

Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet

-

Ein Beitrag zur nachhaltigen Lagerstättennutzung



Von der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat.

vorgelegt

von M.Sc. Anne Engler

geboren am 05.07.1987 in Halle (Saale)

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. F. Christoph Breitkreuz

Prof. Dr. rer. nat. Silvio Zeibig

Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Gursky

Tag der Verleihung: 22.08.2019

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Forschungsarbeit am Institut für Mineralogie im Fachbereich Lagerstättenlehre und Petrologie an der TU Bergakademie Freiberg. Die dreijährige Forschungsarbeit wurde durch die K+S Aktiengesellschaft bzw. die K+S KALI GmbH gefördert. Ich danke dem Institut und den beiden Firmen für die Initiierung des Forschungsthemas. Für die Bereitstellung von Hardware und Software zur Fertigstellung dieser Arbeit danke ich der ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH.

Mein Dank gilt all jenen, die die vorliegende Arbeit direkt oder indirekt ermöglicht haben. Insbesondere danke ich meinem Mann und meiner Familie, die mich auf meinem Weg immer motiviert und unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XI
Kurzzeichenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	XV
1 Einführung	1
2 Präzisierung der Aufgabenstellung	2
3 Wissenschaftlicher Kenntnisstand zum Werra-Kaligebiet	4
3.1 Geographische und topographische Situation	4
3.2 Regionalgeologischer Rahmen	5
3.2.1 Paläogeographie	5
3.2.2 Tektonische Einordnung und Entwicklung	8
3.2.3 Strukturinventar von Subsalinar, Salinar und Suprasalinar im Werra-Kaligebiet	12
3.2.3.1 Tektonische Erscheinungsformen im Subsalinar	12
3.2.3.2 Tektonische Erscheinungsformen im Salinar	13
3.2.3.3 Tektonische Erscheinungsformen im Suprasalinar	18
3.3 Stratigraphische Gliederung	22
3.3.1 Präzechstein	24
3.3.2 Zechstein	24
3.3.3 Postzechstein	27
4 Eingangsdaten und methodische Vorgehensweise	30
4.1 Arbeitsvorbereitung und Datenaufbereitung	32
4.1.1 Digitales Geländemodell	32
4.1.2 Geologische Karten	32
4.1.3 Bohrungsdaten aus Tagesbohrungen	34
4.1.4 Grubenrissliche Unterlagen	35
4.1.4.1 Bohrungsdaten aus Untertagebohrungen	35
4.1.4.2 Fazies- und Strukturdaten	36
4.1.4.3 Vulkanitvorkommen	36
4.1.4.4 Gasereignisse	38
4.1.4.5 Wertstoffgehalte	41
4.1.5 Georadardaten	45
4.1.6 Seismikdaten	46

4.1.7	Geomagnetik	48
4.1.8	Gravimetrie	48
4.2	Eingangsdaten und Geomodellierung	49
4.2.1	Definition Modellraum und stratigraphische Tabelle	51
4.2.2	Eingangsdaten und Erstellung Störungen	53
4.2.3	Eingangsdaten und Erstellung der Horizonte	57
5	Ergebnisse	64
5.1	Ergebnis der geologischen Modellierung	64
5.2	Güte des 3D-Strukturmodells	67
5.3	Auswertung des 3D-Strukturmodells	75
5.3.1	Isobathenpläne ausgewählter stratigraphischer Horizonte	76
5.3.2	Isopachenpläne ausgewählter stratigraphischer Abschnitte	80
5.3.3	Geologische Profile	83
5.3.4	Fazieskarten und Störungszonen	89
5.3.5	Ergebnisse zu Wertstoffgehalten	95
5.3.6	Ergebnisse zu Gasereignissen und Vulkanitvorkommen	101
5.3.6.1	Häufigkeit der Gasereignisse	101
5.3.6.2	Größe der Gas-Salz-Ausbrüche	103
5.3.6.3	Beziehungen der Häufigkeit von Gasereignissen, der Größe von Gas-Salz-Ausbrüchen, der Fazies und der Eigenschaften der Vulkanite	105
6	Diskussion der Ergebnisse	110
6.1	Ableitung zur Senkungsentwicklung des Arbeitsgebietes	110
6.2	Differenzierte geologische Entwicklung des Arbeitsgebietes unter Berücksichtigung einzelner Strukturelemente	111
6.2.1	Beginn des Zechstein	111
6.2.2	Verlauf Zechstein	114
6.2.3	Trias	118
6.2.4	Jura und Kreide	121
6.2.5	Tertiär	126
6.3	Fazielle Ausbildung der Kaliflöze in Bezug zu der geologischen Entwicklung des Arbeitsgebietes	130
6.4	Wertstoffverteilung der Kaliflöze im Hinblick auf die geologische Entwicklung des Arbeitsgebietes	132
6.5	Gasimprägnationen	135
6.6	Auswirkungen und Übertragbarkeit der Ergebnisse	137
7	Zusammenfassung	142
8	Fazit und Ausblick	146
9	Literaturverzeichnis	147
	Anlagenverzeichnis	163
	Anhangverzeichnis	164

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Lage des Arbeitsgebietes. Quellen: Grundkarte (OPENSTREETMAP, Zugriff 2017, [148]), Salzhang (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90])	5
Abbildung 2	Paläogeographische Karte des Zechsteinbeckens zur Zeit der Sedimentation der Sedimente der Staßfurt-Fm.; (gering verändert nach ZIEGLER, 1990, [213]), Rot – Arbeitsgebiet (schematisch)	7
Abbildung 3	Schematische Darstellung struktureller Großelemente des Subsalinars vor (A) und nach (B) der marinen Ingression der Zechsteinsedimente der Werra-Fm. nach ZIEGLER, (1989,) und BERTHELSEN et al., (1992,) ; Grün – Arbeitsgebiet (schematisch); HTO – Hunsrück-Taunus-Oberharz-Schwelle, OSR – Odenwald-Spessart-Rhön-Schwelle, TS – Treischfeld-Schwelle, RH - Rhenoherynikum, PZ – Phyllitzone, MKS Mitteldeutsche Kristallinschwelle, ST - Saxothuringikum	9
Abbildung 4	Schematische Darstellung von Zusammenhängen zwischen Tektonik und dem Auftreten von Salzlösungsvorkommen, (nach SCHWANDT, 2005, [177] entnommen aus HERBERT et al., 2007, [62])	17
Abbildung 5	Salzlösungsvorkommen in Umbildungsbereichen der Kaliflöze Thüringen und Hessen im Werra-Kalirevier (SCHWANDT, 1988, [176])	18
Abbildung 6	Vereinfachte Geologische Übersichtskarte der Niederhessischen Senke (nach WALTER, 2007, [200]). AG – Altmorscher Graben, FNG – Fritzlar Naumberger Grabenzone, FuG – Fuldaer Grabenzone, KG – Kasseler Grabenzone, NSG – Netra- und Sontra-Graben, RG – Remsfelder Graben, Rot – Arbeitsgebiet (schematisch)	20
Abbildung 7	Schematischer Ablauf zur Erarbeitung eines 3D-Modells (modifiziert nach STEINBORN, 2008, [187])	31
Abbildung 8	Lageverzug von Strukturelementen am Beispiel unterschiedlicher Quellen	33
Abbildung 9	A-B: Anpassung des Ausstrichs der Basis des Oberen Buntsandstein (so) unter Berücksichtigung der Bhg. 864; C-D: Anpassung des Ausstrichs der Basis des Mittleren Buntsandstein (smV) unter Berücksichtigung der Bhg. 915. (Cyan - Salzhanginnengrenze; Blau - Salzhangaußengrenze; Orange - Ausstrich (so); Rosarot - Ausstrich (smV); Magenta - Arbeitsgebiet; Gelb – Tagesbohrung)	34

Abbildung 10	Lageungenauigkeiten bei der Zuweisung von Koordinaten am Beispiel einer Vertikalbohrung (A) und einer Horizontalbohrung (B)	36
Abbildung 11	Zuordnung der Vulkanitvorkommen zu GroÙelementen. A: Datengrundlage aus den grubenrisslichen Unterlagen, B: Zuordnung entsprechend lokaler Zusammenhänge; einem GroÙelement zugeordnete Polylinien und Punktaufschlüsse sind farblich entsprechend hervorgehoben	37
Abbildung 12	Aufschlüsse von Vulkaniten in der Grube UB. A: Übergang von Dyke zu Sill; B: geringfügiger vertikaler Schichtversatz entlang eines Dykes, C: geringfügiger vertikaler Schichtversatz im Übergang von Sill zu Dyke	37
Abbildung 13	A: Datengrundlage: Beispielhafte Darstellung eines Rissausschnittes aus den grubenrisslichen Unterlagen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]); B: Gasrachel im Übergang des Kaliflöz Thüringen zum Mittleren Werra-Steinsalz	39
Abbildung 14	Beziehung des CO ₂ -Volumens und der Auswurfmasse der Salzgesteine (nach MÜLLER, 1958, [146])	40
Abbildung 15	Boxplots der K ₂ O- (A) und Kieseritgehalte (B) auf der 1. und 2. Sohle	44
Abbildung 16	A: Georadarmessungen im Arbeitsgebiet; B: Draufsicht Messprofile in ausgewähltem Bereich; C: SE-Ansicht der Messprofile und Reflektoren im ausgewählten Bereich	46
Abbildung 17	Übersicht der im Arbeitsgebiet vorhandenen Seismikprofile	47
Abbildung 18	A: Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes [nT] mit Messpunkt Abstand von 4 m ohne Korrektur anthropogener Effekte, gering verändert nach BGR, (2009,), Arbeitsgebiet (Schwarz); B: Gradient des magnetischen Totalfeldes [nT/m] mit als Vulkanite interpretierten Anomalien im Feld Marbach-Nord (GGL, 2013, [50]).	48
Abbildung 19	Überblick über die Arbeitsschritte im Workflow Structure and Stratigraphy	50
Abbildung 20	Schematische Darstellung des stratigraphischen Modells des Arbeitsgebietes, vgl. auch Tabelle 3 (S. 22) und Tabelle 4 (S. 23)	53
Abbildung 21	A: Darstellung der aus der Seismik resultierenden Linienelemente FSe014, FSe015, FSe055, FSe017 und FSe018; B: Anhand der Linienelemente erstellte Störungsfläche.	54
Abbildung 22	Neu interpretierte Störungen im Suprasalinar	55

Abbildung 23	Methodische Darstellung der Anpassung von Störungsflächen am Beispiel einer Störung im Suprasalar; A: Hilfsfläche erstellen; B: Hilfsfläche interpolieren; C: Störung darstellen; D: Störung an Horizont verschneiden; E/F: Löschen des überstehenden Bereiches	56
Abbildung 24	A – keine Berücksichtigung der nicht erreichten Basis des Horizonts in der mittleren Tagesbohrung; B – Basis Horizonts als „unreached“ definiert; Modellierung im Liegenden der Bohrspur	57
Abbildung 25	A: GK25 im Arbeitsgebiet; B: zugewiesene Ausbisslinien im Arbeitsgebiet	58
Abbildung 26	Manuelle Nachbereitung am Beispiel des Kaliflöz Hessen; A: aus dem 3D-Modell erzeugte Fläche; B: Verbreitung des Kaliflöz Hessen, Draufsicht; C: Verbreitung des Kaliflöz Hessen, SSW-Ansicht, D: anhand der Verbreitungsgrenze erzeugte vertikale Hilfsfläche; E: verschneiden beider Flächen und entfernen überflüssiger Flächenteile; F: Ergebnis; G/H: bestehende Triangulation; I: Verfeinerung Triangulation	60
Abbildung 27	Basis des Unteren Werra-Anhydrit im Bereich der Hochscholle von Wüstfeld inklusive der Darstellung der Salzbasistörungen, Blickrichtung von SSE	63
Abbildung 28	3D-Modell des Arbeitsgebietes in 5-facher Überhöhung, SSE-Ansicht (Kürzel vgl. Tabelle 4, S. 23)	66
Abbildung 29	3D-Modell ausgewählter Horizonte in 5-facher Überhöhung mit Fokus auf dem Kaliflöz Hessen, inklusive Salzbasistörungen und Vulkanitvorkommen (Kürzel vgl. Tabelle 4, S. 23)	67
Abbildung 30	Basis des Unteren Muschelkalk im Arbeitsgebiet; A: Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Tagesbohrungen (obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte [m NN] (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang; B: Ungenauigkeiten der modellierten Fläche an den Ausbisslinien des Landecker Berges; Darstellung 5-fach überhöht; C: Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Daten der Tagesbohrungen	68
Abbildung 31	Basis des Kaliflöz Hessen im Arbeitsgebiet; A: Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Tagesbohrungen (obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte [m NN] (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang; B: Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den	

	Untertagebohrungen (obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte [m NN] (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang; C: Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche der Basis des Kaliflöz Hessen von den Bohrungsdaten [m]; D - Abweichung der Tagesbohrung Nr. 217	70
Abbildung 32	Lage der erstellten Profile 1 bis 5 innerhalb des Arbeitsgebietes inklusive der Darstellung der Geländeoberkante [m NN]	84
Abbildung 33	Grafische Darstellung der Faziesanteile des Kaliflöz Thüringen in der Grube Hattorf (A), der Grube Unterbreizbach (B) sowie den beiden Gruben Hattorf und Unterbreizbach (C); Angaben zu Quadratkilometern bzw. Prozent	90
Abbildung 34	Darstellung ausgewählter Faziesbereiche des Kaliflöz Thüringen im Arbeitsgebiet (A – G)	92
Abbildung 35	Grafische Darstellung der Faziesanteile des Kaliflöz Hessen in der Grube Hattorf (A), der Grube Unterbreizbach (B) sowie den beiden Gruben Hattorf und Unterbreizbach (C); Angaben zu Quadratkilometern bzw. Prozent gerundet auf zwei Dezimalstellen bzw. die ganze Zahl	93
Abbildung 36	Darstellung ausgewählter Faziesbereiche des Kaliflöz Hessen im Arbeitsgebiet (A – C)	94
Abbildung 37	Darstellung der Verteilung der K ₂ O-Gehalte und der Fazies innerhalb ausgewählter Bereiche des Kaliflöz Thüringen (A – C)	95
Abbildung 38	Darstellung der Verteilung der Kieseritgehalte und der Fazies innerhalb ausgewählter Bereiche des Kaliflöz Thüringen (A – C)	97
Abbildung 39	Darstellung der Verteilung der K ₂ O-Gehalte und Fazies innerhalb ausgewählter Bereiche des Kaliflöz Hessen (A – C)	99
Abbildung 40	Darstellung der Verteilung der Kieseritgehalte und Fazies innerhalb ausgewählter Bereiche des Kaliflöz Hessen (A; B)	100
Abbildung 41	Relativer Anteil der Gasereignisse in Bezug zur Fazies über die gesamte kartierte Fläche des jeweiligen Kaliflöz (A; C) sowie in Bezug zu einer Fläche von 1 km ² (B; D)	102
Abbildung 42	Anzahl (A) der Gasereignisse und Größe (B) der Gas-Salz-Ausbrüche für das Kaliflöz Thüringen im Norden des Arbeitsgebietes	106

Abbildung 43	Anzahl (A) der Gasereignisse und Größe (B) der Gas-Salz-Ausbrüche für das Kaliflöz Hessen im südlichen Bereich der Grube Unterbreizbach	107
Abbildung 44	Vulkanit mit Sandsteinschollen im südlichen Bereich der Grube Unterbreizbach. Blickrichtung nach Osten.	108
Abbildung 45	Darstellung der Akkumulation von Sedimenten innerhalb des Arbeitsgebietes in Bezug zu der Zeit (Zeitangaben nach DSK, 2017, [37])	111
Abbildung 46	Schematische Darstellung der paläogeographischen Situation im Arbeitsgebiet zu Beginn des Zechstein	112
Abbildung 47	Schematische Darstellung der paläogeographischen Situation im Arbeitsgebiet während der Ablagerung der Werra-Salze	114
Abbildung 48	Schematische Darstellung der paläogeographischen Situation im Arbeitsgebiet während der Ablagerung des Obersten Werra-Steinsalz	116
Abbildung 49	Schematische Darstellung der paläogeographischen Situation im Arbeitsgebiet während der Ablagerung des Buntsandstein	119
Abbildung 50	Ausschnitt aus dem 3D-Strukturmodell (A), Schematische Darstellung der Eitralstörung vom Subsalinar zum Suprasalinar (B). Die Kürzel entsprechen denen in Tabelle 3 (S. 22) und Tabelle 4 (S. 23)	124
Abbildung 51	Übersicht Aufschluss Sandsteinbrekzie (A) mit Detailaufnahmen (B, C, D)	125
Abbildung 52	Abschiebung im Niveau des Kaliflöz Hessen (rot) mit Ansicht im 3D-Strukturmodell (A), Ausschnitt des Isobathenplanes der Basis des Kaliflöz Hessen mit Darstellung von Störungen im Suprasalinar (grau) und Subsalinar (hellgrau) (B), untertägigem Aufschluss (C) und Blockbild (D) der geologischen Verhältnisse im Bereich der Abschiebung.	128
Abbildung 53	Unterer Werra-Anhydrit in den untertägigen Erkundungsbohrungen Hz 116/01 (A, B) und Hz 113/99 (C)	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Begrenzungskordinaten Arbeitsgebiet. Die Gauß-Krüger Koordinaten sind auf die zweite Nachkommastelle gerundet	4
Tabelle 2	Tektonische Prozesse und Verformungsergebnisse übertragen auf das Werra-Kaligebiet anhand des Spannungsfeldes in Europa (nach ELLENBERG, 1997, [40], HEBMANN & SCHWANDT, 1981, [73], RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155], STÄUBERT & STÄUBERT, 1989, [186])	11
Tabelle 3	Stratigraphische Abfolge und Mächtigkeiten von Perm bis Quartär im Werra-Kaligebiet (DSK, 2017, [37], K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88], LBEG, 2017, [129])	22
Tabelle 4	Stratigraphische Abfolge und Normalmächtigkeiten von Oberrotliegend bis Zechstein (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88], KÄDING, 2001, [107], LBEG, 2017, [129])	23
Tabelle 5	Stratigraphische und lithologische Kurzcharakterisierung des Buntsandstein und Muschelkalk im Werra-Kaligebiet (DSK, 2017, [37], LAEMMLEN, 1966, [123], LANGBEIN & SEIDEL, 2003, [127], LBEG, 2017, [129], PUFF & LANGBEIN, 2003, [154], SEIDEL, 1965, [181])	28
Tabelle 6	Kategorisierung abgeförderten Haufwerks bei der Erfassung von CO ₂ -Ereignissen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2014, [95])	40
Tabelle 7	Auflistung der verwendeten Layer am Beispiel von K ₂ O-Gehalten (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90])	42
Tabelle 8	K ₂ O-Gehalt von ausgewählten Salzgesteinen (WARREN, 2006, [201])	43
Tabelle 9	K ₂ O-Gehalt von ausgewählten Salzmineralen (WARREN, 2006, [201])	43
Tabelle 10	Abgeleitete Gehaltsklassen für die K ₂ O- und Kieseritgehalte der beiden Kaliflöze im Arbeitsgebiet	45
Tabelle 11	Anzahl der Fault Sticks im Sub- und Suprasalinar mit Bezug zu ihrem Ursprung	54
Tabelle 12	„Thickness Range Constraints“ im Zuge der manuellen Anpassung	59
Tabelle 13	Vergleich der Auflösung der aus dem Workflow erzeugten, bereits zugeschnittenen Flächen mit den manuell angepassten Flächen anhand der Anzahl von Punkten, Dreiecken und Maschenweiten	60

Tabelle 14	Information über Eingangsdaten zur Modellierung der stratigraphischen Horizonte des Arbeitsgebietes und Bereiche nachträglicher manueller Anpassung	61
Tabelle 15	Absolute Abweichung der modellierten Horizonte von den Eingangsdaten der Übertage- und Untertagebohrungen (Tabelle 14, S. 61) unter Angabe der Fläche, der mittleren absoluten Abweichung, der Standardabweichung und der prozentualen Abweichung [Formel 2].	71
Tabelle 16	Relative Abweichung der modellierten Horizonte von den Eingangsdaten der Übertage- und Untertagebohrungen (Tabelle 14, S. 61) unter Angabe der größten negativen und positiven Abweichung, der mittleren Abweichung, der Standardabweichung und der prozentualen Abweichung [Formel 2]	72
Tabelle 17	Minimale, mittlere und maximale Mächtigkeit der jeweiligen Horizonte innerhalb des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Oberen Werra-Ton bis zur Basis des Unteren Werra-Steinsalz im Arbeitsgebiet	83
Tabelle 18	Anzahl und Größe der Gas-Salz-Ausbrüche für das Kaliflöz Hessen	104
Tabelle 19	Anzahl und Größe der Gas-Salz-Ausbrüche für das Kaliflöz Thüringen	104

Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Erläuterung
%	Prozent
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
m	Meter
m ³	Kubikmeter
m NN	Meter bezogen auf Normalnull
t	Tonne

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
Ar	Argon
Bhg.	Bohrung, in Bezug auf die K+S Archivnummer der Übertagebohrungen
bzw.	beziehungsweise
bzgl.	bezüglich
ca.	circa
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DGM	Digitales Geländemodell
E	Ost(en)
engl.	englisch
Fm.	Formation
frdl.	freundlich/e
ggf.	gegebenenfalls
GK	Geologische Karte
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HA	Hattorf
HB	Horizontalbohrung
HW	Hochwert
K ₂ O	Kaliumoxid
Kap.	Kapitel
mdl.	mündlich/e
MgCl ₂	Magnesiumchlorid
Mitt.	Mitteilung
MLA	Mineral Liberation Analysis
n	Anzahl
N	Nord(en)
Nr.	Nummer
OT-Bhg.	Übertagebohrung
PKM	Profilkilometer
S.	Seite
S	Süd(en)
SD	Standardabweichung
u. a.	unter anderem
UB	Unterbreizbach
UT-Bhg	Untertagebohrung
VB	Vertikalbohrung
Vgl. / vgl.	Vergleich / vergleiche
W	West(en)
WI	Wintershall
RW	Rechtswert

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Curve	Polylinie; durch eine Linie verbundene Punkte
GOCAD [®]	Geological Objects Computer Aided Design
Grid	Gitter; durch z. B. Tetraeder miteinander verbundene Atome
Hartsalz	Salzgestein bestehend aus ca. 50 % Halit, 20-30 % Sylvin sowie Kieserit, Anhydrit (WARREN, 2006, [201])
Mischsalz	Bereiche, in denen Carnallit und Hartsalz anstehen
PointSet	Punktmenge
Property	Eigenschaft
SKUA [®]	Subsurface Knowledge Unified Approach
Surface	Fläche; durch Triangulation verbundene Punkte
Workflow	Arbeitsabfolge für semi-automatische Modellierung
K ₂ O-Gehalt	Technischer Parameter zur Bestimmung des Wertstoffgehaltes von Kalilagerstätten

1 Einführung

Im Werra-Kaligebiet werden seit über 120 Jahren Kali- und Magnesiumsalze gewonnen. Der Abbau erfolgt auf zwei Sohlen, wobei die Salze des Kaliflöz Hessen¹ auf der 1. Sohle und die des Kaliflöz Thüringen auf der 2. Sohle abgebaut werden. Die intensive Nutzung der Lagerstätte bedingt detaillierte Kenntnisse über das Gebirge. Diese dienen dazu, die bergbaulichen Verfahren an die hydrogeologischen, geologischen und tektonischen Gegebenheiten anzupassen. Weiterhin sind geologische Informationen zur Abschätzung von Potentialen und Risiken von grundlegender Bedeutung. Daher wird seit Beginn des Abbaus bis in die Gegenwart eine Vielzahl verschiedener Erkundungsarbeiten durchgeführt.

Unter der Verwendung dieser vielfältigen geologischen Daten wird mit dieser Arbeit erstmals ein konsistentes 3D-Strukturmodell des Werra-Kaligebietes vorgelegt. Dabei sind eigens Informationen des Subsalinars, des Salinars und des Suprasalinars einbezogen. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf dem südlichen Teil des Werra-Kaligebietes, da sich die Abbaufont perspektivisch nach Süden entwickelt. Neben der Erstellung des 3D-Strukturmodells, das einen Beitrag zur Untersuchung der Beckenentwicklung darstellt, dienen Auswertungen von Wertstoffgehalten und Gasereignissen in Bezug zur Geologie und Tektonik zur Mehrung des Wissens über die geologischen Zusammenhänge im Werra-Kaligebiet und liefern somit einen Beitrag zur nachhaltigen Lagerstättennutzung.

¹ Auf Basis des Beitrags „Zum Genitiv-s in stratigraphischen Termini“ (DSK, 2009, [36]) wird in der vorliegenden Arbeit auf die Verwendung des Genitiv-s bei stratigraphischen Bezeichnungen verzichtet.

2 Präzisierung der Aufgabenstellung

Der Begriff der Nachhaltigkeit wurde bereits 1713 durch den Freiburger Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz geprägt, der im Zuge des Holz Mangels als Folge des intensiven Bergbaus im Erzgebirge zu einer „*continuirliche[n] beständige[n] und nachhaltende[n] Nutzung*“ der Ressource Holz aufrief (CARLOWITZ, 2000, [25]). Seither wurde der der Gedanke der *nachhaltenden Nutzung* in der Geschichte vielfach aufgegriffen und weiterentwickelt. Im Jahr 1987 verfasste die *World Commission on Environment and Development (WCED)* eine der meist zitierten Definitionen für Nachhaltigkeit, die verstärkt die Verantwortung gegenüber zukünftiger Generationen in den Fokus rückt:

„*Development that meet the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.*“ (KHAN & ISLAM, 2007, [109])

Nach dem modernen Verständnis der Nachhaltigkeit sind ökonomische, soziale und ökologische Aspekte nachhaltiger Nutzung von Ressourcen zu berücksichtigen (WELLMER & KOSINOWSKI, 2005, [204]). Auch in der aktuellen Gesetzgebung wurde der Gedanken der nachhaltigen Lagerstättennutzung aufgegriffen, wie bereits mit §1 Abs. 1 des Bundesberggesetzes (BBergG) (1980, [23]) deutlich wird, in dem von einem „*spar-samen und schonenden Umgang mit Grund und Boden*“ die Rede ist. Dabei werden u. a. Gesichtspunkte der verbesserten Ausnutzung der Lagerstätte (§32 Abs. 1 BBergG 1980, [23]) unter Berücksichtigung der Sicherheit der Betriebe und der Beschäftigten (§1 Abs. 2 BBergG 1980, [23]) und der Auswirkungen auf die Umwelt (§ 57a BBergG 1980, [23]) gewürdigt.

In dieser Arbeit sollen die Ziele der nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten mit Bezug zur Werra-Kalilagerstätte untersucht werden. Dabei ist es sowohl Vorteil als auch Herausforderung auf eine über ein Jahrhundert gesammelte Datengrundlage für die ehemals durch die innerdeutsche Grenze getrennt entwickelten Lagerstättenbereiche zurückgreifen zu können.

Grundsätzlich ist für die Nutzung der Lagerstätte die Kenntnis der Geologie von signifikanter Bedeutung. Diese ist das Ergebnis der geologischen Entwicklung über die Zeit und daher anhand der aktuellen Geologie der Lagerstätte ableitbar. Unter Anwendung der 3D-Modellierung soll die Visualisierung geologischer Elemente dem besseren Verständnis der geologischen Entwicklung des Werra-Kaligebietes dienen. Die 3D-Modellierung soll erstmals konkrete Erkundungsergebnisse des hessischen und thüringischen Teils Werra-Kaligebietes vom Subsalinar, Salinar und Suprasalinar in einem plausiblen Strukturmodell in sich vereinen.

Neben der Ableitung der geologischen Entwicklung auf Grundlage der aktuellen Geologie des Werra-Kaligebietes ist das 3D-Modell als Hilfsmittel zur Bearbeitung weiterführender geowissenschaftlicher Fragestellung zu sehen. Auf Basis der Erkenntnisse dieser Entwicklung bieten heutige Analysemethoden die Möglichkeit, geologische und geochemische Eigenschaften in Relation zur Genese und Struktur zu untersuchen.

Die Gewinnbarkeit der Kalisalze wird maßgeblich durch die Mächtigkeit und Tiefe der Flöze sowie ggf. vorhandene geologische Strukturen beeinflusst. Die hierzu bekannten Erkundungsergebnisse (Stand: 2013 - 2016) werden als Grundlage der Interpolation der Flächen mit Hilfe der 3D-Modellierung verwendet. Das erarbeitete 3D-Strukturmodell steht für gezielte Abfragen zur Verfügung. Dazu zählt die Erstellung von Isobathen- und Isopachenplänen ebenso wie die Erarbeitung geologischer Profile durch die Lagerstätte. So soll eine differenzierte Analyse der Beckenentwicklung des Arbeitsgebietes seit dem Perm bis in das Känozoikum erfolgen. Auf diese Weise können Bereiche unterschiedlicher geologischer Entwicklung ausgehalten werden, um zu prüfen, inwieweit eine Beeinflussung der Eigenschaften der Lagerstätte an diese jeweiligen Unterschiede geknüpft ist.

Die bestimmende ökonomische Eigenschaft einer Lagerstätte ist der Wertstoffgehalt. Für die Werra-Kalilagerstätte sind dabei der K_2O -Gehalt und der Kieseritgehalt der Kaliflöze Thüringen und Hessen von Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit soll geklärt werden, ob, und wenn ja, welchen Einfluss synsedimentäre Hebungen bzw. Senkungen und die Struktur der Lagerstätte auf die Verteilung der Wertstoffgehalte hatten. Weiterhin sollen Zusammenhänge zwischen der faziellen Ausprägung und der strukturellen Entwicklung der Lagerstätte untersucht werden. Dies hat zum Ziel, gewonnene Erkenntnisse auf zukünftig zu gewinnende Bereiche der Lagerstätte zu übertragen.

Hinsichtlich sicherheitsrelevanter Aspekte bei der Gewinnung der Kalisalze der Werra-Kalilagerstätte wird zudem erstmals eine regionale, geostatistische Analyse von Gasimprägnationen in Bezug zur geologischen Entwicklung vorgenommen. Dabei soll neben der Häufigkeit der Gasereignisse auch die Größe von Gas-Salz-Ausbrüchen im Kontext mit der geologischen Entwicklung untersucht werden. Es gilt zu klären, ob sich beispielsweise innerhalb der Lagerstätte Trends verfolgen lassen, oder bestimmte geologische Elemente Auswirkungen auf die Häufigkeit und Größe der Gasereignisse haben.

3 Wissenschaftlicher Kenntnisstand zum Werra-Kaligebiet

Mit Kapitel 3 sollen neben der geographischen Einordnung (Kap. 3.1) auch die regionalgeologische Entwicklung hinsichtlich paläogeographischer (Kap. 3.2.1) und tektonischer (Kap. 3.2.2) Besonderheiten dargestellt werden, um daraufhin das aus dieser Entwicklung resultierende Strukturinventar (Kap. 3.2.3) bzw. die Stratigraphie (Kap. 3.3) zu beschreiben.

3.1 Geographische und topographische Situation

Die Werra-Kalilagerstätte zählt zu den mitteldeutschen Kalilagerstätten (HERBERT et al., 2007, [62]). Bezogen auf die Grenzen des äußeren Salzhangs erstreckt sich das gesamte Gebiet über die Landesgrenzen von Thüringen und Hessen mit einer West-Ost-Ausdehnung von ca. 27 km im Norden und ca. 63 km im Süden. Die Nord-Süd-Erstreckung variiert von 18 bis 41 km. Das Arbeitsgebiet umfasst eine Fläche von ca. 724 km² und befindet sich im südlichen Teil des Werra-Kaligebietes. Jenes ist anhand von Gauß-Krüger Koordinaten (Tabelle 1), wie in Abbildung 1 (S. 5) ersichtlich, begrenzt.

Tabelle 1 Begrenzungskordinaten Arbeitsgebiet. Die Gauß-Krüger Koordinaten sind auf die zweite Nachkommastelle gerundet

Punkt	Rechtswert	Hochwert
1	³⁵ 53789,55	⁵⁶ 41239,12
2	³⁵ 40903,75	⁵⁶ 19013,67
3	³⁵ 39432,30	⁵⁶ 10053,05
4	³⁵ 50618,08	⁵⁶ 03119,24
5	³⁵ 61828,92	⁵⁶ 24067,29
6	³⁵ 75736,29	⁵⁶ 15948,09
7	³⁵ 81812,33	⁵⁶ 26385,49

Die Geländehöhen liegen durchschnittlich bei 250 m NN bis 300 m NN, wobei die Vulkanitkuppen des Öchsen- und Dietrichsberges mit bis zu 670 m markante Erhebungen darstellen (JAHNE & PADER, 1994, [82]). Im Wesentlichen dienen die Flüsse Werra und Fulda zur Entwässerung der Einzugsgebiete (BURCHERT et al., 1984, [24]).

Die bergmännische Gewinnung der Kalisalze begann 1900 mit der Fertigstellung des Schachtes Kaiseroda I (KÄDING, 2001, [107]). Nach nunmehr ca. 120 Jahren der konventionellen Gewinnung befinden sich derzeit die Gruben Hattorf (HA)/Wintershall (WI) und Unterbreizbach (UB) in Produktion. Sie werden zum Werk Werra der K+S

KALI GmbH zusammengefasst. Nachfolgend wird der Fokus auf die Gruben Hattorf, mit den zukünftigen Abbaufeldern Marbach-Nord und Marbach-Süd, sowie das südliche Grubenfeld der Grube Unterbreizbach gelegt.

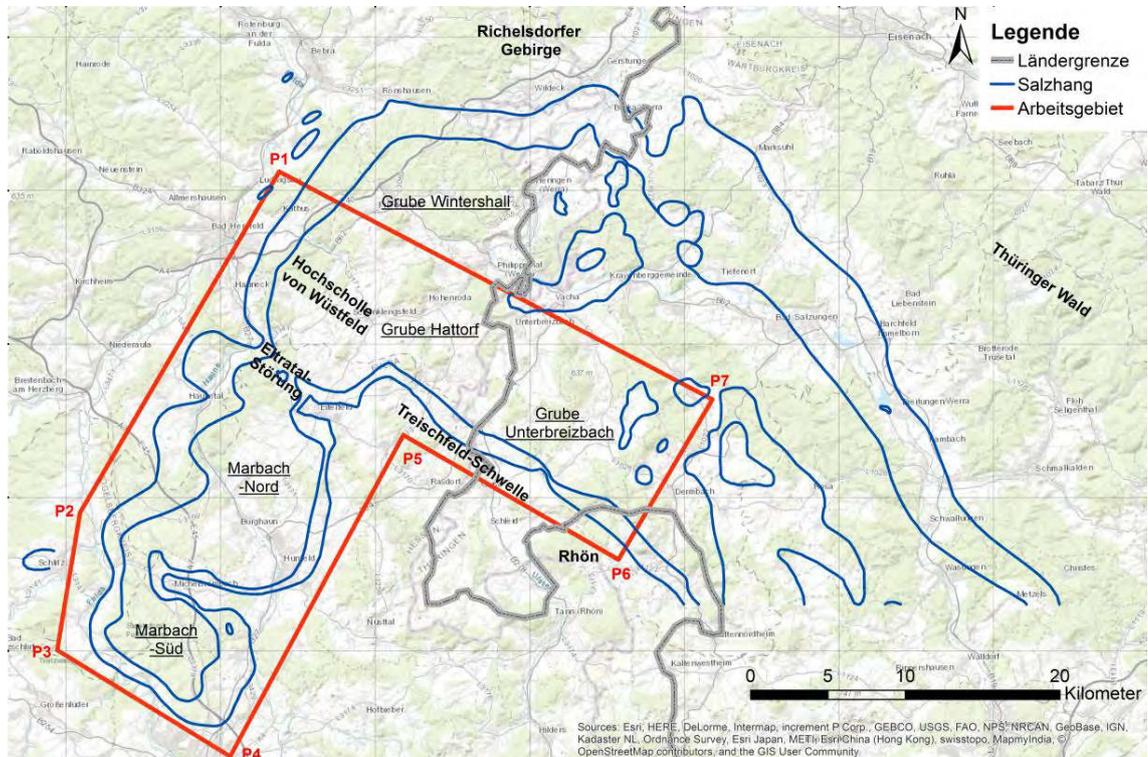


Abbildung 1 Lage des Arbeitsgebietes. Quellen: Grundkarte (OPENSTREETMAP, Zugriff 2017, [148]), Salzhang (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90])

3.2 Regionalgeologischer Rahmen

Nachfolgend wird zunächst der wissenschaftliche Kenntnisstand der paläogeographischen Entwicklungsgeschichte (Kap.3.2.1) des Werra-Kaligebietes vom Paläozoikum bis zum Känozoikum sowie die tektonische Entwicklung (Kap. 3.2.2) dargestellt. Daraufhin erfolgt die Einordnung der strukturellen Erscheinungsformen (Kap. 3.2.3) des Gebietes getrennt nach Subsalinar, Salinar und Suprasalinar.

3.2.1 Paläogeographie

Das Arbeitsgebiet (Abbildung 1) ist Teil der Hessischen Senke. Im Ordovizium befand sich diese im Bereich der auseinander driftenden Kratone Avalonia und Gondwana, zwischen denen sich damit einhergehend der Rheische Ozean bildete. Im Silur kollidierte Avalonia mit dem nördlich gelegenen Laurussia. Die dabei entstandenen Landmassen

boten weitflächige Abtragungsgebiete, die zur Zeit des Devon erodiert wurden und südlich von Avalonia vor allem zur Ablagerung von Schelfsedimenten führten. Im Unterdevon schloss sich der Rheische Ozean. Hiernach bildete sich südlich von Laurussia ein weiteres rhenoherynes Riftbecken aus, das im Oberdevon durch die nach Norden driftende Mitteldeutsche Kristallinschwelle (MKS) geschlossen wurde. Zu dieser Zeit begann die Absenkung Avalonias, was zu einer fortschreitenden marinen Transgression nach Norden führte. Von der MKS ausgehend, wurde das rhenoheryne Riftbecken im Karbon gefüllt. Im Oberkarbon war die Faltung des rhenoherynen Beckens abgeschlossen. Dies war auch das Ende der variszischen Orogenese. (ARNDT, 2012, [4], FRANKE, 2000, [44], MCCANN et al., 2008, [139], WALTER, 2007, [200])

Die Sedimentbecken des Zechstein sind im Karbon bis Perm angelegt worden (vgl. HERBERT et al., 2007, [62], LOTZE, 1957, [132], RICHTER-BERNBURG, 1953, [159]). Zwischen den spätvariszischen Abtragungsgebieten, der Hunsrück-Taunus-Oberharz-Schwelle im Nordwesten und der Odenwald-Spessart-Rhön-Schwelle im Südosten des Arbeitsgebietes, akkumulierten sich bis zu 1.000 m mächtige Rotliegendensedimente (JAHNE, 1990, [80], JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85], KULICK et al., 1984, [118], MESSER, 1978, [140], WALTER, 2007, [200]).

Während des Zechstein erfolgte eine marine Transgression nach Süden. Das Zechsteinmeer erstreckte sich über 1.800 km von Westengland bis nach Litauen und vom Norden Dänemarks über eine Distanz von 1.000 km bis hin zum Oberrhein (Abbildung 2, S. 7).

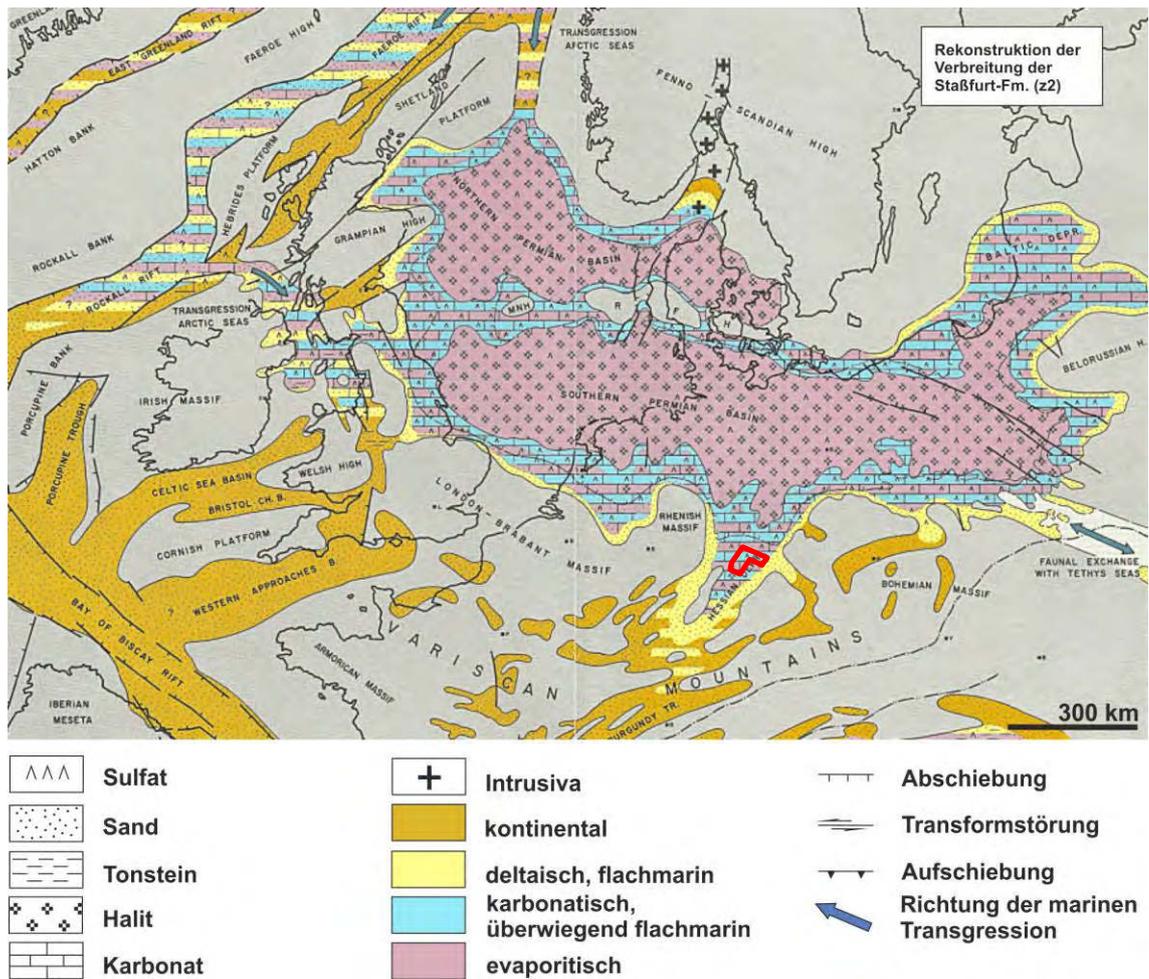


Abbildung 2 Paläogeographische Karte des Zechsteinbeckens zur Zeit der Sedimentation der Sedimente der Staßfurt-Fm.; (gering verändert nach ZIEGLER, 1990, [213]), Rot – Arbeitsgebiet (schematisch)

Im Südwesten des WNW-ESE streichenden Beckens zweigten drei SW-NE verlaufende Nebenbecken ab, zu denen auch das Werra-Fulda-Becken zählt (KNIPPING, 1989, [110]). Es ist Teil des erzgebirgisch streichenden Saar-Selke-Troges (JAHNE, 1990, [80], JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85]). Im Werra-Fulda-Gebiet entwickelten sich flache Becken, in denen es zur Abscheidung evaporitischer Gesteine bis hin zur Präzipitation von Kalisalzen kam. Die salinare Sedimentation erreichte einen ersten Höhepunkt mit der Präzipitation der Salze der Werra-Formation (Tabelle 4, S. 23). Die darüber lagernden Zechsteinfolgen sind im Arbeitsgebiet nur rudimentär entwickelt, was mit der randfaziellen Lage des Werra-Fulda-Beckens im Zechsteinmeer einhergeht (HERBERT et al., 2007, [62]). Fazies- und Mächtigkeitsverteilungen der Werra- und Staßfurt-Formationen (Abbildung 2, Tabelle 4, S. 23) orientieren sich am variszisch angelegten Strukturplan (WALTER, 2007, [200]).

