 2001, BEST und ZIRNGAST, 2002). Der Baustil der Faltung ändert sich signifikant vom SW-Teil des Allertals in Richtung NE. Im SW-Teil stehen asymmetrische, NE-vergente, isoklinale Falten an, die generell sehr schmal und zum Teil stratigraphisch unvollständig sind. In Richtung NE-Teil stehen hingegen breitere und offene, meist steilstehende Faltenstrukturen einer geringeren Amplitude an, häufig durch breitere Mulden und etwas schmalere Sattelstrukturen gekennzeichnet (BEHLAU und MINGERZAHN, 2001; BALZER, 2007). Größere Hauptanhydrit-

Schollen sind gemeinsam mit dem liegendem Grauen Salzton (z3T, inklusive z3CA) vor allem an der Basis und den Schenkeln der Muldenstrukturen vorhanden. Sie sind in höheren Bereichen durch den Salzaufstieg meist zerbrochen und dort nur noch untergeordnet vorhanden, jedoch gemeinsam mit den anderen Hauptstrukturen bis in das Hutgestein, hier in Form von Lösungsrückständen, verfolgbar (BALZER, 2007). Grundsätzlich verhält sich der Hauptanhydrit während der Faltenbildung spröde und zerbricht in Blöcke. Je kleiner der Öffnungswinkel einer Falte ist, desto kleinere Hauptanhydrit-Fragmente sind zu beobachten (BEHLAU und MINGERZAHN, 2001). In den tieferen Bereichen sind die Hauptanhydrit-Schollen teilweise aneinander vorbei oder übereinander geschoben, wobei als Abscherhorizont das sehr mobile Kaliflöz Staßfurt fungierte. BEST und ZIRNGAST (2002) sehen in solchen Bereichen einen klaren Zusammenhang mit dem Verlauf von Störungen im Subsalinar. Besonders im östlichen Randbereich der Allertalstruktur ist der Hauptanhydrit in viele einzelne Fragmente zerbrochen, welche steil aufgerichtet oder teilweise auch dachziegelartig übereinander geschoben wurden. Auch nach BEHLAU und MINGERZAHN (2001) scheinen die subsalinaren Hauptstörungen einen sehr wichtigen Einfluss auf die salinare Faltenbildung gehabt zu haben. Im Bereich Bartensleben sind auf der Hochscholle im Nordwesten generell weniger Falten ausgebildet als auf der Tiefscholle im Südwesten. Die relative Nähe der Störung zum Südwestrand der Salzstruktur habe vermutlich zu sehr wenig Platz für den Salzaufstieg aus dem Bereich der Lappwaldscholle geführt, sodass es zur Ausbildung der engstehenden Isoklinalfalten kam und parallel ausreichend Platz für die Bildung von Großfalten auf der Hochscholle vorlag. Weiterhin sei der NE-Teil der Salzstruktur vom Salzzufluss isoliert gewesen, sodass die dortige Faltenbildung ausschließlich durch die kretazische Kompression beeinflusst war (BEHLAU und MINGERZAHN, 2001).

Eine ähnliche Untergliederung des Subsalinars wie in Morsleben liegt auch in Braunschweig-Lüneburg vor, jedoch mit einer Tiefscholle im NE-Teil und einer Hochscholle im SW-Teil, die bis zu 230 m vertikal zueinander versetzt sind (SCHACHL, 1991; ZEIBIG und BECKER, 2002). Der Versatz nimmt nach Südosten bis auf 50 m ab, sodass ZEIBIG und BECKER (2002) von einer Verkipfung der Hochscholle nach Südosten ausgehen. Sie sehen ähnlich wie auch BEHLAU und MINGERZAHN (2001) klare Zusammenhänge zwischen Deformationsmustern im Subsalinar, Salinar und Suprasalinar.

Als Einheit mit einem hohen rheologischen Kontrast zu den umgebenden Salzgesteinen hat der Hauptanhydrit eine spezielle Funktion für die tektonisch-halokinetische Entwicklung des Internbaus der Salzstruktur eingenommen. Von besonderer Bedeutung für die internen Deformationsstrukturen sind die Mächtigkeitsschwankungen des Hauptanhydrits von 30 m bis 50 m in Normalausbildung auf bis zu 90 m (Grasleben) bzw. über 120 m (Morsleben) in „Klippenfazies“. Diese Mächtigkeitsschwankungen können als wichtiger kontrollierender Faktor der internen Faltung und des heutigen strukturellen Inventars gesehen werden. So

waren das Durchspießen des Staßfurt-Steinsalzes und die Anlage von Sattelstrukturen sowie die Zergliederung in einzelne Bruchschollen an geringmächtige Bereiche des Hauptanhydrits gebunden (SCHACHL, 1991).

Den Begriff der Anhydritklippe prägte zuerst FULDA (1930), der abnorme Mächtigkeiten des Hauptanhydrits mit steil ausgebildeten Flanken im Raum Staßfurt beobachtete und als primäre Mächtigkeitsanomalien interpretierte. Seither gibt es viele Theorien und Überlegungen zur Entstehung dieser Strukturen. Bis heute ist die Genese umstritten, vor allem, da keine Gesetzmäßigkeiten bei der Verbreitung, beispielsweise äquidistante Abstände, erkennbar sind (KAMLOT, 2009). Einen schematischen Überblick über Anhydritklippenstrukturen liefert Abbildung 3.5 in Anlehnung an die Beobachtungen von HEMMANN (1968) in Bernburg und SCHACHL (1991) in Braunschweig-Lüneburg.

Vertreter einer primären Entstehung durch lokale Unterschiede der Ausfällungsbedingungen sind außer FULDA (1930) unter anderem auch BORCHERT und BAIER (1953), BÄUERLE et al. (2000), BEHLAU und MINGERZAHN (2001) sowie BORNEMANN et al. (2008). Ihre Hauptargumente dafür sehen sie in dem Vorhandensein von Pseudomorphosen von Gips zu Anhydrit und sedimentären Strukturen wie beispielsweise Turbiditen und Brekzien an den Klippentops. Eine andere Vorstellung zur Genese der Anhydritklippen hatte RICHTER (1934), der eine rein tektonische Schichtdoppelung durch Überschiebungen bzw. Zerbrecen und Auseinanderdriften einzelner Schollen als Ursache für die Mächtigkeitsanomalien des

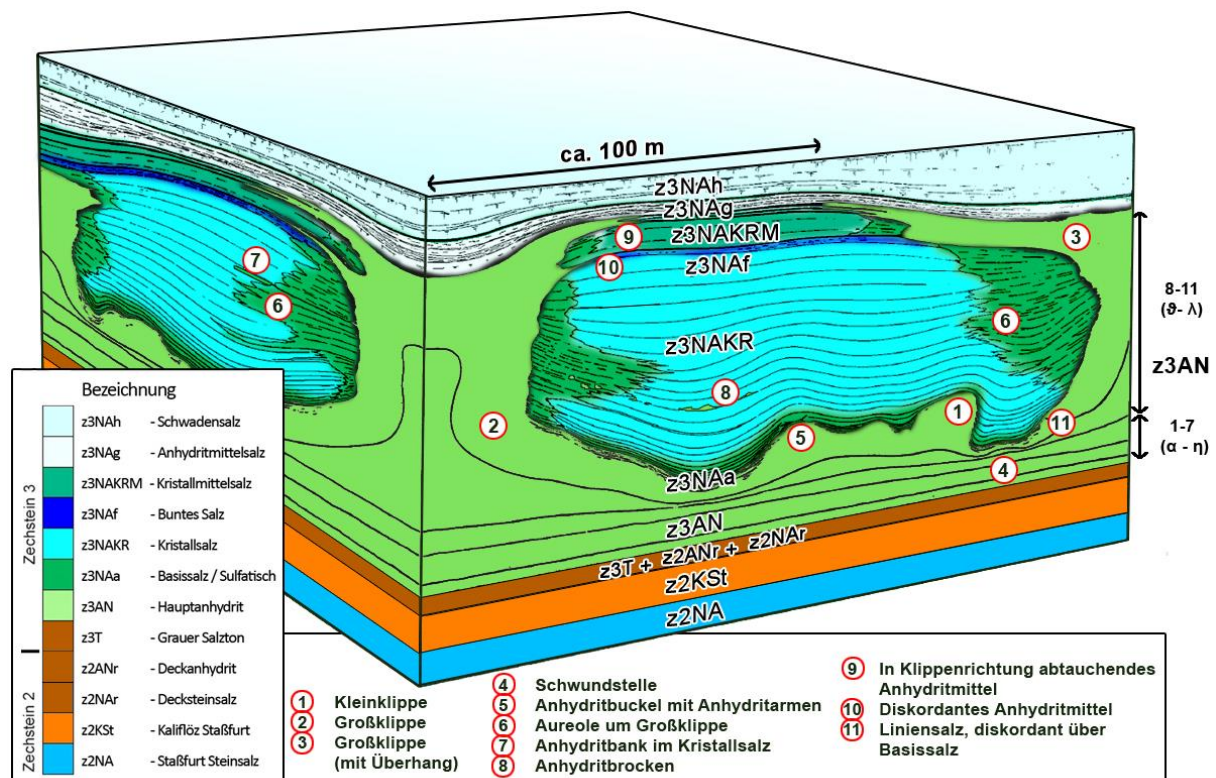


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung einer typischen Anhydritklippe nach Abschluss der Diagenese (modifiziert nach HEMMANN, 1968 und SCHACHL, 1991)

Hauptanhydrits sah. Diese Ansicht setzte sich für lange Zeit, bis in die 1970er Jahre, durch und wurde unter anderem auch von Lotze (1957) vertreten.

Mit einer umfangreichen Arbeit von HEMMANN (1968) änderte sich diese Ansicht hin zu einer eng an die Diagenese von Gips zu Anhydrit geknüpften Entstehungstheorie. Demnach sind die heutigen Strukturen als fröhdiagenetische Gipsdiapire zu betrachten, die durch die Auflast des im Sedimentationsprozess befindlichen Leine-Steinsalzes dieses diskordant durchstoßen haben. Diese Theorie entspricht auch den Vorstellungen von SCHACHL (1991) für die Entstehung der Strukturen in Braunschweig-Lüneburg und wurde von HORN et al. (2016), PAUL (2014) und WILLIAMS-STROUD und PAUL (1997) grundsätzlich dahingehend ergänzt, dass womöglich tektonische Impulse als Initial für den Gipsdiapirismus in Frage kommen und entsprechend auch eine mehrphasige Reaktivierung möglich ist. PAUL (2014) geht davon aus, dass Gipsdiapirismus nicht nur im Gebiet rund um den Harz, sondern im ganzen Zechsteinbecken stattgefunden hat, bisher jedoch nur an Zechsteinausstrichen und Aufschlüssen in Bergwerken beobachtet werden konnte. Tatsächlich wurden mittlerweile in Offshore-3D-Seismik-Auswertungen in den westlichen Niederlanden enorme Mächtigkeitsanomalien des kompetenten Schichtpakets Hauptanhydrit (z3AN), Plattendolomit (z3CA) und Grauer Salzton (z3T) identifiziert (VAN GENT et al., 2011; STROZYK et al., 2012; 2014). VAN GENT et al. (2011) deuteten diese Strukturen jedoch nicht als Gipsdiapire, sondern stellten eine weitere Entstehungstheorie vor. Diese beschreibt den Prozess einer synsedimentären Subrosion der liegenden z2-Salze und die Entstehung von einer Art Karsthohlräumen. Als diese kollabierten, sei es zum Abbruch und Abrutschen des hangenden Schichtpakets und entsprechend zu den enormen Mächtigkeitsanomalien gekommen. Untersuchungen im Umkreis einer kleinen Anhydritklippe und eines von einer Klippe ausgehenden Anhydritarms von HORN et al. (2016) im Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg deuten jedoch stark auf einen diapirartigen Aufstieg eines unverfestigten, sich plastisch verformenden Gipskristallisates hin.

3.4 Stratigraphie und Lithologie

Entsprechend der Zechsteingliederung nach RICHTER-BERNBURG (1953) und der Ergänzung zu insgesamt sieben Zyklen sowie der Zuordnung des Bröckelschiefers als siebte Zechstein-Folge nach KÄDING (2000) ist die stratigraphische Abfolge und deren Normalmächtigkeit im Untersuchungsgebiet (Grasleben) im Vergleich mit der Normalmächtigkeit im Bereich von Morsleben in Tabelle 3.1 dargestellt. Die grundsätzlich sehr ähnlichen Beobachtungen suggerieren eine gute Vergleichbarkeit und erlauben die Adaption von Erkenntnissen der jeweiligen Lokation, welche geographisch direkt aneinander anschließen (Abbildung 4.1). Auch die feinstratigraphische Betrachtung der jeweils aufgeschlossenen Zechstein-Folgen 1 bis 4 spiegelt diese gute Vergleichbarkeit wider (Tabelle 3.2). Der Basalanhydrit der Staßfurt-Folge stellt die kompetente Salzbasis dar (z2AN). Es folgt ein Salzkörper von bis zu 400 m Mächtigkeit, zum größten Teil aus Steinsalz bestehend, bis hin zum Salzspiegel (Oberfläche des Salzkörpers). Die jüngsten in manchen Bereichen aufgeschlossenen stratigraphischen Einheiten sind die der Aller-Folge (z4). In dem Steinsalzkörper, sind Tone (z3T, z4T), Karbonate (z3CA, hier unter z3T zusammengefasst), Sulfate (z3AN, z4AN) und nicht zuletzt das Kaliflöz Staßfurt (z2KSt) eingebettet. Die Lithologie und makroskopische Besonderheiten der gesamten Zechstein-Formation sind in Tabelle 3.2 aufgeführt. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt nur für die wichtigsten strukturbildenden bzw. bergbaurelevanten stratigraphischen Einheiten: Staßfurt-Steinsalz (z2NA), Kaliflöz Staßfurt (z2KSt), Hauptanhydrit (z3AN), Kristallsalz (z3NAKR) und Schwadensalz (z3NAh).

Tabelle 3.1: Normalprofil der geologischen Einheiten im Bereich der Allertalzone in Grasleben* (nach ZEIBIG und BECKER, 2002) und Morsleben** (nach BEST und ZIRNGAST, 2002; LOTSCH, 1998 und ALBRECHT und BURCHARDT, 1998).

Ära	Periode	Gruppe	Subgruppe	Formation	Symbol	Normalmächtigkeit	
						Grasleben* [m]	Morsleben** [m]
Känozoikum	Quartär	Holozän			q	< 100	> 90
		Pleistozän					
	Tertiär	Pliozän			t	< 100	~ 20
		Miozän					
		Oligozän					
		Eozän					
		Paläozän					
Mesozoikum	Kreide	Oberkreide			kr	< 400	~ 270
		Unterkreide					
	Jura	Oberer Jura			jo	< 300	20 - 400
		Mittlerer Jura			jm	< 380	300 - 400
		Unterer Jura			ju	< 280	400 - 500
	Trias	Keuper	Oberer Keuper		ko	< 260	~ 260
			Mittlerer Keuper		km	< 430	~ 410
			Unterer Keuper		ku	< 60	~ 55
		Muschelkalk	Oberer Muschelkalk		mo	< 80	~ 65
			Mittlerer Muschelkalk		mm	< 110	~ 65
			Unterer Muschelkalk		mu	< 100	~ 100
		Buntsandstein	Oberer Buntsandstein		so	< 210	~ 140
			Mittlerer Buntsandstein		sm	< 160	~ 130
			Unterer Buntsandstein		su	< 340	~ 290
Paläozoikum	Perm	Zechstein	Ohre- bis Friesland-Folge		z5-z7		30 - 50
			Aller-Folge		z4	< 40	40 - 80
			Leine-Folge		z3	< 100	150 - 200
			Staßfurt-Folge		z2	< 220	300 - 400
			Werra-Folge		z1	< 60	50 - 60
		Rotliegend			r	> 10	

Tabelle 3.2: Normalprofil und Lithologie des Zechstein im Bereich der Allertalzone in Grasleben* (nach ZEIBIG und BECKER, 2002) und Morsleben** (nach BEHLAU und MINGERZAHN, 2001).

Subgruppe	Formation	Symbol	Normalmächtigkeit		lithologische Kurzbeschreibung
			Grasleben* [m]	Morsleben** [m]	
Zechstein 4 Aller-Folge	Schneesalz	z4NAb	> 10	> 1	Steinsalz mit hellgrauen, anhydritischen Linien
	Basisasalz	z4NAa	< 1	1 bis 2	Steinsalz mit vier grauen Anhydritbändern, kieseritführend an Ober- und Unterkante
	Pegmatitanhydrit	z4AN	< 1	0,5 bis 1	Anhydrit
	Roter Salzton	z4T	< 8	0,5 bis 4	Tonstein
Zechstein 3 Leine-Folge	Tonmittelsalz	z3NAT	< 8	2,7 bis 7,4	Steinsalz mit zunehmendem Tongehalt zum Hangenden; drei 0,2 m mächtige Tonmittelbänder ausgebildet
	Schwadensalz	z3NAh	< 20	5,2 bis 18,7	Steinsalz mit anhydritischen Flocken und Schmitzen; teilweise mit Tonanteilen bis zu 20 % und unreinen Abschnitten
	Anhydritmittelsalz	z3NAg	< 15	5,2 bis 31,2	Steinsalz mit vier charakteristischen Anhydritmitteln unterschiedlicher Mächtigkeit und Ausprägung
	Kristallmittelsalz	z3NAKRM	< 8		Steinsalz, teilw. mit unregelmäßig verteilten sulfatischen Fläsern
	Buntes Salz	z3NAf	< 2	0 bis 2	Steinsalz mit bis zu 15 hellgrauen anhydritischen Linien; Übergang zu z3NAKR fließend (aufhellend)
	Kristallsalz	z3NAKR	< 30	15 bis 49	Steinsalz, selten große Anhydrit-Einsprenglinge; NaCl-Gehalt bis 99,9 %
	Basissalz	z3NAa	< 2	0,2 bis 1,5	Steinsalz häufig mit anhydritischer Linierung; ohne Linien: sulf. Leine-Steinsalz
	Hauptanhydrit	z3AN	< 50 (90)	30 bis 50	Anhydrit mit 13 stratigraphischen Zonen (A3α bis A3C) unterschiedlicher Mächtigkeit und Ausbildung
	Grauer Salzton	z3T	< 4	2,3 bis 3	Tonstein, dreiteilbar: Magnesitmergelstein (oben, auch z3CA genannt), mürber Ton (Mitte), fester Tonstein (unten)
Zechstein 2 Staßfurt-Folge	Deckanhydrit	z2ANr	< 2	1,8 bis 2,2	Anhydrit, gebändert
	Decksteinsalz	z2NAr	< 1	~ 2	Steinsalz, meist ohne Linierung
	Kaliflöz Staßfurt	z2KSt	< 4 (16)	0,1 bis 3	meist Trümmernallit mit unregelmäßig verteilten halitischen Bruchstücken
	Staßfurt-Steinsalz	z2NA	< 200	100 bis 200	Steinsalz mit teilweise unregelmäßig verteilten dunkel- bis schwarzgrauen Anhydritflocken, selten mit Linierung
	Basalanhydrit	z2AN	< 2	2 bis 3	Anhydrit, dreiteilbar: Linienbündel (oben), geflasert (Mitte), fein liniert (unten)
	Stinkschiefer	z2CA	< 7	2,5 bis 3,5	bituminöser Mergel, fein geschichtet
Zechstein 1 Werra-Folge	Werra-Anhydrit	z1AN	< 38	~ 45	Anhydrit, kompakt ausgebildet
	Zechsteinkalk	z1CA	< 18	5 bis 10	
	Kupferschiefer	z1T	< 0,3	0,05 bis 30	
	Zechsteinkonglomerat	z1KG	< 1		

3.4.1 Staßfurt-Steinsalz (z2NA)

Das Staßfurt-Steinsalz kann in Normalausbildung bis zu 200 m mächtig sein. Es handelt sich um ein meist mittelkristallin ausgebildetes, mittel- bis weißgraues Steinsalz. Das Erscheinungsbild ist durch unregelmäßig verteilte schwarzgraue Anhydritflocken gekennzeichnet. Teilweise lassen diese Anhydritanreicherungen noch eine ursprüngliche Linierung erahnen. Feinstratigraphisch lässt sich das Staßfurt-Steinsalz dreiteilen in einen bis zu 3 m mächtigen Bereich im Liegenden (Basissalz, z2NAa), das ca. 200 m mächtige Hauptsalz (z2NAb) und die in Richtung Kaliflöz Staßfurt einsetzenden, 1 bis 3 m mächtigen Kieseritischen Übergangsschichten (z2NAKI) (ZEIBIG und BECKER, 2002).

3.4.2 Kaliflöz Staßfurt (z2KSt)

Die Basis des Flözes ist in der Regel ein etwa 0,2 m mächtiger Hartsalzfuß (Halit, Sylvinit und Kieserit), welcher graumeliert erscheint und von kieseritischen Flocken durchsetzt ist. Im Hangenden ist meist ein hellgrauer, teilweise auch leicht rötlicher Trümmercarnallit mit einer Normalmächtigkeit von bis zu 4 m ausgebildet. In der carnallitischen Matrix schwimmen Trümmer in Form von Steinsalzbruchstücken ehemaliger Leitbänke (ZEIBIG und BECKER, 2002). Diese Ausbildung beschränkt sich im Untersuchungsgebiet jedoch nur auf tiefere Sohlen. Die meisten Aufschlüsse sind hier durch ein etwa 1 m mächtiges Hartsalz gekennzeichnet, welches milchig-weißen, teilweise auch roten Sylvinit in einer halitisch-kieseritischen Matrix führt (HORN et al., 2016). In Morsleben wurde tendenziell im Osten eine carnallitische Fazies und im Westen eine Hartsalzausbildung beobachtet, wobei diese Faziestypen lateral und vertikal ineinander übergehen oder Mischformen bilden können (STORK, 1998).

3.4.3 Hauptanhydrit (z3AN)

Der Hauptanhydrit ist in Normalausbildung zwischen 30 m und 50 m mächtig. Es handelt sich um einen meist gräulich erscheinenden, massigen, grobkristallinen Anhydrit. Eingelagerte graubraune, karbonatische und tonige Gemengeteile resultieren in einer Vielzahl unterschiedlicher Texturtypen. Diese lamellenartigen, flaserigen und schlierigen Textur-Zonen ermöglichen eine lithostratigraphische Feingliederung in sieben (z.B. HEMMANN, 1968) bzw. 13 (KOSMAHL, 1969) Einheiten im östlichen Teil des Subherzynen Beckens (BALZER, 2007). Die Gliederung von KOSMAHL (1969) wurde unter anderem in Braunschweig-Lüneburg vorgenommen, lässt sich jedoch in manchen Bereichen der Lagerstätte nicht oder nur teilweise anwenden (ZEIBIG und BECKER, 2002). Dies liegt nicht zuletzt auch an der in einigen Bereichen vorhandenen anomalen Ausbildung in Form von sogenannten Anhydritklippen, die teilweise bis zu 90 m mächtig sind (SCHACHL, 1991).

Die Zonen 1 bis 7 sind dunkel- bis schwarzgrau gefärbt und weisen einen hohen Magnesitanteil, teilweise in größeren Aggregaten und Anreicherungen, auf. Die Zonen 8 bis

11 sind eher hellgrau gefärbt und können im Vergleich zu den Zonen 1 bis 7 enorme Mächtigkeitsunterschiede aufweisen (STORK, 1998). Der Karbonatgehalt, vor allem in Form von Magnesit, nimmt zum Hangenden ab, während die Führung von Steinsalz, Carnallit und Sylvinit zunimmt (BALZER, 2007). Diese liegen meist als Kluftfüllung vor (ZEIBIG und BECKER, 2002). In den Zonen 8 bis 11 sind häufig Carnalliteinsprenglinge zu beobachten, die durch spätere Herauslösung Poren hinterlassen (STORK, 1998). Den Hangendabschluss des Hauptanhydrits bildet das bis zu 5 cm mächtige Schwarze Tonbänkchen (Zone 12), ein schwarzgrauer, Anhydrit führender Tonstein, und die bis zu 1 m mächtige Anhydrit-Kammschale (Zone 13), häufig als dunkelgrauer Linienanhydrit ausgebildet (ZEIBIG und BECKER, 2002). Im Bereich der Anhydritklippen fehlen diese zwei Zonen jedoch häufig. Hier kann das dritte Anhydritmittel des Anhydritmittelsalzes (z3NAg) unter Umständen direkt auf dem Hauptanhydrit auflagern. Die Trennfuge besteht in diesem Fall aus einem mit Carnallit besetzten Tonstein. Der Großteil der Normalabfolge der Leine-Folge (Basissalz, Kristallsalz, Buntessalz, Kristallsalzmittel, sowie das Anhydritmittelsalz bis zum dritten Anhydritmittel) fehlt in einem solchen Fall (STORK, 1998). Das in Normallagerung auflagernde Basissalz ist rötlich bis grauorange, mittelkristallin und weist eine anhydritische Linierung auf. Häufig ist eine Linierung jedoch nicht mehr zu erkennen, sodass eine Ansprache als sulfatisches Leine-Salz (z3NAKL) erfolgt. Dieses ist meist im Bereich von Anhydritklippen der Fall, sodass es auch als Leine-Klippensalz bezeichnet wird (ZEIBIG und BECKER, 2002).

3.4.4 Kristallsalz (z3NAKR)

Kristallsalz ist ein Begriff, der sich für das gesamte abbauwürdige Leine-Steinsalz durchgesetzt hat (SCHACHL, 1991). Eigentlich umfasst das Kristallsalz mehrere stratigraphische Einheiten, die aufgrund ihrer Reinheit Gegenstand des Bergbaus sind. Diese sind das Liniensalz (z3NAb in Grasleben, z3LS in Morsleben) im Liegenden und das eigentliche Kristallsalz (z3NAKR) im Hangenden, das in Morsleben weiter als Orangesalz (z3OS) und Teile des Bändersalzes (z3BD) untergliedert wird. Das Bändersalz entspricht in Grasleben zum größten Teil dem Kristallmittelsalz (z3NAKRM) und ist in der Regel ca. 30 m mächtig, kann aber in Teilbereichen auch über 50 m Mächtigkeit aufweisen (STORK, 1998; ZEIBIG und BECKER, 2002).

Vor allem Korngrößen mit teilweise über 20 cm Durchmesser zeichnen das Kristallsalz aus. Generell ist es mittelkristallin bis grobspätig ausgebildet und erscheint durch seine hohe Reinheit von häufig über 99,0 % NaCl meist farblos klar. Eine blassgraue zarte Linierung in Form von bis zu 5 cm breiten Anhydritrübelineien mit diffusem Saum im Abstand von 3 cm bis 50 cm kennzeichnet das obere Kristallsalz. Das untere Kristallsalz hat mit 1 mm bis 4 mm mächtigen Anhydritlinien im Abstand von 5 cm bis 10 cm mit scharf ausgebildeten Grenzen eine markantere Linierung (SCHACHL, 1991; STORK, 1998; ZEIBIG und BECKER, 2002).

Generell liegt diese Linierung parallel zur Schichtung. Auf Grund der grobspätigen Ausbildung sind die Linien jedoch häufig nicht verfolgbar. Entsprechend haben sich Versuche der feinstratigraphischen Gliederung und Nutzung der Linierung als Leitlinien in der Praxis als nicht durchführbar erwiesen (ZEIBIG und BECKER, 2002). Selten sind auch Anhydritbänke, -arme und -brocken, meist im Dezimeter- bis Meterbereich, innerhalb des Kristallsalzes zu beobachten, die stets konkordant in die Linierung eingebettet sind und meist von einem grauen Saum umgeben sind (SCHACHL, 1991; ZEIBIG und BECKER, 2002).

Der farbliche Übergang zu dem hangenden Bunten Salz (z3NAf) ist fließend. Dieses ist meist gräulich, selten rötlich und durchzogen von unregelmäßigen, aber markanten Anhydritbändern und schließt mit einer 20 cm mächtigen dreigliedrigen Anhydritbank ab (SCHACHL, 1991; ZEIBIG und BECKER, 2002).

3.4.5 Schwadensalz (z3NAf)

Das Schwadensalz (z3NAf) liegt direkt auf dem obersten Anhydritmittel des Anhydritmittelsalzes (z3NAg) auf. Es ist in Normalausbildung etwa 15 m (Morsleben) bis 20 m (Grasleben) mächtig. Es handelt sich um eine Wechsellagerung von hell orangefarbenen, mittel- bis grobkörnigen Reinsalzzonen mit sogenannten Schwadenzonen, Bereiche in denen das Steinsalz eine orangene bis rotbraune Farbe aufweist und schwadenartig von anhydritischen Flocken und Schmitzen durchsetzt ist. Vereinzelt sind auch bräunliche Tonflocken zu beobachten, die in den oberen Schwadenzonen bis zu 20 % ausmachen können. Beginnend mit einer Reinsalzzone sind insgesamt zehn Zonen feinstratigraphisch zu untergliedern. Diese aus dem hannoverschen Raum stammende Untergliederung lässt sich jedoch nur sehr selten im Oberen Allertalgraben erkennen. Der Übergang zum hangenden Tonmittelsalz (z3NAT) ist fließend und vor allem durch eine Zunahme des Tongehalts im Salz gekennzeichnet (STORK, 1998; ZEIBIG und BECKER, 2002).

3.5 Schlussfolgerungen

Die Intensivierung der Untersuchungen der Salzstruktur im Zuge der Errichtung des ERAM Ende des letzten Jahrhunderts hat die bereits fast 100 Jahre alte Diskussion bezüglich der Genese der Salzstruktur und dessen Internbau nicht vollständig beenden können. Seismische Untersuchungen brachten neue Erkenntnisse über die Anlage der Salzstruktur und dessen zeitliche Einordnung. Wie und in welcher Reihenfolge die internen Faltungen jedoch genau vonstatten gingen und welche Rolle dabei die Mächtigkeitsanomalien des Hauptanhydrits spielten, wird weiterhin diskutiert.

4 Das Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg

4.1 Gerechtsame

Das Steinsalzwerk Braunschweig-Lüneburg ist eines von drei in Deutschland produzierenden Steinsalzbergwerk der european salt company GmbH & Co. KG (esco), einer Tochtergesellschaft der K+S Aktiengesellschaft. Das Werk erschließt die Salzlagerstätte Oberes Allertal in Grasleben, rund 50 km östlich von Braunschweig (Abbildung 4.1). Die Schächte Grasleben 1 und 2 wurden bereits in den Jahren 1910 bis 1914 abgeteuft. Die Lagerstätte des heutigen Steinsalzbergwerkes wurde ursprünglich zur Förderung von Kalisalz aus dem Kaliflöz Staßfurt (z2KSt) erschlossen. 1922 erließ das

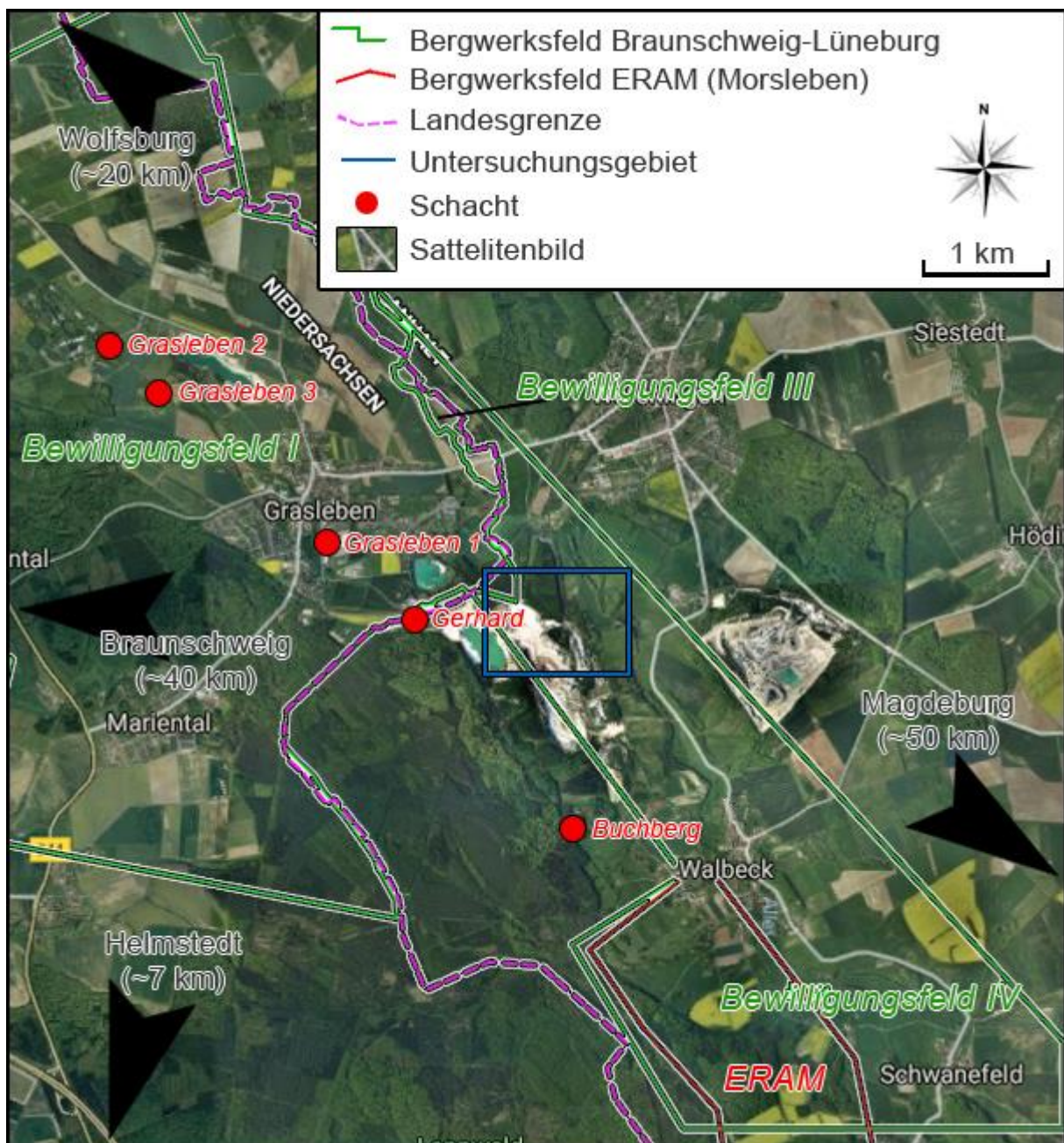


Abbildung 4.1: Übersichtskarte des Steinsalzbergwerks Braunschweig-Lüneburg, die jeweiligen Bewilligungsfelder und das Untersuchungsgebiet (modifiziert nach ZEIBIG und BECKER, 2002)

Deutsches Kalisyndikat eine Stilllegungsverordnung zur Vermeidung einer Überproduktion, die auf Grund der relativ schlechten Qualität des gewonnenen Kalirohsalzes zu einer Schließung des Werkes geführt hätte. Das Vorhandensein des Kristallsalzes (z3NAKR) führte kurz vor der drohenden Schließung zu einer Umstellung der Produktion auf Steinsalz und somit zum Fortbestand des Betriebes. Das unmittelbar südlich anschließende Kalibergwerk Walbeck-Buchberg hingegen wurde 1925 im Zuge der Stilllegungsverordnung geschlossen. Die zwei Schächte (Gerhard und Buchberg) wurden vorerst offen gehalten und dienten der deutschen Rüstungsproduktion vor und während des Zweiten Weltkrieges. Im Rahmen der Verlegung der Rüstungsproduktion nach unter Tage wurde in Grasleben von 1937 bis 1938 ein dritter Schacht abgeteuft. Während die Produktion von Steinsalz nach dem Zweiten Weltkrieg in Grasleben (englische Besatzungszone) weiterlief, wurden die zwei Schächte des angrenzenden Kalibergwerks Walbeck-Buchberg (ehemalige sowjetische Besatzungszone) im Jahr 1946 gesprengt. Dies führte zu einer unkontrollierten Flutung des Grubengebäudes Walbeck Buchberg. Auf Grund der unmittelbaren Nähe der untertägigen Grubenbaue wurde der ursprünglich auf 100 m festgelegte Sicherheitspfeiler zwischen den beiden Grubenbauen entsprechend auf 150 m, in Teilbereichen sogar bis auf 300 m erhöht.

Seither werden umfangreiche Überwachungsmaßnahmen durchgeführt, um einen Übertritt in das Grubengebäude Braunschweig-Lüneburg zu verhindern. Diese Maßnahmen beinhalten unter anderem regelmäßige Laugenstandsmessungen im Schacht Buchberg durch das Landesamt für Geologie und Bergwesen (Sachsen-Anhalt). Außerdem findet eine regelmäßige Begutachtung und Wartung von installierten Wasserwarneinrichtungen im Bereich besonders geringer Sicherheitspfeiler auf mehreren Sohlen des Bergwerks statt (EHRHARDT, 1997; esco, 2012; ZEIBIG und BECKER, 2002).

4.2 Die Steinsalzlagerstätte Braunschweig-Lüneburg

Das im Abbau befindliche Kristallsalz liegt zumeist dem zum Teil sehr unregelmäßig gestalteten Hauptanhydrit innerhalb schmaler und breiter Muldenstrukturen auf. Auf höheren Sohlenniveaus fehlt häufig das Schichtpaket von Decksteinsalz (z2NAr) bis Hauptanhydrit (z3AN), sodass das Kristallsalz schichtparallel zum Kaliflöz Staßfurt (z2KSt) rund um die Sattelstrukturen des Staßfurt-Steinsalzes (z2NA) ansteht (Abbildung 4.2). Im zentralen Bereich der Salzstruktur ist eine mächtige, ostvergente Sattelstruktur ausgebildet, durch welche die Lagerstätte in zwei Bereiche getrennt wird, nämlich einen von Isoklinalfalten geprägten Bereich in Schachtnähe im Südwesten und einen Bereich breiterer, offen stehender Falten im Bereich der Tiefebene im Nordosten. Weiter Richtung Osten steht eine zum Rand der Salzstruktur parallel verlaufende westvergente Sattelstruktur an. Die Gewinnung erfolgt in ca. 400 m bis 600 m Teufe, wobei das Kristallsalz entsprechend dem

strukturellen Bild auf tieferen Sohlenniveaus meist eher flach bis halbsteil und auf höheren Sohlenniveaus eher steil stehend vorliegt.

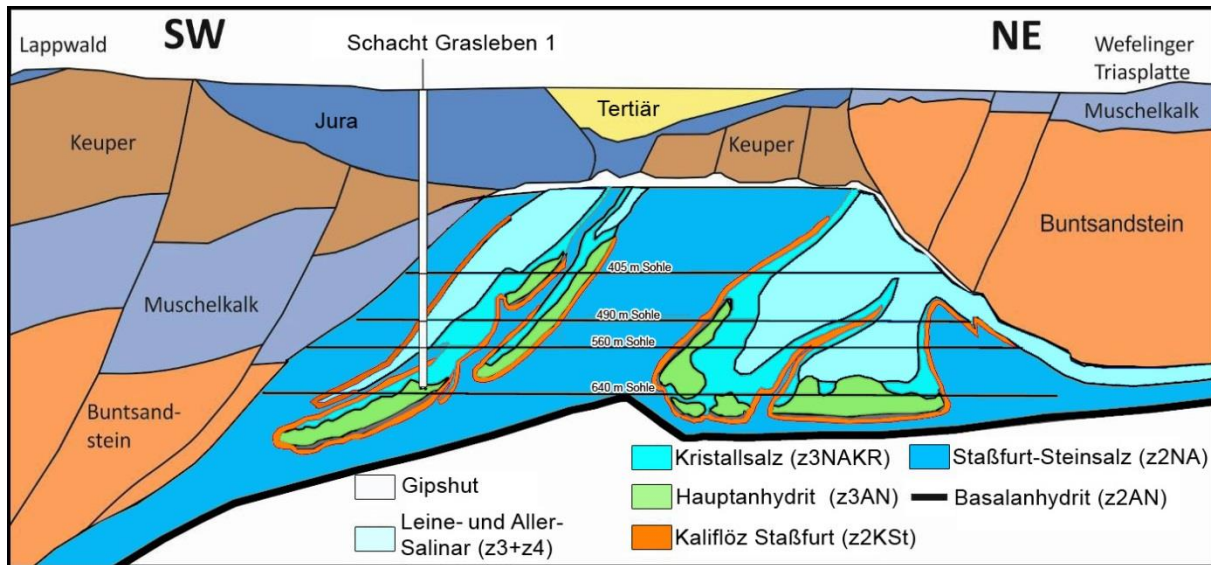


Abbildung 4.2: Schematischer Schnitt durch die Kali- und Steinsalzlagerstätte Braunschweig-Lüneburg in der Allertalzone (modifiziert nach ZEIBIG und BECKER, 2002)

4.3 Abbauverfahren

In Braunschweig-Lüneburg kommt ein Kammerbau mit strossenartigem Verhieb zum Einsatz, gut geeignet um die halbsteil- bis steilstehenden Lagerstättenbereiche durch mehrere übereinanderliegende Abbaukammern zu erschließen. Die Kammern werden je nach Lagermächtigkeit streichend oder querschlägig ausgerichtet. Der querschlägige Kammerbau ist schematisch mit maximalen Kammerabmessungen in Abbildung 4.3 dargestellt. Sowohl für den streichenden als auch für den querschlägigen Abbau ist aus Gründen der Standsicherheit die Dimensionierung der Kammern auf eine maximale Grundfläche von 2500 m² begrenzt. Des Weiteren existiert die Vorgabe, dass querschlägige Kammern nicht breiter als 30 m entlang der Streichrichtung sein sollten. Sind sie nicht breiter als 20 m resultiert eine Feste von 10 m (jede dritte 12 m). Bei einer Breite zwischen 21 m und 30 m werden zwischen zwei Kammern 12 m breite Festen (jede dritte 15 m) stehengelassen. Im streichenden Abbau hingegen bleiben pauschal 10 m breite Festen zwischen den Kammern stehen (esco, 2012).

Im Normalfall werden drei Teilsohlen durch Strossen zu maximal 42 m hohen Kammern verbunden. Zum Einsatz kommen hier luftgespülte Strossenbohrwagen, die über ein Nachsetzgestänge verfügen. Zuvor wird mittels Großbohrloch ein Initialhohlraum zwischen den Teilsohlen geschaffen. Es folgt die Hereingewinnung vom Kopfende der Kammer im rückwärtigen Verhieb, begonnen mit der Strosse zwischen den beiden unteren Teilsohlen.

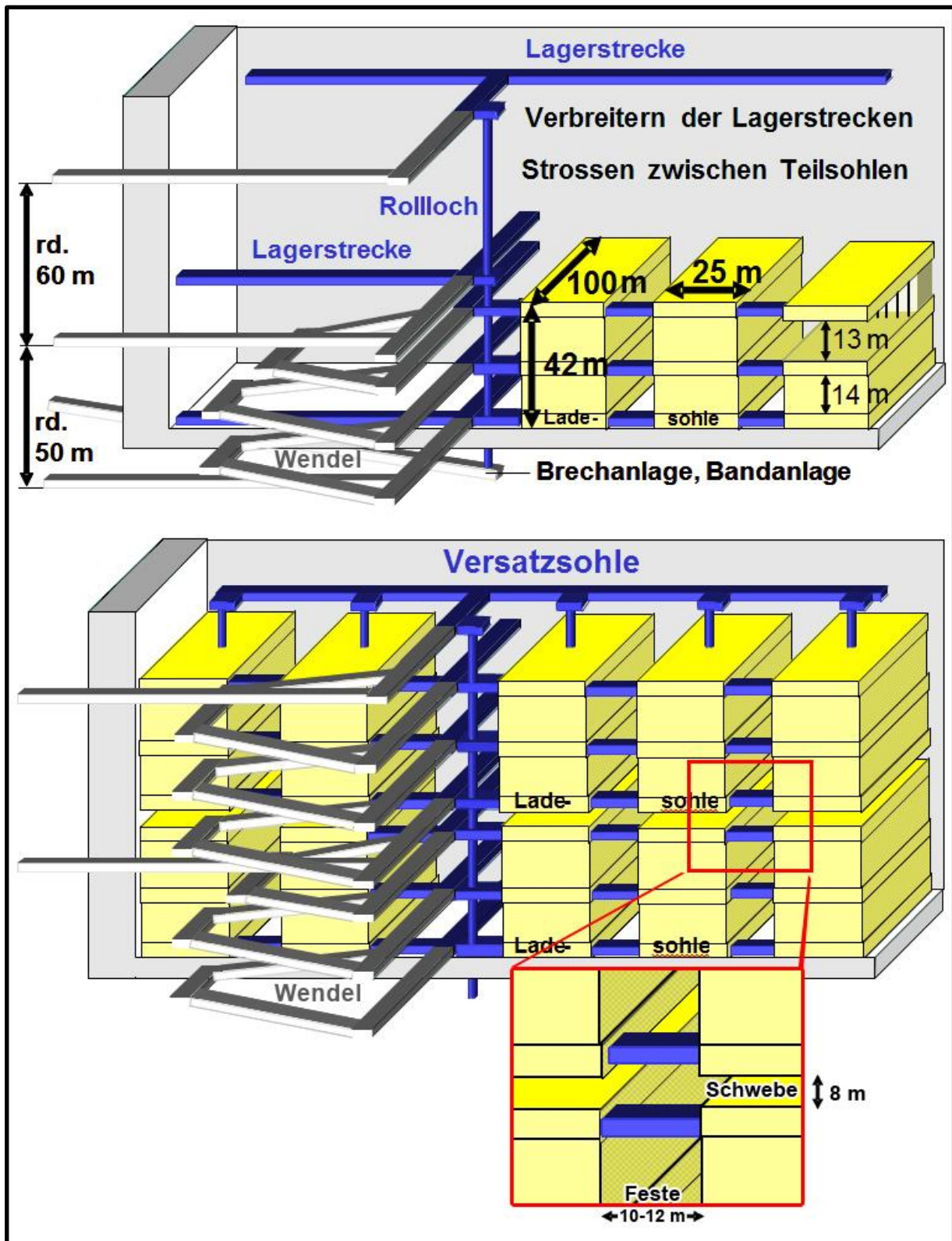


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des angewendeten Abbauverfahrens (modifiziert nach esco, 2012)

Über oder unter solch einer Kammer kann, durch eine 8 m mächtige Schweben getrennt, die nächste Kammer folgen. Daraus ergibt sich ein Teilsohlenabstand von 13 m zwischen der oberen Teilsohle einer Kammer und der Ladesohle einer darüber liegenden Kammer. Die Teilsohlen, zwischen denen die 13 m bis 14 m hohen Strossen stehen, haben entsprechend einen vertikalen Abstand von 18 m bzw. 19 m (esco, 2012). Dieser relativ geringe vertikale

Abstand der Teilsohlen ermöglicht eine gute Anpassung an die teilweise stark durch Änderungen des Einfallens oder der Mächtigkeit variierenden Lagergrenzen. Die resultierende variable Kammergröße und lokale Anpassung an die variierende Lagergrenze lassen die Grubenbaue teilweise eher wie das Produkt eines Weitungsbaus erscheinen. Dennoch lässt sich das angewendete Abbauverfahren nach REUTHER (1989) ganz klar als Kammerbau benennen, da die Kammerfirste jeweils gesichert ist und die Kammer zum Gewinnen und Laden betreten wird.

Neben dem bereits erwähnten Sicherheitspfeiler zur gefluteten Grube Walbeck-Buchberg sind des weiteren Sicherheitspfeiler zur Salzbasis (50 m), zum Salzrand (100 m) und zum Salzspiegel (150 m) einzuhalten. Weiterhin ist nach einer internen Dienstanweisung in Bereichen einer hohen Klufthäufigkeit im Hauptanhydrit und einer damit erhöhten Gefahr von Gas- und Lösungszutritten, in Abbauen eine 10 m starke Anbaubank zu diesem einzuhalten (ZEIBIG und BECKER, 2002).

Streckenauffahrungen im Rahmen der Aus- und Vorrichtung, die Erweiterung von Abbaustrecken, das Wölben der Kammerfirste und das Hereingewinnen der Strossen erfolgen konventionell im Bohr- und Sprengverfahren. Im Streckenvortrieb werden Abschlagslängen von sieben Metern erzielt. Zum Einsatz kommen hier unterschiedliche Bohrwagen im Drehbohrverfahren mit Luftwasserspülung. Der Streckenquerschnitt variiert zwischen 21 m² und 34 m² bzw. 6,4 m und 8 m Breite und 3,5 m und 4,5 m Höhe am höchsten Punkt der Firstwölbung. Generell findet kein Ausbau der Strecken statt. In besonderen Situationen, zum Beispiel bei der Durchörterung von Hauptanhydrit, Grauem Salzton oder des Kaliflözes Staßfurt in carnallitischer Ausbildung, werden Baustahlmatten in Verbindung mit Spreizhülsenankern und nach Bedarf auch Spritzbeton eingebracht. Ansonsten beschränkt sich die Sicherung der Firste und des Stoßes auf die maschinelle Beraubung (esco, 2012).

Das Haufwerk wird von Diesel-Fahrladern aufgenommen und über Rolllöcher auf die Ladesohle geschickt. Dort wird es über eine vorgeschaltete Brecheranlage, vorwiegend Walzenbrecher, teilweise mobile Backenbrecher, einem Förderband aufgegeben. Es folgt der Bandtransport bis zu einer Grobmahlanlage mit nachgeschalteter optischer Sortieranlage in Schachtnähe. Hier gelangt nach einer Siebung die grobe Kornfraktion (> 80 mm) zunächst auf eine Prallmühle und wird anschließend wieder der Siebung zugeführt. Die mittlere Kornfraktion (35 mm bis 80 mm) durchläuft die optische Sortieranlage, die laut Hersteller eine Aufgabekapazität von maximal 80 t/h besitzt (COPPERS und DUDDEK, 2008). Ziel der optischen Sortieranlage ist es, die bis 2007 über Tage per Hand erfolgte Aussortierung größerer anhydritischer Verunreinigungen anhand der automatischen Erkennung des Färbungsgrades effizienter durchzuführen. Der resultierende Gutkornstrom wird gemeinsam mit der zuvor abgesiebten feinen Kornfraktion einem der fünf schachtnahen Bunker

zugeführt. Der Fehlkornstrom wird Steinsalz in Auftausalzqualität untergemischt. Die Bunker haben eine Gesamtkapazität von 9600 t, wovon 4600 t auf Auftausalzqualität entfallen. Von dort aus erfolgt bedarfsabhängig der Transport nach über Tage in Schacht I. Hier ist eine zweite optische Sortierung der relativ feinen Körnung von 2 mm bis 8 mm mit einer Kapazität von 30 t/h nachgeschaltet. Das Schlechkorn wird gemeinsam mit der Feinstkörnung ($< 0,16$ mm) in einer Falleitung als Versatz wieder nach unter Tage geschickt. Hier erfolgt die Förderung aus der sogenannten Puderammer mittels eines Schrappers auf einen Muldenkipper, der das Salzpuder und Schlechkorn möglichst in schachtnahe, für den Versatz vorbereitete Abbaukammern transportiert (esco, 2012).

Die Bewetterung erfolgt einziehend durch den Schacht Grasleben III. Der dort installierte Grubenlüfter hat eine Leistung von 6000 m³/min. Die Frischwetterversorgung wird über die Hauptausrichtungsstrecken, Band- und Schrägstrecken sowie zusätzliche Wetterlöcher gewährleistet. Die Abkopplung abgebauter Lagerteile vom Wetterstrom erfolgt meist durch Aufschüttung von Salzpuder, teilweise auch durch Mauerwerk. In nicht durchschlägigen Grubenbauen wird Sonderbewetterung mittels Kunststofflatten und Lattenlüftern durchgeführt. Ab 400 m Länge im Streckenvortrieb müssen im Bereich nicht durchschlägiger Grubenbaue Fluchtmöglichkeiten eingerichtet werden. Die Abwetter ziehen aus dem Hauptförderschacht (Grasleben I) aus (esco, 2012).

4.4 Untertägige Exploration

Die Vorerkundung basiert im Wesentlichen auf untertägigen Bohrungen, die vor allem in Bohrfächern in einem Abstand von 100 m liegen und so geologische Profile definieren, welche senkrecht zu der Hauptstreichrichtung der Mulden- und Sattelstrukturen liegen. Des Weiteren kommen Bohrlochradarmessungen zur Erkundung des Salzspiegels, der Salzbasis und des Salzrandes zum Einsatz. In Einzelfällen werden bei komplizierten geologischen Situationen zusätzliche Kernbohrungen auch außerhalb dieser Profile durchgeführt. Ebenso werden für die Vorerkundung weiterer Infrastruktur wie beispielsweise Erkundungsstrecken oder Bandstrecken teilweise zusätzliche Kernbohrungen angesetzt. Alle aufgefahrenen Strecken werden außerdem geologisch kartiert, wobei der Verlauf von Schichtgrenzen und Gefügelinien sowie das jeweilige Einfallen erfasst werden. Diese sehr umfassende Exploration ist der Komplexität der Lagerstätte und im Speziellen der Diskontinuität einzelner Kristallsalzlager geschuldet. Die Diskontinuität sowie die Qualitätsschwankungen innerhalb des Kristallsalzes sollen durch die Naherkundung erfasst werden, um eine solide Grundlage für die Abbauplanung zu generieren (Abbildung 4.4).

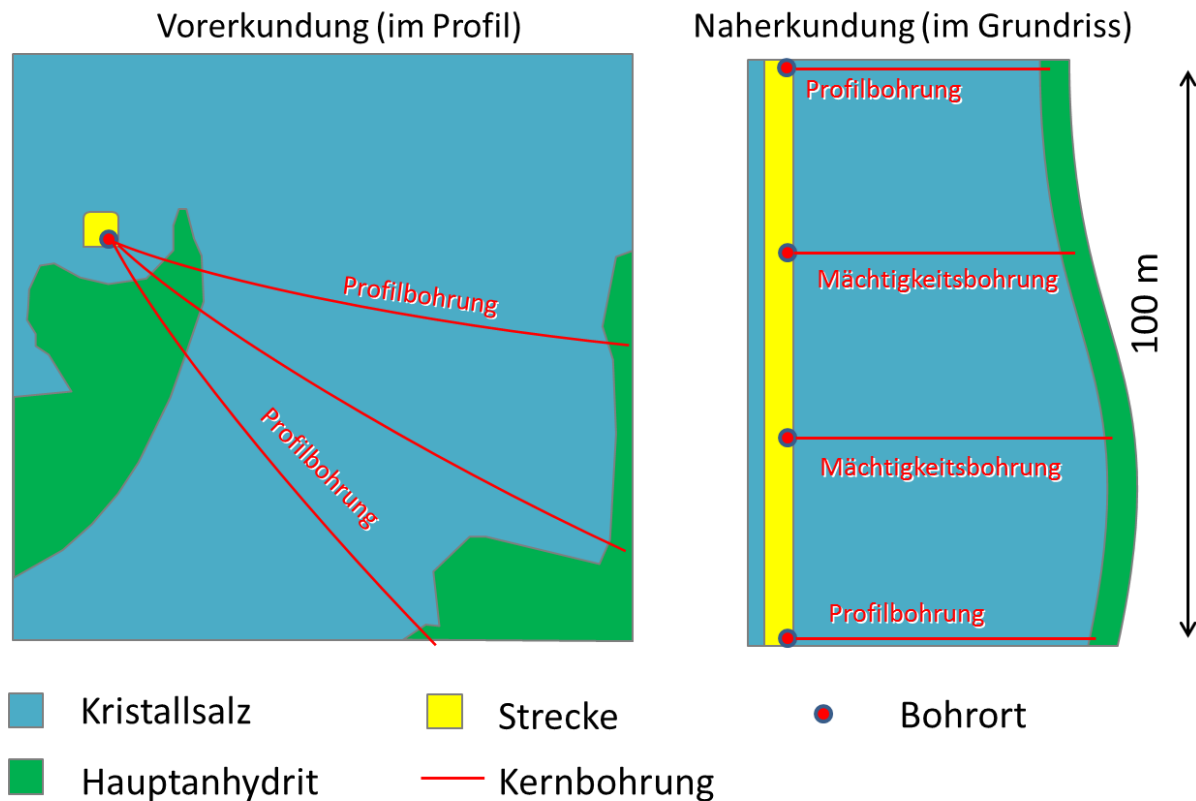


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Naherkundungskonzeptes.

Die Naherkundung erfolgt ausgehend von einer streichend aufgefahrenen Lagerstrecke, welche im Idealfall entlang einer der beiden Lagergrenzen verläuft. Diese Auffahrung parallel zur Lagergrenze wird durch Vollbohrungen in den Seitenstoß in Richtung Lagergrenze während des Vortriebs realisiert. Im Falle des Hauptanhydrits als Lagergrenze signalisiert hierbei eine gräuliche oder rötliche Färbung des Bohrkleins die Nähe zur Lagergrenze und das Erreichen des Basissalzes der Leine-Folge bzw. des sulfatischen Saums des Hauptanhydrits (z3NAa bzw. z3NAKL). Entlang der aufgefahrenen Lagerstrecke werden orthogonal im Abstand von 30 m bis 40 m in Richtung gegenüberliegende Lagergrenze sogenannte Mächtigkeitsbohrungen abgeteuft. Auf einer streichenden Lagerstrecke von 100 m Länge befinden sich so in der Regel vier Kernbohrungen, zwei Profilbohrungen und dazwischen zwei Mächtigkeitsbohrungen (Abbildung 4.4).

Die Erkundungs- und Mächtigkeitsbohrungen erfolgen als Kernbohrungen im Counterflush-Verfahren unter Einsatz einer mit MgCl_2 -gesättigten Bohrspülung. Die Beprobung der Bohrkern aus den Kristallsalz- und Schwadensalzabschnitten findet anhand von 1 m langen Probeintervallen statt. Die Proben werden im übertägigen Labor mit heißem Wasser gewaschen und aufgemahlen ($< 0,5 \text{ mm}$). Der Probenaufschluss erfolgt mit konzentrierter Salpetersäure (HNO_3). Je 2 g Probengut werden mit 2 ml Salpetersäure und 150 ml Wasser ca. 15 Minuten gekocht. Mittels optischem Emissionsspektrometer mit induktiv-gekoppeltem Plasma (ICP-OES, *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) werden

dann die Elemente Calcium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Schwefel (S) quantifiziert. Anschließend erfolgt eine Umrechnung auf die theoretisch vorwiegend vorliegenden Mineralphasen CaSO_4 (Anhydrit), $\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Kieserit) und KCl (Sylvin). Die Ermittlung des NaCl-Gehalts erfolgt durch Abzug der drei vorgenannten Verbindungen von 100 %. Die berechneten Mineralphasen dienen ausschließlich als Kenngrößen für die Qualitätssicherung.

4.5 Förderung und Produkte

Natriumchlorid (Halit) ist ein Mineral mit sehr vielen verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten, in denen es zumeist nicht substituierbar ist. Die mengenmäßig wichtigste Anwendung findet in der chemischen Industrie zur Herstellung von Chlor, Soda und Natronlauge statt, welche in großen Mengen für die Produktion von Kunststoffen, Kunstharzen und Glas und vielen weiteren Produkten benötigt werden (POHL, 2005). Diese sogenannten Industriesalze machten im Jahr 2015 rund 54 % des weltweiten Verbrauchs von 295 Mio. t aus, gefolgt von Gewerbesalzen (24 %), die beispielsweise zur Wasseraufbereitung oder in der Pharmaindustrie genutzt werden. Ein nicht unerheblicher Anteil von 13 % entfiel auf die Nutzung als Auftausalz und 9 % auf Speisesalz (K+S Aktiengesellschaft, 2017). Wo und wie ein Einsatz stattfindet, ist maßgeblich von der Qualität des Rohsalzes abhängig. Rohstoffquellen sind neben der bergmännischen Gewinnung von natürlichem Steinsalz auch die Solung und Herstellung von Siedesalz sowie die Herstellung von Meersalz in Salzgärten.

Im Jahr 2015 wurden in Deutschland in sieben aktiven Bergwerksbetrieben insgesamt 6,1 Mio. t Steinsalz produziert. Weitere 1,0 Mio. t Steinsalz stammten aus der Siedesalzproduktion. Gemeinsam mit den 31,1 Mio. m³ Industriesole, die einem NaCl-Inhalt von 7,8 Mio. t entsprechen, ist Deutschland damit der größte Salzproduzent der Europäischen Union (HUY, 2016). Auf Grund der Reinheit von 99,80 % bis 99,95 % NaCl kann Siedesalz grundsätzlich in allen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Meersalz ist mit einem NaCl-Gehalt von 99,0 % bis 99,7 % ebenfalls relativ frei von Verunreinigungen und somit für ein breites Spektrum an Produkten verfügbar. Das in Europa und den USA bergmännisch gewonnene Steinsalz hingegen weist typischerweise Qualitäten von 97 % bis teilweise über 99 % NaCl auf und beinhaltet nicht selten störende sulfatische Sekundärminerale (SEDIVY, 1996). Entsprechende Einschränkungen gibt es bezüglich der Produktmöglichkeiten auch in Braunschweig-Lüneburg. Abbildung 4.5 zeigt eine Auswahl von Produktmöglichkeiten aus Steinsalz, entsprechend dem Portfolio der esco GmbH & Co. KG. In Braunschweig-Lüneburg werden zwei Rohsalzqualitäten als Basis für verschiedene Produkte gewonnen, Auftausalz und Normalsalz. Auftausalz findet seine Anwendung, dem Namen entsprechend, als Streugut im Winterdienst und unterliegt geringeren

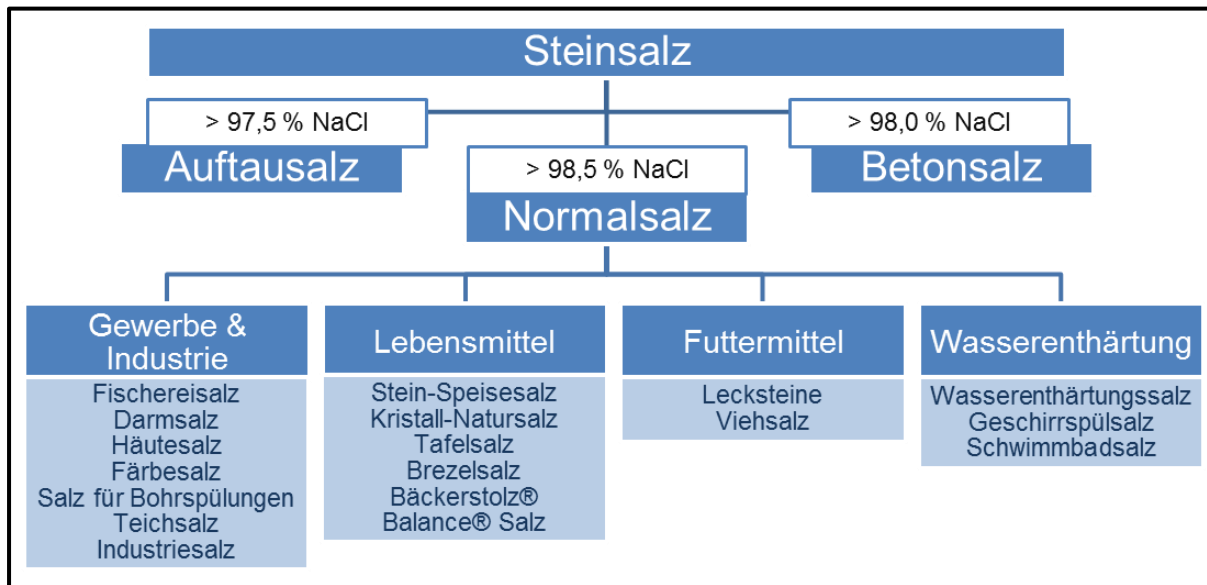


Abbildung 4.5: Überblick über die Steinsalz-Produktpalette der esco GmbH & Co. KG (nach esco, 2017)

Qualitätsanforderungen als Normalsalz, das die Grundlage für alle weiteren nachfolgend genannten Produkte bildet. Ein vorrübergehendes Spezialprodukt ist das Betonsalz, das zur Erzeugung von Sorelbeton an die Schachanlage Asse, ein Versuchsbergwerk zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, geliefert wird. Sorelbeton, eine stark steinsalzhaltige Zementmischung, wird dort als Material zum Bau geotechnischer Barrieren verwendet.

Die Gesamtförderung des Steinsalzbergwerks Braunschweig-Lüneburg lag in den letzten zehn Jahren (2005 - 2015) im Mittel bei rund 650.000 t/a. Die Normalsalzförderung unterlag nur geringen Schwankungen und betrug rund 400.000 t/a. Auch die Förderung von Betonsalz ist relativ konstant, bei ca. 60.000 t/a. Auf Grund der saisonalen Abhängigkeit des Auftausalzbedarfs und der entsprechend höheren Nachfrage in kälteren Wintern schwankten die absoluten Förderzahlen dafür jedoch zwischen 460.000 t/a (2014) und 890.000 t/a (2010). Der Anteil an Auftausalz (inklusive Betonsalz) liegt aktuell entsprechend zwischen 20 % und 25 % in einem milden Winter und 50 % bis 60 % in einem intensiven Winter, was einer Tonnage von 100.000 bis 400.000 t/a entspricht. Die Gesamtkapazität beträgt 1 Mio. t/a und bleibt damit selbst in starken Wintern meist unerreicht (esco, 2016).

Ein Überblick über die jeweiligen Produkthanforderungen ist in Tabelle 4.1 gegeben. Neben einem geringen Anteil an Sulfaten und K- und Mg-Chloriden sind vor allem die Farbe und die Körnung von großer Bedeutung. Die dargestellten Grenzwerte sind der in Braunschweig-Lüneburg traditionell angewendeten Berechnung der theoretischen Mineralphasen angepasst.

Tabelle 4.1: Produktanforderungen an die Rohsalzqualität.

	Normalsalz	Betonsalz	Auftausalz
NaCl [%]	> 98,5	> 98,0	> 97,5
Aussehen	rein weiß	unkritisch	unkritisch
MgSO₄ [%]	< 0,25	< 0,25	< 0,25
CaSO₄ [%]	< 1,2	< 2,0	< 1,9
KCl [%]	< 0,2	< 0,2	< 0,4
MgCl₂ [%]	< 0,02	unkritisch	unkritisch

Die Anforderungen an die Qualität von Auftausalz sind gesetzlich in den „Technischen Lieferbedingungen für Streustoffe im Straßenwinterdienst“ (TL-Streu) festgeschrieben. Demnach sind mindestens 96 % NaCl bei maximal 2 % Sulfatanteil zulässig (FGSV, 2003). Europaweit sind die nationalen Vorgaben sehr unterschiedlich. Die strengste Vorgabe bezüglich des Mindestgehalts an tauwirksamer Substanz liegt in Österreich aktuell bei 97,5 % NaCl, während in Großbritannien, Spanien und Polen nur 90 % NaCl vorgegeben sind. Im Rahmen einer geplanten Normierung zur Vereinheitlichung der Anforderungen an Streugut ist 2015 ein erster Entwurf vorgestellt worden, in dem für Deutschland zukünftig eine Tauwirksame Substanz von mindestens 97 % NaCl bei maximal nur noch 1,5 % Sulfaten vorgesehen ist (GÖTZFRIED, 2015). Die esco GmbH & Co. KG liegt mit ihren intern hoch angesetzten Mindestanforderungen über dem aktuellen nationalen Standard. Die Umsetzung des neuen EU-Normentwurfs könnte jedoch bezüglich der Sulfatgehalte konkrete Änderungen der Produktanforderungen bedeuten.

Die Produkte, die aus Normalsalzqualität hergestellt werden, unterliegen, entsprechend den mannigfaltigen Anwendungsbereichen, ganz unterschiedlichen Qualitätsanforderungen und Nachweisen. So müssen beispielsweise alle im Lebensmittelbereich anzuwendenden Produkte die entsprechenden lebensmittelrechtlichen Vorschriften der EU erfüllen. Gleiches gilt für Lecksteine und Viehsalz, die mit entsprechenden Zertifikaten zur Eignung als Futtermittel gekennzeichnet werden müssen und weiterführend teilweise mit Ökosiegeln, beispielsweise nach der EG-Öko-Landbauverordnung, versehen werden. Alle Produkte werden nach EN ISO 9001 zertifiziert. Jedes Produkt, das ein etabliertes Qualitätsmanagementsystem und die Einhaltung aller behördlichen Anforderungen an das jeweilige Produkt garantiert, erhält dieses Zertifikat (esco, 2017).

Entsprechend der Qualitätsanforderung und der späteren Verfeinerung durch Einsatz von Additiven oder Einengung des Korngrößenbereichs sind die Preisspannen zwischen einzelnen Produkten hoch. Während der Preis für eine Tonne Auftausalz im Zeitraum von 2010 bis 2015 im Schnitt bei 56,30 € lag, betrug er für Gewerbe,- Industrie- und Speisesalz im Mittel 104,50 € (K+S Aktiengesellschaft, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 und 2016).

4.6 Das Untersuchungsgebiet

Das betrachtete Untersuchungsgebiet erstreckt sich im Grenzbereich der Bewilligungsfelder I, IV und V zwischen den Profilen 70 und 79 mit einer Nord-Süd-Ausdehnung von rund 800 m und einer Ost-West-Ausdehnung von rund 850 m im Norden und etwa 400 m im Süden (Abbildung 4.6). Über 60.000 Bohrmeter entlang von untertägigen Kernbohrungen liegen innerhalb des Untersuchungsgebietes. Hinzu kommen ca. 18 km Streckenauffahrungen. Diese erschließen die Lagerstätte über insgesamt zwölf Teilsohlen.

In Abbildung 4.6 ist der Auffahrungsstand gemeinsam mit den Modellergebnissen der Außenkonturen des Kristallsalzes dargestellt. Seit Mitte der 2000er Jahre wurde die Entwicklungsrichtung des Grubenbetriebs nach Südosten in das Feld IV im Bereich des Untersuchungsgebietes fokussiert. Der Wechsel der Streichrichtung der Hauptstrukturen von Nord-Süd (Profil 70 und 72) nach Nordnordwest-Südsüdost (Profil 73 bis 79) und eine entsprechende Abnahme des räumlichen Anteils des östlichen Staßfurt-Steinsalz-Sattels im Randbereich konnte jedoch den nach Süden einengenden Verlauf der Feldesgrenze IV nicht kompensieren. Diese Umstände im südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes führen in Kombination mit einer anomal häufigen Verbreitung von Hauptanhydritschollen, auch auf höheren Sohlenniveaus, zu einer schwierigen Situation für die Gewinnung des Kristallsalzes

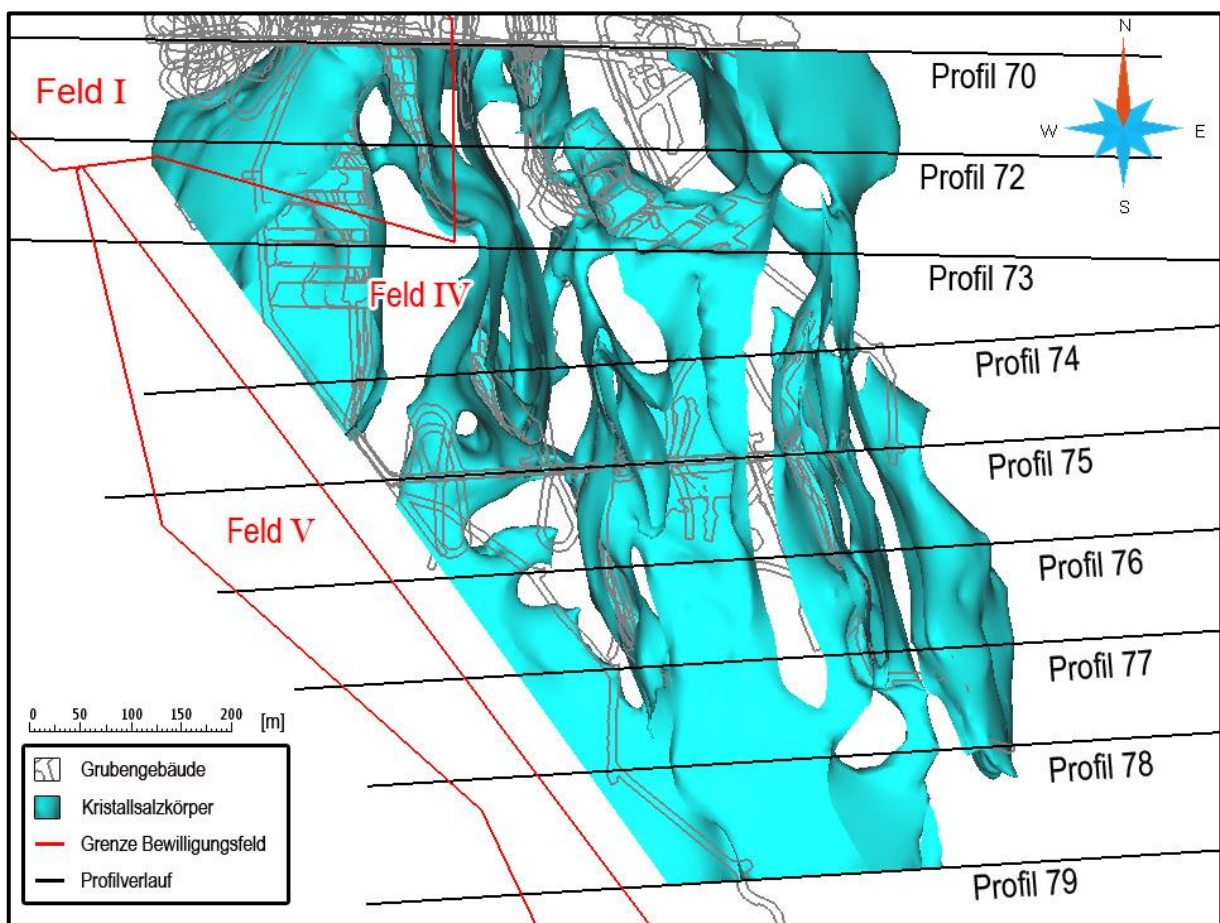


Abbildung 4.6: Überblick über das Untersuchungsgebiet, Position der Profile 70 bis 79 und Ergebnisse der Modellierung des Kristallsalzes.

und zu relativ geringen Vorratsmengen im Verhältnis zu der aufgeschlossenen Fläche. Einzelne vielversprechende Kristallsalzlager in diesem Bereich können nur bis an die SW-Grenze des Bewilligungsfeldes IV aufgefahren werden (Abbildung 4.6). Aus diesem Grunde wurde zwischenzeitlich ein Antrag auf Bewilligung eines neuen Feldes (Feld V) gestellt, das die Erschließung des schmalen Streifens zwischen der Feldesgrenze IV und dem einzuhaltenden Sicherheitspfeiler zur gefluteten Grube Walbeck-Buchberg ermöglichen soll. Mittelfristig wird auch über ein Umschwenken in die ursprüngliche Entwicklungsrichtung nach Nordwesten in das Feld I nachgedacht.

4.7 Schlussfolgerungen

Obwohl eine sehr komplexe Lagerstättengeometrie und damit verbundene Schwierigkeiten bezüglich Exploration und Abbau vorliegen, blickt das Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg auf eine lange Fördergeschichte zurück. Die Kombination aus Auftausalz- und Normalsalzgewinnung bietet für den Betrieb eine hohe Flexibilität in der Nutzung der Lagerstätte. Jedoch werden die Bedingungen insofern erschwert, dass sich der Abbau immer mehr auf den östlichen Randbereich der Lagerstätte verlagert. Das Verhältnis von Kristallsalz zu Hauptanhydrit ist hier höher und die Qualität eher geringer als im Zentralbereich.

5 Methodik

5.1 Geologische 3D-Modellierung der Lagerstätte

Die Modellierung der Lagerstätte stellt den zentralen Teil dieser Arbeit dar und dient als Grundlage für alle weiteren Arbeitsschritte. Sie beschränkt sich nur auf einen ausgewählten Teil der Lagerstätte, den südöstlich gelegenen Abbaubereich im Bewilligungsfeld IV. Die räumliche Eingrenzung auf diesen Bereich liegt vor allem daran, dass hier bereits digitalisierte und georeferenzierte Kartierungs- und Konstruktionsdaten vorliegen, während im nördlichen Teil der Lagerstätte ein Großteil der Daten ausschließlich analog vorliegt. Des Weiteren soll sich die Modellierung auf den aktuellen Abbaubereich im Bewilligungsfeld IV fokussieren, um die sich im Vergleich zu dem nördlichen Feld I stark verändernden geologischen Gegebenheiten darzustellen und näher zu untersuchen.

Die Komplexität der Lagerstätte bewirkt, dass nur begrenzt automatisierte Modellierungsprozesse anwendbar sind, sodass eine räumliche Eingrenzung und Reduzierung der Menge an Aufschluss- und Explorationsdaten unerlässlich ist. Für die Modellierung wird die Software GOCAD® (*Geological Object Computer Aided Design*) der Firma Paradigm genutzt. Diese bietet die Möglichkeit der diskreten Modellierung (*discrete modeling*) geologischer Objekte anhand von Linien, triangulierten Flächen oder Volumen inklusive zugeordneten Eigenschaften (MALLEY, 2002). Der Prozess der 3D-Modellierung beinhaltet typischerweise die Schritte des Datenmanagements, der Zieldefinition, der Auswahl einer geeigneten Auflösung, der geometrischen Modellierung und der Eigenschaftsmodellierung (z.B. CAUMON et al., 2009; KAUFMANN und MARTIN, 2008; TURNER, 2006).

5.2 Datenanalyse und Aufbereitung

Im Bereich der geologischen Modellierung lassen sich die genutzten Daten grundsätzlich in zwei Typen untergliedern, räumliche Daten und Eigenschaftsdaten. Die räumlichen Daten dienen der Erzeugung der Geometrie. Diese wird anschließend in einem Blockmodell diskretisiert, um eine Grundlage für analytische Berechnungen der Eigenschaftsdaten in Schätz- und Vorhersagemodellen zu liefern (TURNER, 2006). Da die im Untersuchungsgebiet gelegenen Kernbohrungen sowohl räumliche als auch Informationen zur Zusammensetzung in Form von Bohrkernanalysen beinhalten, stellten diese auch die wichtigste Modellgrundlage dar. Hierbei war klar zwischen den relativ kurzen, 20 m bis 70 m langen und stets horizontal verlaufenden Mächtigkeitsbohrungen und den bis zu 800 m langen Profildächerbohrungen zu differenzieren, welche weiträumig innerhalb der einzelnen Profilebenen zur Vorfelderkundung genutzt werden.

Tabelle 5.1: Überblick über die verwendeten Daten im Untersuchungsgebiet (Stand 10/2013).

Kernbohrungen (n=414)	Bohrspurverlauf (n=62.254 Bohrmeter)
	Lithostratigraphie
	Farbe (n=199)
	Struktur (n=203)
	Schnittwinkel (nicht orientiert)
	Gaszutritte (n=250)
	Lösungszutritte (n=15)
	Analysedaten (n=15432)
Streckenkartierung	Schichtgrenzen
	Gefügelinien
	Streichen und Einfallen
Grundrisse und Profile	Schichtgrenzen
	Radarreflektoren
	Saum des Grubengebäudes

Im Untersuchungsgebiet und der unmittelbaren Umgebung waren zum Zeitpunkt der Datenerhebung (Oktober 2013) insgesamt 414 untertägige Kernbohrungen mit 62.254 Bohrmeter (siehe Tabelle 5.1) vorhanden. Neben den räumlichen Vermessungsdaten der Bohrungen existierten jeweils lithostratigraphische Bohrkernaufnahmen mit einer zusätzlichen Ansprache von Farbe, Struktur und, falls erkennbar, Schnittwinkel. Die Ansprache von Farbe und Struktur existierte jedoch nur für die letzten 234 Bohrungen (ab KB1010). Hauptsächlich lagen für stratigraphisch als Kristallsalz (z3NAKR) angesprochene Abschnitte geochemische Analysen vor. Untergeordnet wurden jedoch auch andere stratigraphische Einheiten beprobt, vor allem das Schwadensalz (z3NAh) und das Staßfurt-Steinsalz (z2NA). Neben den berechneten Mineralphasen NaCl (Halit), CaSO₄ (Anhydrit), MgSO₄ (Kieserit) und KCl (Sylvin) waren auch Besonderheiten wie Gas- oder Salzlösungszutritte dokumentiert. Zusätzlich zu den Daten der Explorationsbohrungen lagen Vermessungsdaten des Grubengebäudes sowie Streckenkartierungen innerhalb des Grubengebäudes vor. Die Kartierungsdaten umfassten Schichtgrenzen, Gefügelinien und, soweit erkennbar, ein zugehöriges Symbol für Streichen und Einfallen.

Ohne ein gewisses Verständnis der internen Strukturen und der ihnen zugrunde liegenden Deformationsmechanismen sind diese Aufschlusssdaten nur schwer zu interpretieren und ergeben ein unklares, chaotisches Gesamtbild im dreidimensionalen Raum. Die duktile Verformung der z2- und z3-Salze in Kombination mit der spröden Verformung des Hauptanhydrits resultieren in einer derart komplexen internen Geometrie, dass die detaillierten Interpretationen entlang der Projektionsebenen (Grundrisse und Profile) unverzichtbare Eingangsdaten darstellten. Jedoch war der teilweise sehr hohe

Detaillierungsgrad dieser Daten für eine Weiternutzung teils problematisch. Um die Interpretationsdaten für eine dreidimensionale Modellierung konkret nutzbar zu machen, bedurfte es einer umfangreichen Aufbereitung in Form von Vereinfachung und Vereinheitlichung sowie einer intensiven Plausibilitätsprüfung. Dies betrifft alle zuvor genannten Eingangsdaten.

In einem ersten Schritt wurden die für die Fragestellung relevanten Schichtgrenzen bestimmt, um den Datenbestand anschließend entsprechend einzuschränken. Als relevante Horizonte bzw. Schichtgrenzen wurden Salzbasis, Salzspiegel, Staßfurt-Steinsalz (z2NA), Hauptanhydrit (z3AN), Kristallsalz (z3NAKR) und Schwadensalz (z3NAh) gewählt. Das für die Strukturbildung ebenfalls wichtige Kaliflöz Staßfurt (z2KSt) ist in weiten Bereichen auf Grund der geringen Mächtigkeit von nur 1 m bis 2 m nicht auflösbar und wurde somit nicht einbezogen. Generell ist fast nie eine normale Schichtung gegeben, sodass beispielsweise für die Konturierung des Kristallsalzes nicht nur eine hangende und eine liegende Schichtgrenze, sondern über zehn verschiedene Schichtgrenzen, vor allem diskordant zum Liegenden, beispielsweise dem Grauen Salzton (z3T), vorlagen. Entsprechend bedurfte es einer Vereinheitlichung aller Bohrlochdatenbankeinträge. Diese ging einher mit dem Zuschnitt auf die Auflösung der Modellierung. Ein wenige Zentimeter mächtiger Steinsalzeinschluss im Hauptanhydrit ist zum Beispiel typischerweise in einem Bohrprotokoll vermerkt und in der Bohrlochdatenbank als Schichtgrenze definiert, hat jedoch im größeren Maßstab keine Relevanz. Ganz im Gegenteil führt der Import solcher Schichtgrenzen später zu Problemen innerhalb des Modellierungsprozesses. Das Ergebnis der Überarbeitung der Bohrlochdatenbank waren vereinheitlichte Schichtgrenzen, die jeweils nur als Ober- oder Unterkante des jeweiligen Zielhorizontes definiert sind, wobei sich der räumliche Bezug nur auf den Verlauf der jeweiligen Bohrlochspur und nicht auf eine tatsächliche Funktion als Hangend- oder Liegendgrenze bezieht. Analog hierzu wurden auch innerhalb der Interpretationsdaten Konturen erzeugt, die den jeweiligen Zielhorizont umschließen. Alle im CAD-Format vorliegenden kartierten oder konstruierten Schichtgrenzen wurden entsprechend der Harmonisierung mit der Modellauflösung so verändert, dass sie durch möglichst wenige Punkte definiert sind (mindestens 5 m Abstand zwischen zwei Punkten). Gleiches gilt für die Daten der räumlichen Vermessung des Grubengebäudes.

Die Analysedaten entlang der Bohrungen hatten außer ihrer räumlichen Zuweisung keinen Bezug zu der jeweiligen Stratigraphie oder dem beprobten Lager. Der Bezug zur jeweiligen Stratigraphie wurde relativ einfach durch Verknüpfung innerhalb einer Bohrlochdatenbank erzielt. Jedoch durchstoßen Profilfächerbohrungen häufig mehrere Male das Kristallsalz, sodass eine genaue Zuweisung des jeweiligen Probenabschnitts zu einem räumlich zusammenhängenden Lager notwendig wurde. Diese Zuweisung ist im vorliegenden Fall, einhergehend mit einer intensiven Qualitätsprüfung der Daten, manuell geschehen. Das

Ergebnis der Datenaufbereitung waren harmonisierte und vereinfachte Daten in einer Bohrlochdatenbank und verschiedenen CAD-Zeichnungen. Diese beinhalteten Kartierungen, Konstruktionen und Vermessungsdaten des Grubengebäudes der jeweiligen Teilsohlen.

5.3 Erfassung der Lagerstättegeometrie

Die herkömmliche Vorgehensweise zur Definition von Grenzflächen zwischen Abraum und Erz oder zwei geologischen Schichten im 3D-Raum ist die der expliziten Modellierung, in der Regel basierend auf dem Prozess einer sehr zeitintensiven manuellen Digitalisierung einzelner Punkte und Kurven entlang einer Vielzahl von Interpretationsebenen (COWAN et al., 2003). Moderne Ansätze hingegen beinhalten häufig auch den Einsatz von impliziten Methoden. Hierbei wird eine Fläche anhand eines Iso-Wertes in einer volumenbasierten Funktion definiert (FRANK et al., 2007). Dies hat nach COWAN et al. (2003) neben der enormen Zeitersparnis vor allem den Vorteil, dass die geologische Interpretation klar vom Prozess der Flächenerzeugung getrennt ist, wobei grundsätzlich die Möglichkeit gegeben ist, komplexe Objekte jedweder Form abzubilden. FRANK et al. (2007) stellen tatsächlich einen Algorithmus vor, der zu sehr befriedigenden Modellergebnissen einer kompliziert geformten Salzoberfläche führt, die zuvor nur durch eine unregelmäßige Punktwolke definiert war. Jedoch waren auch hier intensive Vorarbeiten in Form von manueller Digitalisierung von Diskontinuitäten als Bedingungen für die angewendete Volumenfunktion notwendig.

Auf Grund der hier vorliegenden komplexen Geometrie und dem Vorhandensein einer Vielzahl digitalisierter Profile und Grundrisse wurden daher für die Erfassung der Lagerstättegeometrie ausschließlich explizite Methoden angewendet. Die Modellierung von dreidimensionalen Grenzflächen der definierten Zielhorizonte erfolgte in drei Hauptschritten: der Erzeugung von Initialflächen aus Interpretationsdaten, der globalen Interpolation unter Einbezug der vorhandenen harten Aufschlussdaten und der finalen regionalen Überarbeitung unter Einbezug zusätzlicher Informationen (Abbildung 5.1).

Im ersten Schritt wurden die Umriss einzelner Zielhorizonte entlang einer ausgewählten Interpretationsrichtung miteinander verbunden. Da die vertikale Interpretationsrichtung (Grundrisse im Abstand von 13 m bis 19 m) im Vergleich zu der horizontalen, N-S gerichteten Interpretationsrichtung (Profile im Abstand von 100 m) weitaus geringere Abstände und somit geringere Unterschiede zwischen den einzelnen Ebenen aufweist, wurden die Kurvensegmente aus den Grundrissen für die Erzeugung von Initialflächen genutzt. Diese Initialflächen wurden durch ein unstrukturiertes Polygongitter dargestellt, welches standardmäßig durch viele Dreiecke definiert ist und im Vergleich zu strukturierten Polygongittern wie beispielsweise einem kartesischen oder stratigraphischen Gitter komplexe Geometrien sehr gut darstellen kann (FRANK, 2009, MEI, 2014). Zwischen

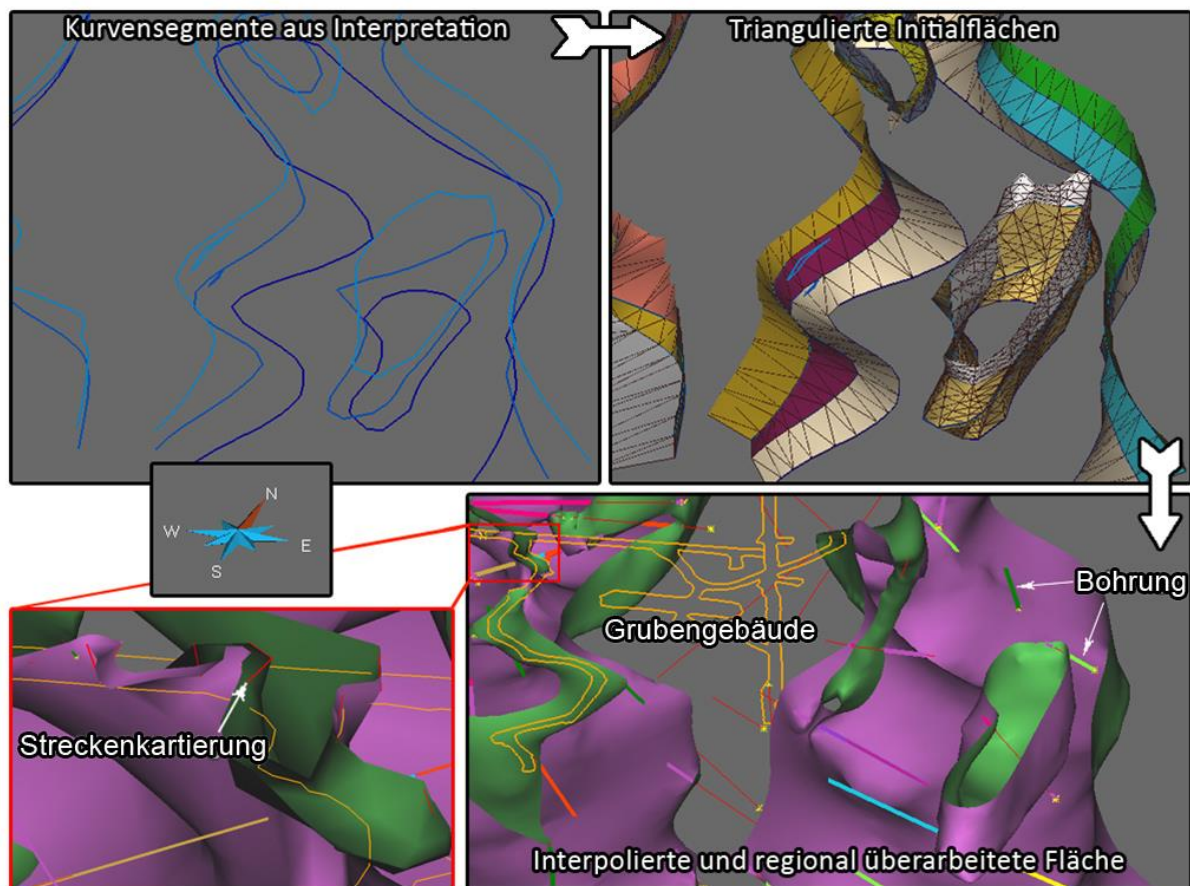


Abbildung 5.1: Vorgehensweise der geometrischen Modellierung: Interpretationsdaten aus Grundrissen werden Sohle für Sohle miteinander Verbunden, sodass Initialflächen entstehen. Harte Aufschlussdaten (Bohrungen und Streckenkartierungen) werden anschließend für die Flächeninterpolation genutzt.

jeder Interpretationsebene wurde erneut im Detail geprüft ob die Interpretation den harten Aufschlussdaten entspricht und grundsätzlich plausibel ist. Die gewählte Vorgehensweise ist vor allem im Falle von Verzweigungen oder Zusammenschluss mehrerer Körper entlang der Interpretationsrichtung sehr aufwändig (COWAN et al., 2003). Hier mussten einzelne Kurvensegmente manuell getrennt und ein Punkt oder eine Linie zwischen den Interpretationsebenen definiert werden, an dem sich der Körper aufspaltet. Als Ergebnis des ersten Schrittes standen triangulierte, nach oben und unten offene Initialflächen, die ausreichend nah entlang der jeweiligen harten Aufschlussdaten verlaufen und einen geologisch logischen Aufbau besitzen. Es folgte die manuelle Konstruktion von Abschlussflächen, um nach unten geschlossene Körper zu erzeugen. Die Interpretationen entlang der Profile dienten hier als hilfreiche Stützpunkte.

Im zweiten Schritt wurde die Initialfläche mit den benachbarten harten Aufschlussdaten verknüpft, sodass diese zu einem Teil der Fläche wurden. Dies betrifft sowohl Aufschlüsse aus Bohrlöchern als auch Streckenkartierungen (Abbildung 5.1). Es folgte die geometrische Interpolation der Fläche entsprechend dem in GOCAD® implementierten Prinzip der *Discrete Smooth Interpolation* (D.S.I.), das die Rauigkeit einer gegebenen Fläche minimiert (FRANK, 2009). Im Ergebnis entstand eine weiche Triangulation, die alle harten Aufschlusspunkte

verbindet. Weitere Informationen, die keinem konkreten Aufschlusspunkt entsprechen, aber logische Randbedingungen darstellen, wurden als zusätzliche Interpolationsbedingungen berücksichtigt. So sind beispielsweise die Profilkonstruktionen der Hauptanhydritkörper unterhalb der 571 m-Sohle, wo keine oder kaum Aufschlüsse vorhanden sind, als weiche Bedingung in die Interpolation mit eingeflossen. Zusätzlich mussten vielerorts manuell weitere Bedingungen integriert werden. Dies ist der dritte und finale Schritt der hier angewendeten Vorgehensweise. Die visuelle Qualitätskontrolle ist hierbei wichtig, um Inkonsistenzen zu erkennen (CAUMON et al., 2009). Beispielsweise darf eine interpolierte Schichtgrenze das Grubengebäude nur kreuzen, wenn an dieser Stelle auch eine entsprechende Streckenkartierung vorliegt. War das nicht der Fall, musste die Fläche lokal überarbeitet und ein Kontrollpunkt in einem geologisch sinnvollen Abstand zum Grubengebäude eingefügt werden. Es erfolgte die regionale Interpolation mittels *Discrete Smooth Interpolation* (D.S.I.) unter Berücksichtigung der lokalen Änderung. Gleiches gilt beispielsweise für die Überschneidung zweier interpolierter Schichtgrenzen. Die finalen Schichtgrenzen sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Sie sind das Ergebnis eines langwierigen iterativen Prozesses, in dem immer wieder eine Plausibilitäts- und Qualitätskontrolle und, wenn nötig, die Definition zusätzlicher Bedingungen und eine regionale Interpolation von Teilflächen erfolgte.

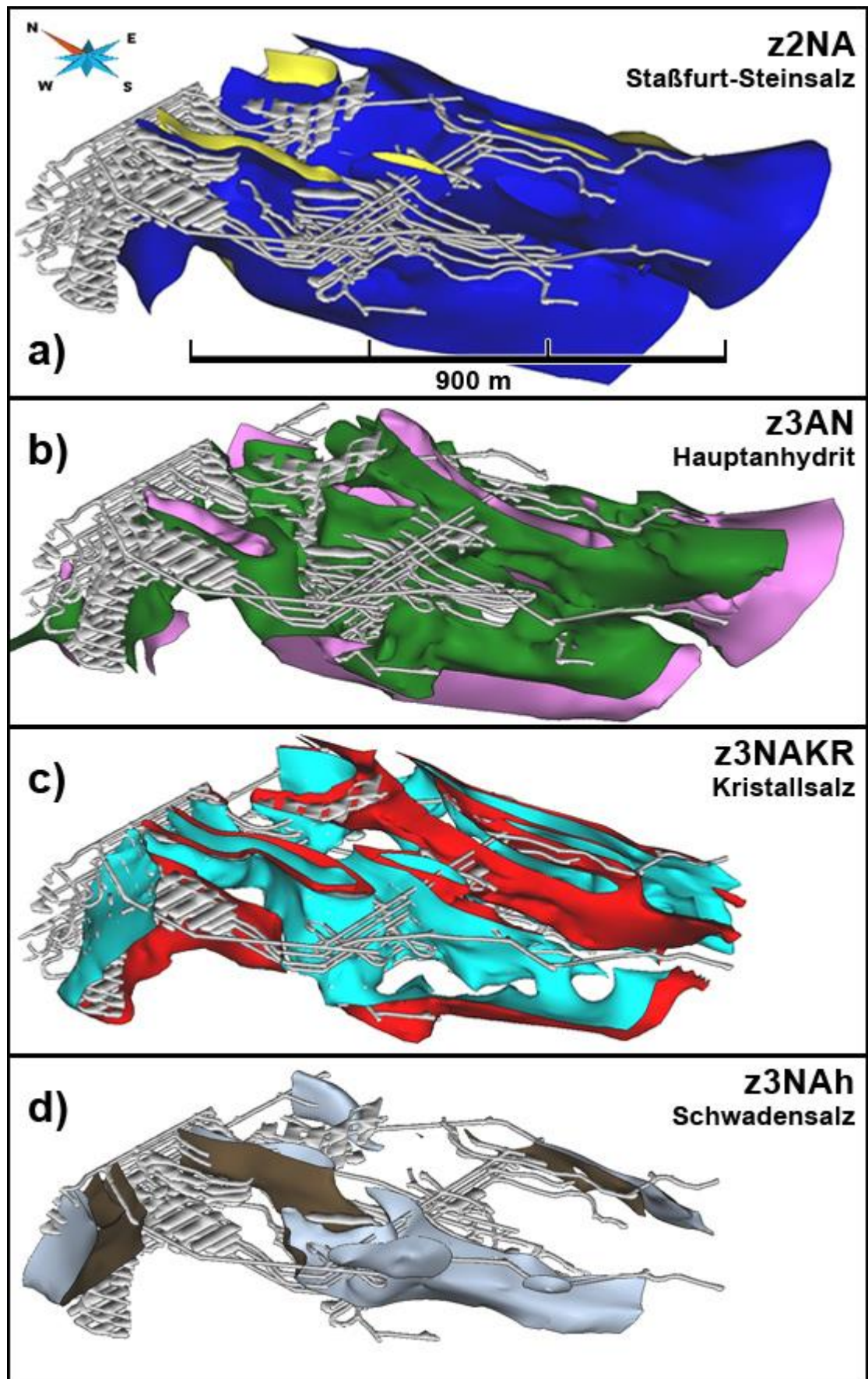


Abbildung 5.2: Ergebnisse der geometrischen Modellierung der relevanten stratigraphischen Einheiten. Innen- und Außenseite jeweils in Komplementärfarben dargestellt: a) Staßfurt-Steinsalz, b) Hauptanhydrit, c) Kristallsalz, d) Schwadensalz.

5.4 Blockmodellerstellung

Innerhalb des erhaltenen Kristallsalzkörpers existieren über 14.000 Analysedaten, die bezüglich ihrer Zusammensetzung in einem Blockmodell zu interpolieren waren, um eine qualitative Auswertung in Bezug auf geometrische Zusammenhänge zu ermöglichen. Dafür waren vorerst drei Fragen zu beantworten:

- Sind räumliche Abhängigkeiten bereits durch die Berechnung experimenteller Variogramme zu erkennen?
- Welche Interpolationsmethode ist geeignet?
- Welche Grid-Auflösung (Blockgröße) ist sinnvoll?

Die Erzeugung von experimentellen Variogrammen und darauf basierten Variogramm-Modellen ist insofern wichtig, dass neben der Identifikation von räumlichen Abhängigkeiten die jeweiligen Ergebnisse als Grundlage für die Auswahl einer geeigneten Interpolationsmethode dienen und gleichzeitig als Eingangsdaten für diese verwendet werden können (GRINGARTEN und DEUTSCH, 2001).

Die Entscheidung für eine Interpolationsmethode ist eng mit der Variogramminterpretation und der Frage nach einer geeigneten Grid-Auflösung verbunden. In der Regel ist die Anwendung und Durchführung unterschiedlicher Methoden und ein entsprechender Ergebnisvergleich unerlässlich, um die für den vorliegenden Fall beste Methode zu identifizieren (BASTANTE et al., 2008; CRESSIE, 1990; ZIMMERMAN et al., 1999).

Die Entscheidung über die zu wählende Blockgröße stellt immer einen Kompromiss zwischen hoher Auflösung und entsprechender Selektivität im Kontext der bergmännischen Gewinnung und niedrigerer Auflösung bei niedrigerer Varianz dar (HULSE, 1992). Die Blockgröße eines Lagerstättenmodells, das als Grundlage für eine Abbauplanung dient, hat durch die Faktoren der Verdünnung und Selektivität bei gegebenen Betriebsmitteln einen sehr großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten Projektes (JARA et al., 2006). Die Blockgröße ist jedoch aus geostatistischer Sicht nicht gemäß Abschlagslängen und -höhen einer bestimmten Abbaumethode mittels bestimmter Betriebsmittel zu wählen, sondern so, dass eine möglichst gute Abbildung der räumlichen Wertstoffverteilung generiert wird. Dies geschieht in Abhängigkeit vom mittleren Probenabstand, der räumlichen Kontinuität zwischen den Proben und der Komplexität der vorliegenden geologischen Situation (HULSE, 1992). Im Idealfall entspricht die geostatistisch optimale Blockgröße einer adäquaten Größe in Bezug auf die Planung einer bergmännischen Gewinnung.

5.4.1 Variographie

Generell sollten experimentelle Variogramme mit einer sinnvollen Entfernungsstufe zwischen zwei Punktpaaren in eine Richtungen berechnet werden, entlang welcher die größte Ähnlichkeit benachbarter Punkte zu erwarten ist, also zum Beispiel parallel entlang der Schichtung (GRINGARTEN und DEUTSCH, 2001). Grundsätzlich ist dies im vorliegenden Fall entlang der NNW-SSE-Streichrichtung der Sattel- und Muldenstrukturen anzunehmen, jedoch ändert sich sowohl die Streichrichtung als auch das Einfallen lokal und ist durch das Vorhandensein von Anhydritklippen kaum als regelmäßig zu erwarten. Entsprechend wurde für eine erste Betrachtung ein Teilbereich des Untersuchungsgebietes ausgewählt, in dem eine relativ einheitliche geometrische Ausbildung vorliegt.

Für die Entwicklung einer generellen Vorgehensweise der Blockmodellierung wurde aus diesem Grund das Lager 28 ausgewählt. Es streicht relativ homogen von N-S bis NNW-SSE auf einer Länge von über 300 m und fällt zumeist mit 45° bis 90° halbsteil bis steil in Richtung Osten, in tieferen Bereichen teilweise auch Richtung Westen ein. Die Mächtigkeit variiert zwischen 15 m und 30 m. Insgesamt liegen 464 Proben entlang von 21 Bohrungen vor, wovon der Großteil das Lager von West nach Ost durchstößt (siehe Abbildung 5.4). Abbildung 5.3 zeigt die Ergebnisse experimenteller Variogramme des *Normal-score*-transformierten NaCl-Gehalts innerhalb des Lagers 28. Sie spiegeln die enorm ungleiche Verteilung der Proben in unterschiedlichen Richtungen gut wider. Entlang der Bohrungen von West nach Ost ist der Abstand der Proben mit 1 m denkbar gering, während die Distanz in Streichrichtung und vertikal zwischen zwei Bohrungen im Bereich von 30 m bis 40 m liegt. Räumliche Abhängigkeiten sind insofern klar erkennbar, dass senkrecht zur Schichtung ein sogenannter *hole-effect* in Form einer Ondulation sichtbar wird. Größere Ähnlichkeiten gibt es vor allem parallel zum Einfallen, also schichtparallel. Das erzeugte theoretische Variogramm-Modell entspricht der Varianz und Reichweite entlang der Hauptproberichtung und besteht aus zwei aufsummierten sphärischen Teilmodellen, dessen Ellipsoide jeweils nach der Hauptstreich- und Fallrichtung ausgerichtet sind. Der maximale Suchradius beträgt 40 m.

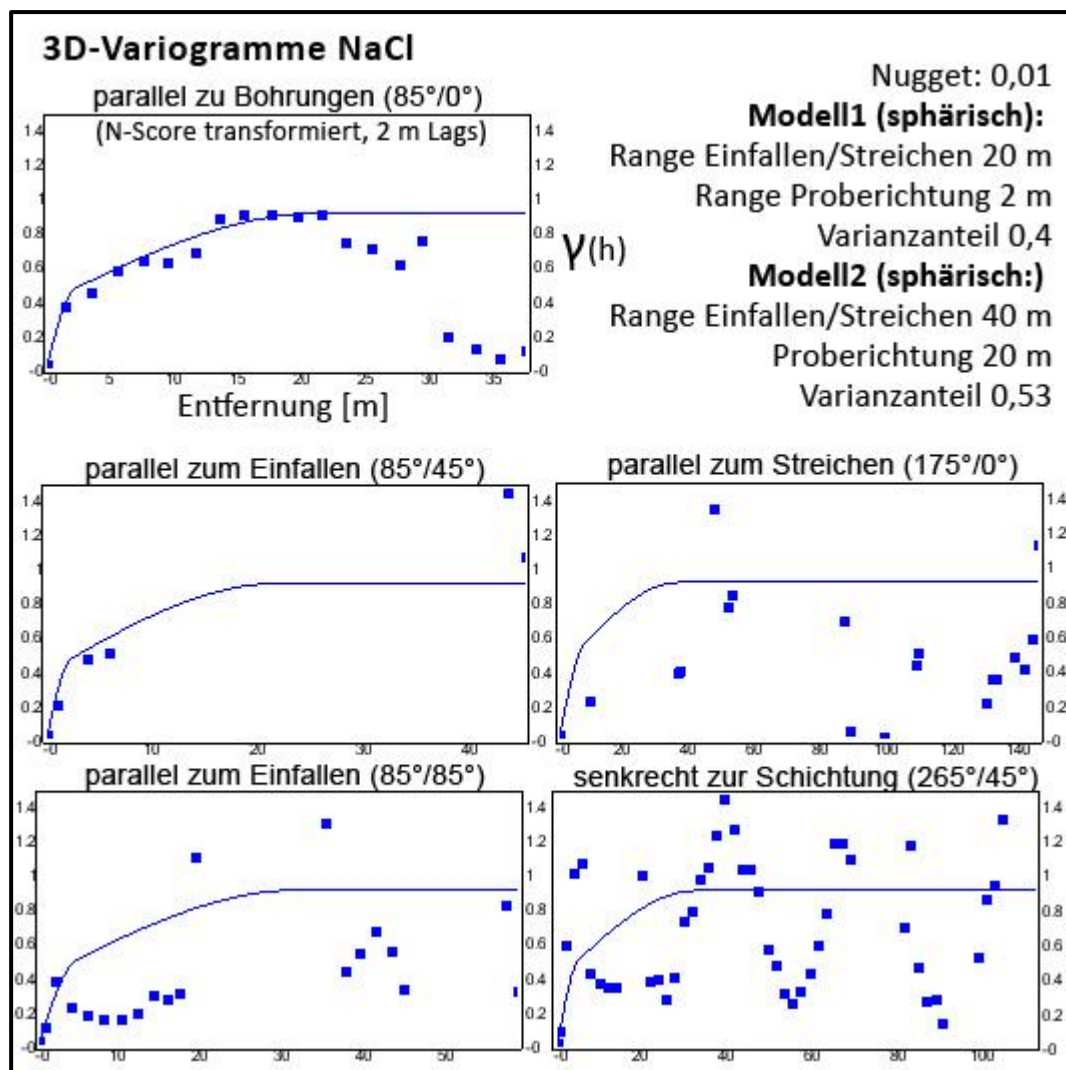


Abbildung 5.3: 3D-Variogramme des NaCl-Gehalts in Lager 28 (γ = Semivarianz).

5.4.2 Interpolationsmethode und Auflösung

Nach Durchführung des Standard-Kriging-Verfahrens (*Ordinary Kriging*) wurde dasselbe insoweit modifiziert, dass eine Korrelation mit der Entfernung des jeweiligen Blocks von der Lagergrenze berücksichtigt wurde, um die größere Ähnlichkeit entlang der Schichtung noch stärker einfließen zu lassen. Dies geschah durch Anwendung des *Kriging-with-an-External Drift*-Verfahrens (siehe KAY und DIMITRAKOPOULOS, 2000). Im Ergebnis führte diese zusätzliche Bedingung lokal in der Nähe vorhandener Proben zu guten Ergebnissen, in großer Entfernung jedoch zu einer starken Überbewertung dieser Zusatzbedingung, sodass häufig Werte mit über 100 % NaCl-Gehalt und eine entsprechende Verschiebung der Verteilungskurve zu verzeichnen waren. *Ordinary Kriging* erzielte in der Gesamtbetrachtung die besten Ergebnisse und wurde weiterführend für die Interpolation genutzt.

Abbildung 5.4 verdeutlicht die Ergebnisse der Interpolation des Lagers 28 mittels *Ordinary Kriging* entsprechend dem zuvor erläuterten Variogramm-Modell in Gitternetzen mit unterschiedlicher Auflösung, nämlich quadratischen Blöcken mit 1 m, 2 m und 4 m Kantenlänge. Die Profilansicht verdeutlicht sehr gut den Einfluss der unterschiedlichen Probenabstände. Im Gitter mit einer Blockgröße von 1 m Kantenlänge konnte im Nahbereich der Beprobung die Schichtung relativ gut abgebildet werden. In vertikaler Richtung liegen zwischen zwei Bohrungen hingegen 30 oder mehr Blöcke, sodass dort kein sinnvolles Ergebnis resultiert. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Blockgröße ab. Gleichzeitig verwischen der Detaillierungsgrad und die erkennbare Schichtung entlang der Hauptproberichtung. Das Ergebnis ist eine starke Homogenisierung der Daten. Dieser Sachverhalt spiegelt sich gut im Vergleich der Histogramme der Input und jeweiligen Output-Daten wider (Abbildung 5.4).

Die Blockgröße und die resultierende Auflösung wirken sich in einer Vorratsberechnung auch unmittelbar auf das Gesamtvolumen aus. Wird die Interpolation wie hier innerhalb eines zuvor generierten dreidimensionalen Körpers angewendet, muss das Gitternetz zuerst auf diesen Körper begrenzt werden, wobei zwischen Integration und Ausschließung der jeweils angeschnittenen Blöcke entlang der Schichtgrenze entschieden werden muss. Je nach vorliegender Lagerstättencharakteristik kann der resultierende Volumenunterschied enorm sein.

Im vorliegenden Fall ist im Gitter mit 4 m Kantenlänge der Blöcke fast eine Verdopplung des Kristallsalzvolumens von 11,1 auf 20,1 Mio. m³ (im gesamten Untersuchungsgebiet) bei Integration der randlichen Blöcke zu beobachten. Bei höherer Auflösung und einer Blockgröße von 1 m Kantenlänge variiert das Volumen nur zwischen 14,2 und 16,6 Mio. m³. Eine realistische Aussage über die Gesamttonnage und Qualität lässt sich im vorliegenden Fall nur durch Kombination beider Auflösungen erzielen. So ist zuerst die Wertstoffinterpolation innerhalb von Blöcken mit 4 m Kantenlänge und Integration angeschnittener Blöcke durchzuführen. Die Ergebnisse sind anschließend in ein feineres Gitter mit 1 m Blockkantenlänge zu übertragen und ohne Integration angeschnittener Blöcke mit der Schichtgrenze zu verschneiden. Im Ergebnis steht eine mengenmäßig konservative Schätzung mit einer guten Aussagekraft zu Qualität und Qualitätsverteilung.

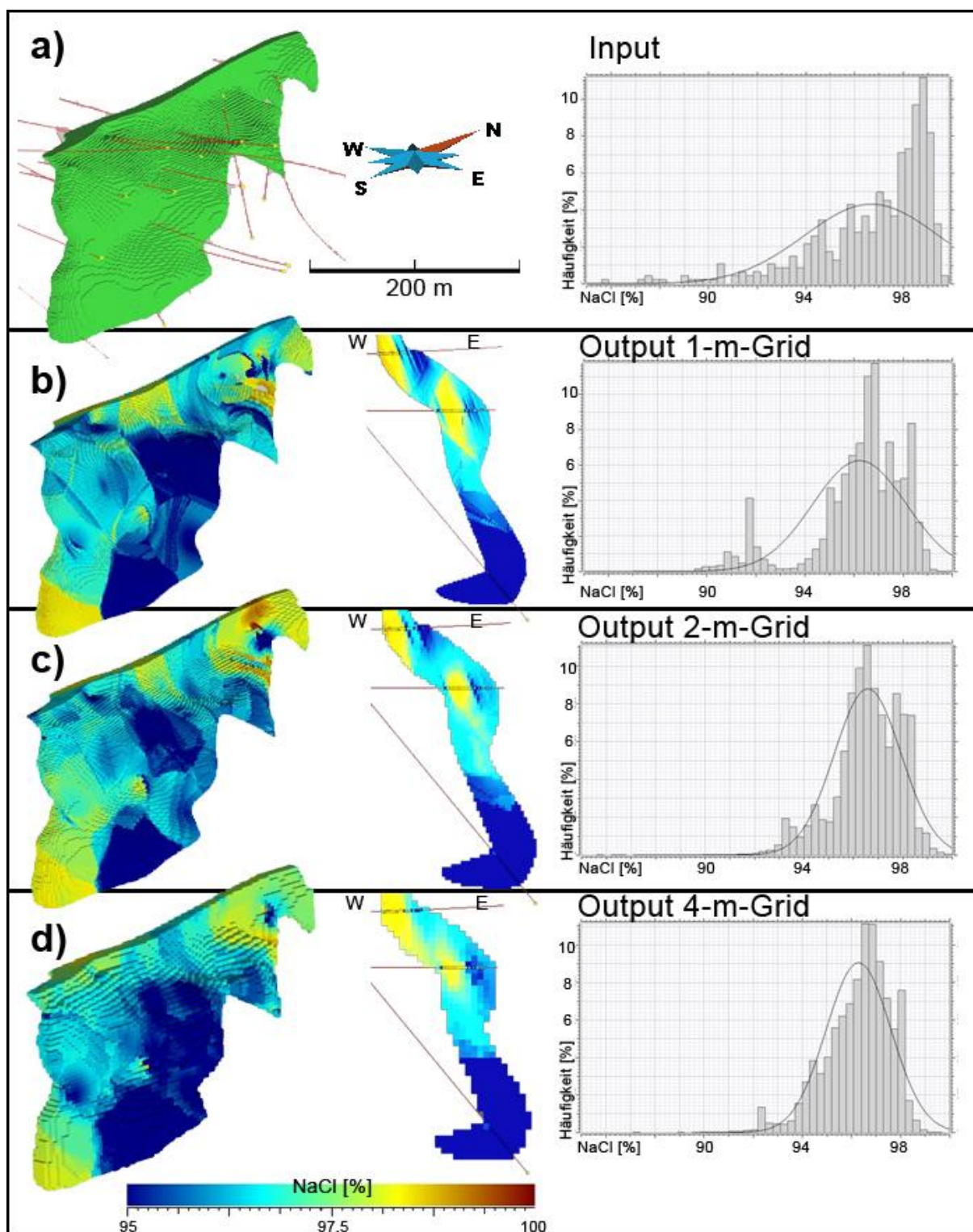


Abbildung 5.4: Ergebnisvergleich der Ordinary-Kriging-Interpolation in Lager 28 mit verschiedenen Blockgrößen: a) Darstellung des Lagers 28 und der Aufschlüsse durch Bohrungen (rot) sowie Histogramm der Eingangsdaten, b) Interpolationsergebnisse im 1-m-Grid, c) Interpolationsergebnisse im 2-m-Grid, d) Interpolationsergebnisse im 4-m-Grid.

5.4.3 Validierung

Im Untersuchungsgebiet sind kontinuierliche Geometrien generell selten. Einzelne Kristallsalzlager können zwar teilweise über hunderte Meter entlang der Muldenstrukturen verfolgt werden, sind jedoch sehr variabel bezüglich Streichrichtung, Einfallen und Mächtigkeit. Eine Untergliederung des Untersuchungsgebietes in Teilbereiche mit einer relativ homogenen Geometrie würde jedoch zu immer mehr und kleineren Betrachtungsebenen und erheblichem Mehraufwand führen. Aus diesem Grund wird für die weitere Bearbeitung eine globale Interpolation des gesamten Untersuchungsgebietes vorgenommen. Als Grundlage hierfür wird in einem ersten Schritt für alle Komponenten unabhängig voneinander jeweils ein Variogramm-Modell anhand experimenteller Variogramme erstellt.

Anhand der hauptsächlich steilstehenden und annähernden N-S verlaufenden Streichrichtung werden die Ellipsoide ausgerichtet ($90^\circ/90^\circ$). Je nach Komponente variiert die Reichweite zwischen 35 m (MgSO_4) und 85 m (CaSO_4) parallel zum Einfallen und zwischen 20 m (MgSO_4) und 40 m (NaCl) senkrecht dazu. Die höchste Varianz (0,9) und der größte Anteil des *Nugget*-Effekts (0,1) sind bezüglich des CaSO_4 -Gehalts zu verzeichnen. Die niedrigste Varianz (0,4) und den niedrigsten Anteil des *Nugget*-Effekts (0,02) weist das Modell für den MgSO_4 -Gehalt auf.

Der maximale Suchradius für die Anwendung des *Ordinary Kriging*-Verfahrens beträgt für alle Komponenten 50 m. Dieses findet in einem Gitter mit Blöcken von 4 m Kantenlänge statt. Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse der Interpolation der jeweiligen Komponenten. MgSO_4 - und KCl -Gehalt weisen Bereiche auf, an denen kein Interpolationsergebnis vorliegt (schwarz gefärbt). Ursache hierfür ist, dass die jeweilige Ellipsoid-Reichweite relativ klein gewählt wurde und die nächstgelegenen Proben in diesem Bereich über 50 m entfernt sind. Zusätzlich liegen vor allem in den südlichen Bohrungen nicht immer Messungen bezüglich des KCl -Gehalts vor. Der Vergleich der Input- und Outputdaten zeigt generell eine starke Homogenisierung der Outputdaten (Abbildung 5.6). Dies ist nicht zuletzt durch die gewählte 4-m-Blockgröße zu erklären, da entlang der Hauptbeprobungsrichtung bis zu vier Werte innerhalb eines Blocks gemittelt werden. Das hat auch zur Folge, dass im Randbereich der Histogramme geringere Häufigkeiten auftreten. So sind sehr niedrige CaSO_4 -, MgSO_4 - und KCl -Gehalte im Input-Datensatz viel häufiger als im Output-Datensatz vertreten.

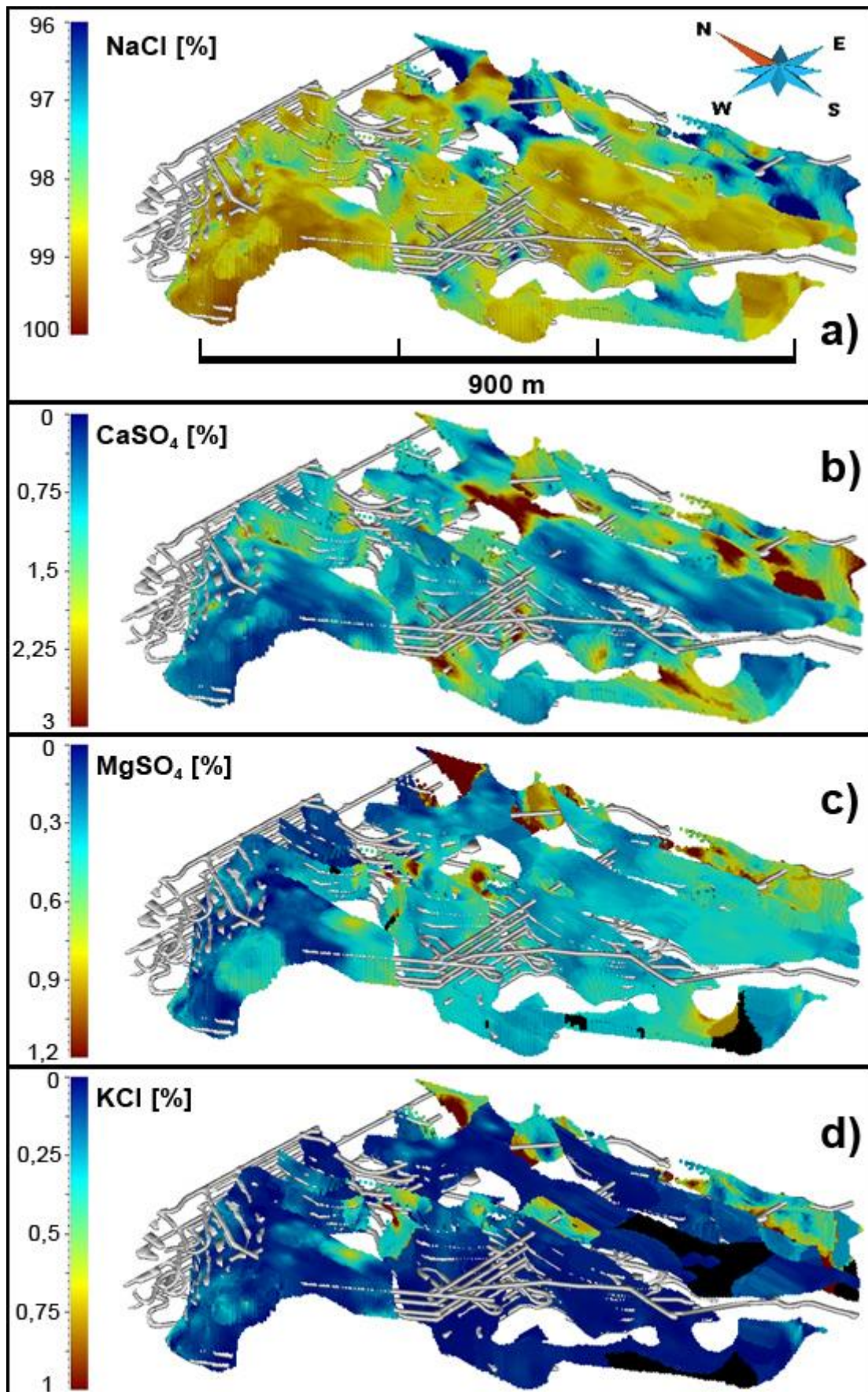


Abbildung 5.5: Interpolationsergebnisse der einzelnen Komponenten (4 m Blockgröße, Ordinary Kriging): a) NaCl-Gehalt, b) CaSO₄-Gehalt, c) MgSO₄-Gehalt, d) KCl-Gehalt. Schwarz dargestellte Blöcke enthalten keine Daten.

Dieser Effekt verstärkt sich mit der relativen Häufigkeit der jeweiligen Komponente. So sind die erzielten Ergebnisse für die Interpolation des NaCl- und CaSO_4 -Gehalts noch sehr nah an den statistischen Kenngrößen der Input-Daten. MgSO_4 - und KCl-Gehalt sind hingegen stark erhöht. Hier fehlt vor allem die Fraktion der sehr niedrigen Werte. Das liegt in erster Linie an dem schwachen räumlichen Einfluss von Werten, die gegen Null gehen. In größerer Entfernung einzelner Proben, beispielsweise zwischen zwei Profilbohrungen, führt der relativ große Suchradius von 50 m dazu, dass die sehr niedrigen Werte stark unterrepräsentiert sind.

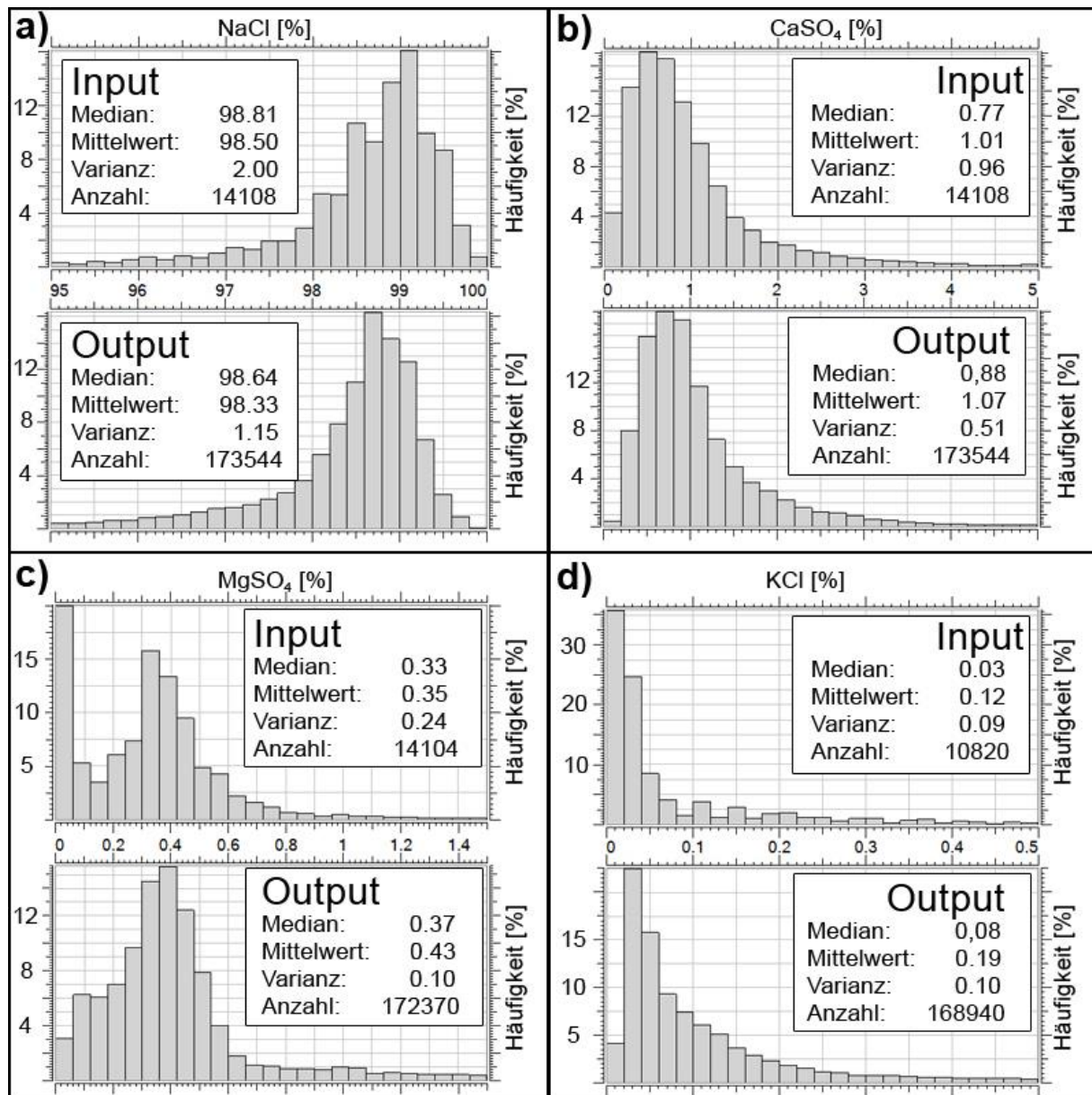


Abbildung 5.6: Vergleich von Eingangs- und Ausgangsdaten der Eigenschaftsmodelle der jeweiligen Komponenten (4 m Blockgröße, Ordinary Kriging): a) NaCl-Gehalt, b) CaSO_4 -Gehalt, c) MgSO_4 -Gehalt, d) KCl-Gehalt.

5.5 Schlussfolgerungen

Der hier entwickelte Ansatz einer expliziten Modellierung in Form der Interpolation von interpretationsbasierten Initialflächen ist zeitaufwändig, garantiert jedoch eine belastbare Grundlage für eine nachfolgende visuelle Auswertungen der Lagerstättengeometrie und die räumliche Interpolation unterschiedlicher Attribute. Die Interpolationsergebnisse der Blockmodellierung stellen die räumliche Verteilung der einzelnen Komponenten generell in befriedigender Weise dar und dienen im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Grundlage zur Interpretation räumlicher Abhängigkeiten und Trends.

6 Ergebnisse

6.1 Strukturbau

Die N-S bis NNW-SSE streichenden Faltenstrukturen lassen sich in der Salzstruktur des oberen Allertals häufig über weite Distanzen von mehreren hundert bis tausend Metern verfolgen, können jedoch auch auf relativ kurze Distanz stark veränderte Deformationsmuster aufweisen, gegeneinander versetzt sein oder in Streichrichtung auslaufen (BEHLAU und MINGERZAHN, 2001). Die strukturelle Untersuchung hat gezeigt, dass diese Aussagen auch auf das Untersuchungsgebiet zutreffen. Entlang der Streichrichtung laufen einige Sattelstrukturen teilweise aus oder sind senkrecht zur Streichrichtung stark versetzt. Nicht selten ist auch eine Aufspaltung in mehrere kleinere Sattelstrukturen zu beobachten. Dementsprechend ist eine Korrelation von Sattel- und Muldenstrukturen zwischen den 100 m voneinander entfernten Profilen je nach Aufschlussdichte stark erschwert.

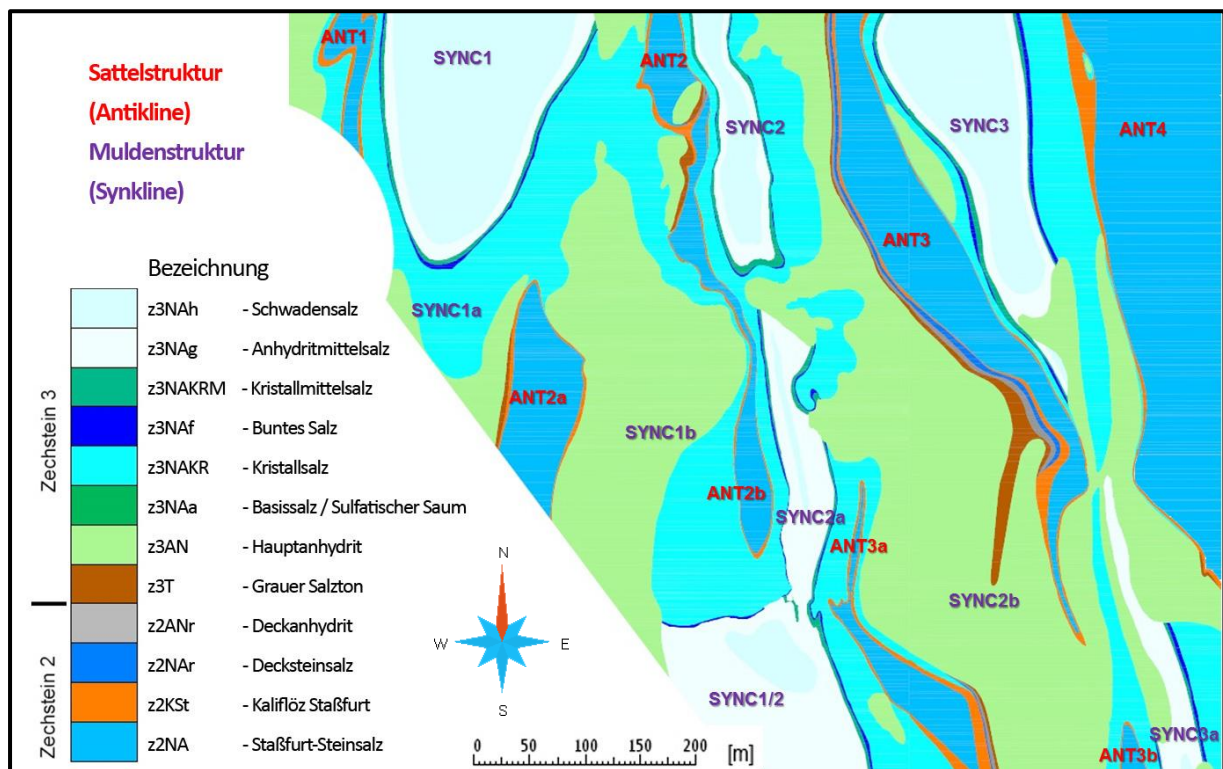


Abbildung 6.1: Grundriss der 471 m-Sohle mit identifizierten Hauptstrukturelementen (modifiziert nach esco, 2012)

Abbildung 6.1 stellt die Grundrisskonstruktion der 471 m-Sohle und die im Untersuchungsgebiet identifizierten Hauptsattel- und Muldenstrukturen dar. Insgesamt konnten vier Hauptsattelstrukturen identifiziert werden: Ein westlicher Sattel (ANT1), zwei zentrale Sättel (ANT2 und ANT3), sowie der an der Nordostflanke der Allertalzone gelegene östliche Randsattel (ANT4). Entsprechend ergeben sich drei Hauptmulden (SYNC1, SYNC2 und SYNC3). Richtung Süden spalten sich die beiden zentralen Sattelstrukturen jeweils auf,

sodass dort vier Sattel- (ANT1a, ANT1b, ANT3a und ANT3b) und entsprechend zusätzliche Muldenstrukturen vorliegen (SYNC1a, SYNC1b, SYNC1/2, SYNC2a, SYNC2b und SYNC3a). Die vorgenommene Nomenklatur dieser Teilstrukturen wird nachfolgend verwendet, um eine vereinfachte Orientierung im Untersuchungsgebiet zu gewährleisten.

6.1.1 Salzbasis

Als Salzbasis ist die Schichtgrenze zwischen Staßfurt-Steinsalz (z2NA) und Basalanhydrit (z2AN) festgelegt, welche im Untersuchungsgebiet durch konkrete Bohrlochaufschlüsse und vereinzelt auch Bohrlochradarmessungen nachgewiesen ist. Abbildung 6.2 zeigt alle Aufschlusspunkte der Salzbasis im Untersuchungsgebiet und die Ergebnisse einer automatisierten Triangulation dieser Schichtgrenze sowie leicht transparent die im Hangenden gelegene Außenkontur des Staßfurt-Steinsalzes (z2NA). Die Salzbasis steigt aus einer Tiefe von etwa -560 m NN im NW des Untersuchungsgebietes bis auf ca. -510 m NN im SE an. Zwischen den Profilen 75 und 77 ist eine relativ hohe Aufschlussdichte gegeben, und es ist lokal ein markanter Anstieg der Salzbasis von NNE nach SSW von über

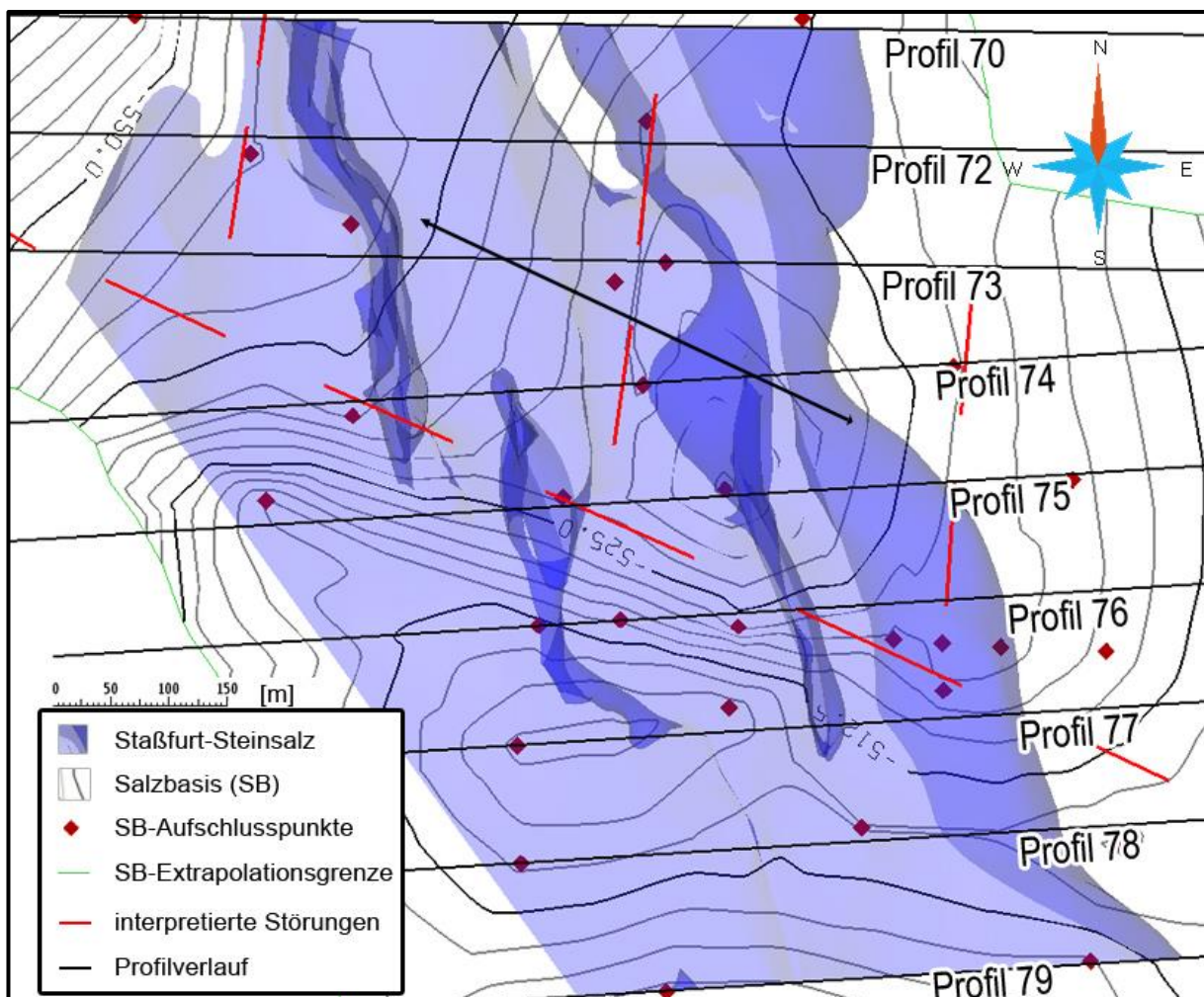


Abbildung 6.2: Ergebnis der geometrischen Modellierung der Salzbasis (Aufsicht). In verschiedenen Blautönen ist leicht transparent die Hangendgrenze des Staßfurt-Steinsalzes (z2NA) dargestellt. Dunklere Bereiche kennzeichnen den Verlauf der Sattelstrukturen.

15 m auf 100 m Entfernung in dieser Richtung zu verzeichnen. In Profil 77 erreicht die Salzbasis seine geringste Tiefenlage von -505 m NN und fällt von dort aus Richtung Süden wieder flach ein. Im Bereich des Profils 79 ist sie wieder in einer Tiefe von -520 m NN anzutreffen.

Mit Hilfe einer starken Überhöhung der interpolierten Fläche können mehrere Störungen interpretiert werden. Dies ist zum einen eine herzynisch streichende Störung, welche die subsalinare Hochlage im Bereich des Profils 77 nach Norden begrenzt, sowie untergeordnet mehrere NNE-SSW streichende Querlineamente, die auf die herzynisch streichende Störung zulaufen (Abbildung 6.2). Im weiteren Sinne entspricht dies den Beobachtungen von SCHACHL (1991) sowie ZEIBIG und BECKER (2002) etwas nördlich des Untersuchungsgebietes, wo eine im Nordosten gelegene Tiefscholle stark gegen eine im Südwesten gelegene Hochscholle versetzt ist. Im Untersuchungsgebiet sind jedoch weitaus geringere Versatzbeträge und eine Verkipfung des nordöstlichen statt des südwestlichen Blocks zu verzeichnen. Auch BEST und ZIRNGAST (2002) proklamieren für den Bereich des Untersuchungsgebietes etwa NW-SE streichende Störungen, jeweils mit einem abgeschobenen Hangendblock im Nordosten. Die hier beobachtete herzynische Streichrichtung entspricht nach BEST und ZIRNGAST (2002) der erwarteten Streichrichtung von En-échelon-artigen Querverbindungen zwischen den NE-SW verlaufenden Hauptabschiebungen. Die Streichrichtung der interpretierten annähernd NNE-SSW verlaufenden Querverbindungen ist bisher nur bezüglich Kluftstrukturen und Scherbrüchen im Suprasalinar beobachtet worden und spiegelt die Hauptkompressionsrichtung während der kretazischen Inversion wider. Die Querverbindungen können als Entspannungszonen zwischen den NW-SE bis WNW-ESE verlaufenden Hauptstörungen angesehen werden und stehen im Einklang mit Paläostressanalysen im Umfeld des Untersuchungsgebietes (BEST und ZIRNGAST, 2002; BRANDES et al., 2013; LOHR, 2007).

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen den Deformationstrukturen des Subsalinars und des Salinars, der besonders gut durch Betrachtung der Staßfurt-Steinsalz-Sattelstrukturen deutlich wird. Diese sind in etwa parallel zur herzynisch streichenden Störung lateral versetzt (Abbildung 6.2, schwarzer Pfeil). Die südwestlich gelegene Sattelstruktur ANT3a weist direkt über der subsalinen Hochlage ein Umbiegen des Streichens parallel zu der Hauptstörung auf.

6.1.2 Sattelstrukturen

Abbildung 6.3 zeigt die Außenkontur der Staßfurt-Steinsalz-Sattelstrukturen im Untersuchungsgebiet und die jeweilige Benennung der Sattel- und Muldenstrukturen. Während im Norden noch relativ mächtige Strukturen anstehen, sind diese in Richtung Süden häufig stark ausgedünnt und durch gegen- oder übereinander geschobene

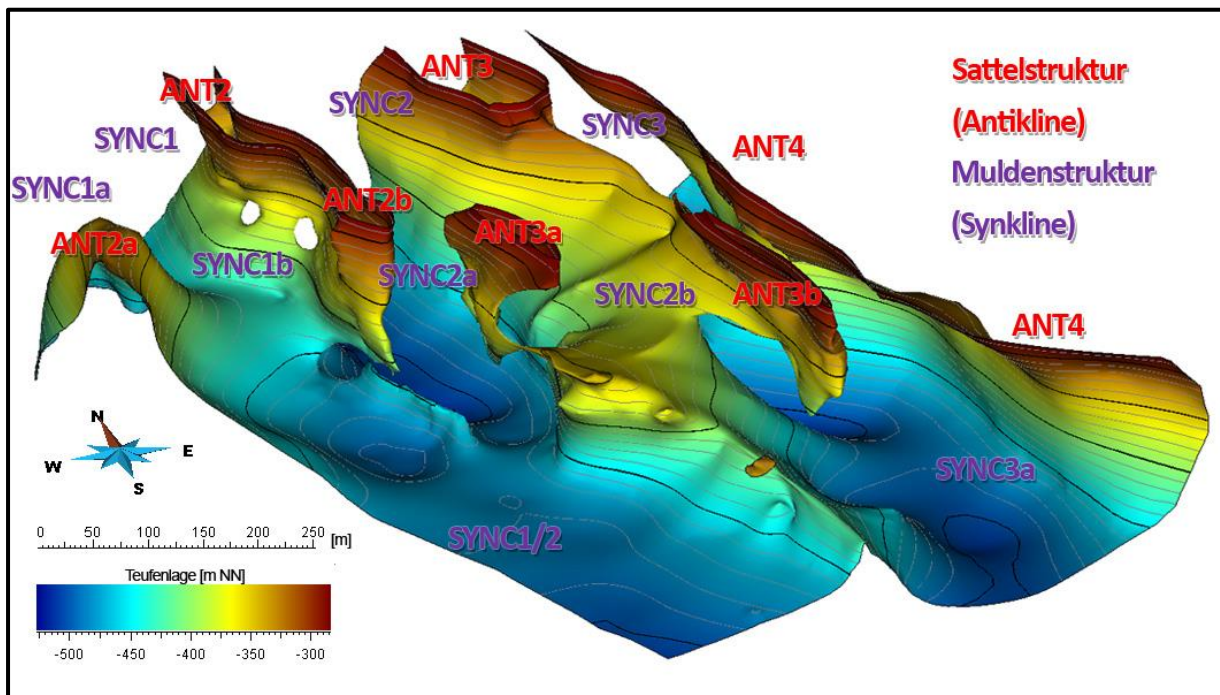


Abbildung 6.3: Ergebnis der geometrischen Modellierung des Staßfurt-Steinsalz (z2NA) und Kennzeichnung der Hauptstrukturelemente.

Hauptanhydritblöcke von ihrer Wurzelzone abgequetscht. Die Sattelstrukturen streichen in der Regel NNW-SSE, wobei im Westen eine starke Ostvergenz und im Osten eine starke Westvergenz vorliegt. Im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes stehen die Strukturen relativ steil und sind teils leicht ost-, teils leicht westvergent ausgebildet. Der Scheitelpunkt der Strukturen liegt meist oberhalb der 390 m-Sohle und ist entsprechend nur für die Sattelstruktur ANT2a abgebildet, wo dieser auf -430 m NN liegt. Die meisten Strukturen erreichen ihren Scheitelpunkt in einer Tiefe von ca. -300 m NN. Nur die Sattelstruktur ANT3 und der östliche Randsattel ANT4 erreichen den Salzspiegel, der in diesem Bereich bei ca. -150 m NN liegt.

Der Randsattel ist durchgehend sehr breit, meist mit weit über 100 m Mächtigkeit ausgebildet. Im Gegensatz dazu ist der Großteil der Sattelstrukturen sehr schmal (< 30 m) ausgebildet, mit Ausnahme der Strukturen ANT2a und ANT3, die meist 60 m bis 90 m mächtig sind. An den Flanken der Sattelstrukturen sind Hauptanhydritblöcke bis auf unterschiedliche Sohlenniveaus emporgeschleppt worden. Im nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes liegen die Blöcke an der Westflanke meist auf höheren Sohlenniveaus als an der Ostflanke. Im Süden und Südwesten des Untersuchungsgebietes ist auf Grund der speziellen Situation über der subsalinaren Hochlage diesbezüglich keine klare Aussage zu treffen. Auffällig ist, dass vor allem die nördlichen Strukturen meist durch z3AN-Blöcke aus westlicher Richtung abgequetscht wurden. Im Süden verkomplizieren Überschiebungs- und Rotationsbewegungen der Anhydritblöcke das Erscheinungsbild. Alle Beobachtungen sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Geometrische Kenngrößen der Staßfurt-Steinsalz-Sattelstrukturen im Untersuchungsgebiet (schmal < 30 m; normal = 30 m bis 60 m; breit = 60 m bis 90 m; sehr breit > 90 m; S = Sohle).

	ANT1	ANT2	ANT2a	ANT2b
Vergenz	stark nach Ost	unten leicht nach Ost bis oben leicht nach West	keine	teils leicht nach Ost und teils leicht nach West
Scheitelpunkt	ca. -400 m NN	ca. -300 m NN	ca. -430 m NN	ca. -300 m NN
Breite (403 m S)	schmal	normal, teils breit	nicht vorhanden	schmal, teils normal
Breite (471 m S)	schmal	schmal, teils abgequetscht	breit	schmal
Breite (553 m S)	schmal	schmal	sehr breit	schmal, teils nicht vorhanden
Top z3AN (Westflanke)	ca. -450 m NN	ca. -450 m NN	ca. -430 m NN	ca. -420 m NN
Top z3AN (Ostflanke)	ca. -550 m NN	ca. -570 m u NN.	ca. -490 m NN	ca. -490 m NN
Streichrichtung	N-S	NNW-SSE	NNE-SSW	NNW-SSE
Bemerkung	von z3AN-Block von Westen her überschoben	von z3AN-Block von Westen her abgequetscht	z3AN-Block scheint an Ostflanke abgeglitten	von z3AN-Block von Westen her abgequetscht
	ANT3	ANT3a	ANT3b	ANT4
Vergenz	nördlicher Teil nach Ost und südlicher Teil nach West	im oberen Bereich teils stark nach Ost	teils leicht nach Ost und teils leicht nach West	stark nach West
Scheitelpunkt	im Norden vermutlich bis Salzspiegel	ca. -350 m NN	ca. -300 m NN	bis Salzspiegel
Breite (403 m S)	breit	schmal	schmal	sehr breit
Breite (471 m S)	breit	schmal, teils abgequetscht	schmal, teils nicht vorhanden	sehr breit
Breite (553 m S)	schmal (Norden), sehr breit (Süden)	nicht vorhanden	nicht vorhanden	sehr breit
Top z3AN (Westflanke)	ca. -300 m NN	unklar (ca. -490 m NN)	unklar (ca. -470 m NN)	ca. -490 m NN, im Süden bis Salzspiegel
Top z3AN (Ostflanke)	im Norden ca. -450 m NN	unklar (ca. -420 m NN, teils -300 m NN)	unklar (ca. -470 m NN)	unklar
Streichrichtung	NNW-SSE	NNW-SSE	NNW-SSE	NNW-SSE
Bemerkung	auflagernder z3AN-Block scheint eine Rotationsbewegung vollzogen zu haben	von Osten her durch z3AN-Block abgequetscht	Relikt einer Tauchfalte von ANT4 oder von Westen her durch z3AN-Block abgequetscht	breiter östlicher Randsattel

6.1.3 Muldenstrukturen

Die Muldenstrukturen sind eng an den Verlauf und die Ausbildung der Sattelstrukturen geknüpft. Es liegt ebenfalls eine Ostvergenz im Westen und eine Westvergenz im Osten vor. Die vorwiegende N-S-Streichrichtung der nördlichen Muldenachsen weicht leicht von den dortigen Sattelstrukturen ab, gleicht sich nach Süden jedoch der vorherrschenden NNW-SSE-Streichrichtung an. Durch die Verzweigung der Sattelstrukturen im Süden ergeben sich hier teilweise auch schmalere Muldenstrukturen. Diese weisen meist einen negativen Öffnungswinkel auf, sind also in tieferen Bereichen breiter als in flachen Bereichen ausgebildet. Dies trifft auch auf die östlichen Muldenstrukturen SYNC3 und SYNC3a zu, die in der Regel von der Randsattelstruktur von Osten her überlagert werden. Asymmetrisch ausgebildete Muldenschenkel sind nur in den ostvergenten Muldenstrukturen im Nordwesten zu beobachten. Hier weisen die Ostschenkel der Muldenstrukturen teils ein Vielfaches der Mächtigkeit der Westschenkel auf. Ausnahme ist die Zwischenmulde SYNC1b, in welcher dieser Sachverhalt entgegengesetzt zu beobachten ist. Wo Hauptanhydrit vorhanden ist, weist er zumeist einen unregelmäßigen Verlauf und große Mächtigkeitsschwankungen auf. Grundsätzlich lassen sich qualitative Aussagen über das Vorhandensein von Klippenstrukturen und deren Einfluss innerhalb der Muldenstruktur treffen. So ist der Einfluss im Nordwesten als relativ gering zu bewerten, während in Richtung Osten und Süden häufiger Mächtigkeitsanomalien zu beobachten sind und der Hauptanhydrit insgesamt mehr Raum innerhalb der Muldenstrukturen einnimmt. Ein Überblick über die geometrischen Kenngrößen der Muldenstrukturen ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2: Geometrische Kenngrößen der Muldenstrukturen im Untersuchungsgebiet (L = Lager; S = Sohle).

	SYNC1	SYNC1a	SYNC1b	SYNC2	SYNC2a
Vergenz	mäßig nach Ost	schwach nach Ost	keine	stark nach Ost	keine
Breite (403-m-S)	200 m	nicht vorhanden	nicht vorhanden	120–170 m	55 m
Breite (471-m-S)	> 300 m	180 m	140–180 m	120–180 m	70 m
Breite (553-m-S)	< 300 m	200 m	60–120 m	120–150 m	100 m
Öffnungswinkel	leicht negativ	leicht negativ	positiv	leicht positiv	negativ
Ø Muldenbreite	breit	breit	eher schmal	eher breit	schmal
Streichrichtung	N-S	NNW-SSW	N-S	N-S (NW-SE)	N-S
Mächtigkeitsasymmetrie	stark (Ost)	stark (Ost)	stark (West)	stark (Ost)	nein
Westflanke	L20	L20	L20aN, L20a	L16, L24N	L24
Ostflanke	L8a, L21	L8a	L20	L14N	L14
Klippeneinfluss (Hauptanhydrit)	mäßig	nicht vorhanden	stark	stark	mäßig
Geometrietyp (Profil 70/72/73)	1b	1a	2 (Westflanke)	2 (Ostflanke)	–
Geometrietyp (Profil 74/75/76)	–	–	2 (Westflanke)	–	2
Geometrietyp (Profil 77/78/79)	–	–	–	–	–
	SYNC2b	SYNC1/2	SYNC3	SYNC3a	
Vergenz	stark nach West	stark nach West	leicht nach West	leicht nach West	
Breite (403-m-S)	130–160 m	–	30–60 m	40–50 m	
Breite (471-m-S)	150–200 m	> 200 m	100–200 m	100–150 m	
Breite (553-m-S)	–	> 160 m	200 m	120–180 m	
Öffnungswinkel	leicht negativ	positiv	negativ	negativ	
Ø Muldenbreite	eher breit	breit	schmal (oben)	schmal (oben)	
Streichrichtung	NNW-SSE	NNW-SSE	NNW-SSE	NNW-SSE	
Mächtigkeitsasymmetrie	nein	nein	nein	nein	
Westflanke	L26	L24	L23	L28	
Ostflanke	L25, L31	L20a, L30	L22	L27	
Klippeneinfluss (Hauptanhydrit)	mäßig bis stark	stark	sehr stark	sehr stark	
Geometrietyp (Profil 70/72/73)	–	–	1b	–	
Geometrietyp (Profil 74/75/76)	1a	1b	–	3	
Geometrietyp (Profil 77/78/79)	1c	1b	–	–	

6.1.4 Hauptanhydrit und Gas-/Salzlösungsvorkommen

Abbildung 6.4 stellt die triangulierte Schichtgrenze des Hauptanhydrits über der Salzbasis, sowie alle im Untersuchungsgebiet angetroffenen Gas- und Salzlösungsvorkommen dar. Diese wurden zum überwiegenden Teil im Hauptanhydrit angetroffen. Im Gegensatz zu den Gasvorkommen, die auf das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt sind, scheinen sich die Lösungsvorkommen vor allem im Bereich der subsalinen Hochlage im Südosten zu konzentrieren. Von den insgesamt 15 Salzlösungsvorkommen wurden 11 in den massigen Hauptanhydritblöcken der östlichen Muldenstruktur (SYNC3/SYNC3a) angetroffen.

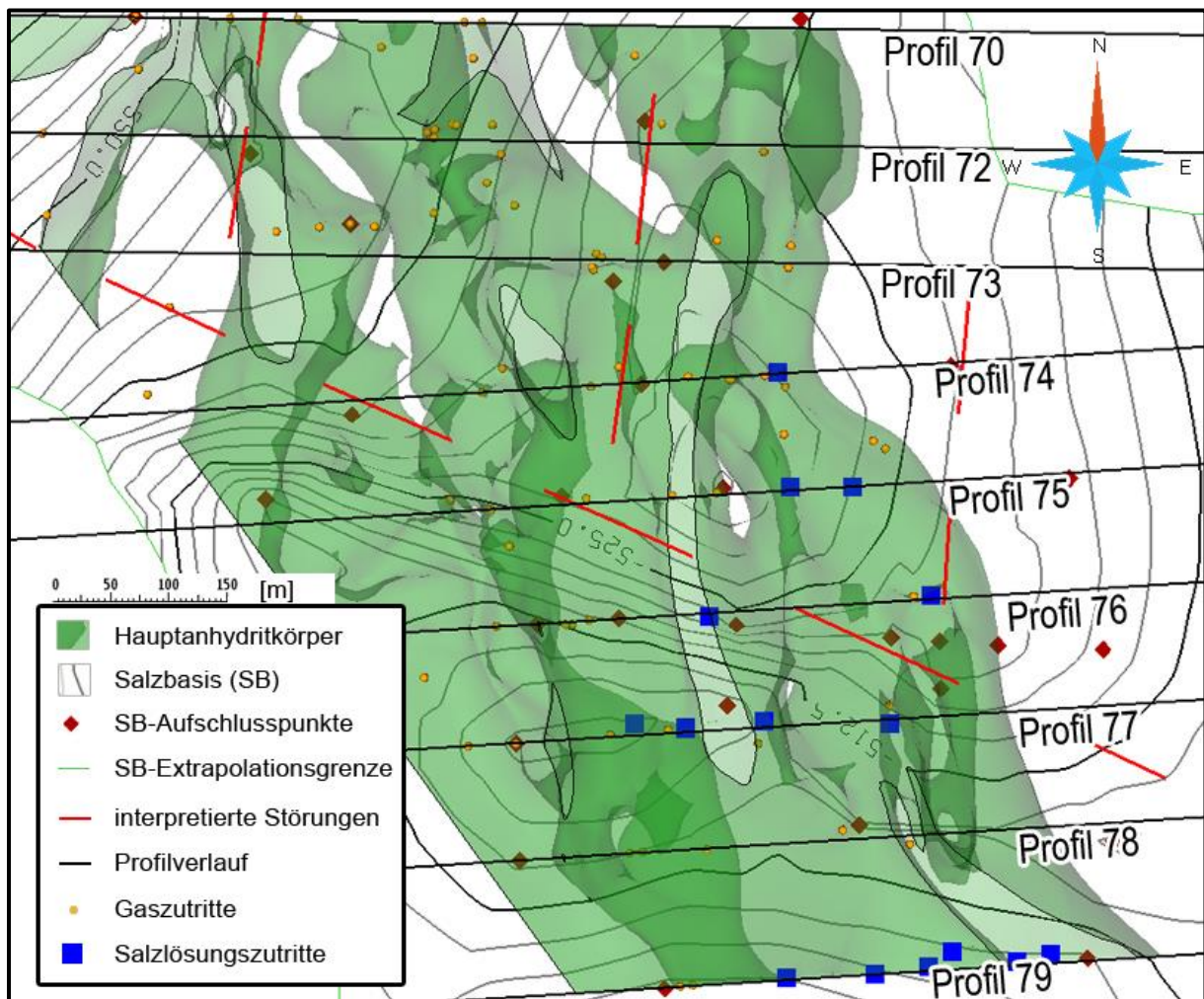


Abbildung 6.4: Ergebnis der geometrischen Modellierung des Hauptanhydrit (z3AN) und Darstellung der Gas- und Salzlösungszutritte im Untersuchungsgebiet (Aufsicht). In verschiedenen Grüntönen ist leicht transparent die Außenkontur des Hauptanhydrit dargestellt. Dunklere Bereiche kennzeichnen Überhänge und die Überlagerung mehrerer Anhydritblöcke.