Mit dem Ende des Zechstein erfolgte eine Regression des Zechsteinmeeres. Die Auffüllung des Buntsandsteinbeckens geschah vornehmlich durch die Erosion der variszischen Abtragungsgebiete im Süden (ZIEGLER, 1990, [213]). Abbildung 6 (S. 20) zeigt die heu-

tige großräumige Verbreitung des Buntsandstein, der die Verbindung des norddeutschen und süddeutschen Sedimentationsraumes darstellt (WALTER, 2007, [200]).

Mittlere und Obere Trias sind aufgrund späterer Abtragung nur lokal erhalten. Dennoch war die Trias weiterhin von einer Senkung geprägt. Während der Sedimentation des Muschelkalk bis zum Jura bestand eine marine Verbindung zwischen Norddeutschem und Süddeutschem Becken (WALTER, 2007, [200]). Zur Zeit des Muschelkalk erfolgte die Meerwasserzufuhr über die Peri-Tethys, die den Übergang zur im Südosten befindlichen Tethys bildete (SZULC, 2000, [192]). Im Mittleren Muschelkalk ist eine Phase der Eindampfung des Meerwassers belegt, nach der sich mit einem erneuten Frischwasserzustrom aus südlicher Richtung auch das Depotzentrum nach Süden verlagert (LANGBEIN & SEIDEL, 2003, [127]).

Während des Mittleren Jura wurde das Gebiet der Hessischen Senke gehoben, was mit der Reaktivierung NW-SE und NNE-SSW streichender Störungen einherging (MEYER & SCHMIDT-KALER, 1996, [141]). Im Oberen Jura setzte sich die Hebungsphase fort. In dieser Zeit bildete sich der Fuldaer Graben aus, der sich bis zur Rhön fortsetzt (Abbildung 6, S. 20).

In der Unteren Kreide folgten großräumige Hebungen, die sich nachhaltig auf die tektonischen Elemente in der Hessischen Senke auswirkten (WALTER, 2007, [200]). Die Störungen des Netra- und Sontra-Grabens (NSG), die südliche Grenzstörung des Thüringer Waldes und die nördliche Störung des Richelsdorfer Gebirges wurden ursprünglich in dieser Zeit angelegt (Abbildung 6, S. 20).

Beginnend mit dem Oligozän setzte abermals ein großräumige Senkung ein, sodass die Hessische Senke erneut eine Verbindung zwischen Norddeutschem und Süddeutschem Becken darstellte (WALTER, 2007, [200]). Mit Beginn des Miozän erfolgte eine neue Phase der Hebung der Hessischen Senke, was zu einer Reaktivierung älterer Bruchmuster der Kreidezeit führte. Das Miozän war durch einen intensiven Vulkanismus geprägt (Kap. 3.2.3) (WALTER, 2007, [200]).

3.2.2 Tektonische Einordnung und Entwicklung

Das Werra-Kaligebiet weist als nördlicher Teil der Süddeutschen Großscholle eine komplexe Struktur auf. Die Großscholle ist mit meso- bis känozoischen Sedimenten überlagert. Das tiefere Grundgebirge besteht aus Glimmerschiefern und Gneisen, die zur europäischen kristallinen Erhebung zählen (RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155]).

Vor der marinen Ingression des Zechsteinmeeres bildeten das Rheinische Massiv und der Thüringer Wald das variszische Rückgrat (Abbildung 3, S. 9). Deren begrenzende Suturen wurden in der geologischen Geschichte mehrfach reaktiviert (ZIEGLER, 1989, [212]). Im Zuge variszischer Einengungstektonik wurden Hebungen und Senkungen auf dem gefalteten variszischen Sockel bewirkt (HERBERT et al., 2007, [62]). Gebiete älterer Einheiten sind unterschiedlich stark abgetragen worden, sodass sich eine Mischung aus devonisch-karbonischen sowie frühen permischen Sedimenten abgelagerte (ZIEGLER,

1989, [212]). Diese Sedimentdurchmischung deutet auf die tektonische Fragmentierung des Grundgebirges hin (Tabelle 2, S. 11). Das Rotliegendebcken zerbrach in mehrere Teilbecken, die durch Schwellen voneinander getrennt waren (Abbildung 3A, S. 9). Dies geschah in Verbindung mit vulkanischer Aktivität im Unteren Perm (ZIEGLER, 1989, [212]). Im Fall der Hessischen Senke bildeten sich variszische Syn- und Antiklinalen mit NW-SE oder NE-SW Richtung schachbrettartig heraus (ZIEGLER, 1989, [212]). Die Hauptstörungen folgen dem Streichen der Fränkischen Linie und des Zentraleuropäischen Riftsystems. Sie werden um N-S verlaufende Elemente ergänzt (RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155]).

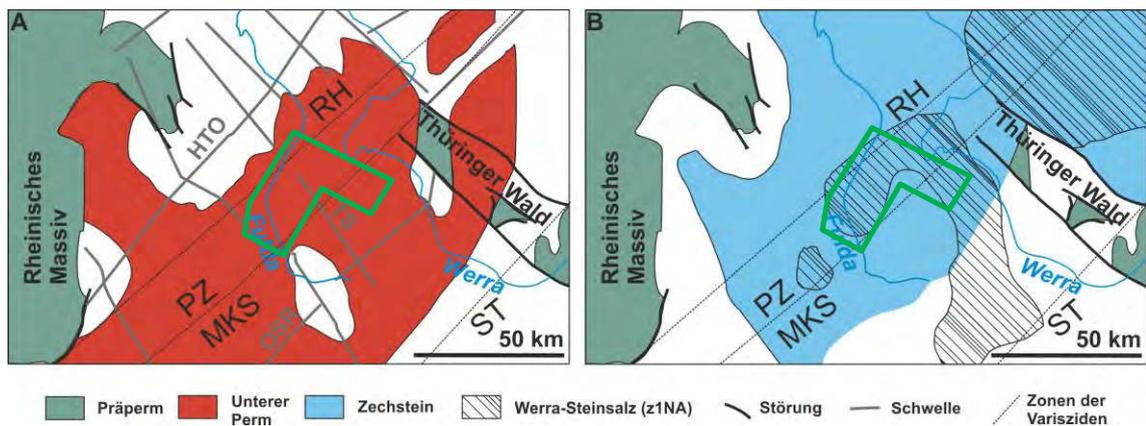


Abbildung 3 Schematische Darstellung struktureller Großelemente des Subsalinars vor (A) und nach (B) der marinen Ingression der Zechsteinsedimente der Werra-Fm. nach ZIEGLER, (1989,) und BERTHELTSEN et al., (1992,) ; Grün – Arbeitsgebiet (schematisch); HTO – Hunsrück-Taunus-Oberharz-Schwelle, OSR – Odenwald-Spessart-Rhön-Schwelle, TS – Treischfeld-Schwelle, RH - Rhenohorzynikum, PZ – Phyllitzone, MKS Mitteldeutsche Kristallinschwelle, ST - Saxothuringikum

Mit der Subsidenz im Oberen Perm folgte die Transgression des Zechsteinmeeres von Norden ausgehend (ZIEGLER et al., 1986, [214]). Sie steht in Zusammenhang mit einem globalen Meeresspiegelanstieg (SMITH, 1979, [183]). Die im gesamten Zechsteinbecken ausgehaltenen Zyklen deuten auf eine eustatische Meeresspiegelveränderung hin. So wird auch die gleichmäßige Hebung der Anhydritwälder des Werra-Anhydrit gedeutet (ZIEGLER, 1989, [212]). Für die Ablagerung des Werra-Anhydrit wird in der Literatur vermehrt ein dynamisch-sedimentäres Modell favorisiert (u. a. RICHTER-BERNBURG, 1968, [161], ROCKEL & ZIEGENHARDT, 1979, [162], SCHARBRODT et al., 1986, [166], STÄUBERT, 1989, [185], WEBER, 1979, [202]). Dabei wird ein epikontinentales Meer aufgrund epirogener Bewegungen zergliedert. Demzufolge ist temporäre bzw. regionale Subsidenz anzunehmen, die auf synsedimentäre Prozesse zurückzuführen ist.

Die Verteilung der evaporitischen Maxima und fazielle Unterschiede reflektieren die Streichrichtungen struktureller Großelemente sowie Entwicklungen des Sedimentationsraumes (Abbildung 3), die aus Hebungen und Senkungen des differenzierten Unter-

grundes resultierten (u. a. HERBERT et al., 2007, [62], JAHNE, 1990, [80], JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85], RICHTER-BERNBURG, 1953, [159]). Im Bereich der Hessischen Senke haben sich zwischen herzyn streichenden Antiklinalen Zechsteinevaporite akkumuliert. Es bildete sich eine Lagune, die die Steinsalzausfällung der Werra-Formation begünstigte (ZIEGLER, 1989, [212]).

Seit dem Ende des Zechstein können mehrere Deformationsstadien beschrieben werden (RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155]). Die erste Phase der Deformation definiert sich durch eine NE-SW und N-S gerichtete Extension, die mit einem vertikalen Scherversatz entlang NW-SE streichender Störungen einhergeht (ELLENBERG, 1997, [40], RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155]). Die Subsidenzraten waren gering (PUFF & LANGBEIN, 2003, [154]).

Das fortschreitende Auseinanderbrechen von Pangäa führte im Jura in unterschiedlichen Bereichen Zentraleuropas zur Entwicklung von NNE-SSW streichenden Riftsystemen (WALTER, 2007, [200], ZIEGLER, 1990, [213]). Im Arbeitsgebiet wird in einer weiteren Deformationsphase eine NE-SW gerichtete Extension beschrieben, die zur Reaktivierung variszischer Bruchsysteme führte (ELLENBERG, 1997, [40]). Im Mittleren Jura kam es zu einer Änderung des regionalen Extensionsregimes aufgrund von thermal induzierten Hebungen (SCHECK & BAYER, 1999, [167]).

Im Zuge einer weiteren Deformation wurde das vorherrschende Spannungsfeld invers verändert. In der Kreide war die Kompression NE-SW gerichtet (Tabelle 2, S. 11). Im Arbeitsgebiet variieren die Hauptspannungsrichtungen der Kompression von N-S bis NNE-SSW. Die im Grundgebirge vorwiegend vorherrschende Kompression überprägte alte Abschiebungen und begünstigte die Entstehung flach einfallender Aufschiebungen (ELLENBERG, 1997, [40], RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155], SCHECK & BAYER, 1999, [167]). Auch die Kluftbildung in kompetenten Salinargesteinen wird dieser sog. kimmerischen Phase zugerechnet (STÄUBERT, 1989, [185]).

Während des Känozoikum dominierte der Einfluss des alpidischen Bauplanes (HEßMANN & SCHWANDT, 1981, [73], RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155], STÄUBERT & STÄUBERT, 1989, [186]). Im Ergebnis der Aktivierung durch das Zentraleuropäische Riftsystem (NNE-SSW) und aufgrund von Impulsen der wandernden Kollisionsfront der alpidischen Orogenese variierte der Kompression in N-S Richtung. Die nach Norden gerichtete alpidische Kollision erzeugte steil einfallende Dehnungsrisse und Abschiebungen, die eng mit der Intrusion von Vulkaniten zusammenhängen (vgl. Kap.3.2.3.3). Diese Phase der Deformation ist auf einen Zeitraum vom Oberen Oligozän bis Miozän festgelegt. Ältere Vulkanite streichen NNE-SSW und N-S, während jüngere Vulkanite NNW-SSE verlaufen (BESSERT, 1933, [8], JAHNE & PADER, 1994, [82]). Im späten Miozän kommt es in NE-SW-Richtung zu einer Extension (ELLENBERG, 1997, [40]). Die Elemente der weiteren Deformationsphasen waren eng an den Verlauf des Zentraleuropäischen Riftsystems gebunden. Dabei waren Kompressionsrichtungen NW-SE bis NNW-SSE vorherrschend. Das äußerte sich im Fall des Werra-Kaligebietes als mit Hebung verbundene Dehnung NW-SE streichender Strukturen (RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155]).

Das rezente Spannungsfeld entspricht in etwa dem zur Zeit der variszischen Gebirgsbildung. Eine NW-SE gerichtete maximalen tektonischen Spannung führt zur Weitung und Öffnung herzyn verlaufender Klüfte (STÄUBERT & STÄUBERT, 1989, [186]). Hebungen und Senkungen zeigen neben lateralen Kompressionen vertikale Blockbewegungen an. Aufgrund von sekundären Zugkräften bilden sich auf halotektonischem Weg Antiklinalen im Deckgebirge. Zur Zeit des Neogen ist die Störungsaktivität flach unter der Oberfläche anzusiedeln (RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155]).

Tabelle 2 Tektonische Prozesse und Verformungsergebnisse übertragen auf das Werra-Kaligebiet anhand des Spannungsfeldes in Europa (nach ELLENBERG, 1997, [40], HEBMANN & SCHWANDT, 1981, [73], RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155], STÄUBERT & STÄUBERT, 1989, [186])

Ära	Periode	Epoche	Tektonische Spannung		Struktur
			Kompression	Extension	
Känozoikum	Quartär	Holozän	NW-SE	NE-SW	Neotektonische Spannungen Epirogene Prozesse
		Pleistozän			
	Tertiär	Pliozän	NNW-SSE	ENE-WSW	Jungtertiäre tektonische Phase
		Miozän	NW-SE	NE-SW	
			N-S	E-W	
		NNW-SSE	ENE-WSW	Suprasalinar: Erweiterung des Bruchschollenmosaiks Salinar: halokinetische Bildungen, Bruchdeformationen und Mischtypen	
		Oligozän Eozän Paläozän	NNE-SSW	WNW-ESE	Ende Saxonische Tektonogenese Saxonischer Bauplan
Mesozoikum	Kreide		NE-SW	NW-SE	Kimmerische Phase
	Jura		NW-SE	NE-SW	Beginn Saxonische Tektonogenese
	Trias	Obertrias	NE-SW	NW-SE	Suprasalinar: Bruchlinienmuster und Schollenbildung
Mitteltrias					
	Untertrias	ENE-WSW	NNW-SSE	Salinar: Staufalten	
Paläozoikum	Perm	Oberperm	NW-SE	NE-SW	Diktyogenese

Ära	Periode	Epoche	Tektonische Spannung		Struktur
		Mittelperm	NW-SE	NE-SW	Jungpaläozoische Tektonogenese
		Untерperm			
	Karbon	Oberkarbon			Variszischer Bauplan Konsolidierter Unterbau

3.2.3 Strukturinventar von Subsalinar, Salinar und Suprasalinar im Werra-Kaligebiet

Die tektonischen Einflüsse für das Werra-Kaligebiet im Salinar, Sub- und Suprasalinar sind separat voneinander zu betrachten, was u. a. in der geomechanischen Entkopplung der drei genannten Bereiche aufgrund ihrer petrographischen Ausbildung sowie Viskosität begründet ist. Salze gleichen Unebenheiten aus, während im Deckgebirge mosaikartige Blöcke, Gräben und Halbgräben in unterschiedlichen Verkippungen gebildet werden. Auch unterscheidet sich der Störungsstil des Grundgebirges von dem des überlagernden Salzes. Mächtige Störungen überwinden jedoch diesen salinaren „Puffer“ und sind sowohl im Grundgebirge, als auch im Deckgebirge nachzuvollziehen (HERBERT et al., 2007, [62], RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155], SCHECK & BAYER, 1999, [167]).

3.2.3.1 Tektonische Erscheinungsformen im Subsalinar

Im Fall der Werra-Kalilagerstätte handelt es sich um flache Lagerung. Die Schichten im Werra-Becken fallen flach mit 2-3° nach SW ein (KNIPPING, 1989, [110]). Weiterhin werden für den thüringischen Teil der Werra-Kalilagerstätte steilherzyn bis erzgebirgisch streichende Bruchstrukturen für das Subsalinar abgeleitet (SCHARBRODT et al., 1989, [165]). Bedeutende Schwellen im Umfeld des Werra-Kaligebietes (Abbildung 3, S. 9) wie die Hunsrück-Taunus-Oberharz-Schwelle, Odenwald-Spessart-Rhön-Schwelle sowie die Treischfeld-Schwelle, die sich zum Teil im Arbeitsgebiet befindet, sind aus der Literatur bekannt (MESSER, 1978, [140], ZIEGLER, 1989, [212]).

Letztere ist auch als salzfrei beschriebene Hochscholle von Treischfeld-Geisa geläufig² (JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85], KÄDING, 1962, [104], LANGE & KÄDING, 1961, [128]). ZIEGLER, (1989,) zeigt deren Anlage im Zuge der spätvariszischen Orogenese auf. Ihre weitere Entwicklung wird als losgelöst von der Entstehung der Fuldaer Grabenzone (vgl. Kap. 3.2.1) interpretiert (KÄDING, 1987, [106]).

Aussagen über das rezente Strukturinventar des Subsalinars sind in Folge beschränkter Erkundungsmöglichkeiten in großen Teilen ungewiss. Anhand von seismischen und magnetischen Kampagnen sowie Georadarerkundungen können Störungsbereiche in Einzelprofilen ausgewiesen werden (Kap. 4.1). Diese belegen unterschiedliche Versät-

² In dieser Arbeit: Treischfeld-Schwelle.

ze, lassen jedoch keine eindeutige Angabe über den Charakter und Bewegungssinn bzw. den Verlauf von Störungsbereichen zu. Bruchhafte Deformationen im Subsalinar bieten Wegsamkeiten in das Salinar und stellen daher ein potentiell Risiko für Salzlösungsvorkommen dar (HERBERT et al., 2007, [62]).

Vulkanite haben einen Einfluss auf das Subsalinar, Salinar und Suprasalinar, wie anhand untertägiger Aufschlüsse, Tagesbohrungen (OT-Bhg.) sowie an übertägigen Aufschlüssen belegt werden kann (BÜCKING, 1889, [17], BÜCKING, 1921, [18], BÜCKING, 1925, [19], BÜCKING, 1926, [20], LAEMMLEN, 1963, [120], LAEMMLEN, 1963, [121], LAEMMLEN, 1965, [122], LAEMMLEN, 1967, [124], LAEMMLEN, 1975, [125], LAEMMLEN & KOENEN, 1975, [126], LÜTZNER et al., 1997, [133], LÜTZNER et al., 1976, [134], LÜTZNER et al., 2000, [135], MEYER & SCHMIDT-KALER, 1996, [141], MOTZKA & LAEMMLEN, 1966, [144], MOTZKA & LAEMMLEN, 1967, [145]). Da ihr Vorkommen vor allem bei der Gewinnung der Kalisalze von Relevanz ist, wird diese tektonische Erscheinungsform nachfolgend im Zusammenhang mit dem Salinar näher beschrieben.

3.2.3.2 Tektonische Erscheinungsformen im Salinar

Innerhalb evaporitischer Ablagerungen des Zechstein wirken sich Störungen meist duktil aus. Störungszonen im Salz äußern sich im Unterschied zu den inkompetenten Hangend- und Liegendschichten daher zumeist in Form von plastischen Deformationen. Verfaltungen im groß- und kleinmaßstäblichen Raum sind bereits in der Literatur beschrieben (u. a. JAHNE et al., 1983, [84], ZEIBIG & JAHNE, 1993, [210]) und sollen nachfolgend eine untergeordnete Rolle einnehmen. Neben plastischen Deformationen wird auch sprödes Verhalten innerhalb der Salzablagerungen beobachtet (u. a. HEBMANN, 1982, [68], HEBMANN, 1983, [69], JAHNE et al., 1983, [84]).

Sprödverhalten, das folglich zu Klüftigkeit führt, ist abhängig vom Gestein, auf das tektonische Kräfte wirken (HEBMANN & SCHWANDT, 1981, [73], LOTZE, 1957, [132], STÄUBERT, 1989, [185]). Klüfte sind in abnehmender Häufigkeit in Dolomit, Anhydrit, Salzton, sulfatischem Hartsalz, Steinsalz, Sylvinit und sylvinitischem Hartsalz zu beobachten (STÄUBERT, 1989, [185]). Salze erfahren nur unter extremer tektonischer Beanspruchung eine Klüftung.

Sprödbrüche innerhalb des Salinars entstehen im Zuge starker Belastung mit Energiefreisetzungen von mindestens 1.012 Joule und sind zumeist bergbauinduziert (AHORNER & SOBISCH, 1988, [3]). Diese Brüche sind zur Gewinnung der Kalisalze mittels Bohren und Sprengen gewollt und lokal auf wenige Dezimeter in der Abbaukontur begrenzt. Natürliche Faktoren spielen bei derartigen Brüchen eine sekundäre Rolle, sind jedoch belegbar. So wirkte sich ein Beben am 29.01.1982 im Haunetal, mit dem Epizentrum ca. 20 km südwestlich der Grube Hattorf, bruchhaft aus (AHORNER & SOBISCH, 1988, [3]).

Ebenso war das Verhalten der Kali- und Steinsalze aufgrund der vorherrschenden Spannungen während der Intrusion der Vulkanite im Werra-Kaligebiet (Kap. 3.2.2) tekto-

nisch bedingt eher bruchdeformativ (u. a. RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155]). Es wird vermutet, dass in Gangzügen angeordnete Vulkanite vorhandene tektonische Schwächezonen für ihren Aufstieg nutzten (BESSERT, 1933, [8], JAHNE & PADER, 1994, [82]). Die Charakterisierung dieser Vulkanite war in der Vergangenheit Thema diverser Forschungsarbeiten (u. a. ABRATIS et al., 2007, [1], GRUMBT & LÜTZNER, 1966, [55], GRUMBT & LÜTZNER, 1983, [56], GUTSCHE & HERRMANN, 1988, [58], JAHNE & PADER, 1994, [82], KNIPPING, 1989, [110], KNIPPING, 1991, [111], KNIPPING & HERRMANN, 1985, [112], KOCH & VOGEL, 1980, [115], KULICK & PAUL, 1987, [119], STEINMANN & STILLE, 2004, [188], STEINMANN et al., 1999, [189], WEDEPOHL, 1983, [203]).

Die basaltischen Gesteine des Nordhessischen Vulkangebietes nördlich des Vogelsberges werden als Alkali-Olivin-Basalte beschrieben. Die Hauptgesteinstypen der Rhön sind Olivin-Nephelinite, Limburgite, Tephrite und Basanite. Untergeordnet treten Phonolithe, Feldspatbasalte und Dolerite auf (KNIPPING, 1989, [110], WALTER, 2007, [200]). Petrochemische Unterschiede im Vulkanit bestehen aufgrund der Differentiation der Schmelze und geben Hinweise auf eine mehrstufige Entwicklung des Vulkanismus (BESSERT, 1933, [8], JAHNE & PADER, 1994, [82], SIEMENS, 1971, [182]). KÄDING, (1962,) beschränkt den Beginn der vulkanischen Tätigkeit auf den südlichen Teil des Werra-Kaligebietes und das Ende auf den Nördlichen. In Richtung Norden sind Vulkanite seltener an der Tagesoberfläche aufgeschlossen. In einigen Fällen ist die basaltische Intrusion bereits in tieferen Schichten erstarrt (KNIPPING, 1991, [111]). Xenolithe wie Sandsteinschollen, Kalkstein oder Steinsalz einschlüsse in den Vulkaniten wurden von diversen Bearbeitern beobachtet (u. a. BESSERT, 1933, [8], JAHNE & PADER, 1994, [82]).

Innerhalb der Lagerstätte werden Schnitte, Schlechten und Spalten unterschieden. Schnitte (< 1 mm) treten am häufigsten in Erscheinung. Schlechten (< 2 cm) sind mit Salz, Ton oder Vulkanit gefüllt. Spalten sind einige Dezimeter bis wenige Meter mächtig und mit vulkanischem Gestein gefüllt (JAHNE et al., 1983, [84]). Mit Vulkanit gefüllte Schlechten und Spalten werden als Dykes bezeichnet. Daneben sind in den Gewinnungshorizonten sog. „Deckenbasalte“ aufgeschlossen, die Sills darstellen (Abbildung 12, S. 37).

Kontaktzonen zwischen Steinsalz und Dykes sind sehr scharf ausgeprägt und eng begrenzt. Teilweise ist entlang der Kontakte die Bildung gläserner Säume zu beobachten, die eine rasche Abkühlung belegen (ENGLER, 2012, [41]). In einigen Fällen ist ein Reaktionsrand im Salzgestein sichtbar (HERBERT et al., 2007, [62]). In der Grube Hattorf wurde im Niveau des Kaliflöz Thüringen ein sillartiges Vulkanitvorkommen mit einem 20-30 cm breiten Kontaktbereich im Übergang vom Vulkanit zum Carnallit untersucht (KNIPPING & HERRMANN, 1985, [112]). Der Übergangsbereich zeigte ein blasiges bis adriges Gefüge. Die Adern waren mit Halit oder Sylvin verheilt, wohingegen die Poren z. T. mit tonigem Material ausgekleidet waren.

Schnitte, Schlechten und Spalten fallen seiger bis steil nach Osten bzw. Westen ein und weisen nur in wenigen Fällen Versätze von einigen Zentimetern bis hin zu wenigen Dezimetern auf (HEßMANN & SCHWANDT, 1981, [73]). Sowohl die Schnitte als auch die

Dykes sind über zehner bis hunderte Meter streichende Erstreckung aushaltbar. Sills können senkrecht zum Streichen eines Dykes ähnlich weit ausgehalten werden.

Schnitte, Schlechten, Spalten weisen herzynische, rheinische und erzgebirgische Streichrichtungen auf (JAHNE et al., 1983, [84]). Schnitte und Schlechten verlaufen zum Teil parallel bis spitzwinklig zueinander (BESSERT, 1933, [8]). Dykes streichen hauptsächlich N-S, wobei ihre Richtung zwischen NNE-SSW und NNW-SSE variiert. Dabei erstrecken sich die Vulkanitizonen über einige Kilometer und verlaufen entlang einer Linie bestehend aus fiederförmig aneinandergereihten Dykes (KNIPPING, 1991, [111]).

Die Auswirkungen der Temperatur während der Vulkanitintrusion auf die Lagerstätte wurden als gering eingeschätzt (KNIPPING, 1991, [111]). Da der Halit nicht aufgeschmolzen wurde, sind Temperaturen von ca. 800°C nicht überschritten worden (MIN-DAT.ORG, 2017, [142]). Anhand von Modellrechnungen wurde die Kontakttemperatur unmittelbar nach dem Eindringen der Schmelze mit ca. 600-790°C angegeben. Sie sank nach einem Monat auf ca. 400°C und lag nach Ablauf eines Jahres bei ca. 100°C (KNIPPING, 1991, [111]).

Die mit dem Vulkanismus einhergehenden Gase und Fluide hatten bzw. haben einen großen Einfluss auf die Lagerstätte. Aszendente Wässer wurden beim Aufstieg der Vulkanite mitgeführt und resultierten innerhalb der Kaliflöze in sekundären Mineralumbildungen (JAHNE, 1990, [80], KÄDING, 1962, [104], KNIPPING, 1991, [111], KOCH, 1986, [114]). Im Kaliflöz Hessen (Kap. 3.3.2), das zumeist als Hartsalz ausgebildet ist, kam es zu einer Reduktion des K₂O-Gehaltes in Kombination mit der Bildung von Steinsalz, Anhydrit, Kainit, Leonit, Glaserit und Polyhalit. Letzteres ist ebenso als typisches Umgebungsmineral in der Umgebung von Vulkaniten im Kaliflöz Thüringen beobachtet worden (HOPPE, 1960, [78]). Das Kaliflöz Thüringen (Kap. 3.3.2) lag präbasaltisch in carnallititischer Fazies vor. In Folge der Vulkanitintrusion ist Magnesiumchlorid (MgCl₂) abgeführt worden und hinterließ im Ergebnis der Umbildung Sylvinit (u. a. BORCHERT, 1959, [10], BRAITSCH, 1962, [13], D'ANS & KÜHN, 1960, [27], HOPPE, 1960, [78]). Ebenso können frühdiagenetische Prozesse Ursache für Mineralumbildungen sein (KÜHN, 1979, [117], VALJASKO, 1960, [196]). Auch werden Sylvinitite teilweise als primäre Bildungen für möglich gehalten (KÜHN, 1972, [116]). Das Fortschreiten der Lösungsfront erfolgte aus Richtung des Vulkanits (KNIPPING & HERRMANN, 1985, [112]). In direkter Umgebung zu diesem ist oft eine vollständige Vertaubung des Flözes zu beobachten (KNIPPING, 1989, [110], KOCH & VOGEL, 1980, [115], PIPPIG, 1992, [152]).

Zu den mit dem Vulkanismus verbundenen Gasen zählen u. a. Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄). Im Werra-Kaligebiet dominieren CO₂-Vorkommen. Sie sind vornehmlich inter- und intrakristallin gebunden, treten aber auch in Form von freien Gasen auf (KNIPPING, 1991, [111], STÄUBERT, 1989, [185]). Im laufenden Gewinnungsbetrieb wird den CO₂-Vorkommen die größte Aufmerksamkeit gewidmet, weshalb nachfolgend vornehmlich auf diese eingegangen werden soll (Kap. 4.1.4.4, 5.3.6). Untergeordnet sind weitere Kohlenwasserstoffe und Schwefelwasserstoff (H₂S) bekannt (STÄUBERT, 1989, [185]).

Salzlösungen kommen als freie Lösungen, als Fluideinschlüsse in Salzmineralen und an Korngrenzen vor. Salzlösungsvorkommen sind aus allen stratigraphischen Horizonten der Zechsteinsalze bekannt (HERBERT et al., 2007, [62]). Sie können intrasalinär sein und ihren Ursprung in den Salzformationen selbst haben. Es existieren diverse Auffassungen zum Charakter und der Herkunft der intrasalinären Lösungen, die als Umbildungslösungen eingestuft wurden. Neben der Dehydratation des unterlagernden Anhydrits (BORCHERT, 1963, [11]) wird auch die Wiederauflösung von bestehenden Mineralen im Zuge neuer Süßwassereinträge während der Präzipitation diskutiert (DÖHNER et al., 1968, [35]). Auch verschiedene Fälle der Lösungsmetamorphose, also Auflösung und Umbildung von Kalisalzen, wurden erwogen (HERBERT et al., 2007, [62]). Dabei migrieren Metamorphoselösungen im Zuge erhöhter Temperatur und bilden geschlossene Systeme.

Weiterhin existieren Salzlösungsvorkommen extrasalinären Ursprungs, die aus dem Subsalinär (Kap. 3.2.3.1) bzw. Suprasalinär (Kap. 3.2.3.3) zutreten (Abbildung 4, S. 17). In den Salzgruben Mitteldeutschlands stammt die Mehrzahl der extrasalinären Zuflüsse aus dem Suprasalinär (HERBERT et al., 2007, [62]). Beziehungen zwischen tektonischen Strukturen und Salzlösungsvorkommen wurden in der Literatur bereits beschrieben (u. a. HEßMANN & SCHWANDT, 1981, [73], JAHNE et al., 1983, [84], STÄUBERT, 1989, [185]). Zutrittsstellen sind an Sattelzonen, Einzelstörungen, Störungszonen sowie Kreuzungsbereiche mehrerer Bruchstörungen gebunden (HERBERT et al., 2007, [62]).

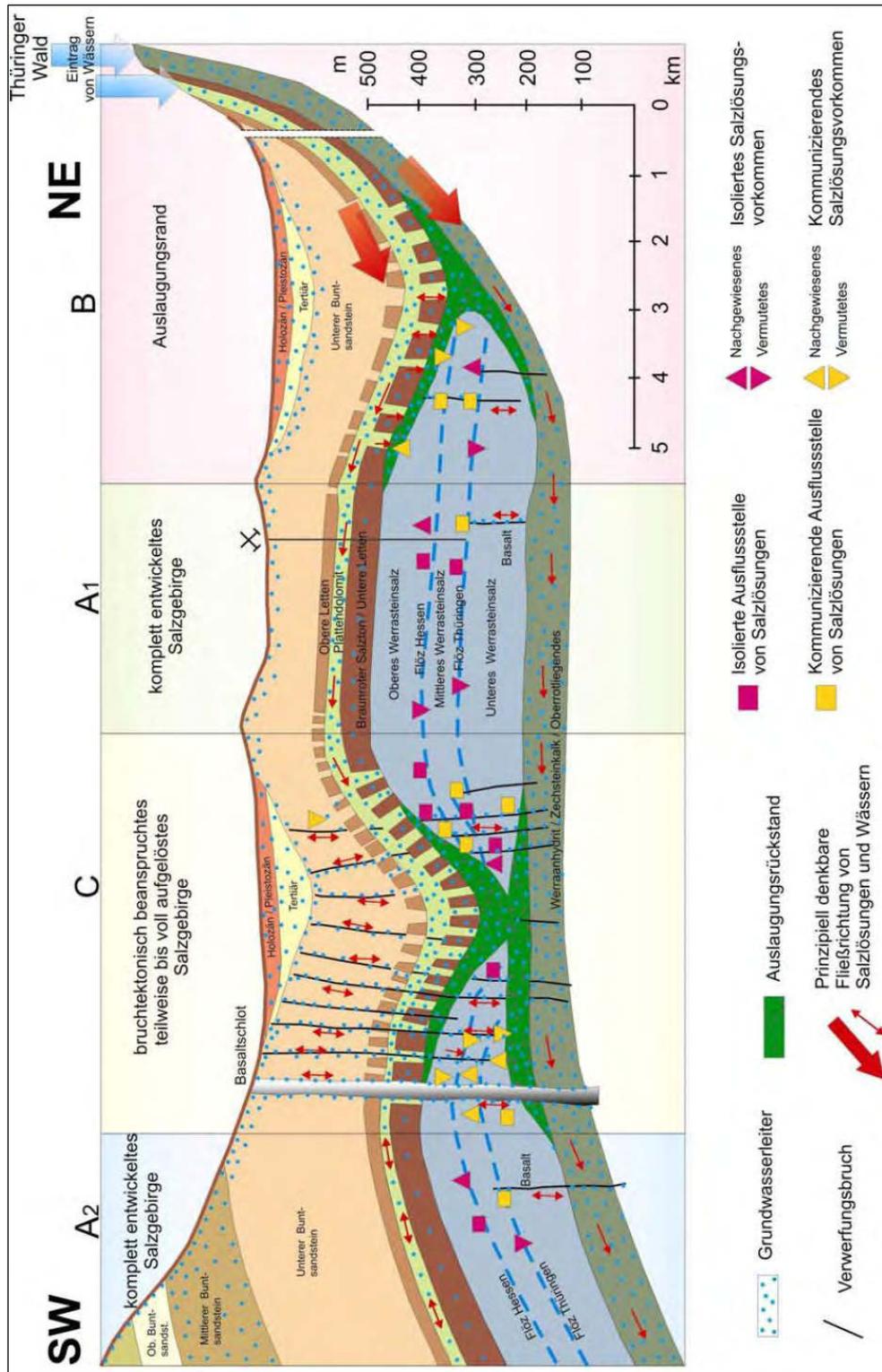


Abbildung 4 Schematische Darstellung von Zusammenhängen zwischen Tektonik und dem Auftreten von Salzlösungsvorkommen, (nach SCHWANDT, 2005, [177] entnommen aus HERBERT et al., 2007, [62])

Einige Salzlösungsvorkommen stehen in Zusammenhang mit Kristallsalzen (Abbildung 5, S. 18). Kristallsalz ist in diesem Zusammenhang ein grobspätiges bis grobkristallines Steinsalz. Es gilt in der Regel, je größer die Störungen, desto ausgeprägter sind Kristallsalzzonen und die damit einhergehende potentielle Lösungsmenge. In vielen Fällen ist dabei keine makroskopisch erkennbare tektonische Beanspruchung des Salinars und Deckgebirges offensichtlich (HERBERT et al., 2007, [62]).

Die Beurteilung eines Salzlösungsvorkommens sollte anhand seiner chemischen Zusammensetzung, dem Zuflussverhalten und unter Einbeziehung geologischer und tektonischer Verhältnisse durchgeführt werden (u. a. HERBERT et al., 2007, [62], HERRMANN et al., 1991, [63], HERRMANN et al., 1978, [64], HERRMANN et al., 2003, [65], SCHWANDT, 1978, [175]).

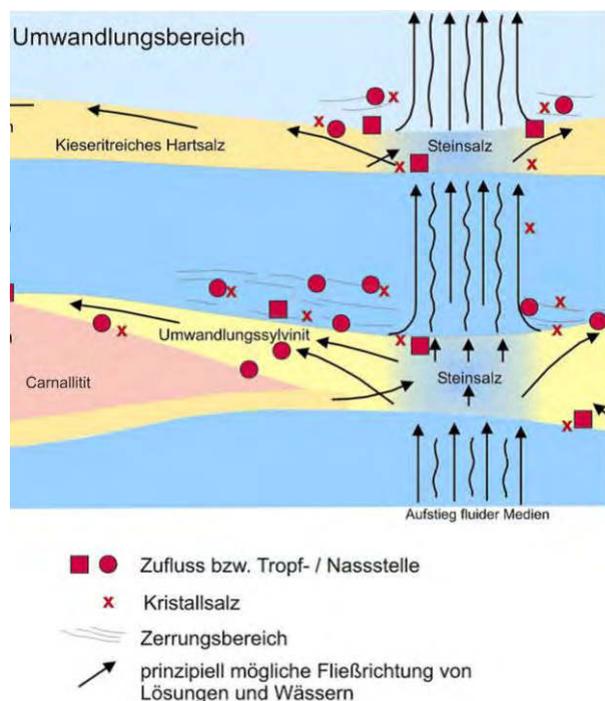


Abbildung 5 Salzlösungsvorkommen in Umbildungsbereichen der Kaliflöze Thüringen und Hessen im Werra-Kalirevier (SCHWANDT, 1988, [176])

3.2.3.3 Tektonische Erscheinungsformen im Suprasalinar

Tektonische Beschreibungen des Suprasalinars und seiner Charakteristik im Werra-Kaligebiet waren bereits Gegenstand diverser Forschungsarbeiten (u. a. BÜCHEL et al., 2012, [16], GRUMBT, 1964, [51], GRUMBT, 1967, [52], GRUMBT, 1980, [53], GRUMBT et al., 1967, [54], GRUMBT & LÜTZNER, 1966, [55], HEBMANN, 1977, [66], HEBMANN, 1979, [67], HEBMANN, 1983, [69], HEBMANN et al., 1981, [70], HEBMANN & KULKE, 1976, [71], HEBMANN & RICHTER, 1979, [72], LÜTZNER et al., 1976, [134], RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155], REDLICH, 2000, [156], REINHARDT, 2014, [157], SCHIRMER &

SCHWARZ, 1991, [169], WÜSTNER, 1965, [208]). Neben Sattel- und Muldenstrukturen unterschiedlicher Ausdehnung und damit einhergehend unterschiedlicher Ordnung wurden in der Literatur bruchtektonische Elemente des Suprasalinars beschrieben. Bereits in frühen Untersuchungen (DIETZ, 1928, [31]) der Werra-Kalilagerstätte wurden einzelne Störungen im Deckgebirge beschrieben, die durch übertägige Kartierungen (GRUMBT, 1967, [52], GRUMBT, 1980, [53], GRUMBT & LÜTZNER, 1966, [55]) und Fernerkundungsmethoden ergänzt wurden (HERBERT et al., 2007, [62], RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155]).

Im Suprasalinar werden größere Störungszonen von subparallelen Kleinstörungen und Klüften begleitet (HERBERT et al., 2007, [62]). Sie fallen zum Teil mit Klüften, Schnitten und Vulkanitzonen im Salinar zusammen (Kap.3.2.3.2). Zusammenhänge zwischen tektonischen Elementen des Suprasalinars und des Salinars sind bereits beschrieben (u. a. BÜCHEL et al., 2012, [16], HERBERT et al., 2007, [62]). Klufnetze und –scharen erreichen Ausdehnungen von einigen Kilometern und sind in einem orthogonalen Bruchflächensystem orientiert, deren Spannungszustände zu Hebungen und Senkungen des Gebirges führen (HEBMANN, 1983, [69]). Mit Quarz, Kalzit und Gips verheilte Klüfte im Hangenden der Werra-Salze (ENGLER, 2012, [41]) zeigen eine Wasserzirkulation zwischen den Ablagerungen des Zechstein und der Trias an (RAUCHE & FRANZKE, 1990, [155]).

Anhand von Modellstudien (u. a. VENDEVILLE et al., 1995, [197]) wurde beschrieben, dass Salz keine differentialen Spannungen vom Grund- bzw. Deckgebirge überträgt, was in einer niedrigen Viskosität begründet liegt. Vertikal gerichtete Spannungen werden in Abhängigkeit der Salzmächtigkeit in nur geringem Maß in das Suprasalinar übertragen (VENDEVILLE et al., 1995, [197]). Am Beispiel des Norddeutschen Beckens zeigen Deformationsstrukturen im Suprasalinar eine gesteigerte Intensität vom Beckenzentrum zum Rand (SCHECK & BAYER, 1999, [167]). Das ist im Werra-Kalilagergebiet in Richtung des ausstreichenden Salzhangs u. a. anhand verstärkter morphologischer Oberflächenrauigkeiten ebenfalls zu beobachten (REINHARDT, 2014, [157]). Die Ausbildung des Salzhangs orientiert sich an markanten Störungen bzw. deren Kreuzungspunkte (HERBERT et al., 2007, [62]).