Drei weitere Vorkommen wurden innerhalb des scheinbar von Osten her aufgeschobenen Hauptanhydritblocks in der Muldenstruktur SYNC2b im Bereich des Profils 77 registriert und eine weitere in tieferen Bereichen der westlichen Muldenstruktur SYNC1/2. Nach ZEIBIG und BECKER (2002) handelt es sich bei den Lösungszutritten aus dem Hauptanhydrit meist um hochkonzentrierte, MgCl_2 -betonte Salzlösungen, die grundsätzlich vom Nebengebirge abgeschlossen (intrasalinar) und somit endlich sind. Die Zutrittsmengen variierten im

Untersuchungsgebiet zwischen 2 m³ und 120 m³, wobei besonders hohe Zutrittsmengen in dem von Osten her überschobenem Anhydritblock im Bereich der Profile 76 und 77 oberhalb der Hochlage der Salzbasis auftraten.

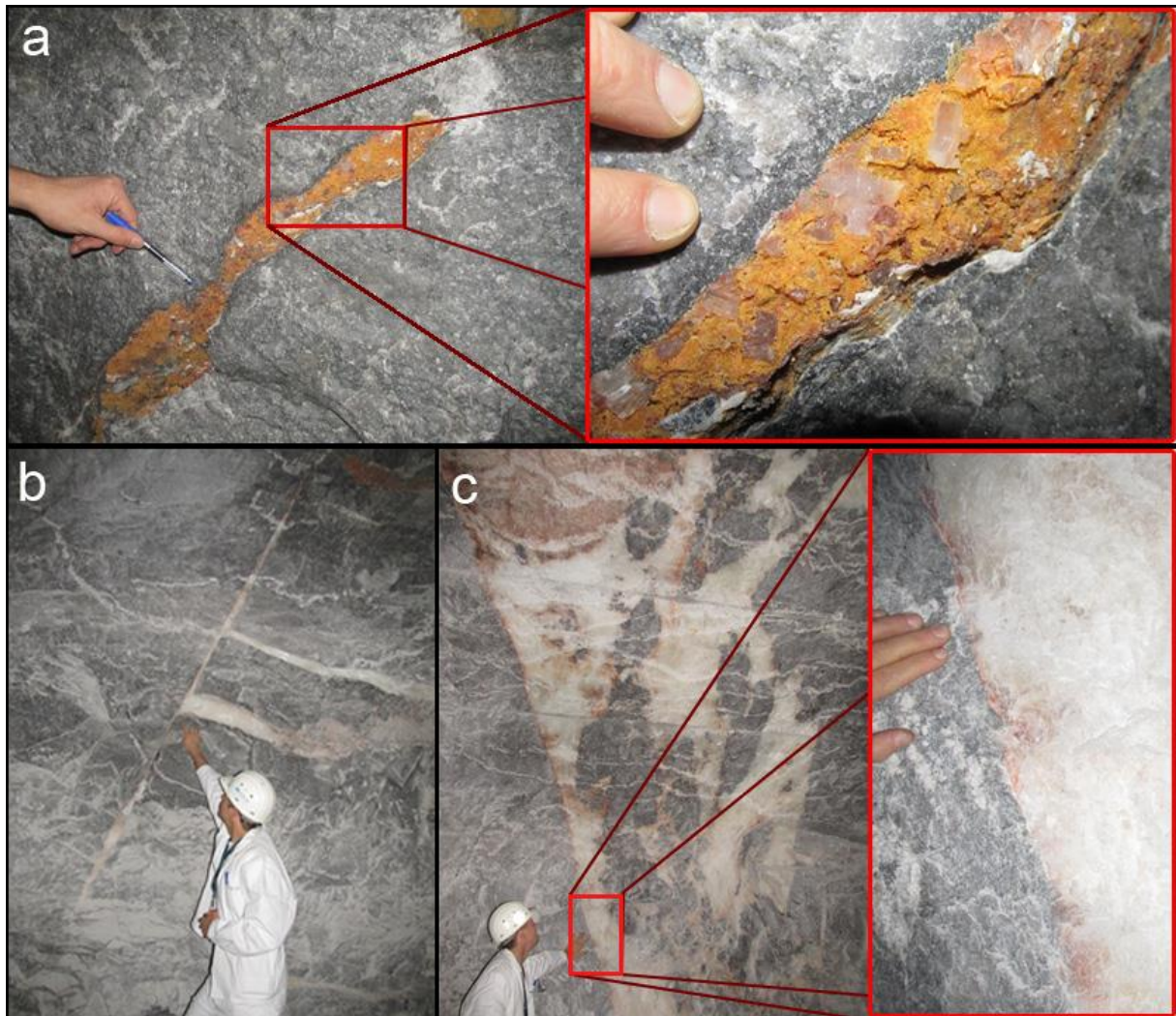


Abbildung 6.5: Kluftfüllungen im Hauptanhydrit. a) Idiomorphe Halitkristalle in einer zuckerkörnigen Carnallit-Matrix (521 m-Sohle). b) Mehrere senkrecht aufeinander stehende, mit Steinsalz verheilte Kluftgenerationen (502 m-Sohle). c) Zerrütteter Übergangsbereich Richtung Klippensalz mit scheinbar chaotisch aufgerissenen Klüften, in die Steinsalz eingedrungen ist. Meist ist ein rötlicher, carnallitischer Saum zu beobachten (502-m-Sohle).

Die räumliche Nähe der registrierten Zuflüsse deutet darauf hin, dass isolierte Vorkommen vorliegen, die über keine Verbindung in Form eines intakten Kluftsystems verfügen. Die Klüfte sind meist mit Steinsalz oder Carnallit gefüllt, teilweise stehen sie jedoch auch noch offen. So beschreibt HORN (2016) eine bis zu 10 cm offen stehende Kluft, die mit idiomorphen Halitkristallen und Sylvinlocken besetzt ist. In Abbildung 6.5 sind beispielhaft einige aufgeschlossene Hauptanhydrit-Kluftfüllungen und ein zerrütteter Übergangsbereich von Hauptanhydrit (z3AN) zu Basissalz (z3NAa) bzw. Klippensalz (z3NAKL, siehe S. 32) dargestellt.

Die Variation der Morphologie des Hauptanhydrits ist anhand der Ergebnisse der 3D-Modellierung besonders gut nachzuvollziehen (Abbildung 6.6). Pilzartige Klippenstrukturen ragen mitten in das hangende Kristallsalz. Dieses verläuft teilweise in tief eingeschnittenen, canyonartigen, teils undulierenden Einkerbungen inmitten des Hauptanhydrits. Neben den kreisförmigen Pilzstrukturen existieren auch langgestreckte Großklippen, die teilweise über mehrere hundert Meter verfolgbar sind. Generell zeichnen die Ergebnisse der Modellierung ein relativ weiches Bild einer mehr oder weniger zusammenhängenden Anhydritmasse. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass häufig nicht eindeutig geklärt werden kann, wo getrennte Blöcke vorliegen und wo eventuell zusammenhängende Bereiche existiert. Berühren sich zwei Blöcke oder sind übereinandergeschoben, werden sie im Modell unter Umständen als ein großer Block aufgelöst. Die weiche Interpolation und Minimierung der Rauigkeit der Fläche im Rahmen der Modellierung suggerieren eine Erscheinungsform, die mehr oder weniger einer rein plastischen Deformation wie der der umgebenden Salzgesteine entspricht. Abbildung 6.5 und eine Vielzahl weiterer Aufschlüsse weisen jedoch auf eine vorwiegend durch Bruchdeformation geprägte, weniger weiche Oberfläche des Hauptanhydrits hin. Ausnahmen sind pilzartige Klippenstrukturen, wie zuletzt von HORN et al. (2016) beschrieben, die ihre primäre plastische Diapirstruktur beibehalten haben und nicht oder nur schwach bruchdeformativ überprägt wurden.

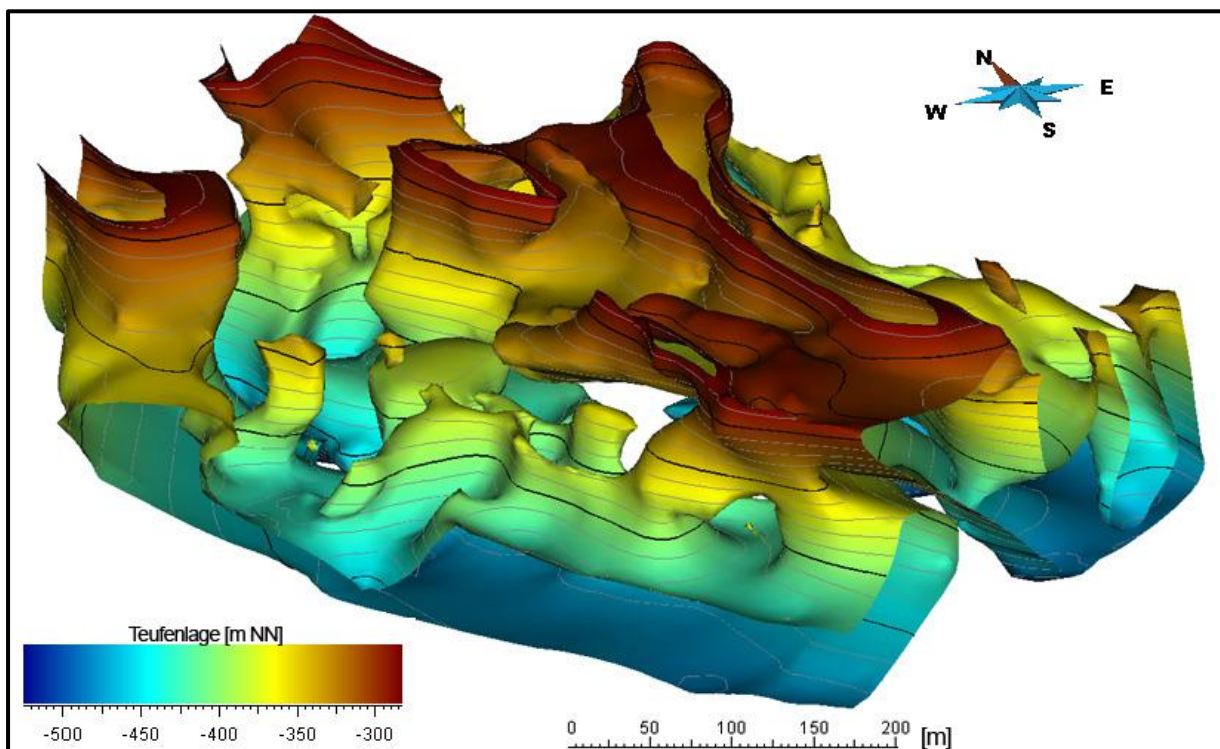


Abbildung 6.6: Ergebnisse der geometrischen Modellierung des Hauptanhydrits zwischen Profil 72 und 78 (3D-Ansicht).

6.1.5 Salzrand und Salzspiegel

Im Zentrum des Untersuchungsgebietes liegt der Salzspiegel bei -110 m bis -120 m NN (Abbildung 6.7). Der Übergang nach Osten hin zum Salzrand ist fließend. Dieser ist ganz im Osten in einer Tiefe von rund -450 m NN anzutreffen. Insgesamt verlaufen die Höhenlinien mehr oder weniger NNW-SSE, also parallel zur Gesamtstruktur. Zwischen Profil 70 und Profil 74 biegen die Höhenlinie jedoch markant nach WNW-ESE um. Weiter Richtung Osten zwischen den Profilen 74 und 76 ist sogar ein Umbiegen in Richtung W-E zu verzeichnen. Das Umbiegen ist hier abrupt entlang einer NNE-SSW verlaufenden Achse parallel zu den entlang der Salzbasis interpretierten Querverbindungen zu verzeichnen. Insgesamt verläuft der Salzrand relativ unregelmäßig und spiegelt die partielle Umgestaltung in Form von starken Einbuchtungen, bedingt durch den Prozess der Subrosion, gut wider. Eine weitestgehend tektonische Entkopplung des Liegenden und Hangenden durch das Zechsteinsalinar, wie unter anderem von BEST und ZIRNGAST (2002) beschrieben, ist auch im Untersuchungsgebiet grundsätzlich anzunehmen.

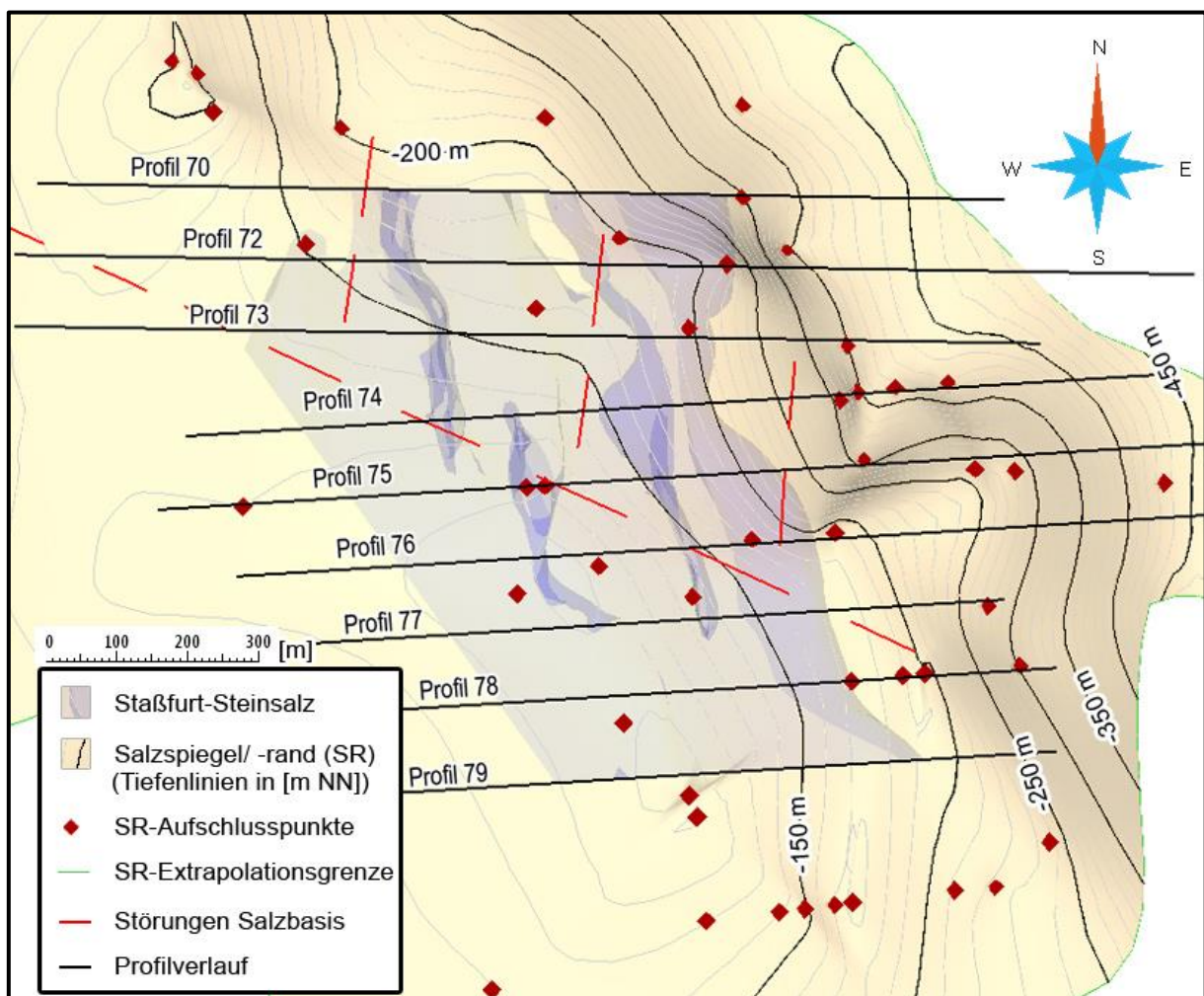


Abbildung 6.7: Ergebnis der geometrischen Modellierung des Salzspiegels und Salzrandes im Untersuchungsgebiet (Aufsicht). In verschiedenen Blautönen ist leicht transparent die Hangendgrenze des Staßfurt-Steinsalz (z2NA) dargestellt. Dunklere Bereiche kennzeichnen den Verlauf der Sattelstrukturen.

6.1.6 Geometrietypen

Anhand der beobachteten Lagerungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet wurden drei Typklassen für die geometrische Ausbildung der Muldenstrukturen identifiziert. Diese sollen gemeinsam mit den geometrischen Kenngrößen der Muldenstrukturen zur Identifizierung möglicher Einflussgrößen auf die Wertstoffverteilung innerhalb des Kristallsalzes beitragen. Diese Typklassen sind schematisch in Abbildung 6.8 dargestellt. Sie umfassen die Normalabfolge (Typ1), Staßfurt-Steinsalz im Zentrum einer synklinalen Großstruktur durch Abquetschen eines Primärsattels (Typ2) und Staßfurt-Steinsalz im Zentrum einer synklinalen Großstruktur durch eine Tauchfalte (Typ3). Typ1 ist weiterhin zu unterteilen in die ungestörte Normalabfolge ohne signifikanten Klippeneinfluss (Typ1a), die Normalabfolge mit einer zentralen, beidseitigen Anhydritklippendiskordanz (Typ1b) und die Normalabfolge mit einer einseitigen Hauptanhydritdiskordanz ohne signifikanten Klippeneinfluss (Typ1c). Klippeneinfluss und eine beidseitige Diskordanz kann grundsätzlich auch bei Typ 2 und Typ 3 vorkommen und wird entsprechend untergeordnet benannt. Alle Ausbildungsformen können relativ breit (ca. 150 m bis 200 m), als auch schmal (ca. 80 m bis 150 m) vorliegen. Die Einteilung der jeweiligen Muldenstruktur in eine der Typklassen ist in Tabelle 6.2 aufgeführt.

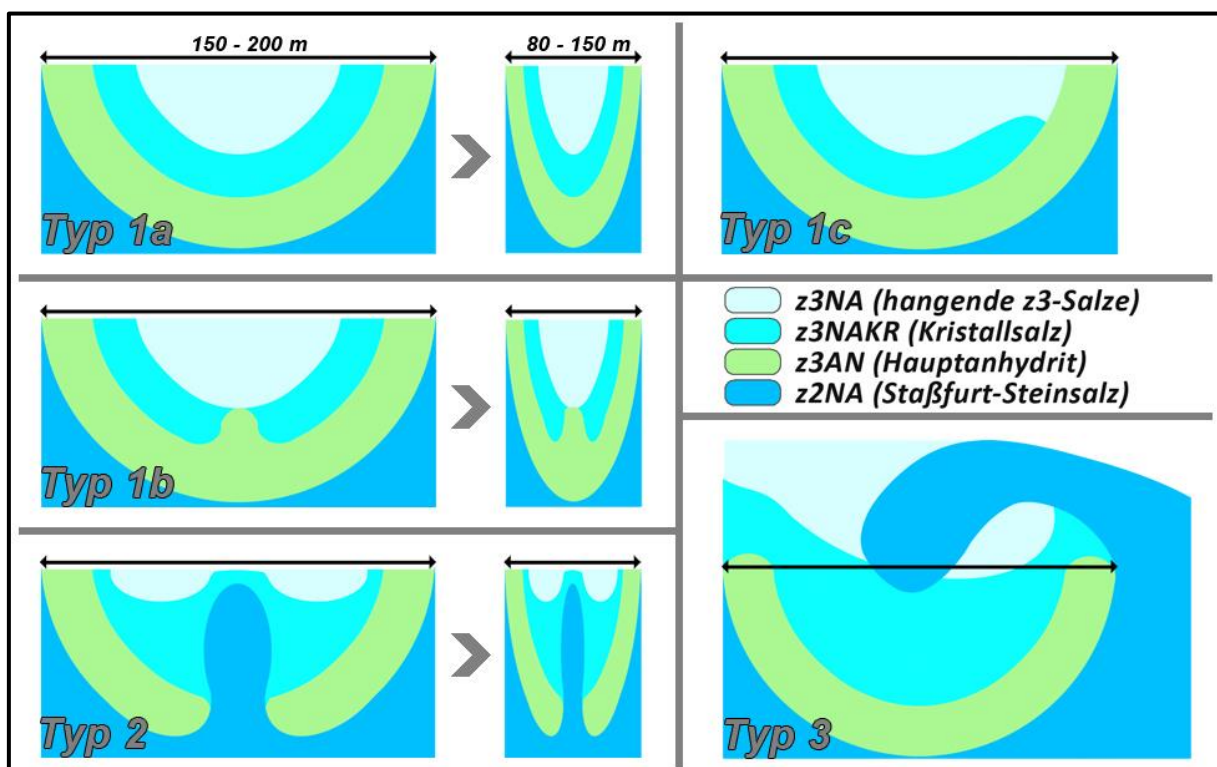


Abbildung 6.8: Typklassen für die geometrische Ausbildung der Muldenstrukturen (Schematische Darstellung von Profilen senkrecht zur NNE-SSW Streichrichtung der Salzstruktur).

6.2 Wertstoffverteilung

Nachfolgend werden räumliche Unterschiede der Wertstoffverteilung identifiziert und detailliert beschrieben. Nach einer Gesamtübersicht der Bohrkernanalysen im Untersuchungsgebiet werden die jeweiligen Steinsalzhorizonte einzeln von stratigraphisch alt nach jung behandelt, wobei ein Schwerpunkt auf der Betrachtung des Kristallsalzes liegt. Über 14.000 Proben stammen aus dem Kristallsalz, während rund 900 Proben auf das Staßfurt-Steinsalz und 400 Proben auf das Schwadensalz entfallen. Die Ableitung von Abhängigkeiten und Zusammenhängen mit Lagerung und Faltengeometrie sowie eine umfangreiche Diskussion der Ergebnisse folgt in den nachfolgenden Kapiteln (6.3 und 7).

Die in Kapitel 3.4 beschriebenen, makroskopisch klar erkennbaren Unterschiede der einzelnen Steinsalzhorizonte spiegeln sich in den Ergebnissen der Bohrkernanalysen wider.

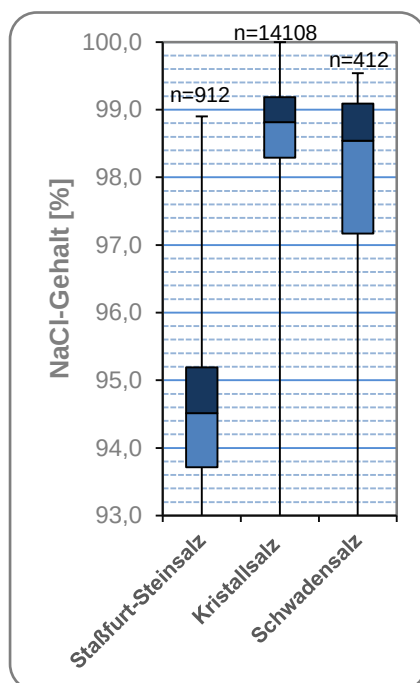


Abbildung 6.9: Boxplot-Diagramm des NaCl-Gehalts verschiedener stratigraphischer Einheiten.

Der wichtigste Parameter ist hierbei der Gehalt des Wertminerals NaCl (Abbildung 6.9). In Bezug auf das Kristallsalz (z3NAKR) ist dieser generell sehr hoch und relativ homogen. Das erste Quartil, Median und drittes Quartil liegen mit 98,29 %, 98,81 % und 99,18 % sehr nah beieinander. Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) und das Schwadensalz (z3NAh) unterliegen im Vergleich insgesamt höheren Schwankungen. Während das Schwadensalz mit einem Median von 98,5 % noch relativ hohe NaCl-Gehalte und damit theoretisch eine Nutzbarkeit als Produkt aufweist, ist das Staßfurt-Steinsalz mit einem Median von 94,5 % NaCl als generell

zu unrein für die Produktion einzustufen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei Betrachtung des CaSO_4 -Gehalts (Abbildung 6.10). Mit einem Median von 5 % und einer relativ heterogenen Verteilung hebt sich das Staßfurt-Steinsalz klar von Kristallsalz und Schwadensalz ab. Die größte Streuung der CaSO_4 -Gehalte ist innerhalb des Schwadensalzes zu erkennen. Hier entfällt ein nicht unerheblicher Teil auf sehr geringe, also positiv zu

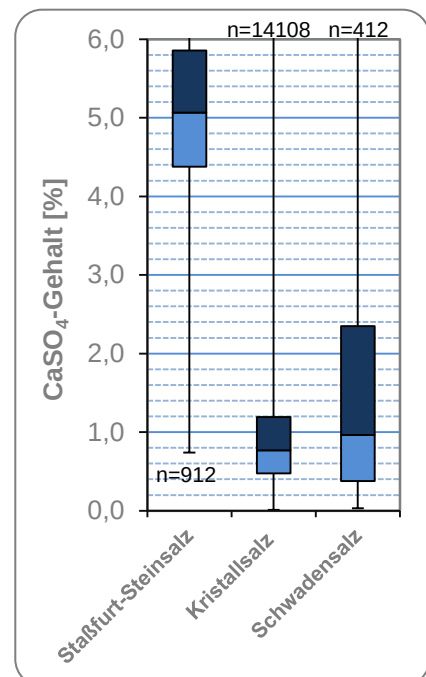


Abbildung 6.10: Boxplot-Diagramm des CaSO_4 -Gehalts verschiedener stratigraphischer Einheiten.

bewertende CaSO_4 -Gehalte. Der CaSO_4 -Gehalt im Kristallsalz weist im Vergleich eine sehr homogene Verteilung auf und liegt meist unter 1 %.

Bei Betrachtung des MgSO_4 -Gehalts (Abbildung 6.11) ist dies genau umgekehrt. Das bezüglich NaCl - und CaSO_4 -Gehalt sehr homogene Kristallsalz lässt hier die größte

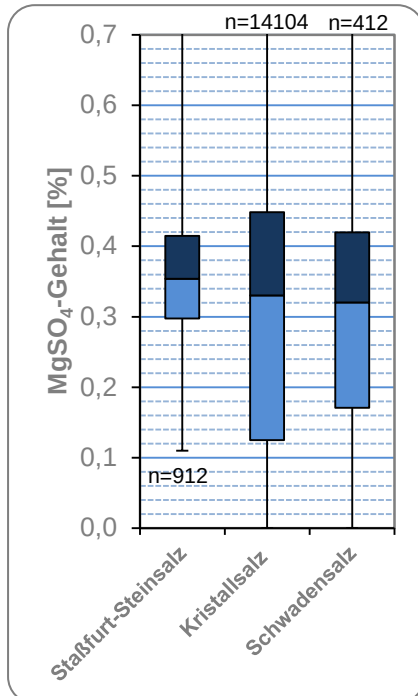


Abbildung 6.11 Boxplot-Diagramm des MgSO_4 -Gehalts verschiedener stratigraphischer Einheiten.

als das Staßfurt-Steinsalz. Dieses weist extrem homogene Werte im Bereich von 80 ppm (0,008 %) auf. Der Median des Kristallsalz hingegen liegt mit 340 ppm in etwa beim Vierfachen und der Median des Schwadensalzes mit 620 ppm beim Achtfachen des Staßfurt-Steinsalzes.

Das Schwadensalz beinhaltet eine primäre Wechselagerung von zwei vollkommen unterschiedlich ausgebildeten Steinsalzpaketen. Daher sind die großen Schwankungsbreiten der einzelnen Bestandteile innerhalb dieser stratigraphischen Einheit sehr gut nachvollziehbar. Dies gilt nicht für das Kristallsalz und das Staßfurt-

Steinsalz. Die großen Schwankungsbreiten in der Gesamtheit aller Proben bezüglich des CaSO_4 -Gehalts im Staßfurt-Steinsalz und des MgSO_4 - und KCl -Gehalts im Kristallsalz deuten auf räumliche Abhängigkeiten und unterschiedliche Ausbildungstypen hin. Im Folgenden werden die Ergebnisse einer räumlichen Auswertung der einzelnen Steinsalzhorizonte vorgestellt.

Spannweite zwischen dem ersten und dritten Quartil erkennen. Eine ebenfalls große Streuung des MgSO_4 -Gehalts lässt sich im Schwadensalz beobachten. Das Staßfurt-Steinsalz hingegen ist bezüglich des MgSO_4 -Gehalts sehr homogen ausgebildet. Insgesamt liegen die jeweiligen Medianwerte der Salzhorizonte mit 0,35 %, 0,33 % und 0,32 % im Vergleich zu den Werten des CaSO_4 -Gehalts sehr nah beieinander.

Abbildung 6.12 zeigt die Verteilung des KCl -Gehalts. Interessanterweise sind das Schwadensalz und das Kristallsalz, welche in Normallagerung theoretisch keine direkte Verbindung zu dem Kaliflös Staßfurt (z2KSt) aufweisen, durch viel höhere KCl -Gehalte gekennzeichnet

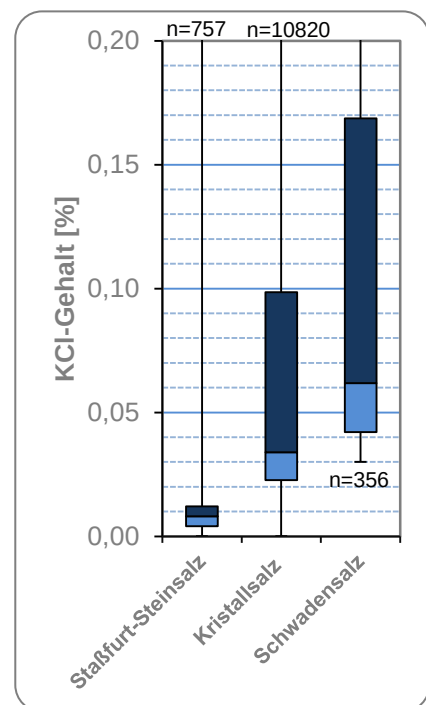


Abbildung 6.12: Boxplot-Diagramm des KCl -Gehalts verschiedener stratigraphischer Einheiten.

6.2.1 Staßfurt-Steinsalz (z2NA)

Tabelle 6.3: Statistische Kenngrößen der Staßfurt-Steinsalz (z2NA)-Proben. (* = berechneter Nullwert)

	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	912	912	912	757
Minimum [%]	73,51	0,74	0,11	<0,001*
1. Quartil [%]	93,71	4,38	0,30	0,004
Median [%]	94,51	5,07	0,35	0,008
3. Quartil [%]	95,19	5,85	0,41	0,012
Maximum [%]	98,90	19,89	15,36	11,490
Mittelwert [%]	94,30	5,12	0,47	0,107
Standardabw. [%]	1,91	1,62	0,87	0,790
Varianz	3,64	2,63	0,76	0,624

Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) wurde im Untersuchungsgebiet insgesamt 912 mal beprobt, wobei die Gesamtstatistik bis auf wenige Ausreißer eine relativ homogene Ausbildung suggeriert (Tabelle 6.3). Ein Großteil der Proben (851 von 912) entfallen auf nur drei Bohrungen (B1194, B1248 und B1250), welche zwecks Erkundung des Salzrandes in Richtung nordöstlicher Salzrand parallel zum Profil 78 durchgeführt wurden (Abbildung 6.13).

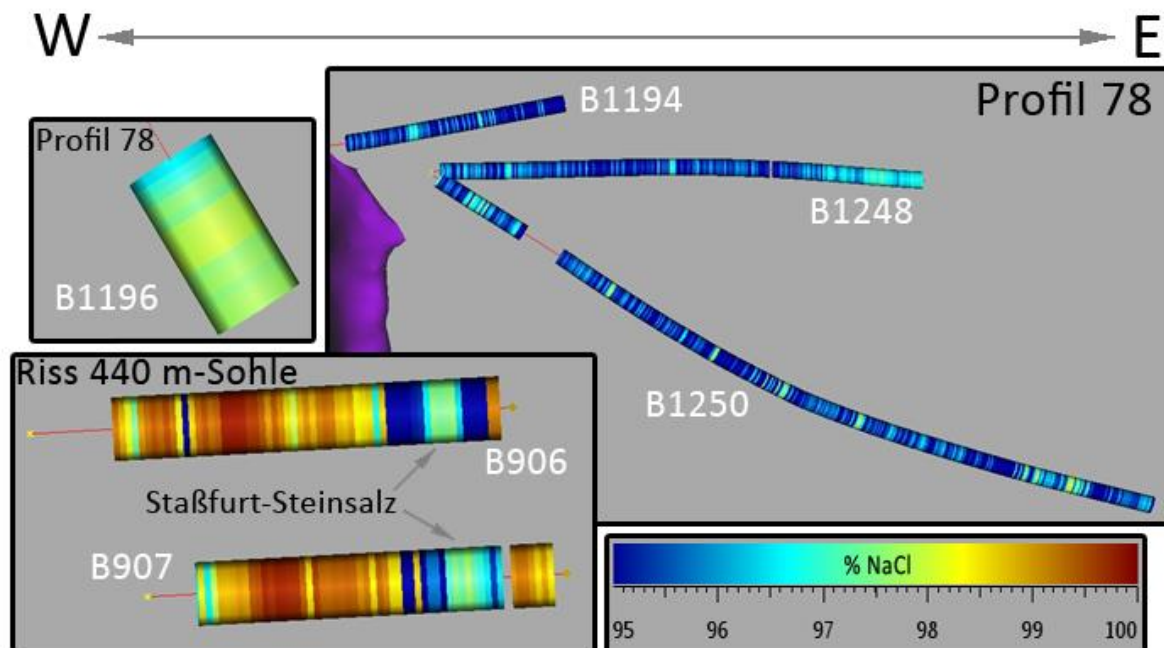


Abbildung 6.13: Lokation der Staßfurt-Steinsalz (z2NA)-Proben und NaCl-Gehalt entlang der Bohrspurverläufe.

Zwei weitere Beprobungsabschnitte stammen aus den Bohrungen B906 und B907 entlang des am Nordwestrand des Untersuchungsgebietes sehr schmal ausgebildeten Sattels zwischen den Lagern 8 und 8a. Ein weiterer Beprobungsabschnitt stammt aus der Bohrung B1196 und ist unterhalb einer breiten Muldenstruktur nahe der Salzbasis gelegen. Somit liegen für drei unterschiedliche Domänen des Staßfurt-Steinsalzes Analysedaten vor:

- 1) die breite westvergente Sattelstruktur (*ANT4*) an der Ostflanke der Salzstruktur (B1194, B1248 und B1250),
- 2) ein sehr schmaler, abgequetschter, ostvergenter Sattel (*ANT1*) am Nordwestrand des Untersuchungsgebietes (B906 und B907) und
- 3) ein Bereich unterhalb einer breiten Mulde (SYNC1/2) nahe der Salzbasis (B1196).

Die erste Domäne bestimmt durch die überrepräsentative Anzahl der Proben die Gesamtstatistik maßgeblich. Eine getrennte Betrachtung lässt jedoch signifikante Unterschiede in der Zusammensetzung erkennen.

Sattelstruktur an der Ostflanke (*ANT4*)

Das Staßfurt-Steinsalz weist hier in der Regel zwischen 4 % und 6 % CaSO_4 bzw. zwischen 93 % und 95 % NaCl auf. In unregelmäßigen Abständen von 2 m bis 15 m sind gering mächtige, meist nur ein bis zwei Meter breite, reinere Partien eingeschaltet, welche rund 96 % NaCl, selten auch bis zu 98 % NaCl aufweisen. Der MgSO_4 - und KCl-Gehalt sind unabhängig von dieser unsystematischen Wechsellagerung konstant niedrig und liegen zwischen 0,3 % und 0,5 % (MgSO_4) bzw. bei 0,01 % (KCl). Es sind jedoch auch vereinzelt starke Abweichungen zu verzeichnen. So wurden in fünf Proben erhöhte MgSO_4 - und KCl-Werte von über 5 % bzw. über 1 % gemessen. Diese Erhöhungen lassen sich stets auf das Kaliflöz Staßfurt zurückführen, welches entweder kurz in den Beprobungsabschnitt streicht, oder an den Randbereichen eines Beprobungsabschnitts für eine Erhöhung der entsprechenden Werte sorgt. In acht Fällen wurde außerdem ein CaSO_4 -Gehalt von über 10 % festgestellt, jedoch ohne dass eine Erhöhung des KCl- oder MgSO_4 -Gehalts eintritt. In den benachbarten Proben ist der CaSO_4 -Wert nicht erhöht. Es handelt sich also um lokal sehr begrenzte Anreicherungen von Anhydrit.

Bemerkenswert ist die Absenkung und Homogenisierung des CaSO_4 -Gehalts auf 3 % bis 4 % auf den letzten 30 m entlang der Bohrung B1248 vor Erreichen des Salzrandes. Dieses Phänomen kann in den beiden anderen Bohrungen nicht beobachtet werden, da diese vor Erreichen des Salzrandes abgebrochen wurden. Jedoch ist die Bohrung B1250 in ihrem unteren Abschnitt der Salzbasis vermutlich bereits relativ nah. Hier ist ebenfalls ein längerer Abschnitt mit relativ hohem NaCl-Gehalt von bis zu 98 % zu verzeichnen, allerdings keine vergleichbare Homogenisierung.

Sattelstruktur am Nordwestrand (*ANT1*)

Die beiden Mächtigkeitsbohrungen B906 und B907 zur Erkundung des Lagers 8 auf der 440 m-Sohle durchstoßen die Sattelstruktur jeweils auf einer Länge von 12 m. Hierbei lassen beide Bohrungen im Zentrum des Sattels über 4 m bzw. 6 m Länge kontinuierlich vergleichbar hohe NaCl-Gehalte von 96 % bis 97 % erkennen. Zu den Randbereichen sinkt der NaCl-Gehalt hin zum Kaliflöz Staßfurt graduell auf unter 95 % ab. Damit einhergehend ist

ein Anstieg des MgSO_4 -Gehalts von ca. 0,2 % auf über 5 % sowie des KCl-Gehalts von ebenfalls 0,2 bis über 1 % zu verzeichnen. Bemerkenswert ist, dass der CaSO_4 -Gehalt über den gesamten Querschnitt der Sattelstruktur relativ konstant bei etwa 2,5 % und damit weit unter dem Durchschnitt der gemessenen Werte aus der Sattelstruktur der Ostflanke liegt.

Bereich nahe der Salzbasis (SYNC1/2)

Der sehr tief gelegene, 18 m lange Beprobungsabschnitt befindet sich unterhalb einer normalgeschichteten Abfolge von z3-Salzen und einem etwa 50 m mächtigen Hauptanhydritkörper direkt im Anschluss an das Kaliflöz Staßfurt, ca. 25 m über der Salzbasis. Unstimmigkeiten in den Analysedaten lassen darauf schließen, dass nur der Mg^{2+} -Anteil ermittelt wurde und pauschal ein KCl-Gehalt von 0,1 % und ein CaSO_4 -Gehalt von 2 % angenommen wurden um den NaCl-Gehalt zu errechnen. Dieser liegt entsprechend mit rund 97 % relativ hoch. Der MgSO_4 -Gehalt spiegelt den Übergang vom Kaliflöz Staßfurt hin zu den kieseritischen Übergangsschichten gut wider und nimmt von 2,1 % über eine Entfernung von 3 m auf unter 1 % ab. Jedoch bleibt der MgSO_4 -Gehalt auch in tieferen Abschnitten mit 0,5 % bis 0,9 % stark erhöht und unterliegt starken Schwankungen.

6.2.2 Kristallsalz (z3NAKR)

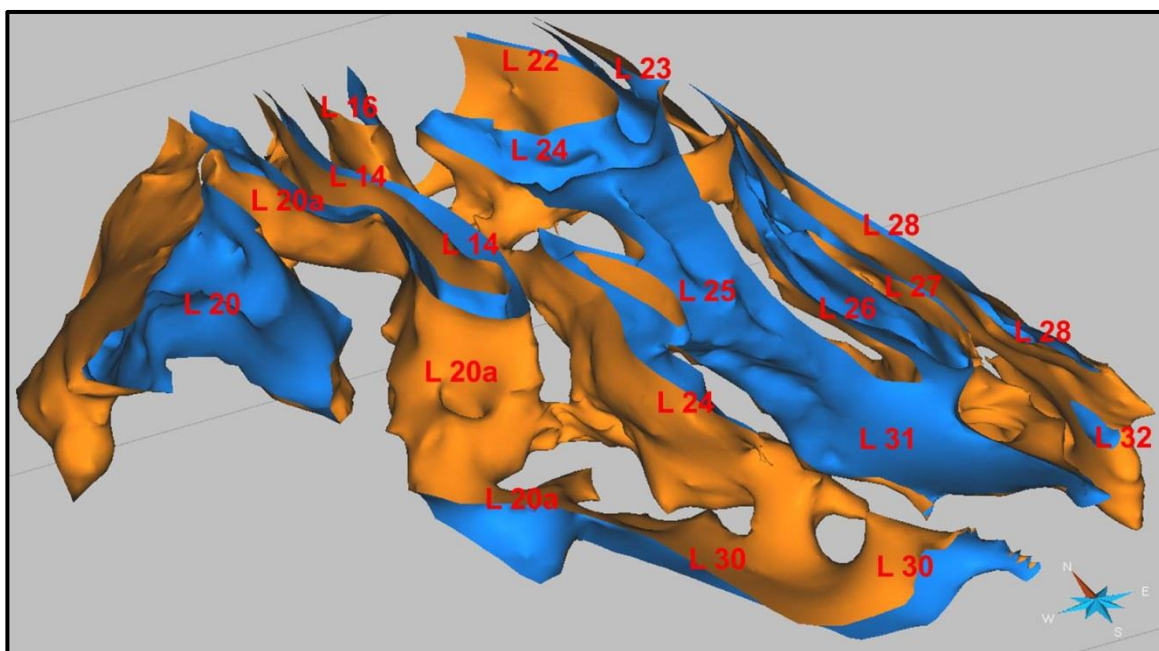


Abbildung 6.14: Übersicht der Position der Kristallsalzlager im Untersuchungsgebiet. Innen- und Außenseite der modellierten Kristallsalzgrenze sind in Komplementärfarben dargestellt.

Abbildung 6.14 zeigt das Ergebnis der triangulierten Kristallsalzschiehtgrenze sowie alle im Folgenden betrachteten Kristallsalzlager. Die Benennungen der einzelnen Lager entsprechen in etwa der Explorationsreihenfolge und der werksseitigen Benennung. Nur im südlichen Bereich wurden drei Lager (L30, L31 und L32) neu benannt. Parallel zur Streichrichtung sehr weit verfolgbare Lager wurden in jeweils einen Nord- und einen Südteil

untergliedert, um zum einen kleinere und in sich ähnlichere Bereich auszugliedern und zum anderen eine bessere Orientierung gewährleisten zu können.

Tabelle 6.4: Statistische Kenngrößen der Kristallsalz (z3NAKR) Proben. (* = berechneter Nullwert)

	NaCl	CaSO₄	MgSO₄	KCl
Anzahl Proben	14108	14108	14104	10820
Minimum [%]	58,93	0,01	<0,01*	<0,001*
1. Quartil [%]	98,29	0,47	0,13	0,023
Median [%]	98,81	0,77	0,33	0,034
3. Quartil [%]	99,18	1,19	0,45	0,099
Maximum [%]	100,00	19,24	21,91	6,920
Mittelwert [%]	98,50	1,01	0,35	0,124
Standardabw. [%]	1,41	0,98	0,49	0,307
Varianz	2,00	0,96	0,24	0,094

Insgesamt liegen im Untersuchungsgebiet 14108 Analysen innerhalb des Kristallsalzes vor. Die Ergebnisse zeigen abgesehen von wenigen Extremwerten eine relativ homogene und sehr reine Ausbildung (Tabelle 6.4). Die Betrachtung einzelner Lager lässt jedoch teilweise sehr starke Unterschiede in der Zusammensetzung erkennen. Auch innerhalb einzelner Lager kann die Ähnlichkeit benachbarter Proben stark variieren. So sind Variationen der mineralogischen Zusammensetzung auf unterschiedlichen Ebenen zu erwarten: zum einen in der Größenordnung der Hauptstrukturelemente, also lagerweise, und zum anderen lokal in einer Größenordnung von wenigen Metern, zum Beispiel im Randbereich einer Hauptanhydritklippe. Solche lokalen Phänomene spiegeln sich vor allem in Extremwerten wider. Es handelt sich dabei meist um einzelne oder einige wenige benachbarte Proben, die zum Beispiel geringmächtige schichtparallele Anhydritgänge oder -brocken innerhalb der einzelnen Lager repräsentieren. So gibt es im Kristallsalz insgesamt 13 Proben mit einem CaSO₄-Gehalt von über 10 %. Der Spitzenwert von 19,24 % CaSO₄ findet sich beispielsweise mitten im Lager 24S, wobei wenige Meter entfernt ein weiterer Abschnitt mit einer starken Erhöhung von 9,11 % zu beobachten ist. Auch in den Lagern 20, 20aS, 26 und 27 sind solche alleinstehenden, stark erhöhten Extremwerte zu beobachten. Einige wenige dieser gangartigen Anhydritstrukturen bzw. CaSO₄-Extremwerte weisen zugleich auch stark erhöhte MgSO₄-Gehalte auf, so beispielsweise im Lager 23 entlang der Bohrung B938, wo mit 58,93 % NaCl, 12,24 % CaSO₄, 21,91 % MgSO₄ und 6,92 % KCl der niedrigste NaCl- sowie der höchste MgSO₄- und KCl-Gehalt innerhalb des Kristallsalzes vorliegt. Abbildung 6.15 verdeutlicht anhand einiger beispielhaft dargestellter Lager die Varianz entlang der Beprobungsabschnitte einzelner Bohrungen und lässt lokal bereits einige Phänomene und Abhängigkeiten erkennen. So ist im Bereich des Lagers 20 eine sehr homogene, hochreine Zone in Nähe des normal ausgebildeten Hauptanhydrits (Osten) zu verzeichnen, während in Richtung des Hangenden (Westen) häufiger Verunreinigungen zu beobachten sind.

Bei Betrachtung des östlich gelegenen Lagers 28 ist wiederum eine gewisse Regelmäßigkeit in Form von zunehmender Verunreinigung in Richtung Lagergrenzen (beidseitig von Hauptanhydrit umschlossen) zu erkennen, wobei diese Verunreinigungszone Richtung Osten generell eine größere Mächtigkeit aufweist.

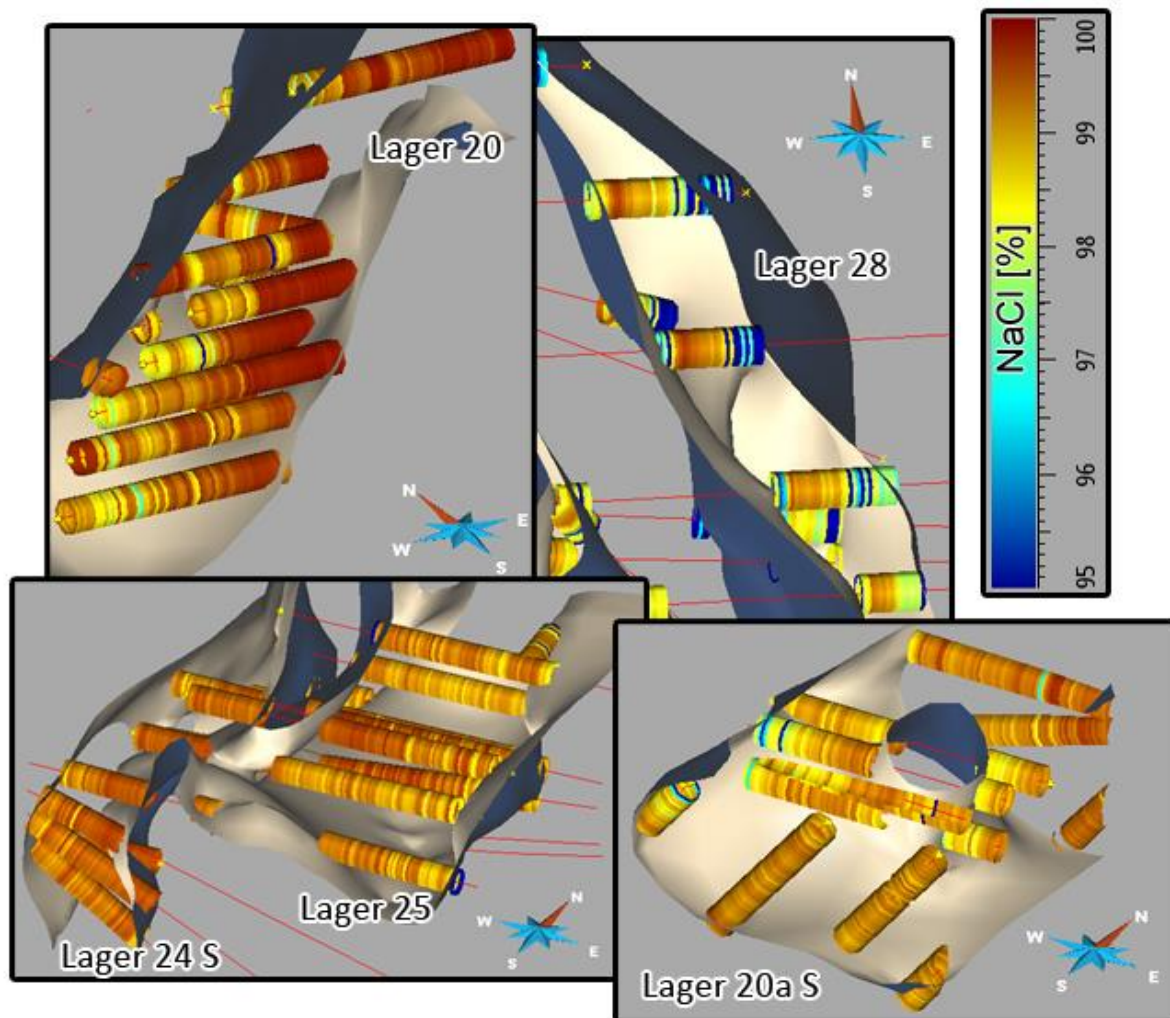


Abbildung 6.15: Lokation der Kristallsalz (z3NAKR)-Proben (beispielhafte Darstellung einzelner Lager) und NaCl-Gehalt entlang der Bohrspurverläufe.

Ähnliche Trends, jedoch nicht vergleichbar intensiv, lassen sich auch an der westlichen Lagergrenze des Lagers 20a S beobachten. Der Vergleich der Interpolationsergebnisse jeweils mit und ohne Integration angeschnittener Blöcke zeigt ebenfalls diesen Trend. Der mittlere CaSO_4 -Gehalt erhöht sich bei Integration der randlichen Blöcke von 1,07 % auf 1,15 %, sodass davon auszugehen ist, dass vor allem im Randbereich des Kristallsalzes häufig erhöhte CaSO_4 -Werte vorliegen. In der Regel ist jedoch eher eine Ausbildung ohne direkt erkennbare Trends innerhalb der meisten Lager vorhanden, beispielsweise innerhalb der Lager 24S und 25. Hier liegt das Kristallsalz größtenteils in Form von wenige Meter mächtigen, unregelmäßig zwischen 98,5 % und 99,5 % NaCl wechselnden Bereichen vor. Es folgt daher eine vergleichende Betrachtung ganzer Lager, untergliedert in einen nördlichen, zentralen sowie südlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Auf Grund der unterschiedlichen

Erstreckung und Mächtigkeit sowie der verschiedenen Auffahrungsstände entfallen unterschiedlich viele Proben auf die jeweiligen Lager. Die Probenanzahl liegt zwischen 230 (Lager 22) und 3793 (Lager 20), meist im Bereich von mehreren Hundert. Ausnahmen sind die Lager 32 und 25a, wo bisher nur eine bzw. zwei Bohrungen vorliegen (28 bzw. 67 Proben). Die gesamten statistischen Kenngrößen der jeweiligen Lager sind im Anhang tabellarisch dargestellt (Anlage 22 bis 30).

6.2.2.1 Auswertung der nördlichen Kristallsalzlager

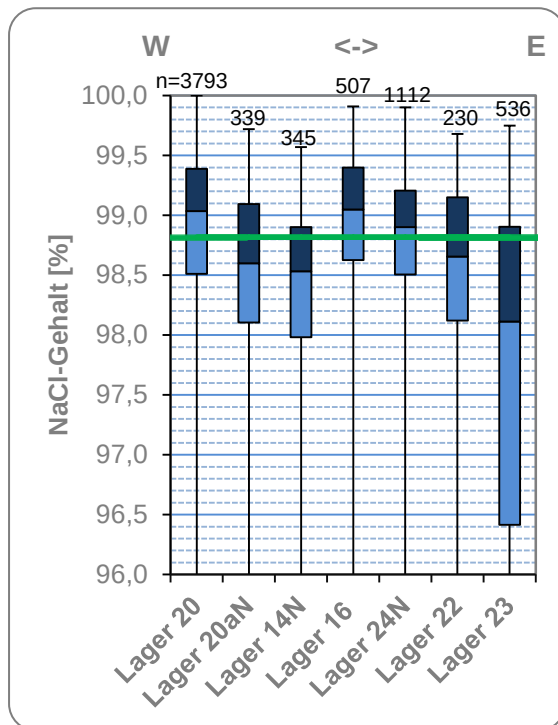


Abbildung 6.16: Boxplot-Diagramm des NaCl-Gehalts der nördlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.

98,90 % zu verzeichnen. In der relativ schmalen östlichen Muldenstruktur SYNC3 liegt in den Lagern 22 und 23 ein nach Osten abnehmender NaCl-Gehalt vor. Während Lager 22 mit einem Median von 98,65 % vergleichbare Werte wie die Lager 20aN und 14N aufweisen, ist der NaCl-Gehalt im Lager 23 mit einem Median von 98,12 % auffällig niedrig. Die Standardabweichung beträgt hier 3,7 %, und auch der stark vom Median nach unten abweichende Mittelwert von 97,0 % deutet auf enorme Schwankungen hin.

Abbildung 6.16 zeigt die Verteilung des NaCl-Gehalts der nördlichen Kristallsalzlager von Westen nach Osten. Mit einem Median von über 99,00 % NaCl liegen die Lager 20 und 16 relativ weit über dem Gesamtmedian von 98,81 % NaCl (als grüne Linie dargestellt). Die dazwischen gelegenen Lager 20aN und 14N grenzen westlich und östlich direkt an die Sattelstruktur ANT2 und weisen um 0,5 % geringere NaCl-Werte auf. Weiter Richtung Osten sind vorerst noch leicht überdurchschnittliche NaCl-Werte in dem innerhalb der breiten Muldenstruktur SYNC2 gelegenen Lager 24N mit einem Median von

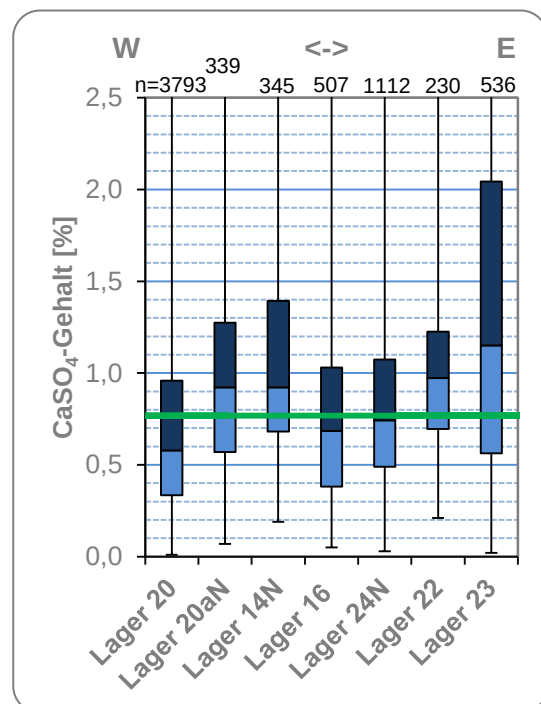


Abbildung 6.17: Boxplot-Diagramm des CaSO₄-Gehalts der nördlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.

Insgesamt betrachtet ergibt sich von West nach Ost eine kontinuierliche Abnahme des NaCl-Gehalts mit einer klar erkennbaren Stufe zwischen den Lagern 14N und 16. Genau entgegengesetzt verhält sich der CaSO_4 -Gehalt. Dieser nimmt von West nach Ost kontinuierlich zu und erreicht schließlich einen Median von 1,15 % in Lager 23, was in etwa einer Verdoppelung des Medians von 0,58 % in Lager 20 entspricht. Ausgenommen von dieser kontinuierlichen Zunahme sind erneut die Lager 14N und 16 (Abbildung 6.17), zwischen welchen ein deutlicher Sprung des jeweiligen Medianes von 0,9 % auf 0,68 % CaSO_4 zu verzeichnen ist.

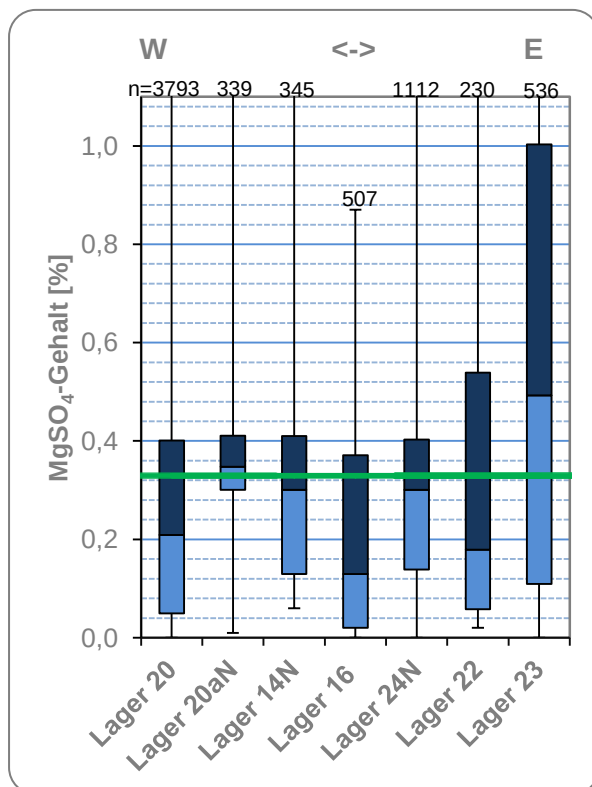


Abbildung 6.18: Boxplot-Diagramm des MgSO_4 -Gehalts der nördlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.

Den KCl-Gehalt betreffend, lässt sich erneut ein ähnlicher Trend wie bezüglich des CaSO_4 -Gehalts beobachten (Abbildung 6.19). Der Gesamtmedian des KCl-Gehalts liegt bei 0,034 %. Im Lager 23 ist der Median des KCl-Gehalts mit 0,17 % etwa fünf Mal so hoch. Leichte Erhöhungen auf 0,06 % und 0,07 % KCl sind auch in den Lagern 14N und 22 zu beobachten. Zwischen den Lagern 14N und 16 ist wieder ein signifikanter Unterschied erkennbar. Der Median halbiert sich hier von 0,06 % auf 0,03 % KCl.

Von diesem Trend unabhängig zeigt sich der Verlauf des MgSO_4 -Gehalts von West nach Ost (Abbildung 6.18). Auch hier ist im östlichen Lager 23 der mit Abstand höchste Median mit 0,49 % und auch die größte Streuung zu verzeichnen, jedoch sind ansonsten keine ähnlichen Entwicklungen wie beim CaSO_4 -Gehalt zu erkennen. Auffällig ist die vergleichbar homogene Verteilung in Lager 20aN mit einem relativ hohen Median von 0,35 % MgSO_4 .

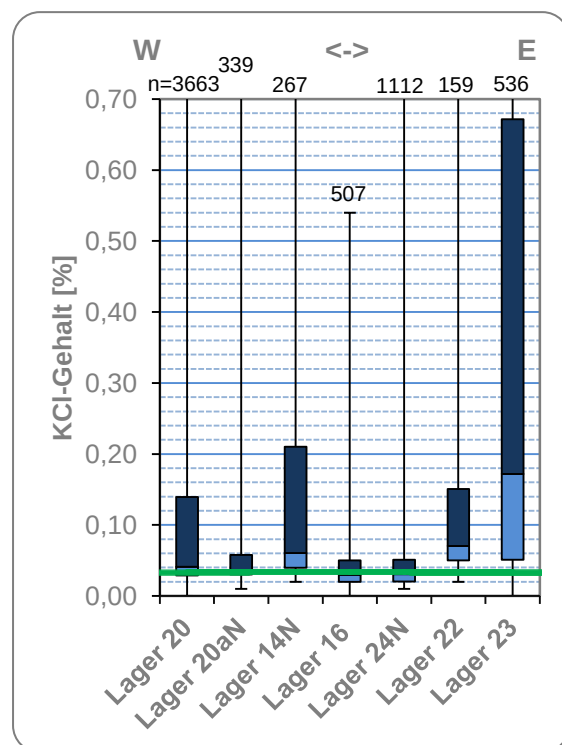


Abbildung 6.19: Boxplot-Diagramm des KCl-Gehalts der nördlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.

6.2.2.2 Auswertung der zentralen Kristallsalzlager

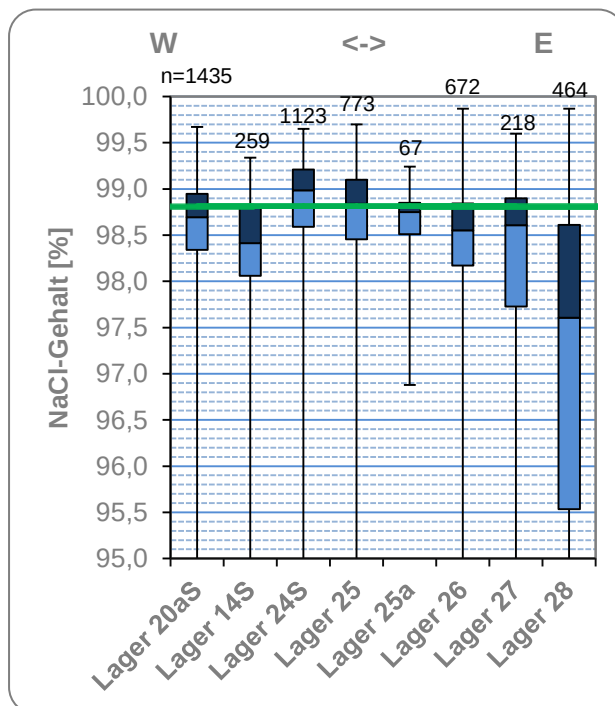


Abbildung 6.20: Boxplot-Diagramm des NaCl-Gehalts der zentralen Kristallsalzlager von West nach Ost.

Dieser Sprung ist auch bei Betrachtung des CaSO_4 -Gehalts klar erkennbar (Abbildung 6.21). Mit einem Median von 0,57 % CaSO_4 liegt nur das Lager 24S unterhalb des Gesamtmedian von 0,77 % CaSO_4 . Es sind also insgesamt relativ hohe CaSO_4 -Gehalte zu verzeichnen.

Die MgSO_4 -Gehalte zeigen sogar eine noch deutlichere Erhöhung relativ zur Gesamtverteilung (Abbildung 6.22). Im Vergleich zu den nördlichen Kristallsalzlager ist der MgSO_4 -Gehalt hier generell signifikant höher, meist im Bereich von 0,4 %. Ein genereller Trend bezüglich des MgSO_4 -Gehalts ist wie auch in dem nördlichen Bereich nicht zu beobachten, jedoch eine starke Erhöhung im östlichen Lager 28 bis auf einen Median von 0,71 %, einhergehend mit einer relativ großen Streuung.

Ähnlich wie im Bereich der nördlichen Kristallsalzlager ist auch im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes bei Betrachtung des NaCl-Gehalts ein Trend Richtung Osten erkennbar. Mit einem Median von nur 97,61 % NaCl ist das östliche Lager 28 deutlich stärker verunreinigt, als das im nördlichen Bereich gelegene Lager 23. Der NaCl-Gehalt ist hier mit Ausnahme des Lagers 24S generell niedriger. Alle Lager weisen einen Median von unter 99,0 % NaCl auf. Erneut ist ein signifikanter Sprung östlich des Lagers 14S von 98,41 % auf 98,99 % NaCl zu erkennen (Abbildung 6.20).

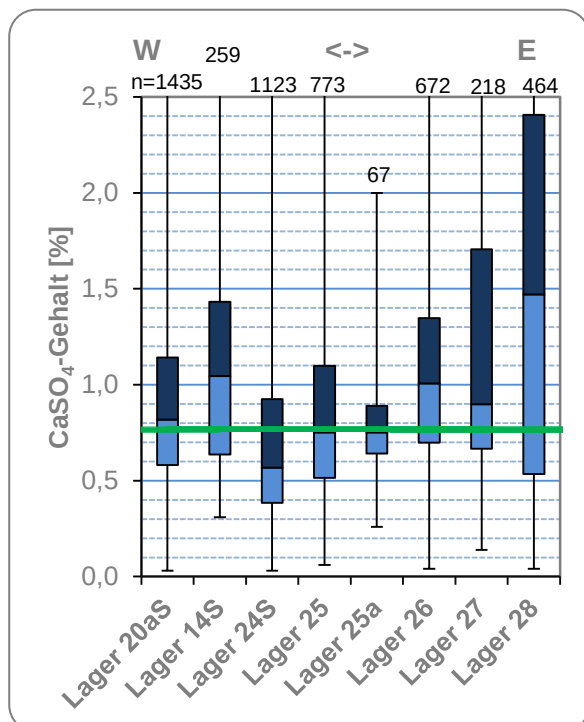


Abbildung 6.21: Boxplot-Diagramm des CaSO_4 -Gehalts der zentralen Kristallsalzlager von West nach Ost.

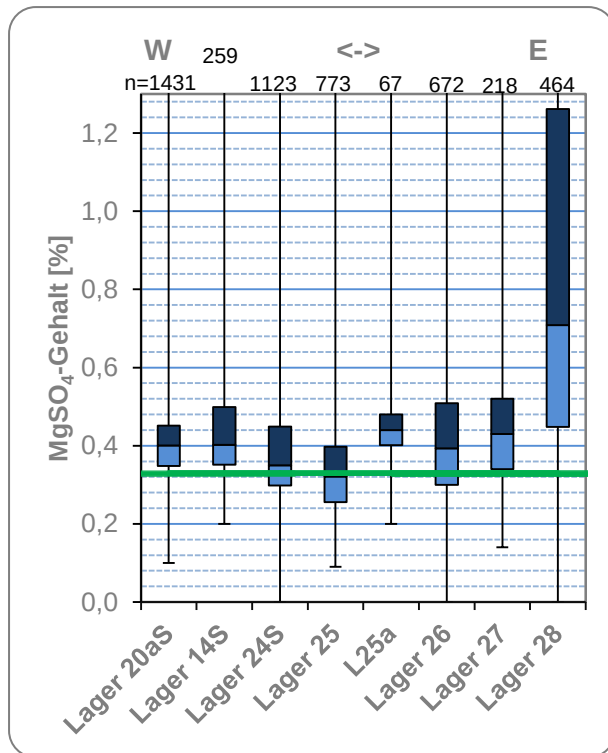


Abbildung 6.22: Boxplot-Diagramm des MgSO_4 -Gehalts der zentralen Kristallsalzlager von West nach Ost.

spezielle Ausbildung des Kristallsalzes. Dies lässt sich auch anhand der Extremwerte klar belegen.

Von den insgesamt 10820 KCl-Proben aus dem Kristallsalz weisen 97 einen KCl-Gehalt von 1,50 % oder höher auf. Davon entfallen 94 auf die östlichen Lager 23 und 28. Es handelt sich dabei also nicht um versehentlich beprobte Abschnitte des Kaliflözes Staßfurt (z2KSt), sondern um eine großräumig in ähnlicher Weise beeinflusste Varietät des Kristallsalzes. Eine versehentliche Beprobung des Kaliflözes Staßfurt im Randbereich einer Bohrung ist in der Regel durch CaSO_4 -Werte unter 1 % bei stark erhöhten KCl- und MgSO_4 -Werten gekennzeichnet, was beispielsweise in den Bohrungen B937 (L22) und B999 (L20aN) zu beobachten ist. Hier sind die KCl- und MgSO_4 -Erhöhungen jedoch großräumig in einer Vielzahl an Proben durch erhöhte CaSO_4 -Gehalte von meist 1 % bis 2 % gekennzeichnet.

Der KCl-Gehalt verhält sich in gewisser Weise konträr zur Verteilung des MgSO_4 -Gehalts. Dieser ist in den zentralen Kristallsalzlager generell sehr niedrig und mit 0,02 % bis 0,03 % in der Regel unter dem Gesamtmedian von 0,034 % KCl (Abbildung 6.23). Ausgenommen hiervon ist erneut das östliche Lager 28, welches in extremer Weise erhöhte Werte aufweist. Das Minimum liegt hier mit 0,04 % bereits über dem Median der benachbarten Lager und dem Gesamtmedian. Der Median ist mit 0,41 % auf das Zwölfwache des Gesamtmedianes erhöht. Es handelt sich hier also wie im östlichen Lager 23 um eine

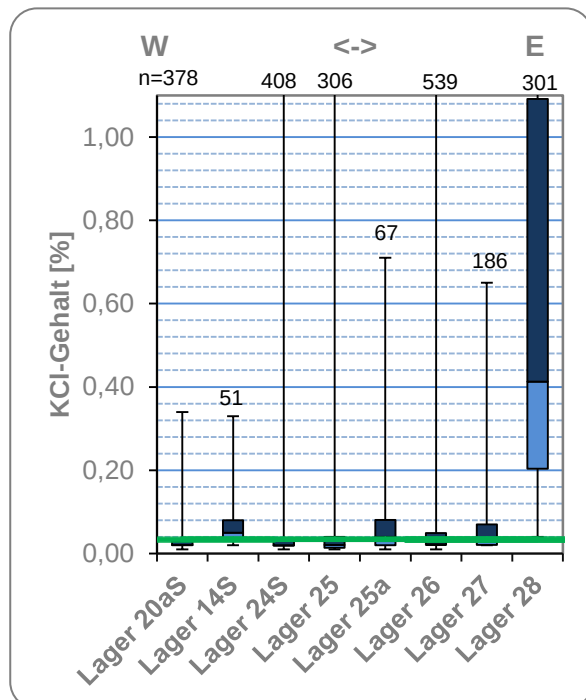


Abbildung 6.23: Boxplot-Diagramm des KCl-Gehalts der zentralen Kristallsalzlager von West nach Ost.

6.2.2.3 Auswertung der südlichen Kristallsalzlager

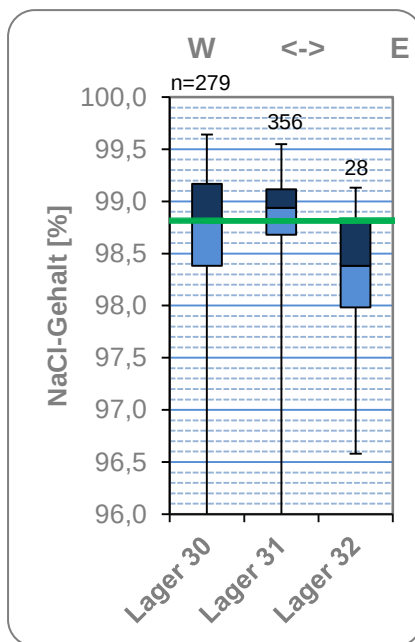


Abbildung 6.24: Boxplot-Diagramm des NaCl-Gehalts der südlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.

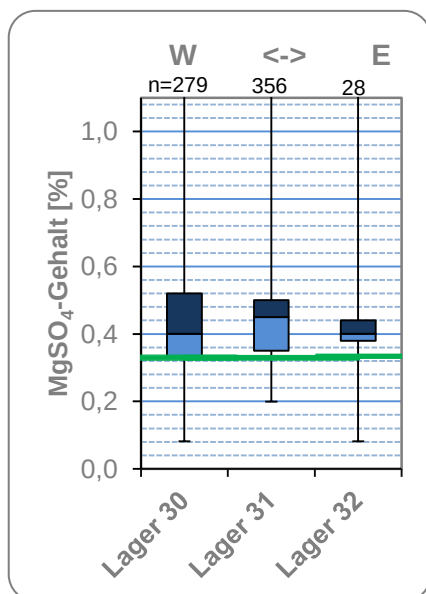


Abbildung 6.26: Boxplot-Diagramm des MgSO₄-Gehalts der südlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.

lichen und zentralen Bereiche des Untersuchungsgebietes. Das liegt sicherlich auch daran, dass das Lager 32 nicht in gleicher Weise in Nähe des östlichen Hauptsattels gelegen ist, sondern im Bereich einer zentralen, breiten Hauptmulde (SYNC2b), etwas oberhalb des Lagers 31.

Im Bereich der südlichen Kristallsalzlager liegen vor allem für das Lager 32 nur begrenzt Daten vor. Das Lager wurde zum Stand der Datenaufnahme nur durch die Bohrung B1216 durchteuft; somit liegen nur 28 Proben vor. Dennoch lassen sich bei Betrachtung des NaCl- und CaSO₄-Gehalts (Abbildung 6.24 und 6.25) grundsätzlich ähnliche Tendenzen wie im zentralen und südlichen Teil des Untersuchungsgebietes beobachten. Das östlich beprobte Lager L32 weist mit einem NaCl-Gehalt von 98,38 % und einem CaSO₄-Gehalt von 1,12 % (jeweils Median) eine übermäßig starke anhydritische Verunreinigung auf. Wie auch schon im zentralen Bereich beobachtet, sind die MgSO₄-Gehalte hier generell leicht erhöht, wobei sich kein Trend Richtung Osten erkennen lässt (Abbildung 6.26).

Die KCl-Gehalte sind insgesamt sehr niedrig und unterliegen nur sehr geringen Streuungen (Abbildung 6.27), entsprechen also auch nicht den Beobachtungen der nörd-

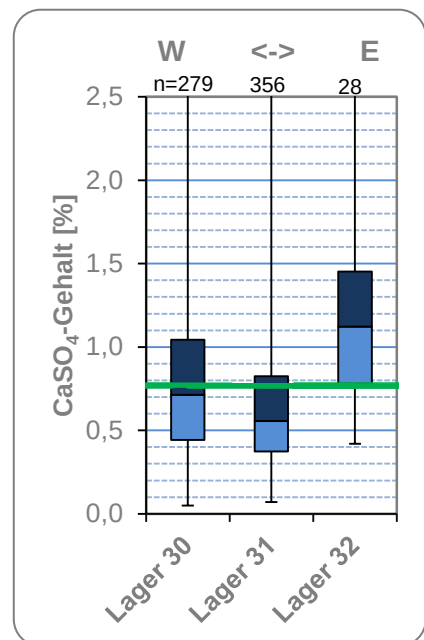


Abbildung 6.25: Boxplot-Diagramm des CaSO₄-Gehalts der südlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.

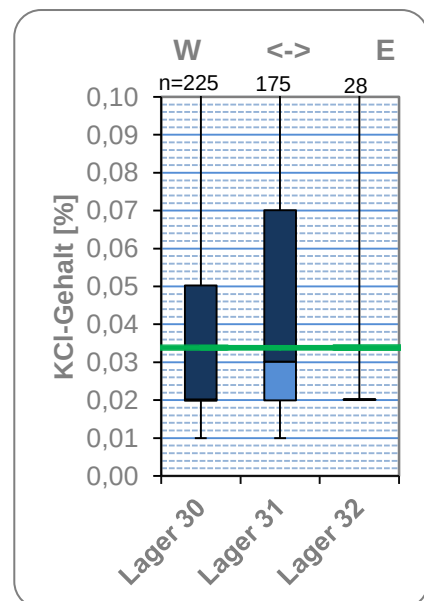


Abbildung 6.27: Boxplot-Diagramm des KCl-Gehalts der südlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.

6.2.2.4 Auswertung der Interpolationsergebnisse im Profil

Profil 73

Die Interpolationsergebnisse der einzelnen Komponenten entlang des Profils 73 sind in Abbildung 6.28 dargestellt und veranschaulichen die geochemischen Unterschiede innerhalb der nördlich gelegenen Kristallsalzlager. Stärkere Schwankungen des NaCl-Gehalts sind vor allem in den Lagern 24N und 23 erkennbar. Während im zentralen Bereich des Lagers 24N in der Nähe einer südlich angrenzenden Klippenstruktur ausschließlich eine signifikante Erhöhung des CaSO_4 -Gehalts für die relativ niedrigen NaCl-Gehalte verantwortlich ist und MgSO_4 - sowie KCl-Gehalt konstant niedrig sind, sind an der Ostflanke des Lagers 23 vor allem starke Erhöhungen des MgSO_4 - und KCl-Gehalts für sehr niedrige NaCl-Gehalte verantwortlich. Eine hohe Reinheit innerhalb des Lagers 20 scheint vor allem oberhalb der Staßfurt-Steinsalz-Sattelstruktur (ANT1a) vorhanden zu sein. Während der CaSO_4 -Gehalt hier im Bereich der normalen Lagerung an der Westflanke der Sattelstruktur relativ niedrig ist und zur hangenden Schichtgrenze zunimmt, ist dort der MgSO_4 -Gehalt mit etwa 0,5 % generell etwas erhöht. Umgekehrt verhält sich dieser Sachverhalt an der Ostflanke im Bereich gestörter Lagerung zwischen Staßfurt-Steinsalz und Hauptanhydrit. Hier ist ein relativ niedriger MgSO_4 -Gehalt von etwa 0,3 % zu verzeichnen bei leicht erhöhten CaSO_4 -Gehalten von 0,8 % bis 1,2 %. Ausnahme ist der unmittelbar an den Hauptanhydrit grenzende Bereich entlang der Bohrung B1009, wo sowohl MgSO_4 - als auch CaSO_4 -Gehalt stark erhöht sind. Auch der KCl-Gehalt ist hier in einigen Bereichen erhöht, in der Regel bis 0,4 %, teilweise sogar bis 0,8 %. Diese Schwankungen werden vor allem im Kontrast zu den durchgängig sehr niedrigen KCl-Gehalten im Lager 24 deutlich (Abbildung 6.28). Die schmalen Lager 20aN und 14 weisen jeweils leicht erhöhte CaSO_4 -, MgSO_4 - und KCl-Gehalte im Bereich der Sattelstruktur (ANT1) auf.

Profil 75

Abbildung 6.29 zeigt die Interpolationsergebnisse der einzelnen Komponenten entlang des Profils 75. In diesem Profil sind bezüglich der Wertstoffverteilung besonders interessante Beobachtungen zu machen, da mehrere Anhydritklippen bzw. Mächtigkeitsanomalien des Hauptanhydrits, Bereiche mit einem sehr unregelmäßigen Übergang zu den hangenden z3-Salzen, sowie mehrere abgequetschte Staßfurt-Steinsalz Sattelstrukturen zu beobachten sind. Speziell an der westlichen und östlichen Grenze des Lagers 20a wird der Einfluss im Bereich von Anhydritklippen gut deutlich. Während KCl- und MgSO_4 -Gehalt in diesen Bereichen konstant niedrig sind, sind bis zu 30 m in das Kristallsalz reichende Verunreinigungen durch Anhydrit parallel zu den Klippenstrukturen erkennbar. Ähnlich lässt sich dieser Sachverhalt auch an der Ostgrenze des Lagers 25 bzw. an der Westgrenze des Lagers 26 beobachten, wo eine kontinuierliche Zunahme des CaSO_4 -Gehalts von ca. 0,5 %

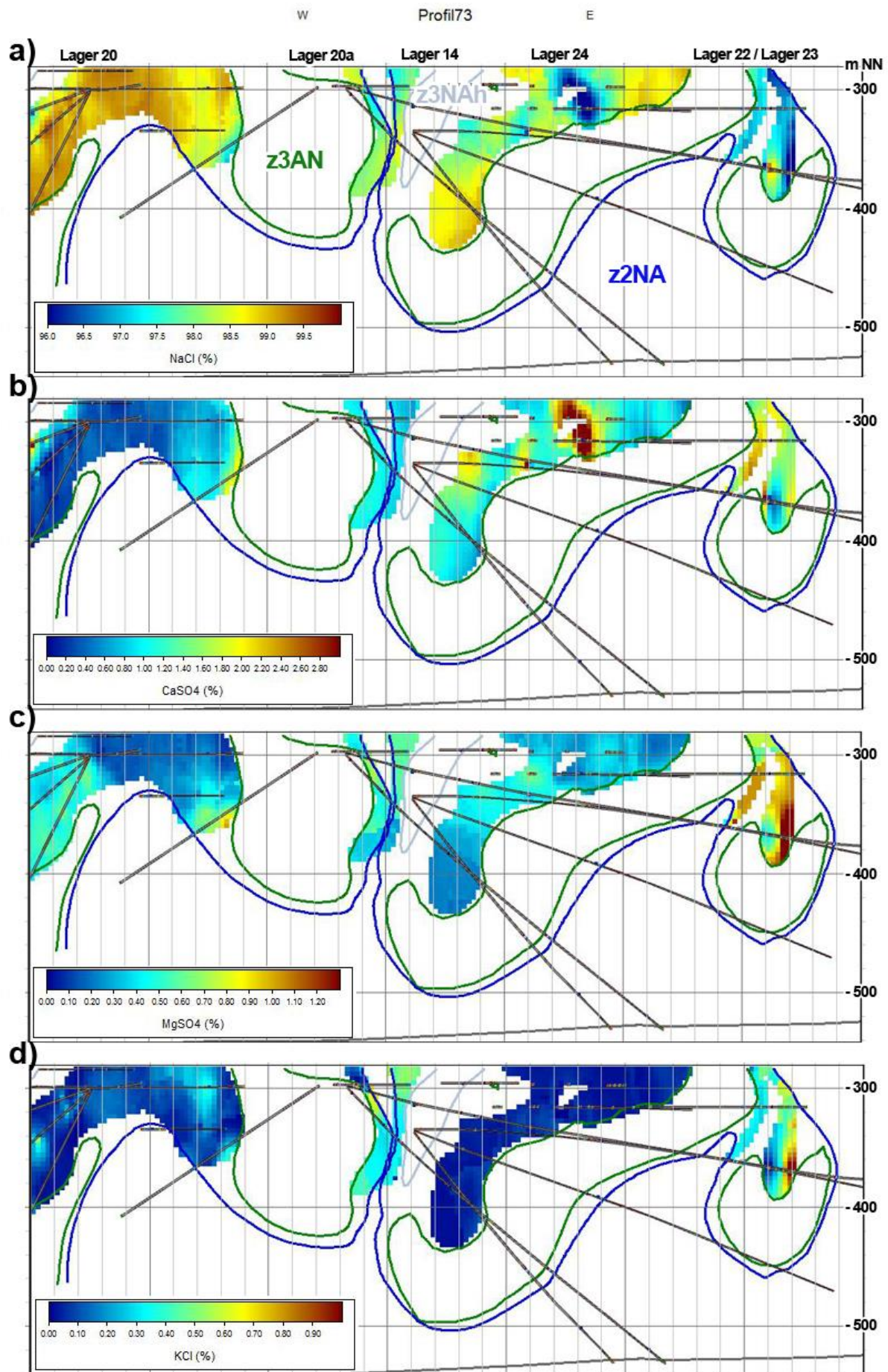


Abbildung 6.28: Interpolationsergebnisse (4-m-Grid, Ordinary Kriging) in Profil 73: a) NaCl-Gehalt, b) CaSO₄-Gehalt, c) MgSO₄-Gehalt, d) KCl-Gehalt. In Grau sind alle bis zu 10 m vom Profil entfernten Bohrungen dargestellt.

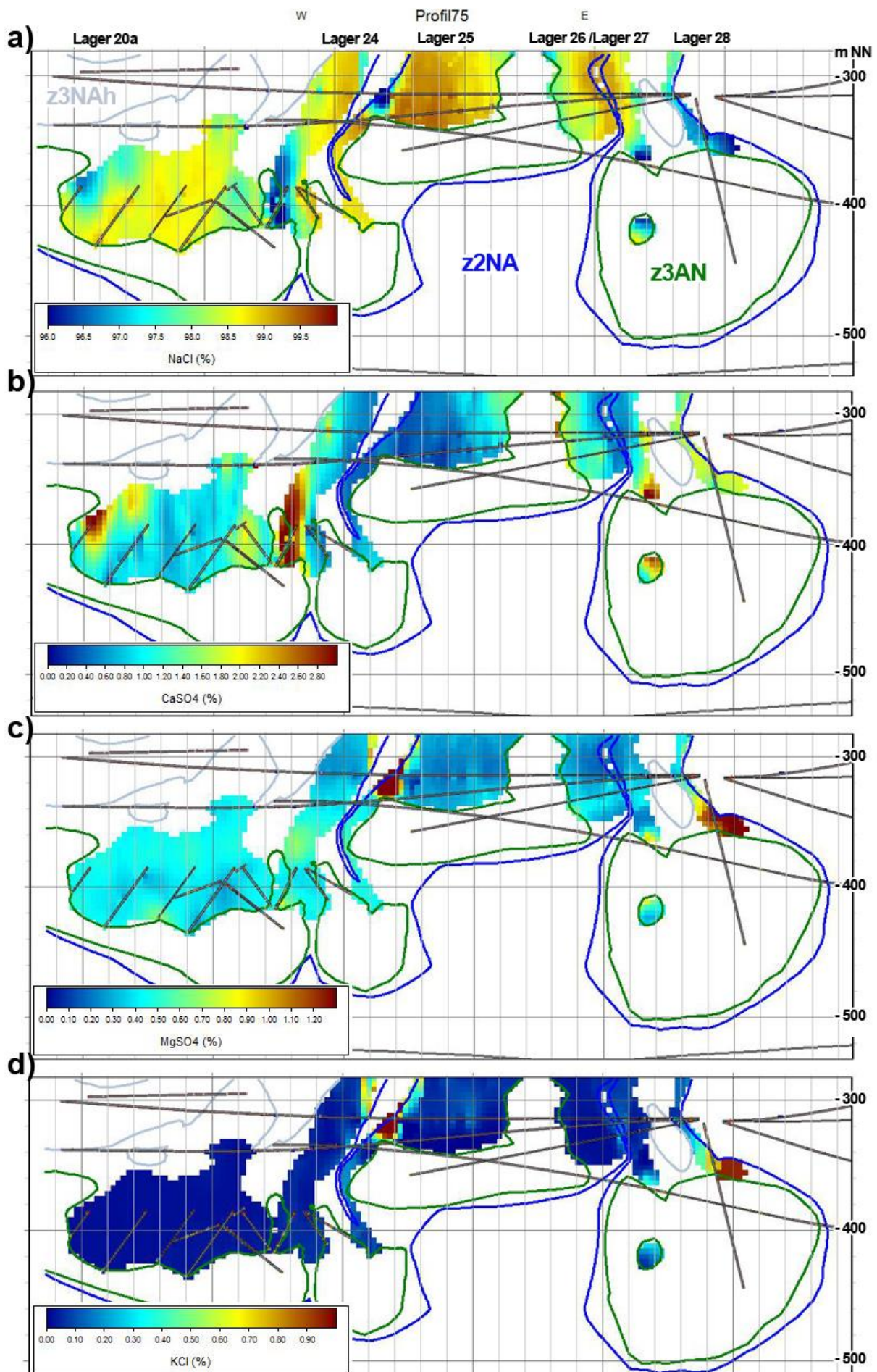


Abbildung 6.29: Interpolationsergebnisse (4-m-Grid, Ordinary Kriging) in Profil 75: a) NaCl-Gehalt, b) CaSO₄-Gehalt, c) MgSO₄-Gehalt, d) KCl-Gehalt. In Grau sind alle bis zu 10 m vom Profil entfernten Bohrungen dargestellt.

auf bis zu 2,0 % in Richtung Hauptanhydrit bei relativ gleichbleibenden geringen MgSO_4 - und KCl-Gehalten erkennbar ist. Im Bereich der beiden abgequetschten Sattelstrukturen ANT3a und ANT3b sind sehr geringe CaSO_4 -Gehalte von 0,5 % bis 0,6 % zu beobachten, während angrenzend an die östliche Sattelstruktur ANT4 im Lager 28 Werte zwischen 1,5 % und 2,0 % CaSO_4 zu verzeichnen sind. Dort sind zugleich erhöhte MgSO_4 - und KCl-Gehalte von jeweils über 1 % zu beobachten. Ebenfalls starke Erhöhungen des MgSO_4 - und KCl-Gehalts sind im Bereich des Sattels ANT3a, vor allem an der westlichen Grenze des Lagers 25, zu erkennen. Im Bereich der Sattelstruktur ANT3b hingegen, die die Lager 26 und 27 voneinander trennt, sind die MgSO_4 - und KCl- Werte besonders niedrig. Generell scheint sowohl der CaSO_4 - als auch MgSO_4 -Anteil in den tieferen Bereichen, also hier vor allem in Lager 20a, relativ erhöht im Vergleich zu den höheren Bereichen der Lager 24, 25 und 26.

Profil 77

Die Interpolationsergebnisse der einzelnen Komponenten entlang des Profils 77 sind in Abbildung 6.30 dargestellt. Klar erkennbar sind die Einflüsse von Mächtigkeitsanomalien des Hauptanhydrits. Erneut ist eine kontinuierliche Zunahme des CaSO_4 -Gehalts in Richtung Hauptanhydrit in solchen Bereichen zu beobachten. Der generell etwas erhöhte CaSO_4 -Gehalt von 1,0 % bis 1,2 % in Lager 30 nimmt in Richtung Anhydritklippe im Osten bis auf 2,0 % zu. Auf der anderen Seite der Klippe ist eine Zunahme von rund 0,5 % auf 1,0 % bis 1,5 % CaSO_4 in Klippennähe zu verzeichnen. Ein viel stärkerer Einfluss von über 3,0 % CaSO_4 ist im Bereich des sehr mächtigen Hauptanhydrits an der Westgrenze des Lagers 26 zu beobachten. In Richtung Sattelstruktur ANT3b sinkt hier der CaSO_4 -Gehalt wieder kontinuierlich auf unter 1 % ab. Ein leichter Einfluss der in Lager 31 zentral gelegenen Anhydritaufwölbung auf das umgebende Kristallsalz lässt sich auch anhand leicht erhöhter CaSO_4 -Gehalte von etwa 1,0 % an den Flanken erkennen. Die MgSO_4 - und KCl-Gehalte sind bei all diesen an Anhydritklippen oder -buckeln gebundenen mineralogischen Veränderungen konstant relativ niedrig. Im Kontrast dazu steht die Mineralogie in den östlichen Lagern 27 und 28. In Lager 27 ist eine starke Erhöhung des CaSO_4 -Gehalts auf 2 % bis über 3 % zu beobachten, bei relativ niedrigen MgSO_4 - und KCl-Gehalten. Die Besonderheit hier ist, dass kein Hauptanhydrit in der Nähe vorliegt, auf welchen ein Einfluss zurückzuführen wäre, da das Lager zwischen der Sattelstruktur ANT3b und den hangenden z3-Salzen liegt.

Die Betrachtung des Lagers 28 bestätigt hier erneut eine grundsätzlich andere Beschaffenheit des Kristallsalzes. Dies trifft nicht nur auf den tiefer gelegenen Bereich zu, wo das Lager augenscheinlich zwischen zwei Anhydritblöcken eingeschlossen vorliegt, sondern auch auf den höher gelegenen Bereich, in dem das Lager zwischen dem Staßfurt-Steinsalz-

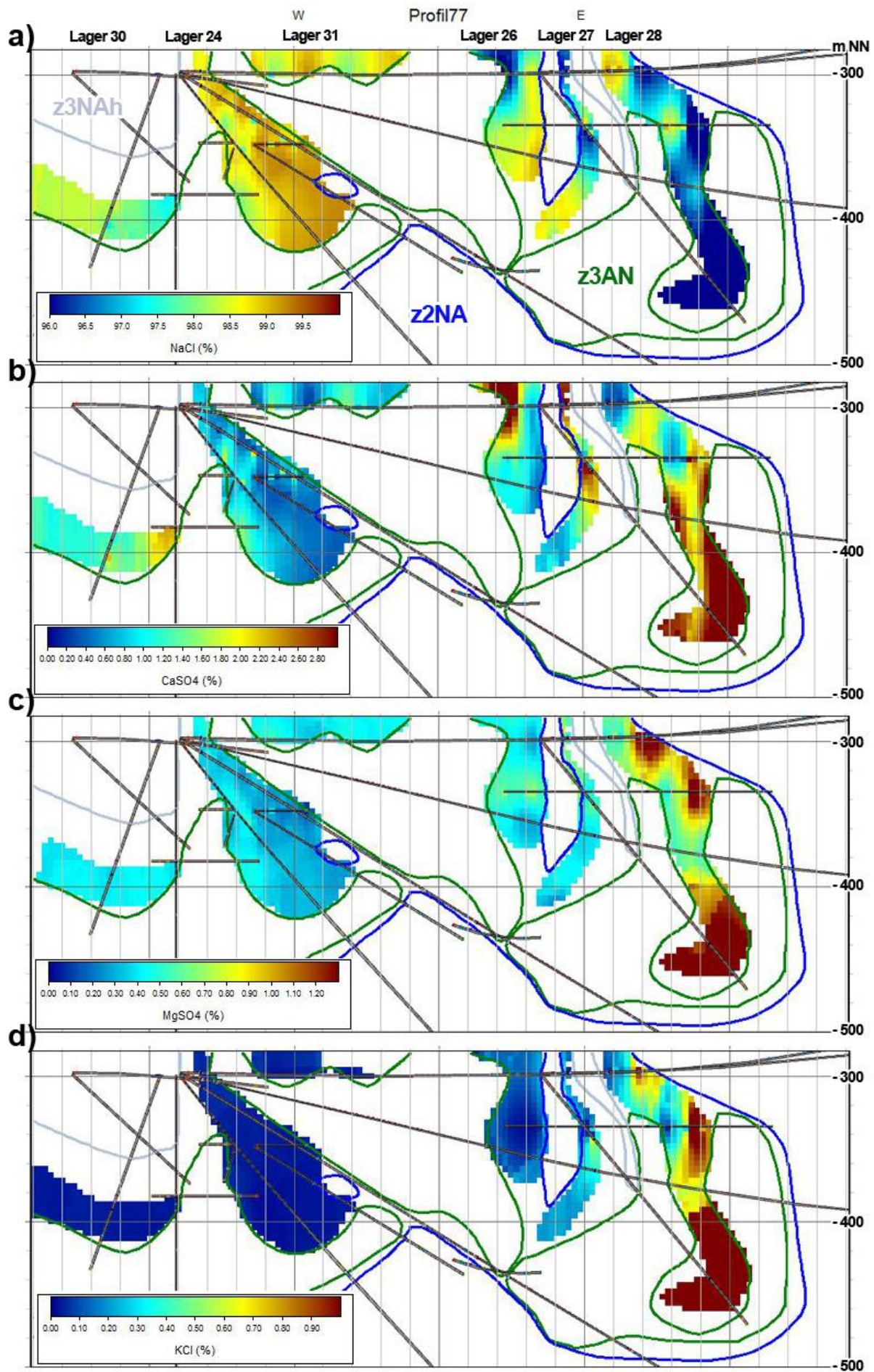


Abbildung 6.30: Interpolationsergebnisse (4-m-Grid, Ordinary Kriging) in Profil 77: a) NaCl-Gehalt, b) CaSO₄-Gehalt, c) MgSO₄-Gehalt, d) KCl-Gehalt. In Grau sind alle bis zu 10 m vom Profil entfernten Bohrungen dargestellt.

Sattel ANT4 im Osten und den hangenden z3-Salzen im Westen liegt. CaSO_4 -, MgSO_4 - und KCl-Gehalt sind hier signifikant erhöht, wobei generell eine Zunahme der Werte Richtung Ostflanke des Lagers zu beobachten ist.

6.2.2.5 Auswertung der Interpolationsergebnisse im Grundriss

521 m-Sohle

Abbildung 6.31 zeigt die Interpolationsergebnisse des NaCl-Gehalts im Grundriss der 521 m-Sohle. Der bereits beschriebene Trend im Lager 20 mit einer zunehmenden Verunreinigung Richtung Hangendes ist sehr gut erkennbar. Eine Abnahme des NaCl-Gehalts auf etwa 97,5 % ist im Lager 20a in etwa 20 m rund um die markante Klippenstruktur erkennbar.

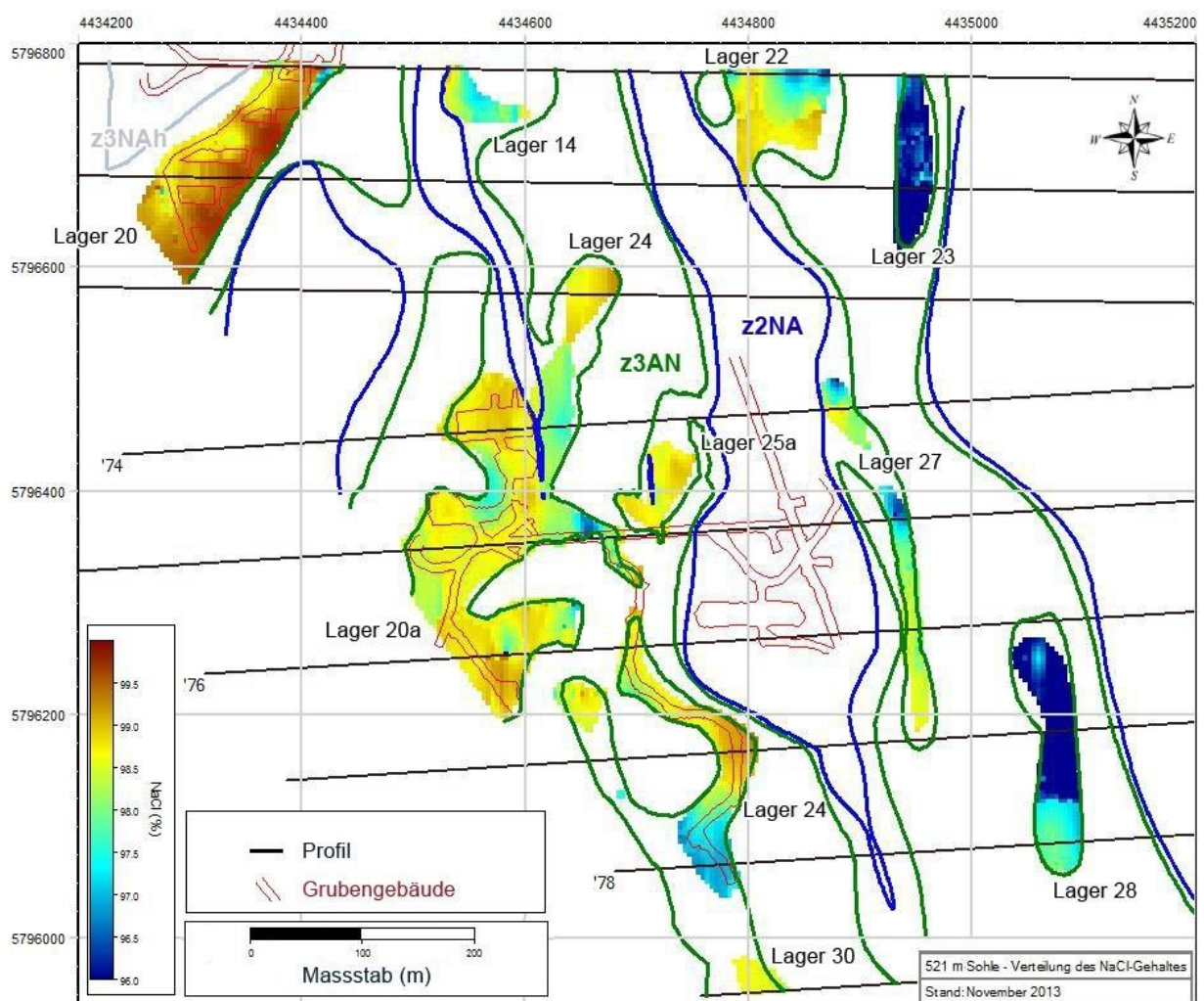


Abbildung 6.31: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des NaCl-Gehalts im Grundriss der 521 m-Sohle.

In ähnlicher Weise ist dies auch im Bereich der Zufahrt des Lagers 24S sowie im südlichen Übergang zu Lager 30 erkennbar. Die geringsten NaCl-Gehalte sind großräumig im Bereich der Lager 23 und 28 ganz im Osten gelegen. Bei Betrachtung der CaSO_4 -Gehalte ergibt sich ein sehr ähnliches Bild (Anlage 10). Werden MgSO_4 - und KCl-Gehalte hinzugezogen, sind hingegen klare Unterschiede in einzelnen Bereichen erkennbar (Anlage 11 und 12). In Lager

20 sind beide Komponenten neben dem CaSO_4 -Gehalt ebenfalls stark erhöht, während im Bereich des Lagers 20a konstant niedrige KCl-Werte und konstant relativ erhöhte MgSO_4 -Werte vorliegen. In Lager 24S ist gemeinsam mit einer starken Erhöhung des CaSO_4 -Gehalts auch eine starke Erhöhung des MgSO_4 -Gehalts im südlichen Übergangsbereich zu Lager 30 zu beobachten. Richtung Osten ist in Lager 27 bereits eine leichte Erhöhung aller Komponenten erkennbar, während in den Lagern 23 und 28 klar die signifikante Erhöhung aller Komponenten zu beobachten ist.

489 m-Sohle

Grundsätzlich sind in den Interpolationsergebnissen auf der 489 m-Sohle ähnliche Sachverhalte wie auf der 521 m-Sohle zu beobachten. Die zuvor beschriebene Klippenstruktur in Lager 20a ragt pilzartig in das Kristallsalz empor und sorgt dort für entsprechend niedrigere NaCl-Gehalte (Abbildung 6.32). Das Lager 24S grenzt auf diesem Sohlenniveau direkt an Staßfurt-Steinsalz und nimmt von dort ausgehend Richtung Hauptanhydrit kontinuierlich im CaSO_4 - und MgSO_4 -Gehalt zu (Anlage 13 und 14). Der KCl-Gehalt ist abseits der östlichen Lager generell niedrig (Anlage 15).

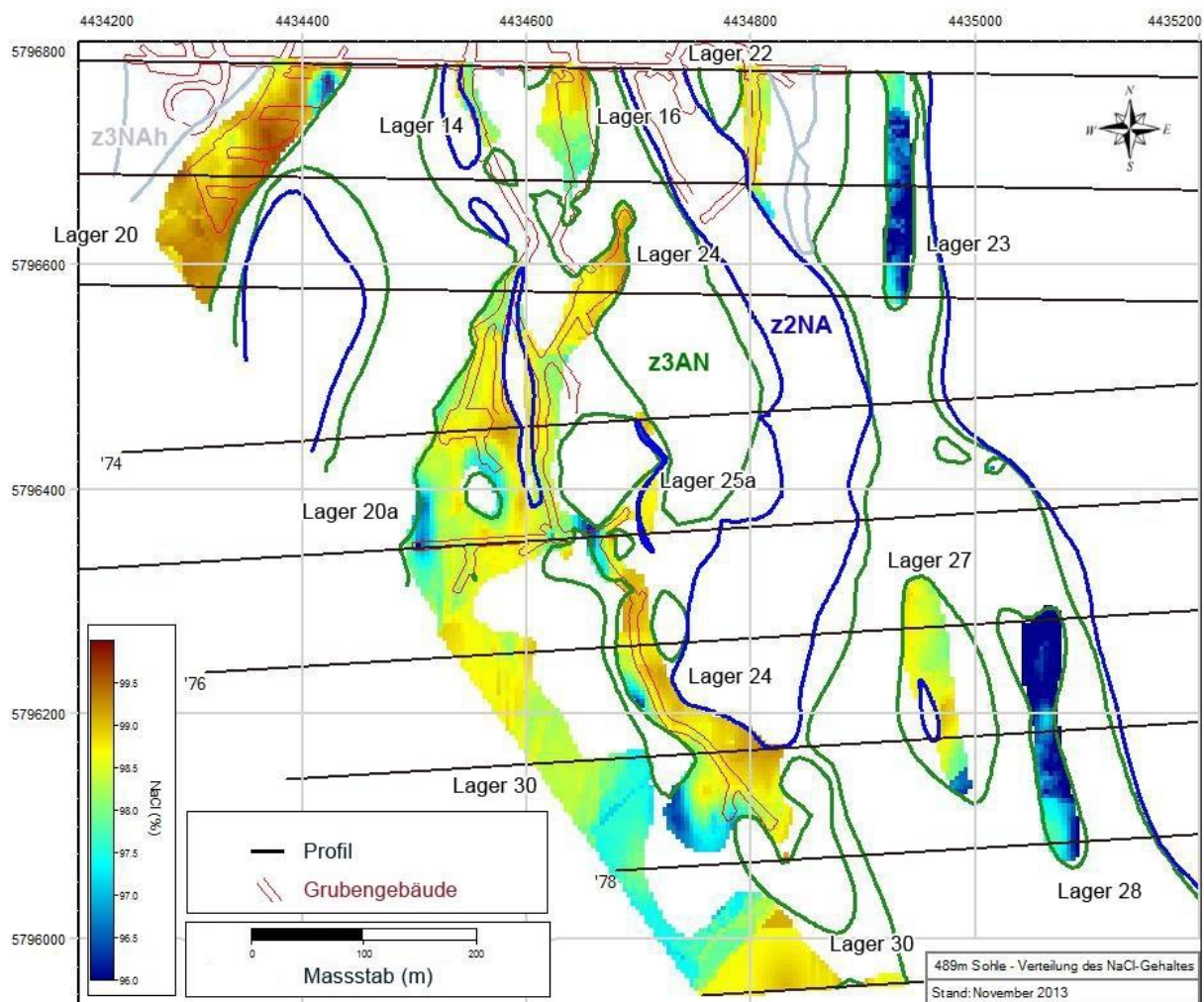


Abbildung 6.32: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des NaCl-Gehalts im Grundriss der 489 m-Sohle.

Das Kristallsalz, welches direkt im Kontaktbereich von Staßfurt-Steinsalz Sattelstrukturen liegt, ist auf diesem Sohlenniveau nur schwach verunreinigt. Eine Ausnahme hiervon stellt Lager 27 dar.

440 m-Sohle

Auf der 440 m-Sohle liegt das Kristallsalz im Bereich des Lagers 20 nun direkt angrenzend an die Staßfurt-Steinsalz-Sattelstruktur ANT2a (Abbildung 6.33). Der NaCl-Gehalt ist hier generell hoch, nimmt jedoch schnell in Richtung Hauptanhydrit ab. Lager 24 ist nun im Osten wieder vom Hauptanhydrit und nicht mehr vom Staßfurt-Steinsalz begrenzt. Generell nimmt der Hauptanhydrit auf diesem Sohlenniveau eine relativ große und zusammenhängende Fläche ein, da er von Osten her aufgeschoben wurde. Trotz des unregelmäßigen Verlaufs ist das Kristallsalz hier in den Lagern 24 und 25 von relativ hoher Reinheit. Eine enorme Erhöhung des CaSO_4 -Gehalts ist im Bereich einer Klippenstruktur im südlichen Übergang des Lagers 27 zu verzeichnen (Anlage 16). Eine Erhöhung des KCl- und MgSO_4 -Gehalts ist neben den östlichen Lagern 23 und 28 auch im Bereich der Sattelstrukturen ANT2b und ANT3a zu verzeichnen (Anlage 17 und 18).

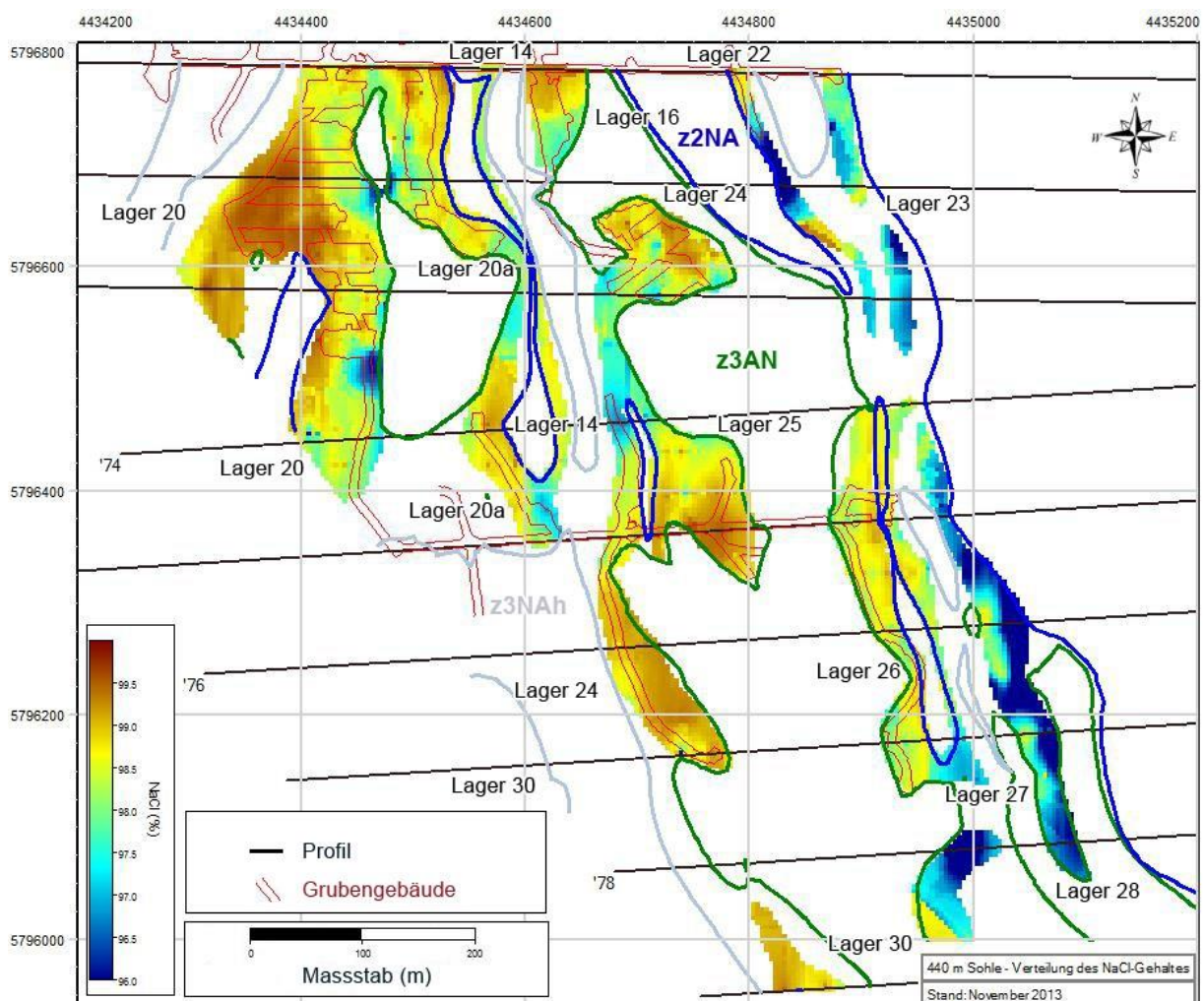


Abbildung 6.33: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des NaCl-Gehalts im Grundriss der 440 m-Sohle.

403 m-Sohle

Auf der 403 m-Sohle überlagert das Lager 20 die Sattelstruktur ANT2a und ist zentral von hoher Reinheit (Abbildung 6.34). Besonders hohe CaSO_4 -Gehalte sind nördlich des Lagers 25 innerhalb einer Hauptanhydritschneise und im südlichen Bereich des Lagers 26 zu beobachten (Anlage 19). Leichte Erhöhungen des CaSO_4 -Gehaltes sind außerdem entlang der Klippenstruktur, welche die Lager 16 und 24 voneinander trennt, und im Bereich des

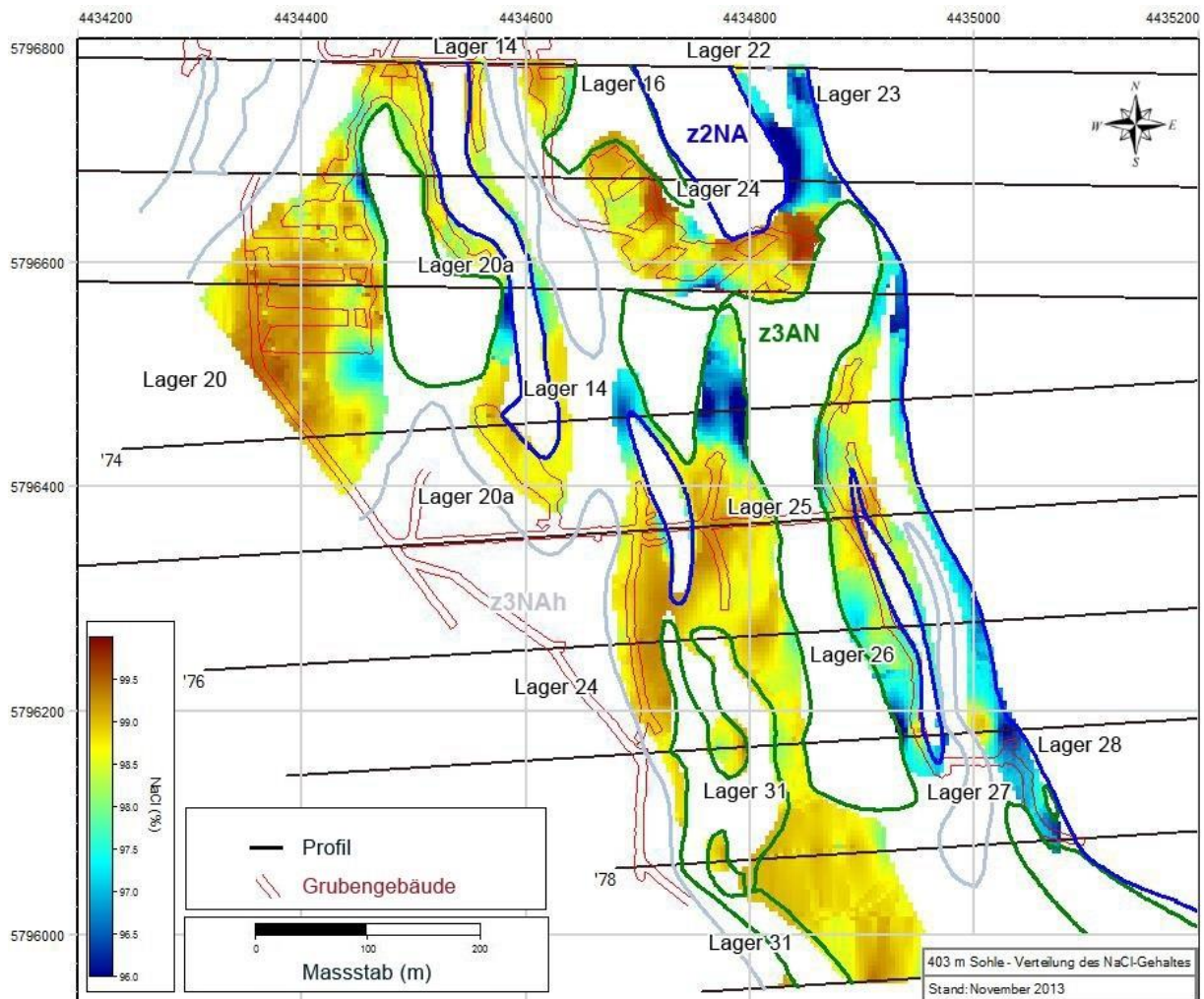


Abbildung 6.34: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des NaCl-Gehalts im Grundriss der 403 m-Sohle.

Hauptanhydrits zwischen den Lagern 20 und 20a zu beobachten. Wie bereits auf der 440 m-Sohle sind auch im Bereich der Sattelstrukturen teils enorme MgSO_4 - und KCl-Erhöhungen zu beobachten (Anlage 20 und 21). Besonders markant ist hier der Übergang von Lager 24 zu Lager 23 im Nordosten. Die Verunreinigung im südwestlichen Teil des Lagers 20 ist ebenfalls auf stark erhöhte KCl- und MgSO_4 -Gehalt und nicht auf eine Erhöhung des CaSO_4 -Gehalts zurückzuführen.

6.2.3 Schwadensalz (z3NAh)

Tabelle 6.5: Statistische Kenngrößen der Schwadensalz (z3NAh) Proben. (* = berechneter Nullwert)

	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	412	412	412	356
Minimum [%]	90,75	0,03	<0,01*	0,030
1. Quartil [%]	97,17	0,38	0,17	0,042
Median [%]	98,54	0,97	0,32	0,062
3. Quartil [%]	99,09	2,35	0,42	0,169
Maximum [%]	99,54	8,28	1,56	2,000
Mittelwert [%]	97,86	1,64	0,30	0,136
Standardabw. [%]	1,77	1,72	0,18	0,182
Varianz	3,14	2,95	0,03	0,033

Das Schwadensalz (z3NAh) wurde im Untersuchungsgebiet in insgesamt 412 Bohrkernmetern analysiert. Die Gesamtstatistik (Tabelle 6.5) spiegelt die Wechsellagerung innerhalb dieses Horizonts in Form relativ hoher Werte der Standardabweichung wider. Der MgSO₄- und KCl-Maximalwert von 1,56 % bzw. 2,00 % sowie der minimal gemessene NaCl-Wert von 90,75 % entfallen auf eine Probe in der Bohrung B783. Die MgSO₄- und KCl-Gehalte liegen bei allen anderen Proben weit unter 1,00 %. Der CaSO₄-Gehalt ist in dieser Probe mit 5,45 % sehr hoch. Ein erhöhter CaSO₄-Gehalt von über 3,00 % ist jedoch auf Grund der Wechsellagerung von reinen Bereichen mit von Anhydrit verunreinigten Bereichen nicht ungewöhnlich (18 % aller Proben).

Mit 205 Proben in den Bohrungen B1111 (56 Proben, 3 Abschnitte), B1112 (110 Proben, 3 Abschnitte) und B1247 (39 Proben, 2 Abschnitte) fällt ein Großteil der Beprobung in den Bereich der sehr breiten Muldenstruktur am Westrand des Untersuchungsgebietes (SYNC 1/2) im Bereich des Profils 76 (Abbildung 6.35). 167 weitere Proben entfallen auf eine ebenfalls relativ breite Muldenstruktur im Norden des Untersuchungsgebietes (SYNC 1a) in und zwischen den Profilen 58 und 70 sowie im Bereich des Profils 73. Es handelt sich hierbei um Proben aus den Bohrungen B783 (86 Proben, 2 Abschnitte), B865 (38 Proben), B871 (23 Proben), B1243 (5 Proben) und B1244 (15 Proben, 2 Abschnitte). Die verbleibenden 42 der 412 Proben entfallen auf die Bohrungen B1061 (20 Proben) und B1062 (22 Proben) in der östlichen sehr schmalen Muldenstruktur im Profil 75. Folglich existieren drei räumlich getrennte, unterschiedliche Beprobungsbereiche innerhalb des Schwadensalzes:

- 1) die breite westliche Muldenstruktur (SYNC1/2) im Bereich des Profils 76,
- 2) die breite westliche Muldenstruktur (SYNC1) im Bereich des Profils 70 und
- 3) die schmale östliche Muldenstruktur (SYNC3a) im Bereich des Profils 75.

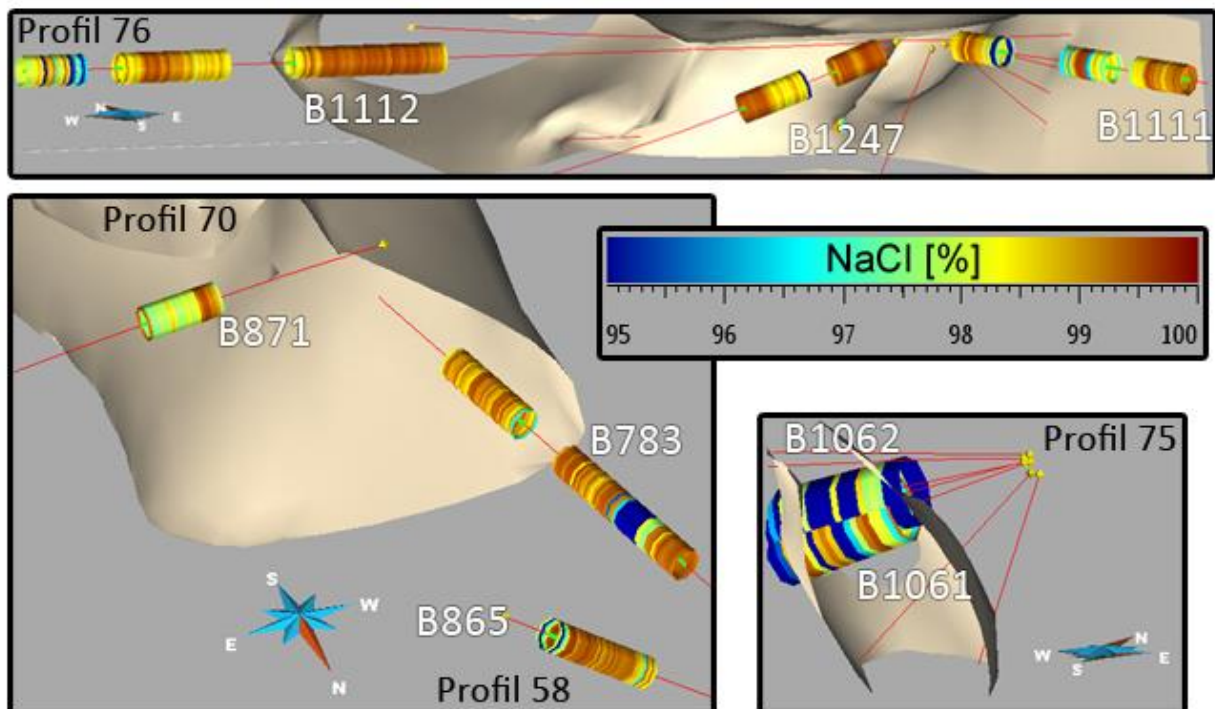


Abbildung 6.35: Lokation der Schwadensalz (z3NAh)-Proben und NaCl-Gehalt entlang der Bohrspurverläufe.

Westliche Muldenstruktur (SYNC1/2)

Mit einem mittleren NaCl-Gehalt von 98,24 % und 1,31 % CaSO_4 ist hier der im Durchschnitt reinste Schwadensalzkörper zu verzeichnen. Die senkrecht zu dem N-S-Streichen verlaufenden Bohrungen B1112 und B1247 weisen sehr breite, reine Bereiche von 99,00 bis 99,50 % NaCl von etwa 10 m bis 15 m Mächtigkeit im Wechsel mit ebenfalls relativ reinen Bereichen mit einem NaCl-Gehalt von 97,00 % bis 98,00 % und einer ähnlichen Mächtigkeit auf. Diese Aussagen über die jeweilige Mächtigkeit sind jedoch begrenzt, da keine zusammenhängenden Beprobungsabschnitte vorliegen. Einige der unreinen Bereiche weisen teilweise auch viel höhere CaSO_4 -Gehalte von bis zu 7,00 % auf, z.B. im dritten Abschnitt der Bohrung B1112. Die MgSO_4 -Gehalte liegen im Mittel bei 0,38 %, wobei relativ starke Schwankungen zwischen 0,12 % und 0,71 % zu verzeichnen sind. Diese korrelieren räumlich nicht mit den Bereichen erhöhter Anhydritkonzentration, sondern scheinen davon meist unabhängig. Eine Ausnahme stellt der dritte Abschnitt der Bohrung B1112 dar, wo parallel zu dem stark erhöhten CaSO_4 -Gehalt der MgSO_4 -Gehalt auffällig niedrig ist und im Mittel nur 0,26 % beträgt. Einhergehend sind hier auch relativ niedrige KCl-Gehalte von 0,03 % bis 0,05 % zu verzeichnen, die ansonsten meist bei 0,06 % liegen. Bezüglich des KCl-Gehalts sind zwei klare Trends zu erkennen. Entlang der Bohrung B1112 nimmt der KCl-Gehalt von 0,07 % auf 0,03 % in Richtung Westen ab. Innerhalb der nicht horizontalen Bohrung B1247 steigt der KCl-Gehalt Richtung Westen und bei zunehmender Teufe kontinuierlich von 0,05 % auf 0,16 % an.

Westliche Muldenstruktur (SYNC1)

Die Gesamtbetrachtung zeigt eine etwas schlechtere Qualität mit im Mittel 97,93 % NaCl und 1,51 % CaSO_4 im Vergleich zur südlich gelegenen Muldenstruktur. Eine Wechsellagerung von reinen und stärker verunreinigten Bereichen ist vor allem entlang der Bohrung B871 im Profil 70 gut erkennbar, wo ein 6 m mächtiger Bereich mit einem NaCl-Gehalt von ca. 99,00 % NaCl in beide Richtungen klar zu Bereichen mit 96,00 % bis 97,00 % NaCl abgegrenzt ist. Innerhalb der Bohrung B865 im Profil 58 wurde ein entsprechend reiner Bereich sogar auf einer Länge von 27 m angetroffen. Die zwischen den Profilen, also parallel zur Streichrichtung verlaufende Bohrung B783 zeigt auf viel kürzeren Distanzen von 2 m bis 5 m geringe Schwankungen des NaCl-Gehalts zwischen ca. 99,50 % und 98,50 %. Ausnahme stellt ein 14 m langer Abschnitt dar, der sehr auffällige Abweichungen zeigt. Neben den KCl- und MgSO_4 -Maximalwerten erreicht auch der CaSO_4 -Gehalt hier mit 8,28 % sein gemessenes Maximum innerhalb des Schwadensalzes und ist generell sehr hoch, meist über 4,00 %. Ein durchweg stark erhöhter KCl-Gehalt zwischen 0,40 % und 2,00 % mit einem Mittelwert von 0,72 % ist hier bemerkenswert. Der KCl-Gehalt ist in der nahe der Basis des Schwadensalzes verlaufenden Bohrung jedoch generell stark erhöht und weist auch in den benachbarten Abschnitten einen sehr hohen Mittelwert von 0,29 % KCl auf. Hierbei ist ein Trend Richtung Süden zu verzeichnen, wobei der KCl-Gehalt kontinuierlich von 0,31 % bis auf 0,16 % innerhalb des südlichen Beprobungsabschnitts abnimmt. In der im Kern der Muldenstruktur verlaufenden Bohrung B871 ist der KCl-Gehalt vergleichsweise gering bei 0,04 %, während in der Bohrung B865 mit zunehmender Teufe ein Anstieg auf 0,07 % zu verzeichnen ist. In der Bohrung B1244 ist im zentralen Bereich der Mulde ebenfalls ein sehr geringer KCl-Gehalt von 0,03 % ausgewiesen, während ein kontinuierlicher Anstieg bis auf 0,17 % bis hin zur östlichen Schichtgrenze festzustellen ist.

Der MgSO_4 -Gehalt variiert unabhängig von der Wechsellagerung relativ stark, ist aber insgesamt mit einem Mittelwert von 0,19 % sehr niedrig. Besonders in den nördlichen, tief gelegenen Bohrungen B783 und B865 sind häufig sehr niedrige Werte unter 0,10 % MgSO_4 auffällig. In der höher gelegenen Bohrung B871 liegt der MgSO_4 -Gehalt meist zwischen 0,20 % und 0,30 % und in den südlichen Bohrungen B1243 und B1244 zwischen Werten von 0,30 % und 0,60 %. Ausgenommen den Bereich stark erhöhter MgSO_4 -Gehalte bis zu 1,56 %, einhergehend mit stark erhöhten KCl- und CaSO_4 -Gehalten, in der Bohrung B783 lässt sich bezüglich des MgSO_4 -Gehalts generell ein Trend mit zunehmenden Werten von Nord nach Süd beobachten.

Östliche Muldenstruktur (SYNC3a)

Mit einem mittleren Gehalt von nur 95,43 % NaCl und 4,06 % CaSO_4 ist dieser östliche Schwadensalz-Abschnitt mit Abstand am stärksten verunreinigt. Vereinzelt sind 1 m bis 3 m mächtige Abschnitte mit etwa 99,00 % NaCl zu beobachten, die jedoch mit stark anhydritischen Bereichen von 4,00 % bis 5,00 % und in manchen Fällen sogar bis zu 8,00 % CaSO_4 in Wechsellagerung stehen. Generell ist ein viel engerer Wechsel von reinen und unreinen Bereichen zu verzeichnen. Zugleich sind größere Unterschiede in der Zusammensetzung der wechselnden Bereiche zu beobachten. Innerhalb von einem Meter kann der NaCl-Gehalt um 6 bis 7 Prozentpunkte variieren. Nicht nur innerhalb, sondern auch zwischen den Bohrungen wird diese starke Heterogenität deutlich. Die beiden Bohrungen B1061 und B1062 sind hier vertikal nur 3 m bis 4 m voneinander entfernt, der durchschnittlichen NaCl-Werte weichen jedoch um 2,69 % voneinander ab. Klare Unterschiede in der Mächtigkeit der in Wechsellagerung stehenden Bereiche sind ebenfalls deutlich zu erkennen (Abbildung 6.35). Einhergehend mit den generell höheren CaSO_4 -Gehalten in der oberen Bohrung B1062 ist auch ein höherer MgSO_4 -Gehalt von 0,45 % zu verzeichnen, der in der Bohrung B1061 im Mittel nur 0,32 % beträgt. Die Schwankungen im MgSO_4 -Gehalt innerhalb der Bohrungen sind jedoch unabhängig von der Wechsellagerung. Der KCl-Gehalt ist in beiden Bohrungen mit im Mittel 0,12 % relativ hoch. Die im Zentrum gemessenen Werte sind jedoch mit 0,05 % bis 0,07 % KCl weitaus geringer. Bemerkenswert ist ein kontinuierlicher Anstieg Richtung Randbereich des Schwadensalzes. In Richtung östliche Schichtgrenze nimmt der KCl-Gehalt kontinuierlich zu und erreicht Werte von bis zu 0,40 %. Eine kontinuierliche Zunahme ist auch Richtung westliche Schichtgrenze zu beobachten, bis hin zu Werten von 0,15 % KCl.

6.2.4 Bewertung der untersuchten Steinsalzhorizonte

Staßfurt-Steinsalz (z2NA)

In der sehr breiten östlichen Sattelstruktur (ANT4) sind generell hohe CaSO_4 - und sehr geringe MgSO_4 - und KCl-Gehalte zu beobachten. In unregelmäßigen Abständen sind vereinzelt reinere Bereiche mit geringeren CaSO_4 -Gehalten vorhanden. In Richtung Salzrand bzw. -basis sind eine Homogenisierung und ein leichter Anstieg des NaCl-Gehalts zu beobachten. In der stark eingeengten westlichen Sattelstruktur (ANT1) ist der CaSO_4 -Gehalt konstant niedrig, KCl- und MgSO_4 -Gehalt jedoch signifikant erhöht und nehmen zu den Flanken in Richtung Kaliflöz Staßfurt weiter zu. Nur im Sattelzentrum ist ein etwa 4 m breiter Bereich mit relativ niedrigem MgSO_4 -Gehalt zu verzeichnen. Im zentralen Bereich nahe der Salzbasis liegen generell höhere MgSO_4 -Gehalte vor als in der östlichen Sattelstruktur.

Kristallsalz (z3NAKR)

In Annäherung an Anhydritklippen ist generell eine Zunahme des CaSO_4 -Gehalts zu beobachten, meist bis auf 1,50 %, teilweise auch bis 3,00 %. Leicht erhöhte CaSO_4 -Gehalte sind zum Teil noch bis in 50 m Entfernung vorhanden. Davon unabhängig sind die KCl- und MgSO_4 -Gehalte. Diese unterliegen innerhalb einzelner Lager relativ geringen Schwankungen, ausgenommen die Lager 23 und 28 in der östlichen Muldenstruktur (SYNC3/SYNC3a). Dort sind sowohl KCl- als auch MgSO_4 -Gehalt sehr stark erhöht und unterliegen hohen Schwankungsbreiten. Eine leichte Erhöhung von KCl- und MgSO_4 -Gehalt ist häufig in Nähe des Kaliflözes Staßfurt im Kontaktbereich der Staßfurt-Steinsalz-Sattelstrukturen zu verzeichnen. Parallel sind hier meist sehr niedrige CaSO_4 -Gehalte vorhanden, die mit Entfernung von der Sattelstruktur leicht ansteigen. Bezüglich des MgSO_4 -Gehalts ist generell eine leichte Erhöhung von Werten um 0,30 % im Norden, auf Werte um 0,40 % im Süden zu beobachten.

Schwadensalz (z3NAh)

Unabhängig von der Wechsellagerung reiner Bereiche mit den unreinen Schwadenzonen liegt stets ein Anstieg des KCl-Gehalts in Richtung Liegendgrenze vor. In der stark eingegengten östlichen Mulde (SYNC3b) ist generell eine relative Erhöhung des CaSO_4 -Gehalts zu verzeichnen. Im Gegensatz zu den dortigen Kristallsalzlager sind MgSO_4 - und KCl-Gehalt jedoch nicht signifikant erhöht.

6.3 Klassifizierung der Kristallsalzlager

Relevant für die bergmännische Planung zum Abbau einer steilstehenden Salzlagerstätte sind in der Regel Wertstoffgehalt und Mächtigkeit. Im Falle von Steinsalzprodukten spielt außerdem die Farbe und die Korngröße eine wichtige Rolle. Des Weiteren sind die Homogenität dieser Parameter sowie die geometrische Kontinuität der Lagergrenze von großer Bedeutung. Diese Kenngrößen sind das Produkt einer Vielzahl möglicher Einflussfaktoren und Geneseprozesse, über die Abbildung 6.36 einen Überblick gibt. Unterschiede können auf veränderte Sedimentationsbedingungen, den Prozess der Diagenese, aber auch auf unterschiedliche tektonische Prozesse und damit verbundene Deformationsvorgänge zurückzuführen sein. Auf Grund der polyphasen Deformation und komplizierten Entstehung bis hin zu der heute vorliegenden steil stehenden

Messbare bzw. bewertbare Eigenschaften einzelner Kristallsalzlager	Mögliche Faktoren / Geneseprozesse
relevant für bergmännische Planung Qualität - Mineralogische Bestandteile - Farbe - Korngröße - Homogenität o.g. Parameter Quantität/Geometrie - Mittl. Mächtigkeit - Form (Kontinuität) relevant für geologisches Verständnis Faltengeometrie - Muldenbreite - Muldentiefe - Vergenz - Öffnungswinkel - Streichrichtung - Ost-/Westschenkel Sonstige Merkmale - Strukturelle Situation - Normale Lagerung - Abgequetscht - Klippennähe (z3AN) - Mächtigkeit des sulf. Saums - Sulf. Schnitte/Gänge - Lösungs-/Gasführung	Gesteinsbildende Prozesse - Primäre Sedimentation - Sulfatische Linien - Mächtigkeitsschwankungen - Diagenese (v.a. Hauptanhydrit) - Volumenverlust - Freisetzung/Zirkulation von (sulf.) Lösungen Tektonische Prozesse - Syndimentäre Extension - Anhydritklippenbildung (Gipsdiapirismus) - Anhydritarme / -Brocken in Klippenumfeld - Postsedimentäre Extension - Floßtektonik - Faltenbildung durch Salzzufluß - Brüche entlang der Schwachstellen des Hauptanhydrit - Kretazische Kompression - Remobilisierung (Drucklösung) - Abquetschen primärer Sattelstrukturen - Einengung primärer Muldenstrukturen - Anlage sekundärer Sattelstrukturen - Subrosion durch Hebung - Lösung und Remobilisierung durch Zutritt von Oberflächenwasser in ausbeißenden Hauptanhydrit Sonstige Prozesse ?

Abbildung 6.36: Überblick über alle messbaren bzw. bewertbaren Eigenschaften einzelner Kristallsalzlager und mögliche Einflussfaktoren und Geneseprozesse (basierend auf den Recherchearbeiten der Kapitel 2,3 und 4).

Steinsalzlagerstätte ist eine schnelle und eindeutige Zuweisung eines Prozesses als maßgeblicher Faktor für einen Qualitätsparameter kaum möglich. Entsprechend sind vorerst zusätzliche Kenngrößen hinzuzuziehen, um das geologische Verständnis zu verbessern und die Wirkung der jeweiligen Geneseprozesse und möglicher Faktoren besser zu verstehen. Zu diesen zusätzlichen Kenngrößen zählen die Faltengeometrie und weitere Merkmale wie die strukturelle Situation in Form der Zuweisung zu einer der vorgestellten Geometrietypen.

6.3.1 Auswahl geeigneter Indikatoren

Im Idealfall sollten einzelne Einflussfaktoren auf die Wertstoffverteilung des Kristallsalzes eindeutige unterschiedliche Eigenschaften vorweisen, die von messbaren Indikatoren ableitbar sind. Diese sind jedoch im vorliegenden Fall teilweise nur schwer abzuleiten. Als Beispiel für eine eindeutig benennbare Kenngröße sei hier der faltengeometrische Aspekt genannt, ob es sich bei dem vorliegenden Lager um den Ost- oder Westschenkel einer Muldenstruktur handelt. Auch wenn es Übergangsbereiche im Muldentiefsten gibt und teilweise breite, annähernd horizontal liegende Kristallsalzlager existieren, ist in der Regel eine eindeutige Zuweisung möglich.

Schwieriger wird die Beantwortung der Frage, ob es sich um einen schmalen oder breiten Muldenschenkel handelt. Die Mächtigkeit eines Muldenschenkels ist zwar lokal eindeutig messbar, jedoch müssen vorerst Klassen mit entsprechenden Spannweiten definiert und eine Normalmächtigkeit ermittelt werden. Des Weiteren erschweren die vorliegenden starken Mächtigkeitsschwankungen über kurze Distanzen eine Einordnung. Die jeweilige Berücksichtigung dieser Varianz in Form einer Einteilung in immer kleinere Betrachtungsbereiche würde bis hin zu einer Betrachtung einzelner Bohrungen und Auffahrungen führen, ohne die im 3D-Modell erzeugten und dargestellten räumlichen Zusammenhänge mit einfließen zu lassen. Aus diesem Grund werden nachfolgend Kenngrößen vorgestellt, die jeweils für ein zusammenhängendes Kristallsalzlager bestimmt werden können um diese im großen Maßstab miteinander zu vergleichen.

6.3.1.1 Qualitätsparameter

Bestandteile

Der wichtigste und aussagekräftigste Qualitätsparameter ist die Zusammensetzung des Steinsalzes. An dieser Stelle stellt sich die Frage, auf welche Mineralogie die errechneten geochemischen Kenngrößen hindeuten. Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit entspricht der ermittelte NaCl-Gehalt dem Mineral Halit und der CaSO_4 -Gehalt dem Mineral Anhydrit. Welchen Salzmineralen jedoch das gemessene Kalium und Magnesium zuzuordnen ist, ist nicht eindeutig. Mg^{2+} und SO_4^{2-} können das Mineral Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) widerspiegeln, das häufig in Streckenauffahrungen anhand von Ausblühungen zu Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$)

im Übergangsbereich zum Kaliflöz Staßfurt identifiziert werden konnte. Andererseits ist gemeinsam mit K_2^{2+} bzw. K_2^{2+} und Ca^{2+} auch das Vorhandensein diverser anderer Minerale wie Kainit, Langbeinit oder Polyhalit möglich. Ausgehend von einem vereinfachten System aus dem reziproken Salzpaar $MgCl_2$ und K_2SO_4 , ergibt sich entsprechend dem Jänecke-Diagramm bei einer vollständigen NaCl-Sättigung ein Dreistoffsystem aus Mg^{2+} , SO_4^{2-} und K_2^{2+} , in dem es zur gleichzeitigen Ausfällung von Epsomit bzw. Hexadrit und Kainit oder bei fortschreitender Sättigung zur parallelen Ausfällung von Kieserit, Carnallit und im finalen Stadium zusätzlich Bischofit kommt (WARREN, 2006). Das Vorhandensein von reinem KCl in Form des Minerals Sylvinit ist im Rahmen einer Remobilisierung des Kaliflöz Staßfurt ebenfalls nicht unwahrscheinlich und wurde von HORN (2016) auch mehrfach im Kristallsalz nachgewiesen. Unabhängig von der exakten Mineralogie ist bei Erhöhungen des errechneten KCl- und $MgSO_4$ -Gehalts im Kristallsalz grundsätzlich von sekundären Mineralanreicherungen auszugehen, die ihren stofflichen Ursprung im Kaliflöz Staßfurt haben.

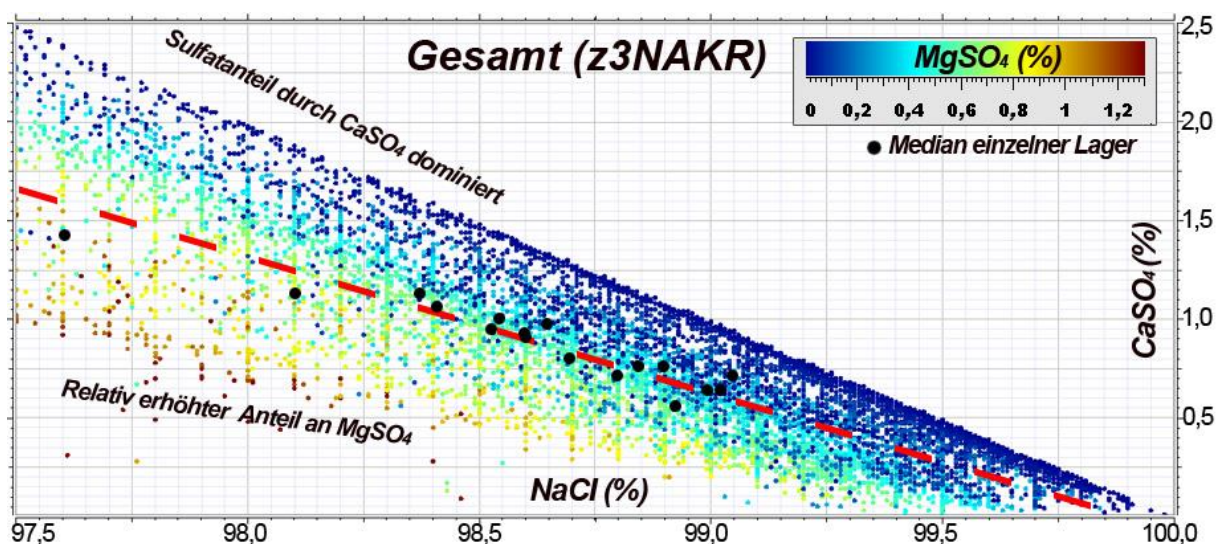


Abbildung 6.37: Streudiagramm NaCl/CaSO₄ der Gesamtheit aller Kristallsalz (z3NAKR)-Proben.

Die Betrachtung der Gesamtheit aller Kristallsalzproben in einem Streudiagramm zwischen NaCl- und CaSO₄-Gehalt spiegelt den Sachverhalt wider, dass niedrige NaCl-Gehalte meist durch erhöhte CaSO₄-Gehalte bedingt sind (Abbildung 6.37). Jedoch ist auch der MgSO₄-Gehalt in einigen Fällen eine wichtige Komponente. Die weiteren Bestandteile sind generell so gering, dass sich im Streudiagramm annähernd ein Dreistoffmodell aus NaCl, CaSO₄ und MgSO₄ ergibt. Unter dieser Annahme markiert die rote Trennlinie in Abbildung 6.37 einen MgSO₄-Anteil am Gesamtsulfat von 30 %. Der Ansatzpunkt bei 99,90 % NaCl resultiert aus einer Berücksichtigung von sonstigen Komponenten, vor allem KCl. Alle Analysedaten unterhalb dieser Trennlinie stellen eine relative Erhöhung des MgSO₄-Gehalts dar. Die NaCl/CaSO₄-Medianwerte der einzelnen Lager liegen entlang dieser Isolinie, teils leicht darüber, teils leicht darunter.

Noch deutlicher wird dieser Sachverhalt bei Betrachtung des $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ -Streudiagramms (Abbildung 6.38). Hier ist zusätzlich ab einem MgSO_4 -Gehalt von etwa 0,50 % eine klare Abhängigkeit von MgSO_4 und KCl-Gehalt erkennbar.

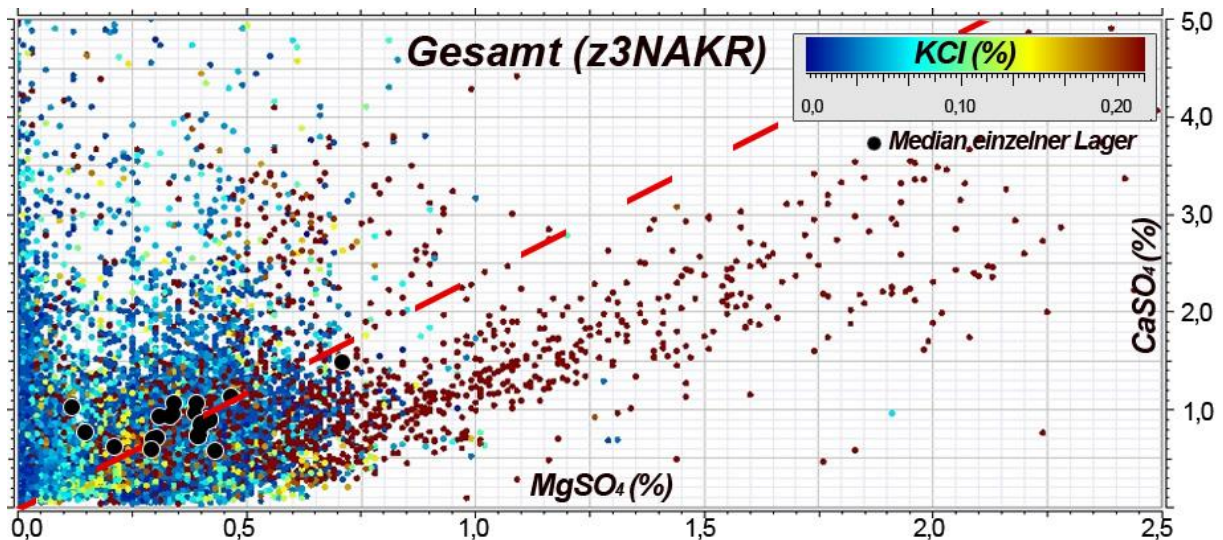


Abbildung 6.38: Streudiagramm $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ der Gesamtheit aller Kristallsalz (z3NAKR)-Proben.

Insgesamt können vier Ausbildungstypen anhand des Gesamtsulfatanteils und des Verhältnisses von CaSO_4 und MgSO_4 ausgewiesen werden. Diese sind einerseits die Randklassen mit besonders hohem bzw. niedrigem Gesamtsulfatanteil (Typ 4 mit mehr als 1,60 % bzw. Typ 1 mit weniger als 1,00 %) sowie zwei Klassen mit einem Gesamtsulfatanteil von 1,00 % bis 1,60 % mit einem MgSO_4 -Anteil an Gesamtsulfat von über 30 % (Typ 3) bzw. unter 30 % (Typ 2, Tabelle 6.6).

Tabelle 6.6: Die vier Ausbildungstypen der Kristallsalzes (z3NAKR). Angewendete Klassengrenzen in rot.

Mineralogischer Typ	Typ1	Typ2	Typ3	Typ4
NaCl-Gehalt [%]	~ 99,00	98,40 - 98,90	98,60 - 98,90	97,60 - 98,10
KCl-Gehalt [%]	0,02 - 0,04	0,02 - 0,07	0,02 - 0,03	0,17 - 0,41
$\text{CaSO}_4 + \text{MgSO}_4$ [%]	< 1,00	1,00 - 1,60	1,00 - 1,60	> 1,60
MgSO_4 / Gesamtsulfat [%]	16 - 39	< 30 (15 – 30)	> 30 (32 – 45)	30 – 33
Lager	L16, L20, L24S	L14N, L14S, L20aN, L22, L24N, L25, L26, L32	L20aS, L27, L30, L31	L23, L28

Die $\text{NaCl}/\text{CaSO}_4$ -Streudiagramme der jeweiligen Ausbildungstypen spiegeln die signifikanten Unterschiede bezüglich der jeweiligen Bestandteile sehr gut wider. Für den Ausbildungstyp 1 sehen die Streudiagramme grundsätzlich den Diagrammen der Gesamtheit aller Proben sehr ähnlich und weisen eine breite Streuung auf (Abbildung 6.39 und 6.40). Im $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ -Streudiagramm sind zwei Hauptgruppen erkennbar, nämlich ein Bereich mit sehr niedrigen

MgSO₄-Werten entlang der CaSO₄-Achse und ein Bereich mit CaSO₄-Werten zwischen 0,5 und 1,0 % bei erhöhtem MgSO₄- und KCl-Gehalt.

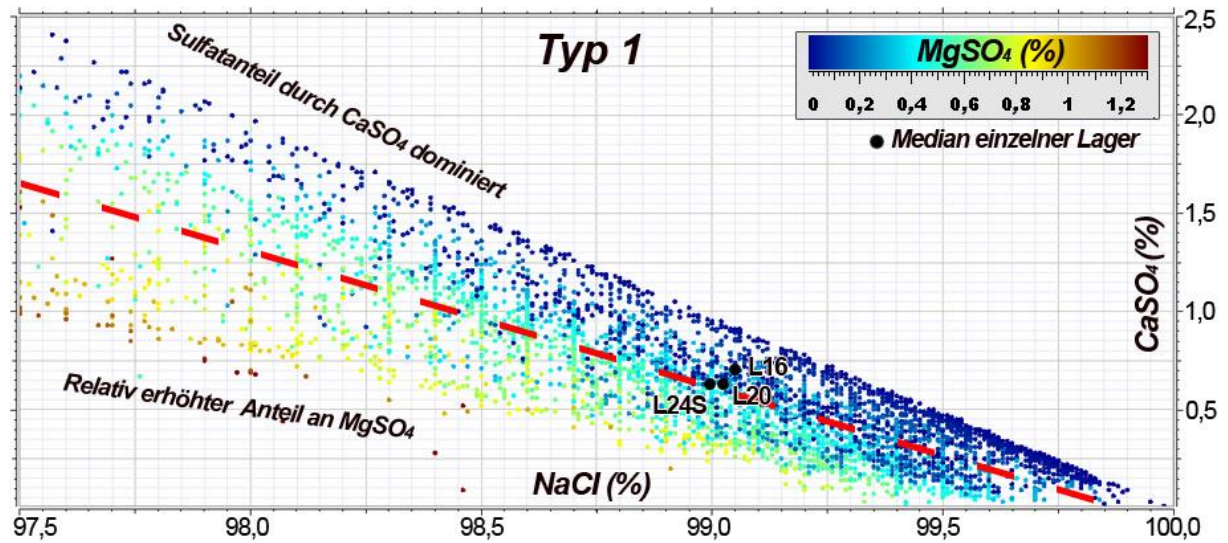


Abbildung 6.39: Streudiagramm NaCl/CaSO₄ des Ausbildungstyps 1 des Kristallsalzes (z3NAKR).

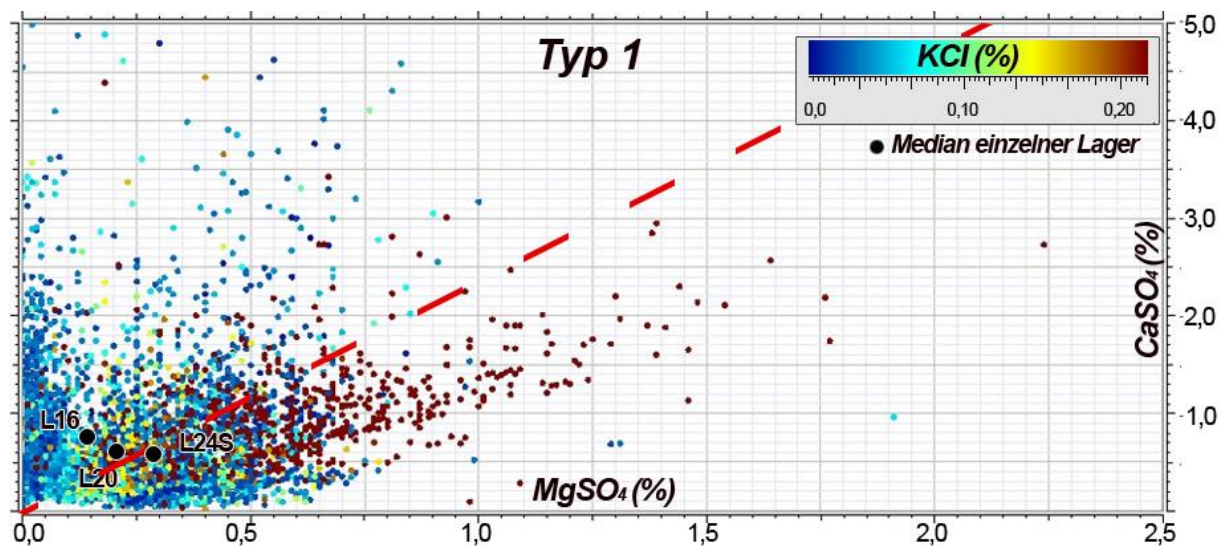


Abbildung 6.40: Streudiagramm CaSO₄/MgSO₄ des Ausbildungstyps 1 des Kristallsalzes (z3NAKR).

In den Streudiagrammen des Ausbildungstyps 2 sind diese zwei Hauptgruppen ebenfalls zu beobachten, jedoch mit weitaus geringerer Streuung und keiner derart starken Ausprägung von Proben mit stark erhöhtem MgSO₄- und KCl-Gehalt (Abbildung 6.41 und 6.42).

Die Streudiagramme des Ausbildungstyps 3 unterscheiden sich stark von den vorherigen (Abbildung 6.43 und 6.44). Die Gruppe mit niedrigen MgSO_4 -Gehalten entlang der CaSO_4 -Achse fehlt vollständig. Die Punktwolke im $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ -Streudiagramm ist auf einen sehr engen Bereich konzentriert. Stark erhöhte MgSO_4 - und KCl -Gehalte sind kaum noch vorhanden.

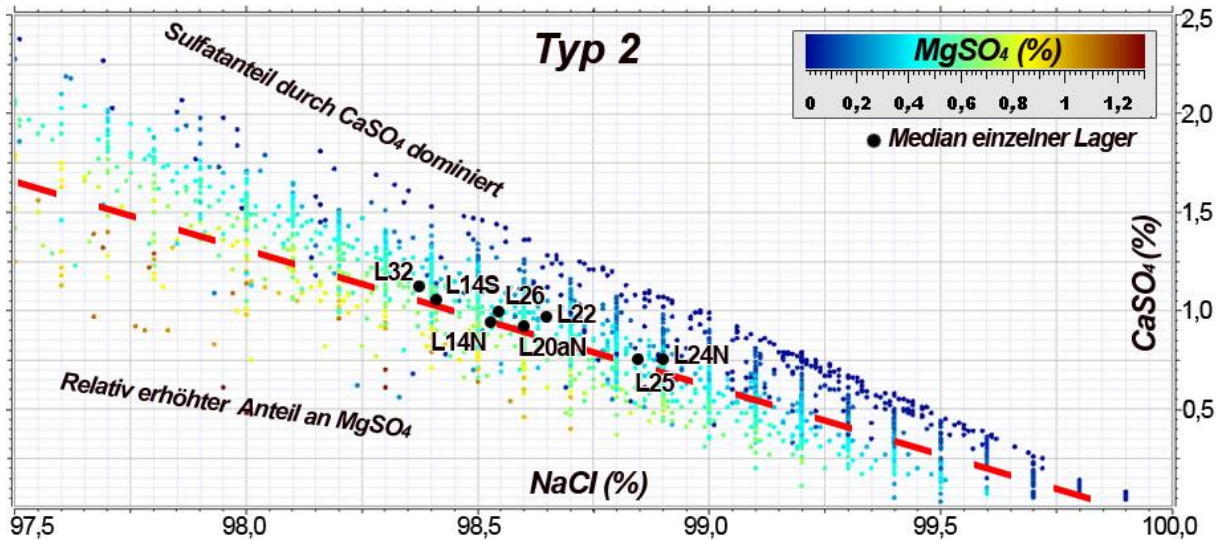


Abbildung 6.41: Streudiagramm $\text{NaCl}/\text{CaSO}_4$ des Ausbildungstyps 2 des Kristallsalzes (z3NAKR).

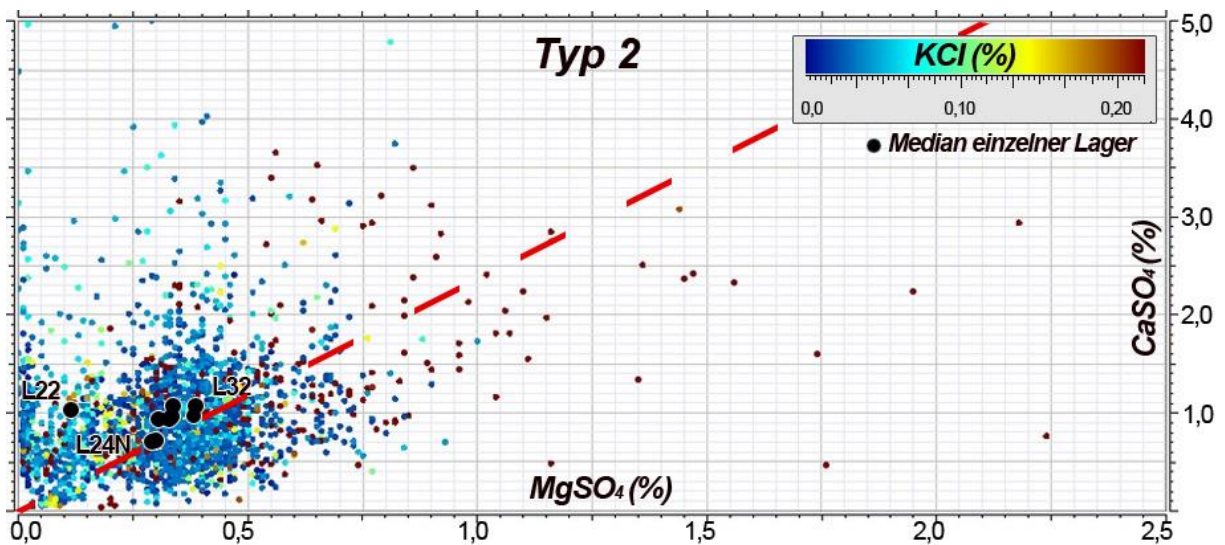


Abbildung 6.42: Streudiagramm $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ des Ausbildungstyps 2 des Kristallsalzes (z3NAKR).