Die Orientierung der Störungen im Suprasalinar kann parallel, jedoch lateral versetzt, zu denen im Subsalinar sein (SCHECK & BAYER, 1999, [167]). Auch ist das Streichen der Störungen bzw. Klüfte im Suprasalinar im Vergleich zu den Strukturen im Salinar mit Abweichungen von bis zu 15° nicht deckungsgleich, was als Hinweis auf unterschiedliche Bildungszeiträume einiger Bruch- und Faltensysteme gedeutet werden kann (HEBMANN & SCHWANDT, 1981, [73]). Versatzbeträge an Einzelstörungen innerhalb einer Störungszone sind im Meter- bzw. Dekameterbereich anzunehmen (SCHWARZ et al., 1987, [180]).

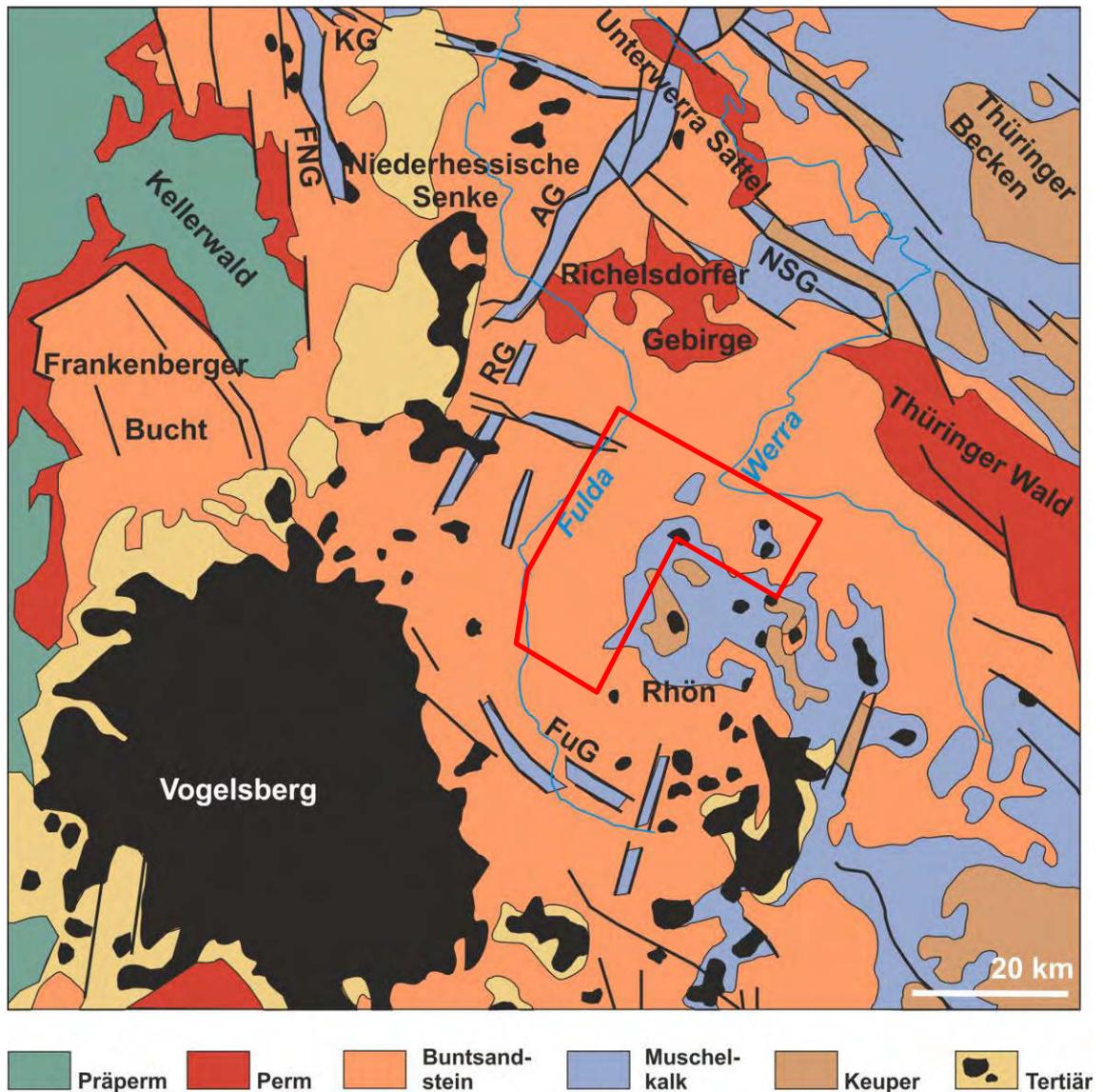


Abbildung 6 Vereinfachte Geologische Übersichtskarte der Niederhessischen Senke (nach WALTER, 2007, [200]). AG – Altmorscher Graben, FNG – Fritzlar Naumburger Grabenzone, FuG – Fuldaer Grabenzone, KG – Kasseler Grabenzone, NSG – Netra- und Sontra-Graben, RG – Remsfelder Graben, Rot – Arbeitsgebiet (schematisch)

Abbildung 6 gibt die derzeitige geologische Situation ohne Berücksichtigung quartärer Sedimente wieder (WALTER, 2007, [200]). Herzyne Elemente und zu diesen konjugierte Störungen gelten als übergeordnete Störungsrichtungen (BÜCHEL et al., 2012, [16], HERBERT et al., 2007, [62]). Im Nordwesten der Hessischen Senke dominieren das Ege-Lineament, das sich nach Süden in Form der Fritzlar-Naumburger Grabenzone (FNG) fortsetzt, und im Nordosten das Leine-Lineament, dessen südliche Verlängerung der Altmorscher Graben (AG) und der Remsfelder Graben (RG) sind (Abbildung 6). Im Süden der E-W gerichteten Kasseler Grabenzone schließt sich die Niederhessische Senke an (WALTER, 2007, [200]). Das ca. 1.000 km² große Werra-Becken wird durch den

herzyn verlaufenden Fuldaer Graben (FuG) von dem ca. 100 km² großem Fulda-Teilbecken getrennt (KNIPPING, 1989, [110]).

Eine weitere bedeutende Erscheinungsform im Suprasalinar im Werra-Kaligebiet ist die Subrosion (u. a. BÜCKING, 1889, [17], DIETZ, 1926, [30], ELLENBERG, 1972, [38], FULDA, 1923, [46], HAASE, 1962, [60], HERBERT et al., 2007, [62], HOPPE, 1944, [77], JUBITZ, 1964, [87], PRINZ, 1970, [153], SCHILDER & SCHWANDT, 1983, [168], SCHWANDT, 2005, [177], SCHWANDT et al., 1986, [178]). Subrosion beschreibt die Ablaugung von löslichen Gesteinen wie Steinsalz bzw. Gips im Untergrund (BÜCKING, 1889, [17]). Man unterscheidet reguläre Subrosion, wie die Ausbildung des Salzhangs zum Ausgehenden einer Salzlagerstätte (FULDA, 1923, [46]), und irreguläre Subrosion. Letztere beschreibt die teilweise bis vollständige Ablaugung von salinaren Gesteinen in die Folge intensiver, bruchhafter Beanspruchung (Abbildung 4, S. 17). Dabei werden mindestens zwei gleichgerichtet streichende, sich in größeren Tiefen verschneidende Bruchstörungen vorausgesetzt (HERBERT et al., 2007, [62]). Irreguläre Subrosionen sind im Zusammenhang mit Vulkanitvorkommen und Schlotbrekzien beschrieben (GRUMBT & LÜTZNER, 1966, [55]). Aber auch atektonische Entstehung ist möglich (ELLENBERG, 1982, [39], HERBERT et al., 2007, [62], KÄBEL & TROTTNER, 1981, [103]). Im Arbeitsgebiet sind die Subrosionssenken von Oberzella-Unterbreizbach, Abteroda und Gehaus zu nennen.

3.3 Stratigraphische Gliederung

Im nachfolgenden Kapitel wird die stratigraphische Einteilung im Werra-Kaligebiet erläutert. Dabei werden Normalmächtigkeit, Petrographie und Lithologie näher beleuchtet. Grundlegend werden dabei die Rotliegendesedimente als Präzechstein (Kap. 3.3.1), das Zechstein (Kap. 3.3.2) und Postzechstein (Kap. 3.3.3) getrennt voneinander beschrieben. Die Tabelle 3 (S. 22) und Tabelle 4 (S. 23) geben einen Überblick über die zeitliche Einteilung vom Perm bis zum Quartär sowie eine Gliederung der einzelnen stratigraphischen Horizonte des Zechstein.

Tabelle 3 Stratigraphische Abfolge und Mächtigkeiten von Perm bis Quartär im Werra-Kaligebiet (DSK, 2017, [37], K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88], LBEG, 2017, [129])

Ära	Periode	Gruppe	Subgruppe	Symbol	Mächtigkeit [m]	Alter [Ma]	
Känozoikum	Quartär			q	90	2,6	
	Tertiär			t	20	66,0	
	Trias	Keuper			k	80	239,5
			Muschelkalk	Oberer Muschelkalk	mo	50	243,3
				Mittlerer Muschelkalk	mm	30	244,4
				Unterer Muschelkalk	mu	100	246,5
		Buntsandstein		Oberer Buntsandstein	so	90	247,7
				Mittlerer Buntsandstein (Volpriehausen-Formation)	sm (smV)	250	251,8
				Unterer Buntsandstein (Gelnhausen-, Calvörde-Formation)	su (suGE, suC)	350	252,5
	Paläozoikum	Perm	Zechstein	Fulda-Formation	z7-Folge	30	} 254,0
Friesland-Formation				z6-Folge	15		
Ohre-Formation				z5-Folge	3		
Aller-Formation				z4-Folge	7		
Leine-Formation				z3-Folge	50	254,7	
Staßfurt-Formation				z2-Folge	35	255,5	
Werra-Formation				z1-Folge	320	257,5	
Rotliegend				r	>20	296,0	

Tabelle 4 Stratigraphische Abfolge und Normalmächtigkeiten von Oberrotliegend bis Zechstein (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88], KÄDING, 2001, [107], LBEG, 2017, [129])

Periode	Gruppe	Formation	Schicht	Symbol	Mächtigkeit [m]	
Perm	Zechstein	Zechstein 7	Oberer Fulda-Ton	z7Tb	12	
			Fulda-Fm.	Oberer Fulda-Sandstein	z7Sb	2
			Unterer Fulda-Ton	z7Ta	12	
			Fulda-Sandstein	z7Sa	2	
		Zechstein 6	Oberer-Friesland-Ton	z6Tb	9	
			Friesland-Fm.	Unterer Friesland-Ton	z6Ta	4
			Friesland-Sandstein	z6S	0,5	
		Zechstein 5	Ohre-Ton	z5T	3	
			Ohre-Fm.	Ohre-Sandstein	z5S	0,5
		Zechstein 4	Oberer Aller-Ton	z4Tb	3	
				Aller-Fm.	Aller-Anhydrit	z4AN
			Unterer Aller-Ton	z4Ta	1,5	
			Aller-Sandstein	z4S	1,5	
		Zechstein 3	Oberer Leine-Ton	z3Tb	5	
				Leine-Fm.	Leine-Karbonat	z3CA
			Unterer Leine-Ton	z3Ta	3	
			Leine-Sandstein	z3S	3	
		Zechstein 2	Oberer Staßfurt-Ton	z2Tb	30	
				Staßfurt-Fm.	Oberer Staßfurt-Anhydrit	z2ANb
			Staßfurt-Steinsalz	z2NA	4	
			Unterer Staßfurt-Anhydrit	z2ANa	2	
			Staßfurt-Karbonat	z2CA	1	
		Zechstein 1	Werra-Fm.	Oberer Werra-Anhydrit	z1ANcb	2
				Oberstes Werra-Steinsalz	z1NAd	15
				Oberer Werra-Anhydrit	z1ANca	7
				Oberer Werra-Ton	z1Tb	10
				Oberes Werra-Steinsalz	z1NAc	150
				Kaliflöz Hessen	z1KHe	3
				Mittleres Werra-Steinsalz	z1NAb	80
				Kaliflöz Thüringen	z1KTh	10
				Unteres Werra-Steinsalz	z1NAa	140
				Unterer Werra-Anhydrit	z1ANa	35
Werra-Karbonat	z1CA	15				
Werra-Ton	z1Ta	0,5				
Rotliegend	Oberrotliegend	Konglomerat	roC	3		
		Cornberger Sandstein	ro	20		

3.3.1 Präzechstein

Im Arbeitsgebiet wurde die Basis des Rotliegend mit zwei Tagesbohrungen erreicht (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Rotliegendesedimente streichen außerhalb des Arbeitsgebietes an der Erdoberfläche aus (Abbildung 6, S. 20). Die Basis des Rotliegenden bilden rotbraune Schluff- und Tonsteine, die aus der Abtragung des variszischen Grundgebirges (Kap. 3.2.2) resultieren. Zum Hangenden hin sind Konglomerate (roC), Fanglomerate und Sandsteine ausgebildet (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88], K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]).

3.3.2 Zechstein

Die Sedimente der Werra-Fm. erreichen Tiefen von 300 m bis 1000 m (JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85]). Die feinstratigraphische Untergliederung erfolgt anhand von Färbungen, Bänderungen, Tonlinien und Anhydritbänken innerhalb des Werra-Salinars (JAHNE et al., 1970, [81], KÄDING, 1975, [105]).

Der Untere Werra-Ton³ (z1Ta) ist ein bituminöser, schwarz gefärbter Mergelton, der regional polymetallisch vererzt ist und eine einheitliche Mächtigkeit von ca. 50 cm aufweist. Er keilt lokal über Schwellen aus und liegt in Synklinalen mit bis zu zwei Metern Mächtigkeit vor (u. a. BORG et al., 2012, [12], K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88], ZIEGLER, 1989, [212]).

Das Werra-Karbonat⁴ (z1CA) setzt mit einem scharfen Übergang ein und besteht an der Basis aus mikritischen und bioturbaten kalkigen Sedimenten. Über herzyn streichenden Antiklinalen im ehemaligen Küstenbereich des Zechsteinmeeres erreicht das Werra-Karbonat hohe Mächtigkeiten von bis zu 40 m mit korngestützten Gefügen und Bryozoenriffen (ZIEGLER, 1989, [212]). Es ist ein ausgewiesener Grundwasserleiter (HERBERT et al., 2007, [62]).

Der Untere Werra-Anhydrit (z1ANa) besteht aus einer Wechsellagerung anhydritischer, toniger und karbonatischer Gesteine. Innerhalb der tonig-mergeligen und karbonatischen Lagen sind teilweise Anhydritknoten ausgebildet. Dieser Bereich wird als sog. „Anhydritknotenschiefer“ bezeichnet, was jedoch in keinem genetischen Kontext steht. Im Topbereich folgt grobflaseriger und zum Teil massiger grauer Anhydrit, in dem wiederum tonige bzw. dolomitische Abschnitte eingeschaltet sind (u. a. BECKER, 2002, [5]).

Das Untere Werra-Steinsalz (z1NAa) ist grobkörnig bis grobspätig und von der Färbung weißgrau-farblos bzw. bei eingeschalteten Tonlinien orange bis orange-rötlich ausgebildet. Zum Hangenden des Unteren Werra-Steinsalz sind zumeist drei mittels Georadar (Kapitel 4.1.5) gut erkennbare Ton- bzw. Anhydritlinien eingeschaltet, die zur stratigraphischen Zuweisung der Reflektoren herangezogen werden (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88]).

³ Unterer Werra-Ton – ehemals auch Kupferschiefer

⁴ Werra-Karbonat – ehemals auch Zechsteinkarbonat

Das Kaliflöz Thüringen (z1KTh) liegt überwiegend in carnallititischen Fazies vor. Diese setzt sich größtenteils aus den Mineralen Carnallit, Sylvinit, Halit und Kieserit zusammen. In geringem Umfang treten ebenso Anhydrit und Ton auf. Das Kaliflöz ist sowohl lagig ausgebildet, als auch ungeschichtet in Form des sog. Trümmern carnallitits. Die Basis der Normalausbildung weist einen kieseritischen Hartsalzfuß auf (KNIPPING, 1989, [110]). Im Beckenzentrum ist die Mächtigkeit des Hartsalzes zu Gunsten einer Mächtigkeitzunahme des Carnallitits ausgedünnt (JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85]). Im südöstlichen Bereich des Werra-Kaligebietes sind halokinetisch beeinflusste Steilstellungen des Kaliflöz Thüringen zu beobachten. Es spießt zum Teil diapirartig in das Kaliflöz Hessen hinein und bedingt im Kaliflöz Thüringen starke Mächtigkeitsschwankungen zwischen 1 m und 90 m (HERBERT et al., 2007, [62], SCHWARZ, 1992, [179], ZEIBIG & JAHNE, 1993, [210]). Die K_2O -Gehalte variieren durchschnittlich zwischen 8 % und 16 % (JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85]).

Zwei sulfatische, tonige Linien bilden den Übergang vom Kaliflöz Thüringen zum Mittleren Werra-Steinsalz (z1NAb) (DIETZ, 1928, [31]). Dieser Bereich ist durch eine hellbraune Färbung mit feiner Bänderung bestimmt. Im Übrigen ist das Mittlere Werra-Steinsalz grau bis farblos klar ausgebildet. Ein Meter oberhalb des Kaliflöz Thüringen ist ein kali- bzw. kieseritführendes Begleitflöz aushaltbar, auf das ein 15 m mächtiges Paket mit enggebänderten Steinsalz und anhydritischen Linien folgt. Darüber steht ein Abschnitt von schwach gebändertem Steinsalz an, über dem sich sechs kieseritführende Bänder im Topbereich des Mittleren Werra-Steinsalz anschließen und den Übergang zum Kaliflöz Hessen darstellen (JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85]).

Das Kaliflöz Hessen (z1KHe) besteht im Wesentlichen aus kieseritischem Hartsalz und zu geringen Teilen aus Carnallit bzw. Sylvinit über Hartsalz. Gewöhnlich gliedert sich die Hartsalzausbildung in wiederum drei markante Bereiche vom Wurmsalz an der Basis, über das sog. Flockensalz bis hin zum gebankten Hartsalz am Top. Das Wurmsalz weist drei bis vier gewellte, tonige bis kieseritische Linien auf. Das darüber lagernde Flockensalz ist ohne jede Schichtung und weist mit bis zu 60 % die höchsten Gehalte an Kieserit auf. Das gebankte Hartsalz ist eine Wechsellagerung von Hartsalz, Steinsalz und Sylvinit in unterschiedlich mächtigen Lagen. Die K_2O -Gehalte des Kaliflöz Hessen variieren zwischen 8 % und 14 % K_2O . Den Top des Kaliflöz markiert ein Tonlöser, der zur stratigraphischen Einordnung herangezogen wird (u. a. JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85], K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88], KNIPPING, 1989, [110], STORCH, 1976, [190]).

Das Obere Werra-Steinsalz (z1NAc) wird von der Basis zum Top in drei Bereiche untergliedert: eine kieseritische Zone, eine mittlere anhydritische Zone und eine tonige Zone. Die untere kieseritische Zone besteht aus farblos klarem bis hellgrauem von anhydritischen bzw. kieseritischen Linien durchzogenem Steinsalz. Die kieseritische Zone beinhaltet die sechs hangenden Begleitflöze des Kaliflöz Hessen. Die mittlere anhydritische Zone ist ebenfalls von farblos-klarem bis grauem Steinsalz dominiert. Im Topbereich des Oberen Werra-Steinsalz nehmen die tonigen Einschaltungen zu. Das Steinsalz erscheint grobspätig, ist zunehmend texturlos und von einer rötlichen Färbung bestimmt (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88]).

Die Basis des Oberen Werra-Ton⁵ (z1Tb) bildet den sog. Salztop. Bei dem Oberen Werra-Ton handelt es sich um einen dunkelgrauen Tonstein, der bei Wasserkontakt quellfähig wird und plastisch reagiert. Im obersten Drittel des Abschnittes ist eine ca. 1 m mächtige Anhydritbank ausgehalten (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88], K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2012, [89]). Der quellfähige Ton nimmt eine Schutzschichtenfunktion ein (GRUNER et al., 2003, [57]). Sowohl Werra-Steinsalz als auch Oberer Werra-Ton sind als Grundwassernichtleiter ausgewiesen (HERBERT et al., 2007, [62]).

Über dem Oberen Werra-Ton folgt der Obere Werra-Anhydrit⁶ (z1ANc). Der dunkelgraue bis graue Obere Werra-Anhydrit ist knollig bis flaserig ausgebildet und gliedert sich im Falle der Einschaltung des Obersten Werra-Steinsalz (z1NAd) in eine Unterbank (z1ANca) und eine Oberbank (z1ANcb) (DITTRICH, 1962, [32], RICHTER-BERNBURG, 1955, [160]). Das partiell präzipitierte Oberste Werra-Steinsalz (z1NAd) ist bis zu 10 m mächtig und von anhydritischen und tonigen Bändern durchzogen. Es ist zumeist hellbraun bis orange und grobkristallin (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88]).

Der Abschnitt von der Staßfurt-Fm. (z2) bis zur Fulda-Fm (z7) ist im gesamten Werra-Kaligebiet nachgewiesen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88]). Dabei ist die laterale Erstreckung der einzelnen Schichten (Tabelle 4, S. 23) zum Teil lokal begrenzt. Ein vollständiger Zyklus, vergleichbar mit Werra-Fm., lässt sich nicht aushalten. Allein das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) wurde in fünf Übertagebohrungen im nördlichen Werra-Kaligebiet mit 1,0 m bis 7,2 m Mächtigkeit nachgewiesen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Diese befinden sich außerhalb des Arbeitsgebietes und folgen einer NW-SE-Orientierung. Das Staßfurt-Steinsalz ist rot bis rotbraun, grobkristallin und von Ton- und Anhydritlagen durchzogen. Es wird vom vornehmlich dolomitischen dunkelgrauen Staßfurt-Karbonat (z2CA) und dem sich darüber anschließenden hellgrauen, feinschichtigen Unteren Staßfurt-Anhydrit (z2ANa) unterlagert. Im Hangenden des Staßfurt-Steinsalz ist der Obere Staßfurt-Anhydrit (z2ANb) in ähnlicher Lithologie, jedoch geringmächtiger Ausbildung eingeschaltet. Am Top der Staßfurt-Fm. ist der Obere Staßfurt-Ton (z2Tb) aushaltbar. Er besteht aus weißgrauem bis dunkelgrauen Mergelsteinen, die von Ton- und Anhydritlagen durchzogen sind. (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91])

Die Basis der Leine-Fm. (z3) bildet der feinkörnige, hell- bis mittelgraue Leine-Sandstein (z3S). Dieser ist das Ergebnis von Festlandeinträgen in Form von Tonen und Sanden (FRICK, 1969, [45]) und verzahnt sich lokal mit dem Unteren Leine-Ton (z3Ta). Darüber folgt das Leine-Karbonat (z3CA), das anhand von Lithologie und Klüftigkeit in drei Zonen untergliedert werden kann (BURCHERT et al., 1984, [24]). Es wird als Grundwasserleiter ausgewiesen (HERBERT et al., 2007, [62]). Basierend auf einem Vorschlag der Bergbehörde und der Preußischen Geologischen Landesanstalt dient das Leine-Karbonat seit 1925 als Versenkhorizont für die Aufbereitungsabwässer der ansässigen Kaliindustrie (BEER & KLUGE, 1999, [6], HECHT, 2000, [61]). Die Ausbildung des

⁵ Oberer Werra-Ton ehemals auch Braunroter Salztou

⁶ Der Abschnitt des Oberen Werra-Anhydrit mit eingeschaltetem Obersten Werra-Steinsalz wurde ehemals auch als Zwischensalinar bezeichnet.

Leine-Karbonat⁷ (z3CA) ist vielfach in der Literatur beschrieben (BURCHERT et al., 1984, [24], DIETZ, 1928, [31], FRICK, 1969, [45], JAGSCH et al., 1980, [79], KÄBEL & TROTTNER, 1981, [103], MÖLLER, 1985, [143], ROTH, 1978, [163]). Die Porosität des kalzitischen bis dolomitischen Gesteins wird mit bis zu 10 % angegeben (KÄBEL & TROTTNER, 1981, [103]). Stark schwankende Mächtigkeiten werden mit Subrosionserscheinungen in Verbindung gebracht (u. a. BESSERT, 1933, [8], HERBERT et al., 2007, [62]), können jedoch auch auf primäre Ausbildung zurückgeführt werden. Im Hangenden des Leine-Karbonat folgt der Obere Leine-Ton (z3Tb), der ebenso wie der Untere Leine-Ton, zu den Grundwassergeringleitern zählt (HERBERT et al., 2007, [62]). Entlang von Störungszonen ist die Abdichtung des Leine-Karbonat zum Liegenden und Hangenden im Einzelfall zu untersuchen (DITTRICH, 1979, [33]).

Innerhalb des von Ton- und Schluffsteinen dominierten Abschnittes vom Allersandstein (z4S) bis zum Oberen Aller-Ton (z4Tb) ist der hellgraue Aller-Anhydrit⁸ (z4AN) eingeschaltet. Daneben sind einige dezimeterstarke Karbonatbänke aushaltbar.

Die jüngsten Schichten des Zechstein bilden die Ohre-Fm. (z5), Friesland-Fm. (z6) und Fulda-Fm. (z7). Hierbei handelt es sich um rotbraune Ton- und Schluffsteine, in die Feinsandsteinbänke eingeschaltet sind (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88]).

3.3.3 Postzechstein

Die Sedimente des Postzechstein bestehen zu großen Teilen aus Abfolgen des Buntsandstein (s), der sich an der Basis durch fluviatile Fazies auszeichnet. Sie werden von sandig-tonigen Wechsellagerungen begleitet, die von diversen Überflutungsereignissen zeugen. Verzahnungen von evaporitischen Zyklen mit Sanden belegen marine Einflüsse. Diese werden von lagunär-terrestrischen und äolischen Sedimenten überlagert. (PUFF & LANGBEIN, 2003, [154])

Zunehmende Kalksteinablagerungen leiten den Übergang zum Muschelkalk (m) ein (u. a. BÜCKING, 1889, [17], BÜCKING, 1921, [18], BÜCKING, 1925, [19], BÜCKING, 1926, [20], FEIST-BURKHARDT et al., 2008, [43], LAEMMLEN, 1963, [120], LAEMMLEN, 1963, [121], LAEMMLEN, 1965, [122], LAEMMLEN, 1967, [124], LAEMMLEN, 1975, [125], LAEMMLEN & KOENEN, 1975, [126], LÜTZNER et al., 1997, [133], LÜTZNER et al., 2000, [135], MOTZKA & LAEMMLEN, 1966, [144], MOTZKA & LAEMMLEN, 1967, [145]). Die Gesteine des Muschelkalk stehen vornehmlich im südöstlichen Arbeitsgebiet bzw. im Umfeld von übertägig austreichenden Vulkaniten an. Die Muschelkalkablagerungen sind von Dolomit, Kalk sowie Kalkmergelgesteinen geprägt.

Tabelle 5 (S. 28) gibt einen Überblick über die Gliederung sowie lithologische Merkmale der Buntsandstein- und Muschelkalk-Formationen im Arbeitsgebiet.

⁷ Leine-Karbonat ehemals Plattendolomit

⁸ Aller-Anhydrit auch Pegmatitanhydrit

Tabelle 5 Stratigraphische und lithologische Kurzcharakterisierung des Buntsandstein und Muschelkalk im Werra-Kaligebiet (DSK, 2017, [37], LAEMMLEN, 1966, [123], LANGBEIN & SEIDEL, 2003, [127], LBEG, 2017, [129], PUFF & LANGBEIN, 2003, [154], SEIDEL, 1965, [181])

Gruppe	Subgruppe	Formation	Symbol	Lithologie
Muschelkalk	Oberer Muschelkalk	Warburg-Fm.	moW	Wechselagerung von Kalk- und Mergelsteinen in sich wiederholenden „shallowing upward“ Zyklen: subtidal abgelagerte Ruhigwassersedimente mit kompakten mergeligen Kalken werden von Klast- und Schilllagen überlagert, darüber Hartgründe oder Sabkha-Dolomite Abgrenzung durch unterschiedliche Fossilführung (Ceratitenschichten, Trochitenkalk)
		Meißner-Fm.	moM	
		Trochitenkalk-Fm.	moTK	
Muschelkalk	Mittlerer Muschelkalk	Karlstadt-\	mmK\	Sulfate im Topbereich wechselagernde Anhydrit-Dolomit- und Mergelsteine Dolomit im Basisbereich
		Heilbronn-\	mmH\	
		Diemel-Fm.	mmD	
Muschelkalk	Unterer Muschelkalk	Jena-Fm.	muJ	Lutite, Arenite, Rudite Schaumkalkzone im Topbereich Flachwellige, plattige Strukturen in Unterer, Mittlerer und Oberer Wellenkalkzone Abgrenzung durch unterschiedliche Fossilführung (Terebratulazone, Oolithzone)
Buntsandstein	Oberer Buntsandstein	Röt-Fm.	soRF	Myophorien-Folgen: tonige Mergelsteine im mit zunehmend kalkigen Einschaltungen zum Hangenden Peliröt: Sandstein überlagerndem Tonmergelstein inkl. Karbonat- und Gipseinschaltungen Salinarröt: feinsandige und sulfatische Abschnitt, Schluff-Tonsteinabfolgen eingeschaltet
		Mittlerer Buntsandstein	Solling-Fm.	smS
	Buntsandstein	Hardeggen-Fm.	smH	Sandstein-Tonstein-Wechselfolge mit violett-grauen, glimmerreichen Schlufflagen im Topbereich Konglomeratische Sandsteine im Basisbereich
		Detfurth-Fm.	smD	Dominierend Sandsteinhorizonte mit dünnen Tonlagen eingeschaltet im Topbereich Konglomeratische Sandsteine im Basisbereich

Gruppe	Subgruppe	Formation	Symbol	Lithologie
		Volpriehausen-Fm.	smV	Avicula-Schichten im Topbereich Durch grobe Sandsteinpartien geprägte Volpriehausen-Wechselfolge Grauer Volpriehausen-Sandstein Konglomeratische Sandsteine im Basisbereich
	Unterer Buntsandstein	Bernburg-Fm.	suBG	Sandstein-Tonstein-Wechsellagerung mit Einschaltungen von Rogenstein Sandsteinhorizont im Basisbereich
		Calvörde-Fm. (Gelnhausen-Fm.)	suC (suGE)	Vorwiegend Sandstein rhythmische Abfolgen sandiger Partien mit überlagernden Schluff- und Tonsteinen

Sedimente des Keuper (k) sind im Werra-Kaligebiet rudimentär verbreitet. Diese können an Vulkaniten in der Rhön bzw. entlang von Störungszonen, wie z. B. der nordöstlich des Arbeitsgebietes gelegenen Eisenach-Creuzburger Störungszone, belegt werden (DOCKTER & LANGBEIN, 2003, [34], WALTER, 2007, [200]). Im Keuper dominieren Ton-, Schluff- und Sandsteine, wohingegen Karbonate nur noch untergeordnet auftreten.

Jurassische (j) Sedimente können im Arbeitsgebiet nicht ausgehalten werden. Sie sind jedoch ebenfalls im Bereich der Eisenach-Creuzburger-Störungszone dokumentiert (ERNST, 2003, [42]).

Die Gesteine des Tertiär (t) können in zwei unterschiedlichen Ausbildungen im Werra-Kaligebiet auftreten. Einerseits bestimmen Vulkanitvorkommen (Kap. 3.2.3.3) die geomorphologische Erscheinung des Gebietes, andererseits sind tertiäre Sedimente nur in Talauen von Flüssen wie Werra und Ulster und in Form von Braunkohlen und Kiesen in Auslaugungssenken erhalten. (KÄBEL & TROTTNER, 1981, [103])

Die Ausbildung quartärer (q) Gesteine beschränkt sich auf Auen und Nebentäler der Werra. Es handelt sich um fluviatile Feinkiese, Sande und Lehm sowie Hangschuttbildungen. Auch die Einschaltungen von Braunkohlen in der Buchenau-Senke werden dem frühen Quartär zugeordnet. (KÄBEL & TROTTNER, 1981, [103])

4 Eingangsdaten und methodische Vorgehensweise

Um Aussagen über die geologische und strukturelle Entwicklung sowie Zusammenhänge dieser treffen zu können, wurde der geologische Untergrund im dreidimensionalen Raum modelliert. Dabei sind erstmalig die stratigraphischen Horizonte vom Subsalinar bis zum Suprasalinar gemeinsam in einem geologischen Modell dargestellt worden. Von der Datenakquise bis zum fertigen Modell (Abbildung 7, S.31) bedurfte es drei grundlegender Arbeitsschritte:

- der Arbeitsvorbereitung,
- der Datenaufbereitung

und

- der Modellierung.

Zu den Arbeitsvorbereitungen zählte die Datenakquise. Die Gründlichkeit in der Datenrecherche spiegelt sich in der Güte des Modells wider.

Für die Datenaufbereitung wurden die Programme AutoCAD[®], ArcGIS[®] und Surfer[®] genutzt. Die Daten variierten in ihrer Verteilung, Detailliertheit, Aussagekraft und Quantität (Kap. 4.1). Sie wurden gesichtet, bewertet und vereinheitlicht, um in einem für die Modellierung nutzbaren Format für weitere Arbeitsschritte zur Verfügung zu stehen.

Bei der Überprüfung der Plausibilität aufgedeckte Widersprüche wurden in der weiteren Aufbereitung der Eingangsdaten berücksichtigt. Ursachen für Widersprüche waren vielfältig und reichten von simplen Übertragungsfehlern hin zu methodisch-technisch bedingten Abweichungen, die zu Unstimmigkeiten (u. a. Kap. 4.1.5) führten. Ein 3D-Modell kann die Qualität der Eingangsdaten nicht übertreffen. Die sorgfältige Verarbeitung dieser Eingangsdaten sowie die Berücksichtigung geologischer Kenntnisse (Kap. 3) begünstigen die Güte des in dieser Arbeit erstellten 3D-Modells. Die Arbeitsvor- und Datenaufbereitung machen ca. zwei Drittel der Arbeit zu dessen Erstellung aus (u. a. ARNDT, 2012, [4], STEINBORN, 2008, [187]).

Die Modellierung ist ein iterativer Prozess der Erstellung des Abbildes der Realität in vereinfachter Form. Sie erfolgte mit dem Programm SKUA[®] 2014.1 der Firma Paradigm (Kap. 4.2), wobei Grundregeln der Geomodellierung beachtet worden sind. So dürfen sich, unter der Berücksichtigung geologisch möglicher Geometrien, z. B. stratigraphische Horizonte nicht schneiden und sollten bis an Störungen heranreichen. Auch während der Modellierung selbst traten Inkonsistenzen auf, die eine fortlaufende Überprüfung der Plausibilität der Daten und gegebenenfalls Anpassungen des Modells bedingten.

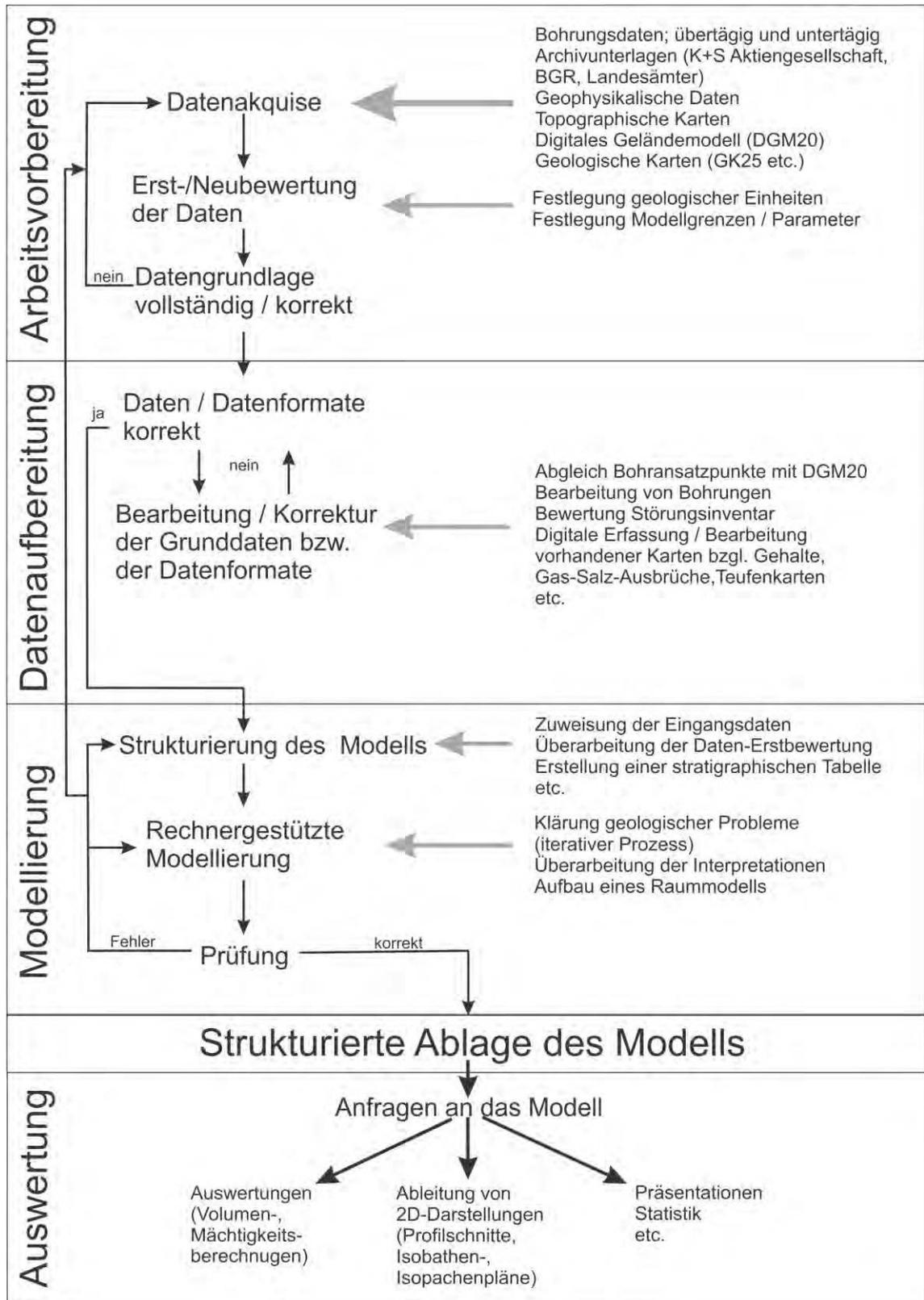


Abbildung 7 Schematischer Ablauf zur Erarbeitung eines 3D-Modells (modifiziert nach STEINBORN, 2008, [187])

4.1 Arbeitsvorbereitung und Datenaufbereitung

Nachfolgend werden die Schritte zur Aufbereitung der recherchierten Daten, beginnend mit der Geländeoberkante, vom Hangenden zum Liegenden erläutert (Kap. 4.1.1 – Kap. 4.1.8), wobei ausführlich auf die grubenrisslichen Unterlagen Bezug genommen wird. Diese enthielten neben fazieller und tektonisch relevanter Dokumentationen (Kap. 4.1.4.2, Kap. 4.1.4.3) auch die der Wertstoffgehalte der Kaliflöze Thüringen und Hessen (Kap. 4.1.4.5). Diese boten eine wesentliche Grundlage für die Untersuchung der Entwicklung von Gehalten in der Fläche in Abhängigkeit zur geologischen bzw. tektonischen Lagerstättenentwicklung. Weiterhin sind zur geostatistischen Untersuchung von Gasereignissen im Arbeitsgebiet erstmals grubenrissliche Unterlagen und Gasverzeichnisse zur Analyse der Gasmengen verarbeitet worden (Kap. 4.1.4.4). Generell wurde harten Aufschlüssen, wie Tagesbohrungen, Untertagebohrungen (UT-Bhg) und Erkenntnissen aus Streckenauffahrungen eher vertraut, als den interpretierten Ableitungen dieser.

4.1.1 Digitales Geländemodell

Digitale Geländemodelle (DGM) sind auf regelmäßige Gitter reduzierte Modelle der Geländehöhen und Morphologie der Erdoberfläche (ADV, 2017, [2]). Für die Modellierung wurde das DGM20 (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]) genutzt, das eine Gitterweite von 20 m aufweist und in Form von Punktdaten vorlag. Der Datensatz umfasste weite Teile des Werra-Kaligebietes und wurde auf das Arbeitsgebiet reduziert, um die Geländeoberkante (GOK) zu modellieren (Tabelle 14, S. 61, Kap. 4.2.3)

Die Höhengenaugigkeit der Gitterpunkte variiert je nach Morphologie und Vegetation. Im Fall von flachem bis gering geneigtem, offenem Gelände beträgt die Abweichung bis zu $\pm 10 \text{ cm} + 5 \%$ der Gitterweite. Bei stark geneigtem Gelände mit dichter Vegetation ergibt sich eine Abweichung von $\pm 10 \text{ cm} + 20 \%$ der Gitterweite. Das entspricht Werten zwischen 1,1 m und 4,1 m für Gitterweiten von 20 m. Die Angaben zur geometrischen Genauigkeit beziehen sich auf eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % (2σ). (ADV, 2017, [2])

4.1.2 Geologische Karten

Geologische Karten des Arbeitsgebietes im Maßstab 1:25.000 (GK25) (u. a. BÜCKING, 1921, [18], LAEMMLER, 1963, [121], LAEMMLER, 1965, [122], LAEMMLER & KOENEN, 1975, [126], LÜTZNER et al., 1997, [133], LÜTZNER et al., 2000, [135], MOTZKA & LAEMMLER, 1966, [144]) und im Maßstab 1:200.000 (GÜK200) (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE & STAATLICHE GEOLOGISCHE DIENSTE, 1988, [21], BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE & STAATLICHE GEO-

LOGISCHE DIENSTE, 1998, [22]) (GÜK200) boten einen Überblick über die an der Tagesoberfläche ausstreichenden geologischen Einheiten und Strukturelementen. Die GK25 und die GÜK200 wiesen jedoch einen Lageverzug auf, wie z. B. anhand von Inkonsistenzen bezüglich der Position und Ausdehnung von Vulkanitvorkommen ersichtlich wurde (Abbildung 8). Da die GK25 gegenüber der GÜK200 bessere Übereinstimmungen mit dem markscheiderischen Risswerken bot (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]), wurde die GK25 für die Modellierung genutzt.