In starkem Kontrast dazu stehen die Streudiagramme des Ausbildungstyps 4 (Abbildung 6.45 und 6.46). Die im Ausbildungstyp 3 stark vertretene Gruppe fehlt hier fast vollständig. Stattdessen ist, wie schon bei den Ausbildungstypen 1 und 2 sichtbar, eine Gruppe entlang der CaSO_4 -Achse und zusätzlich eine extrem stark durch MgSO_4 und KCl dominierte Gruppe ausgebildet.

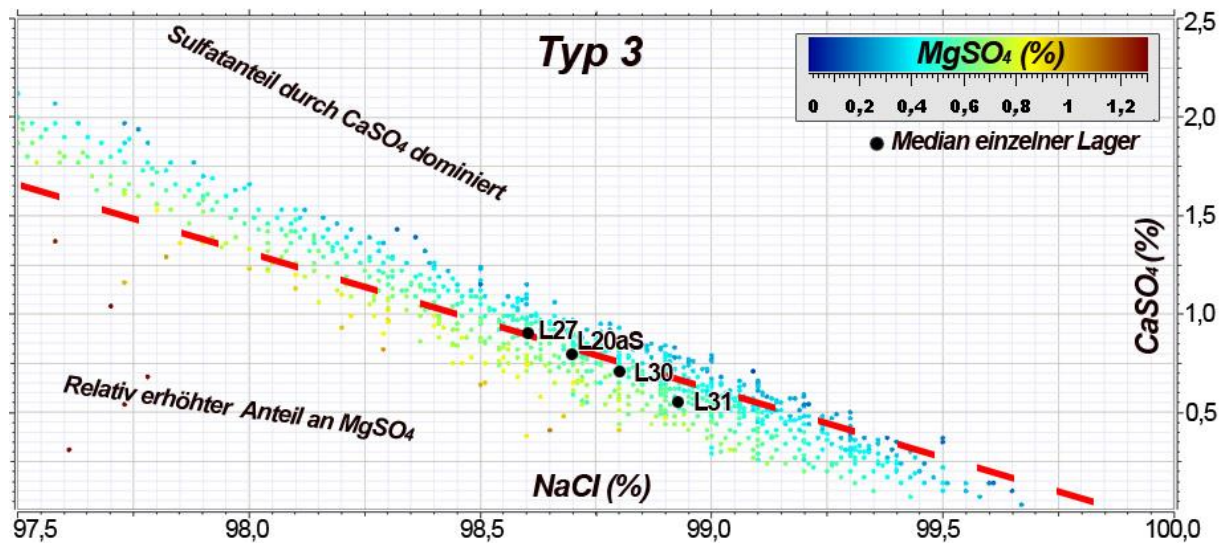


Abbildung 6.43: Streudiagramm NaCl/CaSO₄ des Ausbildungstyps 3 des Kristallsalzes (z3NAKR).

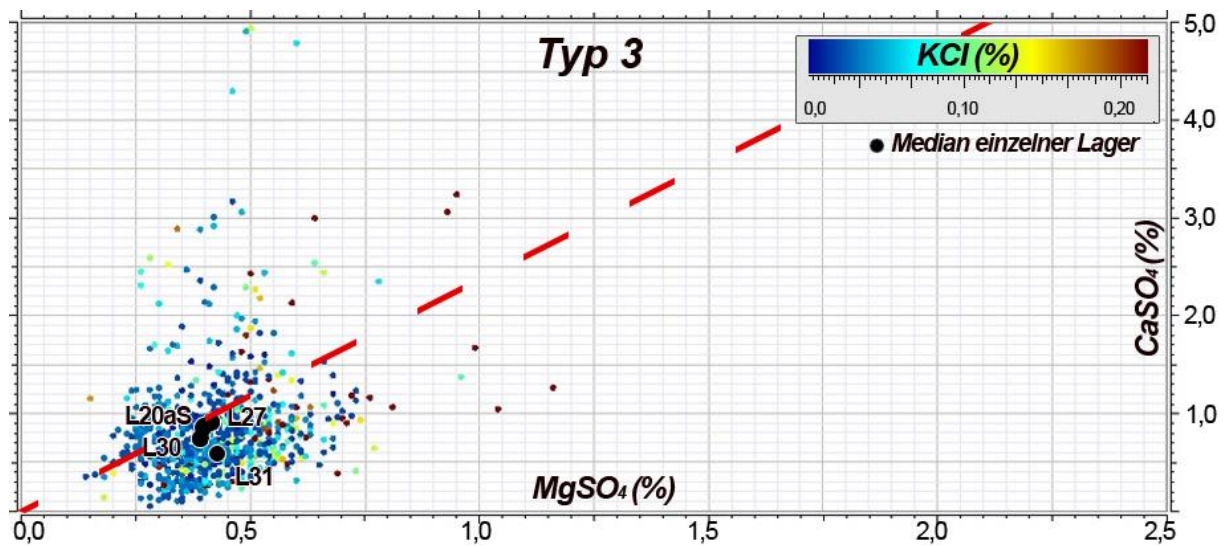


Abbildung 6.44: Streudiagramm CaSO₄/MgSO₄ des Ausbildungstyps 3 des Kristallsalzes (z3NAKR).

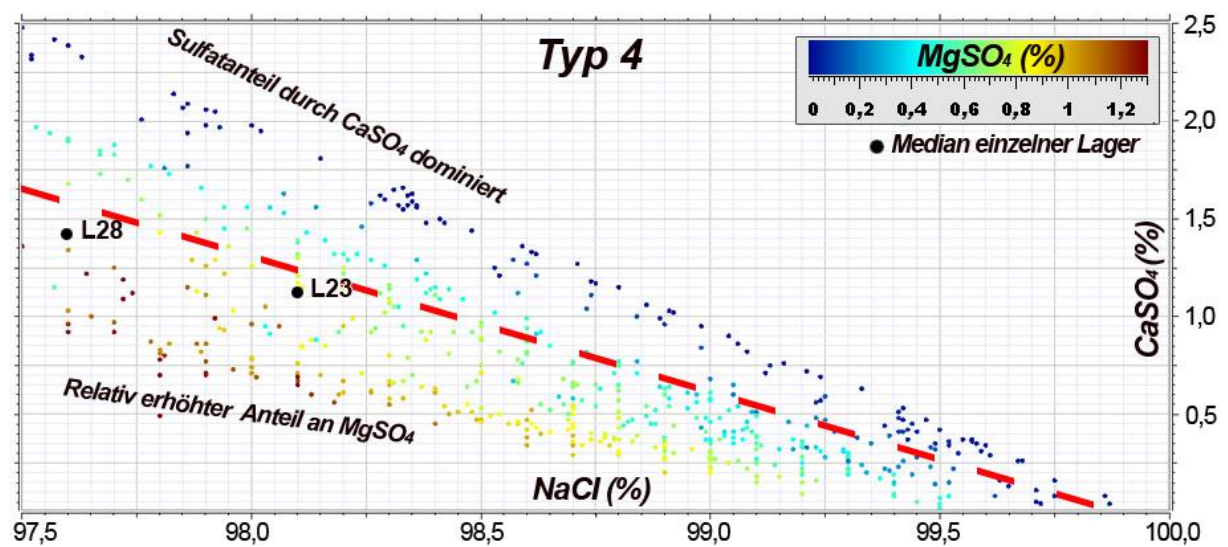


Abbildung 6.45: Streudiagramm NaCl/CaSO₄ des Ausbildungstyps 4 des Kristallsalzes (z3NAKR).

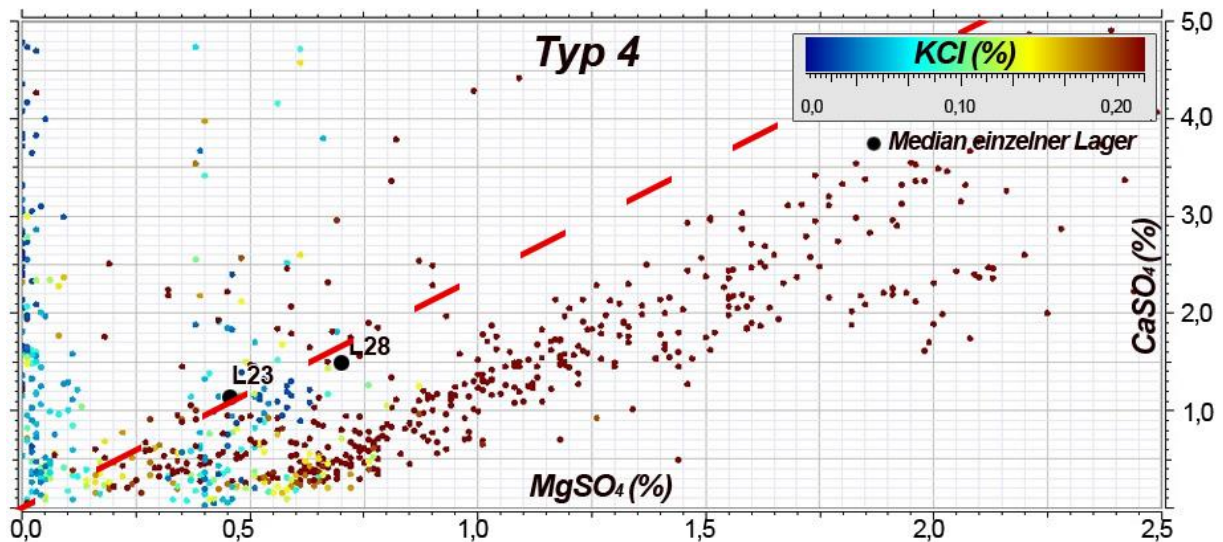


Abbildung 6.46: Streudiagramm $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ des Ausbildungstyps 4 des Kristallsalzes (z3NAKR).

Als Maß für die Homogenität der Steinsalzqualität dient als zusätzlicher Indikator die Standardabweichung des NaCl-Gehalts. Erwartungsgemäß liegt besonders in Bezug auf Ausbildungstyp 4 (Lager 23 und 28) eine eher heterogene Ausbildung vor, während Ausbildungstyp 1 (Lager 16, 20 und 24S) eher eine homogene Ausbildung aufweist. Ein klarer Trend in Richtung östlich gelegener Lager wird deutlich. Die Standardabweichung des NaCl-Gehalts steigt von Werten meist unter 1,0 % im Westen auf 1,3 % bis 1,4 % im Bereich der Lager 22, 26 und 27 an, um schließlich Werte von 2,7 % und höher in den östlichen Lagern zu erreichen.

Farbliche Ausprägung

Die Farbe als ein sehr wichtiger Qualitätsparameter wird in der Ansprache der Bohrkerns meist für einen kompletten Kristallsalzabschnitt aufgenommen. Diese Angaben variieren zwischen „farblos klar“ über „farblos klar bis blassgräulich/blassorange“, „blassgräulich bis gräulich“ bis hin zu „blassrosa“, „rosa“ oder „orange“. Um eine relative Aussage je Lager treffen zu können, wurden diese Beschreibungen in zwei Hauptklassen eingeteilt. Diese Klassen sind „weiß bzw. farblos klar“ und „nicht weiß“. Je Lager sind mindestens drei (Lager 20aN und 31) und maximal 37 (Lager 24S) Angaben zu der farblichen Ausbildung vorhanden. Der Quotient aus der Anzahl dokumentierter weißer Abschnitte und der Gesamtanzahl aufgenommener Abschnitte ergibt einen Wert zwischen Null und Eins als relatives Maß für die farbliche Qualität. Neben den östlichen Lagern fällt vor allem das Lager 20aS auf, in dem sechs der insgesamt 26 Farbangaben von einer Färbung sprechen. Diese relative Erhöhung ist durch die dort vorliegende pilzartige Hauptanhydritstruktur im Zentrum des Lagers bedingt. Innerhalb der besonders reinen Lager 16, 20 und 24S wurden vereinzelt farbliche Abweichungen festgestellt, während umgekehrt in vielen Lagern mit höheren Sulfatgehalten keine Färbungen dokumentiert wurden. Die Aussagekraft dieses Parameters ist auf Grund der Subjektivität und relativ seltenen Erhebung als gering einzustufen.

Korngrößenverteilung

Tabelle 6.7: Korngrößenbezeichnungen aus Bohrprotokollen

Bezeichnung	Körnung [mm]	Klasse
feinstkristallin	0,01 bis 0,1	1
feinkristallin	0,1 bis 1,0	1
fein- bis mittelkristallin	1,0 bis 3,0	2
fein bis grobkristallin	1,0 bis 6,0	2
mittelkristallin	3,0 bis 6,0	3
mittel bis grobkristallin	3,0 bis 10,0	4
grobkristallin	6,0 bis 10,0	5
grobkristallin bis grobspätig	6,0 bis 30,0	6
grobspätig	10,0 bis 30,0	7

Je Lager enthalten die Bohrprotokolle mindestens drei (Lager 20aN, 31) und maximal 38 (Lager 24S) Angaben zur Korngröße. Sie reichen von feinstkristallin bis grobspätig und wurden entsprechend der Tabelle 6.7 numerischen Vergleichsklassen zugewiesen. Für eine subjektive Bewertung der Korngrößenverteilung anhand der Kernbohrungsauswertungen wird die vorherrschende Korngröße je Lager in Form des Medianes der zugehörigen Vergleichsklasse genutzt. Ein detaillierter Gesamtüberblick zur Korngrößenverteilung der Lager ist in Anlage 32 gegeben. Für die meisten Lager liegt eine relativ homogene Korngrößenverteilung vor. Ein Grund dafür ist, dass bei der Bohrkernaufnahme je Kristallsalzabschnitt innerhalb einer Bohrung, ähnlich wie bezüglich der Farbe, häufig nur

eine pauschale Aussage zur Körnung getroffen wird. Die aus den Bohrprotokollen entnommene Korngrößenverteilung geht also nur wenig auf die lagerinternen Unterschiede ein und suggeriert eine homogene Korngrößenverteilung, ohne die möglichen räumlichen Unterschiede und Abhängigkeiten innerhalb einzelner Lager zu berücksichtigen.

HORN (2016) beobachtete beispielsweise in Lager 25 enorme Unterschiede in der Kristallgröße, abhängig von der Position innerhalb des Lagers. Im zentralen Bereich der breiten Muldenstruktur (SYNC 2) stellte er grobspätige Halitkristalle fest, an der Grenze des Lagers im Bereich einer großen Anhydritklippe hingegen nur eine mittel- bis grobkristalline Ausbildung. In Richtung der gegenüberliegenden Lagergrenze im Bereich des Kaliflözes Staßfurt beobachtete er teilweise sogar nur noch eine mittelkristalline Ausbildung, einhergehend mit engstehenden, klaren Anhydritlinien. Ähnliche Beobachtungen machte er auch in Lager 20. Dort identifizierte er leistenartige Ausbildungen mit teilweise bis zu 20 cm langen und 5 cm breiten Halitkristallen, die zwischen engstehenden Anhydritlinien eingebettet sind.

Einige lagerinterne Unterschiede der Korngröße konnten auch anhand der Bohrkernaufnahmen einzelner Lager festgestellt werden. Dies betrifft die Lager 14N, 20, 20aS, 24N, 24S, 25, 30 und 31. Eine wichtige Beobachtung ist, dass in den zentralen Bereichen breiter Muldenstrukturen (Lager 20, 25, und 31) besonders grobkörnige Kristalle ausgebildet sind. In einigen anderen Lagern sind ebenfalls räumlich eingegrenzt gröbere Körnungen zu beobachten. Dies trifft zum Beispiel auf das Lagertiefste des Lagers 24 (Nord und Süd) zu, in einem vollkommen von Hauptanhydrit umschlossenen Bereich. Auch in Lager 14N zwischen Hauptanhydrit und einem Staßfurt-Steinsalz-Sattel sind solche groben Körnungen dokumentiert. Jedoch liegt hier eher eine Ausnahme in Form einer bimodalen Verteilung vor. Drei von sieben Abschnitten weisen eine mittelkristalline, und die anderen vier Abschnitte eine grobspätige Ausbildung auf. Werden die zugewiesenen numerischen Vergleichsklassen statistisch ausgewertet, spiegelt sich dies in einem Median von 6 (Vergleichsklasse 6), einem Mittelwert von 5,1 und einer Standardabweichung von 2,0 für das Lager 14N wider.

Auch Bereiche einer feineren, eher mittelkristallinen Ausbildung sind teilweise anhand der Bohrkernaufnahmen innerhalb einzelner Lager zu beobachten. In den Lagern 20, 20aS, und 30 sind diese vor allem in Anhydritklippennähe zu verzeichnen.

6.3.1.2 Mächtigkeit

Die reale Lagermächtigkeit wurde jeweils anhand der Länge des Bohrabchnitts und der dort erfassten Schnittwinkel ermittelt. Für kurze Abschnitte ist dies relativ gut durchzuführen, da in der Regel nur wenige und nicht stark voneinander abweichende Schnittwinkel vorliegen. In diesem Falle wird der Mittelwert der Schnittwinkel genutzt um die reale Lagermächtigkeit zu bestimmen. Die vorliegenden Faltenstrukturen erschweren diese Vorgehensweise jedoch teilweise erheblich. Innerhalb von längeren Abschnitten liegt oft eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Schnittwinkel vor, sodass davon ausgegangen werden muss, dass die jeweilige Bohrung in der Nähe einer oder mehrerer Faltenscheitelpunkte verläuft und mehrere Schenkel durchstößt oder über größere Distanzen parallel zur Schichtgrenze verläuft. Die Mittelwertbildung der Schnittwinkel führt so zur Berechnung von überhöhten Lagermächtigkeiten. Eine zusätzliche Verzerrung ergibt sich bei dieser Vorgehensweise durch die Vernachlässigung des Standrohres der Kernbohrungen. Die ersten zwei bis fünf Meter fehlen in den Bohrprotokollen zur Berechnung der realen Mächtigkeit und führen so vor allem bezüglich gering mächtiger Lager zu einer deutlichen Unterschätzung. Des Weiteren sind in sehr mächtigen Lagern einige Bohrungen nicht am Rand eines Lagers, sondern zentral in beide Richtungen angesetzt, sodass viel zu geringe Mächtigkeiten resultieren.

Tabelle 6.8: Mittlere Mächtigkeit der Kristallsalzlager entsprechend der unterschiedlichen Erhebungsmethoden.

mittlere Mächtigkeit (nach Bohrerergebnissen)	Lager
bis 12 m	L22, L27
bis 18 m	L14S, L14N, L20aN, L23, L24S, L28
bis 24 m	L16, L20aS, L24N, L25, L26, L30, L31
über 24 m	L20
mittlere Mächtigkeit (nach Modellmessungen)	
bis 15 m	L14S, L22, L27
bis 25 m	L14N, L20aN, L23, L26, L28
bis 35 m	L16, L24S, L24N, L25, L30, L31
über 35 m	L20, L20aS
maximale Mächtigkeit (nach Modellmessungen)	
bis 25 m	L14S, L22, L27
bis 35 m	L14N, L20aN, L24S, L26
bis 45 m	L16, L23, L28, L31
über 45 m	L20, L20aS, L24N, L25, L30

Um eine zweite Vergleichsbasis zu schaffen wird entlang ausgewählter Grundrisse anhand der Modellergebnisse auf mehreren Höhenniveaus die Mächtigkeit je Lager an der breitesten Stelle gemessen. Mit Hilfe mindestens zweier Messungen wird so ein Mittelwert je Lager bestimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen im Gegensatz zu den ermittelten realen

Mächtigkeiten anhand der Bohrerergebnisse um bis zu 90 % höhere Mächtigkeiten auf, vor allem, da die gemessenen Muldenschenkel nicht immer senkrecht im Raum stehen. Bei einer Einteilung in Vergleichsklassen führen beide Vorgehensweisen jedoch zu relativ ähnlichen Gruppierung der Lager (Tabelle 6.8).

Basierend auf der Ermittlung der Lagermächtigkeit, ergeben sich ähnliche Probleme bezüglich der Einstufung der geometrischen Kontinuität in Form von Mächtigkeitsschwankungen. Die Standardabweichung der aus Bohrungen ermittelten Mächtigkeitswerte innerhalb eines Lagers ist nur begrenzt aussagekräftig. Eine Beurteilung erfolgt zusätzlich durch Messungen innerhalb der Modellergebnisse und subjektive Beobachtungen. Für die Beurteilung wird die gemessene mittlere Mächtigkeit von der maximalen Mächtigkeit je Lager abgezogen und der Anteil dieser Differenz an der mittleren Mächtigkeit ermittelt. Es erfolgt die Klassenbildung in „geringe“ ($< 0,2$), „mäßige“ (0,2 bis 0,5) und „starke“ ($> 0,5$) Mächtigkeitsschwankungen. Die Ergebnisse dieser Einteilung werden anschließend durch Betrachtung der Modellergebnisse der jeweiligen Lager und eine subjektive Einordnung in eine dieser Klassen überprüft. Diese Überprüfung zeigt, dass die rechnerische Herangehensweise vor allem bezüglich schmaler Lager zu einer Überschätzung der Mächtigkeitsschwankungen führt (Tabelle 6.9). Generell ist eine gute Übereinstimmung der rechnerischen und der subjektiven Einordnung zu verzeichnen. In der vergleichenden Ergebnisbetrachtung wird daher ausschließlich die subjektive Einordnung dargestellt.

Tabelle 6.9: Mächtigkeitsschwankungen der Kristallsalzlager entsprechend der unterschiedlichen Erhebungsmethoden. Gering [Quotient $< 0,2$], mäßig [Quotient 0,2 bis 0,5], stark [Quotient $> 0,5$]. Quotientenberechnung für die Klassenbildung: (maximale Mächtigkeit – mittlere Mächtigkeit) / mittlere Mächtigkeit.

Einordnung mittels Std.-Abw. (nach Bohrerergebnissen)	Lager
gering	L16, L22, L27
mäßig	L14N , L20aN, L23, 24S, L25, L26, L28
stark	L14S, L20, L20aS, L24N, L30, L31
rechnerische Einordnung (nach Modellmessungen)	
gering	L16, L20, L24S
mäßig	L20aN, L22, L24N, L31
stark	L14S, L14N ,L20aS, L23, L25, L26, L27, L28, L30
subjektive Einordnung (nach Modellmessungen)	
gering	L16, L20, L22, L26, L27
mäßig	L14S, L20aN, L24S, L24N, L25, L26, L28, L30, L31
stark	L14N, L20aS, L23

Die bisherige Gewinnungsart kann ebenfalls zur Überprüfung der Einstufung von Mächtigkeit und Mächtigkeitsschwankungen eines spezifischen Lagers genutzt werden. Ein querschlägiger Abbau spricht für eine erhöhte Mächtigkeit, während die Kombination von querschlägigem und streichendem Abbau auf hohe Mächtigkeitsschwankungen hindeutet.

6.3.1.3 *Faltengeometrie*

Ebenso wie in Bezug auf die Mächtigkeit einzelner Lager sind auch bezüglich der Muldenbreite und anderer Kenngrößen der Faltengeometrie Distanzmessungen innerhalb der Modellergebnisse vorzunehmen. Die detaillierten Ergebnisse hierzu wurden bereits in Kapitel 6.1 vorgestellt.

Generell ist zu erwarten, dass eine erhöhte Lagermächtigkeit innerhalb einer besonders breiten Muldenstruktur vorzufinden ist. Änderungen der Vergenz und des Öffnungswinkels der Muldenstruktur können Indizien für eine lokal unterschiedlich gerichtete oder intensivere tektonische Beanspruchung liefern. Ob es sich bei dem jeweiligen Lager um den Ost- oder Westschenkel einer Muldenstruktur handelt und ob eine Mächtigkeitsasymmetrie innerhalb dieser Mulde vorliegt, sind ebenfalls wichtige Fragestellungen bezüglich möglicher Deformationseinflüsse.

6.3.1.4 *Sonstige Merkmale*

Die Verknüpfung der einzelnen Lager mit den in Kapitel 6.1.6 identifizierten Geometrietypen einzelner Muldenstrukturen soll unter anderem der Überprüfung des Einflusses von abgequetschten Staßfurt-Steinsalz Sattelstrukturen und Anhydritklippenstrukturen auf die Qualität des Steinsalzes dienen. Unabhängig von der Geometrieteilung wird der Klippeneinfluss weiterhin auf zwei Betrachtungsebenen verglichen. Zum einen erfolgt eine subjektive Abschätzung der z3AN-Mächtigkeitsanomalien anhand der Modellergebnisse, zum anderen wird anhand der Bohrergebnisse die Mächtigkeit des sulfatischen Saums bzw. des Klippensalzes (z3NAa bzw. z3NAKL) je Lager bestimmt. Hierbei ergeben sich ähnliche Schwierigkeiten wie bezüglich der Mächtigkeit einzelner Kristallsalzlager. Als obere Grenze für eine normale Ausbildung wird eine Bohrlochabschnittslänge von 2,5 m angenommen. Liegen mindestens 75 % der durchteuften Abschnitte innerhalb eines Lagers zwischen 0 m und 2,5 m, wird von einer normalen Ausbildung des Klippensalzes gesprochen. Sind nur 50 % bis 75 % der Werte im Bereich 0 bis 2,5 m, liegt eine erhöhte Mächtigkeit des sulfatischen Saums vor. Bei weniger als 50 % der Werte unterhalb von 2,5 m Abschnittslänge ist eine stark erhöhte Mächtigkeit des sulfatischen Saums anzunehmen.

6.3.2 Ergebnisse der Klassifizierung

Die Verknüpfung der erhobenen Kenngrößen innerhalb einer Ergebnismatrix erfolgt separat für die nördlichen Lager (Tabelle 6.10), die zentralen Lager (Tabelle 6.11) und die südlichen Lager (Tabelle 6.12), jeweils von Osten nach Westen dargestellt.

Tabelle 6.10: Ergebnismatrix der nördlichen Kristallsalzlager (q = querschlägig, s = streichend).

	Nördliche Lager (von W nach E)						
	L20	L20aN	L14N	L16	L24N	L22	L23
Qualität							
Bestandteile (Tabelle 6.6)	Typ1	Typ2	Typ2	Typ1	Typ2	Typ2	Typ4
Homogenität (Anlage 22 bis 30)	0,86	0,95	0,97	0,65	0,86	1,42	3,71
Farbe (Anlage 31)	0,95	1,00	1,00	0,88	1,00	1,00	0,71
Korngröße (Anlage 32)	4	3	6	4	3	4	3
Quantität							
Mächtigkeit (Tabelle 6.8)	stark erhöht	normal	normal	erhöht	erhöht	gering	normal
Schwankungen (Tabelle 6.9)	gering	mäßig	stark	gering	mäßig	gering	stark
Gewinnung	q	s / q	s	s	q	s	q
Faltengeometrie							
Muldenbreite (Tabelle 6.2)	breit	normal	normal	normal	normal	schmal (oben)	schmal (oben)
Vergenz (Tabelle 6.2)	leicht Ost	-	stark Ost	stark Ost	stark Ost	leicht West	leicht West
Öffnungswinkel (Tabelle 6.2)	leicht negativ	positiv	leicht positiv	leicht positiv	leicht positiv	negativ	negativ
Ost- / Westschenkel (Tabelle 6.2)	Ost	Ost	West	Ost	Ost	West	Ost
Asymmetrie (Tabelle 6.2)	positiv	positiv	negativ	positiv	positiv	-	-
Sonstige Merkmale							
Geometrietyp (Tabelle 6.2)	Typ1b	Typ2	Typ2	Typ2	Typ2	Typ1b	Typ1b
Klippeneinfluss (Tabelle 6.2)	mäßig	stark	stark	stark	stark	sehr stark	sehr stark
sulfatischer Saum (Anlage 33)	erhöht	normal	erhöht	erhöht	erhöht	normal	erhöht

Die Betrachtung der Qualitätsparameter innerhalb der nördlichen Lager spiegelt den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung, deren Homogenität, der farblicher Ausprägung und der Korngröße wider. Dies wird besonders durch Vergleich der Lager des Typs 1 (Lager 20 und 16) und Typs 4 (Lager 23) deutlich. Bezüglich der Quantitätsparameter korrespondiert eine erhöhte Mächtigkeit bei geringen Mächtigkeitsschwankungen mit den Lagern des Ausbildungstyps 1. Die faltengeometrischen Aspekte zeigen eine eindeutige Änderung bezüglich der zwei östlichen, minderqualitativen Lager 22 und 23. Die Muldenbreite ist hier eher schmal, vor allem im oberen Bereich, sodass

ein negativer Öffnungswinkel vorliegt. Des Weiteren ist eine leichte Vergenz nach Westen zu verzeichnen, die weiter im Westen ausschließlich in Richtung Osten vorliegt. Die erhöhten Lagermächtigkeiten gehen fast immer mit einer Asymmetrie der Muldenschenkel einher, wobei die Ostschenkel stets eine größere Mächtigkeit als die Westschenkel der Muldenstruktur aufweisen. Die Lager ganz im Osten (Lager 22 und 23) und ganz im Westen (Lager 20) entsprechen dem Geometrietyp 1b, einer durch Anhydritklippen beeinflussten, normalen Lagerung. Die dazwischen gelegenen Lager sind alle einer synklinalen Großstruktur mit einer im Zentrum stark eingeebten bzw. abgequetschten Staßfurt-Steinsalz Sattelstruktur zuzuordnen. Ein Einfluss durch Anhydritklippen und erhöhte Mächtigkeiten des sulfatischen Saums sind generell zu beobachten, wobei der stärkste Klippeneinfluss in der östlichen Mulde (SYNC3) in den Lagern 22 und 23 zu verzeichnen ist. Die zentralen Lager beinhalten mit dem Ausbildungstyp 3 nun alle vier Ausbildungstypen. Eine relativ große Anzahl farblicher Verunreinigungen ist im westlichen Lager 20aS und im

Tabelle 6.11: Ergebnismatrix der zentralen Kristallsalzlager (q = querschlägig, s = streichend).

	Zentrale Lager (von W nach E)							
	L20aS	L14S	L24S	L25	L25a	L26	L27	L28
Qualität								
Bestandteile (Tabelle 6.6)	Typ3	Typ2	Typ1	Typ2	Typ3	Typ2	Typ3	Typ4
Homogenität (Anlage 22 bis 30)	0,81	0,88	1,08	0,98	0,39	1,36	1,34	2,75
Farbe (Anlage 31)	0,77	0,90	0,86	1,00	1,00	1,00	1,00	0,75
Korngröße (Anlage 32)	3	3	5	4	3	3	3	3
Quantität								
Mächtigkeit (Tabelle 6.8)	stark erhöht	gering	erhöht	erhöht	-	normal	gering	normal
Schwankungen (Tabelle 6.9)	stark	mäßig	mäßig	mäßig		mäßig	mäßig	mäßig
Gewinnung	s / q	-	s / q	q	-	Strecke	Strecke	-
Faltengeometrie								
Muldenbreite (Tabelle 6.2)	normal	schmal	breit	normal	-	normal	schmal	schmal
Vergenz (Tabelle 6.2)	-	-	stark West	stark West	-	stark West	leicht West	leicht West
Öffnungswinkel (Tabelle 6.2)	positiv	negativ	positiv	leicht negativ	-	leicht negativ	negativ	negativ
Ost- / Westschenkel (Tabelle 6.2)	Ost	West	Ost	West	-	Ost	West	Ost
Asymmetrie (Tabelle 6.2)	positiv	-	-	-	-	-	-	-
Sonstige Merkmale								
Geometrietyp (Tabelle 6.2)	Typ2	Typ2	Typ1b	Typ1a	-	Typ1a	Typ3	Typ3
Klippeneinfluss (Tabelle 6.2)	stark	stark	stark	mäßig	-	mäßig	sehr stark	sehr stark
sulfatischer Saum (Anlage 33)	stark erhöht	normal	normal	erhöht	normal	normal	stark erhöht	stark erhöht

östlich gelegenen Lager 28 zu beobachten. Diese gehen mit einem starken bis sehr starken Klippeneinfluss und stark erhöhter Mächtigkeit des sulfatischen Saums einher. Generell ist eine geringere Korngröße als in den nördlichen Lagern zu verzeichnen. Ausnahmen stellen die relativ hochqualitativen Lager 24S (Ausbildungstyp 1) und 25 (Ausbildungstyp 2) dar. Diese weisen gleichzeitig eine relativ erhöhte Mächtigkeit auf. Die besonders stark erhöhte Mächtigkeit des Lagers 20aS ist von starken Mächtigkeitsschwankungen begleitet, die vor allem durch die mitten innerhalb des Lagers gelegene pilzartige Anhydritstruktur bedingt sind. In diesem Lager findet entsprechend auch eine Kombination aus querschlägigem und streichendem Abbau statt. Bezüglich faltengeometrischer Aspekte ist zu bemerken, dass die Muldenstrukturen nur noch Vergenz in Richtung Westen aufweisen. Die östlichen Lager sind ähnlich wie im nördlichen Bereich ausgebildet. Eine asymmetrische Ausbildung der Muldenschenkel ist nicht mehr eindeutig zu beobachten. Mit Lager 14S und Lager 27 weisen

Tabelle 6.12: Ergebnismatrix der südlichen Kristallsalzlager.

Südliche Lager (von W nach E)			
	L30	L31	L32
Qualität			
Bestandteile (Tabelle 6.6)	Typ3	Typ3	Typ2
Homogenität (Anlage 22 bis 30)	0,86	0,57	0,60
Farbe (Anlage 31)	0,86	1,00	-
Korngröße (Anlage 32)	3	4	-
Quantität			
Mächtigkeit (Tabelle 6.8)	erhöht	erhöht	-
Schwankungen (Tabelle 6.9)	mäßig	mäßig	-
Gewinnung	-	-	-
Faltengeometrie			
Muldenbreite (Tabelle 6.2)	breit	normal	-
Vergenz (Tabelle 6.2)	stark West	stark West	-
Öffnungswinkel (Tabelle 6.2)	positiv	leicht negativ	-
Ost- / Westschenkel (Tabelle 6.2)	West	West	-
Asymmetrie (Tabelle 6.2)	-	-	-
Sonstige Merkmale			
Geometrietyp (Tabelle 6.2)	Typ1b	Typ1c	-
Klippeneinfluss (Tabelle 6.2)	stark	mäßig	-
sulfatischer Saum (Anlage 33)	erhöht	normal	-

jedoch vor allem die Westschenkel der Muldenstrukturen besonders geringe Mächtigkeiten auf. Im Westen liegt eine Muldenstruktur des Geometrietyps 2 mit einer abgequetschten Sattelstruktur im Zentrum vor. Ebenfalls Staßfurt-Steinsalz (z2NA) im Zentrum der Muldenstruktur, jedoch in Form einer Tauchfalte (Geometrietyp 3), ist ganz im Osten zu beobachten.

Die südlichen Lager sind geprägt durch einen erhöhten MgSO_4 -Anteil (Ausbildungstyp 3). Ausnahme ist Lager 32, auf welches jedoch bisher nur eine Bohrung mit insgesamt 28 Proben entfällt. Einhergehend mit einem etwas niedrigeren NaCl -Gehalt und einigen farblichen Verunreinigungen, ist auch die Korngröße in Lager 30 etwas

geringer als in Lager 31. Die Mächtigkeit der Lager ist erhöht. Wie bereits bezüglich der zentralen Lager liegt eine starke Westvergenz vor. Lager 30 liegt innerhalb einer breiten Muldenstruktur (SYNC1/2) vom Geometrietyp 1b mit relativ starkem Anhydritklippeneinfluss und erhöhter Mächtigkeit des sulfatischen Saums. Lager 31 hingegen weist die Normalabfolge mit einer einseitigen z3AN-Diskordanz ohne signifikanten Klippeneinfluss auf (Geometrietyp 1c). Der CaSO_4 -Gehalt ist hier niedriger, der MgSO_4 -Gehalt hingegen etwas höher.

6.4 Schlussfolgerungen

Kristallsalzlager mit einer besonders hohen Qualität (Ausbildungstyp 1) weisen tendenziell größere Korngrößen auf. Sie sind stets an die Ostschenkel von breiten Muldenstrukturen gebunden, deren Öffnungswinkel meist positiv ist. Es ist ein mäßiger bis starker Einfluss durch Anhydritklippen und teilweise auch durch abgequetschte Staßfurt-Steinsalz Sattelstrukturen zu verzeichnen. Generell beschränken sich diese Lager auf den westlichen und zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes.

Kristallsalzlager mit besonders schlechter Qualität (Ausbildungstyp 4) gehen mit einer eher feinen Körnung einher und sind sehr heterogen mit einer Vielzahl farblicher Verunreinigungen ausgebildet. Grundsätzlich sind die Lager normalmächtig mit relativ geringen Mächtigkeitsschwankungen ausgebildet und beschränken sich auf die Ostschenkel besonders schmaler Muldenstrukturen, die zumeist einen negativen Öffnungswinkel aufweisen. Der Einfluss durch Anhydritklippen ist hier besonders stark. Die Lager dieses Typs befinden sich in der östlichen, parallel zum Salzrand verlaufenden Muldenstruktur, die im südlichen Bereich durch eine z2NA-Tauchfalte (Geometrietyp 3) stark beeinflusst ist.

Ausbildungstyp 1 und 4 finden sich in keinem Fall am Westschenkel einer Muldenstruktur. Lager mit besonders hoher oder besonders geringer Qualität sind also stets auf die Ostschenkel der Muldenstrukturen beschränkt.

Die Muldenstrukturen ändern im zentralen und südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes ihre Streichrichtung von N-S nach NNW-SSE und weisen statt einer Ostvergenz ausschließlich Westvergenz auf. Mit diesen strukturellen Änderungen geht das Vorhandensein von Kristallsalzlagern mit erhöhtem MgSO_4 -Gehalt (Ausbildungstyp 3) einher. Diese weisen im Vergleich zu dem im nördlichen und zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes vorkommendem Ausbildungstyp 2 tendenziell eine etwas feinere Körnung auf. Sowohl Ausbildungstyp 2 als auch Typ 3 können ansonsten in allen möglichen Konstellationen bezüglich der Mächtigkeit, der Faltengeometrie und des Klippeneinflusses vorliegen.

7 Diskussion

7.1 Genesemodell

Aufbauend auf den Untersuchungen und tektonischen Interpretationen durch BEST und ZIRNGAST (2002) sowie HORN et al. (2016) wurden durch die vorliegende geologische 3D-Modellierung weitere Hinweise zur Ausprägung des Strukturbaus der Steinsalzlagerstätte gefunden. Im nachfolgenden Kapitel werden die einzelnen Stadien, die zu der Ausprägung der Salinarstruktur geführt haben, als Diskussionsgrundlage dargestellt.

7.1.1 Zechstein

Abbildung 7.1 zeigt einen schematischen Querschnitt senkrecht zum Streichen der Allertalzone unter der Annahme einer zentral gelegenen, mehrfach invertierten Horst/Graben-Struktur im Bereich des Subsalinars. Während der permischen E-W-Extension kam es zur Abschiebung des zentralen Blocks (im Untersuchungsgebiet des südwestlichen Blocks in Richtung Westen). So ist von einer lokalen Vergrößerung des Ablagerungsraumes im Zentrum (d.h. im Südwesten des Untersuchungsgebietes) und leichten Unterschieden der Primärmächtigkeit auszugehen. Die Kammschale als jüngste stratigraphische Einheit des Hauptanhydrits, welche primär als Anhydrit ausgeschieden wurde (HEMMANN, 1968) und deshalb kompetenter als das unterlagernde Gemisch aus Gipskristallen und Diagenesewässern war, reagierte spröde auf die Zugspannung. Entlang von N-S-gerichteten Dehnungsfugen drang das Gipskristallinat während der Sedimentation des Kristallsalzes in Form von Fließbewegungen in Richtung Hangendes, und es kam zur Bildung der Anhydritklippen. Es ist nicht auszuschließen, dass die Anhydritklippenbildung bevorzugt oberhalb von Störungen im Subsalinar stattfand. Hier kam es lokal zum Anstieg und Austreten des Gipsbreis sowie zu einem großflächigen Austrag. Anhydritarme und -brocken, aber auch die mikroskopischen Anhydritverunreinigungen im Klippenumfeld entstanden. Abseits dieser Klippenbereiche bildeten sich mächtige und hochreine Kristallsalzlager aus.

7.1.2 Obere Trias bis Untere Kreide

Während der spättriassischen E-W-gerichteten Extension kam es zur Entkopplung des Deckgebirges und zum Abgleiten der Lappwald-Scholle, also der durch Floßtektonik bedingten Strukturbildung, und dem Einfließen der Zechstein-Salzmassen. BEST und ZIRNGAST (2002) gehen von einem Einfließen ausschließlich von Südwesten her, aus dem Bereich der Lappwaldscholle, aus. Sie begründen diese Annahme mit weitgehend offenen Internstrukturen und dem Vorhandensein eines Großteils der Aller-Folge im östlichen Bereich des ERAM. Jedoch ist dort der nordöstliche Salzrand nicht vergleichbar erschlossen

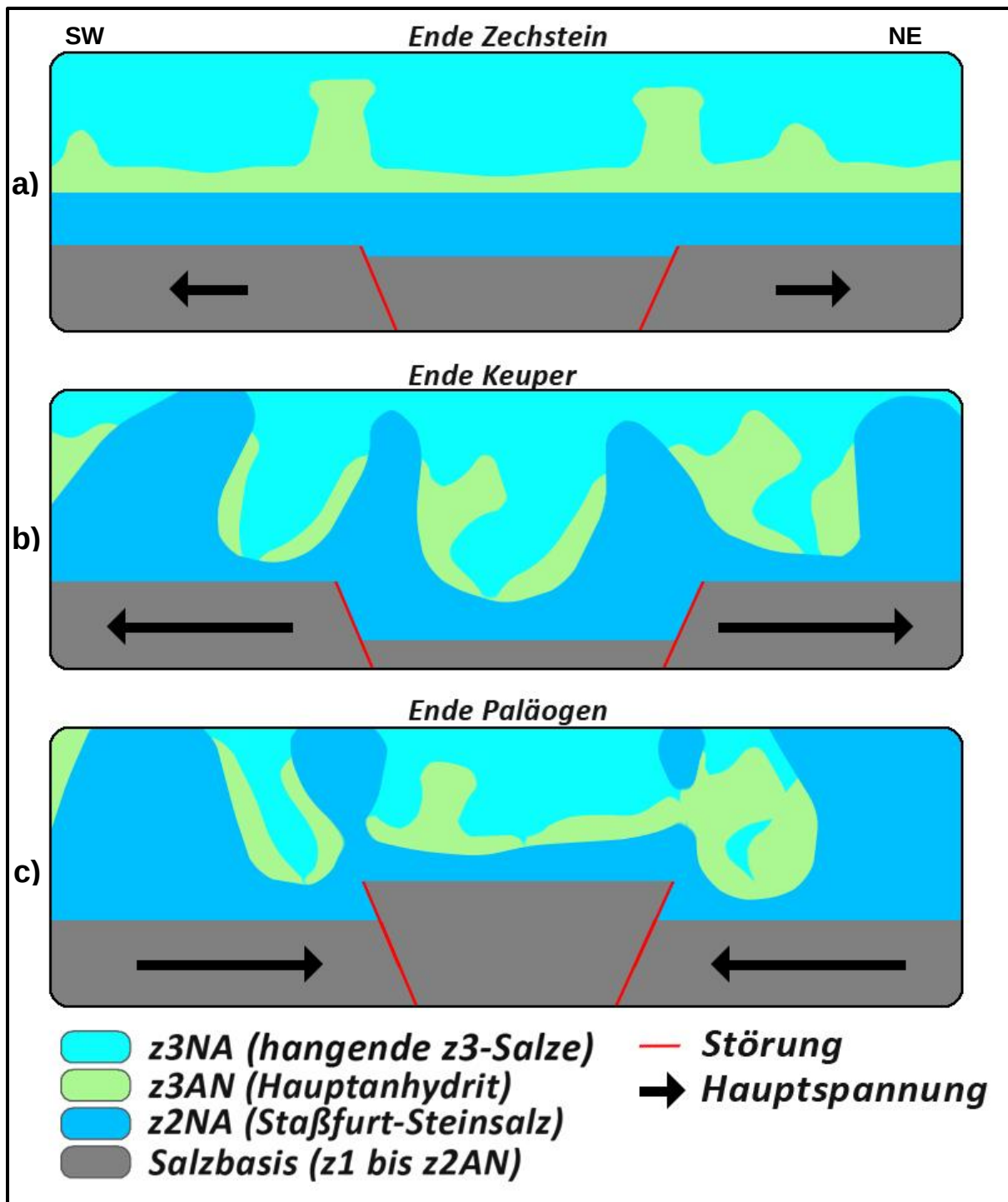


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der einzelnen Deformationsstadien: a) Ende Zechstein, Anhydritklippenbildung ist erfolgt, b) Ende Keuper, Zerbrechen des Hauptanhydrits und Fließfaltenbildung, c) Ende Paläogen, Struktur wurde kompressiv überprägt und Sattelstrukturen abgequetscht (Profil senkrecht zum Streichen der Allertalzone; nicht zu skalieren).

wie in Braunschweig-Lüneburg und die getroffenen Aussagen beziehen sich eher auf den in dieser Studie als zentraler Teil der Allertalstruktur bezeichneten Bereich. Die Beobachtungen in Braunschweig-Lüneburg, legen nahe, dass ein Salzzufluss von Nordosten aus dem Bereich der Weferlinger-Triasplatte her nicht unwahrscheinlich ist. Anhydritblöcke im Bereich der Profile 76 und 77 wurden von Osten nach Westen hin überschoben (Anlage 6 und 7). Die

Vergenz ist stark nach Westen gerichtet, und die Muldenstrukturen sind stark eingeeignet. Der im Untersuchungsgebiet sehr mächtige, westvergente Staßfurt-Steinsalz-Sattel, welcher parallel zum Salzrand verläuft, taucht teilweise von oben wieder in die östliche Muldenstruktur ein.

Diese genannten Beobachtungen, vor allem die Änderung der Vergenz und des Öffnungswinkels, können durch unterschiedliche Prozesse erklärt werden. Einerseits ist ein Salzzufluss von Nordosten aus dem Bereich der Weferlinger Triasplatte möglich, andererseits auch eine Änderung der Faltengeometrie während der späteren kretazischen Inversion und ein besonderer Einfluss oberhalb der Störungen im Subsalinar. Wie jedoch ein von Westen her einströmendes Staßfurt-Steinsalz sich parallel entlang der Ostflanke über die jüngere z3-Folge bewegen konnte, lässt sich außerdem durch eine wirbelartige Rotationszelle, wie von BRUN und MAUDUIT (2009) in Analogexperimenten zu von Floßtektonik bedingten Salzstrukturen (Salzwalzen) beschrieben wurde, erklären. Unabhängig von der Herkunft der Salzmassen kam es in Bereichen geringer Mächtigkeit des Hauptanhydrits zum Zerbrechen und einer Untergliederung in die heute vorliegenden Blöcke. Das Staßfurt-Steinsalz und das Kaliflöz Staßfurt als sehr mobile und fluidreiche Horizonte durchspießten förmlich diese Hauptanhydritschwundstellen und stiegen dazwischen auf. Es kam zur Anlage der Sattel- und Muldenstrukturen. Die Hauptanhydritblöcke wurden teils etwas emporgeschleppt, sammelten sich jedoch größtenteils schwerkraftbedingt im Muldentiefsten und an den Muldenflanken. Im Zentrum der Allertalstruktur bildeten sich dabei breitere Muldenstrukturen aus. Die Vergenzen der Faltenstrukturen unterscheiden sich dabei signifikant je nach Position im Westen oder Osten der Allertalstruktur (Abbildung 7.1). Die Aufwärtsbewegung in den Sattelstrukturen und die relativen Abwärtsbewegung der z3-Salze in den Muldenstrukturen stellten eine entgegengesetzte Bewegungsrichtung dar, die lokal zu vertikal gerichteten Dehnungen führte. Nach HORN et al. (2016) kam es so zu der häufig beobachteten Boudinage kompetenter, schichtparalleler Lagen wie beispielsweise der Anhydritmittel des Anhydritmittelsalzes (z3NAg).

7.1.3 Obere Kreide bis Unteres Tertiär

Während der kretazischen Kompression kam es zur Inversion und einem keilartigen Auspressen des subsalinen Sockels. Der im Untersuchungsgebiet südwestlich gelegene Block wurde nach NNE aufgeschoben. Es kam zur Remobilisierung der Salze. Die Sattelstrukturen wurden durch ineinander keilende Anhydritblöcke stark eingeeignet und teilweise vollständig abgequetscht (Abbildung 7.1). Teils wurden die Anhydritblöcke gegeneinander aufgeschoben oder verhaken sich und rotierten. Das Verhaken einzelner Anhydritblöcke bis hin zu einem plötzlichen Bruchversagen und die damit einhergehende sehr schnell erhöhte Schergeschwindigkeit führte wahrscheinlich zur Rissbildung in manchen

benachbarten Salzhorizonten wie dem Schwadensalz. Nach wie vor waren noch viele Fluide im System vorhanden. Entlang der Korngrenzen angereicherte isolierte Fluideinschlüsse im Staßfurt-Steinsalz, aber auch im Kristallsalz, vernetzten sich wieder. Das Kaliflöz Staßfurt ging zu einem großen Teil in Lösung und drang so teils mehrere Meter in das Korngrenzennetzwerk und Mikrorisse benachbarter Salzhorizonte ein. Partiiell fand ein Massentransfer durch Diffusion statt, der durch Drucklösungserscheinungen im Kristallsalz und Schwadensalz durch HORN (2016) eindrücklich dokumentiert ist. Ein Großteil der fluidbeteiligten Deformationsprozesse fand im näheren Umfeld des Kaliflözes statt.

In größerem Maßstab ist ein weiterer Prozess zu beobachten, dem vermutlich eine fluidinduzierte Perkolation und eine damit verbundene Öffnung potentieller Fließwege vorauszusetzen ist. Es handelt sich um die Migration NaCl-reicher Lösungen in den Druckschattenbereich von Klippenstrukturen, die im Untersuchungsgebiet vorwiegend an die Ostschenkel der Muldenstrukturen gebunden sind. So kam es dort zum Wachstum sehr großer Halitkristalle und zu einer relativen NaCl-Anreicherung. Ein Massentransfer über Diffusion entlang vernetzter Korngrenzen erscheint auf Grund der relativ großen Distanzen von mehreren zehner bis hundert Metern und der relativ geringen Geschwindigkeit des Diffusionsprozesses als eher unwahrscheinlich, ist jedoch nicht vollständig auszuschließen. Das zusätzliche NaCl stammt mit hoher Wahrscheinlichkeit aus dem Staßfurt-Steinsalz. Die dort hohen Fluidanteile, vorwiegend aus dem Diageneseprozess der dispers verteilten Gipsaggregate, gemeinsam mit den Fluiden des Kaliflözes Staßfurt und der kieseritischen Übergangsschichten dienten als Transportmedium. Große Mengen an gelöstem Kalium, Magnesium und Natrium wurden so in stratigraphisch jüngere Einheiten transportiert. Die Kluftfüllungen des Hauptanhydrits zeigen dies sehr anschaulich und sind häufig mit einem carnallitischen Saum und Halit im Zentrum besetzt (Abbildung 6.5).

7.2 Auswirkungen auf die Ausbildung der Salinargesteine

Nachfolgend werden für die drei stratigraphischen Einheiten Staßfurt-Steinsalz, Kristallsalz und Schwadensalz alle Beobachtungen und erkannten räumlichen Zusammenhänge erläutert und anhand von Analogien aus themenverwandten Studien diskutiert.

7.2.1 Staßfurt-Steinsalz (z2NA)

Das Staßfurt-Steinsalz spielt als sehr mobiles und maßgeblich strukturbildendes Element eine sehr wichtige Rolle für das Verständnis des Gesamtsystems der Salzstruktur. Im Bereich der Ostflanke, genau wie in Bezug auf den schmalen Westsattel ist grundsätzlich von intensiven Salzfließbewegungen auszugehen, die zu einer gewissen Veränderung der ursprünglichen Zusammensetzung beigetragen haben. Durch die spätere kretazische Kompression wurde diese Zusammensetzung dann durch erneute Fließbewegungen und dynamische Prozesse wie beispielsweise Drucklösung weiter modifiziert. Entsprechend sind

die Analysedaten unterhalb der Hauptmulde in Nähe der Salzbasis von besonderem Interesse, da dieser Bereich oberhalb des Salzbasissockels einer unterschiedlichen tektonischen Beanspruchung unterlag und somit eventuell Hinweise auf die ursprüngliche, primäre Zusammensetzung des Staßfurt-Steinsalzes liefern kann.

In Sondershausen, südlich des Harzes, wird Steinsalz in Auftausalzqualität, also mit weniger als 2 % Sulfaten, aus dem dort nur schwach deformierten und größtenteils flach mit intakter Schichtung vorliegenden Staßfurt-Steinsalz gefördert. Diese Tatsache lässt vermuten, dass die polyphase Deformation des Zechsteinsalinars innerhalb der Allertalstruktur zu einer relativen Anreicherung von Sekundärmineralphasen, vor allem Anhydrit, innerhalb des sehr mobilen Staßfurt-Steinsalzes geführt haben muss.

Analogien aus mikro- und makroskopischen Untersuchungen in Morsleben von KÜSTER (2011) und KNEUKER et al. (2014) geben bezüglich möglicher Deformationsmechanismen entscheidende Hinweise. Makroskopisch beschreibt KÜSTER (2011) einen stark deformierten und dennoch relativ homogenen Aufbau des Staßfurt-Steinsalzes. Wie auch in Braunschweig-Lüneburg ist die ursprüngliche, primäre Gestalt einer rhythmischen Wechsellagerung von Steinsalz- und Anhydritlagen durchgängig zerstört. Die Brekzienbildung und Faltung ist jedoch Formationsparallel geschehen, sodass die generelle stratigraphische Abfolge erhalten blieb. Dies wurde auch von BORNEMANN et al. (2008) beobachtet. Der untere und mittlere Abschnitt besteht aus einem Wechsel zwischen reineren Lagen und Lagen reich an dispers verteiltem Anhydrit, wobei die Halitkristalle eine relativ heterogene Korngrößenverteilung zwischen 2 mm und 2 cm aufweisen. Der obere Bereich besteht aus relativ klaren Halitkristallen, die frei von dispersem Anhydrit sind und teils Korngrößen von 2 bis 4 cm aufweisen (Kristallbrocken). Hier sind vor allem Schichtfragmente und Knollen aus Anhydrit vorhanden. Zum Hangenden hin kann auch vermehrt Polyhalit auftreten. In beiden makroskopisch unterschiedlichen Bereichen liegt der Anhydritgehalt im Mittel zwischen 4 und 5 %, ähnlich wie in Braunschweig-Lüneburg. In manchen Bereichen ist eine klare Anisotropie der Kornform ausgebildet, mit einem Längen- zu Breitenverhältnis von 2 bis 2,5.

Entgegen den makroskopischen Strukturen unterscheiden sich die mikroskopischen Strukturen nach KÜSTER (2011) generell nur geringfügig im unteren, mittleren und oberen Bereich. Insgesamt wird von einer Kombination aus dynamischer Rekristallisation und Versetzungskriechen ausgegangen, jedoch mit einer starken Dominanz des ersteren Prozesses. Fluideinschlüsse liegen grundsätzlich in Form von isolierten Tröpfchen entlang der Korngrenzen vor. Der Wassergehalt nimmt von 0,4 bis 0,7 % im unteren und mittleren Abschnitt bis über 1,0 % im oberen Abschnitt zu. Obwohl die tektonische Beanspruchung in verschiedenen Bereichen sehr unterschiedlich gewesen sein muss, beobachtete KÜSTER (2011) keine nennenswerten Unterschiede bezüglich der Mikrostrukturen.

KNEUKER et al. (2014) hingegen konnten innerhalb ihrer Untersuchungen der Mikrostrukturen anhand von Messungen der Elektronenrückstreubeugung („electron backscatter diffraction“, EBSD) einen klaren räumlichen Trend erkennen. Demnach sei im östlichen Teil (hier zentraler Teil des Untersuchungsgebietes) vorwiegend fluidunterstützte Korngrenzmigration zu beobachten, während im westlichen Teil auch Versetzungskriechen eine wichtige Rolle spielte. Da Versetzungsklettern und Subkornrotation zu einer Verringerung der Korngröße durch neue Subkornbildung führt, wurde eine relativ enge Korngrößenverteilung im Westen und eine bimodale Verteilung im Osten beobachtet. Weiterführend ergab eine Paläopiezometrieuntersuchung der Subkorngrößen eine mit 2,9 MPa deutlich höhere maximale Differentialspannung im westlichen Teil als im östlichen Teil mit nur 1,2 MPa. Durch den Prozess der Korngrenzenmigration wurden im Rahmen der dynamischen Rekristallisation Kristalle mit relativ vielen Subkörnern von sekundären Kristallen frei von Subkörnern konsumiert. Häufig ist eine Fixierung der Korngrenze entlang von dispers verteilten Anhydritaggregaten zu verzeichnen, die scheinbar eine weitere Migration der Korngrenzen verhindert haben (KNEUKER et al., 2014; KÜSTER, 2011).

Die Anzahl und Größe der Anhydritaggregate und die Tatsache, dass diese häufig von Fluiden umgeben sind, deuten nach KÜSTER (2011) darauf hin, dass es sich um primäre Gipseinlagerungen handelt. Messungen des Bromidgehalts zeigten einen sprunghaften Anstieg von 50 ppm auf über 200 ppm im Übergang zu dem oberen Abschnitt des Staßfurt-Steinsalzes. KÜSTER (2011) vermutet dahinter keine primären, sondern sekundäre Unterschiede, bedingt durch Salzfließbewegungen und deren verbundene Deformationsprozesse.

Auch KNEUKER et al. (2014) gehen in Bereichen erhöhter Bromidkonzentration von Bereichen stärkerer Deformation aus, in denen der Einfluss metamorpher Fluide größer war. Jedoch bleibe unklar, welche Effekte die Prozesse des Versetzungskriechens, der dynamischen Rekristallisation und der Drucklösung sowie eine Kombination dieser Prozesse auf das Vorhandensein und die Häufigkeit von Spurenelementen wie beispielsweise Bromid haben (KÜSTER, 2011).

Die sehr grobkristallinen bis grobspätigen, langgestreckten Monokristalle innerhalb der Kristallbrocken im oberen Abschnitt des Staßfurt-Steinsalzes entstanden nach KÜSTER (2011) nicht primär, sondern durch einen sekundären, postsedimentären Prozess, der das Kornwachstums von ursprünglich kleineren Halitkristallen bewirkte. Hinweise, um welchen Prozess es sich dabei handelt, fehlen jedoch bisher. In den schmalen, stark eingeeengten Sattelstrukturen innerhalb des Untersuchungsgebietes beobachtete auch HORN (2016) grobkristalline Halitkristalle, die vermutlich ebenso auf einen sekundären Prozess zurückzuführen sind. Diese Beobachtungen sind im Einklang mit dem relativ hohen NaCl-

Gehalt innerhalb der stark eingegengten Sattelstruktur ANT1. Die kontinuierliche Zunahme des MgSO_4 - und KCl-Gehalts zu den Sattelflanken in Richtung Kaliflöz Staßfurt wurde von HORN (2016) ebenfalls beschrieben. Er beobachtete Schnittflächen im Kontaktbereich des Kaliflözes, welche mit Carnallit und Kieserit besetzt sind. Diese Beobachtung führt HORN (2016) auf Drucklösungsprozesse im Bereich des Kaliflözes und das Eindringen der entstehenden Lösungen in das Staßfurt-Steinsalz zurück.

Mehrere Faktoren spielen eine Rolle in Bezug auf die enorme Mobilität des Staßfurt-Steinsalzes und dafür, dass dieser Salzhorizont maßgeblich für die primäre Fließfaltenbildung und Anlage des generellen Deformationsmusters verantwortlich ist. Ein sehr wichtiges Kriterium hierfür ist die hohe Verfügbarkeit von Fluiden. Diese sind vor allem im oberen Abschnitt durch die Nähe zum Kaliflöz Staßfurt und den großen Mengen Kristallwasser innerhalb von Carnallit und Kieserit, aber auch im gesamten Salzhorizont durch Diagenese der primären Gipsaggregate zu Anhydrit vorhanden. Als zusätzliche Fluidquelle kommen Einschlüsse von Restlösungen aus dem Sedimentationsprozess in Frage (KNEUKER et al., 2014). In Kombination mit der hohen Normalmächtigkeit von bis zu 200 m und der Position im stratigraphisch ältesten und tiefsten Bereich der Salzstruktur und der damit verbundenen höchsten Temperatur und größten Auflast, ist die höhere Mobilität gegenüber den z3-Salzen sehr gut nachvollziehbar.

Die primären Gipseinschlüsse liefern nicht nur Fluide, die später zu einem dynamischen Deformationsprozess beitragen, sondern stellen nach HUNSCHKE et al. (1996) gleichzeitig auch ein Hindernis für den Prozess des Versetzungskriechens dar. Entsprechend sind die dynamische Rekristallisation in Form von Korngrenzmigration und ein Massentransfer in Form von Diffusionskriechen (Drucklösung) die wichtigsten Deformationsprozesse innerhalb des Staßfurt-Steinsalzes. Diese Prozesse sind maßgeblich für die heutige Zusammensetzung des Staßfurt-Steinsalzes verantwortlich. Insgesamt ist von einem Abtransport leicht löslicher Salzminerale hin zu einem Salzhorizont mit wenigen Fluiden und ein Massentransport aus Bereichen unter hohem Druck in Druckschattenbereiche entlang einem Druckgefälle anzunehmen. Dementsprechend spiegeln die sehr niedrigen KCl-Gehalte im Staßfurt-Steinsalz die Lösung und den Abtransport von leicht löslichen Salzmineralen gut wider. Die große Menge verfügbarer Fluide bewirkte weiterführend, dass auch NaCl in größeren Mengen in Lösung ging und abtransportiert wurde, sodass es zu einer relativen residualen Anreicherung von Anhydrit von ursprünglich etwa 2 % bis auf meist über 5 % kam. Eine Permeabilitätserhöhung durch fluiddruckinduzierte Perkolation bzw. Mikrorissbildung kann diesen Prozess lokal beschleunigt oder gar erst möglich gemacht haben. Nach KNEUKER et al. (2014) sind mechanisch induzierte Fließwege in den Hauptscherhorizonten, nämlich dem Kaliflöz Staßfurt und dem Schichtpaket Grauer Salztön (z3T) bis Hauptanhydrit (z3AN), während des Salzaufstiegs entstanden. Darauf deuteten

eine hohe Konzentration an Fluideinschlüssen im Bereich von Anhydritkristallen und -schichten sowie die häufigere Beobachtung von Strukturen der Korngrenzmigration in Proben, die in der Nähe des Kaliflözes entnommen wurden, hin. Während der späteren kompressiven Phase können diese Fließwege teils reaktiviert worden sein. Isolierte Fluideinschlüsse wurden im Zuge des angelegten Differentialdrucks entlang der Korngrenzen wieder vernetzt und damit dynamische Prozesse wie die Drucklösung in Gang gesetzt. Die großen Massen gelöster und abtransportierter Salzminerale finden sich in Form von sekundären Ausfällungen in den hangenden z3-Schichten wider, teils als Kluftfüllungen des Hauptanhydrits, teils als sehr großgewachsene Halitkristalle im Kristallsalz.

7.2.2 Kristallsalz (z3NAKR)

Bezüglich des Kristallsalzes werden im Folgenden vier räumliche Einflussfaktoren diskutiert, die maßgeblich für die heutige Zusammensetzung und Qualität verantwortlich sind:

1. das Vorhandensein von und die Nähe zu Anhydritklippen,
2. die Nähe zu dem östlichen Salzrand,
3. die Nähe zu (abgequetschten) Sattelstrukturen,
4. die Nähe zu der subsalinaren Störung.

7.2.2.1 Anhydritklippen

HEMMANN (1968) beschrieb in Bernburg eine Zunahme des Sulfat- und Karbonatgehalts sowie unlöslicher Bestandteile innerhalb des Kristallsalzes in Annäherung an Anhydritklippenstrukturen. Diese Sekundärminerale waren nur mikroskopisch erkennbar. Er folgerte, dass in einem Abstand von 50 bis 100 m aus Qualitätsgründen kein Abbau von Steinsalz mehr möglich sei. Dieser Sachverhalt kann anhand der Beobachtungen in Braunschweig-Lüneburg in abgeschwächter Form bestätigt werden, zumindest in Bezug auf Normalsalzqualität. Tatsächlich sind leicht erhöhte Anhydritgehalte in Klippennähe noch bis hin zu einem Abstand von 50 m zu verzeichnen. Unter Annahme eines Gipsdiapirismus, der noch während der Sedimentation des Kristallsalzes aktiv war, spiegeln diese dispers verteilten, sulfatischen Verunreinigungen Ausfällungen aus freigewordenen Diagenesewässern im Klippenumfeld wider. Diese erhöhten Anhydritgehalte reichen weit über den makroskopisch klar erkennbaren sulfatischen Saum hinaus.

Die durch HORN (2016) ausgewerteten Ergebnisse von Röntgendiffraktometrieanalysen (RDA) einer Vielzahl von Proben im nahen Umfeld einer Anhydritklippenstruktur belegen, dass es sich im Falle des erhöhten CaSO_4 -Gehalts um Anhydritminerale handelt. Nur in einer von 21 Proben wurde außerdem Polyhalit ($\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) nachgewiesen. 19 weitere Proben innerhalb des Kristallsalzes zeigten ebenfalls ausschließlich Anhydrit als

vorhandenes Sulfatmineral. In wenigen Fällen wurden neben Halit und Anhydrit auch noch 0,1 bis 0,3 % Sylvin (KCl) nachgewiesen (HORN, 2016).

Neben diesen mikroskopischen Verunreinigungen spielen die von HEMMANN (1968) und SCHACHL (1991) bereits beschriebenen makroskopischen Phänomene im Klippenumfeld wie Anhydritbänke, -brocken und -arme eine wichtige Rolle. Diese sind ebenfalls dem Prozess des Gipsdiapirismus zuzuordnen. Die Beprobung einer konkordant zur Kristallsalzschiebung verlaufenden, teilweise boudinierten gangartigen Anhydritstruktur über mehrere Sohlen ergab nach HORN et al. (2016), dass Veränderungen des angrenzenden Kristallsalzes als marginal einzustufen seien. Tatsächlich ist im Umfeld der wenige Zentimeter bis Dezimeter mächtigen, gangartigen Struktur, welche aus Halit und 10 bis 75 % Anhydrit besteht, eine relative Anreicherung von Sylvin zu beobachten. In fünf von acht angrenzenden Proben lag der gemessene Sylvinanteil oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,1 %. Nur in einer der acht Proben wurden mehr als 0,5 % Anhydrit gemessen, sodass im Mittel ein sehr hoher NaCl-Gehalt von 99,4 % vorliegt. Im Kontaktbereich zur Gangstruktur ist es entsprechend der sehr hohen Qualität zu einer relativen Anreicherung von NaCl und untergeordnet auch KCl gekommen. Auch wenn der Anhydritgang auf Grund seiner geringen Mächtigkeit in Bezug auf eine gewonnene Stosse nur einen geringen Einfluss auf die mineralogische Zusammensetzung des Haufwerks hat, ist die dunkle Farbe der Anhydritminerale doch höchst kritisch und bewirkt ein Ausscheiden des gesamten Abschlags in Bezug auf Normalsalzqualität.

Indirekten Einfluss auf die Qualität des Kristallsalzes haben Anhydritklippenstrukturen des Weiteren durch ihren besonderen Beitrag zur Strukturbildung. Durch die Schwundstellen zwischen einzelnen Klippenstrukturen sind Bruchzonen vorgegeben, entlang welcher es ab der späten Trias zum Einströmen des Staßfurt-Steinsalzes und des Kaliflöz Staßfurt und zu der primären Fließfaltenbildung kam (BEST und ZIRNGAST, 2002; SCHACHL, 1991). Zusätzlich konnten die kompetenten, teilweise gegeneinander gerichteten Hauptanhydrit-Bruchstücke die herrschende Spannung während der späteren kreidezeitlichen Kompression lokal stark beeinflussen. Die spannungsinduzierte Deformation wurde vorrangig von den umgebenden Salzgesteinen in Abhängigkeit von der Geometrie der Hauptanhydrit-Bruchstücke und -klippenstrukturen umgesetzt. Im Bereich großer Klippenstrukturen konnte so lokal ein Druckschatten innerhalb des Kristallsalzes vorliegen. Grobspätige Salzkristalle mit mehreren Zentimetern bis Dezimetern Kantenlänge in breiten Muldenstrukturen, wie beispielsweise in Lager 16 oder 20 beobachtet, sind auf solche Druckschattenpositionen während der kompressiven Deformationsphase zurückzuführen. Der dort mit der gröberen Körnung einhergehende erhöhte NaCl-Gehalt ist vermutlich nicht auf einen Abtransport von Sulfaten, sondern auf Zuwanderung von NaCl-gesättigten Lösungen und Wachstum der NaCl-Kristalle zurückzuführen. Im Untersuchungsgebiet sind solche Druckschattenpositionen grundsätzlich

an die Ostschenkel von Muldenstrukturen gebunden, in denen bis auf hohe Sohlenniveaus nach Westen verkippte Anhydritblöcke anzutreffen sind. Auf Grund der relativen Nähe des Untersuchungsgebietes zur Nordostflanke der Salzstruktur ist davon auszugehen, dass die NNE-SSW bis NE-SW angelegte Kompressionsspannung lokal von Nordosten her höhere Drücke bewirkte. Im Umkehrschluss liegt die Vermutung nahe, dass im Bereich des Südwestrandes der Salzstruktur eher die Westflanken der Muldenstrukturen im Bereich eines Druckschattens lagen.

7.2.2.2 Östlicher Salzrand

Sowohl CaSO_4 - als auch MgSO_4 - und KCl-Gehalt sind in den östlichen Lagern 23 und 28 signifikant erhöht. Dieser Sachverhalt lässt eine mehrphasige Veränderung der Zusammensetzung vermuten. Eine Anreicherung an MgSO_4 und KCl durch Lösungen, die ihre Herkunft vorwiegend im Kaliflöz Staßfurt haben, würde in einem durchschnittlich zusammengesetzten Kristallsalz zu etwas niedrigeren NaCl- und CaSO_4 -Gehalten führen. Der CaSO_4 -Gehalt ist hier jedoch ebenfalls signifikant erhöht. Ausgehend von einer zuletzt erfolgten Anreicherung von MgSO_4 und KCl, muss es zuvor zu einer relativen Anreicherung von CaSO_4 gekommen sein. Diese kann einerseits primär im Zuge der Anhydritklippenbildung und andererseits sekundär im Zuge der Faltenbildung entstanden sein. Ein nicht unerheblicher Klippeneinfluss ist in diesem Bereich zwar zu verzeichnen, jedoch kann dieser allein nicht die sehr hohen CaSO_4 -Gehalte erklären. Es ist anzunehmen, dass es während der Phase der Floßtektonik zu einem Abtransport von NaCl durch die Migration nicht gesättigter Lösungen in diesem Bereich kam. Die Rotation und die Verkipfung einzelner Hauptanhydritblöcke gegeneinander könnte lokal zwischen zwei Blöcken zu hohen Drücken und zur Vernetzung von Korngrenzen innerhalb der Salzgesteine zwischen diesen Blöcken geführt haben, sodass Lösungen aus dem Liegenden und Hangenden (Tauchfalte) migrieren konnten.

Die spätere Anreicherung an MgSO_4 und KCl wiederum kann ebenfalls durch unterschiedliche Prozesse erklärt werden. Einerseits kann es schon während der Phase der Floßtektonik im Hangenden unterhalb eines intakten Schichtpaketes aus Leine-Ton und Hauptanhydrit zu einer Anstauung des sehr mobilen Kaliflözes Staßfurt gekommen sein, welches während der späteren kompressiven Phase remobilisiert wurde und in das liegende Kristallsalz eindrang. Andererseits kann eine MgSO_4 - und KCl-reiche Lösung auch vollständig aus dem Liegenden über das Kluftsystem des Hauptanhydrits migriert sein. In beiden Fällen standen in einer späten Phase der Salzstrukturentstehung nahe dem nordöstlichen Salzrand besonders große Mengen an Fluiden und darin gelösten Kali- und Magnesiumsalzen zur Verfügung.

7.2.2.3 Sattelstrukturen

Auf höheren Sohlenniveaus, in denen im Zuge der Kompression viel Druck auf das Kaliflöz Staßfurt und das Staßfurt-Steinsalz wirkte, wurden die Sattelstrukturen teilweise von Hauptanhydritblöcken abgequetscht. Häufig sind im Randbereich dieser Sattelstrukturen erhöhte MgSO_4 - und KCl-Werte bis mehrere Meter in das Kristallsalz hinein zu beobachten. Auch makroskopisch wurde dieser Sachverhalt von HORN (2016) beobachtet. Er beschreibt eine Zerrüttung der Steinsalzleitbänke und eine Remobilisierung von Kalimineralen und dessen Rekristallisation in den Kontaktbereichen des Kristallsalzes während der kretazischen Kompression. In der weiteren Sattelumgebung kam es außerdem zur Drucklösung und Rekristallisation in Form von grobspätig und länglich ausgebildeten Halitkristallen zwischen etwas eingengten und mit sehr klarer Grenze verlaufenden Anhydritlinien. Die Quelle für die NaCl-reichen Fluide, die das Wachstum der Halitkristalle in der Nähe der Sattelstrukturen begünstigten, sind vermutlich wasserreiche Salzminerale des Kaliflözes Staßfurt, vor allem Carnallit und Kieserit.

7.2.2.4 Subsalinare Störung

Die anhand des Salzbasisverlaufes identifizierte, etwa herzynisch streichende Störung scheint in vielerlei Hinsicht Einfluss auf die heutige Zusammensetzung des Kristallsalzes gehabt zu haben. Neben den klar erkennbaren strukturellen Änderungen bezüglich der Streichrichtung und der Vergenz der Faltenstrukturen ist auch eine mineralogische Veränderung in Form einer generellen Erhöhung Mg-haltiger Minerale im weiteren Umfeld der Störung zu verzeichnen. Von woher genau und wie diese Mg-Salzminerale eingetragen wurden, ist nicht eindeutig. Die Störung hatte zu den unterschiedlichen tektonischen Phasen auch jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf den hangenden Salzkörper. Vor allem während der kompressiven Phase ist es im Hangenden der Störung zu einer starken Beeinflussung des lokalen Spannungsfeldes gekommen. Durch das Aufschieben des südwestlich gelegenen Blocks Richtung NNE kam es zu dieser Zeit auch zum Aufschieben und Ineinanderkeilen einzelner Anhydritblöcke unmittelbar über der Störung. Es ist davon auszugehen, dass sich die mechanische Beanspruchung auch in den Salzkörper hinein fortgesetzt hat und neue Wegsamkeiten für Fluide entstanden. Eine besonders schnelle Veränderung der Schergeschwindigkeit durch das Verhaken einzelner Hauptanhydritblöcke bis hin zu einem plötzlichen Bruch dieser Blöcke, kann zu Dilatanz in den umliegenden Salzgesteinen geführt haben. Die im weiteren Umfeld noch vorhandenen und unter hohem Druck stehenden, Mg- und K-reichen Lösungen migrierten vermutlich sehr schnell in die so entstehenden makro- und mikroskopischen Risse in diesem Bereich.

7.2.3 Schwadensalz (z3NAh)

Eine besonders auffällige Beobachtung innerhalb des Schwadensalzes ist die Erhöhung des KCl-Gehalts hin zur Liegendgrenze, welche unabhängig von der Wechsellagerung von reinen Bereichen und Schwadenzonen ist. Während die Werte in Nähe der Hangendgrenze bzw. im Muldenzentrum in etwa bei 0,05 % KCl oder darunter liegen, nehmen sie hin zur Liegendgrenze kontinuierlich auf ca. 0,15 % zu. Es scheint sich hierbei um ein primäres Phänomen zu handeln, da alle Beprobungsorte unabhängig von Lage und Mächtigkeit diesen Zusammenhang aufweisen. Einige Ausnahmen bezüglich des KCl-Gehalts bestehen jedoch lokal und sind vermutlich auf Schnitte innerhalb des Schwadensalzes zurückzuführen, welche vorwiegend mit Carnallit und Sylvin verfüllt sind, ähnlich der von HORN et al. (2016)



Abbildung 7.2: Mit Carnallit verheilte Bruchstruktur im Schwadensalz (z3NAh), Wendel 403/385 m Sohle, Profil 75.

untersuchten Struktur im nördlichen Bereich der Muldenstruktur SYNC1/2. Abbildung 7.2 zeigt den entsprechenden Aufschluss. Die Entstehung dieser mit Carnallit und Sylvin besetzten linearen Struktur ist auf sehr schnelle Änderungen der Schergeschwindigkeit zurückzuführen. Dies kann in der Umgebung gegeneinander geschobener Anhydritblöcke während der Kompressionsphase geschehen sein oder während des relativ zügigen Einfließens des Staßfurt-Steinsalzes und der Sattelbildung in der spätriassischen Extensionsphase. Der Riss verläuft schichtparallel inmitten einer Schwadenzzone, welche auf Grund des hohen Anhydritgehalts entsprechend kompetenter als die reinen Salzbereiche reagierte. K-reiche Lösungen waren zum Zeitpunkt der Rissbildung in hohem Maße und vermutlich unter hohem Druck stehend vorhanden. HORN et al. (2016) sehen die Herkunft der K-reichen Fluide im Kaliflöz Staßfurt, das mit dem Staßfurt-Steinsalz aufgestiegen ist. In diesem Bereich sind das Kaliflöz Staßfurt und das Schwadensalz tatsächlich nur durch etwa 25 m mächtige jüngere z3-Salze voneinander getrennt, jedoch ist das dazwischen liegende Kristallsalz (Lager 20aS) hier durch sehr geringe Gehalte an KCl und $MgSO_4$ gekennzeichnet. Es ist eher unwahrscheinlich, dass Lösungen des Kaliflözes Staßfurt durch das Kristallsalz hindurch migrierten, ohne dort entsprechende Spuren wie erhöhte KCl- oder

MgSO₄-Gehalte hinterlassen zu haben. Die Quelle der K-reichen Lösungen kann auch im Schwadensalz selbst liegen. Die Vielzahl an Anhydritmineralen der Schwadenzonen wurde vermutlich ähnlich wie im Staßfurt-Steinsalz primär als Gips sedimentiert. Eine entsprechende Verfügbarkeit an Fluiden durch die Diagenese zu Anhydrit muss in dieser stratigraphischen Einheit vorhanden gewesen sein. Zusätzliche Fluide können auch aus dem liegenden Anhydritmittelsalz (z3NAG) und deren mächtigen Anhydritbänken stammen. Das durch einen hohen Tonanteil abdichtend wirkende Tonmittelsalz (z3NATM) im Hangenden sorgte vermutlich dafür, dass diese Fluide nicht entweichen konnten und nach abgeschlossener Diagenese ein hoher Fluiddruck im Schwadensalz herrschte. Als dieser Fluiddruck die kleinste Hauptspannung überstieg, kam es vermutlich in den kompetenteren Schwadenzonen zur lokalen Rissbildung und zum Einströmen der Diagenesewässer, die in der Zwischenzeit vor allem durch leichtlösliche K-Mineralen angereichert waren. Dass ausreichend Fluide auch noch während der Kompressionsphase im Schwadensalz vorhanden waren, belegen zahlreiche Beobachtungen makroskopischer Drucklösungserscheinungen (HORN et al., 2016).