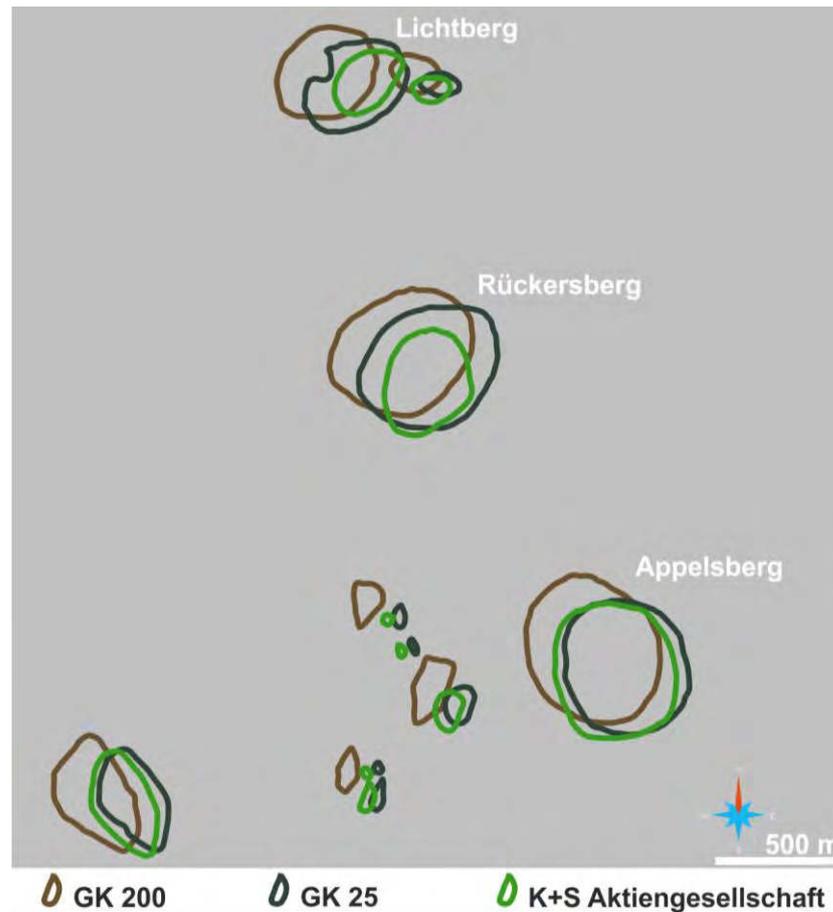


Abbildung 8 Lageverzug von Strukturelementen am Beispiel unterschiedlicher Quellen

Die GK25 lag zweidimensional im CAD-Format vor. Sie wurde im Hinblick auf das zu erstellende 3D-Modell dahingehend vereinfacht, dass für die Modellierung relevante stratigraphische Übergänge innerhalb des Arbeitsgebietes als Linienelemente digitalisiert wurden, um sie weiterführend entsprechend der tatsächlichen Morphologie darzustellen. Die quartäre Überdeckung blieb für das geologische Modell unberücksichtigt. In zwei Fällen wurden unter Einbeziehung von Tagesbohrungen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]) Ausbisslinien lokal angepasst (Abbildung 9, S. 34).

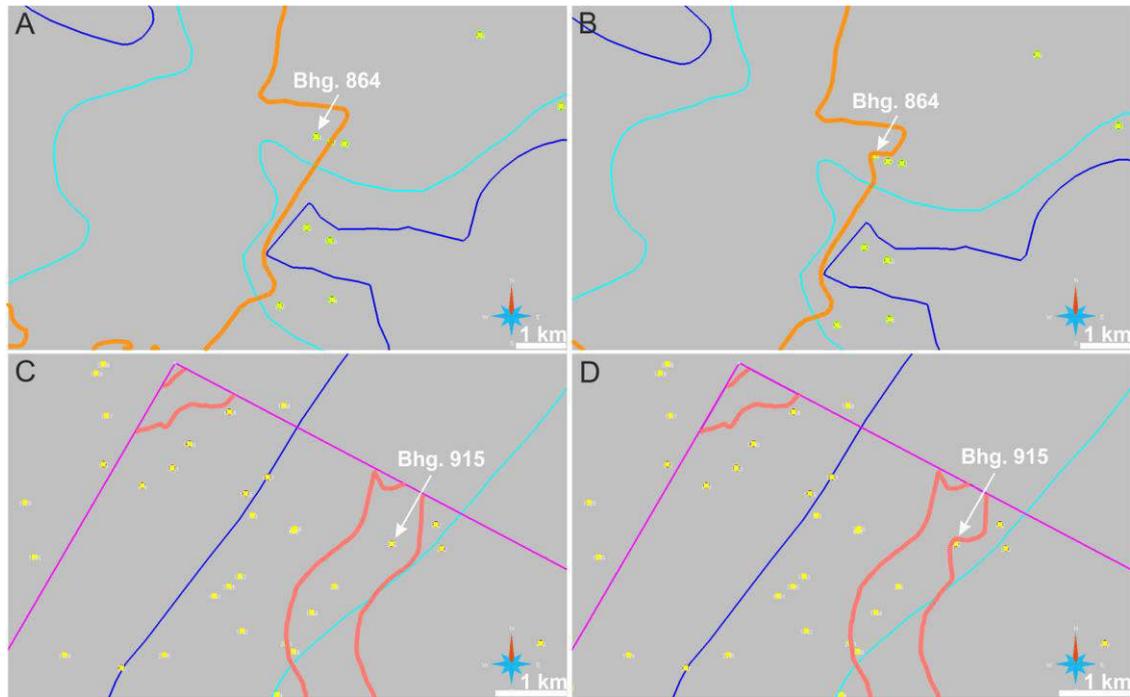


Abbildung 9 A-B: Anpassung des Ausstrichs der Basis des Oberen Buntsandstein (so) unter Berücksichtigung der Bhg. 864; C-D: Anpassung des Ausstrichs der Basis des Mittleren Buntsandstein (smV) unter Berücksichtigung der Bhg. 915. (Cyan - Salzhanginnengrenze; Blau - Salzhangaußengrenze; Orange - Ausstrich (so); Rosarot - Ausstrich (smV); Magenta - Arbeitsgebiet; Gelb – Tagesbohrung)

4.1.3 Bohrungsdaten aus Tagesbohrungen

Für die Modellierung wurden Tagesbohrungen und Untertagebohrungen genutzt. Tagesbohrungen wurden aus der Datenbank der K+S Aktiengesellschaft recherchiert und stellten die Basis der jeweiligen stratigraphischen Schicht dar. Die Recherche bildet den Stand von Juli 2013 ab. Weiterhin standen die jeweiligen Schichtenverzeichnisse der Tagesbohrungen in analoger und digitaler Form zur Verfügung (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Tagesbohrungen, deren Hintergrundinformationen wie Rechtswert, Hochwert, Bohransatzpunkt oder Endteufe unvollständig waren bzw. deren Endteufe bei weniger als einem Meter lag, blieben unberücksichtigt. Ohne die exakte Lokation bzw. Bohrteufen, war eine sinnvolle Verwendung für die Modellierung nicht möglich, da die Unsicherheit der Daten zu groß war. Kurzbohrungen mit Endteufen von weniger als einem Meter entfielen, da die quartäre Überdeckung für das Modell nicht relevant war. Die erste Qualitätskontrolle erfolgte mittels Visualisierung der Eingangsdaten mit dem Programm Surfer®, um offensichtliche Fehler zu erkennen. Tagesbohrungen, die anomale Tiefen- oder Mächtigkeitsangaben bzw. fehlende Schichtunterkanten oder Schichtdopplungen aufwiesen, wurden einzeln überprüft. Unter Berücksichtigung des digitalen Bohrungsarchivs sowie analoger Schichtenverzeichnisse bzw. einer erneuten

Begutachtung vorhandener Bohrkern einer Tagesbohrung erfolgten Korrekturen in drei Fällen. Insgesamt sind 1.737 Tagesbohrungen zur Modellierung verwendet worden. Da die exakten Bohrspuren bei der Mehrzahl der Tagesbohrungen nicht vorlagen, wurde die Annahme getroffen, dass sie vertikal verlaufen, weshalb Abweichungen von der Bohrspur demnach unberücksichtigt bleiben.

4.1.4 Grubenrissliche Unterlagen

Wesentliche Merkmale der Lagerstätte werden im Zuge der bergmännischen Gewinnung dieser in grubenrisslichen Unterlagen dokumentiert. Zu jenen zählen u. a. die für diese Arbeit relevanten Untertagebohrungen, Fazieskarten der Kaliflöze, Vulkanite, Gasvorkommen und Gehalte der Kaliflöze. Die Unterlagen wurden in digitaler Form als CAD-Dateien zur Verfügung gestellt (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]).

4.1.4.1 Bohrungsdaten aus Untertagebohrungen

Untertagebohrungen wurden digital in den grubenrisslichen Unterlagen übermittelt (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]). Sie dienen der Erkundung der Lagerungsverhältnisse was vornehmlich die Kaliflöze sowie potentielle Gas- und Salzlösungsvorkommen impliziert. Die verwendeten Untertagebohrungen wurden entweder vertikal oder horizontal, ondulierend oder in einzelnen Fächern gestoßen. Die Bohrungsdaten lagen im Datenbanksystem der K+S Aktiengesellschaft (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]) im CAD-Format vor. Anhand von Punkt- bzw. Linien-elementen sowie der Beschriftung entlang der Bohrspuren als konkrete Teufenangaben in Textform waren Koordinaten von Basis und Top eines Flözes eindeutig zuweisbar. Die unterschiedliche Form der Daten, die z. T. auf unterschiedlichen digitalen Ebenen in AutoCAD[®], sog. Layern, hinterlegt waren, machte die separate, manuelle Zuweisung von Einzelelementen erforderlich, um einen sinnvollen Datenexport zur Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Dabei wurden Lageungenauigkeiten von wenigen Metern (Abbildung 10, S. 36) unter Berücksichtigung der Fläche des Arbeitsgebietes toleriert, da sie für die nachfolgenden Untersuchungen einen vernachlässigbaren Fehler darstellen. Nicht eindeutig zuweisbare Informationen blieben unberücksichtigt, um keine Fehlinformationen zu transportieren und Ungenauigkeiten zu vermeiden. Dies war beispielsweise der Fall, wenn sich überlagernde Bohrspuren mit unterschiedlichen stratigraphischen Bezeichnungen versehen waren. Dies kam in sehr geringer Häufigkeit vor, sodass die Auswirkungen auf die Modellierung vernachlässigbar waren.

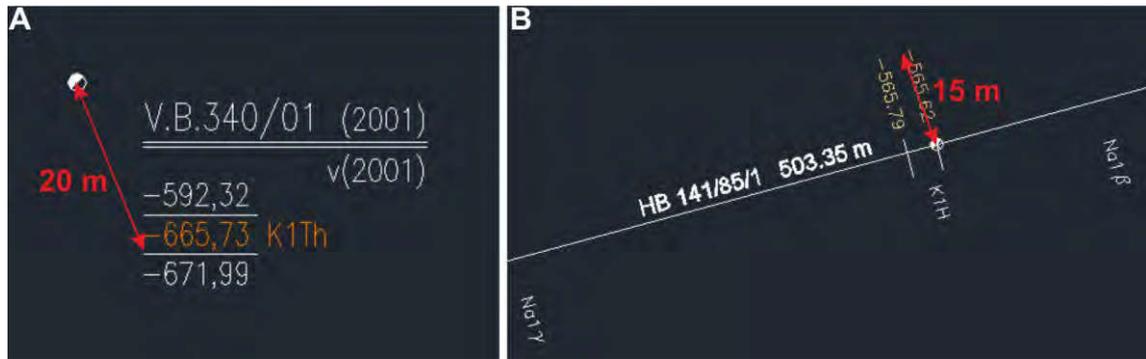


Abbildung 10 Lageungenauigkeiten bei der Zuweisung von Koordinaten am Beispiel einer Vertikalbohrung (A) und einer Horizontalbohrung (B)

4.1.4.2 Fazies- und Strukturdaten

Weiterhin wurden Fazieskarten der beiden im Abbau befindlichen Kaliflöze in die Untersuchungen einbezogen (Kap. 5.3.4). Diese lagen als durch Linien begrenzte schraffierte Flächen in Form von CAD-Dateien (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]) bzw. analog vor und wurden für die weitere Bearbeitung in ein ArcGIS®-fähiges Format übertragen (MARKS, 2015, [138], NAWA, 2014, [147]).

Aus bestehenden Rissunterlagen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [93]) wurden außerdem tektonische Elemente zur Modellierung übernommen. Zu diesen zählen neben Subrosionen auch die durch K+S interpretierten Störungen im Suprasalinar. Die Störungsverläufe im Suprasalinar wurden u. a. unter Berücksichtigung geologischer Karten, seismischer und elektromagnetischer Erkundung, der faziellen Entwicklung der Kaliflöze sowie von Tagesbohrungen und anhand von Fernerkundungsmethoden bewertet (BÜCHEL et al., 2012, [16], K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [93]) und lagen als zweidimensionale Linienelemente im CAD-Format vor. Analog zu dieser Vorgehensweise wurden die Störungsverläufe im Suprasalinar für die Teilgebiete Marbach-Nord und Marbach-Süd (Abbildung 1, S. 5) erarbeitet (Kap. 4.2.1).

4.1.4.3 Vulkanitvorkommen

Vulkanitvorkommen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]) lagen als Punkt- und Linienelemente vor, wobei diese einen definierten Rechts- und Hochwert und in einigen Fällen eine definierte Teufe aufwiesen. Auf Grundlage von 37 verschiedenen Layern erfolgte eine Vereinfachung und Vereinheitlichung. Dabei wurden Duplikate entfernt und komplexe Strukturen fiederförmig angelegter Dykes, Sills sowie übertägig anstehender Vulkanite, die einen räumlichen Zusammenhang aufwiesen, einem Großelement zugeordnet (Abbildung 11, S. 37).

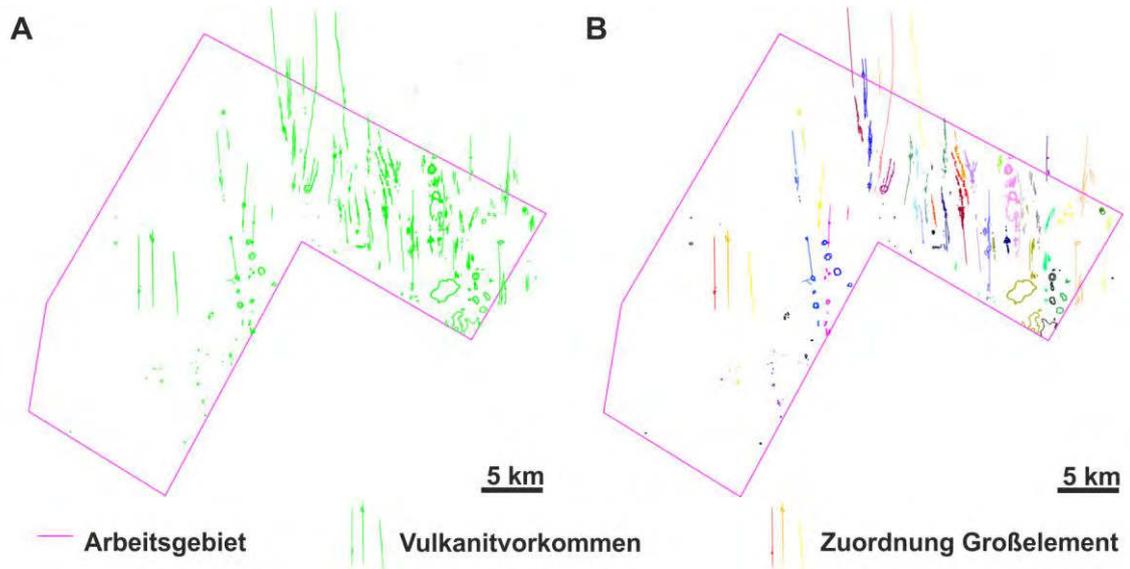


Abbildung 11 Zuordnung der Vulkanitvorkommen zu Großelementen. A: Datengrundlage aus den grubenrisslichen Unterlagen, B: Zuordnung entsprechend lokaler Zusammenhänge; einem Großelement zugeordnete Polylinien und Punktaufschlüsse sind farblich entsprechend hervorgehoben

Damit einhergehend wurden Inkonsistenzen, wie z. B. isolierte Vulkanitvorkommen ohne dokumentierte Gasereignisse, geprüft und nach Absprache mit den verantwortlichen Grubengeologen bzw. eigenen Befahrungen ggf. angepasst. An Vulkanitdykes waren untertage maximale vertikale Schichtversätze von wenigen Zentimetern zu beobachten (Abbildung 12), was ins Suprasalinar extrapoliert wurde. Die entstandenen Flächen wurden daher nicht als Störungen in die Berechnung des 3D-Modell eingefügt, um keine Versätze an diesen zu generieren.

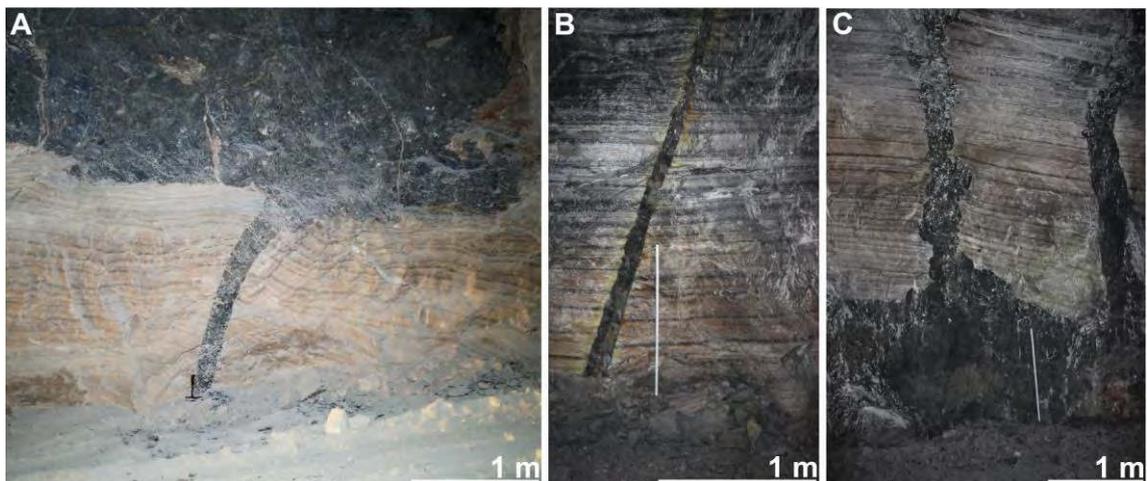


Abbildung 12 Aufschlüsse von Vulkaniten in der Grube UB. A: Übergang von Dyke zu Sill; B: geringfügiger vertikaler Schichtversatz entlang eines Dykes, C: geringfügiger vertikaler Schichtversatz im Übergang von Sill zu Dyke

4.1.4.4 Gasereignisse

Gasanalysen (K+S ANALYTIK- UND FORSCHUNGSZENTRUM, 2014, [97], K+S ANALYTIK- UND FORSCHUNGSZENTRUM, 2015, [98], K+S ANALYTIK- UND FORSCHUNGSZENTRUM, 2015, [99], K+S ANALYTIK- UND FORSCHUNGSZENTRUM, 2015, [100], WINTERSHALL HOLDING GMBH, 2015, [206], WINTERSHALL HOLDING GMBH, 2015, [207]) belegen, dass sich 95 % bis 99 % der untertägig vorkommenden Gase im Arbeitsgebiet aus Kohlenstoffdioxid zusammensetzen. Dem Antreffen von Kohlenstoffdioxid kommt im Grubenbetrieb die stärkste Bedeutung zu. Kohlenstoffdioxidvorkommen (nachfolgend: Gasereignisse) sind grubenrisslich verzeichnet.

Gasereignisse sind einerseits Gasbläser, wie sie im Zuge der Bohrerkundung auftreten, und andererseits Gas-Salz-Ausbrüche, die sog. Gasracheln (Abbildung 13 B, S. 39) unterschiedlicher Größe generieren. Bei der Dokumentation von Gasereignissen bestanden in den Gruben Unterbreizbach und Hattorf historisch gewachsene Unterschiede. Während im Grubenfeld Unterbreizbach vor allem die Größe des Gasereignisses für die Dokumentation ausschlaggebend war, wurden im Grubenfeld Hattorf alle beobachteten Gasereignisse unabhängig von ihrer Größe verzeichnet.

Die Lokationen von Gasereignissen waren mittels unterschiedlicher Symbole im digitalen Risswerk der einzelnen Gruben hinterlegt und besaßen eindeutige Koordinaten in Form von Rechts- und Hochwerten im Gauß-Krüger-Koordinatensystem. Zu den Symbolen zählten Bögen, Kreise, Polylinien und Polygone, die entweder sog. Gaskellen oder Umrisse von Gasracheln ergaben (Abbildung 13 B, S. 39). Gaskellen wurden mit Hilfe von AutoCAD[®] in ihre Bestandteile zerlegt, sodass ein Gasereignis durch je einen Kreis bzw. zwei Bögen und eine Linie dargestellt wurden. Beim Extrahieren der Koordinaten wurden nur Linien berücksichtigt, um kein Gasvorkommen mehrfach zu erfassen. Eine Linie wies je eine Start- und Endkoordinate auf. Beim Auslesen der Koordinaten wurden die jeweiligen Startpunkte als diskrete Anzeiger der Lokation eines Gasereignisses ausgewählt. Die Startpunkte der Linien sind identisch konstruiert und befinden sich jeweils am Anfang einer Gaskelle. Gasracheln lagen z. T. als geschlossene Polygone vor (MARKS, 2015, [138], NAWA, 2014, [147]). Unabhängig von der jeweiligen Größe des Polygons wurde in ArcGIS[®] aus je einem Polygon ein Punkt erzeugt, dessen Koordinate zur weiteren Untersuchung diente. Schnitte blieben im Bezug zu Gasereignissen unberücksichtigt, da nicht jeder Schnitt gasführend ist. Auch Polylinien, die lediglich die Stoßkontur darstellten, wurden nicht weiter verarbeitet.

Um zu klären, wie sich die Verteilung der Gasereignisse innerhalb der Gruben entwickelt, wurde eine Häufigkeitsanalyse der dokumentierten Gasereignisse vorgenommen. Hierzu ist ein 400 km² umfassendes Raster mit Gitterabständen von 100 m x 100 m erstellt worden, um die Anzahl von Gasereignissen in einer definierten Fläche zu bestimmen. Mit Hilfe des Programms SagaGIS[®] wurde die Anzahl der Gasereignisse in einer Rasterzelle ermittelt und farblich differenziert dargestellt (Kap. 5.3.6.1).

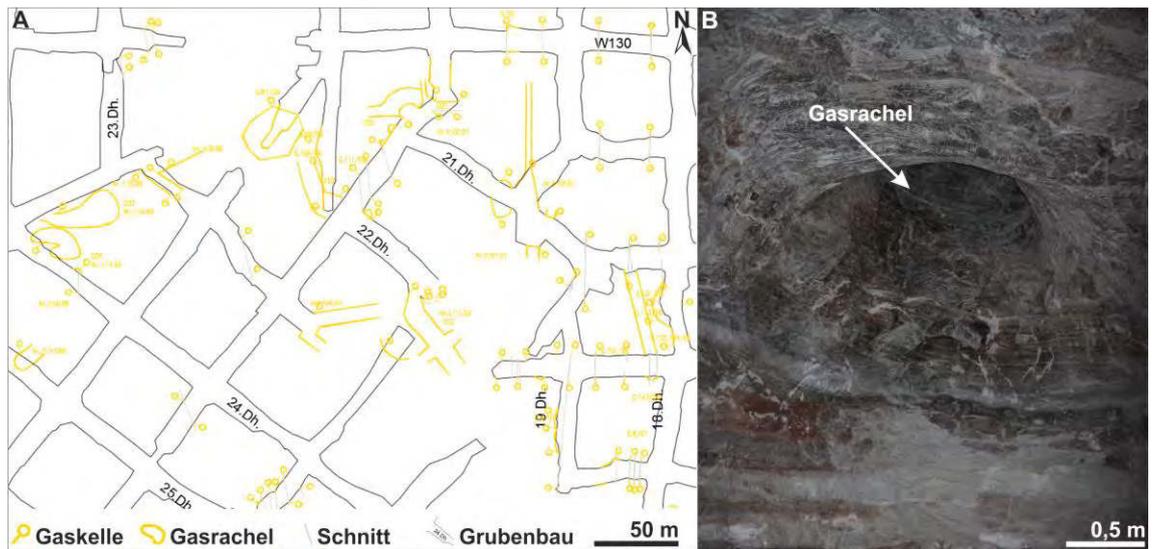


Abbildung 13 A: Datengrundlage: Beispielhafte Darstellung eines Rissauschnittes aus den grubenrisslichen Unterlagen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]); B: Gasrachel im Übergang des Kaliflöz Thüringen zum Mittleren Werra-Steinsalz

Mit dem Ziel neben quantitativen erstmalig auch qualitative Untersuchungen bzgl. der Größe der Gas-Salz-Ausbrüche im Bezug zur Raumlage durchführen zu können, wurden Gasverzeichnisse⁹ und grubenrisslichen Unterlagen ausgewertet (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90], K+S KALI GMBH, 2013, [101], K+S KALI GMBH, 2015, [102]). Erstere dokumentierten Name, Datum und abgeförderte Masse an Salzhafwerk des Gas-Salz-Ausbruchs. Letztere enthielten Textfelder, die entweder Datum oder Namen eines Gas-Salz-Ausbruchs dokumentierten und anhand von Rechts- und Hochwerten räumlich zuweisbar waren. Die eigentliche Zuweisung von Tonnage-Angaben zu den zugehörigen Gauß-Krüger-Koordinaten erfolgte mit Hilfe von Excel[®]. Nur eineindeutig zugewiesene Tonnagen und Gauß-Krüger-Koordinaten wurden für die weitere Bearbeitung genutzt, um Ungenauigkeiten zu vermeiden. Dabei wird die Annahme zu Grunde gelegt, dass ein Zusammenhang zwischen der Ausbruchgröße und dem frei gewordenen Gasvolumen besteht (Abbildung 14, S. 40). Das frei gewordene CO₂-Volumen entspricht im Mittel etwa dem 10-fachen der ausgeworfenen Masse an Salzgestein (MÜLLER, 1958, [146]).

⁹ Gasverzeichnis der Grube Hattorf mit dem Stand von 2005 bis 2015, Gasverzeichnis der Grube Unterbreizbach mit dem Stand von 1997 bis 01.10.2013

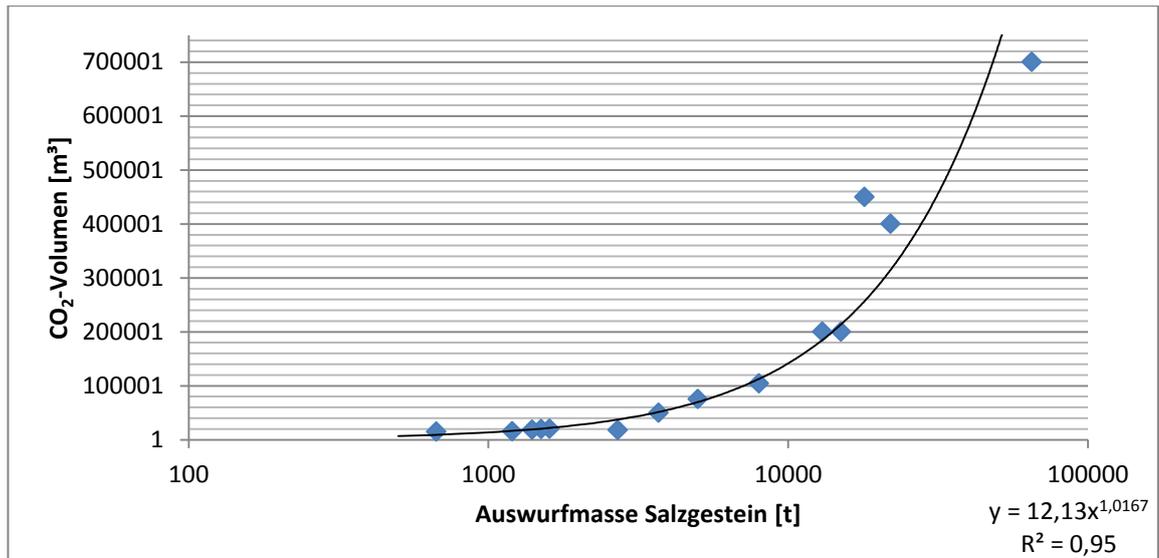


Abbildung 14 Beziehung des CO₂-Volumens und der Auswurfmasse der Salzgesteine (nach MÜLLER, 1958, [146])

Weiterhin wird vorausgesetzt, dass eine verstärkte Häufung und erhöhte Auswurfmenge der in den grubenrisslichen Unterlagen verzeichneten Gas-Salz-Ausbrüche auf lokal stärker CO₂-imprägnierte Salzgesteine zurückzuführen sind. Einschränkend muss erwähnt werden, dass je nach Grube Gas-Salz-Ausbrüche abhängig von der Gewinnungsart entweder vermieden werden sollten oder aber in Form von Weitungsbaue genutzt wurden.

Im Zuge einer Vereinheitlichung der Erfassung von CO₂-Ereignissen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2014, [95]) wurde eine Einteilung des als Resultat von Gas-Salz-Ausbrüchen abgeführten Haufwerks in vier Kategorien vorgenommen (Tabelle 6).

Tabelle 6 Kategorisierung abgeführten Haufwerks bei der Erfassung von CO₂-Ereignissen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2014, [95])

Einteilung	Abgeführtes Salzgestein in Folge von Gas-Salz-Ausbrüchen
Kategorie 1	10 – 99 t
Kategorie 2	100 – 999 t
Kategorie 3	1.000 – 9.999 t
Kategorie 4	> 9.999 t

Die Bestimmung der Tonnagen des jeweils abgeführten Haufwerks ist anhand der in Summe der geförderten Schaufelinhalt der eingesetzten Ladetransportfahrzeuge ermittelt worden. Die Ungenauigkeit dieser Bestimmungsmethode belief sich auf wenige Tonnen, sodass die Anwendung der aufgeführten Kategorien 1 bis 4 zur weiterführenden

den Untersuchung einen vernachlässigbaren systematischen Fehler aufweist und grundsätzlich möglich ist (Kap. 5.3.6.2).

4.1.4.5 Wertstoffgehalte

Neben der Position von Gasereignissen wurden auch Wertstoffgehalte in den grubenrisslichen Unterlagen übermittelt. K_2O - und Kieseritgehalte der kaliführenden Horizonte sind wesentliche Parameter für die Gewinnung. Die Ermittlung beider Parameter erfolgt einerseits nasschemisch, wobei vor Ort genommene Gesamtproben bereits Untertage zerkleinert, homogenisiert und mit Hilfe von Probenteilern geteilt sowie in firmeneigenen Laboren analysiert werden. Der K_2O -Gehalt wird andererseits mit Hilfe von sog. Kalimetern bestimmt. Er beschreibt ein rechnerisch ermitteltes Äquivalent zur Angabe des Wertstoffgehaltes von Kalisalzen und ist unabhängig von der Gesteinszusammensetzung anwendbar (GWOSDZ et al., 2006, [59], WARREN, 2006, [201]). Kalimeter sind radiometrische Messeinrichtungen, die den natürlichen Zerfall des ^{40}K -Isotops detektieren. Dabei gehen ^{40}K -Isotope unter der Aussendung von β -Strahlung in ^{40}Ca -Kerne bzw. unter der Aussendung von γ -Strahlung in ^{40}Ar -Kerne über (HOLLEMAN et al., 1995, [76]).

Die Ermittlung der K_2O -Gehalte erfolgt mittels gasgefüllter Zählrohre durch die Messung der β -Strahlung, die in gasförmigen Medien absorbiert wird. Für die Detektion von γ -Strahlung werden Festkörper zur Absorption genutzt. Die Bestimmung von K_2O -Gehalten mit Hilfe des Kalimeters erfolgt durch Wiederholungsmessungen in einem Messintervall, wobei unter Voraussetzung der Poisson-Verteilung der relative Fehler [1] durch die Impulszahl N bestimmt werden kann.

$$rel. Fehler = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad [1]$$

Aus Formel [1] wird ersichtlich, dass eine beliebige Verlängerung der Messzeit die Präzision des Ergebnisses nur eingeschränkt verbessert. (DIETRICH & STAHL, 2003, [29])

Die in den grubenrisslichen Unterlagen verzeichneten K_2O -Gehalte wurden aus dem Mittelwert von mehreren Messintervallen im Abstand von ca. 30 cm über ein vertikales Messprofil entlang von Stößen bestimmt (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2015, [96]). Dabei wurde keine Rücksicht auf die fazielle Ausprägung der Salzgesteine genommen, sodass sich z. B. auch eingeschaltete Steinsalzlagen im Ergebnis widerspiegeln. Die jeweils ermittelten Gehalte lagen als Texte in CAD-Dateien mit definierten Rechts- und Hochwerten auf verschiedenen Layern vor (Tabelle 7, S. 42).

Tabelle 7 Auflistung der verwendeten Layer am Beispiel von K₂O-Gehalten (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90])

Datei	Layer
2BAU-HA	2BOR-NABO-DATEN-WERTSTOFF
	2GEO-MAECHTIGKEIT-BEM-K2O
	2GEO-MAECHTIGKEIT-BEM-K2O-STREICHUNG
	2geo-k2o
	K1Th_K2O
	TXT132_K20
	TXT132_K2O
	TXT260_K1Th_H
	TXT264_HB_WERTSTOFFMITTEL_K2O
	1BAU-HA
1GEO-BOHRERGERBENIS-K1H	
1geo-k2o	
1GEO-MAECHTIGKEIT-BEM-K2O	
1GEO-MAECHTIGKEIT-BEM-K2O-STREICHUNG	
1GEO-MAECHTIGKEIT-K2O	

In einigen Fällen waren Angaben zu verschiedenen Gehaltskategorien, wie K₂O, Kieserit und Langbeinit, auf einem Layer dargestellt, was die manuelle Zuweisung der jeweiligen Gehalte entsprechend ihrer Kategorien für eine sinnvolle Datenextraktion notwendig machte. So wurden für das Kaliflöz Thüringen 5.312 K₂O-Werte und 5.405 Kieserit-Werte sowie für das Kaliflöz Hessen 11.624 K₂O-Werte und 3.561 Kieserit-Werte zugewiesen. Um der stratiformen Entwicklung der Lagerstätte Rechnung zu tragen, wurden die Gehalte der jeweiligen Flöze getrennt untersucht.

Zur Untersuchung der Gehaltsverteilung war eine eigene Definition von Gehaltsklassen für das Arbeitsgebiet erforderlich. Tabelle 8 (S. 43) dokumentiert die durchschnittlichen K₂O-Gehalte für ausgewählte Salzgesteine im Allgemeinen (WARREN, 2006, [201]). Die Spannweite der Gehalte für Hartsalz, dem mengenmäßig bedeutendsten Gestein der 1. Sohle, und Carnallit, dem mengenmäßig bedeutendsten Gestein der 2. Sohle, sind vergleichbar. K₂O-Gehalte für Sylvinit können höher sein, was vor allem aus dem Anteil an Sylvinit im Gestein (Tabelle 9, S. 43) resultiert. ANLAGE 36 gibt die statistische Verteilung der dokumentierten Messwerte wieder. Im Vergleich zu den in Tabelle 8 (S. 43) dargestellten K₂O-Gehalten für Sylvinit, Hartsalz und Carnallit, lagen die Mittelwerte der K₂O-Gehalte der 1. Sohle mit 9,9 % K₂O bzw. der 2. Sohle mit 10,9 % im unteren Bereich, was die Erfordernis zur Definition einzelner Gehaltsklassen untermauert. Auch für Kieseritgehalte wurden mit Hilfe geostatistischer Mittel (Abbildung 15, S. 44) unter Berücksichtigung der vorliegenden Messdaten eigene Gehaltsklassen festgelegt (Tabelle 10, S. 45).

Tabelle 8 K₂O-Gehalt von ausgewählten Salzgesteinen (WARREN, 2006, [201])

Salzgestein	Zusammensetzung	K ₂ O-Gehalt [%]
Sylvinit	KCl+NaCl	10-35
Hartsalz	KCl+NaCl+CaSO ₄ +(MgSO ₄ •H ₂ O)	10-20
Carnallit	MgCl ₂ •KCl•6H ₂ O+NaCl	10-16
Langbeinitit	2MgSO ₄ •K ₂ SO ₄ +NaCl	7-12
Mischsalz	Hartsalz & Carnallit	8-20
Kainitit	4MgSO ₄ •4KCl•11H ₂ O+NaCl	13-18

Tabelle 9 K₂O-Gehalt von ausgewählten Salzmineralen (WARREN, 2006, [201])

Mineral	Zusammensetzung	K ₂ O-Gehalt [%]
Sylvin	KCl	63,2
Carnallit	MgCl ₂ •KCl•6H ₂ O	16,9
Kainit	4MgSO ₄ •4KCl•11H ₂ O	19,3
Polyhalit	2CaSO ₄ •MgSO ₄ •K ₂ SO ₄ •2H ₂ O	15,6
Langbeinit	2MgSO ₄ •K ₂ SO ₄	22,7
Leonit	MgSO ₄ •K ₂ SO ₄ •4H ₂ O	25,7
Schönit	MgSO ₄ •K ₂ SO ₄ •6H ₂ O	23,4
Glaserit	K ₂ SO ₄ •(Na,K)SO ₄	42,5
Syngenit	CaSO ₄ •K ₂ SO ₄ •H ₂ O	28,7
Kieserit	MgSO ₄ •H ₂ O	0,0
Halit	NaCl	0,0

Der im jeweiligen Boxplot (Abbildung 15, S. 44) dargestellte Wertebereich zwischen dem 1. und 3. Quartil stellt die Durchschnittswerte für die Gehalte dar. Die Antennen umfassen Wertebereiche, in denen die Gehalte jeweils erhöht bzw. erniedrigt sind, während die Ausreißer extreme Gehaltsanreicherungen bzw. –abreicherungen zeigen. Anhand der lagerstättenspezifischen Abgrenzung von Gehaltsklassen (Tabelle 10, S. 45) erfolgt die Untersuchung der Entwicklung der jeweiligen Gehaltskategorien in der Fläche (Kap. 5.3.5).

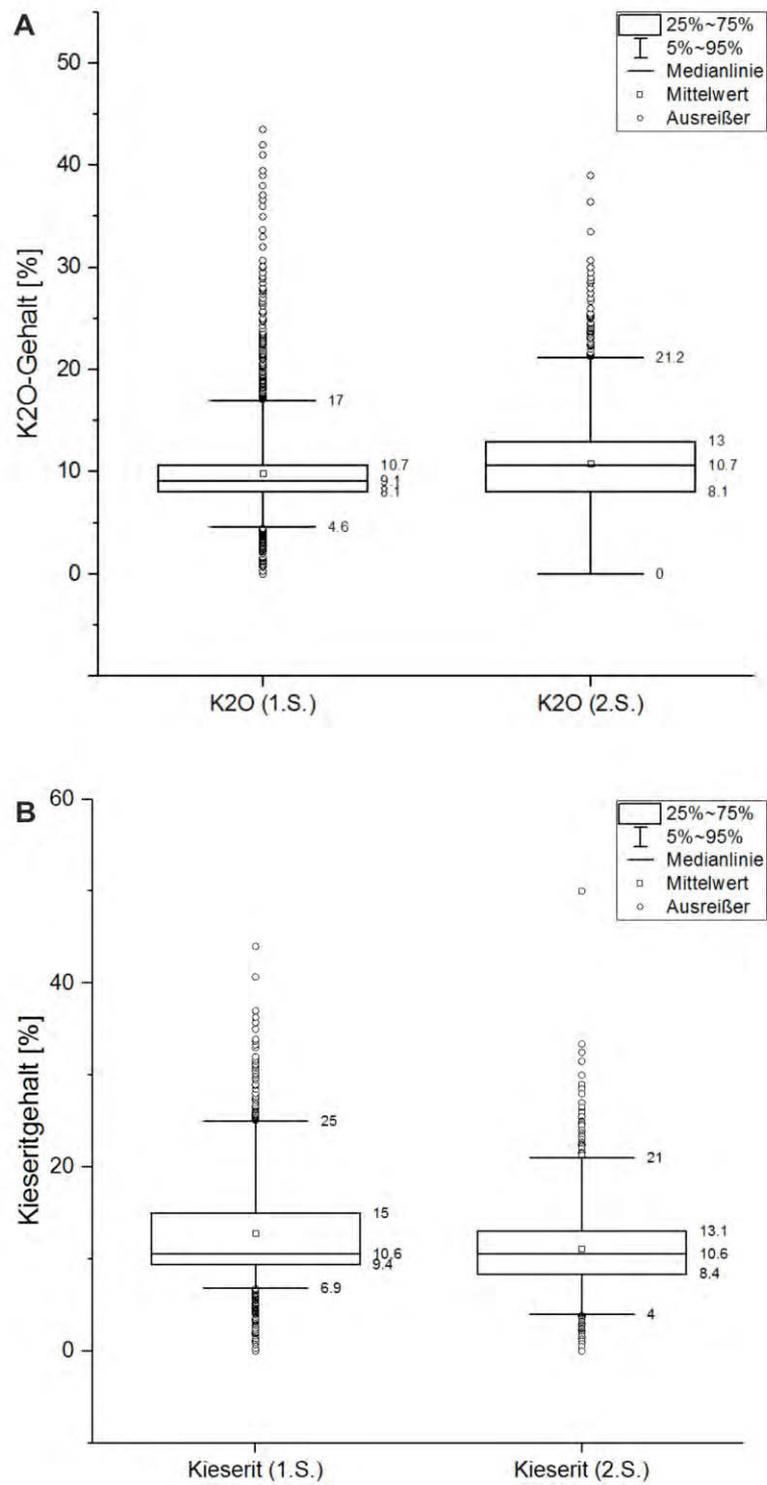


Abbildung 15 Boxplots der K₂O- (A) und Kieseritgehalte (B) auf der 1. und 2. Sohle

Tabelle 10 Abgeleitete Gehaltsklassen für die K₂O- und Kieseritgehalte der beiden Kaliflöze im Arbeitsgebiet

Klasse	K ₂ O-Gehalte (1. Sohle) [%]	K ₂ O-Gehalte (2. Sohle) [%]	Kieseritgehalte (1. Sohle) [%]	Kieseritgehalte (2. Sohle) [%]
1	< 4,6	-	< 6,9	< 4,0
2	4,6 - 8,1	< 8,1	6,9 – 9,4	4,0 – 8,4
3	8,1 – 10,7	8,1 – 13,0	9,4 – 15,0	8,4 – 13,1
4	10,7 – 17,0	13,0 – 21,2	15,0 – 25,0	13,1 – 21,0
5	> 17,0	> 21,2	> 25,0	> 21,0

4.1.5 Georadardaten

Mit Hilfe von Georadarmessungen (u. a. JOL, 2009, [86]) wurden seit Beginn der 1990er Jahre Mächtigkeitentwicklungen und strukturelle Besonderheiten der Lagerstätte im Vorfeld der Gewinnung untersucht. Störungen der Salzbasis¹⁰, Vulkanite oder Brekzien können mit Hilfe des Georadars lokalisiert werden. Für die Modellierung wurden Reflektoren des Unteren Werra-Anhydrit, des Kaliflöz Thüringen und des Kaliflöz Hessen aus Bohrloch- und Streckengeoradarmessungen genutzt (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [92]). Die Mehrzahl der Reflektoren war als Linienelement stratigraphisch zugewiesen. Einige weitere Reflektoren wurden unter Berücksichtigung benachbarter Bohrungen und sicherer Reflektoren selbstständig interpretiert. Die unterschiedliche Form der Datengrundlage resultierte aus dem Stand der Technik, den Auswertemethoden oder der Art und Weise der Reflektorbestimmung. Ältere, analog verarbeitete Radargramme wiesen technisch bedingt Messabweichungen von einigen Metern auf. Mit den technischen Entwicklungen verringerte sich der Messfehler auf ungefähr einen Meter. Diese Abweichungen waren im Hinblick auf die Ausdehnung des Arbeitsgebietes vernachlässigbar.

Die verschiedenen Reflektoren wurden jeweils einem Layer zugewiesen, der Top bzw. Basis eines stratigraphischen Horizonts repräsentierte. Auch bruchhafte Störungen innerhalb eines Horizonts, die sich in Form von Versätzen äußerten, wurden entsprechend kategorisiert. Die Vereinheitlichung ging mit einer Plausibilitätsüberprüfung einher. So wurden Reflektorversätze vernachlässigt, die zwischen zwei sich kreuzenden Profilen festgestellt wurden. Es wurde für die weitere Bearbeitung davon ausgegangen, dass die Verhältnisse der Tiefen innerhalb eines Profils zueinander korrekt waren. Stratigraphisch oder räumlich nicht zuweisbare Reflektoren (Abbildung 16) blieben für die Modellierung unberücksichtigt. Insgesamt wurden für die Modellierung 518.216 Reflektorlinien verwendet, die den Stand Januar 2014 abbilden.

¹⁰ Die Salzbasis beschreibt den Übergang vom Unteren Werra-Steinsalz zum Unteren Werra-Anhydrit (Tabelle 4, S. 45) und somit die Grenze von kompetent und inkompetent reagierendem Gestein im Liegenden der Lagerstätte.

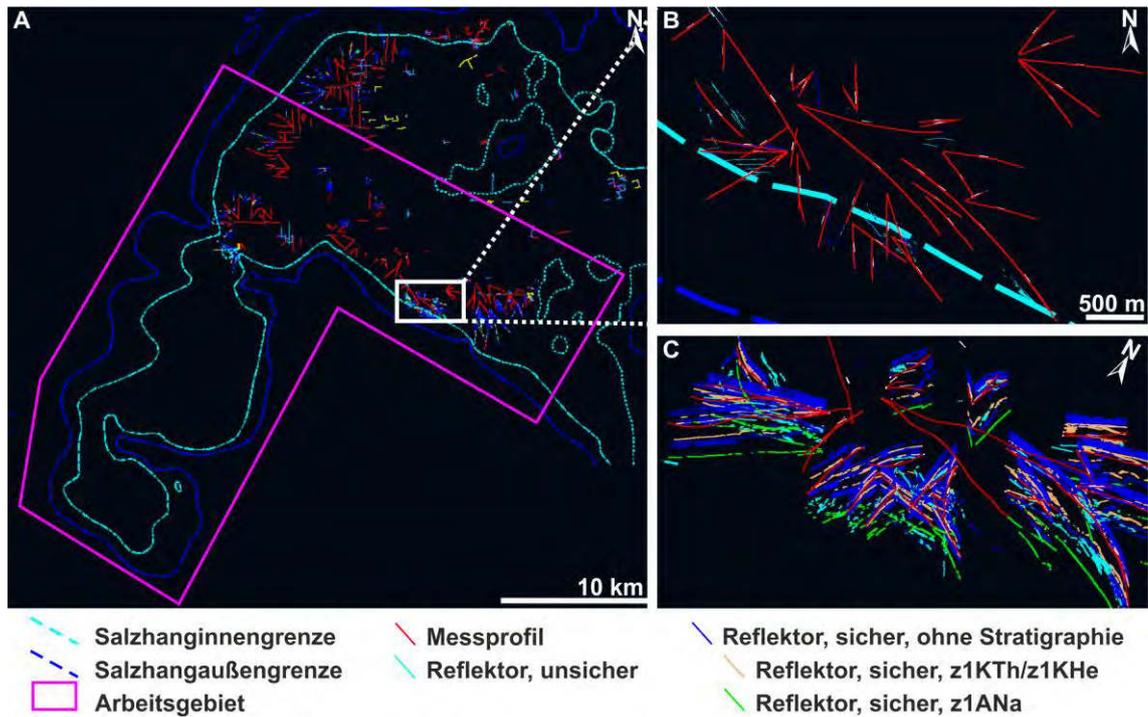


Abbildung 16 A: Georadarmessungen im Arbeitsgebiet; B: Draufsicht Messprofile in ausgewähltem Bereich; C: SE-Ansicht der Messprofile und Reflektoren im ausgewählten Bereich

4.1.6 Seismikdaten

Eine Vielzahl seismischer Messungen wurde in verschiedenen Messkampagnen seit den 1960er Jahren von Übertage durchgeführt (Abbildung 17, S. 47). Der angegebene Tiefenfehler betrug im Mittel ± 40 m, lokal bis 80 m. Störungen waren ab einem Versatzbetrag von mehr als 30 m darstellbar, allerdings ausschließlich anhand der Reflexionsseismik nicht näher charakterisierbar (u. a. SCHWARZ et al., 1987, [180]).

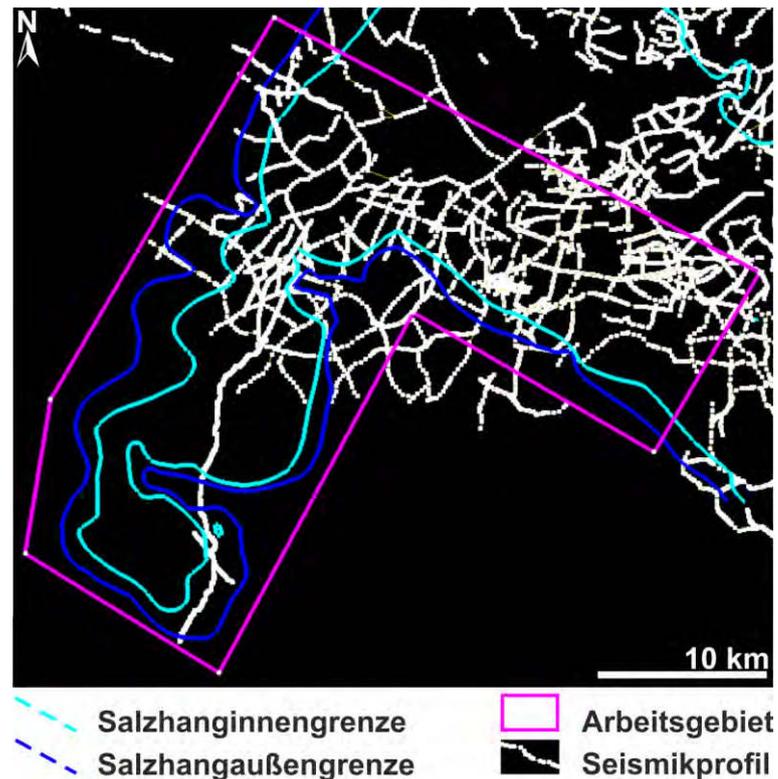


Abbildung 17 Übersicht der im Arbeitsgebiet vorhandenen Seismikprofile

Die Seismikdaten standen in Form von sechs GOCAD[®]-Projekten zur Verfügung (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2014, [94]) und geben den Stand von September 2014 wider. Seismikreflektoren des Leine-Karbonat, des Obere Werra-Ton sowie des Unteren Werra-Anhydrit lagen als Linienelemente im dreidimensionalen Raum vor. Vereinzelt waren Reflektoren der Buntsandsteinschichten vorhanden. Die Messgenauigkeit sinkt mit zunehmender Tiefe methodisch bedingt (SCHULZ, 2000, [173]). Die Reflektoren wiesen bezüglich ihrer Tiefe im Vergleich zu Aufschlüssen in Tagesbohrungen Abweichungen von einigen Dekametern auf. Die Abweichungen lagen z. T. mit 20 m bis 30 m im Bereich der Messgenauigkeit, betrug vereinzelt aber auch mehr als 200 m. Ebenso traten vertikale Abweichungen bei Reflektoren sich kreuzender Seismikprofile auf. Darüber hinaus waren vereinzelt stratigraphisch gedoppelte Zuweisungen von Reflektoren in unterschiedlichen Tiefen einzelner Messprofile vorhanden. Teilweise vorliegende Berichte zu den jeweiligen Messungen enthielten selten Rohdaten, die es ermöglicht hätten, die Interpretation der Bearbeiter nachzuvollziehen. Daher waren die Unsicherheiten der Reflektoren aus den seismischen Kampagnen insgesamt als zu groß zu bewerten, um sie für die Modellierung der jeweiligen Horizonte zu verwenden. Dennoch wurden signifikante Schichtversätze, die innerhalb einzelner Seismikprofile als sichere Störungen deklariert worden waren (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2014, [94]), im 3D-Strukturmodell berücksichtigt.

4.1.7 Geomagnetik

Mit Hilfe geomagnetischer Messungen können aufgrund der unterschiedlichen Magnetisierbarkeit des Untergrundes Rückschlüsse auf Anomalien gezogen werden. So zeigen u. a. Vulkanite Anomalien in Bezug zur Umgebung an (Abbildung 18). Es standen Berichte und Kartenmaterial von fünf Magnetikkampagnen zur Verfügung (BGR, 2009, [9], GGL, 2010, [47], GGL, 2011, [48], GGL, 2012, [49], GGL, 2013, [50]). Aussagen zur exakten Tiefenlage und Verbreitung magnetische Anomalien waren technisch bedingt nicht möglich. Daher erfolgte lediglich ein visueller Abgleich interpretierter Vulkanitvorkommen. Im Fall verlässlicher¹¹, zusätzlicher Erkenntnisse, wie am Beispiel des Perspektivfeldes Marbach-Nord, wurden Vulkanitvorkommen ergänzt (Abbildung 18 B). Das vorliegende Kartenmaterial wurde in ArcGIS[®] georeferenziert, um daraufhin entsprechende Linienelemente zu digitalisieren, die für die Modellierung genutzt worden.

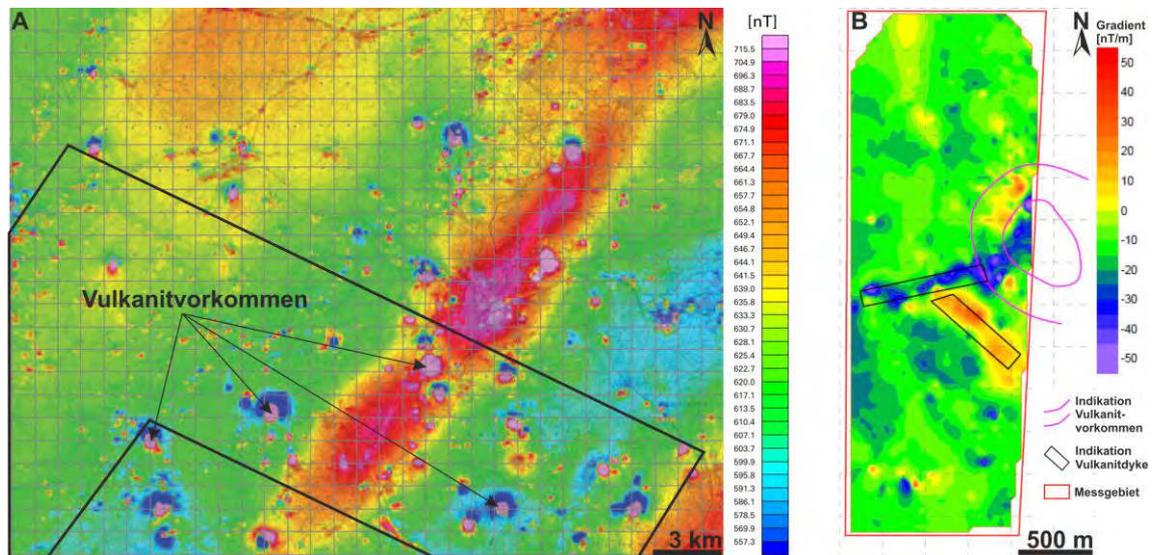


Abbildung 18 A: Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes [nT] mit Messpunktabstand von 4 m ohne Korrektur anthropogener Effekte, gering verändert nach BGR, (2009.), Arbeitsgebiet (Schwarz); B: Gradient des magnetischen Totalfeldes [nT/m] mit als Vulkanite interpretierten Anomalien im Feld Marbach-Nord (GGL, 2013, [50]).

4.1.8 Gravimetrie

Mit Hilfe gravimetrischer Messmethoden werden Materialdichten im Untergrund untersucht (KNÖDEL et al., 2005, [113], WÜSTNER, 1965, [208]). Abweichungen des Schwe-

¹¹ Unsicherheiten bestehen vor allem, wenn die magnetischen Gradienten eher mit anthropogenen Ursachen in Zusammenhang stehen könnten. Kann dies ausgeschlossen werden, ist das Ergebnis verlässlich.

refeldes von der Normalschwere beruhen auf Masseanomalien im Erdinneren. So erfolgte die Bestimmung des Salzhangverlaufs unter Zuhilfenahme gravimetrischer Messungen. Der Salzhang stand in Form von Linienelementen zur Verfügung, wobei diese die äußere und innere Begrenzung der Subrosionsgebiete darstellten (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]). Die Entwicklung des Salzhangs orientiert sich an bereits beschriebenen Störungsrichtungen im Werra-Kaligebiet (Kap. 3.2.2, Kap. 3.2.3).

4.2 Eingangsdaten und Geomodellierung

Geomodellierung beschreibt die mathematisch-informatischen Methoden, die auf einheitlichem Weg das Abbilden der Topologie, Geometrie und der Eigenschaften geologischer Objekte ermöglichen und dabei alle Arten von Daten mit Bezug zu diesen geologischen Objekten berücksichtigen (MALLET, 2002, [137]). Die Erstellung strukturgeologisch anspruchsvoller 3D-Modelle wurde bereits in der Vergangenheit mit Hilfe des Programms GOCAD[®] realisiert (u. a. ARNDT, 2012, [4], SCHMIEDEL, 2012, [171], SCHULZ, 2010, [172], STEINBORN, 2008, [187], VOGT, 2013, [198]), wobei in zuletzt auch SKUA[®] Verwendung fand (SATTLER, 2013, [164], ZEHNER et al., 2015, [209]).

GOCAD[®] (Geological Computer Aided Design) dient der Darstellung und Untersuchung geologischer Strukturen im Untergrund mit Hilfe von Punktmengen, Polylinien, Flächen und Körpern. Das Programm wurde von einem internationalen Konsortium, bestehend aus einer Vielzahl an Universitäten und Firmen, entwickelt und wird stets optimiert (STEINBORN, 2008, [187], TRÖGER, 2014, [195]). Wie für alle CAD-basierten Systeme werden auch in GOCAD[®] triangulierte Flächen genutzt. Die Koordinaten der triangulierten Punkte werden durch den in GOCAD[®] implementierten Interpolationsalgorithmus DSI (Discrete Smooth Interpolation) möglichst genau an die Eingangsdaten angepasst (MALLET, 1989, [136], MALLET, 2002, [137]). Der Interpolationsalgorithmus DSI orientiert sich hierfür an Randbedingungen (engl. Constraints), deren Wichtung durch den Nutzer festgelegt wird. Entsprechend dieser Wichtung verfolgt DSI im Verhältnis zur Rauigkeit der zu modellierenden Fläche das Ziel, die Randbedingungen so gut wie möglich zu erfüllen und gleichzeitig das Relief der Fläche zu minimieren.

SKUA[®] (Subsurface Knowledge Unified Approach) ist eine Weiterentwicklung von GOCAD[®] und bietet einen neuen Ansatz zur Modellerstellung sowie eine präzise Vorgehensweise zur volumenbasierten, geologischen Modellierung des Untergrundes. SKUA[®] bietet vor allem in Hinblick auf die tektonischen Darstellungen verbesserte Möglichkeiten zur Integration von auslaufenden Störungen. Darüber hinaus sind sehr geringmächtige Horizonte im Vergleich zur horizontalen und vertikalen Modellauflösung darstellbar. Damit ist die Erstellung kleinräumiger Modelle ohne Überlappungen möglich. SKUA[®] nutzt den Algorithmus UVT Transform[®], der darauf basiert, dass die zu modellierenden Horizonte die geochronologische Entwicklung einer Lagerstätte repräsentieren (Kap. 4.2.1). Mit Bezug zu tektonischen Elementen und der Stratigraphie ist ein gleichzeitiges Modellieren komplexer geologischer Sachverhalte mit Berücksichtigung gegenseitiger Abhängigkeiten der Horizonte untereinander möglich, ohne die

Eingangsdaten zu stark zu vereinfachen. Diese Innovationen von SKUA[®] gegenüber GOCAD[®] werden im Workflow Structure and Stratigraphy ausgenutzt. (PARADIGM, 2011, [149], PARADIGM, 2013, [150], PARADIGM, 2016, [151])

Abbildung 19 (S. 50) stellt den Ablauf des Workflows Structure and Stratigraphy dar. Erst nach der Beendigung eines Arbeitsschrittes war es möglich, mit dem Nächsten fortzufahren. So mussten zunächst Eingangsdaten für die Erstellung der stratigraphischen Tabelle ausgewählt werden, bevor der Modellraum definiert werden konnte. Daraufhin erfolgte die Erstellung der Störungen und Horizonte. In den nachfolgenden Unterkapiteln wurde inhaltlich Bezug auf die Arbeitsabfolge genommen, jedoch ist der Arbeitsschritt 1 (Abbildung 19, S. 50) inhaltlich jeweils mit den Schritten 4 (Kap. 4.2.2) und 5 (Kap. 4.2.3) zusammengefasst dargelegt, um einen Themenkomplex vollumfänglich zu beschreiben.

Für das Verständnis des dreidimensionalen Strukturmodells ist von Bedeutung, dass die Horizonte in SKUA[®] vom Top ausgehend modelliert wurden, während die Recherche in den Datenbanksystemen (u. a. Kap. 4.1.3) die jeweilige Basis dokumentierten. Dies wurde im Hinblick auf das stratigraphische Modell berücksichtigt (Kap. 4.2.1).

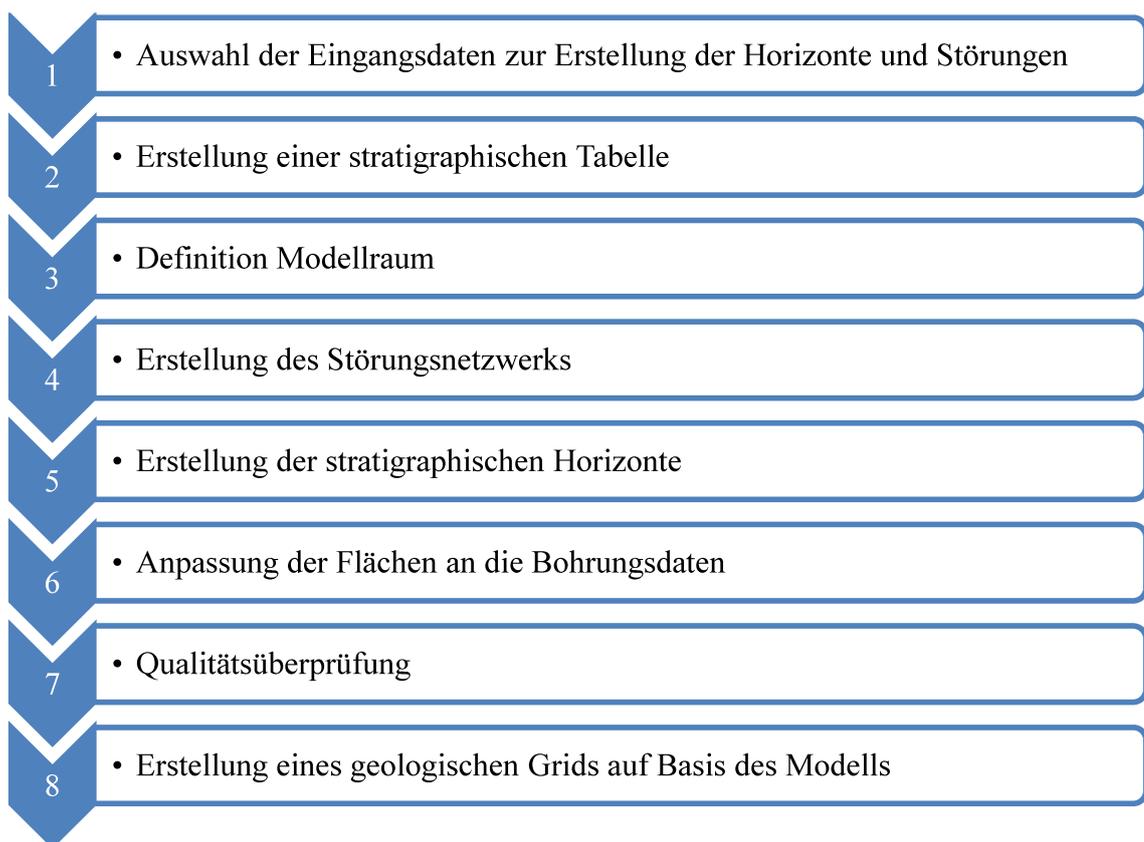


Abbildung 19 Überblick über die Arbeitsschritte im Workflow Structure and Stratigraphy¹²

¹² Grid: Gitter; durch z. B. Tetraeder miteinander verbundene Punkte

4.2.1 Definition Modellraum und stratigraphische Tabelle

Mit der Definition des Modellraumes wurde das Arbeitsgebiet in den dreidimensionalen Raum übertragen, indem dieses (Abbildung 1, S. 5) zunächst als Linienelement importiert wurde. Dem daraus erzeugten Polygon ist im Workflow eine vertikale Ausdehnung zwischen 1.000 m NN und -1.500 m NN zugewiesen worden. Innerhalb dieser Grenzen erfolgte die Erstellung des Strukturmodells.

Unter Berücksichtigung des Modellraumes, des regionalgeologischen Rahmens (Kap. 3.2) und der recherchierten Daten (Kap. 4.1) wurde ein stratigraphisches Modell für das Arbeitsgebiet erstellt (Abbildung 20, S. 53). Vor dem Hintergrund der daraus resultierenden stratigraphischen Informationen zur Sedimentations- und Erosionsentwicklung erfolgte die Modellierung der Horizonte (Kap. 4.2.3).

Die Geländeoberkante (Kap. 4.1.1) wurde als oberster Horizont definiert. Sie stellte aufgrund von tiefgreifender Erosion gleichzeitig die erste Diskordanz innerhalb der stratigraphischen Abfolge dar. Die sedimentären Einheiten des Tertiär und Quartär waren vornehmlich in Talauen und Senkenstrukturen kartiert (Kap. 4.1.2) und wurden im 3D-Modell nicht ausgehalten. Die Folgen vom Unteren bis zum Oberen Muschelkalk wurden für die Modellierung zusammengefasst. Der Muschelkalk wurde im Arbeitsgebiet weiträumig erodiert und ist vor allem im südlichen Bereich aushaltbar (Abbildung 25, S. 58).

Die Folgen des Oberen, Mittleren und Unteren Buntsandstein waren ebenfalls durch diese Erosion betroffen, wurden jedoch konform übereinander abgelagert. Der Abschnitt vom Oberen Leine-Ton bis zur Fulda-Formation wurde zusammengefasst. Dieses Schichtpaket konnte im gesamten Arbeitsgebiet nachgewiesen werden und wurde daher als konform eingeordnet. In diversen Schichtenverzeichnissen wird es als Teil einer tonig-sandigen Schichtenfolge ausgehalten, die ehemals als sog. „Obere Letten“ zusammengefasst worden waren (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]).

Das im Liegenden anstehende Leine-Karbonat wurde innerhalb des Arbeitsgebietes in allen Tagesbohrungen (Kap. 4.1.3) ausgewiesen und wurde daher als konform interpretiert. Die Basis des darunter folgenden Unteren Leine-Ton war hingegen nicht in allen Tagesbohrungen ausgehalten. Das lag vor allem darin begründet, dass der Untere Leine-Ton innerhalb des ehemals als sog. „Unteren Letten“ bezeichnete Schichtenpaket zusammengefasst wurde (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Diese waren im gesamten Arbeitsgebiet nachweisbar (Kap. 4.1.3), weshalb auch der Top des Unteren Leine-Ton im Modell als konform modelliert wurde. Dessen Basis war als Diskordanz zu definieren. Diese ergab sich in Bezug zur Verbreitung der Staßfurt-Formation und den Schichten des Obersten Werra-Steinsalz bzw. der Oberbank des Oberen Werra-Anhydrit.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch die jeweilige Basis des Staßfurt-Karbonat, des Unteren Staßfurt-Anhydrit und des Staßfurt-Steinsalz recherchiert. Diese waren in acht Tagesbohrungen nördlich des Arbeitsgebietes dokumentiert. Im Arbeitsgebiet konnten hingegen keine näheren Spezifikationen zur Staßfurt-Formation gemacht werden, weshalb sie im Modell nicht dargestellt wurde.

Der darunter anstehende Obere Werra-Ton war im gesamten Arbeitsgebiet nachweisbar (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Dessen Basis wurde als weitere Diskordanz definiert, da im abgegrenzten Modellraum direkt im Liegenden des Oberen Werra-Ton sowohl der Untere Werra-Anhydrit aufgeschlossen war, als auch die Kali- und Steinsalze der Werra-Formation eingeschaltet waren.

Die Kaliflöze Hessen und Thüringen wurden aufgrund ihrer Verbreitungsgrenzen ebenfalls als diskordant betrachtet. Zwar waren beide Kaliflöze regional aushaltbar, doch konnten sie in ihrer Verbreitung nicht über die gesamte Fläche des Arbeitsgebietes nachgewiesen werden. So war das Kaliflöz Hessen im Osten des Arbeitsgebietes nicht belegbar. Auch im Bereich von Subrosionen konnten die Kaliflöze nicht nachgewiesen werden. Der Untere Werra-Anhydrit wurde hingegen als konform interpretiert. Im stratigraphischen Modell des Arbeitsgebietes wurden somit fünf wesentliche Diskordanzen erkannt.

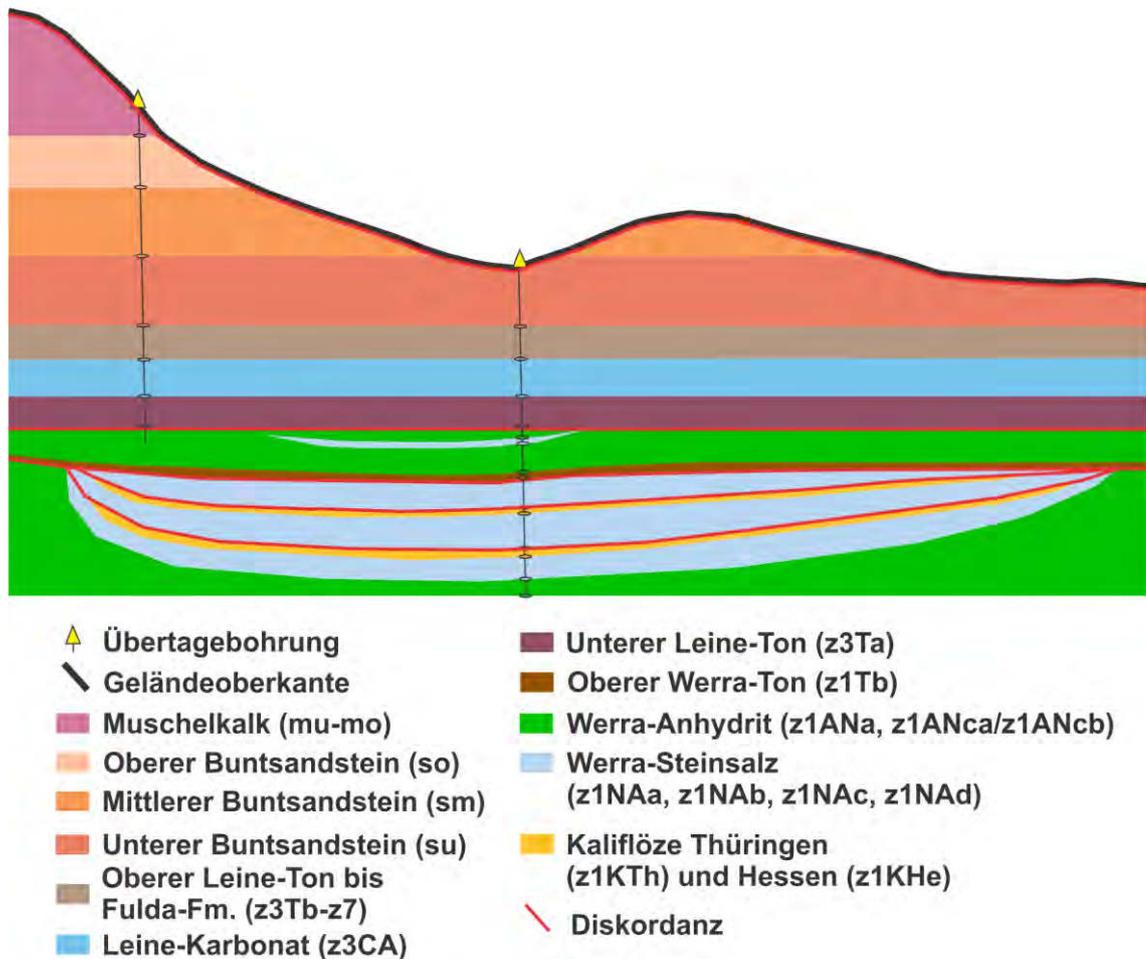


Abbildung 20 Schematische Darstellung des stratigraphischen Modells des Arbeitsgebietes, vgl. auch Tabelle 3 (S. 22) und Tabelle 4 (S. 23)

4.2.2 Eingangsdaten und Erstellung Störungen

Wie bereits festgestellt (Kap. 3.2.3), bestanden Unterschiede im Strukturinventar des Subsalinars, Salinars und Suprasalinars. Es ist davon auszugehen, dass die Störungen in den duktilen Gesteinen des Zechstein auslaufen, sodass die Salzgesteine als Abscheerungsfläche fungieren. Daher wurden die Horizonte oberhalb und unterhalb der vornehmlich plastisch reagierenden Salze der Werra-Formation voneinander entkoppelt modelliert.

Im Zuge der Datenauswertungen wurden Störungsindizien manuell mit Linienelementen (SKUA[®] Fault Stick) versehen. Diese wurden in der Reihenfolge ihrer Digitalisierung nummeriert, wobei eine Kategorisierung in sicher bzw. unsicher und in Bezug auf ihren Ursprung erfolgte. Zu den Unsicherheitsfaktoren zählten Reflektorausfälle sowie geringe Versätze, an der Grenze der Messgenauigkeit der Methode (Kap. 4.1.5, Kap. 4.1.6). Tabelle 11 (S. 54) gibt einen Überblick über die Anzahl der digitalisierten Fault Sticks im Arbeitsgebiet.

Das Störungsnetz des Suprasalinar wurde im Wesentlichen anhand der mit den grubenrisslichen Unterlagen übermittelten Störungen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [93]) sowie sicheren Störungselementen aus Seismikprofilen (Kap. 4.1.6) erstellt. Störungen des Subsalinar sind mit Hilfe von Seismikprofilen, Georadarreflektoren und in einigen Fällen aufgrund von Störungsindizien anhand von Tagesbohrungen erstellt worden.

Tabelle 11 Anzahl der Fault Sticks im Sub- und Suprasalinar mit Bezug zu ihrem Ursprung

Kürzel	Herkunft/Grundlage der Störungselemente	Subsalinar	Suprasalinar
FGK	Störung auf Basis der K+S Aktiengesellschaft (Modell 2013)	-	196
FBo	Störung sicher auf Basis von Ergebnissen aus Tagesbohrungen	19	-
fBo	Störung vermutet auf Basis von Ergebnissen aus Tagesbohrungen	5	-
FSe	Störung sicher auf Basis von Seismikreflektoren	45	55
fSe	Störung vermutet auf Basis von Seismikreflektoren	80	-
FRa	Störung sicher auf Basis von Georadarreflektoren	305	-
fRa	Störung vermutet auf Basis von Georadarreflektoren	124	-

Unter Berücksichtigung der geologischen Entwicklung (Kap. 3.2, Kap. 3.3) sowie vorliegender geologischer Karten und grubenrisslicher Unterlagen wurden die digitalisierten Fault Sticks den jeweiligen Störungen zugewiesen (Abbildung 21).

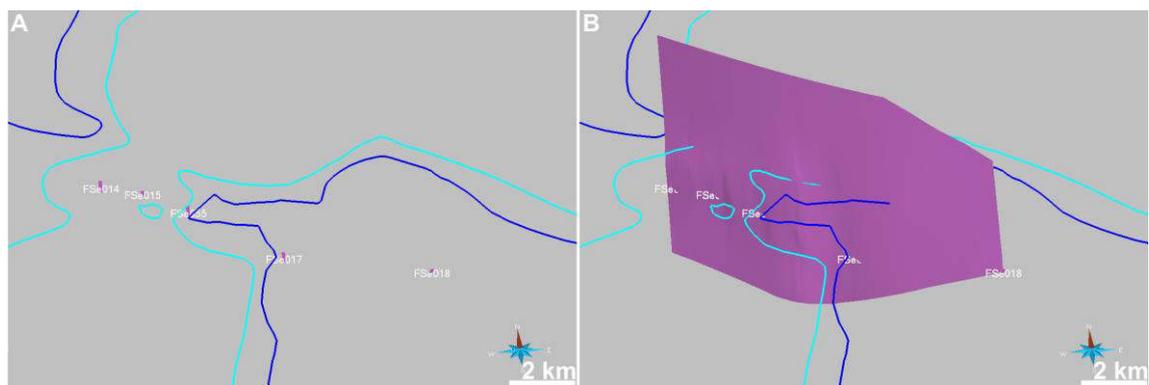


Abbildung 21 A: Darstellung der aus der Seismik resultierenden Linienelemente FSe014, FSe015, FSe055, FSe017 und FSe018; B: Anhand der Linienelemente erstellte Störungsfläche.

Im südwestlichen Teil des Arbeitsgebietes (Abbildung 22) wurden darüber hinaus Störungen im Suprasalinar anhand von Höhendaten (Kap. 4.1.1) sowie geologischen (Kap. 4.1.2) und geomagnetischen (Kap. 4.1.7) Karten neu interpretiert.

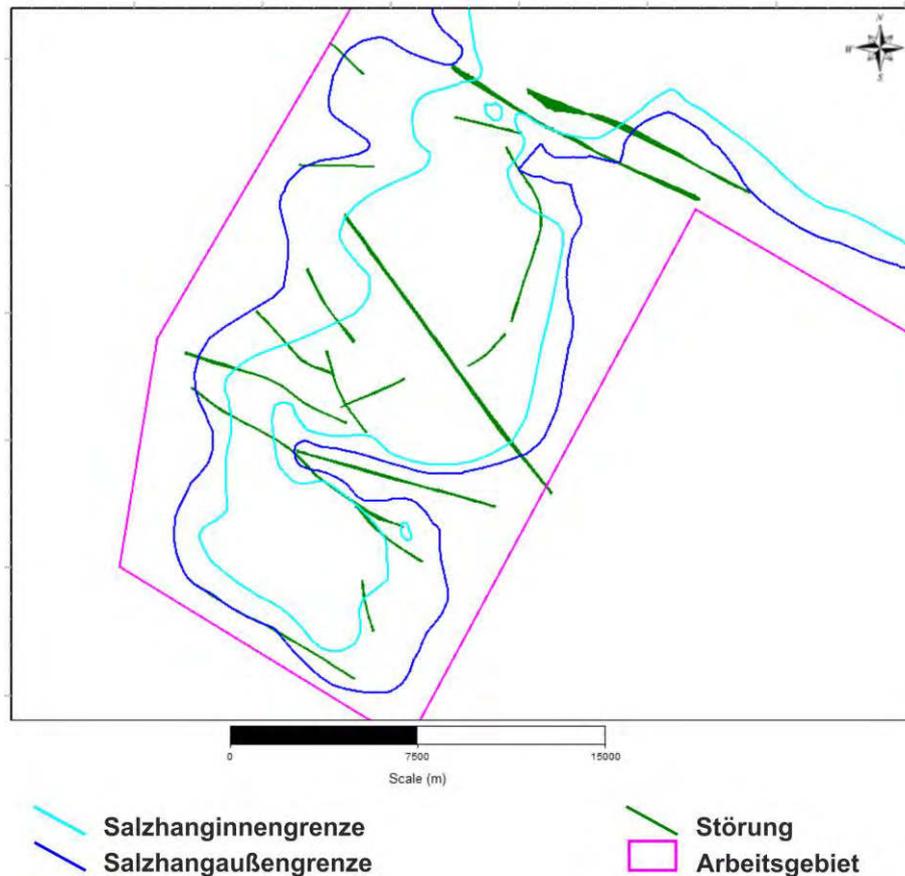


Abbildung 22 Neu interpretierte Störungen im Suprasalinar

Die Störungen des Suprasalinars wurden so konstruiert, dass sie im eher plastisch reagierenden Oberen Werra-Ton (ENGLER, 2012, [41], GRUNER et al., 2003, [57], K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88]) endeten. Zu diesem Zweck war eine manuelle Nachbearbeitung der Störungen notwendig, wobei die Basis des Oberen Werra-Ton zur Orientierung diente. Anhand dessen wurde eine Hilfsfläche erzeugt, um die Störungsflächen in einer plausiblen Tiefe zu begrenzen (Abbildung 23, S. 56). Aufgrund der geringen Mächtigkeit und begrenzten Verbreitung des Obersten Werra-Steinsalz (Tabelle 4, S. 23) blieb dieses von dieser Regelung unberücksichtigt.

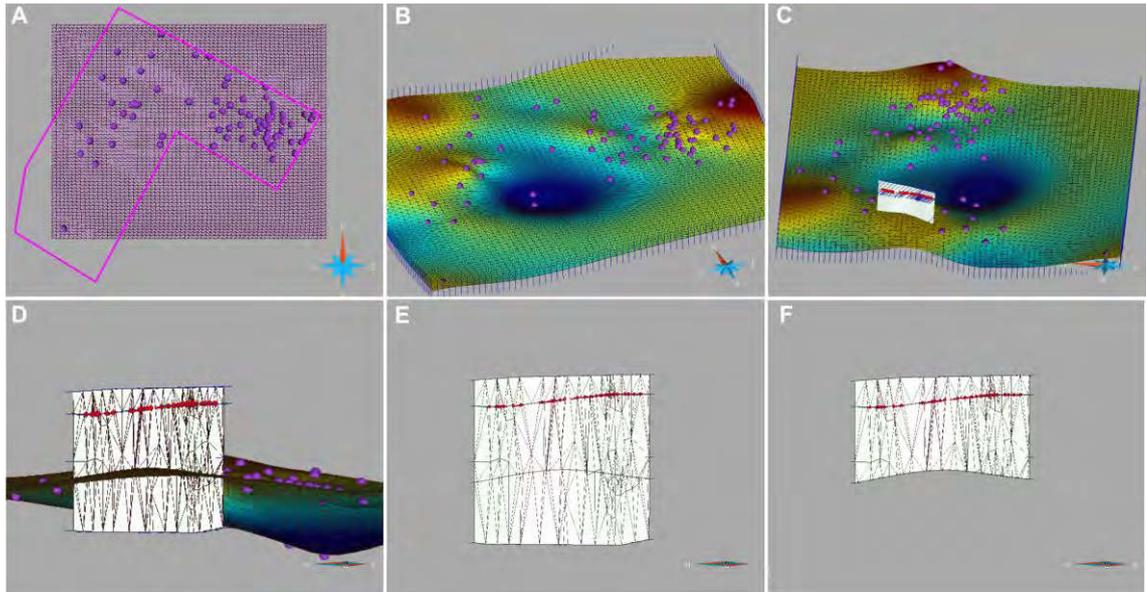


Abbildung 23 Methodische Darstellung der Anpassung von Störungsflächen am Beispiel einer Störung im Suprasalinar; A: Hilfsfläche erstellen; B: Hilfsfläche interpolieren; C: Störung darstellen; D: Störung an Horizont verschneiden; E/F: Löschen des überstehenden Bereiches

Um Versätze im bruchhaft reagierenden Anhydrit im Liegenden des Unteren Werra-Steinsalz darstellen zu können, war es technisch bedingt notwendig, dass die jeweiligen Störungsflächen den Zielhorizont schnitten, weshalb sie über die Basis des Unteren Werra-Steinsalz hinausragten.