7.3 Schlussfolgerungen

Die eingangs formulierte Forschungsfrage nach räumlichen Abhängigkeiten der Werstoffverteilung innerhalb des Kristallsalzes kann klar beantwortet werden: Die Nähe zu Anhydritklippen, zum östlichen Salzrand, zu abgequetschten Sattelstrukturen und zu der identifizierten subsalinaren Störung beeinflussen die Zusammensetzung und Ausprägung des Kristallsalzes eindeutig. Für das Verständnis des Gesamtsystems der Salzstruktur spielte das Staßfurt-Steinsalz als sehr mobiles und gemeinsam mit dem Hauptanhydrit maßgeblich strukturbildendes Element eine Schlüsselrolle. Die heutige Zusammensetzung der Steinsalzhorizonte und lokale Unterschiede in deren Zusammensetzung sind das Ergebnis einer hohen Fluidverfügbarkeit und des Vorhandenseins von Migrationspfaden sowohl während der triassischen Extension als auch während der kretazischen Kompression. Insgesamt fand ein Massentransport in Richtung jüngere z3-Salze statt, welcher wiederum eine relative Anreicherung von schwer löslichen Salzmineralen im Liegenden bedingte. Für die Steinsalzgewinnung in Braunschweig-Lüneburg bedeutet dies eine ausschließliche Fokussierung auf hangende z3-Salze. Innerhalb der z3-Salze sind weiterhin vor allem Bereiche des Kristallsalzes im Druckschatten großer Anhydritklippen von besonderem Interesse. Die Zuwanderung NaCl-reicher Lösungen und das dortige sekundäre Wachstum von Halitkristallen während der kretazischen Kompression führte zu einer besonders hohen Reinheit des Steinsalzes mit teils 99,9 % NaCl-Gehalt.

8 Optimierung der Exploration

8.1 Hintergrund und Vorgehensweise

Auf Basis der geologischen 3D-Modellierung konnten verschiedene Ansätze zur Optimierung des Explorationsprozesses identifiziert werden. Das Konzept der Vorerkundung mittels Bohrfächern entlang der senkrecht zur Streichrichtung verlaufenden Profile im Abstand von 100 m ist das Ergebnis einer steten Weiterentwicklung der Exploration im Laufe der nunmehr über 100jährigen Geschichte des Bergwerkes. Die nachfolgend erläuterten Verbesserungsansätze basieren auf einer Weiterführung dieses Vorerkundungskonzeptes und beziehen sich ausschließlich auf die Naherkundung, welche folgende Aufgaben erfüllen muss:

- 1) Ermittlung der Mächtigkeit eines Kristallsalzlagers und dessen Schwankungen,
- 2) Ermittlung der Qualität und deren Schwankungsbreiten,
- 3) Erkundung des Hauptanhydrits und dessen Mächtigkeitsanomalien,
 - a) Erfassung von möglichen Gas- oder Lösungsvorkommen,
 - b) Entspannung durch Entgasung bzw. Kontrolle der Lösungszutritte.

Im Folgenden werden alternative Konzepte erarbeitet, die diese Aufgaben adäquat erfüllen. Diese Konzepte werden innerhalb verschiedener Szenarien miteinander verglichen, um für unterschiedliche Situationen das jeweils zu favorisierende Konzept zu ermitteln.

Für die Entwicklung alternativer Konzepte ist zuerst eine ideale Vergleichsbasis anzunehmen. Diese ist in Form einer stark vereinfachten Geometrie eines Kristallsalzlagers

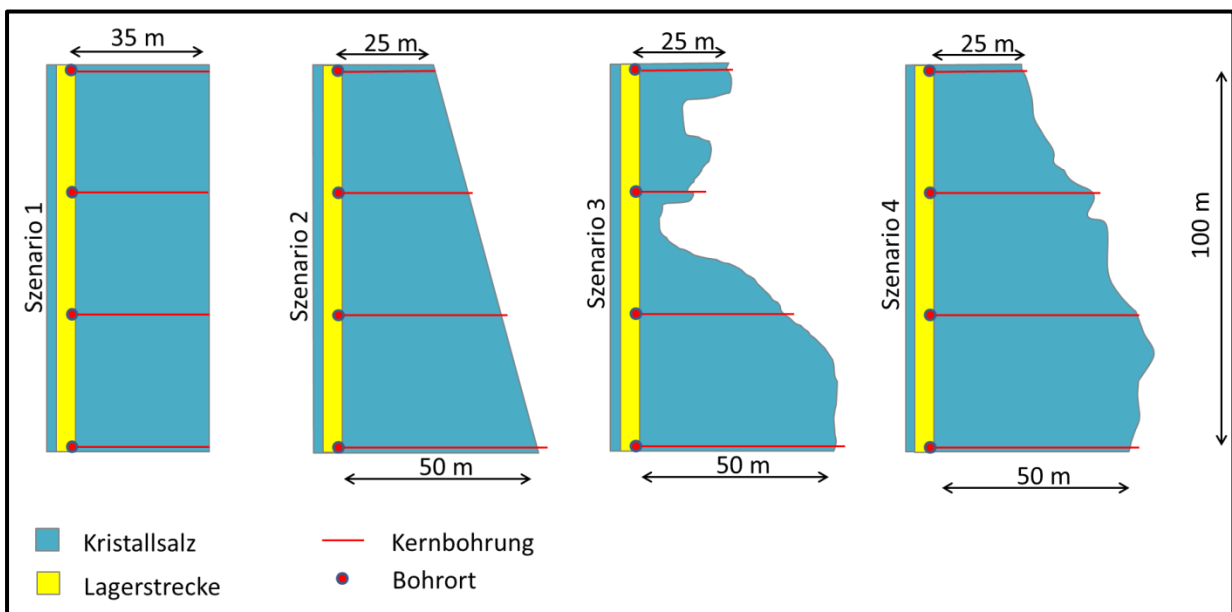


Abbildung 8.1: Szenarien unterschiedlicher Lagergeometrien für die Naherkundung. Für alle Szenarien gilt ein Abstand von 100 m zwischen den zwei außenstehenden Profilbohrungen. Die bankrechte Mächtigkeit des steilsten Lagers und die entsprechenden Bohrlängen variieren zwischen 25 m und 50 m.

mit einer parallel zu einer der Lagergrenzen aufgefahrenen Lagerstrecke anzunehmen (Abbildung 8.1, Szenario 1). Diese Lagerstrecke verbindet zwei Profilebenen, ist also genau 100 m lang und in beide Richtungen durch eine Profilbohrung begrenzt. Szenario 1 wird in mehrere Subszenarien untergliedert, innerhalb welcher verschiedene Lagermächtigkeiten betrachtet werden (25 m, 35 m, 50 m und 70 m Distanz von der Lagerstrecke bis zur Lagergrenze). Weitere zu betrachtende Szenarien beinhalten eine linear zwischen zwei Profilbohrungen variierende Lagermächtigkeit (Abbildung 8.1, Szenario 2) sowie zwei nichtlinear variierende, diskontinuierliche Lagermächtigkeiten (Abbildung 8.1, Szenario 3 und Szenario 4). Szenario 3 stellt einen Fall geringerer Mächtigkeit, als aus den angrenzenden Profilbohrungen zu erwarten wäre, dar. Für Szenario 4 wird eine im Gegenteil etwas höhere Mächtigkeit angenommen.

Die Entwicklung der unterschiedlichen Konzepte der Naherkundung erfolgt einerseits durch Integration zusätzlicher Erkundungsmöglichkeiten (Vollbohrungen/Georadarmessungen) und andererseits durch Variation der Zielrichtung und Anzahl der Kernbohrungen. Die Kernbohrungen erfolgen mittels DIAMEC 262 der Firma Atlas Copco im Counterflush-Verfahren und die Vollbohrungen mittels eines Strossenbohrwagens des Typs BW 50 S1 der Firma SMAG mit Luftspülung (esco, 2012).

Ein Vergleich der entwickelten Konzepte wird anhand folgender Kenngrößen vorgenommen:

- Anzahl der Bohrmeter (Kernbohrung/Vollbohrung),
- Anzahl der Aufschlusspunkte der Lagergrenze,
- Anzahl der nötigen Bohrorte und Bohransatzpunkte (Kernbohrung/Vollbohrung),
- Aufwand (in Personenarbeitsstunden) für Gesamtbohrungen.

Aktuell liegen keine Erfahrungswerte bezüglich der Qualität und des möglichen Aufwandes einer Stoßradarmessung in einer Lagerstrecke vor. Die Betrachtung des Arbeitsaufwandes je Konzept bezieht sich entsprechend nur auf die Bohrtätigkeiten. Für die Bewertung des unterschiedlichen Zeitaufwandes der einzelnen Konzepte werden verschiedene Annahmen und empirische Erfahrungswerte genutzt. Es wird eine Arbeitszeit von acht Stunden pro Schicht angenommen, wobei mit einer effektiven Arbeitszeit von 75 % gerechnet wird, um Pausen und Anfahrtswege sowie sonstige zeitliche Einbußen zu berücksichtigen. Bezüglich der Kernbohrungen wird eine theoretische Leistung von 0,25 m/min angenommen. Des Weiteren wird von einer technischen Verfügbarkeit von 80 % sowie einer organisatorischen Verfügbarkeit von 90 % ausgegangen. Unter den getroffenen Annahmen werden rund 65 Bohrmeter pro Schicht erreicht, vorausgesetzt es findet kein Umzug zu einem neuen Bohrort oder der Ansatz einer neuen Bohrung innerhalb dieser Schicht statt. Ein Umzug innerhalb einer Lagerstrecke wird auf zwölf Stunden veranschlagt. Hierbei wird sowohl während des

Bohrvorgangs als auch des Umzuges der Bohrmaschine stets von zwei Mitarbeitern ausgegangen, um die benötigten Gesamtarbeitsstunden zu berechnen.

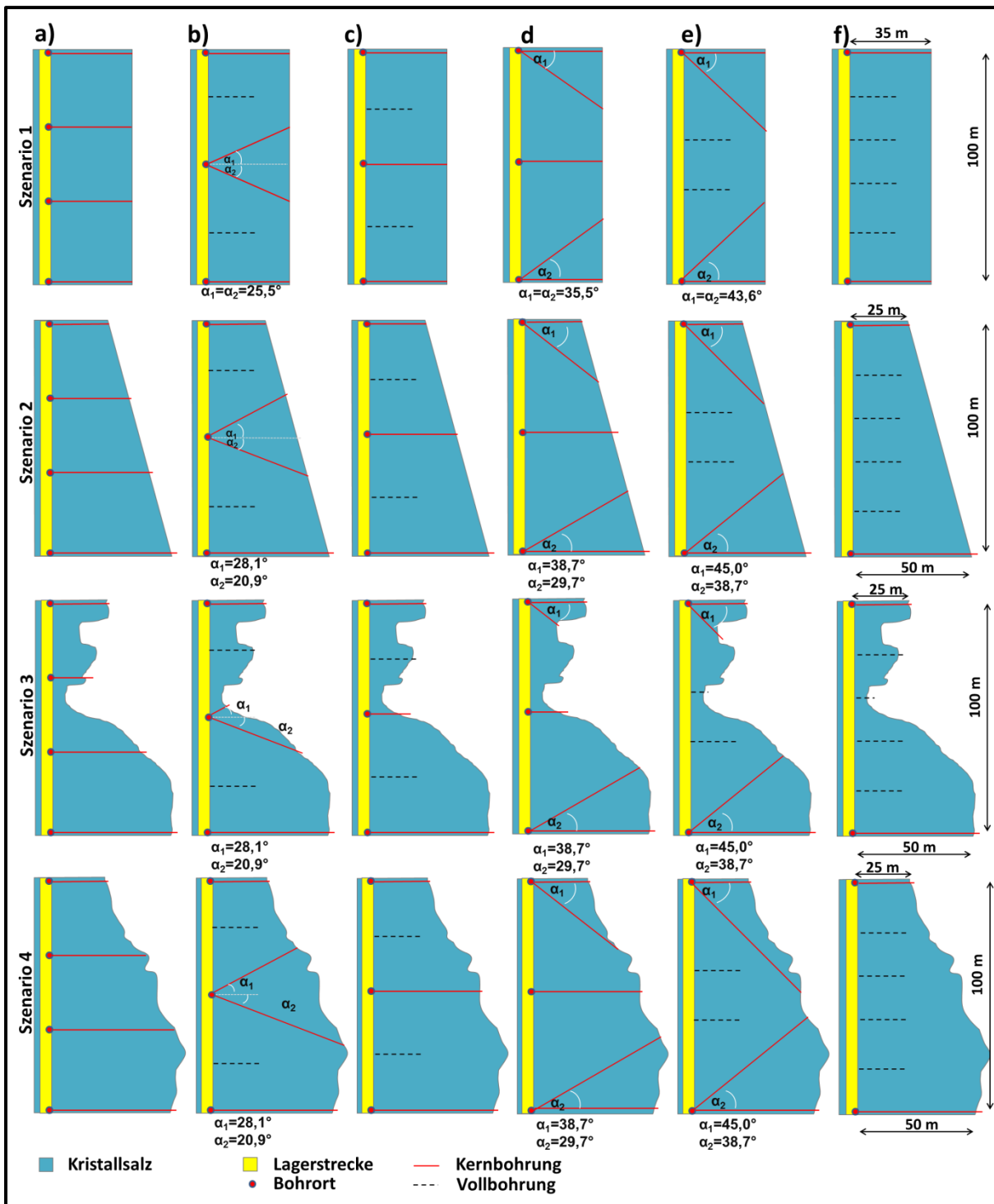


Abbildung 8.2: Konzepte der Naherkundung für unterschiedliche Lagergeometrien: a) aktuelles Naherkundungskonzept mit zwei Bohrorten und zwei Kernbohrungen zwischen den Profilbohrungen, b) ein Bohrort mit zwei schrägen Kernbohrungen und zwei Vollbohrungen, c) ein Bohrort mit einer Kernbohrung und zwei Vollbohrungen, d) ein Bohrort mit einer Kernbohrung und zwei zusätzlichen schrägen Kernbohrungen von den Profilbohrungen ausgehend, e) zwei zusätzliche schräge Kernbohrungen, von den Profilbohrungen ausgehend, und zwei Vollbohrungen, f) vier Vollbohrungen und Georadarmassungen entlang dem Stoß. Für alle Szenarien gilt ein Abstand von 100 m zwischen den zwei außenstehenden Profilbohrungen. Die bankrechte Mächtigkeit des steilstehenden Lagers und die entsprechenden Bohrlängen variieren zwischen 25 m und 50 m.

Eine Vollbohrung wird nur von einem Mitarbeiter durchgeführt. Mit einer theoretischen Bohrleistung von 0,4 m/min und einer etwas höheren technischen Verfügbarkeit von 90 % ergibt sich eine Leistung von etwa 118 Bohrmeter pro Schicht. Dem zugrunde liegt eine Maximallänge einer Vollbohrung von 20 m im Steinsalz und einem Zeitaufschlag von rund 7 min pro neu begonnene Vollbohrung. Dieser Zeitaufschlag resultiert einerseits aus dem nötigen Umsetzen der Bohrmaschine je Bohrloch und andererseits aus der Notwendigkeit, Bohrmehlproben in adäquaten Behältnissen aufzufangen und zu kennzeichnen.

Geht aus den Profilbohrungen hervor, dass das Lager in der zu erkundenden Richtung durch Hauptanhydrit begrenzt wird, hat dies Vor- und Nachteile. Vorteil ist die Einsetzbarkeit eines Georadars, da der Kontrast zwischen Steinsalz und Anhydrit in der Regel einen gut identifizierbaren Reflektor erzeugt (BEER, 1990; ZEIBIG et al., 2001; ZEIBIG und WENDZEL, 2000). Nachteil ist, dass in diesem Fall dennoch eine Kernbohrung zwischen den beiden Profilbohrungen angesetzt werden sollte, um mögliche Gas- oder Lösungsvorkommen zu erfassen. Ist anhand der Informationen aus den Profilbohrungen erkenntlich, dass eine entsprechende Kernbohrung nicht notwendig ist, können Georadarmessungen in Kombination mit Vollbohrungen theoretisch ausreichende Informationen über die Lagermächtigkeit sowie die entsprechende Qualität liefern.

Einen Überblick über alle hier entwickelten und verglichenen Konzepte gibt Abbildung 8.2. Insgesamt werden neben dem aktuellen Naherkundungskonzept a) drei Konzepte mit einem zusätzlichen Bohrort zwischen zwei Profilbohrungen (Konzepte b), c) und d)) und zwei Konzepte ohne zusätzlichen Bohrort betrachtet (Konzepte e) und f)). Alle Konzepte beinhalten den Einsatz von Vollbohrungen. Ausnahme ist Konzept d). Hier wird statt Vollbohrungen eine dritte Kernbohrung vorgenommen. Außer in der Anzahl an Bohrorten unterscheiden sich die Konzepte auch durch die Länge der schräg angesetzten Kernbohrungen. Die verschiedenen Ansatzwinkel resultieren aus der unterschiedlichen Anzahl an Aufschlusspunkten der Lagergrenze. Für die konkrete Berechnung werden die Informationen aus den vorhandenen Profilbohrungen genutzt. Unter der Annahme einer linear verlaufenden Lagergrenze zwischen zwei Profilbohrungen wird eine theoretische Grenzlinie ermittelt und in gleichlange Abschnitte entsprechend der Anzahl der Aufschlusspunkte unterteilt. So ergeben sich ausgehend von dem jeweiligen Bohrort anzuvisierende Zielpunkte und entsprechend unterschiedliche Ansatzwinkel für die unterschiedlichen Konzepte. Die Vollbohrungen erfolgen im Abstand von 20 m zu der nächstliegenden Profilbohrung für die Konzepte b) und f). Genau zwischen zwei Kernbohrungen, also im Abstand von 25 m werden die Vollbohrungen in Konzept c) angesetzt. Die zwei Vollbohrungen in Konzept e) werden im Abstand von 20 m zueinander und 40 m zu den Profilbohrungen angesetzt. In Konzept f) kommt für die Erkundung der Lagergrenze zwischen den zwei Profilbohrungen ein Georadar zum Einsatz.

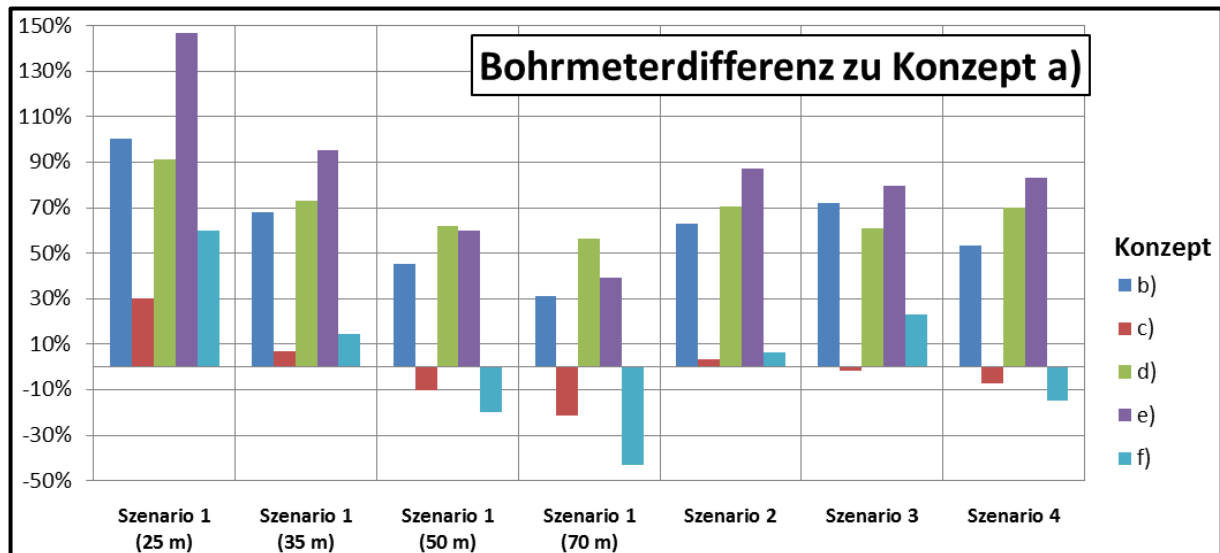


Abbildung 8.3: Bohrmeterdifferenz unterschiedlicher Konzepte zu dem aktuellen Naherkundungskonzept.

8.2 Aufwand und Nutzen unterschiedlicher Naherkundungskonzepte

Die meisten zusätzlichen Bohrmeter werden bis zu einer Distanz zur Lagergrenze von 50 m mit Konzept e) erzielt (Abbildung 8.3). Dies resultiert aus den relativ steilen Ansatzwinkeln der Bohrungen. So werden bei besonders schmalen Lagern bis zu 150 % mehr Bohrmeter und bei besonders breiten Lagern bis zu 35 % mehr Bohrmeter im Vergleich zur Ausgangssituation generiert. Je mächtiger das Lager ist, desto geringer sind auch die errechneten Ansatzwinkel und die Bohrmeterdifferenz. Ab einer Distanz von 50 m liefert Konzept d) die meisten Bohrmeter. Ab etwa 45 m Distanz zur Lagergrenze weisen die Konzepte c) und f) eine negative Differenz im Vergleich zur Ausgangssituation auf.

Alle Konzepte bedeuten gegenüber der Ausgangssituation in allen betrachteten Szenarien weniger Aufwand (Abbildung 8.4). Konzept f), in welchem ausschließlich Vollbohrungen

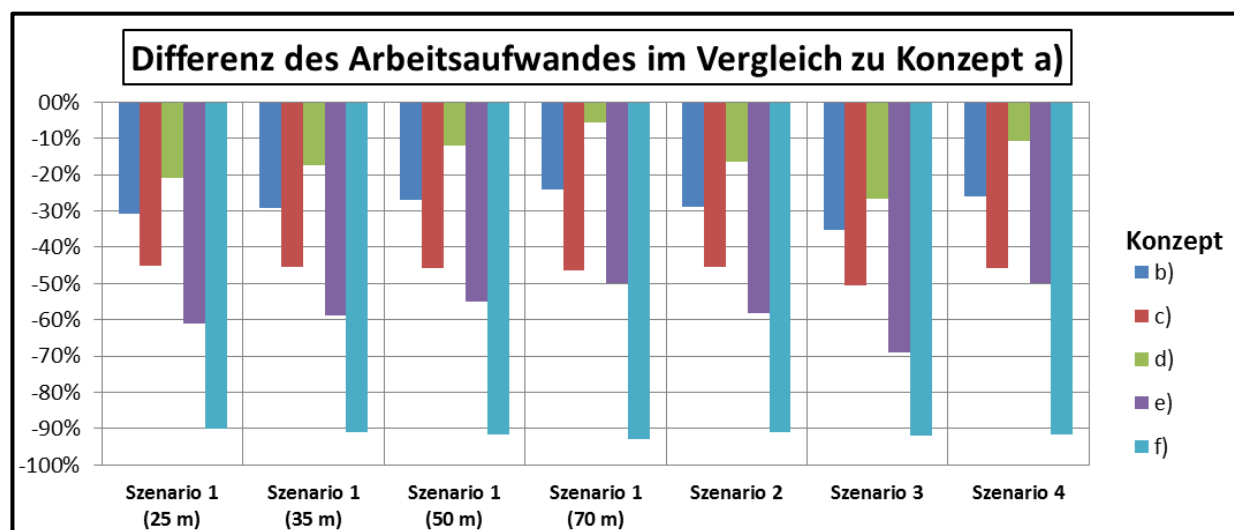


Abbildung 8.4: Differenz des Arbeitsaufwandes (in Bezug auf die Bohrtätigkeiten) unterschiedlicher Konzepte gegenüber dem aktuellen Naherkundungskonzept.

zwischen den zwei Profilbohrungen der Naherkundung des Lagers genutzt werden, weist grundsätzlich den niedrigsten Aufwand von rund 10 % gegenüber der Ausgangssituation auf. Der nächstniedrigere Aufwand wird immer von Konzept e) erzielt, da hier kein zusätzlicher Bohrort einzurichten ist, gefolgt von Konzept c), welches nur eine statt zwei Kernbohrungen beinhaltet. Die Konzepte b) und d) bedeuten in allen Szenarien den größten Aufwand, welcher jedoch jeweils immer noch geringer ausfällt, als bei Anwendung des aktuellen Naherkundungskonzeptes.

Einhergehend mit weniger zusätzlichen Bohrmeter in Bezug auf breitere Lager, nimmt auch die Aufwandsersparnis gegenüber der Ausgangssituation ab. Ausgenommen sind die Konzepte c) und Konzept f), bei denen die Aufwandsersparnis relativ konstant bei 45 % bzw. 90 % liegt, da hier keine schrägen Bohrungen vorgesehen sind.

Interessant ist der Vergleich der Ergebnisse von Szenario 2, 3 und 4. Die theoretisch errechneten Bohrmeter und der entsprechende notwendige Aufwand ändern sich stark mit dem diskontinuierlichen Verlauf der Lagergrenze. Außerdem wird der Einfluss einer Über- bzw. Unterschätzung der Mächtigkeit anhand der Informationen aus Profilbohrungen deutlich. So schneidet Konzept f) in Szenario 3 besser ab als in Szenario 2 und erzielt rund 23 % statt rund 7 % mehr Bohrmeter bei 92 % statt 91 % weniger Aufwand. Die Konzepte c), d) und e) weisen bei einer diskontinuierlichen Lagergrenze wie in Szenario 3 weniger Bohrmeter als in Szenario 2 und entsprechend auch relativ weniger Aufwand auf. Konzept b) ist neben Konzept f) das Einzige, in dem sich der diskontinuierliche Verlauf der Lagergrenze positiv auf die Bohrmeterdifferenz (72 % statt 63 %) und den Aufwand (35 % statt 29 % weniger) auswirkt. Dieser Sachverhalt ändert sich entgegengesetzt bei Betrachtung des vierten Szenarios, welches eine Unterschätzung der Lagermächtigkeit repräsentiert. Hier entfallen auf Konzept b) weniger Bohrmeter im Vergleich zu Szenario 2 (53 % statt 63 %) bei mehr Aufwand (26 % statt 29 % weniger). Auch Konzept e) bietet relativ weniger Bohrmeter (83 statt 87 %) bei etwas mehr Aufwand (50 % statt 58 % weniger). Konzept c) weist weniger Bohrmeter bei gleichbleibendem Aufwand und Konzept d) ähnlich viele Bohrmeter bei geringem Aufwand auf.

Der Vergleich des nötigen Aufwandes für die Bohrtätigkeit suggeriert, dass stets Konzept f) oder Konzept e) gewählt werden sollten. Konzept f) erfüllt jedoch nur in bestimmten Situationen alle Anforderungen, und auch Konzept e) weist in bestimmten Szenarien klare Schwächen auf, welche nicht durch die erhobenen Kenngrößen deutlich werden. Es stellt sich die Frage, ob mehr Bohrmeter bei geringerem Aufwand generell als positiv zu bewerten sind, da so zwar mehr Informationen für den jeweiligen Lagerteil vorliegen, die räumliche Verteilung dieser Informationen jedoch stark unterschiedlich ist. So kommt es bei starken Mächtigkeitsschwankungen zu einer ungewollten Nähe von Aufschlusspunkten entlang der Lagergrenze bei Anwendung des Konzeptes e). In Szenario 3 betrifft dies die zwei

nördlichen Bohrungen und in Szenario 4 die beiden zentralen Bohrungen (Abbildung 8.2). Gerade in Bezug auf unerwartete Mächtigkeitsschwankungen bringt also ein zusätzlicher Bohrort im Zentrum der Strecke enorme Vorteile mit sich und führt zu einem gleichmäßigeren Aufschluss der Lagergrenze. So wird mit Konzept b) in beiden Szenarien mit diskontinuierlicher Lagergrenze ein deutlich besseres Aufschlussergebnis erzielt, sowohl im Bereich der Lagergrenze, als auch in Stoßnähe.

8.3 Beprobungsintervalle

Grundsätzlich sind mehr Bohrmeter bei niedrigerem Gesamtaufwand innerhalb eines Szenarios positiv zu bewerten, da so mehr Informationen für diesen Lagerstättenteil vorliegen. Dies ist zumindest der Fall, wenn die räumliche Verteilung der anfallenden Bohrmeter unberücksichtigt bleibt. Der später entstehende Mehraufwand durch eine größere Anzahl an durchzuführenden Analysen bleibt bei diesem Vergleich unterschiedlicher Konzepte unberücksichtigt. Doch auch hier lässt sich grundsätzlich Aufwand einsparen, nämlich durch längere Probeintervalle von 2 m oder sogar 4 m Länge. Die Ergebnisse der Blockmodellierung haben gezeigt, dass eine Interpolation innerhalb von Blöcken mit 4 m Kantenlänge praktikabel ist und eine Verfeinerung auf Blöcke mit 2 m oder sogar 1 m Kantenlänge keinen Mehrwert bringen; ganz im Gegenteil führen höhere Auflösungen zu einer Überbewertung der Analysen entlang der Bohrspuren und zu insgesamt schlechteren Ergebnissen. Liegen in einem Block mit 4 m Kantenlänge vier Beprobungsintervalle und somit vier Analysewerte, wird in diesem Block als Ausgangswert für die Interpolation das arithmetische Mittel dieser vier Werte gebildet. Entsprechend sind im Rahmen dieser Vorgehensweise 1-m-Beprobungsintervalle überflüssig. Eine Verlängerung der Beprobungsintervalle entlang von Mächtigkeitsbohrungen auf 2 m, 3 m oder sogar 4 m bedeutet einen niedrigeren Aufwand bezüglich der Analytik bei gleicher Leistung und gleichem Informationsgewinn innerhalb der Blockmodellierung. Zusätzlich sind so in Bezug auf Vollbohrungen vergleichbare Intervalle gegeben, welche beispielsweise im Steinsalzbergwerk Bernburg 3 m bis 5 m betragen (KÖPPKE, 2008). Eine Homogenisierung von Probeintervalllängen zwischen Vollbohrungen und Kernbohrungen ist im Falle von Konzepten, in welchen beide Methoden kombiniert werden, eine wichtige Voraussetzung, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

Ein Nachteil von längeren Probeintervallen ist, dass einzelne lokale Phänomene wie Anhydritarme, -bänke oder -brocken oder sonstige Erscheinungen, die zu einem stark erhöhten CaSO_4 -Gehalt führen, in den Ergebnissen noch schlechter abgebildet werden, als das bei 1-m-Probeintervallen ohnehin schon der Fall ist. Das liegt daran, dass diese Phänomene häufig nur wenige Zentimeter des Beprobungsabschnittes ausmachen. Des Weiteren ergibt sich hin zu den Lagergrenzen unter Umständen das Problem einer geringen

Auflösung, wenn hier beispielsweise der Übergang von Kristallsalz zu Klippensalz innerhalb eines 4-m-Intervalls liegt. In der Regel werden diese lokalen Phänomene und der Übergang zu den Lagergrenzen, solange makroskopisch erkennbar, im Rahmen der geologischen Bohrkernaufnahme detailliert dokumentiert. Werden diese Informationen bei der Bewertung einzelner Abbaubereiche berücksichtigt, ist die Umstellung auf gröbere Beprobungsintervalle grundsätzlich sinnvoll, nicht nur im Hinblick auf eine Kombination mit Vollbohrungen. Um die Lagergrenze dennoch einigermaßen gut auflösen zu können, und auf Grund der teilweise geringen Mächtigkeiten einzelner Lager von 20 m und weniger erscheint eine Länge der Beprobungsintervalle von 2 m angemessen.

8.4 Einfluss der Bohrspülung auf die Analytik

Ein geringer Anteil der MgSO_4 -Erhöhung kann auf die Nutzung gesättigter MgCl_2 -Lösung als Bohrspülung zurückgeführt werden. Anhand eines Vergleichs von Trockenproben und Kernproben konnte dies eindeutig belegt und in etwa eine Größenordnung der Beeinflussung des durch ICP-OES ermittelten Mg^{2+} -Gehalts festgestellt werden (Tabelle 8.1). Der Vergleich von 2079 Grubenproben, die im Zeitraum von Juli 2014 bis Mai 2017 analysiert wurden, mit rund 13.000 Bohrkernproben innerhalb des Untersuchungsgebiets gibt diesbezüglich einen guten ersten Eindruck. Bezogen auf den Mittelwert ist der Mg-Gehalt um den Faktor zwei erhöht, bezogen auf den Median um den Faktor sieben. Der jeweilige Ca-Gehalt liegt hingegen sowohl bezüglich des Mittelwertes als auch des Medians sehr eng beieinander und suggeriert eine grundsätzliche Vergleichbarkeit. Diese ist jedoch nur begrenzt gegeben, da die betrachteten Grubenproben und Kernproben zu unterschiedlichen Zeitpunkten in ganz unterschiedlichen Bereichen angefallen sind. Um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sind Probengruppen zu betrachten, die aus demselben räumlich eingeschränkten Bereich stammen. Dies wurde anhand der vorliegenden Datensätze für zwei Kristallsalzlager umgesetzt, nämlich das relativ hochqualitative Lager 25 und das relativ stark verunreinigte Lager 28. Während in Lager 25 der Mg-Gehalt in den Kernbohrungen um den Faktor 8 bzw. 9 (Mittelwert bzw. Median) erhöht ist, liegt die Erhöhung in Lager 28 unterhalb des Faktors 2. In absoluten Zahlen entspricht das in beiden Lagern einer Erhöhung um ca. 600 mg/kg (Median) gegenüber den Trockenproben. Dies ist auch bezüglich der Gesamtheit aller Proben zu beobachten. Auf Grund einer Vielzahl an Extremwerten ist der Mittelwert gegenüber dem Median häufig stark erhöht. Dies trifft vor allem auf Lager 28 zu, sowohl in Bezug auf die Trockenproben als auch auf die Kernproben.

Tabelle 8.1: Vergleich des mittels RFA gemessenen Ca- und Mg-Gehalts von trockenen Grubenproben und nas-sen Bohrkernproben.

	n	Ca [mg/kg] Mittelwert	Ca [mg/kg] Median	Mg [mg/kg] Mittelwert	Mg [mg/kg] Median
Grubenproben	2079	3514	2491	366	96
Kernproben	12985	2984	2300	796	700
Grubenproben L25	311	2145	1944	87	73
Kernproben L25	767	2817	2200	666	640
Grubenproben L28	326	4844	3781	1206	689
Kernproben L28	304	5402	4100	2027	1300
Stichproben ATS	363	3549	3374	325	264
Stichproben NS	689	2258	2188	109	95

Die Erhöhung der gemessenen Mg-Gehalte durch die verwendete MgCl_2 -Bohrspülung scheint unabhängig von unterschiedlichen Mg-Gehalten im Rohsalz zu sein und in einer Größenordnung von über 500 mg/kg zu liegen. Dieser Einfluss scheint relativ konstant für alle betrachteten Proben und Probengruppen zu zutreffen. Die räumliche Auswertung und Interpretation von relativen Veränderungen des errechneten MgSO_4 -Gehalts anhand der Bohrkernanalysen ist daher grundsätzlich belastbar.

Im Vergleich zu Vollbohrungen ergibt sich pauschal ein geringerer berechneter NaCl-Gehalt. Dieser ist mit Werten, die um etwa 0,25 % bis 0,35 % geringer ausfallen, eher als konservative Einschätzung des Wertstoffgehalts zu betrachten. Der vermehrte Einsatz von Vollbohrungen innerhalb des Naherkundungskonzeptes würde somit auch zu unbeeinflussten Ergebnissen führen und damit eine Grundlage für eine theoretische Korrektur der Analytik der benachbarten Bohrkernkerne liefern. Ein weiterer Ansatz, den Einfluss der genutzten MgCl_2 -Lösung zu minimieren, ist die Verwendung eines größeren Bohrlochdurchmessers. Der aktuell verwendete relativ kleine Bohrlochdurchmesser von 52 mm führt im Steinsalz häufig zu einer Vielzahl von Bohrkernbruchstücken von unter einem Zentimeter Länge. Die durch die Bohrspülung benetzbare Oberfläche vervielfacht sich so. Auch der Waschvorgang der Proben, um die Bohrspülung möglichst vollständig zu entfernen, kann sich dadurch stärker auf die Messergebnisse auswirken. Ein größerer Bohrlochdurchmesser für die Kerngewinnung würde zu weniger Bruchstücken und somit zu aussagekräftigeren Analyseergebnissen der Bohrkernproben führen.

8.5 Vorschlag zur zukünftigen Datenerfassung

Alle Explorationsdaten wurden ursprünglich jeweils für bestimmte Zwecke erhoben und archiviert, jedoch in der Regel ohne Berücksichtigung einer möglichen Weiternutzung zur Erstellung eines dreidimensionalen Modells. Vielmehr fand die Erhebung und Archivierung in Hinblick auf die Erstellung und Aktualisierung von Planungsrissen und Profilen, also zur Darstellung und Interpretation auf relevanten Projektionsebenen statt. Eine Nutzung für den

Prozess der 3D-Modellierung ist entsprechend mit einer aufwändigen Aufbereitung und Vereinheitlichung der Daten verbunden. Im Folgenden werden konkrete Beispiele für Veränderungen in der Datenaufnahme genannt, die ohne viel Aufwand zu einer besseren Nutzbarkeit für die 3D-Modellierung dienen.

Die geologische Kartierung im Grubengebäude erfolgt mit Stift und Papier. Die anschließende Digitalisierung führt zur Aufnahme sehr detaillierter Polylinien, teilweise durch 20 bis 30 Punkte definiert, für eine Schichtgrenze, die auf wenige Meter an Stoß oder Firste aufgeschlossen ist. Die Information ist wichtig für das geometrische Modell, die Größe des Betrachtungsraums und die Distanz zu den nächsten Aufschlusspunkten dieser Schichtgrenze, steht jedoch nicht im Einklang mit der hohen Auflösung der Kartierung. Eine solche Information sollte entsprechend nur durch sehr wenige Punkte, im besten Fall durch zwei oder sogar nur einen Punkt definiert sein. Nur so kann eine sinnvolle Flächeninterpolation mittels eines Netzes aus etwa gleichgroßen Dreiecken gewährleistet werden. Die überdefinierten Kurvenobjekte können im Nachhinein automatisch durch Anwendung bestimmter Filter simplifiziert, also durch weniger Punkte neudefiniert werden. Eine sinnvolle automatische Reduzierung auf nur einen Punkt ist jedoch im Nachhinein nicht möglich. Auch relevante Sachverhalte wie ein Wechsel der Streichrichtung gehen verloren. Ein solcher Wechsel wäre durch eine einfache Digitalisierung durch drei Punkte genau definiert.

Die Konstruktionen in Form von Profilen und Grundrissen resultieren in einer sehr detaillierten Darstellung einer Interpretation auf Basis von harten Aufschlussdaten. Der eigentliche Nutzen der Profile und Grundrisse ist es, einerseits eine Planungsgrundlage und andererseits ein Dokument zur Vorlage bei Behörden darzustellen, welches ein möglichst gutes Verständnis der Lagerstätte widerspiegelt. Interpretierte Faltenachsen führen hier zu geschwungenen Linien zwischen zwei harten Aufschlusspunkten, und diese geschwungenen Linien sind in digitaler Form als hunderte Punkte entlang einer Polylinie definiert. Diese Überdefinierung bei der Digitalisierung führt, wie bereits bezüglich der Kartierdaten erläutert, zu Problemen für die Weiternutzung innerhalb des Prozesses der 3D-Modellierung.

Bei der Auffahrung einer Lagerstrecke werden Informationen aus schräg angesetzten Vollbohrungen genutzt, um die Strecke parallel zu einer Lagergrenze auszurichten. Im Falle des Hauptanhydrits als Lagergrenze signalisiert hierbei eine Rotfärbung des Bohrkleins die Nähe zu der Lagergrenze und das Erreichen des Basissalzes der Leine-Folge bzw. des sulfatischen Saums des Hauptanhydrits (z3NAa). Diese harten Aufschlusspunkte werden bisher jedoch nicht dokumentiert und archiviert, sondern stehen nur kurzfristig in Form von Kennzeichnungen am Stoß der Strecke zur Verfügung. In der Regel fließen diese Informationen dann in die Aktualisierung und Konstruktion der Schichtgrenzen innerhalb des entsprechenden Grundrisses ein. So fließen harte Aufschlusspunkte in eine Interpretation

ein, die ein späterer Bearbeiter, beispielsweise im Rahmen der 3D-Modellierung, nicht mehr nachvollziehen kann. Für ihn bleibt dann unklar, ob besagte Schichtgrenze nur zufällig in der Nähe einer Strecke verläuft oder ob ein tatsächlicher Aufschluss vorliegt.

8.6 Konzeptioneller Vorschlag für die zukünftige untertägige Exploration

Der Vergleich unterschiedlicher Konzepte für unterschiedliche Ausgangssituationen hat gezeigt, dass individuelle Naherkundungslösungen je nach vorliegender Situation die besten Ergebnisse erzielen. Um das jeweils sinnvollste Konzept auswählen zu können, sollten auf Basis der Informationen aus den begrenzenden Profilbohrungen und der Auffahrung der Erkundungsstrecke zuerst die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Ist Hauptanhydrit (bzw. sulfatisches Salz/Basissalz) als Lagergrenze zu erwarten?
- Wie weit ist die Lagergrenze senkrecht von der Strecke entfernt?
- Wie fällt das Lager ein, und wie groß ist die entsprechende reale Mächtigkeit?

Wird das Lager durch Hauptanhydrit begrenzt, ist von größeren Mächtigkeitsschwankungen und einem diskontinuierlichen Verlauf der Lagergrenze auszugehen. Entsprechend ist ein detaillierter Aufschluss der Lagergrenze mit zwei oder mehr Aufschlusspunkten wünschenswert. Stoßradarmessungen liefern hier im besten Fall eine Vielzahl an Aufschlusspunkten und können den Aufschluss der Lagergrenze mittels Kernbohrungen ersetzen. Die Bestimmung der Qualität kann dann mittels Vollbohrungen und Bohrmehlproben erfolgen. Zeitaufwändige Kernbohrungen entlang solch einer Lagerstrecke entfallen also vollständig.

Wird das Lager nicht durch Hauptanhydrit begrenzt, sind in jedem Fall gekernete Bohraufschlüsse der Lagergrenze notwendig. Da in diesem Fall von einem gleichmäßigeren Verlauf der Lagergrenze ausgegangen werden kann, würde theoretisch auch nur ein Aufschlusspunkt der Grenze, wie in Konzept c) vorgestellt, ausreichen.

Die zu erwartende Distanz zu der Lagergrenze ist ein sehr wichtiges Kriterium zur Auswahl eines adäquaten Konzeptes für die Naherkundung. Die kritische maximale Bohrlänge von rund 20 m mittels Vollbohrungen limitiert das Konzept einer Kombination von Vollbohrung und Stoßradar auf geringe Mächtigkeiten von rund 35 m. Auch bezüglich der Konzepte, in denen Kernbohrung und Vollbohrung kombiniert werden, würde sich die Möglichkeit längerer Vollbohrungen positiv auf das Aufschlussergebnis auswirken. Entsprechend interessant wären technische Verbesserungen zur Erhöhung der Reichweite, die für den genutzten Bohrwagen BW50 S1 theoretisch bei bis zu 40 m liegt (MERSCH, 2007).

Tabelle 8.2: Anleitung zur situationsbedingten Auswahl eines adäquaten Naherkundungskonzeptes.

Art der Lagerbegrenzung		Distanz zur Lagergrenze		
		bis 35 m	35 bis 50 m	ab 50 m
Hauptanhydrit	Konzept f) Stoßradar und vier Vollbohrungen	Konzept b) zwei Vollbohrungen und zwei schräge Kernbohrungen ohne zusätzlichen Bohrort	Konzept d) zwei schräge und eine senkrechte Kernbohrung mit einem zusätzlichem Bohrort	
	kein Hauptanhydrit	Konzept e) zwei Vollbohrungen und zwei schräge Kernbohrungen ohne zusätzlichen Bohrort	Konzept e) zwei Vollbohrungen und zwei schräge Kernbohrungen ohne zusätzlichen Bohrort	Konzept b) zwei Vollbohrungen und zwei schräge Kernbohrungen mit einem zusätzlichen Bohrort

Ausgehend von den aktuellen Randbedingungen sind in Tabelle 8.2 Handlungsempfehlungen für verschiedene zu erwartende Situationen dargestellt. Für eine diskontinuierliche Lagergrenze und starke Mächtigkeitsunterschiede zwischen zwei Profilbohrungen, wie in Szenario 3 und 4 dargestellt, ist Konzept b) von Vorteil, ansonsten ist Konzept e) zu favorisieren. Ausnahmen ergeben sich bei besonders großer Lagermächtigkeit. Hier sollte die Möglichkeit eines dritten Aufschlusspunktes genutzt und Konzept d) zur Anwendung gebracht werden, wenn größere Mächtigkeitsschwankungen zu erwarten sind. Sind keine großen Mächtigkeitsschwankungen zu erwarten sollte dennoch Konzept b) und nicht Konzept e) Anwendung finden um eine bessere räumliche Verteilung der gewonnen Informationen zu gewährleisten.

Die letzte zu beantwortende Frage zu der realen Mächtigkeit kann einen ersten Hinweis auf die zu erwartende Qualität innerhalb dieses Lagers liefern. So ist bei eher schmalen Lagern (bis ca. 25 m) von einer tendenziell geringeren Korngröße der Halitkristalle und minderer Qualität auszugehen als bei breiten Lagern (ab ca. 50 m). Diese Information kann der mittel- bis langfristigen strategischen Auffahrung je nach Bedarf der Auftausalzmengen dienen und für eine sinnvoll koordinierte strategische Fernerkundung verwendet werden.

8.7 Schlussfolgerungen

Mit relativ einfachen Anpassungen lässt sich die Exploration in Braunschweig-Lüneburg effizienter gestalten. Bezüglich der Qualitätsbestimmung kann durch eine Verlängerung des standardmäßigen Beprobungsintervalls von einem auf zwei Bohrkernmeter der Aufwand der Laboranalytik stark reduziert werden. Der nicht zu vernachlässigende Einfluss von MgCl_2 -Bohrspülung auf die Analytik kann durch den vermehrten Einsatz von Vollbohrungen eliminiert oder durch das Gewinnen von Bohrkernen größeren Durchmessers reduziert werden. Eine individuell geplante Naherkundung je Kristallsalzlager anhand der Ergebnisse benachbarter Profilmächtigkeitsbohrungen kann allein durch Anpassen der Bohrlochrichtung zu einer Verringerung des Explorationsaufwandes bei gleich bleibendem Erkenntnisgewinn führen. Der vermehrte Einsatz von Vollbohrungen und Stoßradar birgt zusätzlich großes Potential für eine effizientere Naherkundung, vor allem in Bezug auf Bereiche in der Nähe von Anhydritklippenstrukturen.

9 Optimierung der Lagerstättennutzung

9.1 Hintergrund und Vorgehensweise

Der konkreten Planung und Dimensionierung von Abbauen innerhalb eines Lagerstättenkörpers geht die Definition der äußeren Konturen dieses Körpers, einschließlich der Bewertung der Qualität, im Rahmen eines geologischen Modells voraus. Die Auswertung von Proben des Schwadensalzes und Staßfurt-Steinsalzes und deren räumlicher Bezug haben gezeigt, dass Staßfurt-Steinsalz zwar in ausreichender Mächtigkeit vorliegt, jedoch auf Grund geringer Qualität keine Produktfähigkeit aufweist. Das Schwadensalz hingegen hat sowohl in Teilbereichen eine ausreichende Mächtigkeit als auch bezüglich der Qualität durchaus das Potential für eine Gewinnung als Auftausalz einerseits und als rosa Speisesalz andererseits. Qualität und Kontur bauwürdiger Schwadensalzlager liegen als Ergebnis der 3D-Lagerstättenmodellierung vor. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit Möglichkeiten zur Integration von Schwadensalz-Abbaukammern in das Gesamtabbauschema und einer entsprechenden Erhöhung des Lagerstättennutzungsgrades innerhalb des Untersuchungsgebietes. Dem voraus geht die Betrachtung der aktuellen Abbausituation sowie eine Quantifizierung der vorhandenen Salzqualitäten. Abschließend werden die Erkenntnisse aus einer exemplarischen 3D-Abbauplanung gemeinsam mit weiteren Möglichkeiten zur Erhöhung des Lagerstättennutzungsgrades wie beispielsweise der Verwendung von Versatzmaterial zur Reduzierung der Festendimensionierung diskutiert.

Für die Darstellung und Volumenberechnung vorhandener Strecken und Abbaukammern im Untersuchungsgebiet wurden die auf die Grundrisse der einzelnen Sohlen projizierten Umrandungen der Aus- und Vorrichtung aus den originalen Autocad-Zeichnungen des Betriebes extrahiert. Die Daten wurden anschließend bereinigt, auf die reale Teufe eingehängt und mittels der Software SURPAC in ein 3D-Grubengebäude, bestehend aus geschlossenen Volumenkörpern, überführt (Abbildung 9.1). Dabei wurde pauschal eine Streckenhöhe von 4,5 m angenommen. Auch alle Abbaukammern wurden über die jeweiligen Sohlen verbunden und den entsprechenden Kristallsalzlager zugewiesen. Anschließend erfolgte eine Quantifizierung der gewonnenen Salzqualitäten, einerseits anhand der mittleren Zusammensetzung einzelner Kristallsalzlager bezogen auf das aufsummierte Kammervolumen und andererseits anhand einer Verschneidung der Abbaukammern mit den Ergebnissen der Blockmodellierung. Um die aktuelle Lagerstättennutzung zu bewerten, erfolgte anschließend ein Vergleich mit der Qualitätsverteilung des Kristallsalzes im gesamten Untersuchungsgebiet.

Weiterführend erfolgte die Auswahl eines Lagerstättenbereiches für eine exemplarische Planung von Abbaukammern im Schwadensalz. Die Umsetzung von drei verschiedenen Planungsvarianten in diesem Bereich geschah ebenfalls mit Hilfe der Planungssoftware SUR-

PAC unter Berücksichtigung der aktuellen Vorgaben zur Dimensionierung von Abbaukammern und Sicherheitspfeilern. Ein Ergebnisvergleich der Planungsvarianten fand abschließend anhand der Berechnung der Gesamttonnage und der benötigten Streckenmeter pro gewonnener Tonne statt.

9.2 Bewertung der Abbausituation

Innerhalb des Untersuchungsgebietes lag zum Zeitpunkt der Datenerhebung eine Dreiteilung in ein nördliches Gebiet, welches nahezu vollständig durchbaut ist, ein zentrales Gebiet, in dem die Vorrichtung zu großen Teilen abgeschlossen ist, und ein südliches Gebiet, das sich noch im Stadium der Vorerkundung und Ausrichtung befindet, vor (Abbildung 9.1). Während innerhalb der Hauptquerschläge (SO1 und SO2) die gesamte Zechsteinfohle durchörtert ist,

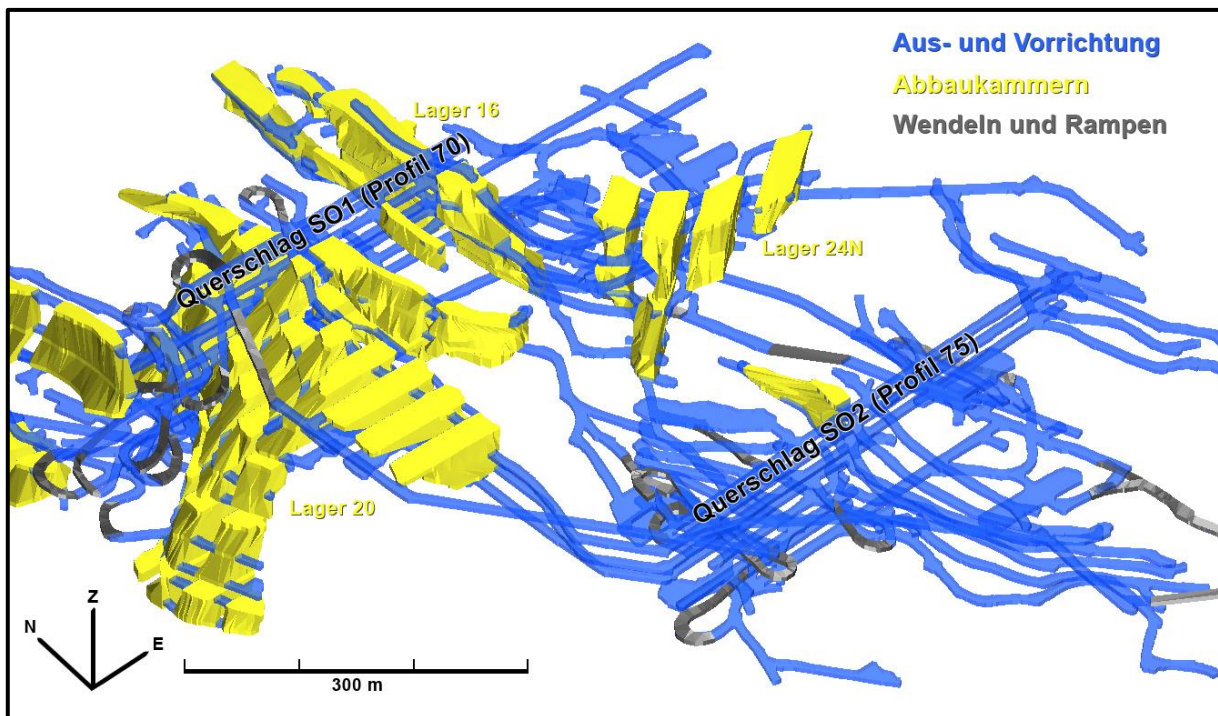


Abbildung 9.1: 3D-Modell des Grubengebäudes im Untersuchungsgebiet. Räumliche Darstellung: N = Nordpfeilrichtung, Z= Höhenachse, E = Ostrichtung (eigene Darstellung aus SURPAC-Modell).

sind die Wendeln vorwiegend auf Bereiche konzentriert, in denen das Schwadensalz in großer Mächtigkeit ansteht. Hier verlaufen auch N-S-Verbindungsstrecken. Auf tieferen Sohlen sind diese Strecken häufig in Form von Bandstrecken im Staßfurt-Steinsalz angelegt. Die Konzentration der Aus- und Vorrichtung auf diese beiden Steinsalzschieben liegt an der Nähe zu den Kristallsalzlagerstätten, vor allem aber an der Möglichkeit, das gelöste Steinsalz auf Grund seiner relativ wenigen Verunreinigungen dem Auftausalz beizumischen und somit zur Minimierung von anfallendem Sturzversatz zu sorgen. Dies trifft in besonderem Maße für das Schwadensalz zu. Zwischen Kristallsalz und Schwadensalz liegt in Normalausbildung das Schichtpaket aus Buntem Salz (z3NAf), Kristallsalzmittel (z3NAKRM) und Anhydritmittelsalz (z3NAG), das in Summe eine Normalmächtigkeit von bis zu 25 m einnimmt. Eine größere

Nähe zum Kristallsalz und ausreichend Platz zur Anlage von Wendeln ist entsprechend gegeben, jedoch sorgen die vorhandenen Anhydritmittel dafür, dass jedweder Streckenvortrieb als Sturzversatz gehandhabt werden muss. Die Fokussierung auf das Schwadensalz zur Realisierung wichtiger Infrastruktur ist also bei Einstufung dieses Steinsalzpaketes als Wertstoff mit Auftausalzqualität nicht im Sinne einer nachhaltigen Lagerstättennutzung. Die Anlage von Infrastruktur erschwert oder verhindert eine spätere Integration von Abbaukammern im Schwadensalz und macht große Mengen nicht weiter nutzbar. Grundsätzlich stellt sich jedoch die Frage nach dem Bedarf an zusätzlichen Mengen mit Auftausalzqualität. Der Auftausalzanteil an der Gesamtförderung lag innerhalb der letzten zehn Jahre bei 20 % bis 25 % in einem milden Winter und 50 % bis 60 % in einem intensiven Winter. Das entspricht Tonnagen von 130.000 bis 400.000 t/a (esco, 2016). Daraus kann über das Mittel von 10 Jahren ein Zielwert von 38,5 % Auftausalz an der Gesamtförderung von 650.000 t/a abgeleitet werden. Darauf basierend lässt sich die Aussage treffen, dass in einem betrachteten Lagerstättenbereich ausreichender Größe, in dem die Tätigkeiten des Versatzes, des Abbaus, der Vorrichtung und der Vorfelderkundung räumlich abgebildet sind, zwischen 30 und 40 % der Salzgewinnung aus Lagern mit Auftausalzqualität stattfinden muss.

Tabelle 9.1 zeigt unter Annahme einer Dichte von 2,2 t/m³ die Tonnage aller Abbaukammern und Strecken im Untersuchungsgebiet inklusive einer Zuordnung zu Normalsalz- bzw. Auftausalzqualität anhand der mittleren Qualität des jeweiligen Kristallsalzlagers. In die Betrachtung flossen auch die unmittelbar nördlich des Querschlags SO1, eigentlich außerhalb des Untersuchungsgebietes, gelegenen Abbaukammern ein. Im Ergebnis steht ein Anteil von Auftausalzqualität an der Gesamttonnage von nur rund 17 % (Tabelle 9.1). Diese Betrachtung vernachlässigt die aufgefahrenen Mengen an Nutzsatz aus der Aus- und Vorrichtung, gibt jedoch einen guten ersten Überblick. Im gesamten Untersuchungsgebiet wurden rund 3250 m im Schwadensalz und 4100 m im Staßfurt-Steinsalz und sonstigen z3-Steinsalzhorizonten aufgefahren. Bei einem mittleren Streckenquerschnitt von 26 m² bzw. einer Tonnage von 58 t pro Vortriebsmeter resultieren daraus rund 189.000 t Förderung aus dem Schwadensalz und 238.000 t aus dem Staßfurt-Steinsalz und sonstigen z3-Steinsalzeinheiten. Selbst unter der Annahme, dass die gesamte Nutzsatzmenge aus Aus- und Vorrichtung der Auftausalzqualität entspricht, ergibt sich ein Anteil von nur rund 23 % an der Gesamtförderung.

Tabelle 9.1: Tonnage aus Abbaukammern sowie Streckenvortrieb im Untersuchungsgebiet (eigene Berechnungen aus SURPAC-Modell) und jeweilige Qualitätseinordnung anhand der mittleren Lagerzusammensetzung (ATS=Auftausalz, NS=Normalsalz).

Lager	Tonnage [t]	NaCl [%]	CaSO ₄ [%]	MgSO ₄ [%]	KCl [%]	Qualität
Lager 8a	323088	97,64	2,01	0,17	0,07	ATS
Lager 8	350748	98,66	1,14	0,05	0,03	NS
Lager 14N	52406	98,30	1,18	0,32	0,16	ATS
Lager 16	938320	98,95	0,79	0,20	0,05	NS
Lager 21	136785	98,33	1,36	0,22	0,02	ATS
Lager 22	17417	98,32	1,14	0,38	0,17	ATS
Lager 24N	561554	98,75	0,90	0,29	0,06	NS
Lager 24S	61279	98,70	0,84	0,38	0,04	NS
Lager 20	2731720	98,83	0,75	0,27	0,12	NS
Lager 20a	420394	98,45	1,09	0,35	0,09	ATS
Summe ATS	950090	98,15	1,45	0,27	0,08	
Summe NS	4643621	98,83	0,81	0,24	0,09	
Gesamtsumme	5593711	98,71	0,92	0,25	0,09	
Aus Streckenvortrieb						
Schwadensalz	188790					ATS
Stäufurt-Steinsalz und sonstige z3-Salze	238148					-

Bei Betrachtung der Interpolationsergebnisse des Kristallsalzes und einer Unterteilung anhand des NaCl-Gehalts in Normalsalz, Auftausalz und Versatz liegt der Volumenanteil bei etwa 59,6 %, 25,8 % und 14,6 % (Abbildung 9.2). Innerhalb der im Untersuchungsgebiet gelegenen Abbaukammern hingegen lag das Verhältnis entsprechend einer Verschneidung mit dem Blockmodell bei etwa 71,6 % Normalsalz, 26,0 % Auftausalz und 1,2 % Versatz. Auch bei dieser Betrachtung ist die Förderung von Steinsalz in Auftausalzqualität relativ gering. Die Konsequenz ist, dass generell zu wenige Lager mit Steinsalz in Auftausalzqualität erschlossen werden. Die geforderten Auftausalzmengen werden bei Bedarf häufig durch Mischung von Kristallsalz in Normalsalzqualität mit schlechteren Qualitäten aus Aus- und Vorrückung und dem Schlechkornstrom der untertägigen optischen Sortieranlage erzielt. Die Bereitstellung der geforderten Auftausalzmengen findet in großem Maße durch die Degradierung von Kristallsalz in Normalsalzqualität statt. Eine zusätzliche Gewinnung von Steinsalz in Auftausalzqualität erscheint grundsätzlich sinnvoll und würde zur Schonung bzw. dem adäquateren Einsatz von hochqualitativem Kristallsalz beitragen.

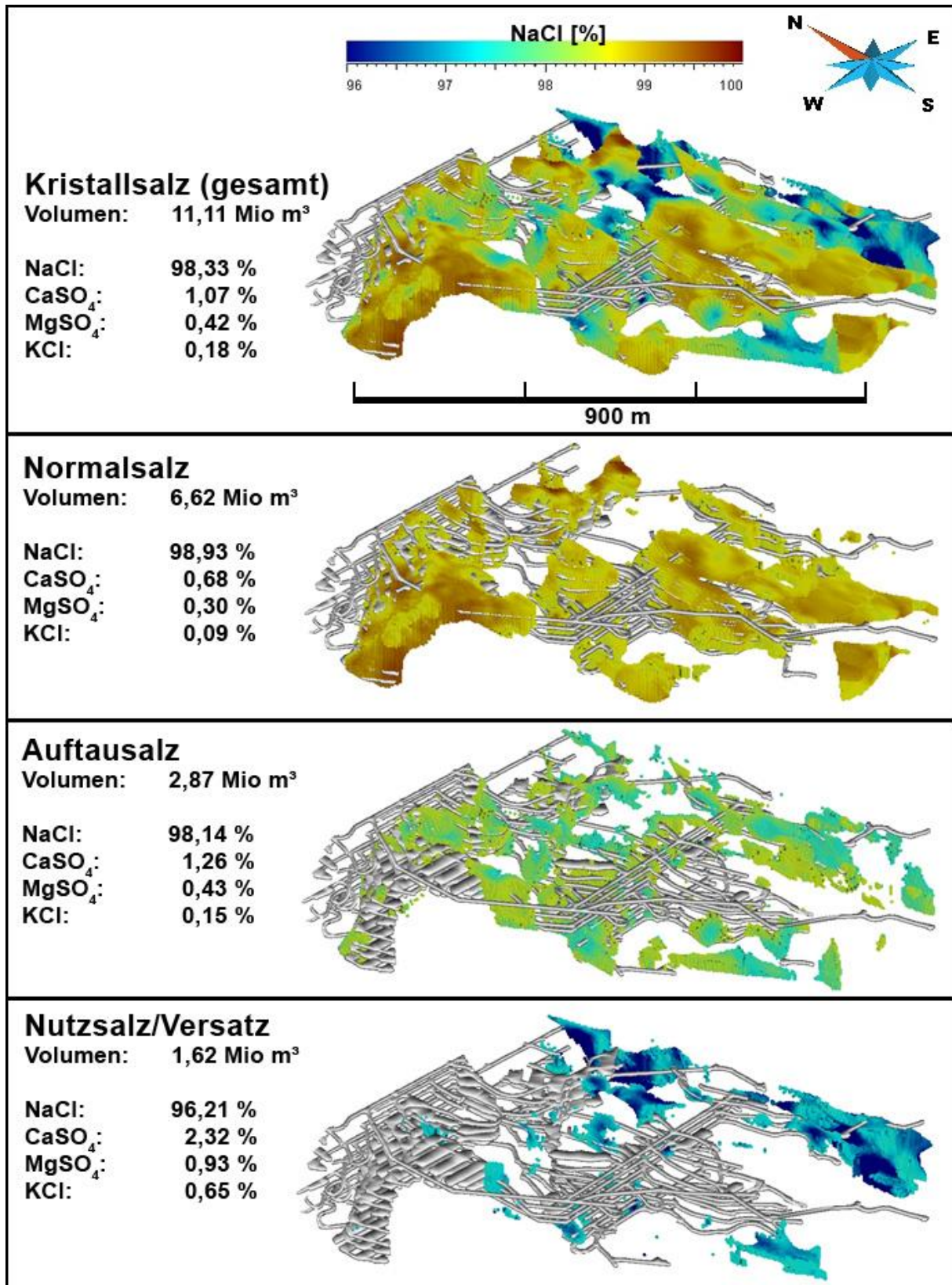


Abbildung 9.2: Volumina unterschiedlicher Rohsalzqualitäten aus der Blockmodellierung (n=173544 Blöcke = 11,11 Mio m³, detaillierte Input- und Outputdatenübersicht siehe Abbildung 5.6), Einteilung der jeweiligen Qualitätsklasse nur anhand des NaCl-Gehalts, konservative Berechnung ohne Integration randlicher Blöcke.

9.3 Exemplarische Abbauplanung im Schwadensalz

Für die Integration von Abbaukammern im Schwadensalz bietet sich innerhalb des Untersuchungsgebiets vor allem der Bereich südlich des Querschlags SO2 (Profil 75) innerhalb der breiten westlichen Muldenstruktur (SYNC 1/2) an (Abbildung 5.2). Lokal erreicht das Schwadensalz hier eine Mächtigkeit von bis zu 50 m, sodass die Integration von Abbaukammern problemlos möglich ist. Die Wechsellagerung von reinen und unreinen Bereichen ergibt zusammen im Mittel einen NaCl-Gehalt von 98,24 % (Median 98,66 %) anhand 205 analysierter Bohrkernmeter in diesem Bereich (Details siehe Kapitel 6.2.3). Eine Gewinnung des gesamten Lagers als Steinsalz mit Auftausalzqualität oder teilweise zur Nutzung als grobkörniges rosafarbenes Speisesalz ist möglich. Zwei Wendeln und eine N-S-Hauptverbindungsstrecke sind im Rahmen der Ausrichtung des südlichen Lagerstättenteils hier innerhalb des Schwadensalzes aufgefahren worden.

Grundsätzlich sollte die vorhandene Aus- und Vorrichtung und die Möglichkeit zur Gewinnung von Kristallsalz nicht beeinträchtigt werden. Entsprechend sollte die Abbauplanung zur Gewinnung von Schwadensalz untergeordnet, zeitlich nach der Planung und Umsetzung der Vorrichtung zur Gewinnung von Kristallsalzlager erfolgen. Das östlich angrenzende Lager 24 Süd ist bereits durch Lagerstrecken und Naherkundung erschlossen, sodass diese Voraussetzung hier erfüllt ist. Die breite Muldenstruktur läuft im Bereich des Profils 78 über die Feldgrenze in Richtung SW aus dem Bewilligungsfeld IV heraus, sodass die Durchführung einer Abbauplanung auf den Bereich zwischen den Profilen 75 und 78 begrenzt wurde.

Exemplarisch wurden drei verschiedene Abbauszenarien, nämlich eine querschlägige, eine streichende und eine kombinierte Anordnung der Kammern, geplant (Abbildung 9.3). Dabei wurden alle Randbedingungen analog zur Auffahrung und Dimensionierung von Kristallsalzkammern und entsprechenden Festen berücksichtigt. Für alle aufzufahrenden Strecken wurde mit einer Höhe von 4,5 m und einer Breite von 7 m gerechnet. Zu den vorhandenen Wendeln wurden Sicherheitspfeiler von 10 m eingehalten. Weiterhin wurde ein Abstand von mindestens 3 m zu der interpolierten Lagergrenze eingehalten, um das Risiko einer Verunreinigung durch Verdünnung mit dem liegenden Anhydritmittelsalz (z3NAG) oder dem hangenden Tonmittelsalz (z3NAT) zu minimieren. In allen Planungsszenarien wurde parallel zur östlichen Lagergrenze auf der 403 m-Sohle eine Ersatzstrecke als N-S-Verbindung eingeplant und zu dieser Strecke ein Abstand der Kammern von 10 m gewahrt. Die vormals vorhandene quer durch das Lager verlaufende Verbindungsstrecke fungiert in allen Szenarien entsprechend als Lagerstrecke auf der 403 m-Sohle. Grundsätzlich bietet sich bei der gegebenen Mächtigkeit ein querschlägiger Abbau an. Dieser wurde ausgehend

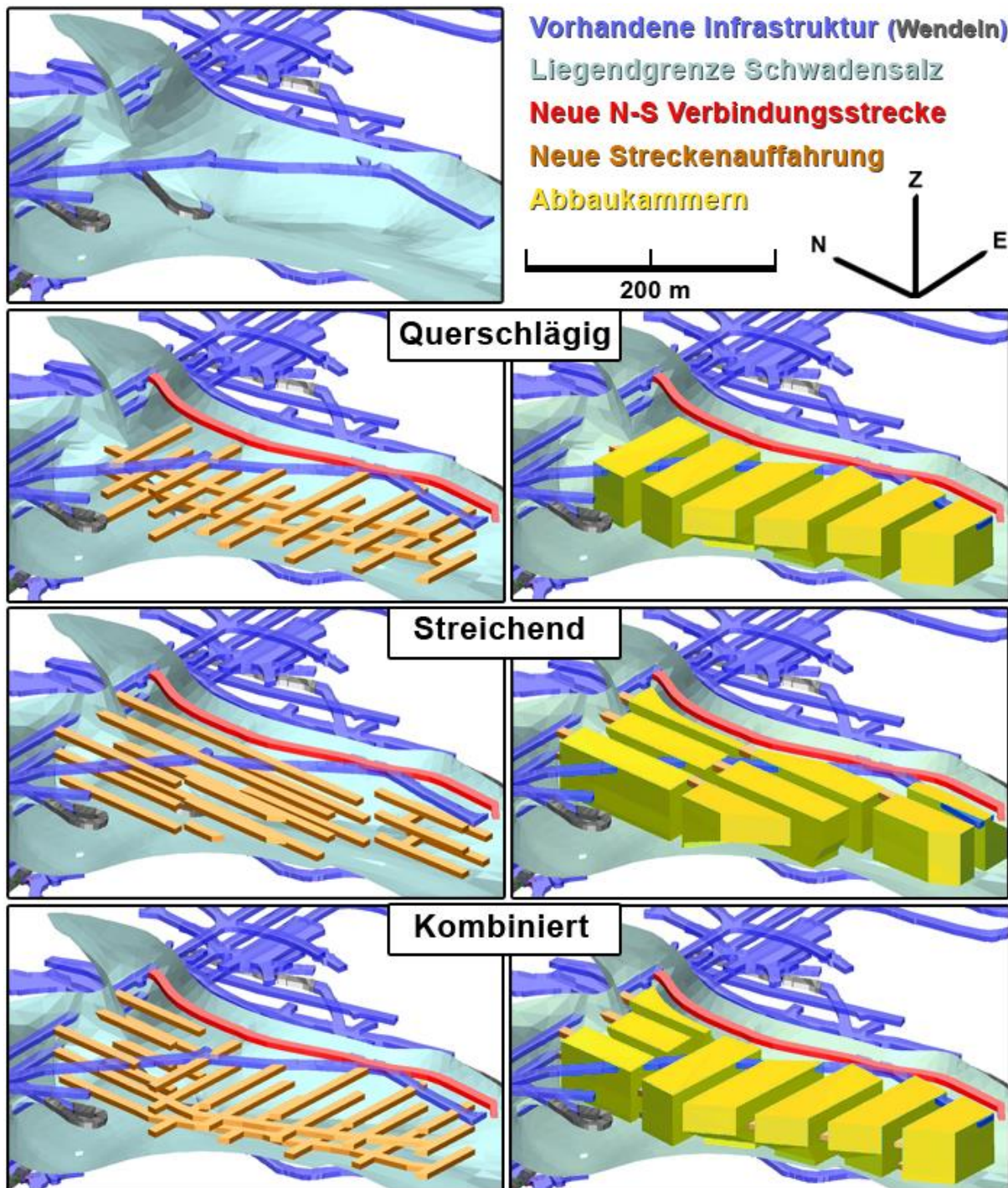


Abbildung 9.3: Szenarien der Abbauplanung von Schwadensalz südlich des Querschlags SO2 zwischen Profil 75 und 78. Räumliche Darstellung: N = Nordpfeilrichtung, Z= Höhenachse, E = Ostrichtung (eigene Darstellung aus SURPAC-Modell).

von dem südlichen Profil 78 nach Norden mit Kammerbreiten von 30 m geplant. Ein Auskeilen der Lagergrenze im Bereich des Querschlags SO2 in Richtung Süden führt jedoch zu einer relativ geringen Ausnutzung des Schwadensalzlagers. Durch die dort notwendige 15 m breite Feste kann hier keine siebte Kammer integriert werden. Um diesen geometrisch ungünstigen Bereich des Lagers besser zu erschließen, wurde alternativ vom Querschlag SO2 ausgehend die Planung streichender Abbaukammern mit einer Breite von 25 m vorgenommen. Als dritte Planungsvariante wurden, entsprechend der querschlägigen

Planung, von Süden ausgehend die ersten fünf Kammern übernommen und die sechste Kammer im Norden durch drei streichende Kammern ersetzt (kombinierte Planung).

Tabelle 9.2: Ergebnisvergleich der Abbauszenarien im Schwadensalz (eigene Berechnungen aus SURPAC-Modell, Ermittlung der Tonnage mittels einer Dichte von 2,2 t/m³).

	querschlägig	streichend	kombiniert
Abbaukammern			
kleinste Kammer [m ³]	60908	44132	32574
größte Kammer [m ³]	103634	103614	103634
mittleres Kammervolumen [m ³]	93083	74294	75556
Gesamtvolumen	558499	594354	604449
Kammerverbindungen			
403 m-Sohle [m]	0	88	44
403 m-Sohle [m ³]	0	2772	1384
421 m-Sohle [m]	110	121	134
421 m-Sohle [m ³]	3462	3807	4212
440 m-Sohle [m]	111	92	103
440 m-Sohle [m ³]	3484	2908	3253
Kammerverbindungen gesamt [m]	221	301	281
Kammerverbindungen gesamt [m ³]	6946	9487	8849
Zusätzliche Auffahrung			
N-S-Verbindungsstrecke [m]	299	299	299
N-S-Verbindungsstrecke [m ³]	9416	9416	9416
Gesamtvolumen [m³]	574861	613257	622714
Gesamttonnage [t]	1264694	1349165	1369971
Vorrichtung			
Vorrichtung gesamt [m]	1774	2218	2082
Vorrichtung gesamt [m ³]	55871	69881	65591
Vorrichtsungsanteil an Gesamttonnage [%]	9,88	11,57	10,69
Vorrichtsungsanteil an Gesamttonnage [m/kt]	1,43	1,67	1,54

Erwartungsgemäß erzielt der streichende Abbau durch die bessere Lagerausnutzung im nördlichen Bereich mit 1,35 Mio. t eine höhere Gesamttonnage als der querschlägige Abbau mit einer Gesamttonnage von nur 1,26 Mio. t (Tabelle 9.2). Die Anwendung einer Kombination beider Varianten resultiert in der höchsten Tonnage von 1,37 Mio. t. Gegenüber den beiden anderen Szenarien hat jedoch der querschlägige Abbau den Vorteil eines geringeren Vorrichtungsaufwandes, unter anderem, da von Querschlag SO₂ nach Süden nur jeweils eine statt drei Zufahrten pro Teilsohle aufgefahren werden muss. Auf der 403 m-Sohle entfällt außerdem ein Anschluss durch die Nutzbarkeit der ehemaligen N-S-Verbindungsstrecke. Es werden nur 1,43 m statt 1,67 m (streichend) bzw. 1,54 m (kombiniert) Vorrichtsungsstrecke pro gewonnene 1000 t Steinsalz benötigt, was einem Mehraufwand von 17,1 % bzw. 8,2 % entspricht. Als Vorrichtung wird in diesem Falle jede

Auffahrung, die dem Breitschießen und Wölben innerhalb einer Kammerstrecke vorrausgeht, gerechnet. Diesem Vorrichtungsmehraufwand steht eine Erhöhung der Gesamttonnage von 84 kt bzw. 6,7 % (streichend) und 105 kt bzw. 8,3 % (kombiniert) gegenüber.

9.4 Hinweise zur Verringerung von Abbauverlusten

Im Rahmen der Abbauplanung des Schwadensalzlagers konnte nicht nur die grundsätzliche Möglichkeit der Integration von Steinsalz niedrigerer Qualität in die Produktion aufgezeigt werden, sondern unter anderem auch die gute Nutzbarkeit der geologischen 3D-Modellierung als Grundlage für die Abbauplanung. Ein großer Vorteil gegenüber der vormaligen Planung anhand von horizontalem und vertikalem Risswerk entsteht allein schon durch die Visualisierung und Planungsmöglichkeit im dreidimensionalen Raum. Zusätzlich ist der Vergleich unterschiedlicher Szenarien hier relativ einfach durch eine automatisierte Volumenberechnung möglich.

Die Entscheidung, welches Planungsszenario jeweils zu wählen ist, hängt letztlich jedoch von der individuellen Situation ab. Grundsätzlich führt die Kombination von streichender und querschlägiger Gewinnung in Bereichen diskontinuierlicher Lagermächtigkeit und Verzweigungen in Streichrichtung zu dem größten Nutzungsgrad dieses spezifischen Lagers. Entsprechend wurde und wird diese Vorgehensweise in Braunschweig-Lüneburg auch vielerorts angewendet, um der Komplexität der Lagerstätte besser gerecht zu werden. Dieser positive Effekt konnte anhand der hier vorgenommenen exemplarischen Abbauplanung belegt werden.