Für die Erstellung der Störungsflächen wurden eine Auflösung von 380 m in der Fläche und eine vertikale Auflösung von 76 m verwendet. Mit Hilfe der Konstruktionsmethode „Convex Curves“, die mit einer konvexen Außenlinie alle Eingangsdaten zur Erstellung einer Störung umfasst und einer mittleren Passgenauigkeit (SKUA[®] Fit) wurde das Störungsnetzwerk in einem iterativen Verfahren erstellt.

In einigen Fällen kreuzten sich Störungsflächen mit Bohrspuren von Tagesbohrungen. Daher erfolgte an diesen Stellen die Prüfung auf tektonische Hinweise in den Ursprungsdaten. Zu jenen zählten brekziöses Gefüge sowie von den Bearbeitern interpretierte Störungszonen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Falls sich im Verlauf der Bohrspur einer Tagesbohrung ein gestörter Bereich bestätigte, wurde dieser entsprechend der Ursprungsdaten manuell mit der exakten Position im Bohrungsverlauf vermerkt und der betreffenden Störung zugewiesen. Waren jedoch keine Hinweise auf gestörte Bereiche vorhanden, wurde die Störungsfläche unter Berücksichtigung aller Eingabedaten so konstruiert, dass keine Verschneidung mit der Bohrspur zu Stande kam. Im Sinne einer möglichst hohen Güte des Störungsnetzes sind grundsätzlich alle Fehlermeldungen im Workflow Structure and Stratigraphy bearbeitet und behoben worden.

Insgesamt wurden im Suprasalinar 87 Störungen konstruiert, die als Abschiebung klassifiziert worden sind. Für das Subsalinar erfolgte die Neuinterpretation von 104 einzel-

nen Störungen, wobei allein die Störungen entlang der Treischfeld-Schwelle mit einer näheren Kennzeichnung als Abschiebungen versehen wurden. Die weiteren Störungen des Subsalinars blieben dahingehend nicht näher charakterisiert.

4.2.3 Eingangsdaten und Erstellung der Horizonte

Zunächst sind Tagesbohrungen unter Berücksichtigung ihrer Lokation¹³ und ihrer jeweiligen Endteufe sowie eindeutigen Archiv-Nr. in SKUA[®] importiert worden. Die so dargestellten Bohrspuren wurden daraufhin mit der stratigraphischen Information (SKUA[®] Well Marker) einer jeweiligen Schicht versehen. Nicht erreichte Schichtunterkanten lieferten zwar keine konkreten Informationen über die genaue Raumlage einer stratigraphischen Grenze, belegten aber, dass sich diese im Liegenden der erreichten Endteufe einer Bohrung befinden mussten. Diese Information floss so in die Modellierung ein, dass Bohrungen als unerreicht (SKUA[®] unreached) eingestuft worden sind. So wurde die Fläche unterhalb des Bohrlochtiefsten einer Bohrung modelliert (Abbildung 24).

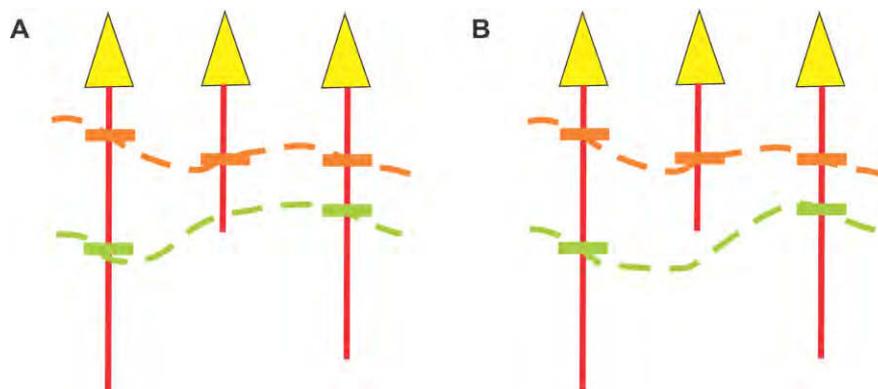


Abbildung 24 A – keine Berücksichtigung der nicht erreichten Basis des Horizonts in der mittleren Tagesbohrung; B – Basis Horizonts als „unreached“ definiert; Modellierung im Liegenden der Bohrspur

Im Fall von Untertagebohrungen wurden die jeweiligen, im Vorfeld bearbeiteten Punktelemente (Kap. 4.1.4.1) mittels RW, HW und Teufe importiert und dem betreffenden Horizont zugewiesen. Auch die Georadarreflektoren (Kap. 4.1.5) der Kaliflöze Hessen und Thüringen sowie die Reflektoren der Salzbasis wurden als Linienelemente importiert und ihrem jeweiligen Horizont zugeordnet.

Den verschiedenen Ausstrichen (Kap. 4.1.1) der zu modellierenden Horizonte wurde nach ihrem Import in SKUA[®] entsprechend ihrer Sedimentations- bzw. Erosionsentwicklung eine Eigenschaft zuzuweisen. Dabei bestand die Wahl zwischen

¹³ Rechtswert, Hochwert, Bohransatzpunkt

- Erosion-Outline,
- Non-Erosion-Outline,
- Deposition-Outline

und

- Non-Deposition-Outline.

Die Ausstriche des Unteren Muschelkalk sowie des Oberen und Mittleren Buntsandstein wurden entsprechend der stratigraphischen Klassifikation als Erosion-Outline bzw. Non-Erosion-Outline charakterisiert (Abbildung 25). In gleicher Weise erfolgte die Zuweisung von Sedimentations- und Erosionslinien für Horizonte, deren Verbreitung innerhalb des Arbeitsgebietes begrenzt ist. Die Konstruktion der Verbreitungsgrenzen der Kali- und Steinsalze der Werra-Formation orientierte sich am Verlauf des Salzhangs, wobei die Basis des Unteren Werra-Steinsalz an die Salzhangaußengrenze und die des Oberen Werra-Steinsalz an der Salzhanginnengrenze angelehnt war. Die Grenzen wurden auch unter Berücksichtigung der Übertage-, Untertagebohrungen und Georadarmmessungen konstruiert.

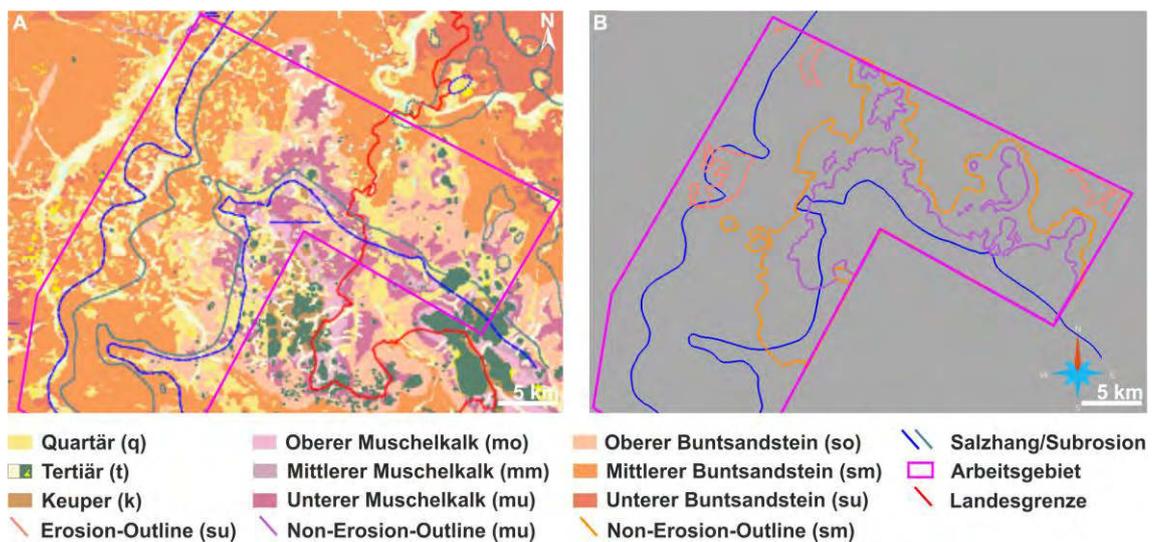


Abbildung 25 A: GK25 im Arbeitsgebiet; B: zugewiesene Ausbisslinien im Arbeitsgebiet

Es wurden insgesamt 18 Horizonte mit einer vertikalen Auflösung von 110 m und einer horizontalen Auflösung von 380 m innerhalb des Workflows modelliert. In Anlehnung an die Erstellung der Störungen (Kap. 4.2.2) wurde ebenfalls eine mittlere Passgenauigkeit gewählt. Für Horizonte, die eine unzureichende Übereinstimmung mit den Eingangsdaten aufwiesen, sind Hilfsflächen aus den Eingangsdaten konstruiert worden (Tabelle 14, S. 61). Diese Daten dienen bei der Interpolation der Hilfsflächen als Kontrollpunkte, sodass eine gute Genauigkeit erreicht werden konnte. Die Hilfsflächen wurden wiederum als Modellierungsgrundlage in den Workflow integriert. Dies erwies sich

unter anderem bei Horizonten mit einer vergleichsweise geringen Zahl von Eingangsdaten als vorteilhaft.

Allerdings war die Anwendung des Workflows Structure and Stratigraphy, im Gegensatz zu den Horizonten im Suprasalinar, für die Horizonte des Zechstein nicht zufriedenstellend. So wurden beispielsweise Schichtausfälle dargestellt, die für die Kaliflöze aufgrund der Eingangsdaten nicht nachvollziehbar waren. Deshalb erfolgte zunächst eine Vereinfachung der stratigraphischen Tabelle innerhalb der Workflows. Die Horizonte des Subsalinars und Suprasalinars sind mit Ausnahme der Geländeoberkante innerhalb des Workflows Structure and Stratigraphy als konform modelliert. Im Nachgang an die vollständige Modellierung der Störungen und Horizonte, wurden diese als Flächen extrahiert und in Teilen unter Einbeziehung des stratigraphischen Modells (Abbildung 20, S. 53) nachbearbeitet (Tabelle 14, S. 61). Im Anschluss daran sind manuelle Nachbearbeitungen durchgeführt worden.

Wesentliche Nachbereitungen waren Verschneidungen an Ausstrichlinien im Niveau des Salinars sowie eine Verfeinerung der Triangulationen (Abbildung 26, S. 60) im Hinblick auf die vorhandene Datendichte (Tabelle 13, S. 60). Am Beispiel des Kaliflöz Thüringen konnte die Auflösung ca. um das 25-fache erhöht werden, was die Reduktion des Punktabstandes von ca. 250 m auf ca. 50 m ermöglicht. Das spiegelt die Verteilung der Eingangsdaten besser wider und ist vorteilhaft für die weitere Auswertung (Kap. 5.3). Vor einer erneuten Interpolation der Flächen wurden Mächtigkeitsintervallbedingung (SKUA[®] Thickness Range Constraints) festgelegt, die Verschneidungen der Horizonte verhindern sollten (Tabelle 12). Die für die Anpassungen genutzten Werte orientierten sich an den jeweiligen durchschnittlichen vertikalen Mächtigkeiten eines stratigraphischen Horizonts, die in SKUA[®] für die Eingangsdaten kalkuliert worden sind, und an Erfahrungswerten anhand von Auffahrungen. Bohrungsdaten (Kap. 4.1.3, Kap. 4.1.4) wurden als Kontrollpunkte für die Interpolation festgelegt. Ziel dieser iterativen Optimierung war die größtmögliche Passgenauigkeit der Fläche in Bezug zu den Eingangsdaten.

Tabelle 12 „Thickness Range Constraints“ im Zuge der manuellen Anpassung

Horizont	Kürzel	Thickness Range Constraint [m]
Oberes Werra-Steinsalz	z1NAc	10-200
Kaliflöz Hessen	z1KHe	3-5
Mittleres Werra-Steinsalz	z1NAb	30-250
Kaliflöz Thüringen	z1KTh	1-100
Unteres Werra-Steinsalz	z1NAa	50-250
Unterer Werra-Anhydrit	z1ANa	1-15

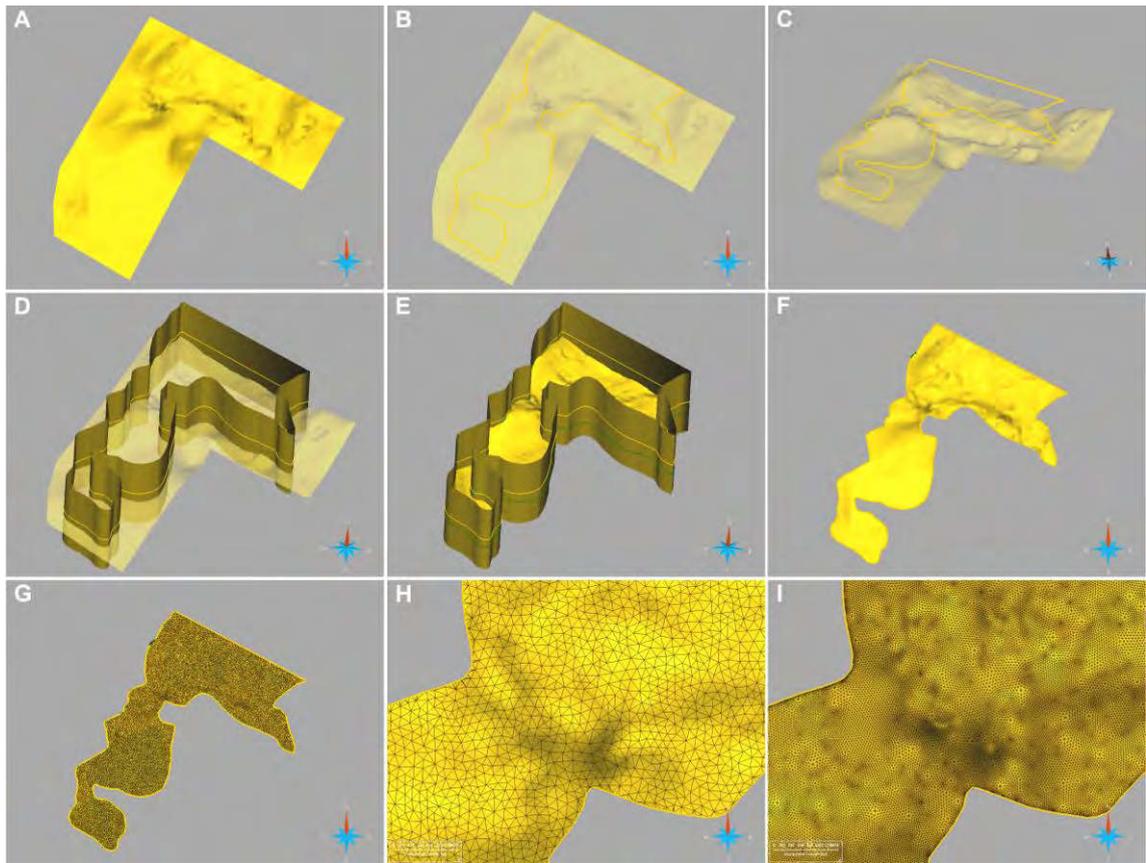


Abbildung 26 Manuelle Nachbereitung am Beispiel des Kaliflöz Hessen; A: aus dem 3D-Modell erzeugte Fläche; B: Verbreitung des Kaliflöz Hessen, Draufsicht; C: Verbreitung des Kaliflöz Hessen, SSW-Ansicht, D: anhand der Verbreitungsgrenze erzeugte vertikale Hilfsfläche; E: verschneiden beider Flächen und entfernen überflüssiger Flächenteile; F: Ergebnis; G/H: bestehende Triangulation; I: Verfeinerung Triangulation

Tabelle 13 Vergleich der Auflösung der aus dem Workflow erzeugten, bereits zugeschnittenen Flächen mit den manuell angepassten Flächen anhand der Anzahl von Punkten, Dreiecken und Maschenweiten

Horizont	Auflösung	Aus Workflow erzeugt	Manuell angepasst	Faktor
UK(z1NAc)	Punkte	48.489	79.530	ca. 1,6
	Dreiecke	93.608	154.699	ca. 1,7
	Punktabstand [m]	ca.100-160	ca.70-110	
UK(z1KHe)	Punkte	10.642	160.524	ca. 15,1
	Dreiecke	19.668	314.652	ca. 16,0
	Punktabstand [m]	ca.200	ca.40-60	
UK(z1NAb)	Punkte	13.406	99.622	ca. 7,4

Horizont	Auflösung	Aus Workflow erzeugt	er-Manuell angepasst	Faktor
UK(z1KTh)	Dreiecke	25.169	194.483	ca. 7,7
	Punktabstand [m]	ca.200-220	ca.65-100	
	Punkte	12.498	315.051	ca. 25,2
	Dreiecke	23.389	621.224	ca. 26,6
UK(z1NAa)	Punktabstand [m]	ca.180-250	ca.40-55	
	Punkte	22.039	84.117	ca. 3,8
	Dreiecke	40.044	160.084	ca. 4,0
	Punktabstand [m]	ca.40-550	ca.40-70	

Weiterhin wurde die Geländeoberkante nachbearbeitet. Die aus dem Workflow Structure and Stratigraphy auf Basis des DGM20 sowie der Tagesbohrungen erstellte Fläche wurde als stratigraphischer Horizont behandelt und war dementsprechend von offensichtlichen Schichtversätzen begleitet. Diese konnten jedoch weder im DGM20 noch im Verlauf diverser eigener Geländeuntersuchungen bestätigt werden. Daher wurde die Geländeoberkante außerhalb des Workflows modelliert. Aufgrund der nachträglichen Adaption der Flächen außerhalb des Workflows wurden keine innerhalb des Workflows Structure and Stratigraphy erstellten geologischen Grids (Abbildung 19, S. 50) verwendet.

Tabelle 14 Information über Eingangsdaten zur Modellierung der stratigraphischen Horizonte des Arbeitsgebietes und Bereiche nachträglicher manueller Anpassung

Fläche	Anzahl der Eingangsdaten SKUA®-Workflow					DGM20	Manuelle Nachbereitung
	OT-Bhg.	UT-Bhg.	Radar-reflektoren	Ausstrich	Hilfsfläche		
GOK	1.677	-	-	-	ja	1.819.825	ja
UK(mu)	18	-	-	Non-Erosion Outline	ja		ja
UK(so)	53	-	-	Non-Erosion Outline	ja		-
UK(smV)	112	-	-	Erosion Outline	ja		-
UK(su)	64	-	-	-	-		-
UK(z3Tb)	127	-	-	-	-		-

Fläche	Anzahl der Eingangsdaten SKUA®-Workflow					Manuelle Nachbereitung
UK(z3CA)	132	-	-	-	ja	-
UK(z3Ta)	28	-	-	-	-	-
UK(z1ANcb)	20	-	-	-	-	ja
UK(z1NAd)	17	-	-	-	-	ja
UK(z1ANca)	82	-	-	-	-	-
UK(z1Tb)	100	251 ¹⁴			-	-
UK(z1NAc)	46	374	-	-	-	ja
UK(z1KHe)	41	492	171.305	-	ja	ja
UK(z1NAb)	72	43	14.581	-	-	ja
UK(z1KTh)	66	307	291.302	-	ja	ja
UK(z1NAa)	72	94	41.028	-	ja	ja
UK(z1ANa)	55	-	-	-	-	ja

Zwar variierte die Dichte und Homogenität der jeweiligen Eingangsdaten, doch konnten mit Hilfe des im Workflows Structure and Stratigraphy Informationen über- bzw. unterlagernder Flächen zur detaillierten Modellierung des Gesamtmodells beitragen. Bereiche hoher Datendichte sind dabei entsprechend mit weniger Unsicherheiten belegt als solche geringer Datendichte. Letztere entfallen z. B. auf das Perspektivfeld Marbach im Südwesten des Arbeitsgebietes.

Abbildung 27 (S. 63) zeigt die Basis des Unteren Werra-Anhydrit im Bereich der Hochscholle von Wüstfeld. Trotz der geringen Bohrungsdichte konnte die Basis an dieser Stelle gut modelliert werden, da Aufschlüsse hangender stratigraphischer Horizonte aus Tagesbohrungen in die Modellierung einfließen.

¹⁴ Punktdaten, die den Salztop darstellten, (90 [90])

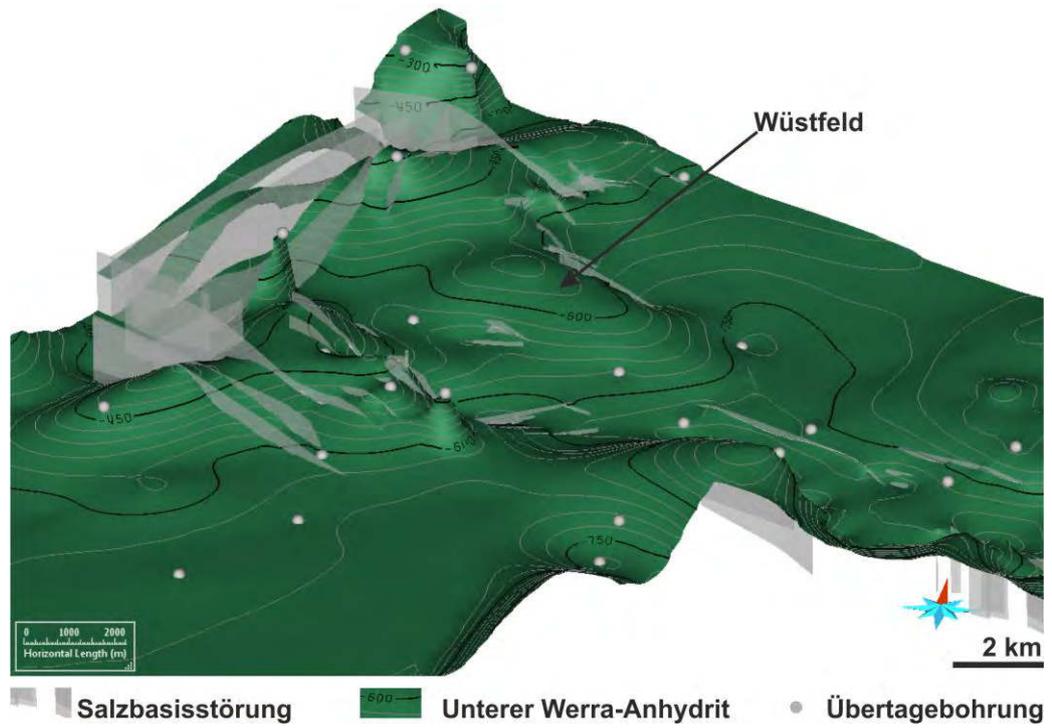


Abbildung 27 Basis des Unteren Werra-Anhydrit im Bereich der Hochscholle von Wüstfeld inklusive der Darstellung der Salzbasisstörungen, Blickrichtung von SSE

5 Ergebnisse

Nachfolgend wird das 3D-Strukturmodell vorgestellt (Kap. 5.1) und dessen Güte (Kap. 5.2) untersucht. Für eine zweidimensionale Auswertung des Modells wurden ausgewählte Isolinienpläne und Profilschnitte erstellt (Kap. 5.3), die zur Interpretation (Kap. 6) herangezogen werden. Weiterhin können neben Wertstoffgehalten (Kap. 5.3.5) auch Gasvorkommen (Kap. 5.3.6) im räumlichen Kontext abgebildet und untersucht werden. Die Auswertung der im Zusammenhang mit dieser Forschungsarbeit durchgeführten Vulkanituntersuchungen (Kap. 5.3.6.3) fließt ebenso in die Ergebnisbetrachtung ein.

5.1 Ergebnis der geologischen Modellierung

Das 3D-Strukturmodell stellt den erstmaligen Ansatz einer in sich konsistenten und plausiblen räumlichen Darstellung der Geologie im Süden des Werra-Kaligebietes unter Einbeziehung der Horizonte vom Unteren Werra-Anhydrit bis zur Geländeoberkante dar. Erstmals wurden komplexe geologische Informationen methodisch unterschiedlichen Ursprungs (Kap. 4.1) in einem homogenen geologischen Modell zusammengeführt. Dabei sind Informationen auf Basis harter¹⁵ und weicher¹⁶ Eingangsdaten aus der ca. 120-jährigen Bergbaugeschichte im Arbeitsgebiet implementiert.

Das Modell umfasst eine flächenhafte Ausdehnung von mehr als 724 km² und einen Teufenbereich von ca. 1600 m. Es beinhaltet neben der Tagesoberfläche ebenso die Flächen des Unteren Muschelkalk, des Buntsandstein sowie ausgewählte Flächen des Oberen Perm, sodass insgesamt 18 Horizonte modelliert wurden (Abbildung 28, S. 66). Weiterhin sind neben 63 Vulkanitvorkommen in Form von vereinfachten Flächen (Kap. 4.1.4.3) auch 104 Störungszonen im Niveau der Salzbasis sowie 87 Störungszonen im Suprasalinar konstruiert worden (Kap. 4.2.2).

Das 3D-Strukturmodell ist die wesentliche und notwendige Voraussetzung der themenbezogenen Anfragen (Kap. 2) an das Modell. Entsprechend Abbildung 7 (S. 31) können anhand der erstellten Flächen Auswertungen in Bezug zu Volumen- und Mächtigkeitsberechnungen erfolgen (Kap. 5.3.2). Die Mächtigkeit salinärer Schutzschichten im Hangenden und Liegenden der Gewinnungshorizonte sind für die bergbauliche Aus- und Vorrichtung von wesentlicher Bedeutung. Die Mächtigkeit der jeweiligen Gewinnungshorizonte selbst bedingt darüber hinaus die Abbaumethodik. Das 3D-Strukturmodell bietet nicht nur die Möglichkeit, an jedem beliebigen Punkt innerhalb des Arbeitsgebietes jede beliebige Mächtigkeit zwischen der Geländeoberkante und dem Unteren Werra-Anhydrit zu kalkulieren und darzustellen, sondern ebenso die Tiefen der jeweiligen Horizonte (Kap. 5.3.1).

¹⁵ Harte Eingangsdaten sind Aufschlüsse aus Erkundungsbohrungen und Kartierungen.

¹⁶ Weiche Eingangsdaten umfassen Informationen aus zerstörungsfreien geophysikalischen Untersuchungsmethoden.

Tiefe und Mächtigkeit sind wesentliche Einflussfaktoren für die Dimensionierung des Tragsystems der Grube. Konkrete Angaben zur Überdeckung sind weiterhin bei der Wahl von Standorten weiterer Explorationsbohrungen von Nutzen. Gleiches gilt für die Lokation eines potentiellen Schachtes, wobei für dessen umfassende Planung neben der Teufe auch die Kenntnis der Verläufe von Störungszonen hilfreich ist. Auf diese Weise sind eine Planungsoptimierung und eine realistische Kostenkalkulation möglich. Im Sinne einer optimalen Lagerstättennutzung wäre ein potentieller Schachtstandort darüber hinaus so zu wählen, dass dieser und der zugehörige Sicherheitspfeiler die Reserven der Lagerstätte gering beeinflussen. Das 3D-Strukturmodell bietet die Möglichkeit, Eigenschaften im räumlichen Kontext darzustellen und zu interpolieren. So sind beispielsweise Bereiche hoher und niedriger Wertstoffgehalte aushaltbar, was bei der Wahl eines Schachtstandortes bzw. der Lokation von Tagesbohrungen Berücksichtigung finden sollte.

Ebenso gestattet das 3D-Strukturmodell neuralgische Lokationen innerhalb des Arbeitsgebietes zu untersuchen, an denen Auffahrungen in geologisch komplexen Bereichen entstehen sollen. Nicht immer sind im Salzgestein selbst Hinweise zu Störungszonen im Hangenden und Liegenden zu beobachten, wie anhand einer Vielzahl von eigenen Befahrungen deutlich wird. Störungen können Gefahrenpotentiale für die Grube bergen. Zu diesen zählen Lösungszutritte oder Gasereignisse. Sowohl entlang von Störungen im Suprasalinar als auch im Subsalinar können als Wegsamkeit für ungesättigte Lösungen dienen. Die Salzlösungszutritte aus dem Subsalinar im Bereich der Querorte 23 und 86 in der Grube Springen (DEPPE & PIPPIG, 2002, [28]) nordöstlich des Arbeitsgebietes verdeutlichen diesen Sachverhalt ebenso wie der Lösungszutritt entlang einer herzzyklen Störung im Suprasalinar nördlich der Auslaugungssenke von Unterbreizbach (HOPPE, 1960, [78]). Die Darstellung kritischer Lokationen im 3D-Strukturmodell kann einen wichtigen Beitrag im Umgang mit sensiblen Bereichen leisten. Dazu zählen beispielsweise zukünftige Auffahrungen im südwestlichen und südöstlichen Bereich der Grube Hattorf sowie im Süden der Grube Unterbreizbach. Die Zusammenschau von Horizonten und Strukturen in Kombination mit Eigenschaften, wie z. B. bereits dokumentierten Gasereignissen, trägt zur sicheren Herstellung von Grubenbauen bei. Die umfassende Visualisierung des geologischen Umfeldes zukünftiger Auffahrungen im räumlichen Kontext ist eine Erleichterung für die Kommunikation und somit für die bergtechnische Abbauplanung. So können Störungszonen und Vulkanitvorkommen in Zusammenhang mit Flözverläufen bildhaft dargestellt werden (Abbildung 29, S. 67).

Ein weiterer Mehrwert des 3D-Strukturmodells besteht darin, dass Eigenschaften, wie Wertstoffgehalte (Kap. 5.3.5) oder Gasimprägnation (Kap. 5.3.6), dem dreidimensionalen Raum analysierbar sind. Auf Basis dieser Eigenschaften wurden erstmals geostatistische Untersuchungen in Bezug zur Geologie und Tektonik der Kalisalzlagerstätte durchgeführt, was als Voraussetzung für die Analyse möglicher geologischer Zusammenhänge innerhalb der Lagerstätte dient. Das 3D-Strukturmodell ist Ausgangspunkt für die Interpretation der Beckenentwicklung (Kap. 6.1, Kap. 6.2) des Arbeitsgebietes.

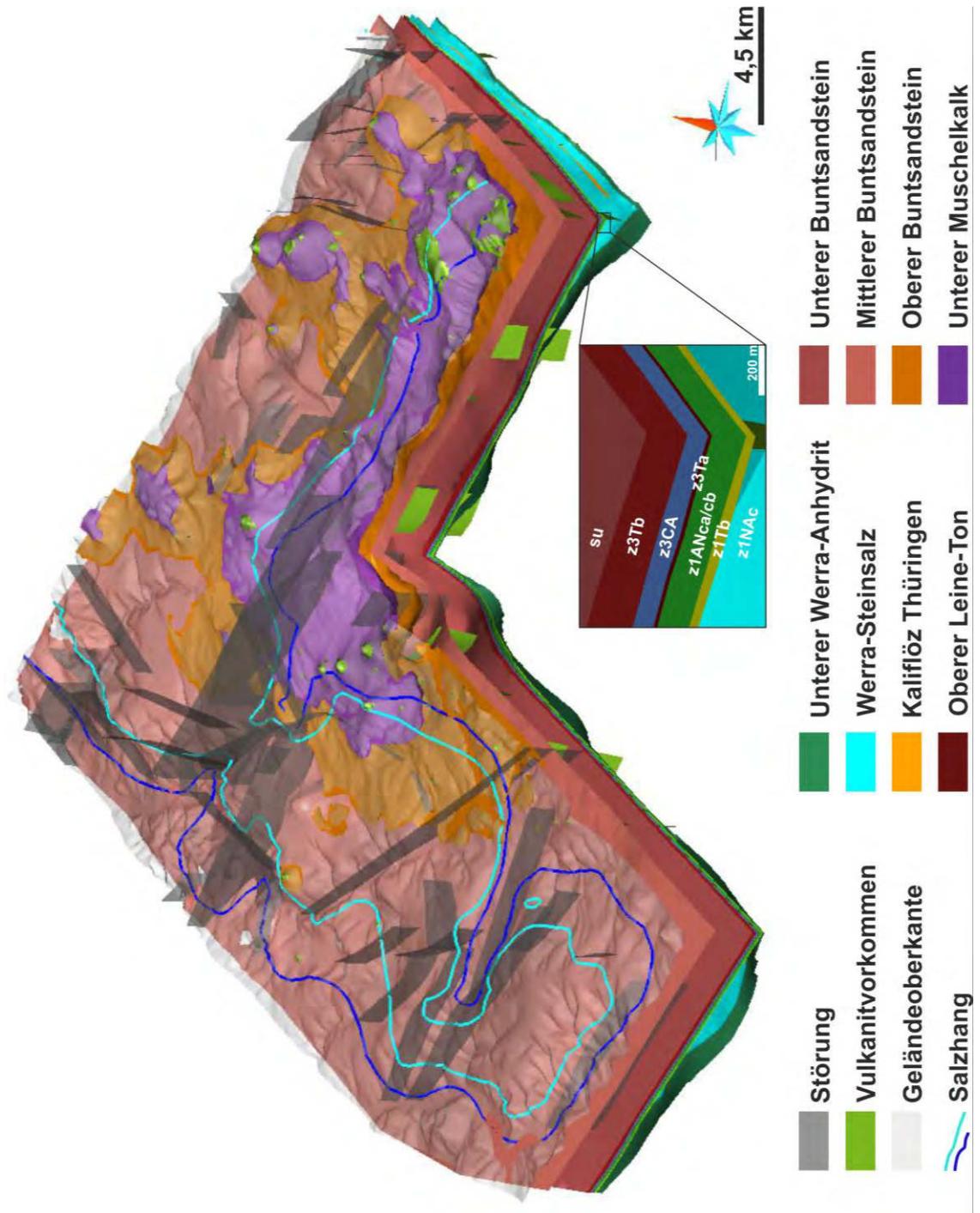


Abbildung 28 3D-Modell des Arbeitsgebietes in 5-facher Überhöhung, SSE-Ansicht (Kürzel vgl. Tabelle 4, S. 23)

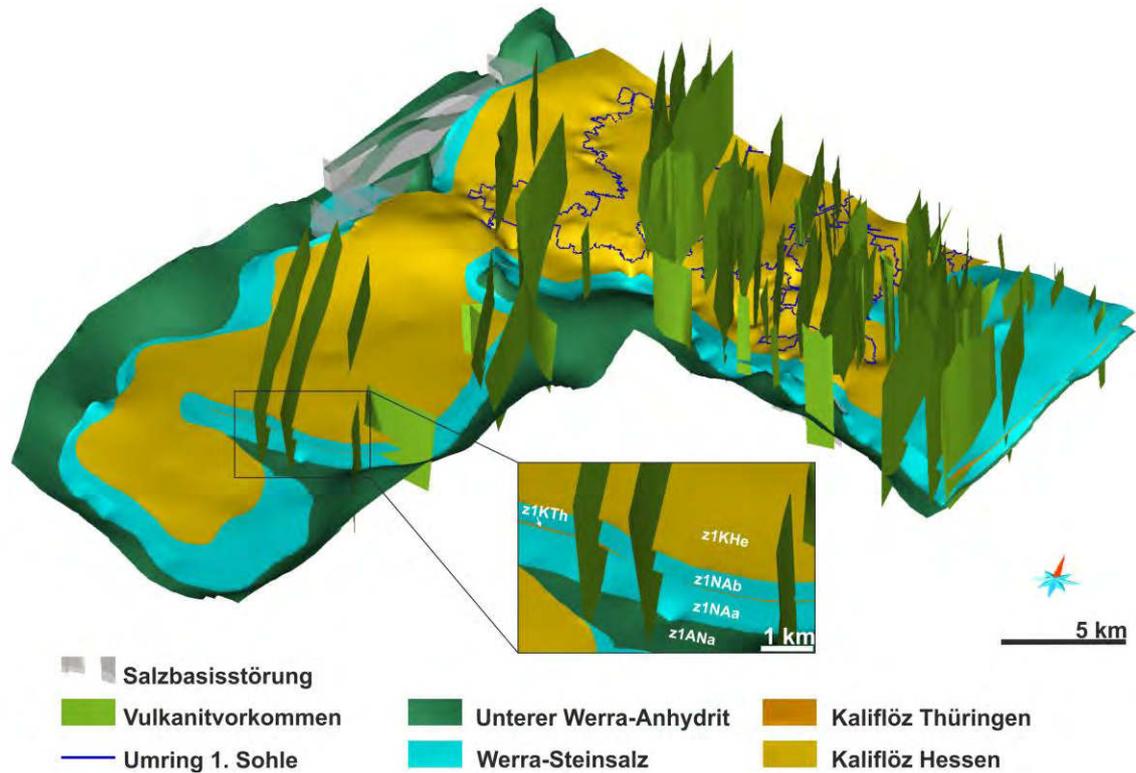


Abbildung 29 3D-Modell ausgewählter Horizonte in 5-facher Überhöhung mit Fokus auf dem Kaliflöz Hessen, inklusive Salzbasisstörungen und Vulkanitvorkommen (Kürzel vgl. Tabelle 4, S. 23)

5.2 Güte des 3D-Strukturmodells

Mit Hilfe unterschiedlicher stochastischer Ansätze werden Unschärfen in geologischen Strukturmodellen untersucht (u. a. CHERPEAU et al., 2010, [26], HOLDEN et al., 2003, [75], LELLIOTT et al., 2009, [131], TACHER et al., 2006, [193], THORE et al., 2002, [194]). Diese Konzepte haben ihren Ursprung zumeist in der Erdöl- und Erdgasindustrie, wo Modelle auf einem dichten Netz seismischer Informationen beruhen (ARNDT, 2012, [4]). Im vorliegenden Modell hingegen fließen eine Vielzahl unterschiedlicher Datensätze ein, die sich in ihrer Aussagekraft unterscheiden und nicht homogen über das gesamte Arbeitsgebiet verteilt sind (Kapitel 4.1), weshalb diese stochastischen Ansätze zur Untersuchung von Unschärfen nicht analog angewandt werden können.

Um dennoch Aussagen über die Qualität einer Fläche treffen zu können, wurden mit Hilfe von SKUA[®] absolute (Tabelle 15, S. 71) bzw. relative vertikale Abweichungen (Tabelle 16, S. 72) der jeweils modellierten Fläche von den Eingangsdaten ermittelt. Die absolute Abweichung ist ein Betrag und stellt somit einen quantitativ absoluten Wert der Abweichung dar, während die relative Abweichung die Dimension einer Zahl beinhaltet und auf dieser Basis positiv oder negativ sein kann. Daher sind Minimal- und

Maximalwerte angegeben, um die jeweils geringste bzw. größte vertikale Entfernung der Fläche zu den Eingangsdaten darzustellen. Die einzelnen arithmetischen Mittelwerte der Abweichungen werden um die jeweilige Standardabweichung (SD) ergänzt. Die Standardabweichung hängt von der geostatistischen Verteilung der Abweichungen einer modellierten Fläche ab. Je geringer die Standardabweichung ist, desto höher ist die Güte der modellierten Fläche. Um eine Vergleichbarkeit der Standardabweichungen der jeweiligen Flächen zu erreichen, wurden anhand Formel [2] die prozentualen Abweichungen ermittelt (Tabelle 15, S. 71, Tabelle 16, S. 72). Die prozentuale Abweichung beschreibt das Verhältnis zwischen Fläche und Standardabweichung.

$$\text{Abweichung [\%]} = \frac{\sqrt{\text{Fläche [m}^2\text{]}}}{\text{SD [m]}} \times 100 \quad [2]$$

Sind die Abweichungen normalverteilt, spricht das für die höhere Güte der modellieren Fläche. Eine detaillierte Auflistung geostatistischer Untersuchungen bezüglich der Güte des geologischen 3D-Strukturmodells ist ANHANG 1 zu entnehmen. Dort sind neben der Verteilung der Eingangsdaten in Histogrammen auch die jeweiligen Abweichungen einer Fläche von diesen in Form von Karten dargestellt. Nachfolgend werden exemplarisch die Basis des Unteren Muschelkalk (Abbildung 30) sowie die Basis des Kaliflöz Hessen (Abbildung 31, S. 70) in Bezug zu ihrer Güte untersucht.

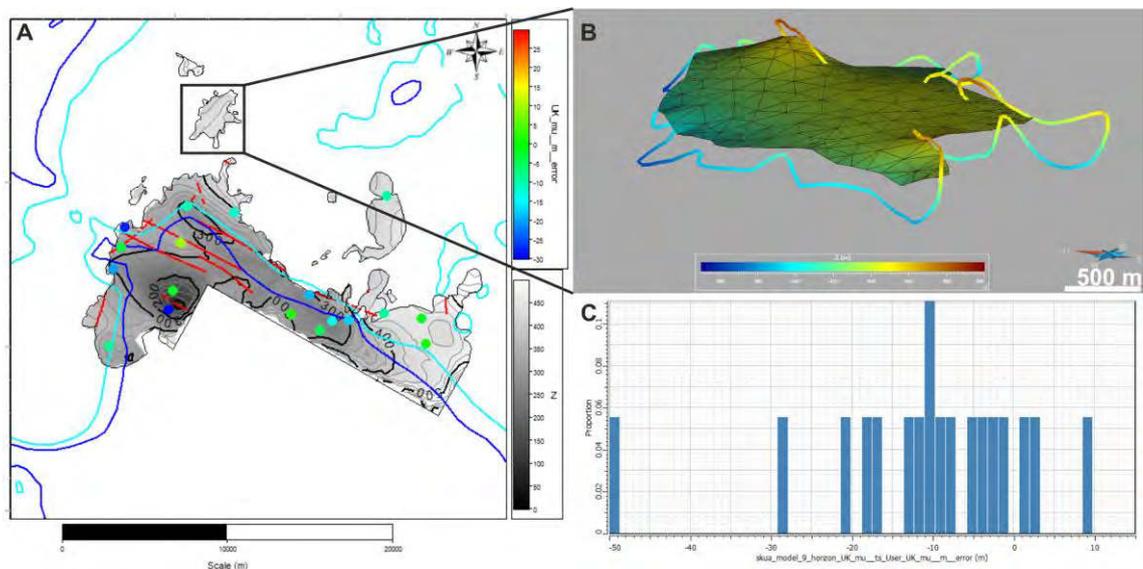


Abbildung 30 Basis des Unteren Muschelkalk im Arbeitsgebiet; A: Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Tagesbohrungen (obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte [m NN] (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang; B: Ungenauigkeiten der modellierten Fläche an den Ausbisslinien des Landecker Berges; Darstellung 5-fach überhöht; C: Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Daten der Tagesbohrungen

In Abbildung 30 (C) (S. 68) sind die relativen Abweichungen der Fläche von den Eingangsdaten der Tagesbohrungen dargestellt (Tabelle 14, S. 61). Die relativen Abweichungen variieren zwischen -49,6 m und 9,2 m, wobei der Median bei -9,6 m liegt. 80 % der Eingangsdaten liegen mit absoluten Abweichungen von maximal 18,7 m von der modellierten Fläche entfernt. Die absoluten bzw. relativen Abweichungen der Basis des Unteren Muschelkalk sind nicht normalverteilt. Die jeweiligen Standardabweichungen der Fläche von den Eingangsdaten variieren zwischen 11,6 m (Tabelle 15, S. 71) und 13,0 m (Tabelle 16, S. 72), was im Verhältnis zur Ausdehnung der modellierten Fläche bis zu 3,4 % prozentuale Abweichung ausmacht. Die größte Differenz zum modellierten Horizont wurde mit -49,6 m innerhalb einer Synklinalstruktur (Abbildung 30, A, S. 68) ermittelt. Dort ist die Basis des Muschelkalk in der Tagesbohrung Nr. 775 anhand des γ -Logs bei ca. 255,5 m Teufe festgelegt bzw. ist die Gesteinsabfolge vom Oberen Werra-Ton bis zum Top der Fulda-Formation gestört (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Dies erhöht die Unsicherheiten in diesem Fall.