Unabhängig davon muss immer die Voraussetzung der Wirtschaftlichkeit erfüllt sein. Es stellt sich die Frage, ab welchem Mehraufwand der Vorrichtung pro gewonnene Tonne ein Szenario mit geringerer Gesamttonnage gewählt werden sollte. Dies ist einerseits abhängig vom Anteil der Kosten für die Vorrichtung an den Gesamtkosten pro geförderter Tonne und andererseits vom Wert des geförderten Materials pro Tonne, welche im Deckungsbeitrag abgebildet werden. Ohne konkrete Kostenaufstellung ist hierüber kaum eine Aussage zu treffen. GERLING (1994) stellte am Beispiel des Weitungsbaus in steilstehenden Kalilagerstätten fest, dass die Kosten pro geförderter Tonne aus dem Streckenvortrieb in etwa um den Faktor drei höher sind als die Kosten pro geförderter Tonne aus den Strossen. Die Lade- und Förderkosten stellten je nach Länge des Förderwegs mit dem doppelten bis dreifachen der Kosten für das Strossen in der Regel den höchsten Kostenfaktor dar. Bei Übertragung dieser Annahmen würde der Kostenanteil der Vorrichtung bei einem Förderanteil aus der Vorrichtung von 10 % etwa 22 % bis 27 % der Gesamtkosten pro Tonne ausmachen. Einen maßgeblich größeren Einfluss als dieser Kostenanteil durch möglichen Mehraufwand in der Vorrichtung hat in diesem Fall der jeweils unterschiedliche Wert einer Tonne. Handelt es sich um ein hochreines Kristallsalzlager, das ausschließlich

Normalsalzqualität aufweist, ist der entsprechende Deckungsbeitrag maßgeblich höher, als bei einem Lager, aus dem nur Auftausalz gefördert werden kann. Hinzu kommen jedoch Aspekte der Kapazität und Auslastung der Betriebsmittel sowie die saisonabhängige Absetzbarkeit von Auftausalz. Die Auslastung der Betriebsmittel außerhalb der Auftausalzseason in Form von zusätzlicher Vorrichtung von Kammern mit Auftausalzqualität kann sich als gute Investition für einen besonders intensiven Winter herausstellen.

Kurzfristig mag die zusätzliche Produktion von Auftausalz aus Schwadensalzlagern mit höheren Kosten als das bisher angewendete Verfahren der Degradierung verbunden sein, vor allem, wenn dadurch weniger Nutzsatz aus der Streckenauffahrung aufgewertet werden kann. Langfristig würde die Produktion von Auftausalz aus Schwadensalzlagern jedoch dazu führen, dass in einem betrachteten Lagerstättenbereich mehr der geforderten Steinsalzmengen produziert werden könnten und sich der Abbau entsprechend langsamer vom Förderschacht weg bewegt. Basierend auf diesen vielfältigen Einflüssen, ist im Rahmen des aktuell angewendeten Abbauverfahrens grundsätzlich die Planung mit den geringsten Abbauverlusten, unabhängig von dem Anteil des Vorrichtungsaufwandes pro geförderte Tonne, zu wählen.

Weiterführend ist das angewendete Abbauverfahren dahingehend zu hinterfragen, dass alle Vorgaben zur Dimensionierung auf empirischen Erfahrungswerten beruhen und nie durch ein gebirgsmechanisches Gutachten bestätigt oder widerlegt wurden. Die einzuhaltende Grundfläche von 2500 m² kann entsprechend zu großen Abbauverlusten in Bereichen besonders hoher Mächtigkeit führen. Dies ist beispielsweise im querschlägigen Schwadensalz-Abbauszenario für die zwei nördlichen Kammern der Fall (Abbildung 9.3). Solche besonders breiten Abbausituationen sind im Kristallsalz eher selten der Fall. Dennoch sollte der Maximalwert der Grundfläche und auch die Beschränkung der Kammerbreite auf 30 m im querschlägigen Abbau hinterfragt werden. Nicht selten sind Abbauverluste durch die einzuplanenden Festen im Randbereich einzelner Lager im querschlägigen Abbau zu verzeichnen. So führt die Einhaltung einer Feste von 12 m oder sogar 15 m im Randbereich unter Umständen dazu, dass gar keine Kammer mehr in diesem Bereich geplant wird, obwohl noch 25 m Steinsalz anstehen. Zumeist nimmt die Mächtigkeit in Richtung dieser Randbereiche ab, sodass die äußerste Kammer ohnehin nur noch die Hälfte oder weniger der Längserstreckung der vorherigen Abbaukammer aufweist. An dieser Stelle ist zu prüfen, ob eine Feste von 10 m wie im streichenden Abbau hier ausreicht, sodass eine Gewinnung einer 15 m breiten Kammer möglich wäre. Bei einer Kammerlänge von 40 m könnte so eine zusätzliche Tonnage von rund 55.500 t erzielt werden.

Eine Minimierung von Abbauverlusten an den Rändern einzelner Lager ließe sich nur durch Einbringen von stabilisierendem Versatzmaterial erzielen. Hier gilt es zu prüfen, ob und wie weit sich die Breite der Feste dadurch reduzieren ließe. Als Konsequenz müsste die außenstehende Kammer zuerst versetzt werden, bevor die benachbarte Kammer gestrosst wird. Bisweilen wird der anfallende Puder als Abfallprodukt versetzt. Allein dieser Puder könnte ohne spätere Kompaktion nicht die erforderliche stabilisierende Wirkung erzielen. Vermischt mit anfallendem Sturzversatz aus der Aus- und Vorrichtung (Hauptanhydrit und Nicht-Nutzsalz) könnten jedoch regelmäßig kleine Hohlräume verfüllt und ausreichend stabilisiert werden. In dem Beispielsfall einer 40 m langen Kammer würde dies bei Einhaltung einer 5 m Feste eine Mehrförderung von 18.500 t zusätzlich zu den 55.500 t führen, bei einem durch Versatzmaterial zu füllenden Hohlraum von 33.600 m³. Dieses Hohlraumvolumen entspricht einer Streckenauffahrung von ca. 1.260 m Länge, die entweder im Hauptanhydrit oder Nicht-Nutzsalz aufgefahren werden müssten, um ausreichend Versatzmaterial zu erhalten. Mit solchen Sturzversatzmengen ist generell nicht zu rechnen. Im gesamten Untersuchungsgebiet waren zum Zeitpunkt der Datenaufnahme 1.170 m im Hauptanhydrit, 3.250 m im Schwadensalz und 4.100 m im Staßfurt-Steinsalz und sonstigen z3-Salzen aufgefahren. Nur ein Bruchteil dieser Steinsalzmengen wurde neben dem Hauptanhydrit als Sturzmasse versetzt. Des Weiteren fällt dieser Sturzversatz an räumlich weit voneinander entfernten Punkten innerhalb des Grubengebäudes und zu unterschiedlichen Zeiten an, sodass generell nicht mit Mengen zu rechnen ist, die zum Zeitpunkt des Abbaus für die Füllung und Stabilisierung einer ganzen Abbaukammer ausreichen. Anders wäre die Situation jedoch, wenn mehr Infrastruktur außerhalb des Schwadensalzes, nämlich in dem Schichtpaket zwischen Kristallsalz und Schwadensalz angelegt würde um dieses für einen möglichen Abbau bereit zu halten. Entsprechend würde mehr Sturzversatz während der Vorrichtung anfallen, der zur Erhöhung der Lagerausnutzung in den auskeilenden Randbereichen eines benachbarten, im Abbau befindlichen Kristallsalzlagers genutzt werden könnte.

Diskussionsbedarf herrscht auch bezüglich des intern festgelegten Sicherheitspfeilers von 10 m in Richtung Hauptanhydrit im Falle einer festgestellten großen Klufthäufigkeit (ZEIBIG und BECKER, 2002). Erstens ist dieser Abstand bei Auffahrung einer Lagerstrecke parallel zur Lagergrenze gar nicht einzuhalten, da die Bohrlafette im Streckenvortrieb nur 7 m lang ist und schräg angesetzt wird. Zweitens ist in der Regel durch Erkundungs- und Mächtigkeitsbohrungen bereits belegt, dass keine Gas- oder Lösungsvorkommen in diesem Bereich zu erwarten sind. Die Planung einer Anbaubank zum Hauptanhydrit ist jedoch insofern zweckmäßig, dass das Risiko einer Verunreinigung durch Zuschnitt von Anhydrit minimiert wird. Außerdem wird der teilweise mehrere Meter mächtige, rötlich gefärbte sulfatische Saum (z3NAKL), der vor allem auf Grund seiner Färbung nicht der

Normalsalzqualität entspricht, nicht angeschnitten. Es stellt sich jedoch weiterhin die Frage, ob eine Anbaubank von 5 m in diesem Fall ausreicht, um einerseits die Lagerstätte möglichst gut auszunutzen, andererseits eine hohe Qualität zu gewährleisten und nicht zuletzt ausreichende sicherheitliche Randbedingungen zu schaffen.

Neben der Grundfläche und der Festenbreite ist gleichermaßen auch die maximale Kammerhöhe zu hinterfragen. Generell sind in Braunschweig-Lüneburg keine sichtbaren Konvergenzen zu beobachten. Die Abbauteufen sind mit 400 m bis 600 m relativ gering. Der Puderversatz hat zwar beim Einbringen noch keine stabilisierende Wirkung, wird jedoch auf Dauer durch Setzung und einsetzende Rekristallisation eine festere Konsistenz entwickeln. Die Lagerstättengeometrie ist derartiger Gestalt, dass Kammern durch die häufig halbsteile Lagerung horizontal stark versetzt übereinander liegen und das nächste Lager meist erst in über hundert Metern Entfernung innerhalb des nächsten Muldenschenkels vorliegt. In vielen Fällen liegen sogar unter und über einzelnen Kammern keine weiteren Kammern. All diese Argumente sind Motivatoren dafür, durch ein neues gebirgsmechanisches Gutachten belastbare Aussagen bezüglich der Kammer- und Festendimensionierung zu erhalten und möglicherweise darauf basierend neue Konzepte zu entwickeln.

Ein nicht geringer Teil des Kristallsalzes in Normalsalzqualität entspricht zwar den zulässigen Grenzwerten der chemischen Zusammensetzung, wird jedoch auf Grund farblicher Verunreinigungen in Form von sichtbaren Anhydritkörnern oder ganzer Anhydritbruchstücke als nicht für die Normalsalznutzung geeignet eingestuft. Dieses Salz wird grundsätzlich mit minderqualitativem Steinsalz aus der Aus- und Vorrichtung zur Herstellung von Auftausalz etwa im Verhältnis zwei zu eins vermischt. Ein Durchlaufen der untertägigen optischen Sortierung könnte diese Degradierung zur Herstellung von Auftausalz zu einem gewissen Maße vermeiden. Die Anlage wird momentan jedoch nur mit Kristallsalz in farblich anstandsloser Normalsalzqualität beschickt und kann auf Grund von Kapazitätsbeschränkungen auch diesen Massenstrom nicht vollständig abdecken. Entsprechend wäre eine Kapazitätserhöhung oder sogar die Installation einer zweiten optischen Sortieranlage sinnvoll. Diese könnte, programmiert auf eine andere Aufgabe, nämlich Schwadensalz oder farblich gestörtes Kristallsalz in Normalsalzqualität, zur Optimierung der Auftausalzproduktion beitragen.

9.5 Schlussfolgerungen

Eine Verbesserung der Lagerstättennutzung im Kontext eines Gleichgewichtes zwischen Nachfrage und Gewinnung der unterschiedlichen Salzqualitäten ist vor allem durch eine Erhöhung der Förderung aus Lagern in Auftausalzqualität möglich. Die Gewinnung von Schwadensalz als Auftausalz würde automatisch zur Verringerung der degradierten Kristallsalzmengen, welche eigentlich Normalsalzqualität aufweisen, führen. Eine gezielte Gewinnung der jeweiligen Salzqualitäten und damit einhergehende Verringerung von Mischvorgängen und Degradation hochqualitativer Rohsalze kann vor allem durch die Nutzung von 3D-Modellen als Grundlage für eine Abbauplanung im 3D-Raum erzielt werden.

10 Zusammenfassung

Das Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg produziert seit über 100 Jahren innerhalb der Salzstruktur Oberes Allertal. Seit 1923 erfolgte die Gewinnung zunächst ausschließlich auf dem Kristallsalz (z3NAKR) der Zechstein-Leine-Folge. Neben Steinsalz in sogenannter Normalsalzqualität als Grundlage für hochqualitative Produkte wird auch Auftausalz gefördert, an welches weitaus geringere Qualitätsanforderungen gestellt werden: für dieses ist nur ein Mindestgehalt von 97,5 % statt 98,5 % NaCl einzuhalten. Das Kristallsalz ist – wie die gesamte Salzstruktur – stark deformiert und unterliegt nicht unerheblichen Qualitätsschwankungen, vor allem in Form eines erhöhten Vorkommens sulfatischer Begleitminerale wie Anhydrit. Aus diesem Sachverhalt ergab sich die Forschungsfrage, ob bisher unbekannte räumliche Abhängigkeiten der Wertstoffverteilung vorhanden sind, deren Kenntnis und Berücksichtigung zu einem besseren Verständnis von Struktur und Genese und somit auch zu einer effizienteren Nutzung der Lagerstätte führen (siehe Kapitel 1.2).

Um diese Frage zu beantworten wurde im südlichen Bewilligungsfeld IV des Bergwerks Braunschweig-Lüneburg ein über 12 Teilsohlen erschlossenes (ca. 180 m Höhendifferenz) Untersuchungsgebiet von etwa 500.000 m² für die Erstellung eines geologischen 3D-Modells ausgewählt. Als relevante Schichtgrenzen bzw. Horizonte für das geometrische Modell wurden Salzbasis, Salzspiegel, Staßfurt-Steinsalz (z2NA), Hauptanhydrit (z3AN), Kristallsalz (z3NAKR) und Schwadensalz (z3NAh) bestimmt. Das für die Strukturbildung ebenfalls wichtige Kaliflöz Staßfurt (z2KSt) ist in weiten Bereichen auf Grund der geringen Mächtigkeit von nur 1 bis 2 m nicht auflösbar. Als Eingangsdaten wurden hauptsächlich Informationen aus den 414 untertägigen Kernbohrungen und Streckenkartierungen genutzt. Die Komplexität der Strukturen machte die Nutzung von Interpretationsdaten (Profilschnitte, Grundrisse) unerlässlich. Auf Grund der größeren Nähe zueinander und der höheren Aufschlussdichte entlang der Grundrisse wurden diese zur Erstellung von Initialflächen genutzt und in einem iterativen Prozess immer wieder mit den harten Aufschlussdaten abgeglichen. Dieser explizite Modellierungsansatz resultierte in einzelnen Schichtgrenzflächen, die jeden harten Aufschlusspunkt unter Anwendung einer Interpolationsmethode, welche die Rauigkeit der Fläche minimiert, beinhalten. Folgende Sachverhalte wurden anhand der erzeugten 3D-Schichtgrenzflächen bezüglich der Geometrie der Lagerstätte beobachtet:

- Die Hauptstrukturelemente im Untersuchungsgebiet sind vier Staßfurt-Steinsalz-Sattelstrukturen, die sich in Richtung Süden in mehrere, teils von ihrer Basis abgequetschte Sattelstrukturen verzweigen.
- Insgesamt sind acht Sattelstrukturen und neun Muldenstrukturen vorhanden, die vorwiegend NNW-SSE, im Norden teilweise auch N-S und NNE-SSW streichen.

- Die Verzweigungen der Faltenstrukturen liegen im Einflussbereich einer WNW-ESE streichenden Störung, die entlang der Salzbasis identifiziert wurde. Auf diese laufen etwa N-S verlaufende Querverbindungen zu.
- Im Norden sind die Sattelstrukturen durch Hauptanhydritblöcke von Westen her eingeengt, teilweise auch abgequetscht. Im zentralen und südlichen Bereich in Nähe der subsalinaren Störung verkomplizieren Überschiebungs- und Rotationsbewegungen der Hauptanhydritblöcke das Erscheinungsbild.
- Der Verlauf der Muldenstrukturen ist grundsätzlich eng an den Verlauf der begrenzenden Sattelstrukturen geknüpft.
- Die Vergenz der Sattel- und Muldenstrukturen ändert sich von östlich im Westen nach westlich im Osten. Der Öffnungswinkel der Muldenstrukturen ist teils positiv, teils negativ, im Osten stets negativ.
- Der Hauptanhydrit weist eine sehr unregelmäßige Oberfläche und große Mächtigkeitsschwankungen auf. Eine Vielzahl sogenannter Klippenstrukturen prägt das Erscheinungsbild maßgeblich, im Nordwesten des Untersuchungsgebietes weniger als im zentralen und südöstlichen Teil.
- Die Klippenstrukturen ragen teils in Form von pilzartigen Diapirstrukturen weit in das hangende Kristallsalz. Dieses verläuft mancherorts in tief eingeschnittenen, canyonartigen, undulierenden Einkerbungen inmitten des Hauptanhydrits.
- Der Hauptanhydrit nimmt Richtung Südosten grundsätzlich immer mehr Raum innerhalb der Muldenstrukturen ein.
- Der nordöstliche Salzrand der Allertalstruktur ist relativ unruhig gestaltet und spiegelt die partielle Umgestaltung durch subrosionsbedingte Einbuchtungen gut wider. Eine weitestgehend tektonische Entkopplung des Liegenden und Hangenden durch das Zechsteinsalinar, wie u.a. von BEST und ZIRNGAST (2002) beschrieben, ist auch im Untersuchungsgebiet grundsätzlich anzunehmen.

Die Ergebnisse führten zur Klassifizierung von drei unterschiedlichen Geometrietypen der Muldenstrukturen. Sie umfassen die Normalabfolge (Typ 1), Staßfurt-Steinsalz im Zentrum einer synklinalen Großstruktur durch Abquetschen eines Primärsattels (Typ 2) und Staßfurt-Steinsalz im Zentrum einer synklinalen Großstruktur durch eine Tauchfalte (Typ 3).

Die Auswertung von über 15.000 stratigraphisch zugewiesenen Analysedaten erfolgte zuerst in einem Vergleich der Steinsalzhorizonte, Staßfurt-Steinsalz, Kristallsalz und Schwadensalz und anschließend räumlich dezidiert für die jeweiligen Salzhorizonte. Die anhand von ICP-OES-Messungen errechneten Kenngrößen NaCl, KCl, CaSO₄ und MgSO₄ zeichnen bezüglich der jeweiligen Gesamtstatistik der Vergleichshorizonte ein sehr unterschiedliches Bild der Zusammensetzung. So sind Kristallsalz und Schwadensalz im Gegensatz zum Staßfurt-Steinsalz bezüglich des NaCl- und CaSO₄-Gehalts im Bereich der Produktfähigkeit

(> 97,5 % NaCl; < 2,0 % CaSO₄). Jedoch ist überraschenderweise der KCl-Gehalt jeweils weitaus höher als der des Staßfurt-Steinsalzes und unterliegt sehr großen Schwankungsbreiten. Ebenfalls sehr großen Schwankungsbreiten unterliegt der MgSO₄-Gehalt in beiden stratigraphischen Einheiten, jedoch in besonderem Maße im Kristallsalz. Auf Grund der Wechsellagerung innerhalb des Schwadensalzes sind große Schwankungen innerhalb dieses Horizontes gut nachvollziehbar. Die große Varianz des KCl- und MgSO₄-Gehalts im Kristallsalz hingegen deutet auf bisher unbekannte räumliche Abhängigkeiten und unterschiedliche Ausbildungstypen hin.

Tatsächlich sind räumliche Unterschiede in allen drei betrachteten Steinsalzhorizonten zu verzeichnen. Das Staßfurt-Steinsalz wurde in drei tektonisch unterschiedlich beanspruchten Bereichen beprobt. In der sehr breiten östlichen Sattelstruktur parallel zum Salzrand (ANT4) sind generell hohe CaSO₄- und sehr geringe MgSO₄- und KCl-Gehalte zu beobachten. In unregelmäßigen Abständen sind vereinzelt reinere Abschnitte mit geringeren CaSO₄-Gehalten vorhanden. In Richtung Salzrand ist teilweise eine Homogenisierung und ein leichter Anstieg des NaCl-Gehalts zu beobachten. In der stark eingeeengten westlichen Sattelstruktur (ANT1) ist der CaSO₄-Gehalt konstant niedrig, KCl- und MgSO₄-Gehalt jedoch sind signifikant erhöht und nehmen zu den Flanken in Richtung Kaliflöz Staßfurt weiter zu. Nur im Sattelzentrum ist ein etwa 4 m breiter Bereich mit relativ niedrigem MgSO₄-Gehalt zu verzeichnen. In einem weiteren Aufschluss nahe der Salzbasis sind generell höhere MgSO₄-Gehalte als in der östlichen Sattelstruktur zu beobachten.

Die über 14.000 Analysen innerhalb des Kristallsalzes bieten eine hervorragende Basis für die räumliche Auswertung von Unterschieden in der Zusammensetzung. Diese Auswertung erfolgte auf drei unterschiedlichen Ebenen. Zuerst wurden lokale Phänomene, die meist durch Ausreißer widerspiegelt werden, und repräsentativ ausgewählte Abbaubereiche entlang einzelner Bohrspuren betrachtet, die eine typische Zusammensetzung des Kristallsalzes und dessen Varianz widerspiegeln. Anschließend wurden alle Beprobungsabschnitte den jeweiligen Lagern zugewiesen und diese als zusammenhängende Bereiche miteinander verglichen. In einem dritten Schritt wurden entlang von Profilen und Grundrissen die Interpolationsergebnisse einer Blockmodellierung ausgewertet.

Diese Auswertungen zeigten, dass in Annäherung an Anhydritklippenstrukturen generell eine Zunahme des CaSO₄-Gehalts zu beobachten ist, meist bis auf 1,5 % teilweise auch bis 3 %. Leicht erhöhte CaSO₄-Gehalte sind zum Teil noch bis in 50 m Entfernung zu beobachten. Davon unabhängig sind KCl- und MgSO₄-Gehalt. Diese unterliegen innerhalb einzelner Lager relativ geringen Schwankungen, ausgenommen die Lager 23 und 28 in der östlichen Muldenstruktur (SYNC3/SYNC3a). Dort sind beide Komponenten sehr stark erhöht und unterliegen hohen Schwankungsbreiten. Eine leichte Erhöhung des KCl- und MgSO₄-Gehalts

ist weiterhin häufig in der Nähe des Kaliflözes Staßfurt im Kontaktbereich der Staßfurt-Steinsalz-Sattelstrukturen zu beobachten. Parallel sind hier meist sehr niedrige CaSO_4 -Gehalte zu verzeichnen, die mit der Entfernung von der Sattelstruktur leicht ansteigen. Bezüglich des MgSO_4 -Gehalts ist generell eine leichte Erhöhung von Werten um 0,3 % im Norden auf Werte um 0,4 % im Süden zu beobachten.

Auch für das Schwadensalz konnten, wie für das Staßfurt-Steinsalz, in drei unterschiedlichen Bereichen Proben ausgewertet werden. Generell wurde festgestellt, dass unabhängig von der Wechsellagerung der reinen Bereiche mit den unreinen Schwadenzonen ein Anstieg des KCl-Gehalts in Richtung Liegendgrenze zu beobachten ist. Im Vergleich zu den zwei sehr mächtigen Muldenstrukturen im Westen (SYNC1 bzw. SYNC1/2) ist in der stark eingeeengten östlichen Muldenstruktur (SYNC3b) eine relative Erhöhung des CaSO_4 -Gehalts zu verzeichnen. Im Gegensatz zu den östlich gelegenen Kristallsalzlager sind jedoch MgSO_4 - und KCl-Gehalt hier nicht signifikant erhöht.

Auf Grund der ökonomischen Relevanz und der für eine hohe Aussagekraft sorgenden Vielzahl an Proben wurde weiterführend nur das Kristallsalz in einem neu entwickelten Ansatz hinsichtlich räumlicher Abhängigkeiten und entsprechender möglicher Geneseprozesse analysiert. Für die Typisierung unterschiedlicher Kristallsalzlager wurden hierfür zunächst geeignete Indikatoren für unterschiedliche Eigenschaften definiert. Betrachtet wurden bestimmte Qualitätsparameter (Bestandteile, Farbe und Korngröße), Quantitätsparameter (Mächtigkeit und dessen Schwankungen), faltengeometrische Aspekte (Muldenbreite, Vergenz und Öffnungswinkel) und sonstige Merkmale (Geometrietyp, Klippeneinfluss und sulfatischer Saum). Für die jeweiligen Vergleichsgrößen wurden Klassen gebildet und die jeweiligen Kristallsalzlager zugewiesen.

Anhand von Streudiagrammen der einzelnen Komponenten wurden insgesamt vier Typklassen unterschiedlicher geochemischer Zusammensetzung innerhalb des Kristallsalzes identifiziert. Als Unterscheidungskriterium wurden der Gesamtsulfatgehalt sowie der Anteil von MgSO_4 am Gesamtsulfatgehalt genutzt. Neben den Klassen mit besonders niedrigem (< 1,0 %, Typ 1) und besonders hohem Gesamtsulfatanteil (> 1,6 %, Typ 4) wurden zwei Zwischenklassen mit weniger (Typ 2) oder mehr (Typ 3) als 30 % MgSO_4 -Anteil am Gesamtsulfat (1,0 % bis 1,6 %) unterschieden. Die Homogenität der Zusammensetzung wurde anhand der Standardabweichung des NaCl-Gehalts bewertet. Farbe und Körnung wurden aus Bohrkernaufnahmeprotokollen adaptiert. Die Mächtigkeit und deren Schwankungen wurde einerseits aus den direkten Bohrergebnissen und andererseits aus Messungen der Modellierungsergebnisse bestimmt. Auch die faltengeometrischen Aspekte wurden je Mulde über Distanzmessungen auf unterschiedlichen Sohlenniveaus bzw. entlang der Profilschnitte aus den Modellierungsergebnissen abgeleitet. Einzelne Vergleichsgrößen wie die Stärke eines Klippeneinflusses konnten nur subjektiv eingeschätzt werden.

Die Auswertung der vergleichenden Ergebnismatrix lieferte folgende Erkenntnisse:

- Kristallsalzlager mit einer besonders hohen Qualität (Typ 1) weisen tendenziell eine gröbere Korngröße auf.
- Diese Lager sind in ihrer Mächtigkeit erhöht und unterliegen nur geringen bis mäßigen Mächtigkeitsschwankungen.
- Sie sind stets an die Ostschenkel von breiten Muldenstrukturen gebunden, deren Öffnungswinkel meist positiv ist und deren Schenkel in ihrer Mächtigkeit meist asymmetrisch ausgebildet sind.
- Der Einfluss von Klippenstrukturen des Hauptanhydrits ist in diesen Bereichen mäßig bis stark.
- Teilweise sind diese Lager durch eingeeengte oder abgequetschte Staßfurt-Steinsalz-Sattelstrukturen beeinflusst.
- Kristallsalzlager mit einer besonders schlechten Qualität (Typ 4) gehen mit einer eher feinen Körnung einher, sind sehr heterogen ausgebildet und weisen eine Vielzahl farblicher Verunreinigungen auf.
- Die Lager sind normalmächtig ausgebildet mit mäßigen bis starken Mächtigkeitsschwankungen.
- Sie sind stets auf die Ostschenkel besonders schmaler Muldenstrukturen beschränkt, die einen negativen Öffnungswinkel aufweisen.
- Der Einfluss von Klippenstrukturen des Hauptanhydrits erscheint in diesen Bereichen besonders stark.
- Diese Lager sind beschränkt auf die östliche, parallel zum Salzrand verlaufende Muldenstruktur, welche im Süden durch eine Staßfurt-Steinsalz-Tauchfalte stark beeinflusst ist.
- Kristallsalzlager des Typs 2 beschränken sich auf den nördlichen und zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes.
- Sie weisen im Vergleich zu dem Typ 3 (erhöhter MgSO_4 -Gehalt) eine etwas gröbere Körnung auf.
- Kristallsalzlager des Typs 3 sind gebunden an den südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes, wo sich im Einflussbereich der subsalinaren Störung die Streichrichtung von N-S nach NNW-SSE ändert.
- Die dortigen Muldenstrukturen sind ausschließlich westvergent gerichtet.
- Sowohl Ausbildungstyp 2 als auch Typ 3 können ansonsten in allen möglichen Konstellationen bezüglich der Mächtigkeit, der Faltengeometrie als auch des Klippeneinflusses vorliegen.

Anhand dieser Erkenntnisse wurden die folgenden maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Qualität des Kristallsalzes diskutiert:

- das Vorhandensein und die Nähe zu Anhydritklippen,
- die Nähe zu dem östlichen Salzrand,
- die Nähe zu (abgequetschten) Sattelstrukturen,
- die Nähe zu der subsalinaren Störung.

Die bereits von HEMMANN (1968) in Bernburg beschriebenen nur mikroskopisch erkennbaren, dispers verteilten Anhydritminerale im weiteren Umfeld einer Anhydritklippe konnten grundsätzlich auch für Braunschweig-Lüneburg bestätigt werden. Diese sind, genau wie die bereits von SCHACHL (1991) beschriebenen Anhydritbänke, -brocken und -arme im Klippenumfeld, auf den synsedimentären Prozess des Gipsdiapirismus wie von HORN et al. (2016) beschrieben zurückzuführen.

Neben diesen negativen Auswirkungen auf die Qualität des Kristallsalzes durch die Anhydritklippenbildung konnte auch ein positiver Effekt beobachtet werden. So waren während der kretazischen Kompression lokal besondere Druckschattenpositionen im Einflussbereich von Klippenstrukturen gegeben, sodass es dort vermutlich zum sekundären Wachstum grobspätiger Halitkristalle und der relativen Anreicherung von NaCl durch die Migration NaCl-gesättigter Lösungen kam.

Die stärksten Deformationserscheinungen und Änderungen der Zusammensetzung des Kristallsalzes im Untersuchungsgebiet sind in der östlichsten Muldenstruktur nahe dem Salzrand zu verzeichnen. Es sind sowohl CaSO_4 - als auch MgSO_4 - und KCl-Gehalt signifikant erhöht, was auf eine starke, mehrphasige Veränderung der Zusammensetzung hindeutet. Demnach ist es in diesem Bereich vermutlich erst zur relativen Anreicherung von CaSO_4 durch Migration von ungesättigten Lösungen und der Lösung sowie dem Abtransport von NaCl während einer frühen Deformationsphase gekommen. In einer späteren Phase, vermutlich der kretazischen Kompression, kam es dann zur Anreicherung an MgSO_4 und KCl. Hierfür müssen zu diesem Zeitpunkt nahe dem östlichen Salzrand große Mengen an Fluiden und darin gelösten Kali- und Magnesiumsalzen vorhanden gewesen sein.

Der Einfluss der eingeeengten, teils abgequetschten Staßfurt-Steinsalz-Sattelstrukturen auf das Kristallsalz ist vor allem durch das dazwischenliegende Kaliflöz Staßfurt geprägt. Im Kontaktbereich zu diesem ist häufig eine sukzessive Zunahme von MgSO_4 und KCl und damit einhergehende relative Abnahme des CaSO_4 -Gehalts zu beobachten. Von HORN (2016) dokumentierte Drucklösungserscheinungen im näheren Umfeld deuten auf das ausreichende Vorhandensein von Fluiden, vermutlich ausgehend vom Kaliflöz Staßfurt, hin.

Die subsalinare Störung stellt in vielerlei Hinsicht einen wichtigen Einflussfaktor auf die Qualität des Kristallsalzes dar. Sie hatte während der verschiedenen Deformationsphasen auch unterschiedliche Auswirkungen auf den hangenden Salzkörper und dessen interne Deformationsstrukturen. Neben den beobachteten Änderungen der Faltengeometrie bezüglich Streichrichtung und Vergenz ist auch eine mineralogische Veränderung in Form einer generellen Erhöhung Mg-haltiger Minerale im Einflussbereich der Störung zu verzeichnen. Komplizierte Rotations- und Überschiebungsstrukturen von Hauptanhydritblöcken im Hangenden der Störung sind Zeugen einer starken Beeinflussung des lokalen Spannungsfeldes. Rückschlüsse auf Druckschattenbereiche wie im Norden des Untersuchungsgebietes lassen sich hier nicht ziehen.

Für das Verständnis des Gesamtsystems der Salzstruktur spielt das Staßfurt-Steinsalz als sehr mobiles und maßgeblich strukturbildendes Element eine Schlüsselrolle. Entsprechend wertvoll sind die Ergebnisse zahlreicher Studien zu makro- und mikroskopischen Untersuchungen des Staßfurt-Steinsalzes in Morsleben, unter anderem von KÜSTER (2011) und KNEUKER et al. (2014). Demnach sind vor allem im Hangenden des Staßfurt-Steinsalzes, also in der Nähe des Kaliflözes Staßfurt, viele Fluideinschlüsse zu beobachten. Dort ist ein Wassergehalt von einem Gewichtsprozent zu verzeichnen. Anhand der Mikrostrukturen konnten vorwiegend dynamische Prozesse wie die fluidunterstützte Korngrenzmigration, untergeordnet aber auch Strukturen des Versetzungskriechens festgestellt werden.

Die hohe Verfügbarkeit von Fluiden führte vermutlich in einer frühen Phase der Deformation zur Lösung und dem Abtransport von leicht löslichen Salzmineralen hin zu hangenden stratigraphischen fluidärmeren Horizonten und einem Massentransport entlang einem Druckgefälle hin zu Bereichen niedrigeren Drucks. Eine Permeabilitätserhöhung durch fluiddruckinduzierte Perkolation bzw. Mikrorissbildung kann diesen Prozess lokal beschleunigt oder gar erst möglich gemacht haben. Die während der Salzaufstiegsphase angelegten Migrationspfade im Bereich des Kaliflözes Staßfurt, des Grauen Salztons und des Hauptanhydrits wurden vermutlich während der kretazischen Kompressionsphase teilweise reaktiviert. Die großen Massen gelöster und abtransportierter Salzminerale aus dem Staßfurt-Steinsalz finden sich in Form von sekundären Ausfällungen in den hangenden z3-Schichten wieder, teils als Kluftfüllungen des Hauptanhydrits, teils als sehr groß gewachsene Halitkristalle im Kristallsalz.

Neben neuen geologischen Erkenntnissen erbrachte die dreidimensionale Modellierung auch die Identifikation von Ansätzen zur Optimierung der Exploration, des Datenmanagements und weiterführend der Abbauplanung im Sinne einer effizienteren Lagerstättennutzung. Während sich das Vorerkundungskonzept mittels Profilfächerbohrungen und dem Einsatz von Bohrlochradar in der Vergangenheit bewährt hat, wurde das Naherkundungskonzept innerhalb verschiedener Szenarien überprüft. Die Integration von Vollbohrungen und

Stoßradarmessungen wurde bezüglich des Aufwandes sowie der Aufschlussdichte des Lagers und der Lagergrenze mit dem aktuellen Konzept verglichen. In bestimmten Situationen, nämlich einem relativ gering mächtigen Lager (25 m), welches durch Hauptanhydrit begrenzt ist, könnte das erarbeitete Konzept einer Kombination von Stoßradarmessungen und Vollbohrungen im Vergleich zum aktuellen Konzept dieses Lager mit 60 % mehr Bohrmeter und 90 % weniger Aufwand (nur Bohrtätigkeit) erschließen. Die Limitation der Bohrlochlänge von Vollbohrungen (20 m mit den aktuellen Betriebsmitteln) sowie die begrenzte Einsetzbarkeit von Stoßradarmessungen (abhängig von der Einheit, welche die Lagergrenze darstellt, und dessen Entfernung), machten die Entwicklung weiterer Konzepte notwendig. Diese benötigen nur einen oder gar keinen zusätzlichen Bohrplatz zwischen zwei Profilen durch einen schrägen Ansatzwinkel der Mächtigkeitsbohrungen in Richtung Lagergrenze. So können bei einem 50 m mächtigen Lager durch Einrichtung eines Bohrplatzes, von dem zwei schräge Mächtigkeitsbohrungen ausgehen, in Kombination mit zwei zusätzlichen Vollbohrungen entlang der Lagerstrecke etwa 45 % mehr Bohrmeter bei gleicher Anzahl der Lagergrenzenaufschlüsse durch Kernbohrungen bei rund 28 % weniger Gesamtaufwand erzielt werden. Wie sich unerwartete Mächtigkeitsschwankungen auf die jeweiligen Konzepte auswirken, wurde anhand mehrerer Szenarien analysiert und darauf basierend eine situationsbedingte Vorgehensweise erarbeitet.

Bei der Nutzung der Explorationsdaten für eine spätere Blockmodellierung sind die detaillierten Beprobungsintervalle von 1 m Länge nicht sinnvoll. Der hohe Auflösungsgrad bringt bei der optimalen Blockkantenlänge von 4 m keinen Mehrwert. Um den Einfluss von MgCl_2 -gesättigter Bohrspülung auf die Analytik zu minimieren könnte ein größerer Bohrkern Durchmesser verwendet werden, sodass weniger Bruchstücke und somit weniger Benetzungsfläche des Probenmaterials entsteht. In einem Vergleich von rund 2.000 Trocken- und rund 13.000 Nassproben wurde ein Einfluss auf den gemessenen Mg^{2+} -Gehalt in einer Größenordnung von 500 mg/kg festgestellt. Dieser Einfluss ist enorm, wenn bedacht wird, dass bei Stichproben aus dem Normalsalz nur ein Mg^{2+} -Gehalt von ca. 100 mg/kg gemessen wird. Der vermehrte Einsatz von Vollbohrungen in der Naherkundung ist auch bezüglich dieser Problematik sehr sinnvoll.

Die Nutzbarkeit der vorhandenen Datenstrukturen zum Zwecke einer geologischen 3D-Modellierung ist in einem Gewinnungsbetrieb, der seit über 100 Jahren besteht, in vieler Hinsicht eingeschränkt. Die sorgfältige und einheitliche Archivierung sowie die Dokumentation von Veränderungen in der Vorgehensweise der Datenerhebung sind hierfür maßgebliche Voraussetzungen. Insgesamt ist vor allem bezüglich der Digitalisierung analoger Informationen wichtig, diese durch möglichst wenige Punkte umzusetzen.

Eine effektive Lagerstättennutzung hat die Bereitstellung der jeweils nachgefragten Salzqualitäten unter möglichst geringem Lagerstätteneinsatz zum Ziel. Der Bedarf an Auftausalz ($\text{NaCl} > 97,5\%$) ist saisonabhängig und unterliegt starken Schwankungen. Anhand der Jahresproduktion im Zeitraum von 2005 bis 2016 ergibt sich eine theoretische Gesamtförderung von 650.000 t/a bei einem Auftausalzanteil von 38,5 % als sinnvollem Zielwert für die nächsten Jahre. Eine Quantifizierung der bereits gewonnenen Rohsalzqualitäten im Untersuchungsgebiet mittels der digitalisierten Abbaukammern und der Erkundungsdaten ergab einen Anteil der Auftausalzqualität von nur rund 17 %. Eine Verschneidung mit den Blockmodellergebnissen ergab immerhin rund 26 %. Die Differenz zu den benötigten 38,5 % wurde in der Vergangenheit nachweislich durch Degradation von Normalsalz ($\text{NaCl} > 98,5\%$) durch Vermischung mit Auftausalz und minderwertigem Material aus der Auffahrung bereitgestellt. Im Untersuchungsgebiet wurde exemplarisch ein Abbau innerhalb des Schwadensalzes geplant, um zu verdeutlichen, wie zusätzliche Auftausalzmengen problemlos aufgeschlossen werden können, ohne die wertvollen Normalsalzqualitäten des Kristallsalzes zu degradieren. In einem bereits für die Kristallsalzgewinnung erschlossenem Bereich könnten ohne aufwändige zusätzliche Infrastruktur 1,37 Mio. Tonnen Auftausalz in insgesamt acht Abbaukammern gewonnen werden. Die bisher häufig angewendete Vorgehensweise einer Kombination von streichenden und querschlägigen Abbaukammern in Bereichen starker Mächtigkeitsschwankungen erwies sich innerhalb dieser Szenarienplanung grundsätzlich als sinnvoll. Es sind jedoch 1,54 m anstatt 1,43 m Vorrichtungsstrecke pro gewonnene 1.000 Tonnen Steinsalz im Vergleich zu einem rein querschlägigem Abbau notwendig.

Das angewendete Abbauverfahren ist über Jahrzehnte entwickelt worden, und die Dimensionierung der Kammern und Festen und dessen genehmigte Maxima basieren auf Erfahrungswerten. Ohne diese zu hinterfragen, ist beispielsweise durch das Einbringen von Versatz im Randbereich von Lagern mit komplexem Grenzverlauf lokal eine bessere Lagerstättennutzung in Form einer Festenreduzierung möglich. Die nötigen Mengen Versatzmaterial können aus Wendeln und sonstiger Aus- und Vorrichtung genutzt werden, die statt wie bisher im Schwadensalz in den stärker verunreinigten Salzhorizonten zwischen Schwadensalz und Kristallsalz aufgefahren werden.

Nicht zuletzt würde eine massive Kapazitätserhöhung der untertägigen optischen Sortieranlage, vor allem im Hinblick auf eine potentielle Schwadensalzförderung, zu einer Optimierung der Auftausalzproduktion und somit nachhaltigeren Nutzung der Lagerstätte beitragen.

Die vorliegende Arbeit hat aufgezeigt, dass auch komplexeste geologische Strukturen wie die polydeformierten Salzlagerstätten Norddeutschlands mit vertretbarem Aufwand dreidimensional modelliert werden können. Innerhalb der geologischen 3D-Modellierung

konnten räumliche Abhängigkeiten der Wertstoffverteilung eindrücklich nachgewiesen und dargestellt werden. Bestimmte Erscheinungen konnten mit hoher Sicherheit einzelnen Deformationsphasen und teilweise auch den jeweils wirkenden Prozessen zugeordnet werden. Der Prozess der Modellierung konnte auf vielen Ebenen, der Exploration, dem Datenmanagement, dem geologischen Verständnis und der strategischen Abbauplanung, zur Identifikation von Ansätzen einer nachhaltigeren Nutzung der Lagerstätte beitragen.

11 Ausblick

Die meisten mikroskopischen Untersuchungen von Salzgesteinen in der näheren Umgebung beziehen sich auf die mechanischen Eigenschaften hinsichtlich der Frage einer langzeitlichen Standsicherheit bei der möglichen Nutzung als Endlager radioaktiver Abfälle. Wie jedoch die mineralogische Zusammensetzung eines mehrfach deformierten Salzgesteines sich konkret verändert und welchen Anteil daran migrierende Lösungen haben und wie ein Massentransfer stattfinden kann, ist bisher nur wenig untersucht. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze, die geochemischen Unterschiede innerhalb einer stratigraphischen Einheit anhand von räumlich unterschiedlich wirksamen Deformationsprozessen und des unterschiedlichen Vorhandenseins von Fluiden zu erklären, gilt es anhand von umfangreichen Untersuchungen vor allem auf mikrostruktureller Ebene weiter auszubauen. Besonders interessant wären zur Validierung der hier geäußerten Thesen entsprechende Untersuchungen in dem benachbarten Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben.

Um wirklich eine nachhaltigere Nutzung der Salzlagerstätte Braunschweig- Lüneburg anhand der Modellierungsergebnisse zu erzielen, müssen die gewonnen Erkenntnisse bezüglich der Wertstoffverteilung in die kurz-, mittel- und langfristige Abbauplanung einfließen. Die Entwicklung von Konzepten, die eine größere Flexibilität und Selektivität des Abbaus gewährleisten, ist ein wichtiger Zukunftsschritt, um mit möglichst großem Nutzen von einem hochauflösenden 3D-Blockmodell zu profitieren.

Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz der 3D-Modellierung und strukturabhängigen (je auf Mulden- und Sattelstrukturen bezogenen) Verknüpfung mit unterschiedlichen Analysedaten birgt auch bei Anwendung auf andere komplex deformierte Salzlagerstätten das Potential, ganz neue Erkenntnisse zu gewinnen.

12 Literaturverzeichnis

- ALBRECHT, H.; BURCHARDT, I., 1998: Projekt Morsleben. Geologische Bearbeitung von Trias und Jura. Bundesamt für Strahlenschutz. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.endlager-morsleben.de>, zuletzt geprüft am 19.09.2016.
- ARRHENIUS, S.; LACHMANN, R., 1912: Die physikalisch-chemischen Bedingungen bei der Bildung der Salzlagerstätten und ihre Anwendung auf geologische Probleme. In: *Geologische Rundschau* 3 (3), S. 139–157.
- AZAPAGIC, A., 2004: Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. In: *Journal of Cleaner Production* 12 (6), S. 639–662.
- BALZER, D., 2007: Zechstein. In: L. Stottmeister, H. Jordan und H.-G. Röhling (Hg.): Erläuterungen zur geologischen Karte 1:25000 von Sachsen-Anhalt (GK 25). Erläuterungen zum Blatt Helmstedt 3732. 2. Aufl. Halle, S. 32–50.
- BASTANTE, F.G.; ORDÓÑEZ, C.; TABOADA, J.; MATÍAS, J.M., 2008: Comparison of indicator kriging, conditional indicator simulation and multiple-point statistics used to model slate deposits. In: *Engineering Geology* 98 (1-2), S. 50–59.
- BÄUERLE, G.; BORNEMANN, O.; MAUTHE, F.; MICHALZIK, D., 2000: Turbidite, Breccien und Kristallrasen am Top des Hauptanhydrits (Zechstein 3) des Salzstocks Gorleben. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 151 (1-2), S. 99–125.
- BECK, K., 1911: Petrographisch-geologische Untersuchung des Salzgebirges an der oberen Aller im Vergleich mit dem Staßfurter und Hannoverschen Lagerstättentyps. Dissertation. Philosophische Fakultät der Universität Leipzig. Berlin.
- BEER, W.W., 1990: Elektromagnetische Reflexionsmessungen im Kali- und Steinsalzbergbau - Zwölf Jahre praktische Anwendungen und Ergebnisse. In: *Kali und Steinsalz* 10 (7/8), S. 226–232.
- BEER, W.W., 1996: Kalilagerstätten in Deutschland. In: *Kali und Steinsalz* 12 (1), S. 18–30.
- BEHLAU, J.; MINGERZAHN, G., 2001: Geological and tectonic investigations in the former Morsleben salt mine (Germany) as a basis for the safety assessment of a radioactive waste repository. In: *Engineering Geology* 61 (2-3), S. 83–97.
- BEST, G., 1996: Floßtektonik in Norddeutschland: Erste Ergebnisse reflexionsseismischer Untersuchungen an der Salzstruktur "Oberes Allertal". In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* Band 147 (4), S. 455–464.
- BEST, G.; ZIRNGAST, M., 2002: Die strukturelle Entwicklung der exhumierten Salzstruktur "Oberes Allertal". Hannover: BGR.
- BIEHL, B.C.; REUNING, L.; STROZYK, F.; KUKLA, P.A., 2014: Origin and deformation of intra-salt sulphate layers: an example from the Dutch Zechstein (Late Permian). In: *Geologische Rundschau* 103 (3), S. 697–712.

- BORCHERT, H.; BAIER, E., 1953: Anhydritgesteine mit Pseudomorphosengefüge. In: *Experientia* 9 (7), S. 237–242.
- BORNEMANN, O.; BEHLAU, J.; FISCHBECK, R.; HAMMER, J.; JARITZ, W.; KELLER, S. et al. (Hg.), 2008: Standortbeschreibung Gorleben. Hannover: BGR und LBEG (Geologisches Jahrbuch: Reihe C).
- BRANDES, C.; SCHMIDT, C.; TANNER, D.C.; WINSEMANN, J., 2013: Paleostress pattern and salt tectonics within a developing foreland basin (north-western Subhercynian Basin, northern Germany). In: *Geologische Rundschau* 102 (8), S. 2239–2254.
- BRUN, J.-P.; FORT, X., 2004: Compressional salt tectonics (Angolan margin). In: *Tectonophysics* 382 (3-4), S. 129–150.
- BRUN, J.-P.; MAUDUIT, T.P.-O., 2009: Salt rollers. Structure and kinematics from analogue modelling. In: *Marine and Petroleum Geology* 26 (2), S. 249–258.
- BURCHARDT, S.; KOYI, H.; SCHMELING, H., 2011: Strain pattern within and around denser blocks sinking within Newtonian salt structures. In: *Journal of Structural Geology* 33 (2), S. 145–153.
- BURCHARDT, S.; KOYI, H.; SCHMELING, H., 2012: The influence of viscosity contrast on the strain pattern and magnitude within and around dense blocks sinking through Newtonian rock salt. In: *Journal of Structural Geology* 35, S. 102–116.
- CARON, J.; DURAND, S.; ASSELIN, H., 2016: Principles and criteria of sustainable development for the mineral exploration industry. In: *Journal of Cleaner Production* 119, S. 215–222.
- CARTER, N.L.; HORSEMAN, S.T.; RUSSELL, J.E.; HANDIN, J., 1993: Rheology of rocksalt. In: *Journal of Structural Geology* 15 (9-10), S. 1257–1271.
- CAUMON, G.; COLLON-DROUAILLET, P.; Le Carlier de Veslud, C.; VISEUR, S.; SAUSSE, J., 2009: Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures. In: *Mathematical Geosciences* 41 (8), S. 927–945.
- CHEMIA, Z., 2008: Modeling internal deformation of salt structures targeted for radioactive waste disposal. Dissertation. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis (Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology, 551).
- CHEMIA, Z.; KOYI, H., 2008: The control of salt supply on entrainment of an anhydrite layer within a salt diapir. In: *Journal of Structural Geology* 30 (9), S. 1192–1200.
- COPPERS, M.; DUDDEK, K., 2008: Optische Sortierung Untertage mit dem RHEWUM DataSort. In: *Aufbereitungstechnik* 49 (9), S. 10–16.
- COWAN, E.J.; BEATSON, R.K.; ROSS, H.J.; FRIGHT, W.R.; MCLENNAN, T.J.; EVANS, T.R. et al., 2003: Practical Implicit Geological Modelling. In: S. Dominy (Hg.): 5th International Mining Geology Conference. Bendigo, Victoria, S. 89–99.
- CRESSIE, N., 1990: The origins of kriging. In: *Mathematical Geology* 22 (3), S. 239–252.

- DOOLEY, T.P.; JACKSON, M.P.; JACKSON, C.A.-L.; HUDEC, M.R.; RODRIGUEZ, C.R., 2015: Enigmatic structures within salt walls of the Santos Basin—Part 2. Mechanical explanation from physical modelling. In: *Journal of Structural Geology* 75, S. 163–187.
- DUBIŃSKI, J., 2013: Sustainable Development of Mining Mineral Resources. In: *Journal of Sustainable Mining* 12 (1), S. 1–6.
- DUVAL, B.; CRAMEZ, C.; JACKSON, M.P., 1992: Raft tectonics in the Kwanza basin, Angola. In: *Marine and Petroleum Geology* 9 (4), S. 389–404.
- EHRHARDT, K., 1997: Das Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg. In: Klaus Ebel und Rainer Slotta (Hg.): 100 Jahre Schacht Marie. Salzbergbau im oberen Allertal. Wefensleben: Knappenverein "Oberes Allertal" Morsleben, S. 122–126.
- esco, 2012: Werk Braunschweig-Lüneburg: Hauptbetriebsplan Grubenbetrieb für den Zeitraum April 2012 - März 2016. unveröffentlicht. esco GmbH & Co. KG. Grasleben.
- esco, 2016: Werk Braunschweig-Lüneburg: Grubenkennzahlen. unveröffentlicht. esco GmbH & Co. KG. Grasleben.
- esco, 2017: Produkte. Salz - der vielseitige Rohstoff. esco GmbH & Co. KG. Hannover. Online verfügbar unter <https://www.esco-salt.com/products.html>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- FGSV, 2003: Technische Lieferbedingungen für Streustoffe des Straßenwinterdienstes. TL-Streu. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- FRANK, T., 2009: Advanced visualization and modeling of tetrahedral meshes. Dissertation. Technischen Universität Bergakademie, Freiberg. Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau.
- FRANK, T.; TERTOIS, A.-L.; MALLET, J.-L., 2007: 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. In: *Computers & Geosciences* 33 (7), S. 932–943.
- FUCHS, L.; KOYI, H.; SCHMELING, H., 2014: Numerical modeling on progressive internal deformation in down-built diapirs. In: *Tectonophysics* 632, S. 111–122.
- FULDA, E., 1930: Über Anhydritklippen. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 82, S. 383.
- GELUK, M.C., 1998: Internal tectonics of salt structures. In: *Journal of Seismic Exploration* 7 (3-4), S. 237–250.
- GELUK, M.C.; BRÜCKNER-RÖHLING, S.; RÖHLING, H.G., 2000: Salt occurrences in the Netherlands and Germany: new insights in the formation of salt basins. In: R. M. Geertman (Hg.): 8th World Salt Symposium. Amsterdam: Elsevier, S. 126–131.
- GERLING, R., 1994: Untersuchung zur wirtschaftlichen Optimierung des Weitungsbaus am Beispiel steil stehender Kalilagerstätten. Dissertation. Technische Universität Clausthal, Clausthal. Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen.

- GÖTZFRIED, F., 2015: Europäische Normung der tauenden Streustoffe. In: *Kali & Steinsalz* (2), S. 14–21.
- GRATIER, J.-P., 1993: Experimental pressure solution of halite by an indenter technique. In: *Geophysical Research Letters* 20 (15), S. 1647–1650.
- GRATIER, J.-P.; DYSTHE, D.K.; RENARD, F., 2013: The Role of Pressure Solution Creep in the Ductility of the Earth's Upper Crust. In: *Advances in Geophysics* 54, S. 47–179.
- GRINGARTEN, E.; DEUTSCH, C.V., 2001: Teacher's Aide Variogram Interpretation and Modeling. In: *Mathematical Geology* 33 (4), S. 507–534.
- HANSEN, M.B.; SCHECK-WENDEROTH, M.; HÜBSCHER, C.; LYKKE-ANDERSEN, H.; DEGHANI, A.; HELL, B.; GAJEWSKI, D., 2007: Basin evolution of the northern part of the Northeast German Basin — Insights from a 3D structural model. In: *Tectonophysics* 437 (1-4), S. 1–16.
- HEMMANN, M., 1968: Zur Ausbildung und Genese des Leinsteinsalzes und Hauptanhydrits (Zechstein 3) im Ostteil des Subherzynen Beckens. Dissertation. Bergakademie Freiberg, Freiberg. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- HILSON, G.; MURCK, B., 2000: Sustainable development in the mining industry: clarifying the corporate perspective. In: *Resources Policy* 26 (4), S. 227–238.
- HORN, M., 2016: Erscheinungsformen der bruchlosen Deformation und Bruchdeformation im Salinar des Steinsalzbergwerkes Braunschweig-Lüneburg. Masterarbeit. Bergakademie Bergakademie, Freiberg. Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau.
- HORN, M.; BARNASCH, J.; BODE, J.; STANEK, K.; ZEIBIG, S., 2016: Erscheinungsformen der bruchlosen Deformation und Bruchdeformation im Salinar des Steinsalzbergwerkes Braunschweig-Lüneburg. In: *Kali & Steinsalz* (2), S. 30–42.
- HUDEC, M.R.; JACKSON, M.P., 2007: Terra infirma. Understanding salt tectonics. In: *Earth-Science Reviews* 82 (1-2), S. 1–28.
- HULSE, D.E., 1992: The consequences of block size decisions in ore body modelling. In: *Proceedings of the 23rd APCOM*, S. 225–232.
- HUNSCHKE, U.; HAMPEL, A., 1999: Rock salt — the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. In: *Engineering Geology* 52 (3-4), S. 271–291.
- HUNSCHKE, U.; MINGERZAHN, G.; SCHULZE, O., 1996: The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behavior of rock salt. In: M. Ghoreychi, P. Berest, H. Hardy Jr. und M. Langer (Hg.): *The Mechanical Behavior of Salt III. Proceedings of the 3rd conference, Palaiseau (France) 1993*. Clausthal: Trans Tech Publications, S. 143–151.
- HUNSCHKE, U.; SCHULZE, O., 1994: Das Kriechverhalten von Steinsalz. In: *Kali & Steinsalz* 11 (8/9), S. 238–255.

- HUY, D., 2016: Deutschland - Rohstoffsituation 2015. Hannover: BGR.
- JACKSON, C.A.-L.; JACKSON, M.P.; HUDEC, M.R.; RODRIGUEZ, C.R., 2015: Enigmatic structures within salt walls of the Santos Basin—Part 1. Geometry and kinematics from 3D seismic reflection and well data. In: *Journal of Structural Geology* 75, S. 135–162.
- JACKSON, M.; TALBOT, C., 1989: Anatomy of mushroom-shaped diapirs. In: *Journal of Structural Geology* 11 (1-2), S. 211–230.
- JACKSON, M.; TALBOT, C.J., 1991: A Glossary of Salt Tectonics. Austin: Bureau of Economic Geology, University of Texas.
- JACKSON, M.P., 1995: Retrospective salt tectonics. In: M. P.A. Jackson, D. G. Roberts und S. Snelson (Hg.): Salt tectonics: A global perspective (AAPG Memoir 65), S. 1–28.
- JACKSON, M.P.; TALBOT, C.J., 1994: Advances in salt tectonics. In: P. L. Hancock (Hg.): Continental deformation. Oxford: Pergamon Press, S. 159–179.
- JACKSON, M.P.; VENDEVILLE, B.C., 1994: Regional extension as a geologic trigger for diapirism. In: *Geological Society of America Bulletin* 106 (1), S. 57–73.
- JACKSON, M.P.A.; HUDEC, M.R., 2017: Salt tectonics. Principles and practice. Cambridge: Cambridge University Press.
- JARA, R.M.; COUBLE, A.; EMERY, X.; MAGRI, E.J.; ORTIZ, J.M., 2006: Block size selection and its impact on open-pit design and mine planning. In: *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 106 (3), S. 205–211.
- JARITZ, W., 1973: Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. In: *Geologisches Jahrbuch A* 10, S. 1–24.
- JARITZ, W., 1980: Einige Aspekte der Entwicklungsgeschichte der nordwestdeutschen Salzstöcke. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* Band 131 (131), S. 387–408.
- JUBITZ, K.B.; BEUTLER, G.; SCHWAB, G.; STACKEBRANDT, W., 1991: Zur Strukturentwicklung des Spaltendiapirs der Allertalzone (Subherzyne Senke). In: *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 19 (4), S. 409–421.
- K+S Aktiengesellschaft, 2011-2016: Finanzberichte/Geschäftsberichte der Jahre 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 und 2016. Kassel. Online verfügbar unter <http://www.k-plus-s.com/de/archiv/finanzberichte.html>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- K+S Aktiengesellschaft, 2017: Kompendium: Wissenswerte Fakten über K+S. Kassel. Online verfügbar unter http://www.k-plus-s.com/de/pdf/2017/kompendium_juli.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- KÄDING, K.-C., 2000: Die Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Folge (vormals Bröckelschiefer-Folge). Stratigraphie und Verbreitung des z4 bis z7 im Zechstein-Becken. In: *Kali & Steinsalz* 13 (14), S. 86–96.

- KAMLOT, W.P., 2009: Gebirgsmechanische Bewertung der geologischen Barrierefunktion des Hauptanhydrits in einem Salzbergwerk. Habilitation. Bergakademie Freiberg. Institut für Geotechnik.
- KATZ, T., 2010: Ein Beitrag zur Bewertung von Maßnahmen zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit. Dissertation. RWTH, Aachen.
- KAUFMANN, O.; MARTIN, T., 2008: 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. In: *Computers & Geosciences* 34 (3), S. 278–290.
- KAY, M.; DIMITRAKOPOULOS, R., 2000: Integrated Interpolation Methods for Geophysical Data: Applications to Mineral Exploration. In: *Natural Resources Research* 9 (1), S. 53–64.
- KIRSCHMANN, W., 1913: Die Lagerungsverhältnisse des oberen Allertales zwischen Morsleben und Walbeck. In: *Zeitschrift für praktische Geologie* 21, S. 1–27.
- KLEY, J.; Franke H.-J.; JÄHNE, F.; KRAWCZYK, C.; LOHR, T.; REICHERTER, K. et al., 2008: Strain and stress. In: R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski und S. Nelskamp (Hg.): *Dynamics of Complex Intracontinental Basins. The Central European Basin System*. Berlin: Springer-Verlag, S. 97–124.
- KNEUKER, T.; ZULAUF, G.; MERTINEIT, M.; BEHLAU, J.; HAMMER, J., 2014: The impact of finite strain on deformation mechanisms of Permian Stassfurt rock salt at the Morsleben site (Germany): constraints from microfabric studies and EBSD analyses. In: *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 165 (1), S. 91–106.
- KOCKEL, F., 2003: Inversion structures in Central Europe - Expressions and reasons, an open discussion. In: *Netherlands Journal of Geosciences* 82 (04), S. 351–366.
- KÖPPKE, K., 2008: Vergleich der Explorationsabteilungen in den Bergwerken der K+S Gruppe und Aufzeigen von Optimierungsansätzen. Diplomarbeit. Bergakademie Freiberg. Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau.
- KOSMAHL, W., 1969: Zur Stratigraphie, Petrographie, Paläogeographie, Genese und Sedimentation des Gebänderten Anhydrits (Zechstein 2), Grauen Salztones und Hauptanhydrits (Zechstein 3) in Nordwestdeutschland. Stuttgart, Germany: Schweizerbart.
- KOYI, H.A., 2001: Modeling the influence of sinking anhydrite blocks on salt diapirs targeted for hazardous waste disposal. In: *Geology* 29 (5), S. 387.
- KUKLA, P.A.; URAI, J.L.; MOHR, M., 2008: Dynamics of salt structures. In: R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski und S. Nelskamp (Hg.): *Dynamics of Complex Intracontinental Basins. The Central European Basin System*. Berlin: Springer-Verlag, S. 291–306.
- KÜSTER, Y., 2011: Bromide Characteristics and Deformation Mechanisms of Naturally Deformed Rock Salt of the German Zechstein Basin. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- LACHMANN, R., 1913: Der Bau des Reiheneckzems an der oberen Aller. In: *Zeitschrift für praktische Geologie* 21, S. 28.

- LAINE, E., 2012: 3D modeling of polydeformed and metamorphosed rocks. the old Outokumpu Cu-Co-Zn mine area as a case study. Espoo: Geological Survey of Finland.
- LAURENCE, D., 2011: Establishing a sustainable mining operation. An overview. In: *Journal of Cleaner Production* 19 (2-3), S. 278–284.
- LI, S.; ABE, S.; REUNING, L.; BECKER, S.; URAI, J.L.; KUKLA, P.A., 2012: Numerical modelling of the displacement and deformation of embedded rock bodies during salt tectonics. A case study from the South Oman Salt Basin. In: *Geological Society, London, Special Publications* 363 (1), S. 503–520.
- LOHR, T., 2007: Seismic and sub-seismic deformation on different scales in the NW German Basin. Dissertation. Freie Universität, Berlin. Fachbereich Geowissenschaften.
- LOTSCH, D., 1998: Projekt Morsleben. Geologische Bearbeitung von Kreide und Tertiär. Bundesamt für Strahlenschutz. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.endlager-morsleben.de>, zuletzt geprüft am 19.09.2016.
- LOTZE, F., 1957: Steinsalz und Kalisalze. Teil 1 (Allgemein Geologischer Teil). 2. Aufl. Berlin: Gebrüder Borntraeger.
- MALLET, J.-L., 2002: Geomodeling. Oxford, New York: Oxford University Press (Applied geostatistics series).
- MARNIKA, E.; CHRISTODOULOU, E.; XENIDIS, A., 2015: Sustainable development indicators for mining sites in protected areas. Tool development, ranking and scoring of potential environmental impacts and assessment of management scenarios. In: *Journal of Cleaner Production* 101, S. 59–70.
- MAYSTRENKO, Y.; BAYER, U.; SCHECK-WENDEROTH, M., 2013: Salt as a 3D element in structural modeling — Example from the Central European Basin System. In: *Tectonophysics* 591, S. 62–82.
- MEI, G., 2014: Summary on several key techniques in 3D geological modeling. In: *The Scientific World Journal* 2014, S. 1–11.
- MERSCH, T., 2007: Entwicklung und Einsatzerfahrungen des neuen Strossenbohrwagens BW 50 S1 in steiler Lagerung. In: *Kali und Steinsalz* (2), S. 38–43.
- MOHR, M.; KUKLA, P.A.; URAI, J.; KLUG, B.; BRESSER, G.; BLEI, R., 2003: Ein neues Modell für die Salztektunik am SW-Rand des Zentraleuropäischen Beckens (ZEB). Hamburg (Vorträge der Frühjahrstagung des DGMK-Fachbereichs Aufsuchung und Gewinnung, 179 - 185).
- MOHR, M.; KUKLA, P.A.; URAI, J.L.; BRESSER, G., 2005: Multiphase salt tectonic evolution in NW Germany: seismic interpretation and retro-deformation. In: *International Journal of Earth Sciences* 94 (5-6), S. 917–940.
- OKRUSCH, M.; MATTHES, S., 2014: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Berlin, Heidelberg: Springer.

- PATEIRO FERNÁNDEZ, J.B., 2008: Nachhaltigkeit im Bergbau. Indikatoren und Beurteilungssystem. Dissertation. RWTH, Aachen.
- PAUL, J., 2014: Gypsum domes and diapirs. Common features in the Zechstein (Upper Permian) of Germany. In: *Geological Quarterly* 58 (3), S. 521–530.
- PEACH, C.J.; SPIERS, C.J., 1996: Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock. In: *Tectonophysics* 256 (1-4), S. 101–128.
- PEACH, C.J.; SPIERS, C.J.; TRIMBY, P.W., 2001: Effect of confining pressure on dilatation, recrystallization, and flow of rock salt at 150°C. In: *Journal of geophysical research* 106 (B7), S. 13315–13328.
- PENGE, J.; MUNNS, J.W.; TAYLOR, B.; WINDLE, T.M., 1999: Rift-raft tectonics: examples of gravitational tectonics from the Zechstein basins of northwest Europe. In: A. J. Fleet und S. A. R. Boldy (Hg.): *Petroleum Geology of Northwest Europe*. Proceedings of the 5th Conference, Bd. 5. Geological Society of London, S. 201–213.
- PENNOCK, G.M.; DRURY, M.R.; PEACH, C.J.; SPIERS, C.J., 2006: The influence of water on deformation microstructures and textures in synthetic NaCl measured using EBSD. In: *Journal of Structural Geology* 28 (4), S. 588–601.
- PENNOCK, G.M.; DRURY, M.R.; SPIERS, C.J., 2005: The development of subgrain misorientations with strain in dry synthetic NaCl measured using EBSD. In: *Journal of Structural Geology* 27 (12), S. 2159–2170.
- POHL, W., 2005: Mineralische und Energie-Rohstoffe. Eine Einführung zur Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten. Stuttgart: Schweizerbart.
- POPP, T.; KERN, H.; SCHULZE, O., 2001: Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation. In: *Journal of geophysical research* 106 (B3), S. 4061–4078.
- RAITH, A.F.; STROZYK, F.; VISSER, J.; URAI, J.L., 2016: Evolution of rheologically heterogeneous salt structures. A case study from the NE Netherlands. In: *Solid Earth* 7 (1), S. 67–82.
- REUTHER, E.-U., 1989: Lehrbuch der Bergbaukunde. 11. Aufl. Essen: Verl. Glückauf.
- RICHTER, G., 1934: Hauptanhydrit und Salzfaltung. In: *Kali verwandte Salze und Erdöl* 28 (9 und 10), S. 105.
- RICHTER-BERNBURG, G., 1953: Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 105, S. 843–854.
- RICHTER-BERNBURG, G., 1980: Salt tectonics, interior structures of salt bodies. In: *Bulletin des Centres de Recherches Exploration - Production Elf-Aquitaine* 4 (1), S. 373–393.

- RICHTER-BERNBURG, G., 1987: Deformation within salt bodies. In: I. Lerche und J. J. O'Brien (Hg.): *Dynamical Geology of Salt and Related Structures*. Orlando: Academic Press Inc., S. 39–75.
- SANNEMANN, D., 1968: Salt-stock families in northwestern Germany. *AAPG Memoir* 8, S. 261–270.
- SCHACHL, E., 1991: Das Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg. Schichtlagerung in der Wurzelzone eines Salzstockes. In: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil I* (4), S. 1223–1245.
- SCHECK, M.; BAYER, U., 1999: Evolution of the Northeast German Basin — inferences from a 3D structural model and subsidence analysis. In: *Tectonophysics* 313 (1-2), S. 145–169.
- SCHECK, M.; BAYER, U.; LEWERENZ, B., 2003a: Salt movements in the Northeast German Basin and its relation to major post-Permian tectonic phases—results from 3D structural modelling, backstripping and reflection seismic data. In: *Tectonophysics* 361 (3-4), S. 277–299.
- SCHECK, M.; BAYER, U.; LEWERENZ, B., 2003b: Salt redistribution during extension and inversion inferred from 3D backstripping. In: *Tectonophysics* 373 (1-4), S. 55–73.
- SCHECK-WENDEROTH, M.; LAMARCHE, J., 2005: Crustal memory and basin evolution in the Central European Basin System—new insights from a 3D structural model. In: *Tectonophysics* 397 (1-2), S. 143–165.
- SCHENK, O.; URAI, J.L., 2004: Microstructural evolution and grain boundary structure during static recrystallization in synthetic polycrystals of Sodium Chloride containing saturated brine. In: *Contributions to Mineralogy and Petrology* 146 (6), S. 671–682.
- SCHENK, O.; URAI, J.L.; PIAZOLO, S., 2006: Structure of grain boundaries in wet, synthetic polycrystalline, statically recrystallizing halite - evidence from cryo-SEM observations. In: *Geofluids* 6 (1), S. 93–104.
- SCHLÉDER, Z.; URAI, J.L., 2007: Deformation and recrystallization mechanisms in mylonitic shear zones in naturally deformed extrusive Eocene–Oligocene rocksalt from Eyvanekey plateau and Garmsar hills (central Iran). In: *Journal of Structural Geology* 29 (2), S. 241–255.
- SCHLÉDER, Z.; URAI, J.L.; NOLLET, S.; HILGERS, C., 2008: Solution-precipitation creep and fluid flow in halite. A case study of Zechstein (Z1) rocksalt from Neuhof salt mine (Germany). In: *Geologische Rundschau* 97 (5), S. 1045–1056.
- SCHMIERER, T., 1909: Zur Tektonik des oberen Allertals und der benachbarten Höhenzüge. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 61, S. 499–514.
- SCHULZE, O.; POPP, T.; KERN, H., 2001: Development of damage and permeability in deforming rock salt. In: *Engineering Geology* 61 (2-3), S. 163–180.

- SCHUTJENS, P.; SPIERS, C.J., 1999: Intergranular pressure solution in NaCl. grain-to-grain contact experiemts under the optical microscope. In: *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP* 54 (6), S. 729–750.
- SEDIVY, V.M., 1996: Purification of salt for chemical and human consumption. In: *Industrial Minerals* 343, S. 73–83.
- SPACHTHOLZ, F.X., 2010: Rohstoffeffizienz im Kali- und Steinsalzbergbau. In: *Chemie Ingenieur Technik* 82 (11), S. 1871–1879.
- SPIERS, C.J.; SCHUTJENS, P.; BRZESOWSKY, R.H.; PEACH, C.J.; LIEZENBERG, J.L.; ZWART, H.J., 1990: Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. In: *Geological Society, London, Special Publications* 54 (1), S. 215–227.
- SPUERK, S.; DROBE, M.; LOTTERMOSER, B.G., 2017: Evaluating resource efficiency at major copper mines. In: *Minerals Engineering* 107, S. 27–33.
- STILLE, H., 1925: The upthrust of the salt masses of Germany. In: *AAPG Bulletin* 9 (3), S. 417–441.
- STORK, G.H., 1998: Projekt Morsleben. Geologische Standortbeschreibung. Bundesamt für Strahlenschutz. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.endlager-morsleben.de>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- STROZYK, F.; URAI, J.L.; VAN GENT, H.; KEIJZER, M. de; KUKLA, P.A., 2014: Regional variations in the structure of the Permian Zechstein 3 intrasalt stringer in the northern Netherlands: 3D seismic interpretation and implications for salt tectonic evolution. In: *Interpretation* 2 (4), S. 101–117.
- STROZYK, F.; VAN GENT, H.; URAI, J.; KUKLA, P.A., 2012: 3D seismic study of complex intra-salt deformation: An example from the Upper Permian Zechstein 3 stringer, western Dutch offshore. In: *Geological Society, London, Special Publications* 363 (1), S. 489–501.
- SZEDER, T., 2003: Active tectonics in the NW-German Basin: Evidence from correlations between the modern landscape and deep geological structures (Lower Saxony, river Hunte). Dissertation. Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz. Fachbereich Geowissenschaften.
- TALBOT, C.J., 1992: Quo vadis tectonophysics? with a pinch of salt! In: *Journal of geodynamics* 16 (1-2), S. 1–20.
- TALBOT, C.J.; JACKSON, M.P., 1987: Internal kinematics of salt diapirs. In: *AAPG Bulletin* 71 (9), S. 1068–1093.
- TER HEEGE, J.H.; BRESSER, J. de; SPIERS, C.J., 2005a: Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite. Dependence of grain size distribution on flow stress, temperature and strain. In: *Tectonophysics* 396 (1-2), S. 35–57.

- TER HEEGE, J.H.; BRESSER, J. de; SPIERS, C.J., 2005b: Rheological behaviour of synthetic rock salt. The interplay between water, dynamic recrystallization and deformation mechanisms. In: *Journal of Structural Geology* 27 (6), S. 948–963.
- THIEME, B.; ROCKENBAUCH, K., 2001: Flosstektonik in der Trias der Deutschen Südlichen Nordsee. In: *Erdöl, Erdgas, Kohle* 117 (12), S. 568–573.
- TRUSHEIM, F., 1957: Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, S. 111–158.
- TRUSHEIM, F., 1960: Mechanism of salt migration in northern Germany. In: *AAPG Bulletin* 44 (9), S. 1519–1540.
- TURNER, A.K., 2006: Challenges and trends for geological modelling and visualisation. In: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65 (2), S. 109–127.
- URAI, J.L.; SCHLÉDER, Z.; SPIERS, C.J.; KUKLA, P.A., 2008: Flow and transport properties of salt rocks. In: R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski und S. Nelskamp (Hg.): *Dynamics of Complex Intracontinental Basins. The Central European Basin System*. Berlin: Springer-Verlag, S. 277–290.
- URAI, J.L.; SPIERS, C.J.; ZWART, H.J.; LISTER, G.S., 1986: Weakening of rock salt by water during long-term creep. In: *Nature* 324 (6097), S. 554–557.
- VAN GENT, H.; URAI, J.; KEIJZER, M. de, 2011: The internal geometry of salt structures – A first look using 3D seismic data from the Zechstein of the Netherlands. In: *Journal of Structural Geology* 33 (3), S. 292–311.
- VENDEVILLE, B.C.; JACKSON, M., 1992a: The rise of diapirs during thin-skinned extension. In: *Marine and Petroleum Geology* 9 (4), S. 331–354.
- VENDEVILLE, B.C.; JACKSON, M.P., 1992b: The fall of diapirs during thin-skinned extension. In: *Marine and Petroleum Geology* 9 (4), S. 354–371.
- WARREN, J.K., 2006: *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- WARREN, J.K., 2010: Evaporites through time. Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. In: *Earth-Science Reviews* 98 (3-4), S. 217–268.
- WARREN, J.K., 2016: *Evaporites. A Geological Compendium*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- WEIJERMARS, R.; JACKSON, M.; VENDEVILLE, B., 1993: Rheological and tectonic modeling of salt provinces. In: *Tectonophysics* 217 (1-2), S. 143–174.
- WILLIAMS-STROUD, S.C.; PAUL, J., 1997: Initiation and growth of gypsum piercement structures in the Zechstein Basin. In: *Journal of Structural Geology* 19 (7), S. 897–907.