Weiterhin sind vertikale Abweichungen zwischen der modellierten Fläche und den Ausbisslinien des Unteren Muschelkalk am Beispiel des Landecker Berges (Abbildung 30, B) dargestellt. Die abgebildeten engräumigen Variationen der Höhe der Ausbisslinien sind unter Berücksichtigung der Verteilung der Eingangsdaten und der daraufhin im Workflow Structure and Stratigraphy angewandten Auflösung mit Abweichungen von bis zu ca. 30 m behaftet. Insgesamt ist die Güte der Basis des Unteren Muschelkalk für die in dieser Arbeit untersuchten Fragestellungen im Hinblick auf die Eingangsdaten als ausreichend genau zu bewerten.

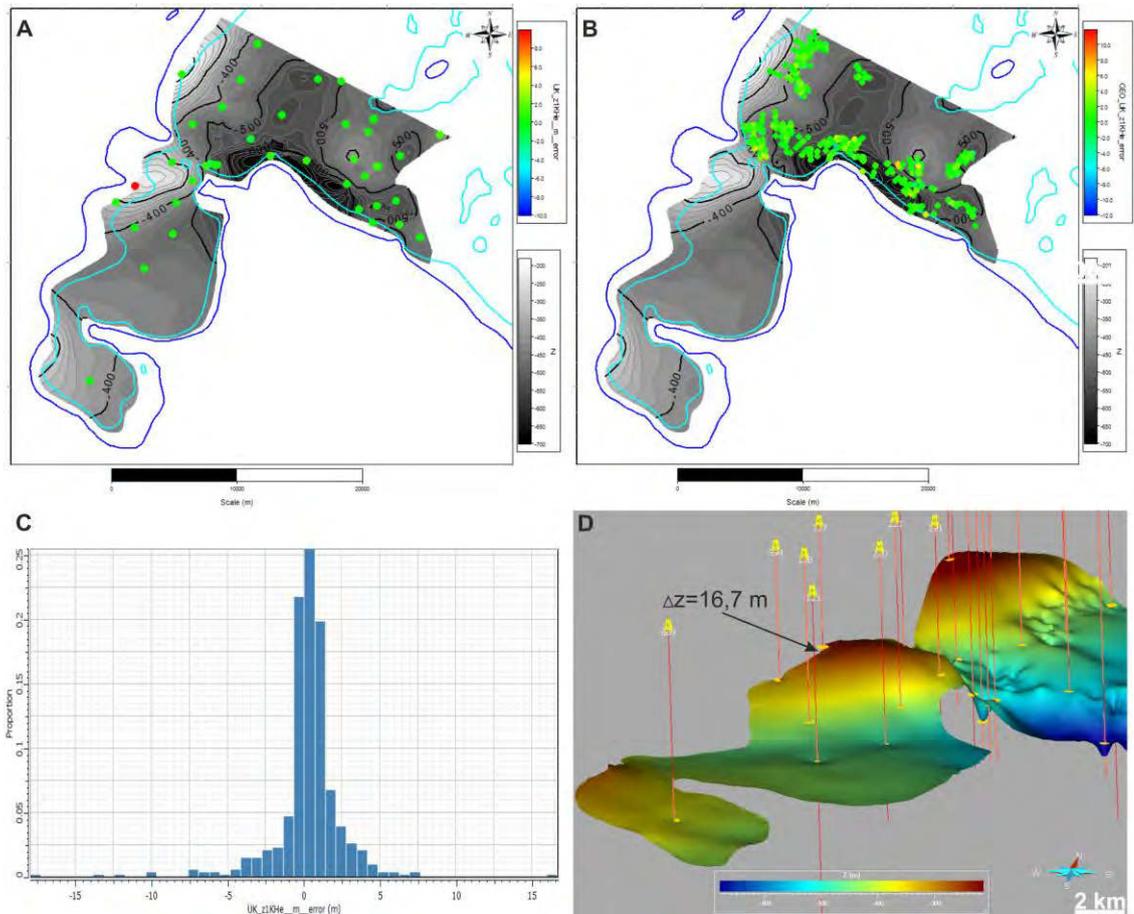


Abbildung 31 Basis des Kaliflöz Hessen im Arbeitsgebiet; A: Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Tagesbohrungen (obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte [m NN] (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang; B: Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Untertagebohrungen (obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte [m NN] (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang; C: Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche der Basis des Kaliflöz Hessen von den Bohrungsdaten [m]; D - Abweichung der Tagesbohrung Nr. 217

Abbildung 31 (C) stellt die statistische Verteilung der Fläche der Basis des Kaliflöz Hessen von den Erkundungsdaten der übertägigen (Abbildung 31, A) und untertägigen Bohrungen (Abbildung 31, B) dar. Jene ist normalverteilt (Abbildung 31, C) und umfasst einen Wertebereich zwischen -17,5 m und 16,7 m. 80 % der Eingangsdaten liegen zwischen -1,5 m und 2,3 m von der modellierten Fläche entfernt, wobei die mittlere relative Abweichung (Tabelle 16, S. 72) 0,3 m beträgt. Das bedeutet, dass die Fläche insgesamt ca. 30 cm höher modelliert worden ist, als die Eingangsdaten es durchschnittlich vorgeben. Mit Standardabweichungen von 2,3 m erreicht die Basis des Kaliflöz Hessen eine prozentuale Abweichung von 0,4 %, was einer sehr hohen Güte der modellierten Fläche entspricht.

Abweichungen von über 10 m beschränken sich auf Randbereiche der Fläche (Abbildung 31, D) bzw. auf Bereiche, mit so engräumigen Tiefenvariationen, dass diese sogar unter Verwendung der nachträglich angepassten Auflösungen (Abbildung 26, S. 60) nicht dargestellt werden konnten.

Tabelle 15 beinhaltet die mittlere absolute Abweichung sowie die Standardabweichung und die prozentuale Abweichung aller Flächen von den jeweiligen Eingangsdaten harter Aufschlüsse. Die minimale absolute Abweichung einer jeden Fläche entspricht ca. 0,0 m und das Maximum ist analog zu der größten positiven bzw. negativen Abweichung in Tabelle 16 (S. 72). In dieser sind die relativen Abweichungen der jeweiligen Flächen gegeben. Die Werte beider Tabellen sind auf die erste Dezimalstelle nach dem Komma gerundet.

Tabelle 15 Absolute Abweichung der modellierten Horizonte von den Eingangsdaten der Übertage- und Untertagebohrungen (Tabelle 14, S. 61) unter Angabe der Fläche, der mittleren absoluten Abweichung, der Standardabweichung und der prozentualen Abweichung [Formel 2].

Bezeichnung	Fläche [km²]	Mittelwert [m]	Standard- abweichung [m]	Prozentual [%]
GOK	729,5	0,9	6,0	0,7
UK(mu)	142,6	12,4	11,6	3,1
UK(so)	284,1	21,6	14,6	2,7
UK(smV)	713,5	6,1	6,8	0,8
UK(su)	729,6	0,7	3,8	0,4
UK(z3Tb)	732,9	4,4	6,8	0,8
UK(z3CA)	735,2	4,7	5,0	0,6
UK(z3Ta)	735,6	3,6	2,1	0,2
UK(z1ANcb)	31,2	2,4	2,5	1,4
UK(z1NAd)	25,7	1,5	1,8	1,1
UK(z1ANca)	738,0	4,2	3,8	0,4
UK(z1Tb)	738,1	7,2	15,0	1,7
UK(z1NAc)	459,6	3,0	5,0	0,7
UK(z1KHe)	370,9	2,1	2,3	0,4
UK(z1NAb)	491,9	1,0	3,7	0,5
UK(z1KTh)	464,3	0,5	1,6	0,2
UK(z1NAa)	540,1	3,1	3,9	0,5
UK(z1ANa)	730,9	6,6	14,9	1,7

Die in Tabelle 16 angegebene minimale und maximale relative Abweichung beschreibt die größten negativen und positiven Abstände der Eingangsdaten zur Fläche. Die mittlere relative Abweichung gibt Auskunft darüber, wie viele Meter die modellierte Fläche in Bezug zu den Eingangsdaten höher oder tiefer liegt.

Tabelle 16 Relative Abweichung der modellierten Horizonte von den Eingangsdaten der Übertage- und Untertagebohrungen (Tabelle 14, S. 61) unter Angabe der größten negativen und positiven Abweichung, der mittleren Abweichung, der Standardabweichung und der prozentualen Abweichung [Formel 2]

Bezeichnung	Minimum [m]	Mittelwert [m]	Maximum [m]	Standard- abweichung [m]	Prozentual [%]
GOK	-209,1	-0,1	202,0	6,1	0,7
UK(mu)	-49,6	-11,0	9,1	13,0	3,4
UK(so)	-69,4	-11,5	50,3	24,6	4,6
UK(smV)	-43,8	-2,7	25,1	8,9	1,1
UK(su)	-33,2	-0,4	5,3	3,4	0,4
UK(z3Tb)	-62,1	-0,2	35,6	8,1	0,9
UK(z3CA)	-49,5	3,2	14,5	6,0	0,7
UK(z3Ta)	-0,6	3,5	7,9	2,3	0,3
UK(z1ANcb)	-5,6	-0,1	8,9	3,5	2,0
UK(z1NAd)	-6,0	-1,1	0,6	2,0	1,2
UK(z1ANca)	-19,9	-3,2	6,9	4,6	0,5
UK(z1Tb)	-85,4	-10,6	28,9	18,4	2,1
UK(z1NAc)	-21,9	-0,6	45,3	3,7	0,5
UK(z1KHe)	-17,9	0,3	16,7	2,3	0,4
UK(z1NAb)	-27,7	-0,8	1,8	3,8	0,5
UK(z1KTh)	-12,9	0,0	19,9	2,0	0,3
UK(z1NAa)	-19,9	0,5	30,0	5,0	0,7
UK(z1ANa)	-18,5	3,2	81,9	16,1	1,9

Die jeweiligen modellierten Flächen weisen mittlere absolute Abweichungen (Tabelle 15, S. 71) zwischen 0,5 m und 21,6 m auf, wobei nur im Fall der Basis des Unteren Muschelkalk und des Oberen Buntsandstein ein Wert von 7,2 m überschritten wurde. Die Standardabweichung der Datenverteilung für die absoluten Abweichungen liegt zwischen 1,6 m bis 15,0 m.

Die mittlere relative Abweichung der modellierten Flächen von den Eingangsdaten variiert von -11,5 m bis 3,5 m. Die größten relativen Abweichungen sind am Beispiel der

Geländeoberkante ersichtlich. So weist diese vornehmlich im Randbereich des Arbeitsgebietes Abweichungen von mehr als 15 m auf. 80 % der relativen Abweichungen variieren zwischen -0,8 m und 0,8 m, was sich auch in der Standardabweichung von 6,1 m wieder findet. Die größte Standardabweichung von 24,6 m ist am Beispiel der Fläche des Oberen Buntsandstein zu beobachten. Das arithmetische Mittel der Standardabweichungen liegt bei ca. 7,4 m, wobei im Fall der Basis beider Kaliflöze sowie des Obersten Steinsalz und des Unteren Leine-Ton Standardabweichungen von 2,0 m bzw. 2,3 m erreicht werden.

Die prozentualen Abweichungen in Tabelle 15 (S. 71) liegen zwischen 0,2 % und 3,1 % und Tabelle 16 (S. 72) im Bereich von 0,3 % bis 4,6 %. Im Schnitt weisen die Flächen zwischen 1,0 % und 1,2 % prozentuale Abweichung auf, was eine hohe Güte des Gesamtmodells belegt.

Insgesamt sind die Abweichungen im Bereich des Suprasalinars größer als für die jeweiligen Horizonte des Zechstein. Vor allem die Lagerstättenhorizonte zeichnen sich durch sehr kleine Abweichungen sowie, in Bezug auf die Verteilung der jeweiligen Abweichungen, sehr geringe Standardabweichungen aus.

Die Ursachen der Abweichungen der Fläche von den Eingangsdaten sind mannigfaltig. Sie können in Bezug zu den Datengrundlagen sowie der Modellierung stehen. Der Einfluss von Fehlern aufgrund der Datenaufbereitung ist hierbei zu vernachlässigen, da erst nach mehrfachen Prüfungen der Korrektheit und Plausibilität der Daten mit der Modellierung begonnen wurde (Kap. 4.1, Abbildung 7, S. 31). Mit großen Unsicherheiten behaftete Angaben, wie am Beispiel der Seismikdaten (Kap. 4.1.6) verdeutlicht worden ist, wurden für die Erstellung des 3D-Modells nicht berücksichtigt.

Die Erkundungsmethode ist bei der Bewertung der Güte des 3D-Modells also zu berücksichtigen. So wiesen die Georadarreflektoren methodisch bedingt Unsicherheiten von bis zu wenigen 10er Metern auf. Die Differenz der Fläche zu den Georadarreflektoren umfasst z. B. für die Basis des Kaliflöz Thüringen bis zu 80 m, wobei 80 % der Reflektoren weniger als 30 m von der Fläche entfernt liegen. Diese Abweichung ist für die Güte des Modells akzeptabel.

Der Grad der Erkundung spiegelt sich in der Güte des 3D-Modells wider. So ist u. a. die Kenntnis von Salzbasissprüngen stark vom Stand der Erkundung abhängig. Der beckenzentrale Bereich des Arbeitsgebietes scheint nahezu frei von Störungen zu sein. Dort befinden sich bereits abgeworfene Abbaufelder, in denen nur wenige Georadarprofile vorlagen, die vornehmlich zur Konstruktion von Salzbasisstörungen dienen. Im Perspektivfeld Marbach (Abbildung 1, S. 5) können im Hinblick auf den Stand der Erkundung keine verlässlichen Aussagen zu Salzbasisstörungen getroffen werden. Der sehr gute Aufschluss- und Erkundungsgrad der Lagerstätte wirkt sich hingegen positiv auf die Güte des Modells aus, wie u. a. am Beispiel der beiden Kaliflöze Thüringen und Hessen ersichtlich wird (ANHANG 1, Tabelle 15, S. 71, Tabelle 16, S. 72)

Weiterhin wirken sich Unstimmigkeiten in digitalen Datenbanken und analogen Schichtenverzeichnissen auf das 3D-Modell aus. So beträgt die maximale Abweichung im Fall des Oberen Leine-Ton -62,1 m (Tabelle 16, S. 72). Diese ist in der Tagesbohrung

Nr. 675 dargestellt. Dort ist die Zuordnung der stratigraphischen Einheiten vom Top des Leine-Karbonat bis inklusive der Basis des Unteren Buntsandstein mit der Bemerkung „Grenzziehung fraglich“ versehen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). In der Distanz von ca. 700 m bis 1.200 m sind drei weitere Tagesbohrungen abgeteuft, in denen die Fläche Abweichungen von maximal zwei Metern aufweist. Die Abweichung der Fläche ist daher in diesem Fall als akzeptabel einzuschätzen.

Im Bereich der Tagesbohrung Nr. 466 ist aufgrund der aus der digitalen Datenbank recherchierten Angaben eine anomal hohe Mächtigkeit des Kaliflöz mit ca. 60 m modelliert worden. Im analogen Schichtenverzeichnis waren eine Mächtigkeit von 4,2 m sowie eine überkippte Lagerung des Kaliflöz an dieser Stelle dokumentiert (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]), die über weite Bohrabchnitte als Kaliflöz Thüringen interpretiert vorlagen und in dieser Form in der Modellierung berücksichtigt worden sind. Im Hinblick auf den verwendeten Modellmaßstab und die Datengrundlage ist die Modelldarstellung an dieser Stelle als vertretbar einzuschätzen.

Die Vereinfachung komplexer Strukturen ist wesentlicher methodischer Bestandteil von Modellierungen und erfolgte z. B. bei der Darstellung von Störungszonen sowie von Vulkaniten (Kap. 4.1.4.3). Es war weiterhin nicht immer möglich, den Charakter der Störungen zweifelsfrei zu bestimmen. Beispielhaft hierfür ist der Bereich einer erzgebirgischen Großstruktur im Nordwesten des Arbeitsgebietes zu nennen. Die Verstellung einzelner Schollen sowie der Verlauf von untergeordneten Störungen wird als komplexer eingeschätzt, als bisher in der Erkundung dargestellt bzw. in der Modellierung umgesetzt werden konnte. Da jedoch das Vorhandensein einer erkundeten Störung im 3D-Strukturmodell in jedem Fall berücksichtigt wurde, ist ein Fehlen der Charakterisierung einer Störung hinsichtlich ihres Bewegungssinnes für die Interpretation vertretbar.

Ein weiterer bedeutender Faktor bei der Erstellung eines Modells ist die Triangulation einer Fläche. Diese wird im Verhältnis zur Größe des Arbeitsgebietes im Hinblick auf eine moderate Rechenleistung gewählt. Ist die Datendichte im Vergleich zur Feinheit der Triangulation höher, kann es zu Abweichungen kommen. So ist die stärkste Abweichung der Basis des Oberen Werra-Ton im Bereich der Auslaugungssenke Unterbreizbach zu erkennen. Zur Erstellung der Flächen sind neben den Tagesbohrungen zusätzliche, engräumig angeordnete Punktdaten (Tabelle 14, S. 61) mitberücksichtigt, die sich in der Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten aufgrund der Triangulation der Fläche wiederfinden (u. a. Tabelle 15, S. 71). Die maximale Abweichung der Basis des Oberen Werra-Ton von den Eingangsdaten der Tagesbohrungen beträgt 8,7 m, während die größte Abweichung der zusätzlichen Punktdaten bei -85,4 m liegt. Die Teufen wurden triangulationsbedingt im 3D-Modell nicht im Detail abgebildet, deuten sich jedoch in der Morphologie der Fläche an.

Im Perspektivfeld Marbach (Abbildung 1, S. 5) sind zwar Mächtigkeiten des Kaliflöz Thüringen zwischen 5 m und 20 m interpoliert worden, dennoch sind in diesem Bereich abgeteuften Tagesbohrungen selten mehr als fünf Meter aufgeschlossen. Das lässt darauf schließen, dass die Mächtigkeiten des Kaliflöz Thüringen in weiten Teilen des Perspektivfeldes das Ergebnis der Interpolationsmethode ist. Dies ist im Zusammenhang

mit dokumentierten Mächtigkeitenvariationen in diesen Größenordnungen in bereits aufgefahrene Grubenfeldern zu betrachten.

Weiterhin sind interpolationsbedingt erhöhte Mächtigkeiten des Unteren, Mittleren und Oberen Werra-Steinsalz sowie der beiden Kaliflöze im Bereich des Salzhangs dargestellt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine stete Mächtigkeitsreduktion bis hin zum vollständigen Ausdünnen der Salzhorizonte zum Ausgehenden der Lagerstätte zu beobachten ist. Diese Art der Unschärfe ist auf die äußeren Grenzen der genannten Horizonte beschränkt, weshalb dieser Randeffekt in Bezug zur Güte der genannten Flächen im Bereich von Erkundungsbohrungen und Auffahrungen vernachlässigbar ist.

Innerhalb des ca. 724 km² großen Arbeitsgebietes belaufen sich Standardabweichungen der absoluten Abweichung auf wenige Meter. Die berechneten Abweichungen der erzeugten Flächen von den Eingangsdaten (Tabelle 15, S. 71, Tabelle 16, S. 72) sind im Vergleich zur Triangulation, also der Auflösung einer jeweiligen Fläche (z. B. Tabelle 13, S. 60), die mindestens ca. 40 m, zumeist jedoch über 100 m beträgt, als gering einzustufen. Der stratigraphische Abschnitt vom Unteren Werra-Steinsalz bis zum Oberen Werra-Steinsalz erreicht eine sehr hohe Qualität, was auch mit einer hohen Dichte an Eingangsdaten einhergeht. Die Güte des 3D-Strukturmodells ist daher insgesamt als sehr gut zu bewerten, sodass entsprechend Abbildung 7 (S. 31) zur Auswertung Anfragen an das Modell gestellt werden können. Diese dienen der weiteren wissenschaftlichen Untersuchung der in Kap. 2 präzisierten Aufgabenstellung.

5.3 Auswertung des 3D-Strukturmodells

Die Untersuchung der in Kap. 2 aufgeführten Themenschwerpunkte erfolgt u. a. anhand der Auswertung des 3D-Strukturmodells, wobei in gezielten Abfragen laterale und vertikale Einblicke in den geologischen Aufbau des Arbeitsgebietes ermöglicht werden. Die nachfolgend beschriebenen Isobathen- (Kap. 5.3.1) und Isopachenpläne (Kap. 5.3.2), die aus dem 3D-Strukturmodell abgeleitet worden sind, werden in ANLAGE 2 bis ANLAGE 17 dargestellt. Sie werden vom Hangenden zum Liegenden beschrieben. Weiterhin liegen ausgewählte Profilschnitte (Kap. 5.3.3) durch das Arbeitsgebiet in ANLAGE 18 bis ANLAGE 22 vor.

Die in dem 3D-Strukturmodell erzeugten stratigraphischen Horizonte und Störungen werden nachfolgend in Relation zu der Faziesverteilung (Kap. 5.3.4) untersucht. Weiterhin werden die Wertstoffgehalte (Kap. 5.3.5) der Kaliflöze Hessen und Thüringen unter Anwendung der in Kap. 4.1.4.5 vorgestellten Kategorisierung unter Einbeziehung des 3D-Strukturmodells räumlich dargestellt. Darüber hinaus erfolgt die Untersuchung der Gasereignisse (Kap. 5.3.6) hinsichtlich ihrer Häufigkeit und der Größe der Gas-Salz-Ausbrüche in Bezug zum 3D-Strukturmodell, wobei auch auf Beziehungen zur Fazies sowie Eigenschaften von Vulkaniten eingegangen wird.

5.3.1 Isobathenpläne ausgewählter stratigraphischer Horizonte

Die Geländeoberkante (ANLAGE 1) liegt im Mittel bei einer Höhe von 350 m NN, wobei sie im Arbeitsgebiet von 201,8 m NN bis 700,0 m NN variiert. Deutliche morphologische Erhöhungen sind die an der Tagesoberfläche ausstreichenden Vulkanite wie u. a. der Hohe Stern, Öchsen oder Soisberg. Flusstäler wie die der Ulster, Eitra, Haune und Fulda hingegen zeichnen Einschnitte in das Gelände nach.

Die Basis des Unteren Muschelkalk (ANLAGE 2) wurde mit Höhen von ca. 66 m NN bis ca. 617 m NN modelliert. Die nördlichsten Vorkommen des Unteren Muschelkalk stehen im Umfeld der Vulkanitvorkommen des Dreienberges, des Landecker Berges sowie des Öchsen bzw. des Dietrichsberges an. Parallel zum Streichen des Salzhangs sind im Bereich der Treischfeld-Schwelle vornehmlich herzyn verlaufende Deckgebirgsstörungen modelliert, die über eine Distanz von einigen Kilometern entwickelt sind. In diesem Gebiet korreliert die Basis des Unteren Muschelkalk mit einer NW-SE verlaufenden Synklinalstruktur, wobei in Richtung des Hohen Sterns ein allmählicher Anstieg erfolgt. Im Südwesten des Muschelkalkvorkommens ist außerhalb des Salzhangs eine weitere markante Synklinalstruktur entwickelt. In deren Zentrum ist eine NW-SE streichende Deckgebirgsstörung modelliert.

Die Basis des Oberen Buntsandstein (ANLAGE 3) wurde mit Tiefen zwischen ca. -68 m NN und ca. 494 m NN modelliert. Morphologisch sind Ähnlichkeiten zum Unteren Muschelkalk zu erkennen, wobei jedoch die flächenhafte Verbreitung des Oberen Buntsandstein größer ist. Westlich und südlich der Auslaugungssenke von Gehaus sind darüber hinaus N-S streichende Störungen entwickelt, die parallel zu den Vulkanitvorkommen des Öchsen bzw. Dietrichsberges sowie einer westlich davon liegenden, N-S verlaufenden Synklinalstruktur streichen.

Die Basis des Mittleren Buntsandstein (ANLAGE 4) ist, mit Ausnahme erodierter Bereiche nahe dem westlichen Salzhang sowie im östlichsten Teil des Arbeitsgebietes, großflächig aushaltbar. Sie erreicht Tiefen zwischen ca. -280 m NN und ca. 405 m NN, wobei die im Hangenden entwickelte (ANLAGE 3), herzyn streichende Synklinalstruktur mit ihren parallel verlaufenden Störungen im Bereich der Treischfeld-Schwelle ebenfalls modelliert ist. Die bedeutendste Vertiefung fällt, ebenso wie bereits für die Basis des Oberen Buntsandstein beschrieben, mit der Synklinalstruktur südlich der Treischfeld-Schwelle zusammen. Relative Erhebungen des Mittleren Buntsandstein sind im Perspektivfeld Marbach-Süd, dem Umfeld der Hochscholle von Buchenau sowie im nordwestlichen Salzhangbereich anzutreffen. Dort sind neben erzgebirgisch streichenden Störungen auch senkrecht dazu entwickelte Störungen modelliert, die einen Graben bilden. Im östlichen Teil des Arbeitsgebietes, im Umfeld der Auslaugungssenke von Gehaus, ist eine Vergitterung von N-S und NNW-SSE bis NW-SE verlaufenden Deckgebirgsstörungen zu beobachten. Auch hier ist die Basis des Mittleren Buntsandstein gehoben. Östlich der Auslaugungssenke von Gehaus fällt eine weitere Auslaugungssenke bei Stadtlengsfeld mit einer Erosion der Basis des Mittleren Buntsandstein zusammen. Vom Hohen Stern nach Norden verläuft eine N-S streichende Störung, an die sich westlich die bereits im Hangenden dargestellte N-S streichende Synklinalstruktur an-

schließt. Mit Ausnahme der Auslaugungssenke von Unterbreizbach befindet sich im zentralen nördlichen Teil des Arbeitsgebietes ebenfalls eine Erhöhung der Basis des Mittleren Buntsandstein. Nicht nur im nordwestlichen Salzhangbereich sind Störungen parallel und senkrecht zum Salzhangverlauf modelliert. Im Umfeld der Eitra sowie der Hochscholle von Buchenau, in dem der Salzhang eine laterale Verjüngung der intakten Lagerstätte beschreibt, treffen unterschiedliche Störungsrichtungen aufeinander und gliedern sie die Gesteine des Mittleren Buntsandstein in einzelne Schollen. Neben steil- und flachherzynen Elementen treten auch NE-SW bis NNE-SSW verlaufende Störungen auf. Die Störung entlang der Haune streicht steilherzyn im Feld Marbach-Nord (Abbildung 1, S. 5), wobei sie im NW mit einer ebenfalls steilherzyn streichenden Antiklinalstruktur korreliert. Die herzyne Eitratalsörung korreliert mit einer engräumigen Subrosion. Südlich der Hochscholle von Buchenau und im Verlauf des Rombachs fallen laterale Verjüngungen der intakten Lagerstätte ebenfalls mit herzyn streichenden Störungen zusammen.

Die Basis des Unteren Buntsandstein (ANLAGE 5) ist im gesamten Arbeitsgebiet aushaltbar und erreicht Tiefen von ca. -660 m NN bis ca. 114 m NN. Die wesentlichen morphologischen und strukturellen Elemente entsprechen den bereits für den Mittleren Buntsandstein ausgeführten Beschreibungen. Darüber hinaus ist der Wechsel von herausgehobenen bzw. relativ dazu abgesenkten Teilbereichen der Basis des Unteren Buntsandstein von Nordwest nach Südost deutlich modelliert. Dabei entfallen die Absenkungen auf das Umfeld des Landecker Berges sowie westlich des Öchsen. Weiterhin fällt eine im Vergleich zum Mittleren Buntsandstein stärkere Zergliederung der Synklinalstruktur im Bereich der Treischfeld-Schwelle auf. Südlich davon erreicht die Basis des Unteren Buntsandstein mit weniger als -660 m NN das tiefste Niveau innerhalb des Arbeitsgebietes, wobei die im Hangenden ausgehaltene Deckgebirgsstörung (ANLAGE 4) in diesem Bereich nicht modelliert ist.

Die Morphologie der Basis des Leine-Karbonat (ANLAGE 6) lehnt sich im Wesentlichen an die des Unteren Buntsandstein (ANLAGE 5) an. Die Basis ist im gesamten Arbeitsgebiet modelliert und in Tiefen von ca. 41 m NN bis -731 m NN entwickelt, wobei der nordwestliche Salzhang, der östliche Teil des Arbeitsgebietes sowie die Hochscholle von Buchenau deutliche morphologische Erhöhungen darstellen. Im Perspektivfeld Marbach-Süd (Abbildung 1, S. 5) ist die Basis des Leine-Karbonat erhöht modelliert, erreicht jedoch nicht das Tiefenniveau der drei zuvor genannten Bereiche. Die Absenkungen im Umfeld des Landecker Berges und westlich des Öchsen sind verglichen mit dem Unteren Buntsandstein engräumiger entwickelt. Die zwischen diesen beiden Vulkanitvorkommen liegende, relative Erhebung ist hingegen großräumiger ausgebildet als im Unteren Buntsandstein. Südlich der Hochscholle von Buchenau ist im Bereich des Salzhangs eine relative Absenkung der Basis des Leine-Karbonat modelliert. Dort wurden in einer Tagesbohrung Residualbrekzien angetroffen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]).

Die Basis des Oberen Werra-Anhydrit (ANLAGE 7) wurde durchgehend im Arbeitsgebiet modelliert, wobei Tiefen von ca. 20 m NN bis ca. -745 m NN dargestellt sind. Mit zunehmender Tiefe bzw. Nähe zu plastisch reagierenden salinaren Horizonten sind we-

niger Störungen dargestellt. Die Morphologie entspricht weitgehend den bereits für die überlagernden Horizonte beschriebenen Elementen. Darüber hinaus ist die Auslaugungssenke von Unterbreizbach deutlich herausgearbeitet. Im Umfeld des Landecker Berges und des Öchsen fallen zwei Synklinalstrukturen mit der Verbreitung zweier Teilhorizonte des Obersten Werra-Steinsalz zusammen. Verbreitung und Tiefe der Basis des Obersten Werra-Steinsalz (ANLAGE 7) resultieren aus Aufschlüssen anhand von Tagesbohrungen (Kap. 4.1.3). Das Oberste Werra-Steinsalz besteht aus insgesamt sieben Teilhorizonten mit flächenhaften Ausdehnungen von je ca. 0,1 km² bis zu ca. 13 km² und Tiefen zwischen ca. -413 m NN und ca. -125 m NN. Der größte Teilhorizont des Obersten Werra-Steinsalz befindet sich nördlich der Eitra und südlich der Solz. Anhand der Verbreitung sind sowohl NNE-SSW sowie NW-SE Verläufe dieser erkennbar, die sowohl den Verlauf der Eitratalsörung bzw. des Salzhangs reflektieren.

Die Basis des Oberen Werra-Ton (ANLAGE 8) bildet den Salztop für das mächtige Kali- und Steinsalzpaket (Kap. 5.3.2) vom Unteren bis zum Oberen Werra-Steinsalz und ist im gesamten Arbeitsgebiet modelliert. Die Tiefen des Oberen Werra-Ton variieren zwischen ca. -759 m NN und ca. 10 m NN. Die wesentlichen morphologischen Einheiten entsprechen dem bereits für die Basis des Oberen Werra-Anhydrit bzw. den darüber anstehenden, beschriebenen Elementen. Sowohl die Auslaugungssenken von Unterbreizbach und Gehaus als auch die Synklinale im nordwestlichen Bereich der Treischfeld-Schwelle sind modelliert. Im Bereich des äußeren Salzhangs und totaler Salzablaugung werden wenige Störungen dargestellt, deren Versätze ca. 14,0 m nicht überschreiten.

Als Zwischenfazit kann im Hinblick auf Versatzbeträge an Störungen festgehalten werden, dass im Hangenden der intakten Salzverbreitung Störungen mit wenigen Metern Versatz modelliert sind. Versatzbeträge im Bereich von Subrosionen können bis zu ca. 100 m erreichen. Versätze herzyner Störungen weisen zwar unterschiedlich starke Beträge auf, sind jedoch im Allgemeinen größer als jene von N-S streichenden Störungen. Erzgebirgisch streichenden Störungen sind mit Versatzbeträgen von wenigen Dekametern modelliert und erreichen beispielsweise im Bereich des westlichen Salzhangs ca. 30 m Versatz. Im stratigraphischen Abschnitt vom Unteren Werra-Steinsalz bis zum Oberen Werra-Steinsalz sind Störungen unüblich. Es dominieren Klüfte (Kap. 3.2.3.2), die in den nachfolgenden Isobathenplänen nicht dargestellt sind.

Das Kaliflöz Hessen (ANLAGE 9) ist in seiner lateralen Ausdehnung an den Verlauf des Salzhangs angelehnt, jedoch im östlichen Teil des Arbeitsgebietes nicht nachgewiesen. Das Ausbleiben des Kaliflöz Hessen korreliert dort mit der bereits für alle hangenden Horizonte beschriebenen Erhebung. Die Basis des Kaliflöz Hessen ist in Tiefen zwischen -745,6 m NN bis -171,8 m NN modelliert. Die Morphologie entspricht im Wesentlichen den für den Oberen Werra-Ton beschriebenen Strukturen, wobei deutliche Erhebungen im Bereich des westlichen Salzhangs, der Hochscholle von Wüstfeld sowie der Hochscholle von Buchenau modelliert sind. Relative Absenkungen befinden sich im Bereich des Landecker Berges, der Auslaugungssenke von Unterbreizbach und westlich des Öchsen. Auch in einem ca. 0,54 km² umfassenden Bereich bei Reckrod, ca. 1,7 km östlich der engräumigen Subrosion im Eitratl ist eine relative Absenkung belegt (K+S

AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Die morphologisch tiefste Einheit ist im nördlichen bzw. nordöstlichen Vorfeld der Treischfeld-Schwelle modelliert und erstreckt sich über eine Länge von ca. 10 km.

Die flächenhafte Ausdehnung des Kaliflöz Thüringen (ANLAGE 10) orientiert sich ebenfalls an dem Verlauf des Salzhangs, wobei die Basis in Tiefen von -802 m NN bis ca. -99 m NN modelliert ist. Erhebungen und Absenkungen sind analog zu den für das Kaliflöz Hessen beschriebenen Elementen. Eine Ausnahme bildet eine morphologische Erhöhung im Osten des Arbeitsgebietes, die mit dem Ausbleiben des Kaliflöz Hessen sowie den beschriebenen relative Erhebung überlagernder Horizonte korreliert.

Diese sich über ca. 75 km² erstreckende, plateauartige Erhebung ist ebenso für den Unteren Werra-Anhydrit (ANLAGE 11) modelliert worden. Deren Basis erreicht Tiefen von ca. -905 m NN bis -223 m NN. Südlich dieser Erhebung schließt sich ein ca. 1,0 km breiter, herzyn streichender Graben an, der in nordwestlicher Verlängerung durch mehrere Tagesbohrungen belegt ist (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Dieser ist der Treischfeld-Schwelle vorgelagert, deren nördliche Begrenzung ungleichmäßig ausgebildet ist und spornartige Vorsprünge nach Norden aufweist. In diesem Bereich dominieren im Wesentlichen herzyne Störungsrichtungen. Insgesamt 104 Störungen des Unteren Werra-Anhydrit, die zuvor noch nie modelliert und interpretiert worden waren, konnten im Zuge der vorliegenden Arbeit innerhalb des Arbeitsgebietes konstruiert werden. Diese weisen unterschiedliche Ausdehnungen und Versatzbeträge auf. Entlang des nordwestlichen Salzhangbereiches zergliedern erzgebirgisch streichende Störungen die Basis des Unteren Werra-Anhydrit, der dabei unterschiedliches Schichteinfallen aufweist. Weiterhin wurden komplexe Schichtenverstellungen und Streichrichtungen kleinerer Elemente herausgearbeitet, wie am Beispiel der erzgebirgisch streichenden Großstruktur, die westlich des Dreienberges parallel zum westlichen Salzhang streicht, veranschaulicht wird. Diese Struktur trifft südlich der Solz auf die Hochscholle von Wüstfeld, die gegenüber umliegenden Gebieten um bis zu ca. 175 m herausgehoben ist und im Nordosten bzw. Südwesten von herzyn streichenden Störungen begrenzt wird. Dabei ist der Versatz der Störung im Nordosten der Hochscholle von Wüstfeld höher als an der südwestlichen Flanke, was ein Einfallen der Hochscholle nach Südwesten impliziert. Südlich der Hochscholle schließt sich ein Bereich relativer Absenkung an, der von flach erzgebirgisch streichenden Störungen begleitet wird. Das Streichen dieser Störungen weicht geringfügig von dem der darüber entwickelten Störungen im Deckgebirge ab (ANLAGE 4). Die südwestlich davon modellierte, herzyn verlaufende Eitratalsörung erreicht Versatzbeträge von bis zu ca. 300 m und beschreibt den morphologischen Übergang zur ca. 24 km² umspannenden Hochscholle von Buchenau. Im südwestlichen Teil des Arbeitsgebietes zeichnet die Morphologie der Basis des Unteren Werra-Anhydrit eine deutliche Konturierung in Abhängigkeit von der Verbreitung des Unteren Werra-Steinsalz nach. N-S streichende Schwächezonen beschränken sich auf das den östlichen Teil des Arbeitsgebietes.

5.3.2 Isopachenpläne ausgewählter stratigraphischer Abschnitte

Die Berechnungen der Isopachenpläne basieren auf dem erstellten 3D-Strukturmodell. Nachfolgend werden ausgewählte stratigraphische Abschnitte zwischen der Geländeoberkante und dem Unteren Werra-Anhydrit näher beschrieben.

Die Mächtigkeit des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Muschelkalk bis zur Geländeoberkante (ANLAGE 12) beträgt bis zu ca. 287 m, wobei hohe Mächtigkeiten mit der lateralen Verbreitung von übertägig anstehenden Vulkanitvorkommen korrelieren (u. a. BÜCKING, 1925, [19], LAEMMLEN, 1963, [120], LAEMMLEN, 1963, [121], LAEMMLEN, 1965, [122], LAEMMLEN, 1967, [124], LAEMMLEN, 1975, [125], LAEMMLEN & KOENEN, 1975, [126], LÜTZNER et al., 1997, [133], LÜTZNER et al., 2000, [135], MOTZKA & LAEMMLEN, 1966, [144], MOTZKA & LAEMMLEN, 1967, [145]). Das wird beispielhaft anhand der begrenzten Verbreitung im Umfeld des Dreienberges, Landecker Berges, Öchsen bzw. Dietrichsberges verdeutlicht. Das flächenhaft größte Vorkommen im Arbeitsgebiet ist entlang des Streichens der Treischfeld-Schwelle modelliert. Während die Basis des Unteren Muschelkalk (ANLAGE 2) im Umfeld des Soisberges und des Hohen Sterns keine topographischen Besonderheiten aufweist, deckt sich eine Synklinalstruktur, die ca. 8,5 km südwestlich des Soisberges gelegen ist, mit einer erhöhten Mächtigkeit dieses stratigraphischen Abschnittes. Dort, stehen übertägig keine Vulkanite an.

Der Isopachenplan von der Basis des Unteren Muschelkalk bis zur Basis des Unteren Buntsandstein (ANLAGE 13) umfasst die Gesteine des gesamten Buntsandstein. Dabei bildet die Fläche der Geländeoberkante (ANLAGE 1) in Bereichen, in denen die Gesteine des Muschelkalk nicht anstehen, die hangende Begrenzung für die Berechnung der Mächtigkeit. Diese variiert zwischen ca. 199 m und ca. 958 m. Geringe Mächtigkeiten, wie im nordwestlichen und südwestlichen Bereich des Salzhangs, nahe der Hochscholle von Buchenau und östlich der Auslaugungssenke von Gehaus korrelieren mit Antiklinalen im Untergrund bzw. Erosion (ANLAGE 4, ANLAGE 5) sowie Verbreitungsgrenzen (ANLAGE 3). Weiterhin zeichnen sich die eingeschnittenen Flussläufe von Eitra, Solz, Haune, Rombach und Ulster durch eine geringere Mächtigkeit des Buntsandstein aus. Erhöhte Mächtigkeiten im Bereich des Dreienberges, Landecker Berges sowie des Öchsen bzw. Dietrichsberges sind einerseits im Zusammenhang mit der Verbreitung des Unteren Muschelkalk zu sehen (ANLAGE 2). Andererseits sind sie anhand großräumiger Synklinalen im Umfeld der genannten Vulkanite auch durch die Verbreitung des Oberen Buntsandstein (ANLAGE 3) und die Topographie des Mittleren (ANLAGE 4) sowie Unteren Buntsandstein (ANLAGE 5) modelliert. Im Umkreis von ca. 1 km um den Soisberg korrelieren eine erhöhte Mächtigkeit der Sedimente des Buntsandstein mit einer Synklinalstruktur, die sich mit zunehmender Tiefe deutlicher in den entsprechenden Isobathenplänen (ANLAGE 2 - ANLAGE 5) abzeichnet. Ebenso verhält es sich mit der bereits in ANLAGE 12 genannten Synklinalstruktur südwestlich des Soisberges, wobei das Zentrum der Struktur im Fall des Buntsandstein ca. 9,0 km vom Soisberg entfernt liegt.