- WOLDSTEDT, P., 1924: Zur Tektonik des subherzynen Beckens. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 76, S. 183–201.
- ZEIBIG, S.; BECKER, F., 2002: Verbalargumentative Verträglichkeitsbetrachtung Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg. unveröffentlicht. K+S Aktiengesellschaft. Kassel.
- ZEIBIG, S.; OCHS, A.; LINDNER, U., 2001: Ermittlung der Steinsalzmächtigkeit über den Kali- und Steinsalzabbauen des Werks Bernburg. In: *Kali und Steinsalz* 14 (17), S. 11–19.
- ZEIBIG, S.; WENDZEL, J., 2000: Exploration of anhydrite wall and klippe structures for an optimized extraction of rock salt in the K+S salt mine Bernburg (Northern Germany). In: R. M. Geertman (Hg.): 8th World Salt Symposium. Amsterdam: Elsevier, S. 193–198.
- ZHANG, Y.; KRAUSE, M.; MUTTI, M., 2013: The Formation and Structure Evolution of Zechstein (Upper Permian) Salt in Northeast German Basin. A Review. In: *Open Journal of Geology* 03 (08), S. 411–426.
- ZIMMERMAN, D.; PAVLIK, C.; RUGGLES, A.; ARMSTRONG, M.P., 1999: An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. In: *Mathematical Geology* 31 (4), S. 375–390.
- ZULAUF, G.; ZULAUF, J.; BORNEMANN, O.; BRENKER, F.E.; HÖFER, H.E.; PEINL, M.; WOODLAND, A.B., 2010: Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction. Part 2: Deformation mechanisms and the role of fluids. In: *Journal of Structural Geology* 32 (3), S. 264–277.
- ZULAUF, G.; ZULAUF, J.; BORNEMANN, O.; KIHM, N.; PEINL, M.; ZANELLA, F., 2009: Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction. Part 1: Geometric and kinematic aspects. In: *Journal of Structural Geology* 31 (4), S. 460–474.
- ZULAUF, J.; ZULAUF, G.; HAMMER, J.; ZANELLA, F., 2011: Tablet boudinage of an anhydrite layer in rock-salt matrix: Results from thermomechanical experiments. In: *Journal of Structural Geology* 33 (12), S. 1801–1815.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Die physikalischen Eigenschaften von Steinsalz im Vergleich zu anderen Gestein (nach WARREN, 2006).....	6
Abbildung 2.2: Deformationsmechanismen und wichtigste mikrostrukturelle Beobachtungen für Steinsalz im Temperaturbereich von 20 C bis 200 °C (nach URAI et al., 2008).....	8
Abbildung 2.3: Salzstrukturen und deren Entwicklungsstadien (nach JACKSON und HUDEC, 2017).....	11
Abbildung 3.1: Strukturgeologische Übersichtskarte des Subherzynen Beckens (nach BEST und ZIRNGAST, 2002 und BREWITZ et al., 2008).	17
Abbildung 3.2: Profildarstellungen im Bereich der Allertalstruktur (aus BEST und ZIRNGAST, 2002).....	18
Abbildung 3.3: Schematischer geologischer Schnitt durch die Struktur „Oberes Allertal“ in der Höhe von Schacht Bartensleben (nach BEST, 1996 und BEHLAU und MINGERZAHN, 2001).....	21
Abbildung 3.4: Zeitliche Zuordnung der Hauptspannungsfelder und Entstehung der Salzstrukturen im Subherzynen Becken (modifiziert nach BRANDES et al., 2013; LOHR, 2007; KLEY et al., 2008 und SIPPEL et al., 2009).....	23
Abbildung 3.5: Schematische Darstellung einer typischen Anhydritklippe nach Abschluss der Diagenese (modifiziert nach HEMMANN, 1968 und SCHACHL, 1991)	26
Abbildung 4.1: Übersichtskarte des Steinsalzbergwerks Braunschweig-Lüneburg, die jeweiligen Bewilligungsfelder und das Untersuchungsgebiet (modifiziert nach ZEIBIG und BECKER, 2002)	34
Abbildung 4.2: Schematischer Schnitt durch die Kali- und Steinsalzlagerstätte Braunschweig-Lüneburg in der Allertalzone (modifiziert nach ZEIBIG und BECKER, 2002)	36
Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des angewendeten Abbauverfahrens (modifiziert nach esco, 2012).....	37
Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Naherkundungskonzeptes.....	40
Abbildung 4.5: Überblick über die Steinsalz-Produktpalette der esco GmbH & Co. KG (nach esco, 2017)	42
Abbildung 4.6: Überblick über das Untersuchungsgebiet, Position der Profile 70 bis 79 und Ergebnisse der Modellierung des Kristallsalzes.....	44
Abbildung 5.1: Vorgehensweise der geometrischen Modellierung.....	50
Abbildung 5.2: Ergebnisse der geometrischen Modellierung der relevanten stratigraphischen Einheiten.	52
Abbildung 5.3: 3DVariogramme des NaCl-Gehalts in Lager 28.	55
Abbildung 5.4: Ergebnisvergleich der Ordinary-Kriging-Interpolation in Lager 28 mit verschiedenen Blockgrößen.	57

Abbildung 5.5: Interpolationsergebnisse der einzelnen Komponenten (4 m Blockgröße, Ordinary Kriging).....	59
Abbildung 5.6: Vergleich von Eingangs- und Ausgangsdaten der Eigenschaftsmodelle der jeweiligen Komponenten (4 m Blockgröße, Ordinary Kriging).....	60
Abbildung 6.1: Grundriss der 471 m-Sohle mit identifizierten Hauptstrukturelementen (modifiziert nach esco, 2012)	62
Abbildung 6.2: Ergebnis der geometrischen Modellierung der Salzbasis (Aufsicht).	63
Abbildung 6.3: Ergebnis der geometrischen Modellierung des Staßfurt-Steinsalz (z2NA) und Kennzeichnung der Hauptstrukturelemente.....	65
Abbildung 6.4: Ergebnis der geometrischen Modellierung des Hauptanhydrit (z3AN) und Darstellung der Gas- und Salzlösungszutritte im Untersuchungsgebiet (Aufsicht).	69
Abbildung 6.5: Kluftfüllungen im Hauptanhydrit.	70
Abbildung 6.6: Ergebnisse der geometrischen Modellierung des Hauptanhydrits zwischen Profil 72 und 78 (3D-Ansicht).....	71
Abbildung 6.7: Ergebnis der geometrischen Modellierung des Salzspiegels und Salzrandes im Untersuchungsgebiet (Aufsicht).....	72
Abbildung 6.8: Typklassen für die geometrische Ausbildung der Muldenstrukturen.....	73
Abbildung 6.9: Boxplot-Diagramm des NaCl-Gehalts verschiedener stratigraphischer Einheiten.	74
Abbildung 6.10: Boxplot-Diagramm des CaSO ₄ -Gehalts verschiedener stratigraphischer Einheiten.	74
Abbildung 6.11 Boxplot-Diagramm des MgSO ₄ -Gehalts verschiedener stratigraphischer Einheiten.	75
Abbildung 6.12: Boxplot-Diagramm des KCl-Gehalts verschiedener stratigraphischer Einheiten.	75
Abbildung 6.13: Lokation der Staßfurt-Steinsalz (z2NA) Proben und NaCl-Gehalt entlang der Bohrspurverläufe.	76
Abbildung 6.14: Übersicht der Position der Kristallsalzlager im Untersuchungsgebiet.	78
Abbildung 6.15: Lokation der Kristallsalz (z3NAKR)-Proben (beispielhafte Darstellung einzelner Lager) und NaCl-Gehalt entlang der Bohrspurverläufe.....	80
Abbildung 6.16: Boxplot-Diagramm des NaCl-Gehalts der nördlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	81
Abbildung 6.17: Boxplot-Diagramm des CaSO ₄ -Gehalts der nördlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	81
Abbildung 6.18: Boxplot-Diagramm des MgSO ₄ -Gehalts der nördlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	82

Abbildung 6.19: Boxplot-Diagramm des KCl-Gehalts der nördlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	82
Abbildung 6.20: Boxplot-Diagramm des NaCl-Gehalts der zentralen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	83
Abbildung 6.21: Boxplot-Diagramm des CaSO_4 -Gehalts der zentralen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	83
Abbildung 6.22: Boxplot-Diagramm des MgSO_4 -Gehalts der zentralen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	84
Abbildung 6.23: Boxplot-Diagramm des KCl-Gehalts der zentralen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	84
Abbildung 6.24: Boxplot-Diagramm des NaCl-Gehalts der südlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	85
Abbildung 6.25: Boxplot-Diagramm des CaSO_4 -Gehalts der südlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	85
Abbildung 6.26: Boxplot-Diagramm des MgSO_4 -Gehalts der südlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	85
Abbildung 6.27: Boxplot-Diagramm des KCl-Gehalts der südlichen Kristallsalzlager von West nach Ost.....	85
Abbildung 6.28: Interpolationsergebnisse (4-m-Grid, Ordinary Kriging) in Profil 73.....	87
Abbildung 6.29: Interpolationsergebnisse (4-m-Grid, Ordinary Kriging) in Profil 75.....	88
Abbildung 6.30: Interpolationsergebnisse (4-m-Grid, Ordinary Kriging) in Profil 77.....	90
Abbildung 6.31: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des NaCl-Gehalts im Grundriss der 521 m-Sohle.	91
Abbildung 6.32: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des NaCl-Gehalts im Grundriss der 489 m-Sohle.	92
Abbildung 6.33: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des NaCl-Gehalts im Grundriss der 440 m-Sohle.	93
Abbildung 6.34: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des NaCl-Gehalts im Grundriss der 403 m-Sohle.	94
Abbildung 6.35: Lokation der Schwadensalz (z3NAh)-Proben und NaCl-Gehalt entlang der Bohrspurverläufe.....	96
Abbildung 6.36: Überblick über alle messbaren bzw. bewertbaren Eigenschaften einzelner Kristallsalzlager und mögliche Einflussfaktoren und Geneseprozesse.....	100
Abbildung 6.37: Streudiagramm NaCl/ CaSO_4 der Gesamtheit aller Kristallsalz (z3NAKR)-Proben.	102
Abbildung 6.38: Streudiagramm $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ der Gesamtheit aller Kristallsalz (z3NAKR)-Proben.	103

Abbildung 6.39: Streudiagramm $\text{NaCl}/\text{CaSO}_4$ des Ausbildungstyps 1 des Kristallsalzes (z3NAKR).....	104
Abbildung 6.40: Streudiagramm $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ des Ausbildungstyps 1 des Kristallsalzes (z3NAKR).....	104
Abbildung 6.41: Streudiagramm $\text{NaCl}/\text{CaSO}_4$ des Ausbildungstyps 2 des Kristallsalzes (z3NAKR).....	105
Abbildung 6.42: Streudiagramm $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ des Ausbildungstyps 2 des Kristallsalzes (z3NAKR).....	105
Abbildung 6.43: Streudiagramm $\text{NaCl}/\text{CaSO}_4$ des Ausbildungstyps 3 des Kristallsalzes (z3NAKR).....	106
Abbildung 6.44: Streudiagramm $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ des Ausbildungstyps 3 des Kristallsalzes (z3NAKR).....	106
Abbildung 6.45: Streudiagramm $\text{NaCl}/\text{CaSO}_4$ des Ausbildungstyps 4 des Kristallsalzes (z3NAKR).....	106
Abbildung 6.46: Streudiagramm $\text{CaSO}_4/\text{MgSO}_4$ des Ausbildungstyps 4 des Kristallsalzes (z3NAKR).....	107
Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der einzelnen Deformationsstadien.	118
Abbildung 7.2: Mit Carnallit verheilte Bruchstruktur im Schwadensalz (z3NAh), Wendel 403/385 m Sohle, Profil 75.	128
Abbildung 10.1: Szenarien unterschiedlicher Lagergeometrien für die Naherkundung.	130
Abbildung 10.2: Konzepte der Naherkundung für unterschiedliche Lagergeometrien.	132
Abbildung 10.3: Bohrmeterdifferenz unterschiedlicher Konzepte zu dem aktuellen Naherkundungskonzept.	134
Abbildung 10.4: Differenz des Arbeitsaufwandes (in Bezug auf die Bohrtätigkeiten) unterschiedlicher Konzepte gegenüber dem aktuellen Naherkundungskonzept.	134
Abbildung 11.1: 3D-Modell des Grubengebäudes im Untersuchungsgebiet	144
Abbildung 11.2: Volumina unterschiedlicher Rohsalzqualitäten aus der Blockmodellierung.	147
Abbildung 11.3: Szenarien der Abbauplanung von Schwadensalz südlich des Querschlags SO2 zwischen Profil 75 und 78.....	149

Tabellenverzeichnis

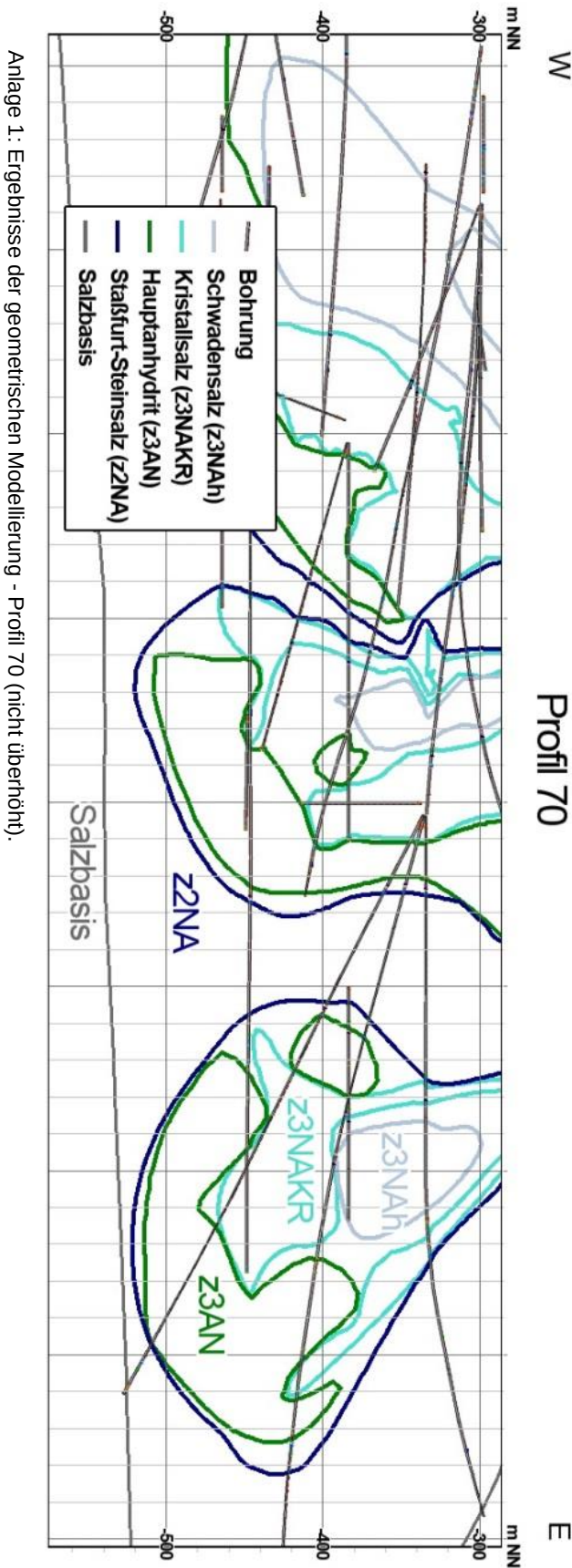
Tabelle 3.1: Normalprofil der geologischen Einheiten im Bereich der Allertalzone in Grasleben* (nach ZEIBIG und BECKER, 2002) und Morsleben** (nach BEST und ZIRNGAST, 2002; LOTSCH, 1998 und ALBRECHT und BURCHARDT, 1998).....	29
Tabelle 3.2: Normalprofil und Lithologie des Zechstein im Bereich der Allertalzone in Grasleben* (nach ZEIBIG und BECKER, 2002) und Morsleben** (nach BEHLAU und MINGERZAHN, 2001).	30
Tabelle 4.1: Produktanforderungen an die Rohsalzqualität.....	43
Tabelle 5.1: Überblick über die verwendeten Daten im Untersuchungsgebiet (Stand 10/2013).....	47
Tabelle 6.1: Geometrische Kenngrößen der Staßfurt-Steinsalz-Sattelstrukturen im Untersuchungsgebiet.	66
Tabelle 6.2: Geometrische Kenngrößen der Muldenstrukturen im Untersuchungsgebiet (L = Lager; S = Sohle).	68
Tabelle 6.3: Statistische Kenngrößen der Staßfurt-Steinsalz (z2NA)-Proben.	76
Tabelle 6.4: Statistische Kenngrößen der Kristallsalz (z3NAKR) Proben.	79
Tabelle 6.5: Statistische Kenngrößen der Schwadensalz (z3NAh) Proben.	95
Tabelle 6.6: Die vier Ausbildungstypen der Kristallsalzes (z3NAKR).	103
Tabelle 6.7: Korngrößenbezeichnungen aus Bohrprotokollen.....	108
Tabelle 6.8: Mittlere Mächtigkeit der Kristallsalzlager entsprechend der unterschiedlichen Erhebungsmethoden.	110
Tabelle 6.9: Mächtigkeitsschwankungen der Kristallsalzlager entsprechend der unterschiedlichen Erhebungsmethoden.....	111
Tabelle 6.10: Ergebnismatrix der nördlichen Kristallsalzlager.	113
Tabelle 6.11: Ergebnismatrix der zentralen Kristallsalzlager.....	114
Tabelle 6.12: Ergebnismatrix der südlichen Kristallsalzlager.	115
Tabelle 8.1: Vergleich des mittels RFA gemessenen Ca- und Mg-Gehalts von trockenen Grubenproben und nassen Bohrkernproben.....	138
Tabelle 8.2: Anleitung zur situationsbedingten Auswahl eines adäquaten Naherkundungskonzeptes.....	141
Tabelle 9.1: Tonnage aus Abbaukammern sowie Streckenvortrieb im Untersuchungsgebiet (eigene Berechnungen aus SURPAC-Modell) und jeweilige Qualitätseinordnung anhand der mittleren Lagerzusammensetzung.	146
Tabelle 9.2: Ergebnisvergleich der Abbauszenarien im Schwadensalz.	150

Anlagenverzeichnis

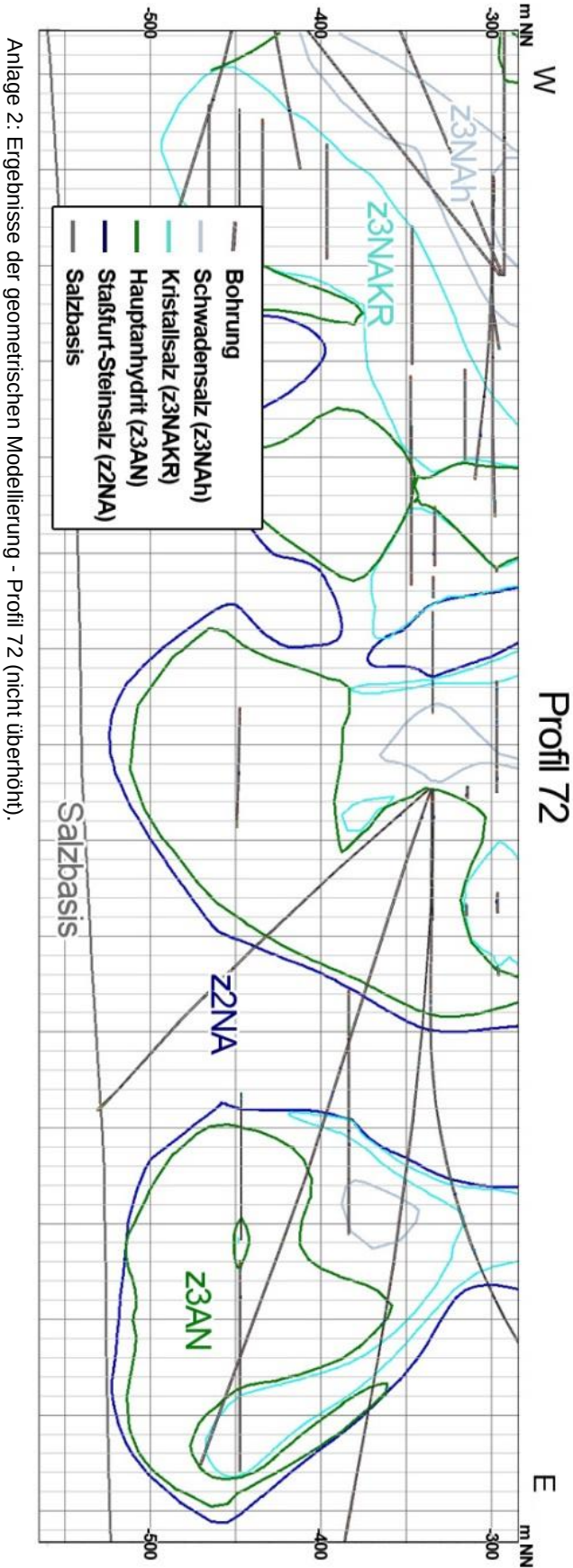
Anlage 1: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 70.....	186
Anlage 2: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 72.....	187
Anlage 3: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 73.....	188
Anlage 4: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 74.....	189
Anlage 5: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 75.....	190
Anlage 6: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 76.....	191
Anlage 7: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 77.....	192
Anlage 8: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 78.....	193
Anlage 9: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 79.....	194
Anlage 10: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des CaSO_4 -Gehalts im Grundriss der 521 m Sohle.....	195
Anlage 11: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des MgSO_4 -Gehalts im Grundriss der 521 m Sohle.....	195
Anlage 12: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des KCl-Gehalts im Grundriss der 521 m Sohle.....	196
Anlage 13: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des CaSO_4 -Gehalts im Grundriss der 489 m Sohle.....	196
Anlage 14: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des MgSO_4 -Gehalts im Grundriss der 489 m Sohle.....	197
Anlage 15: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des KCl-Gehalts im Grundriss der 489 m Sohle.....	197
Anlage 16: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des CaSO_4 -Gehalts im Grundriss der 440 m Sohle.....	198
Anlage 17: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des MgSO_4 -Gehalts im Grundriss der 440 m Sohle.....	198
Anlage 18: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des KCl-Gehalts im Grundriss der 440 m Sohle.....	199
Anlage 19: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des CaSO_4 -Gehalts im Grundriss der 403 m Sohle.....	199
Anlage 20: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des MgSO_4 -Gehalts im Grundriss der 403 m Sohle.....	200
Anlage 21: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des KCl-Gehalts im Grundriss der 403 m Sohle.....	200
Anlage 22: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 14N und 14S.....	201
Anlage 23: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 16 und 20.....	201

Anlage 24: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 20aN und 20aS.	201
Anlage 25: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 22 und 23.	202
Anlage 26: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 24N und 24S	202
Anlage 27: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 25 und 25a.	202
Anlage 28: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 26 und 27.	203
Anlage 29: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 28 und 30.	203
Anlage 30: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 31 und 32.	203
Anlage 31: Auswertung von Angaben zur Färbung innerhalb der Kristallsalzlager anhand numerischer Klassen (Erläuterung der Klassenbildung siehe Kapitel 6.3.1.1).	204
Anlage 32: Korngrößenverteilung innerhalb der Kristallsalzlager anhand numerischer Klassen (Erläuterung der Klassenbildung siehe Kapitel 6.3.1.1).	205
Anlage 33: Ausprägung des sulfatischen Saums einzelner Kristallsalzlager anhand numerischer Klassen (Erläuterung der Klassenbildung siehe Kapitel 6.3.1.4).	206

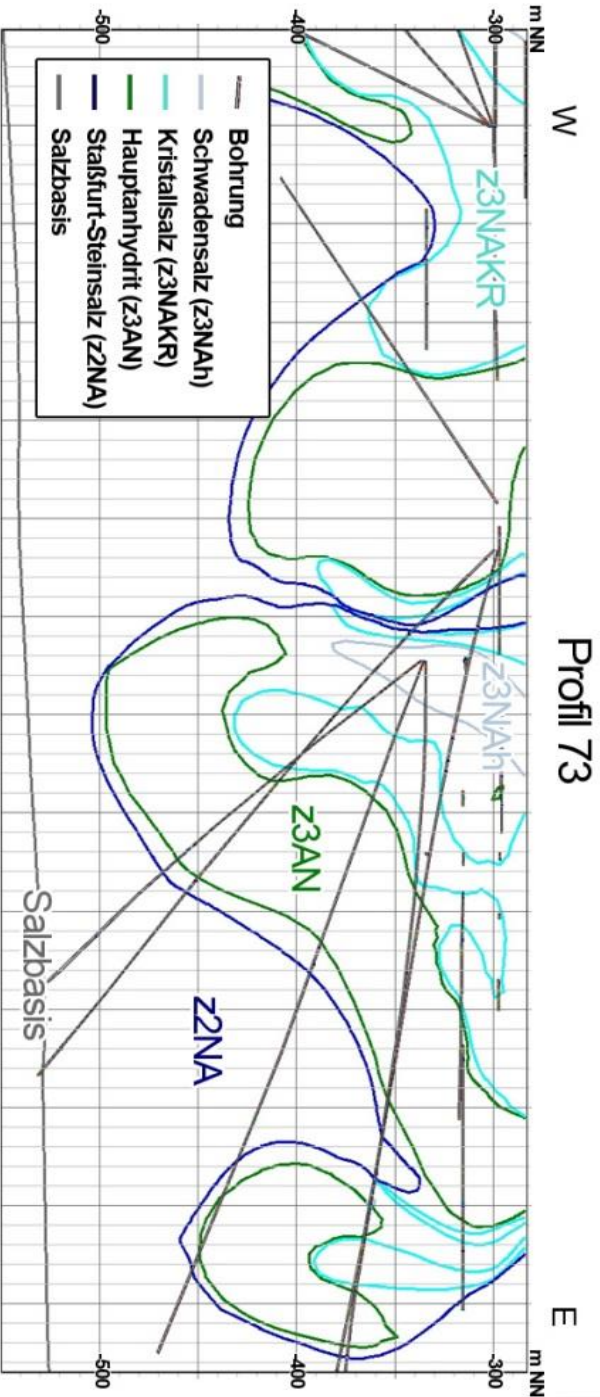
Anlagen



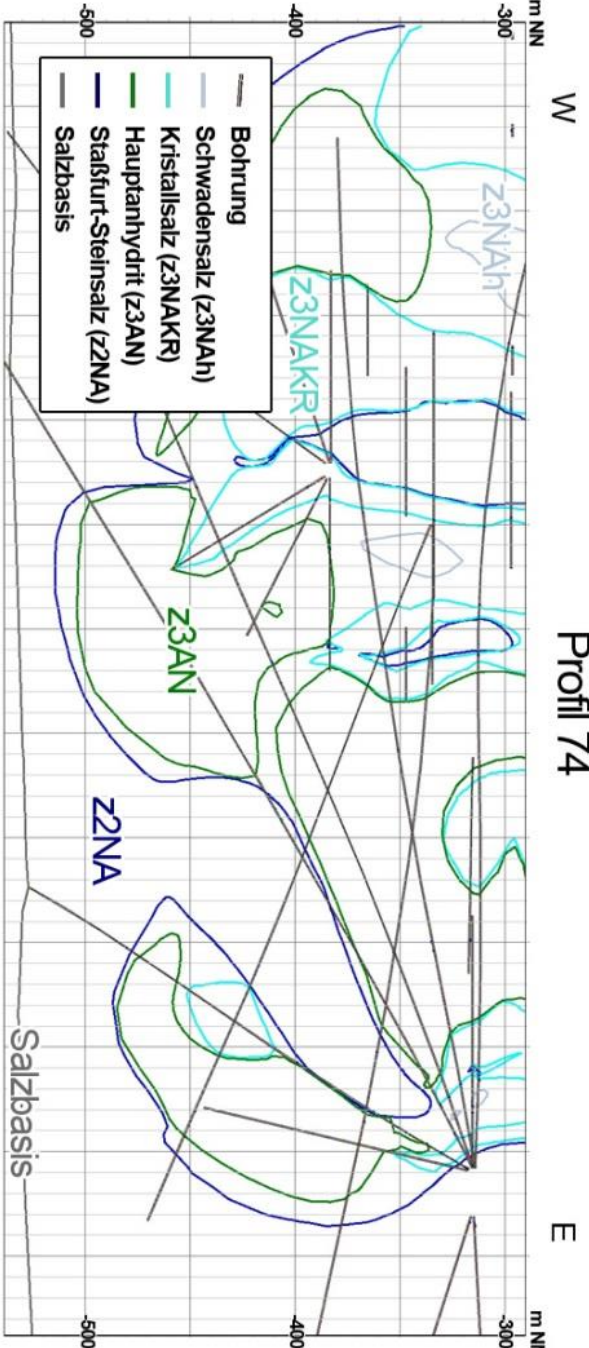
Anlage 1: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 70 (nicht überhöht).



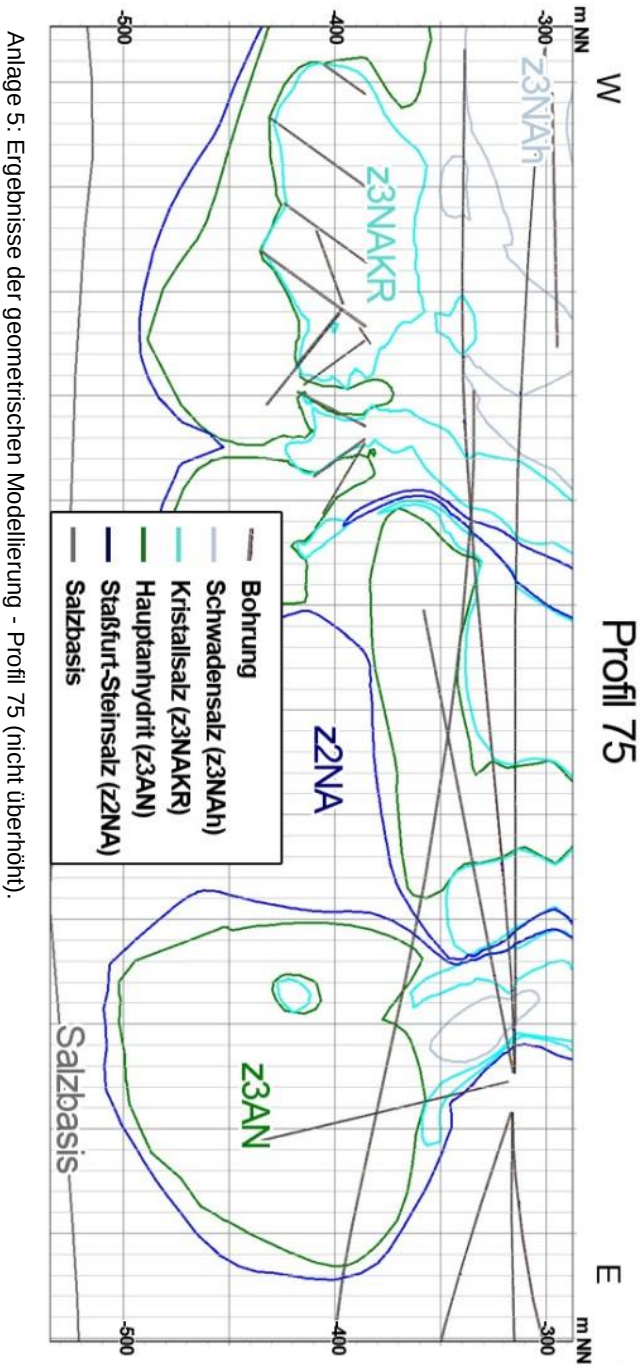
Anlage 2: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 72 (nicht überhöht).



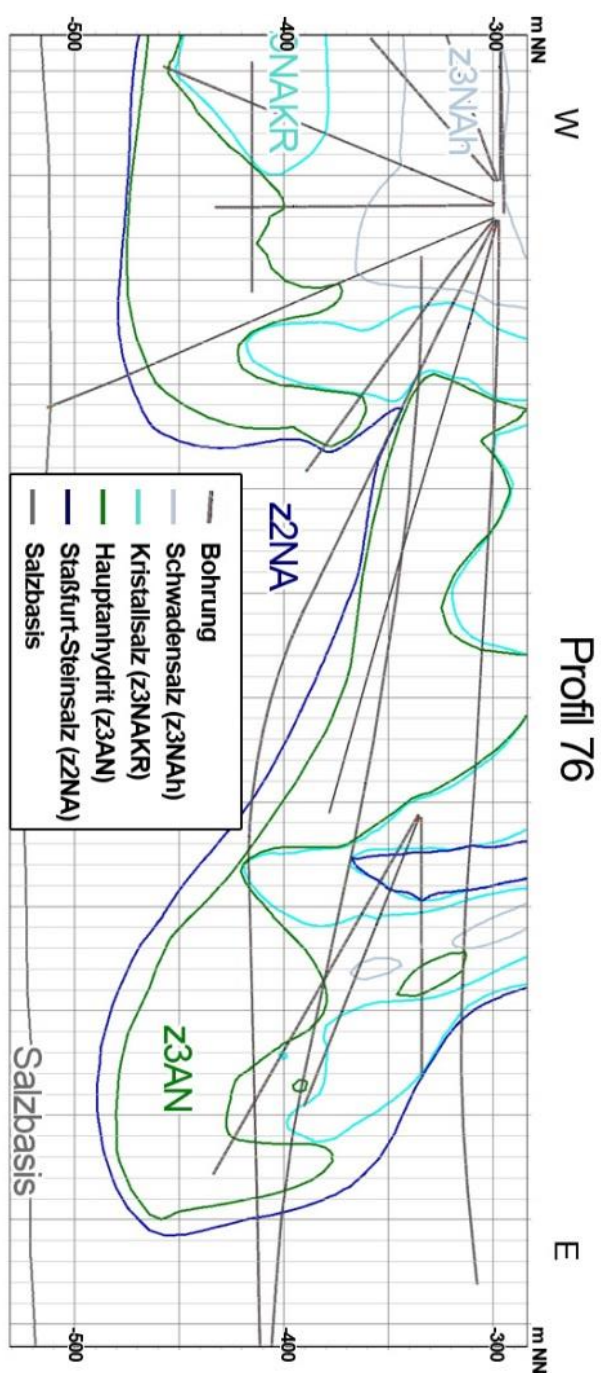
Anlage 3: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 73 (nicht überhöht).



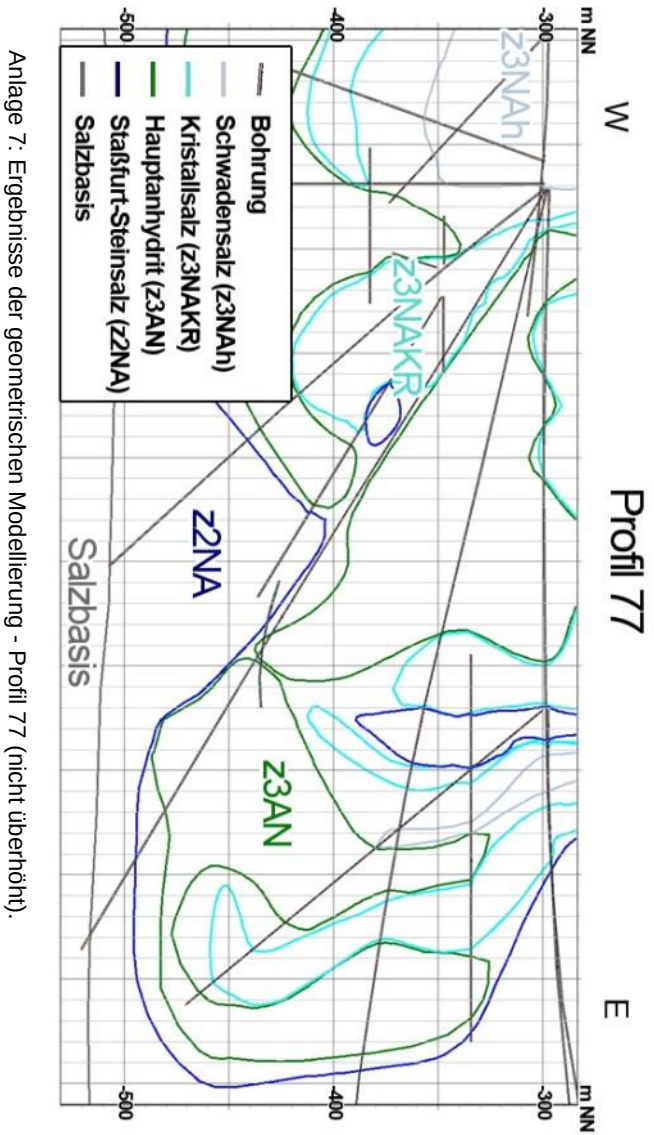
Anlage 4: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 74 (nicht überhöht),



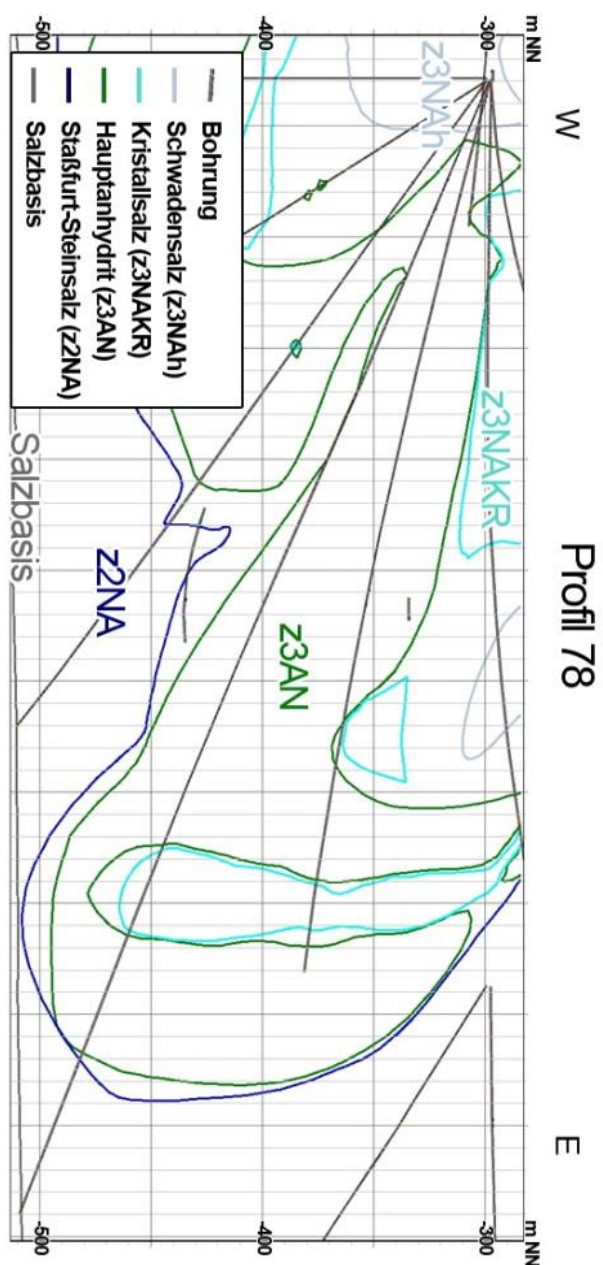
Anlage 5: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 75 (nicht überhöht).



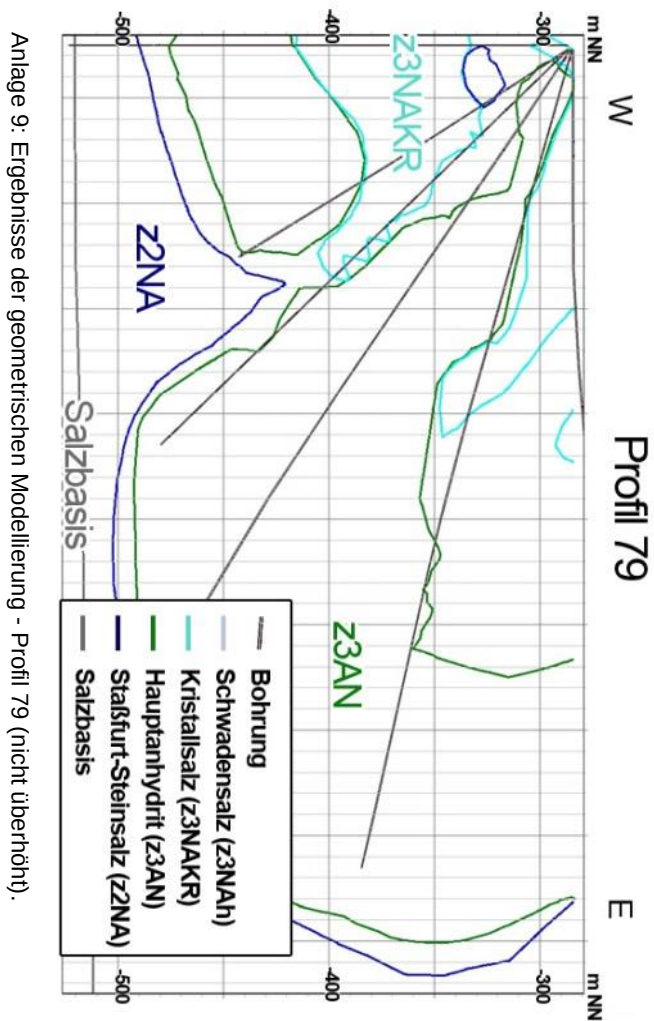
Anlage 6: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 76 (nicht überhöht).



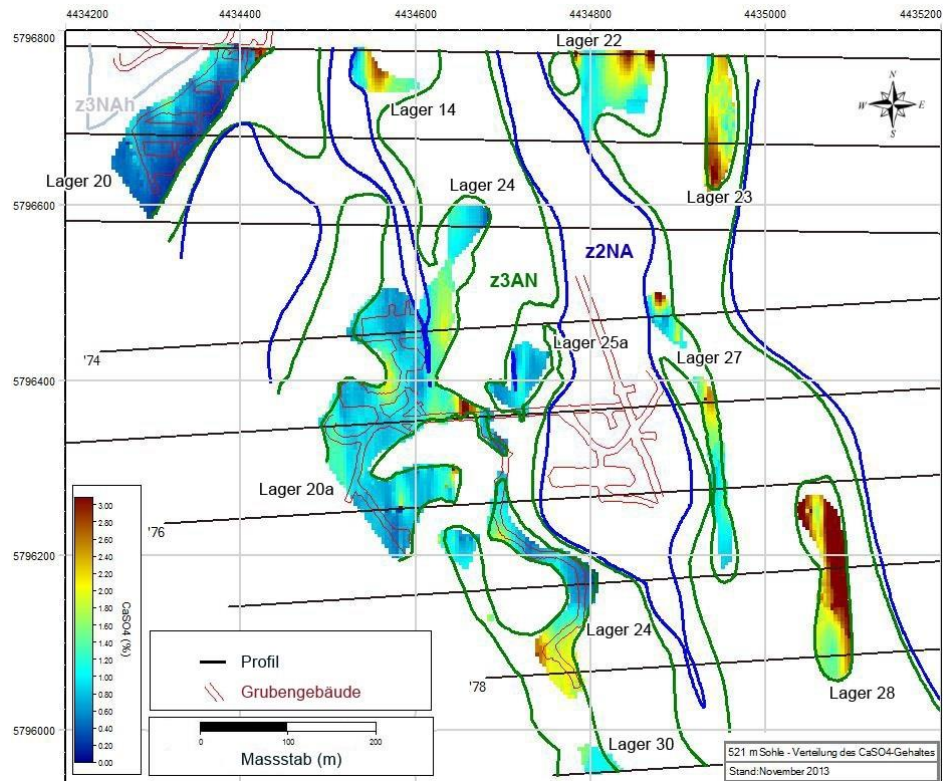
Anlage 7: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 77 (nicht überhöht).



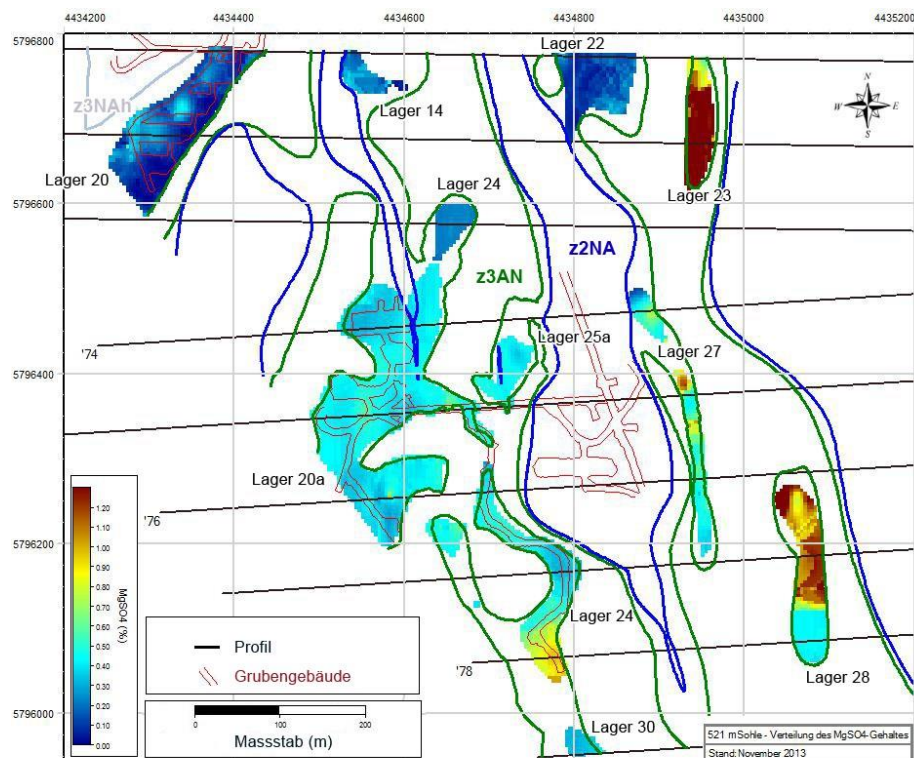
Anlage 8: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 78 (nicht überhöht).



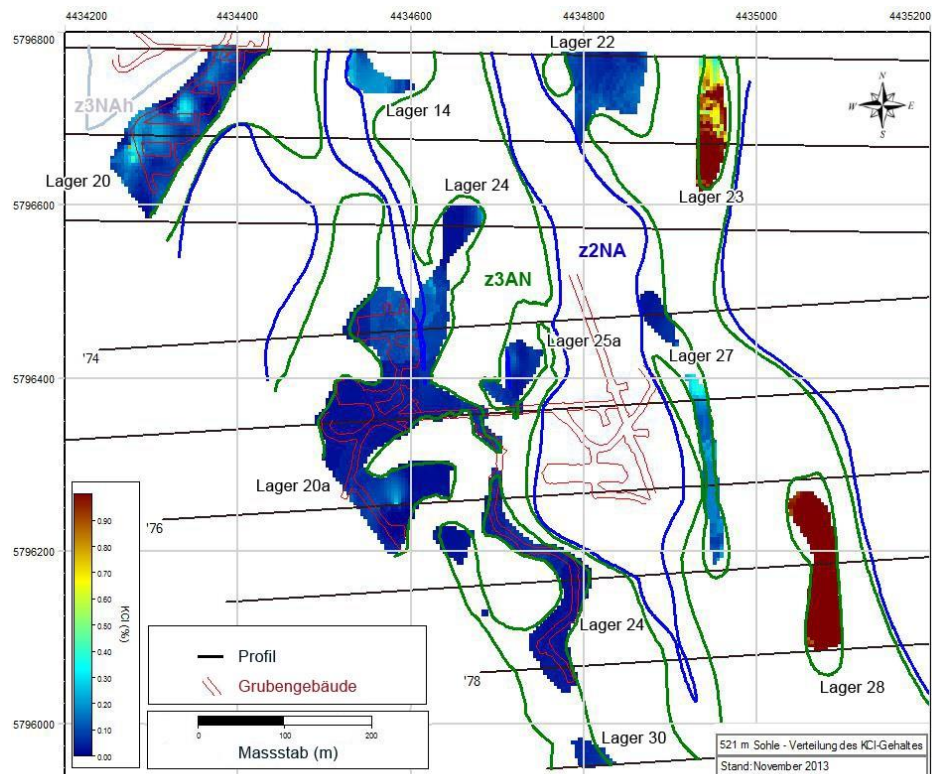
Anlage 9: Ergebnisse der geometrischen Modellierung - Profil 79 (nicht überhöht).



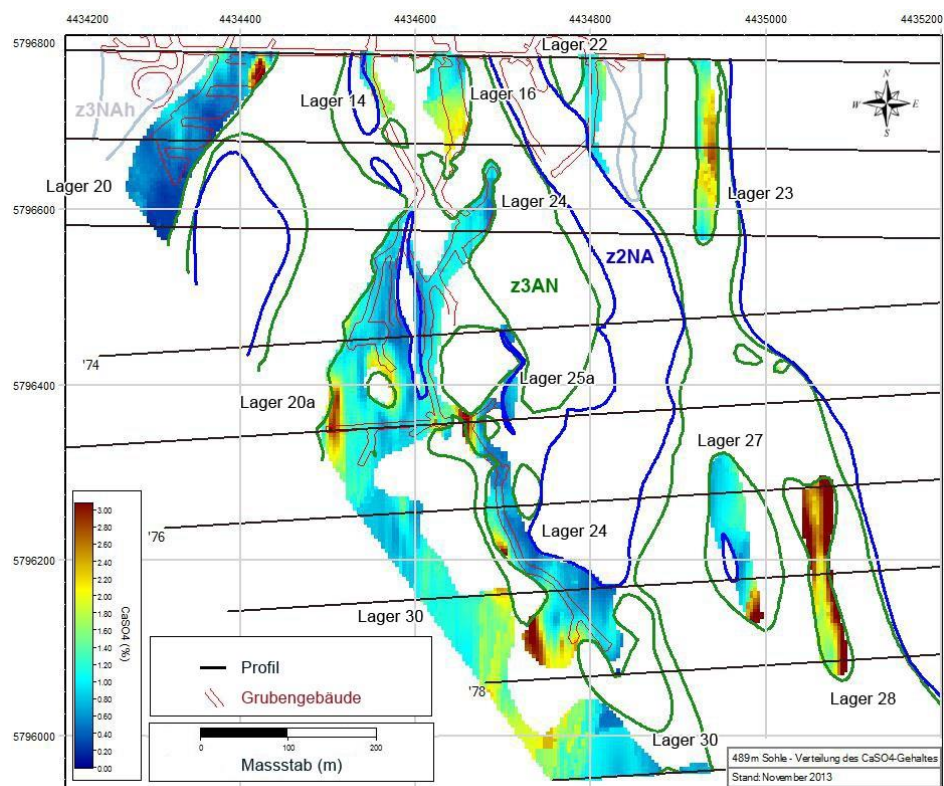
Anlage 10: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des CaSO_4 -Gehalts im Grundriss der 521 m Sohle.



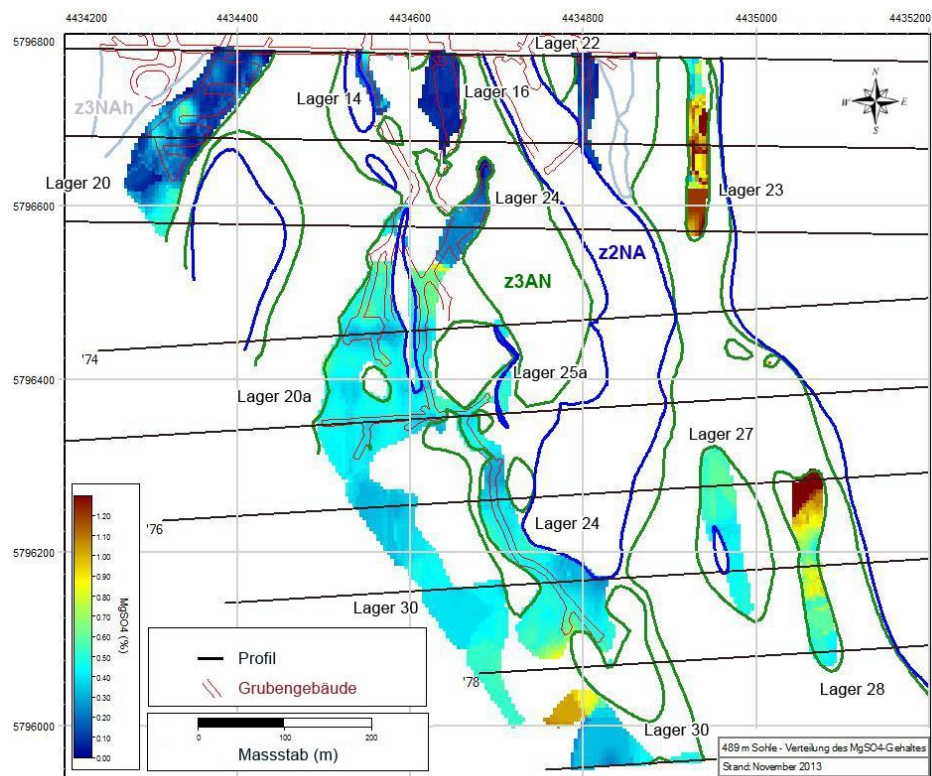
Anlage 11: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des MgSO_4 -Gehalts im Grundriss der 521 m-Sohle.



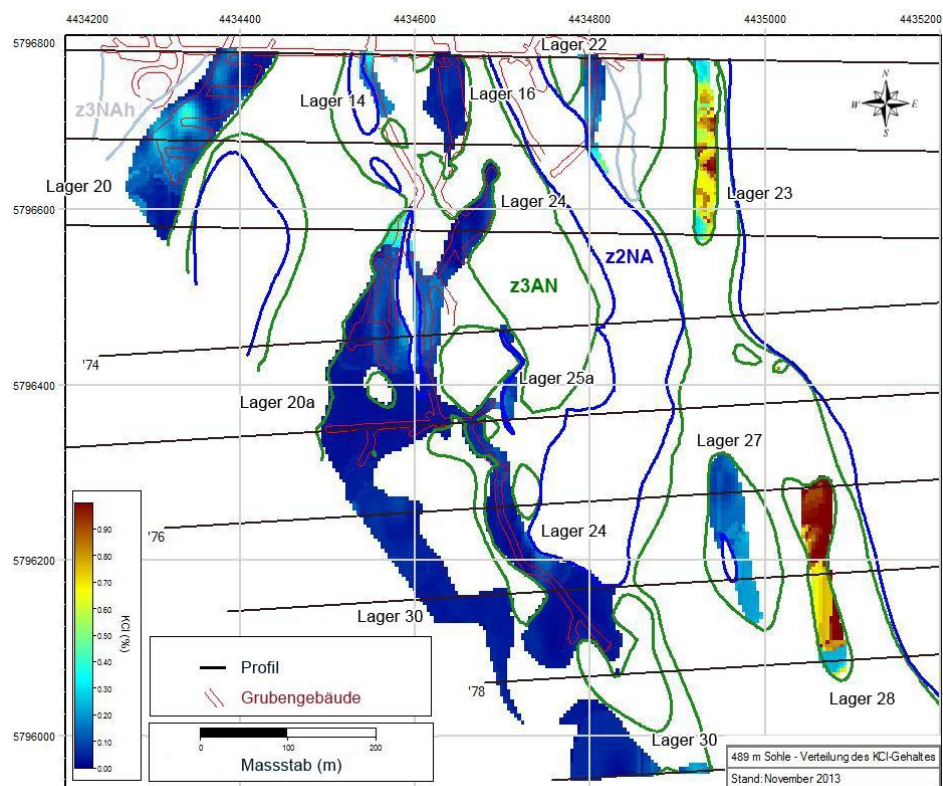
Anlage 12: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des KCl-Gehalts im Grundriss der 521 m-Sohle.



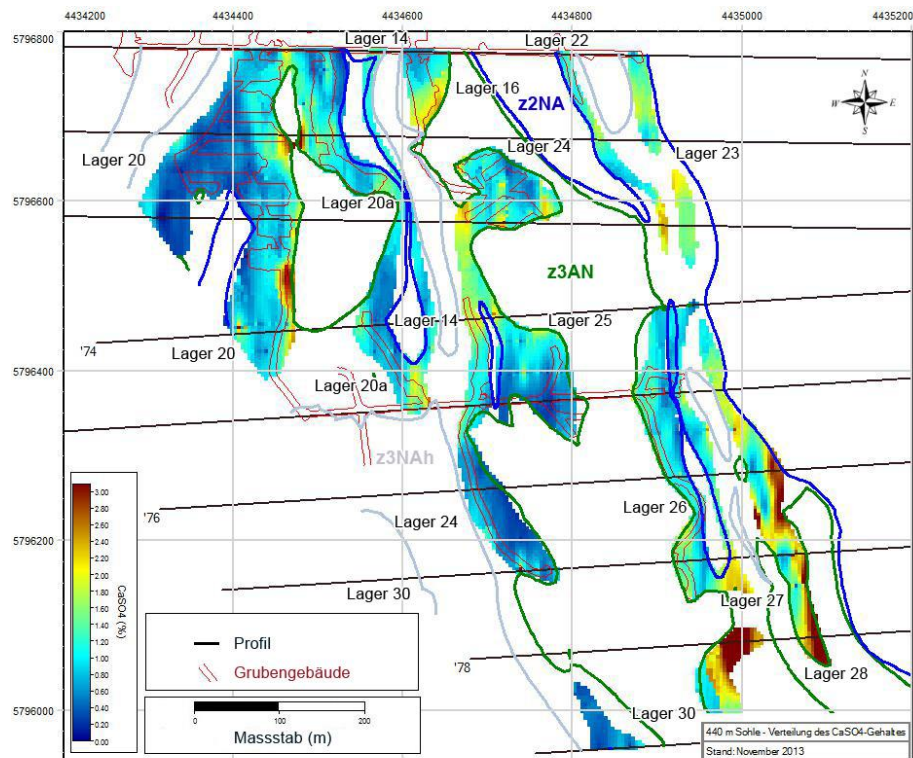
Anlage 13: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des CaSO₄-Gehalts im Grundriss der 489 m-Sohle.



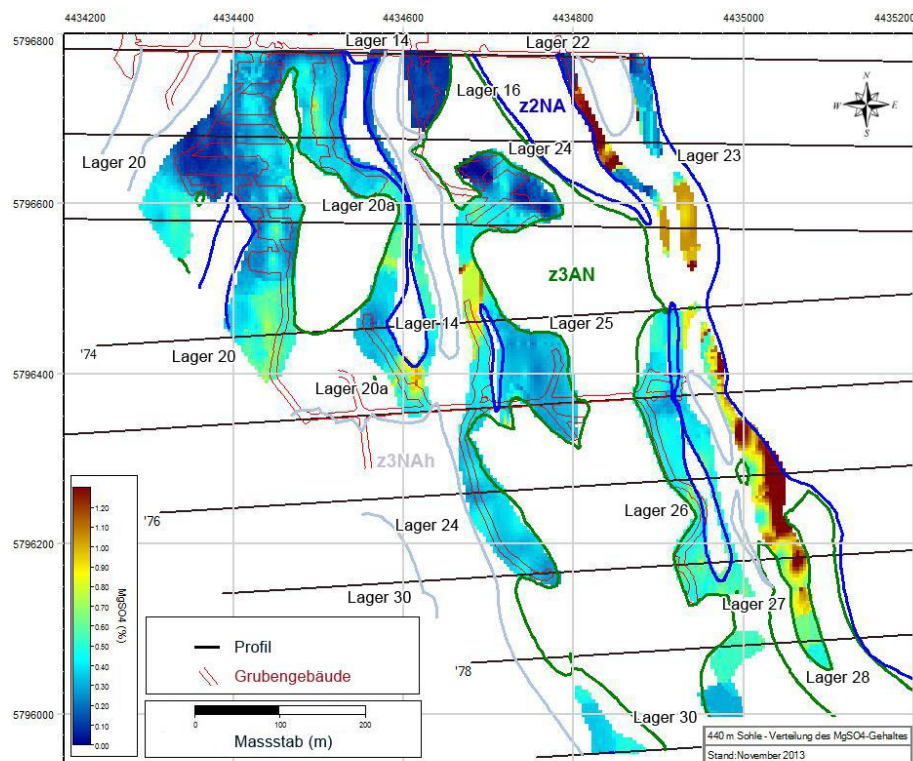
Anlage 14: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des MgSO_4 -Gehalts im Grundriss der 489 m-Sohle.



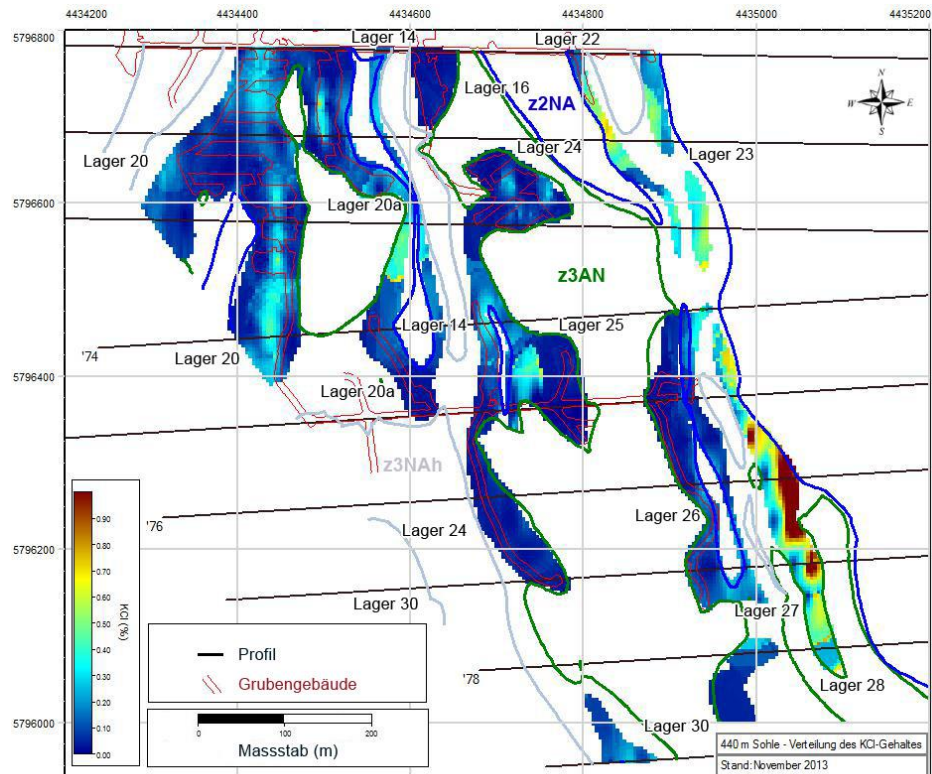
Anlage 15: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des KCl-Gehalts im Grundriss der 489 m-Sohle.



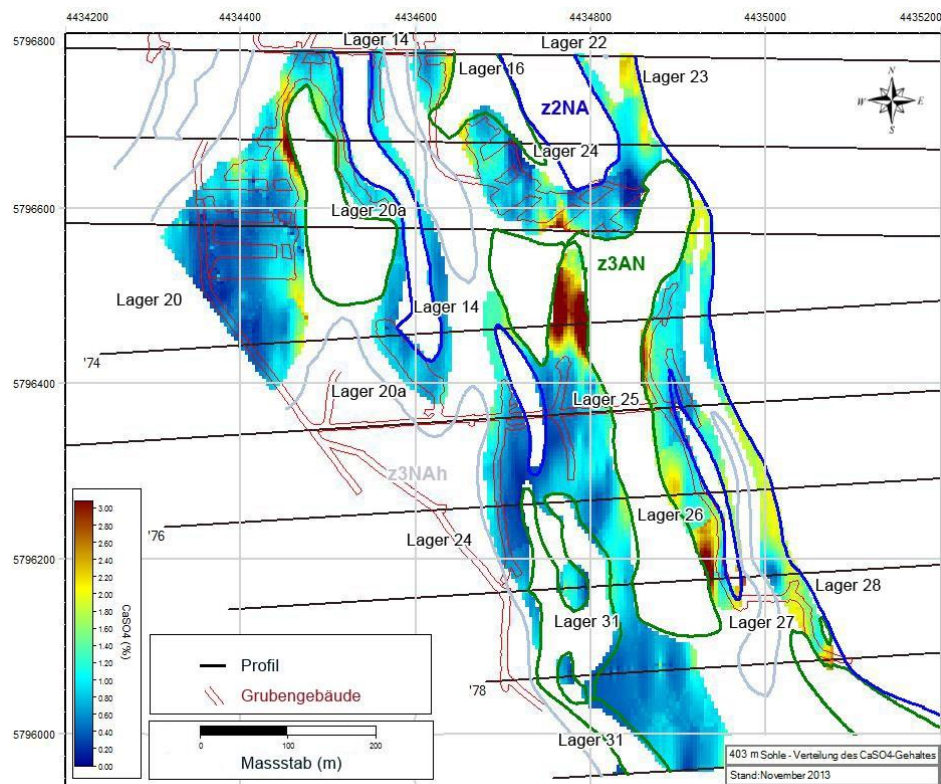
Anlage 16: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des CaSO_4 -Gehalts im Grundriss der 440 m-Sohle.



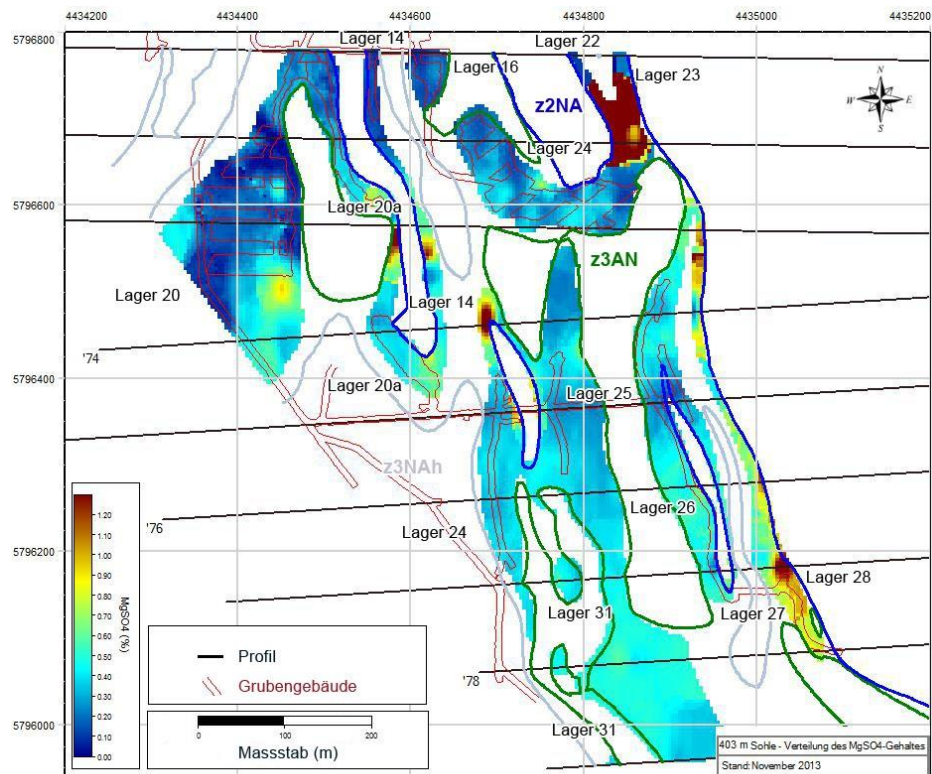
Anlage 17: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des MgSO_4 -Gehalts im Grundriss der 440 m-Sohle.



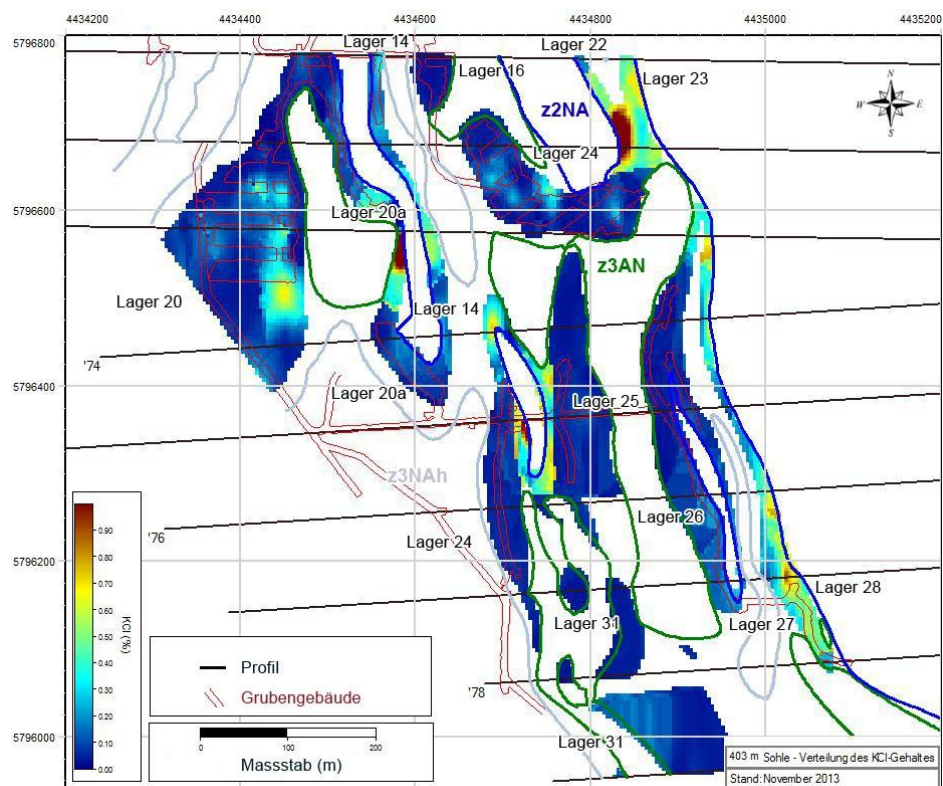
Anlage 18: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des KCl-Gehalts im Grundriss der 440 m-Sohle.



Anlage 19: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des CaSO_4 -Gehalts im Grundriss der 403 m-Sohle.



Anlage 20: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des MgSO_4 -Gehalts im Grundriss der 403 m-Sohle.



Anlage 21: Interpolationsergebnis (4-m-Grid, Ordinary Kriging) des KCl-Gehalts im Grundriss der 403 m-Sohle.

Anlage 22: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 14N und 14S.

	Lager 14N				Lager 14S			
	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	345	345	345	267	259	259	259	51
Minimum [%]	92,90	0,19	0,06	0,020	90,55	0,31	0,20	0,020
1. Quartil [%]	97,98	0,68	0,13	0,040	98,06	0,64	0,35	0,030
Median [%]	98,53	0,92	0,30	0,060	98,42	1,05	0,40	0,050
3. Quartil [%]	98,90	1,39	0,41	0,210	98,82	1,43	0,50	0,080
Maximum [%]	99,57	6,48	1,47	1,140	99,34	8,90	2,33	0,330
Mittelwert [%]	98,30	1,18	0,32	0,156	98,29	1,15	0,47	0,074
Standardabw. [%]	0,97	0,85	0,25	0,186	0,88	0,81	0,23	0,065
Varianz	0,94	0,73	0,06	0,035	0,78	0,65	0,05	0,004

Anlage 23: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 16 und 20 (* = berechneter Nullwert).

	Lager 16				Lager 20			
	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	507	507	507	507	3793	3793	3793	3663
Minimum [%]	94,94	0,05	<0,01*	<0,001*	84,72	0,01	<0,01*	<0,001*
1. Quartil [%]	98,63	0,38	0,02	0,020	98,51	0,33	0,05	0,029
Median [%]	99,05	0,69	0,13	0,030	99,03	0,58	0,21	0,041
3. Quartil [%]	99,40	1,03	0,37	0,050	99,39	0,96	0,40	0,140
Maximum [%]	99,91	4,80	0,87	0,540	100,00	13,02	3,43	1,440
Mittelwert [%]	98,95	0,79	0,20	0,047	98,83	0,75	0,27	0,116
Standardabw.	0,65	0,60	0,19	0,064	0,86	0,67	0,26	0,160
Varianz	0,42	0,36	0,04	0,004	0,74	0,45	0,07	0,026

Anlage 24: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 20aN und 20aS.

	Lager 20aN				Lager 20aS			
	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	339	339	339	339	1435	1435	1431	378
Minimum [%]	91,50	0,07	0,01	0,010	85,67	0,03	0,10	0,010
1. Quartil [%]	98,10	0,57	0,30	0,030	98,34	0,58	0,35	0,020
Median [%]	98,60	0,92	0,35	0,033	98,69	0,82	0,40	0,020
3. Quartil [%]	99,09	1,27	0,41	0,058	98,95	1,14	0,45	0,030
Maximum [%]	99,72	7,79	2,24	3,180	99,67	13,83	2,43	0,340
Mittelwert [%]	98,45	1,09	0,35	0,087	98,53	0,98	0,40	0,033
Standardabw. [%]	0,95	0,83	0,21	0,209	0,81	0,78	0,14	0,037
Varianz	0,90	0,69	0,04	0,044	0,65	0,61	0,02	0,001

Anlage 25: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 22 und 23 (* = berechneter Nullwert).

	Lager 22				Lager 23			
	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	230	230	230	159	536	536	536	536
Minimum [%]	88,83	0,21	0,02	0,020	58,93	0,02	<0,01*	<0,001*
1. Quartil [%]	98,12	0,70	0,06	0,050	96,41	0,56	0,11	0,051
Median [%]	98,65	0,97	0,18	0,070	98,11	1,15	0,49	0,172
3. Quartil [%]	99,15	1,22	0,54	0,151	98,90	2,04	1,00	0,672
Maximum [%]	99,68	7,27	7,66	2,590	99,75	12,24	21,91	6,920
Mittelwert [%]	98,32	1,14	0,38	0,165	97,01	1,64	0,84	0,511
Standardabw. [%]	1,42	0,86	0,68	0,302	3,71	1,71	1,51	0,845
Varianz	2,02	0,74	0,46	0,091	13,75	2,93	2,28	0,714

Anlage 26: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 24N und 24S (* = berechneter Nullwert).

	Lager 24N				Lager 24S			
	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	1112	1112	1112	1112	1123	1123	1123	408
Minimum [%]	92,00	0,03	<0,01*	0,010	80,18	0,03	<0,01*	0,010
1. Quartil [%]	98,50	0,49	0,14	0,020	98,59	0,39	0,30	0,019
Median [%]	98,90	0,74	0,30	0,031	98,99	0,57	0,35	0,020
3. Quartil [%]	99,21	1,07	0,40	0,051	99,21	0,92	0,45	0,030
Maximum [%]	99,90	7,87	3,51	1,070	99,65	19,24	3,22	1,170
Mittelwert [%]	98,75	0,90	0,29	0,064	98,70	0,84	0,38	0,039
Standardabw. [%]	0,86	0,76	0,21	0,100	1,08	1,02	0,15	0,073
Varianz	0,74	0,58	0,04	0,010	1,16	1,05	0,02	0,005

Anlage 27: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 25 und 25a.

	Lager 25				Lager 25a			
	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	773	773	773	306	67	67	67	67
Minimum [%]	90,40	0,06	0,09	0,010	96,88	0,26	0,20	0,010
1. Quartil [%]	98,46	0,51	0,26	0,013	98,51	0,64	0,40	0,020
Median [%]	98,84	0,75	0,32	0,021	98,75	0,75	0,44	0,040
3. Quartil [%]	99,10	1,10	0,40	0,040	98,85	0,89	0,48	0,081
Maximum [%]	99,70	9,29	5,42	3,310	99,24	2,00	1,83	0,710
Mittelwert [%]	98,62	0,97	0,34	0,048	98,66	0,83	0,46	0,062
Standardabw. [%]	0,98	0,93	0,22	0,196	0,39	0,33	0,18	0,091
Varianz	0,96	0,86	0,05	0,038	0,15	0,11	0,03	0,008

Anlage 28: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 26 und 27 (* = berechneter Nullwert).

	Lager 26				Lager 27			
	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	672	672	672	539	218	218	218	186
Minimum [%]	87,60	0,04	<0,01*	0,010	89,72	0,14	0,14	0,020
1. Quartil [%]	98,17	0,70	0,30	0,020	97,73	0,67	0,34	0,021
Median [%]	98,55	1,01	0,39	0,022	98,61	0,90	0,43	0,030
3. Quartil [%]	98,84	1,35	0,51	0,049	98,90	1,71	0,52	0,070
Maximum [%]	99,87	11,59	4,15	2,410	99,60	9,63	1,47	0,650
Mittelwert [%]	98,23	1,21	0,46	0,107	98,10	1,38	0,44	0,071
Standardabw. [%]	1,36	0,98	0,42	0,283	1,34	1,24	0,18	0,098
Varianz	1,84	0,96	0,18	0,080	1,79	1,54	0,03	0,010

Anlage 29: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 28 und 30 (* = berechneter Nullwert).

	Lager 28				Lager 30			
	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	464	464	464	301	279	279	279	225
Minimum [%]	73,50	0,04	<0,01*	0,040	91,60	0,05	0,16	0,010
1. Quartil [%]	95,54	0,53	0,45	0,203	98,38	0,44	0,33	0,020
Median [%]	97,61	1,47	0,71	0,413	98,80	0,71	0,40	0,020
3. Quartil [%]	98,61	2,41	1,26	1,091	99,17	1,04	0,52	0,050
Maximum [%]	99,87	9,34	12,46	4,930	99,64	7,85	1,39	0,420
Mittelwert [%]	96,69	1,79	0,99	0,757	98,60	0,87	0,46	0,053
Standardabw. [%]	2,75	1,56	0,90	0,772	0,86	0,71	0,22	0,073
Varianz	7,57	2,43	0,81	0,596	0,74	0,51	0,05	0,005

Anlage 30: Statistische Kenngrößen der Proben in den Lagern 31 und 32.

	Lager 31				Lager 32			
	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	KCl
Anzahl Proben	356	356	356	175	28	28	28	28
Minimum [%]	91,72	0,07	0,21	0,010	96,58	0,42	0,31	0,020
1. Quartil [%]	98,68	0,37	0,35	0,020	97,98	0,78	0,38	0,020
Median [%]	98,94	0,56	0,45	0,030	98,38	1,12	0,40	0,020
3. Quartil [%]	99,12	0,82	0,50	0,070	98,80	1,45	0,44	0,020
Maximum [%]	99,55	7,54	0,68	0,290	99,13	2,93	0,54	0,200
Mittelwert [%]	98,83	0,67	0,42	0,054	98,37	1,19	0,41	0,037
Standardabw. [%]	0,57	0,54	0,10	0,056	0,60	0,56	0,05	0,044
Varianz	0,33	0,29	0,01	0,003	0,36	0,31	0,00	0,002

Anlage 31: Auswertung von Angaben zur Färbung innerhalb der Kristallsalzlager anhand numerischer Klassen (Erläuterung der Klassenbildung siehe Kapitel 6.3.1.1).

Lager	n	Klasse					Median	Klasse 1 / n
		1	2	3	4	5		
L14N	7	7					1	1,00
L14S	10	9	1				1	0,90
L16	8	7	1				1	0,88
L20	21	20	1				1	0,95
L 20aN	3	3					1	1,00
L 20aS	26	20	6				1	0,77
L22	4	4					1	1,00
L23	7	5				2	1	0,71
L24N	21	21					1	1,00
L24S	37	32	3	2			1	0,86
L25	8	8					1	1,00
L25a	1	1					1	1,00
L26	11	11					1	1,00
L27	13	13					1	1,00
L28	12	9	3				1	0,75
L30	7	6		1			1	0,86
L31	3	3					1	1,00

Anlage 32: Korngrößenverteilung innerhalb der Kristallsalzlager anhand numerischer Klassen (Erläuterung der Klassenbildung siehe Kapitel 6.3.1.1).

Lager	n	Klasse							Median	Std.- Abw.	Ø	Kommentar
		1	2	3	4	5	6	7				
L14N	7			3			1	3	6	2,0	5,1	Im Süden grobspätig
L14S	10			7	2	1			3	0,7	3,4	Rel. homogen
L16	8				8				4	0,0	4,0	Sehr homogen
L20	23			8	5	4	5	1	4	1,3	4,4	Richtung Westen und über ANT2a grobkristallin, östlich über z3AN mittelkristallin
L 20aN	3			1	2				3	0,3	3,7	Rel. homogen
L 20aS	27			16	5	1	3	2	3	1,3	3,9	Grobspätig ausschließlich in Nähe von ANT2b, in z3AN-Klippen-Bereich mittelkristallin
L22	4			1	3				4	0,5	3,8	Rel. homogen
L23	7			5	2				3	0,5	3,3	Sehr homogen
L24N	21			14	3	2	2		3	1,0	3,6	Im Lagertiefsten grobspätig (von z3AN umschlossen)
L24S	38		1	12	3	6	10	5	5	1,5	4,6	Im Lagertiefsten grobspätig (von z3AN umschlossen), feinkristallin in z2NA / z2KSt-Nähe
L25	8		1	1	3	2	1		4	1,2	4,1	Im Muldenzentrum grobspätig
L25a	1			1					3	0,0	3,0	-
L26	11			6	5				3	0,5	3,5	Rel. homogen
L27	13	1		10		2			3	1,0	3,2	Rel. homogen
L28	12			9	2	1			3	0,7	3,3	Rel. homogen
L30	7	2		4		1			3	1,4	2,7	Mittel- bis grobkristallin in z2NA / z2KSt-Nähe, feinkristallin bei z3AN-Klippe
L31	3			1	1	1			4	1,0	4,0	Im Muldenzentrum grobspätig

Anlage 33: Ausprägung des sulfatischen Saums einzelner Kristallsalzlager anhand numerischer Klassen (Erläuterung der Klassenbildung siehe Kapitel 6.3.1.4).

Lager	n	Klasse				Median	Klasse 1 / n	Kommentar
		1	2	3	4			
L14N	5	3	1	1	0	1	0,60	erhöht
L14S	5	5	0	0	0	1	1,00	normal
L16	11	7	4	0	0	1	0,64	erhöht
L20	32	23	4	3	2	1	0,72	erhöht
L 20aN	5	5	0	0	0	1	1,00	normal
L 20aS	13	5	6	1	1	2	0,38	stark erhöht
L22	7	6	0	1	0	1	0,86	normal
L23	9	6	2	1	0	1	0,67	erhöht
L24N	13	8	4	0	1	1	0,62	erhöht
L24S	16	15	0	0	1	1	0,94	normal
L25	11	7	1	3	0	1	0,64	erhöht
L25a	2	2	0	0	0	1	1,00	normal
L26	12	10	2	0	0	1	0,83	normal
L27	1	0	1	0	0	2	0,00	stark erhöht
L28	6	2	2	1	1	2	0,33	stark erhöht
L30	2	1	1	0	0	1	0,50	erhöht
L31	3	3	0	0	0	1	1,00	normal