Die Mächtigkeit des Abschnittes von der Basis des Oberen Leine-Ton bis zur Basis des Oberen Werra-Ton (ANLAGE 14) schwankt zwischen ca. 29 m und ca. 146 m. Im Vergleich zu der Mächtigkeitsverteilung im Buntsandstein weist die des Abschnittes von der Basis des Oberen Leine-Ton bis zur der des Oberen Werra-Ton neben einigen Gemeinsamkeiten auch Unterschiede auf. Für diesen betrachteten stratigraphischen Abschnitt sind, ebenso wie im Buntsandstein, östlich und südlich der Auslaugungssenke von Gehaus vergleichsweise geringe Mächtigkeiten modelliert. In der Auslaugungssenke selbst sind lokal mehr als 50 m Mächtigkeit der Sedimente von der Basis des Oberen Leine-Ton bis zur Basis des Oberen Werra-Ton belegt (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]), was im Vergleich mit dem Umfeld der Auslaugungssenke von Gehaus eine Mächtigkeitserhöhung darstellt. Auch der südliche Teil der Auslaugungssenke von Unterbreizbach hebt sich mit deutlich höheren Mächtigkeiten von der Umgebung ab. Diese Auslaugungssenke ist in allen Isobathenplänen von der Basis des Unteren Buntsandstein (ANLAGE 5) bis zur Basis des Oberen Werra-Ton (ANLAGE 8) modelliert. Weiterhin korrelieren entlang des nordwestlichen und südwestlichen Salzhangs Bereiche geringer Mächtigkeit des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Oberen Leine-Ton bis zu Basis des Oberen Werra-Ton mit geringmächtigen Bereichen des Buntsandstein (ANLAGE 13). Im zentralen westlichen Bereich des Salzhangs südwestlich der Haune ist im Unterschied zum Buntsandstein jedoch keine erhöhte, sondern eine geringere Mächtigkeit für den stratigraphischen Abschnitt von der Basis des Oberen Leine-Ton bis zur Basis des Oberen Werra-Ton modelliert. Die geringen Mächtigkeiten des Buntsandstein im Bereich des Rombachs selbst finden sich in der Darstellung der Mächtigkeit des beschriebenen stratigraphischen Abschnittes (ANLAGE 14) nicht wieder. Gleiches trifft auf das Haunetal, Eitratatal, Tal der Solz und der Ulster zu. Auch das im Isopachenplan des Buntsandstein (ANLAGE 13) dargestellte Mächtigkeitsmaximum ca. 9,0 km südwestlich des Soisberges ist für den stratigraphischen Abschnitt von der Basis des Unteren Leine-Ton bis zur Basis des Oberen Werra-Anhydrit geringmächtiger ausgebildet. Das Mächtigkeitsmaximum in diesem Abschnitt befindet sich im Vergleich zu den Gesteinen des Buntsandstein ca. 3,0 km weiter südwestlich.

Während die Hochscholle von Buchenau, die in den Isobathenplänen des Unteren Buntsandstein bis zum Oberen Werra-Ton (ANLAGE 5 - ANLAGE 8) deutlich als Antiklinalstruktur dargestellt ist, zeichnet sich die herzyn verlaufende Hochscholle von Wüstfeld vornehmlich anhand der Mächtigkeitsverteilung der das Obere Werra-Steinsalz überlagernden zechsteinzeitlichen Gesteine ab (Tabelle 4, S. 23, ANLAGE 14). Zwischen den beiden genannten Hochschollen befindet sich ein ebenfalls herzyn streichender Bereich generell erhöhter, lokal jedoch stark schwankender Mächtigkeit des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Oberen Leine-Ton bis zur Basis des Werra-Ton, der sich mit der Verbreitung des Obersten Werra-Steinsalz (ANLAGE 7) deckt. Östlich des eben beschriebenen Bereiches, im Nordosten der Treischfeld-Schwelle, befindet sich ebenfalls ein Mächtigkeitsmaximum, dessen Ausdehnung ca. 6,0 km von NW nach SE und ca. 3,0 km von NE nach SW erreicht. Es befindet sich in der südöstlichen Verlängerung der Hochscholle von Wüstfeld. Nordöstlich der Hochscholle von Wüstfeld, im zentralen Bereich der Lagerstätte werden ebenfalls mehr als 80 m Mächtigkeit des betrachteten stratigraphischen Abschnittes erreicht.

Die mittlere Mächtigkeit des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Unteren Werra-Anhydrit bis zur Basis des Oberen Werra-Ton (ANLAGE 15) beträgt ca. 295 m, während bei Reckrod mit ca. 464 m die größte Mächtigkeit modelliert ist. In diesem Bereich ist im Liegenden des Unteren Werra-Steinsalz eine Synklinalstruktur ausgebildet, wie im Isobathenplan des Unteren Werra-Anhydrit (ANLAGE 11) dargestellt ist. Ebenso ist zwischen dem Dreienberg und der Hochscholle von Wüstfeld eine erhöhte Mächtigkeit des beschriebenen stratigraphischen Abschnittes modelliert, was sich in Richtung SE, entlang der Treischfeld-Schwelle, fortsetzt. Dort zeichnet die Verteilung Mächtigkeit der Gesteine von der Basis des Unteren Werra-Anhydrit bis zur Basis des Oberen Werra-Ton die Morphologie des Unteren Werra-Anhydrit (ANLAGE 11) deutlich nach. Dennoch ist im Bereich des Soisberges trotz der größeren Tiefe des Unteren Werra-Anhydrit keine erhöhte Mächtigkeit der überlagernden Salze modelliert. Dort weist das Obere Werra-Steinsalz keine Anomalien auf, während im Mittleren und Unteren Werra-Steinsalz geringere Mächtigkeiten vorherrschen. Auch im Zentrum des Perspektivfeldes Marbach-Süd ist der betrachtete stratigraphische Abschnitt mit vergleichsweise erhöhter Mächtigkeit von ca. 200 m modelliert, was auch durch eine Tagesbohrung (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]) belegt ist. Im Perspektivfeld Marbach ist südlich der Hochscholle von Buchenau eine Zunahme der Mächtigkeit dargestellt, die in südöstlicher Richtung von einer Mächtigkeitsreduktion abgelöst wird und im weiteren Verlauf nach Süden sukzessive wieder ansteigt. Die Basis des Unteren Werra-Anhydrit fällt dort nach Südosten ein (ANLAGE 11). Geringere Mächtigkeiten des beschriebenen stratigraphischen Abschnittes sind hingegen sowohl im Bereich der Hochscholle von Wüstfeld als auch im Osten des Arbeitsgebietes modelliert, wobei im Zentrum der Auslaugungssenke von Gehaus eine Mächtigkeit von weniger als 160 m dargestellt ist. Dort erreicht das Obere Werra-Steinsalz weniger als 20 m Mächtigkeit (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Ebenso sind im Bereich der Auslaugungssenken von Stadtlengsfeld und Unterbreizbach verminderte Mächtigkeiten modelliert. Insgesamt zeichnet die Mächtigkeitsverteilung im stratigraphischen Abschnitt vom Unteren Werra-Anhydrit bis zum Oberen Werra-Steinsalz nicht in allen Bereichen die Morphologie des Unteren Werra-Anhydrit (ANLAGE 11) nach, was nicht nur im Umfeld des Soisberges, sondern auch im Nordosten des Landecker Berges offensichtlich wird. Tabelle 17 (S. 83) gibt einen Überblick über die minimalen, maximalen und durchschnittlichen¹⁷ Mächtigkeiten der Horizonte, aus denen sich der betrachtete stratigraphische Abschnitt (ANLAGE 15) zusammensetzt. Die Mächtigkeiten der beiden sich im Abbau befindlichen Kaliflöze werden für das Kaliflöz Hessen in ANLAGE 16 und für das Kaliflöz Thüringen in ANLAGE 17 dargestellt. Während das Kaliflöz Hessen, wie auch anhand Tabelle 17 (S. 83) deutlich wird, geringe Mächtigkeitsvariationen aufweist, variiert die Mächtigkeit des Kaliflöz Thüringen zwischen ca. 0 m und 87 m. Dabei korrelieren der Grad der Erkundung und die Detailliertheit des Isopachenplanes (Kap. 4.2). So sind innerhalb des Perspektivfeldes Marbach, in dem die Mächtigkeit des Kaliflöz Thüringen augenscheinlich geringeren Schwankungen unterlegen ist, Werte von mehr als 5,0 m, mit Ausnahme des westlichen Salzhangbereiches im Perspektivfeld Marbach-

¹⁷ Durchschnittlich bezieht sich auf das arithmetische Mittel.

Süd, ein Produkt der Interpolation. Bereiche erhöhter Mächtigkeit befinden sich bei Reckrod, nördlich entlang des Verlaufs der Hochscholle von Wüstfeld sowie im Osten des Arbeitsgebietes südlich bzw. südwestlich des Dietrichsberges. Sowohl entlang der nördlichen Begrenzung der Hochscholle von Wüstfeld als auch bei Reckrod sind markante Schichtversätze im Unteren Werra-Anhydrit (ANLAGE 11) bekannt, wobei diese südwestlich von den Mächtigkeitsanomalien verlaufen. Weiterhin sind im Vorfeld der Treischfeld-Schwelle erhöhte Mächtigkeiten modelliert. Die Mächtigkeitsverteilung des Kaliflöz Thüringen weist stärkere Parallelen zur Mächtigkeitsverteilung des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Oberen Werra-Ton bis zur Basis des Unteren Werra-Steinsalz (ANLAGE 15) auf als zur Morphologie des Flözes selbst (ANLAGE 10). Die genannten Bereiche mit vermehrt erhöht auftretender Flözmächtigkeit decken sich mit erhöhter Mächtigkeit des Abschnittes vom Unteren bis zum Oberen Werra-Steinsalz. Dabei ist eine erhöhte Mächtigkeit des Kaliflöz Thüringen ein Indiz auf stark steil stehende Flöze bzw. verfaltete Bereiche (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]).

Tabelle 17 Minimale, mittlere und maximale Mächtigkeit der jeweiligen Horizonte innerhalb des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Oberen Werra-Ton bis zur Basis des Unteren Werra-Steinsalz im Arbeitsgebiet

Horizont	Minimale Mächtigkeit [m]	Mittlere Mächtigkeit [m]	Maximale Mächtigkeit [m]
Oberes Werra-Steinsalz	19,3	100,0	298,6
Kaliflöz Hessen	2,0	3,6	8,0
Mittleres Werra-Steinsalz ¹⁸	0,1	64,4	201,9
Kaliflöz Thüringen	0,03	13,4	87,4
Unteres Werra-Steinsalz	23,9	115,5	241,4

5.3.3 Geologische Profile

Abbildung 32 (S. 84) gibt einen Überblick über den Verlauf ausgewählter, geologischer Profile durch das 3D-Strukturmodell, wobei alle modellierten Horizonte von Sub- bis Suprasalinar abgebildet werden. Neben dem Verlauf der Horizonte und Störungszonen wird auch die Position von Vulkanitvorkommen schematisch dargestellt. Die Profile

¹⁸ Die Mächtigkeit des Mittleren Werra-Steinsalz wurde i. d. R. anhand der Basis des Kaliflöz Hessen sowie der Basis und der des Mittleren Werra-Steinsalz selbst kalkuliert. Da im Ostteil des Arbeitsgebietes kein Kaliflöz Hessen ausgebildet ist, wurde die Mächtigkeit des Mittleren Werra-Steinsalz in diesem Bereich anhand der Basis des Oberen Werra-Steinsalz und der des Mittleren Werra-Steinsalz berechnet.

werden nachfolgend im Hinblick auf Morphologie und vorhandene Strukturelemente beschrieben. Dabei dient die Angabe der lateralen Erstreckung in Profilkilometer (PKM) einer räumlichen Zuordnung innerhalb des jeweiligen geologischen Profils.

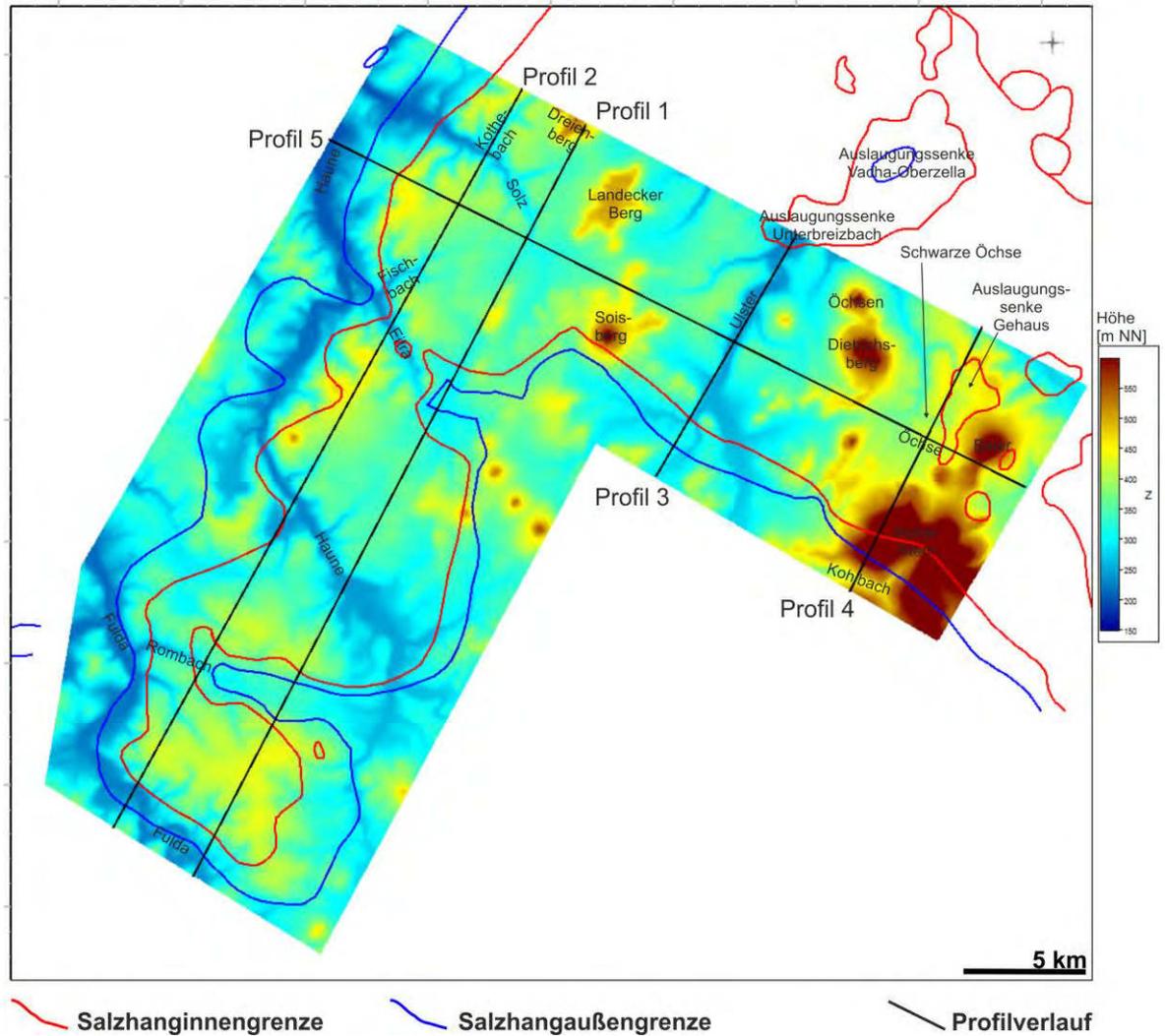


Abbildung 32 Lage der erstellten Profile 1 bis 5 innerhalb des Arbeitsgebietes inklusive der Darstellung der Geländeoberkante [m NN]

Profil 1 (ANLAGE 18) erstreckt sich von NNE nach SSW über eine Länge von 34,7 km vom Dreienberg bis hin zur Fulda im SSW des Perspektivfeldes Marbach-Süd. Der im NNE gelegene Dreienberg stellt eine morphologische Erhöhung dar, die von Muschelkalk-Ablagerungen begleitet wird. Das Profil 1 schneidet die Vulkanitvorkommen des Dreienberges bei PKM 1,0 bzw. bei PKM 3,0 (Abbildung 32, S. 84). Bei PKM 4,3 sind die Taleinschnitte der Solz sowie eines ihrer Seitenarme dargestellt. In deren Umfeld ist kein Oberer Buntsandstein ausgehalten und es wird eine erhöhte Mächtigkeit der stratigraphischen Folge von der Basis des Unteren Werra-Steinsalz bis zu Basis des Oberen Werra-Ton ersichtlich. Die Horizonte oberhalb des Oberen Werra-Ton zeigen dort eine

leichte Aufwölbung. Bei PKM 4,7 wurde ein Salzbasissprung mit einem vertikalen Versatz von ca. 90 m konstruiert. Dieser bildet die nördliche Begrenzung der Hochscholle von Wüstfeld, die zwischen PKM 6,0 und PKM 8,0 nach SSW einfallend modelliert wurde. Die überlagernden Salze im Hangenden der Hochscholle sind in ihrer Mächtigkeit reduziert. Die im Suprasalinar dargestellten Horizonte bilden eine Synklinalstruktur, was vor allem anhand der Basis des Mittleren Buntsandstein deutlich wird. Nahe Reckrod, zwischen PKM 10,0 bis PKM 11,0, sind sowohl im Unteren Werra-Anhydrit (ANLAGE 11) als auch im Suprasalinar (z. B. ANLAGE 5) erzgebirgisch streichende Störungen modelliert worden. In diesem Bereich ist die Mächtigkeit des stratigraphischen Abschnittes vom Unteren bis zum Oberen Werra-Steinsalz erhöht, wobei die Kaliflöze Thüringen und Hessen eine unruhige Lagerung und, im Fall des Kaliflöz Thüringen, engräumige Mächtigkeitsvariationen aufweisen (vgl. ANLAGE 17). Die Salzbasis bildet eine Synklinalstruktur und die Horizonte vom von Oberem Werra-Ton bis zur Fulda-Formation eine Antiklinalstruktur. Auch das in im Bereich Reckrod ausgebildete Oberste Werra-Steinsalz folgt dieser Aufwölbung, die jedoch im Suprasalinar anhand der Basis des Unteren bzw. Mittleren Buntsandstein in abgeschwächter Amplitude modelliert ist und von Deckgebirgsstörungen begleitet wird. Bei PKM 13,0 quert das Profil 1 einen Bereich außerhalb der intakten Salzverbreitung, in dem der südöstliche Teil der Hochscholle von Buchenau modelliert wurde. Zwischen PKM 13,3 und PKM 20,7 ist begrenzt von zwei Störungzonen im Suprasalinar eine morphologische Erhöhung des Geländes modelliert, wobei die Mächtigkeit des stratigraphischen Abschnittes vom Oberen Leine-Ton bis zur Fulda-Formation nach SSW abnimmt. Diese Entwicklung korreliert mit der sukzessiven Zunahme der Mächtigkeit der Werra-Salze bis zum PKM 20,7. Dort zeichnet sich der Taleinschnitt der Haune nach. Bei PKM 26,2 und PKM 34,3 folgen die Taleinschnitte des Rombachs bzw. der Fulda, wobei an diesen beiden Punkten keine Salze der Werra-Formation ausgehalten sind, wie anhand des Verlaufs des Salzhangs nachvollziehbar ist (Abbildung 32, S. 84). Bereiche erhöhter Geländemorphologie korrelieren mit der Verbreitung der Werra-Salze. Aufgrund des derzeitigen Standes der Exploration ist kein detaillierteres Abbild des Untergrundes im Bereich des Perspektivfeldes Marbach modellierbar.

Das Profil 2 (ANLAGE 19) verläuft ca. 3 km westlich parallel zu Profil 1 über eine Distanz von 34,6 km von NNE nach SSW. Im Unterschied zu Profil 1 ist im Profil 2 kein Oberer Buntsandstein ausgehalten. Darüber hinaus wird über das gesamte Profil 2 eine vergleichsweise unruhigere Morphologie der Geländeoberkante deutlich, die durch tiefe Taleinschnitte von Flüssen und Bächen geprägt ist. Zwischen PKM 18,0 und PKM 34,0 sind wie im Profil 1 die Taleinschnitte der Haune, des Rombachs und der Fulda deutlich ausgeprägt. Zudem weist die Geländeoberkante in diesem Profilabschnitt, verglichen mit Profil 1, deutlich stärkere morphologische Schwankungen auf. Im genannten Profilabschnitt sind im Bereich der aufgeführten Taleinschnitte weitere Störungzonen modelliert, die jeweils steil bis flach herzyn streichen (vgl. ANLAGE 5). Ebenso wie im Profil 1 ist die Modellierung des Untergrundes im Bereich des Perspektivfeldes Marbach unter Berücksichtigung des derzeitigen Standes der Exploration nicht in größerer Detailgenauigkeit bzw. Sicherheit möglich. Der Profilabschnitt zwischen PKM 0 und PKM 18 stützt sich hingegen auf

eine engmaschigere Erkundung. Bei PKM 12,5 ist der Scheitelpunkt der Hochscholle von Buchenau im Subsalinar modelliert. Dieser korreliert, im Gegensatz zu Profil 1, mit einer relativen Hebung der im Hangenden ausgebildeten Horizonte, die bis zur Basis des Oberen Leine-Ton verfolgen lässt. Die dort steil bis flach herzynen Streichrichtungen der Störungszonen im Subsalinar (vgl. ANLAGE 11) sind mit geringen Abweichungen mit denen im Suprasalinar (vgl. ANLAGE 5) vergleichbar. Die jeweilige Basis des Unteren und Mittleren Buntsandstein im Hangenden der Hochscholle von Buchenau sind, wie im Profil 1 dargestellt, von Störungszonen zergliedert und leicht eingesunken, sodass die Hebung in diesem Bereich mit geringerer Amplitude modelliert wurde. Zwischen den Hochschollen von Buchenau und Wüstfeld sind die Verläufe der modellierten Horizonte mit denen im Profil 1 vergleichbar. Allein das Oberste Werra-Steinsalz ist im Unterschied zu Profil 1 nicht als Antiklinalstruktur ausgebildet, folgt aber dennoch den Verläufen der stratigraphischen Horizonte, in die es eingebettet ist. Im Hangenden der Hochscholle von Wüstfeld ist wie im Profil 1 ebenfalls eine Mächtigkeitsreduktion der Werra-Salze modelliert, die im NNE bzw. SSW jeweils von erhöhten Mächtigkeiten der Werra-Salze begleitet wird. Dabei ist die Mächtigkeit des Kaliflöz Thüringen an diesen Stellen ebenfalls erhöht. Der Versatz der NNE anschließenden Störung, die als Begrenzung der Hochscholle modelliert ist (vgl. ANLAGE 11), ist deutlich geringer als in Profil 1. Die im Hangenden der Hochscholle von Wüstfeld modellierten Horizonte bilden jedoch im Gegensatz zu Profil 1 keine Synklinalstruktur. Die dort vergleichsweise eben modellierte Geländeoberkante ist zwischen PKM 3,3 und PKM 7,3 durch sich einschneidende Gewässer begrenzt. Im NNE schließt sich der Taleinschnitt der Solz an, in die der Kothebach mündet. Dessen Verlauf entspricht dem des Profils 2 von PKM 1,5 bis PKM 3 und deckt sich mit einer erzgebirgisch streichenden Störungszone im Suprasalinar (vgl. ANLAGE 5), die das Profil 2 bei PKM 2,3 schneidet und, mit 5° veränderter Streichrichtung, auch im Subsalinar modelliert wurde. Dabei konnten für die Basis des Unteren Werra-Anhydrit (vgl. ANLAGE 11) in diesem Bereich diverse Kleinschollen modelliert werden.

Das Profil 3 (ANLAGE 20) wurde parallel zu Profil 1 in einer Entfernung von ca. 9,5 km in südöstlicher Richtung erstellt. Die Länge des Profils 3 umfasst 11,4 km, wobei der Profilverlauf im NNE über ca. 6,0 km dem Verlauf des Ulstertals entspricht (Abbildung 32, S. 84). Die Geländeoberkante weist im Vergleich zu den Profilen 1 und 2 nur geringe morphologische Variationen auf. Im SSW Drittel des Profils 3 sind neben Ablagerungen des Oberen Buntsandstein auch die des Muschelkalk ausgehalten, was zur Erhöhung der Mächtigkeit des Suprasalinars beiträgt. Dort sind die Horizonte des Muschelkalk bis hin zum Oberen Werra-Ton als Synklinalstruktur modelliert und durch herzyn verlaufende Störungen begleitet. Die Störungsrichtungen sind parallel zum Verlauf der Treischfeld-Schwelle im Subsalinar (vgl. ANLAGE 11). Im NNE des Profils 3 ist bis zum PKM 0,6 der südliche Teil der Auslaugungssenke Unterbreizbach modelliert, an die nach SSW eine flachherzyn streichende Störung im Suprasalinar (vgl. ANLAGE 5) anschließt. Im Liegenden der Auslaugungssenke ist die Mächtigkeit der Werra-Salze (vgl. ANLAGE 15) reduziert und die Basis des Unteren Werra-Anhydrit (vgl. ANLAGE 11) erhöht. Zwischen PKM 1,9 und PKM 3,3 quert das Profil 3 vier NNW-

SSW streichende Vulkanitvorkommen. In diesem Bereich ist die Mächtigkeit der Werra-Salze (vgl. ANLAGE 15) erhöht, was mit einer Synklinalstruktur der Basis des Unteren Werra-Anhydrit (vgl. ANLAGE 11) korreliert. Dort ist lokal begrenzt Oberstes Werra-Steinsalz modelliert, das in drei nahegelegenen Tagesbohrungen erbohrt wurde (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Im Bereich des PKM 4,5 bilden alle dort modellierten Horizonte eine Antiklinalstruktur, wobei für das Kaliflöz Thüringen bei PKM 5,0 eine Mächtigkeitsanstauung modelliert wurde. Zwischen PKM 5,0 und PKM 7,0 fallen alle in diesem Bereich modellierten Horizonte nach SSW ein. Dabei fällt das Kaliflöz Hessen steiler ein als das Kaliflöz Thüringen. Dies bedingt eine extreme Mächtigkeitserhöhung des Oberen Werra-Steinsalz bzw. eine Mächtigkeitsreduktion des Mittleren Werra-Steinsalz im Bereich des PKM 7,8.

Das Profil 4 (ANLAGE 21) erstreckt sich, ca. 8,7 km südöstlich parallel zu Profil 3 (Abbildung 32, S. 84), über eine Länge von 12,1 km. Im Bereich des Hohen Sterns sind Muschelkalkablagerungen und Sedimente des Oberen Buntsandstein ausgehalten, sodass die Mächtigkeit der Ablagerungen von der Basis des Buntsandstein bis zur Geländeoberkante bis zu 920 m beträgt. Bei PKM 11,6 ist der Taleinschnitt des Kohlbachs dargestellt. Dieser ist deutlich tiefer als der der Schwarzen Öchse und der Öchse bei PKM 4,2 bzw. PKM 5,6. Die modellierten Horizonte weisen ein generelles Einfallen nach SSW auf. Für die Basis des Unteren Werra-Anhydrit, die von ca. -315 m NN im NNE auf ca. -710 m NN bei PKM 10,5 einfällt, ist dabei bei PKM 4,8 eine relative Erhöhung modelliert. Dort erreicht die Mächtigkeit der Werra-Salze ca. 150 m, wobei diese generell geringer ist als in Profil 3 (ANLAGE 20). Das Profil 4 quert den westlichen Einflussbereich der Auslaugungssenke Gehaus zwischen PKM 1,8 und PKM 2,7. Im Umfeld der Auslaugungssenke sind eggisch und steilherzyn streichende Störungen im Suprasalar modelliert (vgl. ANLAGE 5). Zwischen PKM 4,0 und PKM 8,0 sind Vulkanitvorkommen modelliert, die N-S streichen. Das Kaliflöz Hessen ist zwischen PKM 9,0 und PKM 9,8 lokal begrenzt modelliert, während das Kaliflöz Thüringen durchgängig ausgehalten ist. Im SSW des PKM 10,5 fällt die Basis des Unteren Werra-Anhydrit nach NNE ein. Dort ist die Treischfeld-Schwelle modelliert.

Profil 5 (ANLAGE 22) erstreckt sich ca. 31,7 km von WNW nach ESE und quert die Profile 1 bis 4 (Abbildung 32, S. 84) nahezu senkrecht. Die Geländehöhe in Profil 5 variiert von ca. 200 m NN im Taleinschnitt der Haune im WNW bis zu ca. 525 m NN, die auf dem Gipfel des Baiers bei PKM 29,4 erreicht werden. Die übertägig ausstreichenden Vulkanitvorkommen Schwärzelsberg-Langeberg, Öchsen und Baier bilden mit ihren Muschelkalkablagerungen morphologische Erhöhungen, während Gewässer wie Öchse, Ulster und Solz deutliche Taleinschnitte darstellen. Zwischen PKM 0,0 und PKM 5,5 ist die Geländemorphologie, verglichen mit der im ESE von PKM 5,5, unruhig. Darüber hinaus ist bis zum PKM 5,5 die Mächtigkeit des Mittleren Buntsandstein unter Berücksichtigung des gesamten Profils 5 vergleichsweise gering. Bis zu PKM 3,0, in dem eine Antiklinalstruktur des Subsalinars modelliert ist, fallen nicht nur die Geländeoberkante, sondern auch die Horizonte von der Basis des Mittleren Buntsandstein bis zur Basis des Oberen Werra-Ton nach WNW ein. In diesem Bereich, in dem der westliche Salzhang ausgebildet ist, dominieren sowohl im Sub- (vgl. ANLAGE 11) als auch

im Suprasalinar (vgl. ANLAGE 5) erzgebirgisch streichende Störungen. Von PKM 3,0 bis PKM 12,0 ist ein generelles Schichteinfallen aller Horizonte nach ESE modelliert. Allein die Hochscholle von Wüstfeld bildet zunächst ein Plateau. Profil 5 ist im Streichen dieser konstruiert, wobei sich deren nordöstliche Begrenzungsstörungen (vgl. Profil 1, ANLAGE 18) außerhalb des Profils 5 befinden. Im Hangenden der Hochscholle von Wüstfeld ist zwischen PKM 7,0 und PKM 8,0 ein lokales Vorkommen des Obersten Werra-Steinsalz angetroffen. Die Mächtigkeit der Werra-Salze in diesem Bereich ist geringer und steigt in Richtung ESE an. Zwischen PKM 10,5 und PKM 12,0 erreicht auch das Kaliflöz Thüringen Mächtigkeiten von bis zu ca. 60 m. Die Basis des Kaliflöz Thüringen ist dort anhand untertägiger Aufschlüsse gut dokumentiert (Kap. 4.1.4, Kap. 4.1.5). Das Profil 5 quert eine Vielzahl von Vulkanitvorkommen, von denen alle ein Streichen von N nach S aufweisen. Im Umfeld des Schwärzelsberg-Langeberges, ca. 2,0 km nordöstlich des Soisberges, reichen die Vulkanite bis zur Tagesoberfläche. Östlich der Vulkanitvorkommen ist eine Antiklinalstruktur ausgebildet, die in allen Horizonten nachvollziehbar ist. Dabei kann der Obere Buntsandstein von PKM 16,0 bis PKM 20,8 nicht ausgehalten werden. Zudem korreliert der Taleinschnitt der Ulster mit dem Scheitelpunkt der Antiklinalstruktur. Die unruhige Lagerung der Kaliflöße Hessen und Thüringen sowie die starken Mächtigkeitsschwankungen des Kaliflöz Thüringen in diesem Bereich sind durch untertägige Exploration und Tagesbohrungen belegt (Kap. 4.1.3, Kap. 4.1.5, Kap. 4.1.4). Das Profil 5 verläuft zwischen PKM 22,0 und PKM 24,0 südlich des Dietrichsberges, der selbst eine markante Erhebung im Gelände darstellt. Dort bilden die Horizonte von der Basis des Oberen Buntsandstein bis zur Basis des Kaliflöz Thüringen eine Synklinale. In diesem Bereich wurde ein weiteres lokales Vorkommen des Obersten Werra-Steinsalz modelliert, das in seinem Verlauf ebenfalls der Synklinalstruktur folgt. Das Kaliflöz Hessen ist ab PKM 22,0 nach ESE nicht mehr ausgehalten während das Kaliflöz Thüringen mit Mächtigkeiten von bis zu 47 m (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]) angetroffen wurde. Die Basis des Unteren Werra-Steinsalz bzw. die Basis des Unteren Werra-Anhydrit weisen zwischen PKM 22,5 und PKM 27,5 eine unruhige Morphologie auf und steigen stufenartig nach ESE an, wie anhand von Georadarexploration modelliert wurde (Kap. 4.1.5). Bei PKM 25,8 ist eine flachherzyn verlaufende Salzbasisstörung modelliert. Im ESE des PKM 27,2 variiert die Höhe der Basis des Unteren Werra-Anhydrit zwischen ca. -420 m NN und ca. -460 m NN und weist eine ruhigere Lagerung auf. Zwischen PKM 28,0 und PKM 28,5 ist der südliche Bereich der Auslaugungssenke Gehaus dargestellt, wobei die Mächtigkeit des Werra-Steinsalz (ANLAGE 15) hier keine starke Reduktion aufweist. Die zwischen PKM 28,0 und PKM 31,7 dargestellten Störungen im Suprasalinar streichen parallel zu den Vulkanitvorkommen nahezu N-S. Ebenso verhält es sich mit der Störung bei PKM 26,0, die parallel zum Verlauf der Öchse streicht. Im Umfeld der Öchse ist kein Oberer Buntsandstein ausgehalten. An dieser Stelle weisen die Horizonte vom Mittleren Buntsandstein bis zur Basis des Kaliflöz Thüringen eine lokal begrenzte Antiklinalstruktur auf.

5.3.4 Fazieskarten und Störungszonen

Im Folgenden werden die Ergebnisse des 3D-Strukturmodells in Bezug zu den Kaliflözen Hessen und Thüringen ausgewertet. In den Gruben Hattorf und Unterbreizbach lagen Kartierungen über eine Fläche von ca. 137 km² hinsichtlich der Fazies der Kaliflöze vor (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]). Diese wurden jeweils in ein GIS-fähiges Format übertragen (MARKS, 2015, [138], NAWA, 2014, [147]), in das 3D-Strukturmodell integriert und sind für das Kaliflöz Thüringen in ANLAGE 23 bzw. für das Kaliflöz Hessen in ANLAGE 24 zusammengefasst dargestellt. Neben der statistischen Auswertung der Faziesverteilung der Kaliflöze Thüringen und Hessen wird nachfolgend vornehmlich auf die Verteilung der Fazies in Bezug zu Vulkanitvorkommen sowie Störungen im Subsalinar und Suprasalinar eingegangen. Weiterhin werden erstmals Ergebnisse zu möglichen Zusammenhängen zwischen den jeweiligen Tiefen der Basis der Kaliflöze Thüringen (ANLAGE 25) und Hessen (ANLAGE 26) beschrieben. Darüber hinaus wird auch die Mächtigkeitsverteilung des Kaliflöz Thüringen in einen Kontext zur Faziesverteilung gestellt (ANLAGE 27). Demgegenüber wird jedoch aufgrund der geringen Mächtigkeitsvariationen im Kaliflöz Hessen (Kap. 5.3.2, ANLAGE 16) auf eine Darstellung der Mächtigkeiten mit der Fazies verzichtet.

Die Faziesverteilung des Kaliflöz Thüringen (ANLAGE 23) ist der Fläche nach in Abbildung 33 (S. 90) dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse der Gruben Hattorf und Unterbreizbach einerseits gegenübergestellt und andererseits zusammengefasst. Mit 68 % überwiegt die Carnallitfazies während Sylvinitfazies 14 % der Gesamtfläche ausmacht. Bereiche, die als *Vertaubung*, *Steinsalz* und *Umwandlungshalit* ausgehalten sind, umfassen ca. 3 % der Gesamtfläche, was sich ebenfalls in den jeweiligen Flächenanteilen in den beiden Gruben widerspiegelt. Unterschiede in der Faziesverteilung bestehen in Bezug

- zur Hartsalzfazies, die in der Grube Hattorf 4,38 km² bzw. 14 % und in der Grube Unterbreizbach mit 0,04 km² weniger als 1 % der Fläche ausmacht,
- zur Übergangsfazies Sylvinit über Carnallit, die mit 3,35 km² bzw. 10 % in der Grube Unterbreizbach und 2,05 km² bzw. 6 % in der Grube Hattorf quantifiziert werden kann,
- zur Langbeinitfazies, die in der Grube Hattorf mit ca. 2 % eine Fläche von 0,63 km² ausmacht, in der Grube Unterbreizbach jedoch nicht dokumentiert ist

und

- zu einem Vorkommen von Rinneit¹⁹, das mit einer Fläche von 0,05 km² allein auf die Grube Unterbreizbach beschränkt ist.

¹⁹ Rinneit ist ein Halid mit der empirischen Formel K₃NaFeCl₆ ([191]).

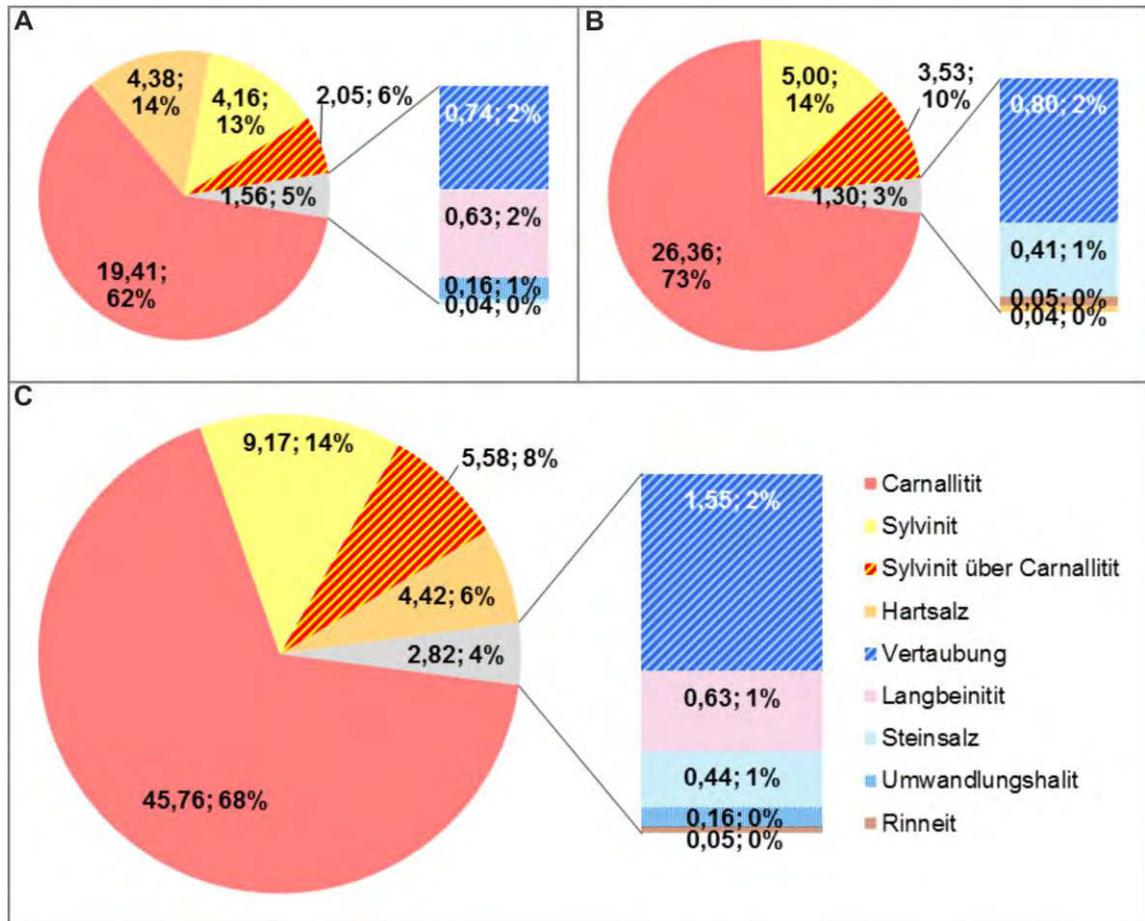


Abbildung 33 Grafische Darstellung der Faziesanteile des Kaliflöz Thüringen in der Grube Hattorf (A), der Grube Unterbreizbach (B) sowie den beiden Gruben Hattorf und Unterbreizbach (C); Angaben zu Quadratkilometern bzw. Prozent

Carnallitfazies (ANLAGE 23) wird im gesamten Arbeitsgebiet angetroffen, wobei sie im Zentralteil und im Osten des Arbeitsgebietes in größeren zusammenhängenden Flächen auftritt als im westlichen Teil. In letzterem ist die Faziesverteilung differenzierter wie auch anhand der Zunahme an Hartsalz und Langbeinitit ersichtlich ist. In Bezug auf die Langbeinititfazies sind konzentrische Anordnungen auffällig (Abbildung 34 B, S. 92), in deren Zentrum z. T. Vertaubungen ausgehalten werden können. Um den Langbeinitit folgen Hartsalzsäume, die bisweilen von Sylvinitssäumen umgrenzt werden, bevor die Fazies Sylvinit über Carnallit folgt. Diese konzentrischen Bereiche sind meist in Carnallitfazies eingebettet.

Im Osten der Lagerstätte wird die Carnallitfazies von der Fazies Sylvinit über Carnallit bzw. von Sylvinitfazies begrenzt. Dabei sind im Unterschied zum westlichen Lagerstättenteil anstatt konzentrischer Anordnungen vielmehr N-S streichende, sylvinitische Faziesbereiche dokumentiert. Innerhalb der Sylvinitfazies sind oftmals Vertaubungen in Form von Steinsalz ausgehalten, die ebenfalls ungefähr in N-S-Richtung streichen. Das korreliert mit den Verläufen der Vulkanitvorkommen, die zumeist im Zentrum einer Steinsalzvertaubung liegen. Die Breite der Sylvinit über Carnallit- bzw. Sylvinitssäume

entlang der Vulkanitvorkommen ist unterschiedlich. Es ist auch möglich, dass entlang eines Vulkanitvorkommens bereichsweise keine sylvinitische Fazies ausgebildet ist (Abbildung 34 A, S. 92). In seltenen Fällen ist kein Vulkanitvorkommen im Bereich einer Vertaubung bzw. sylvinitischer Fazies aufgeschlossen (Abbildung 34 B, C, S. 92). So ist auch im nordöstlichen Teil des Arbeitsgebietes ein Bereich sylvinitischer Fazies mit einer Umgrenzung von Sylvinit über Carnallitit ausgehalten (Abbildung 34 C, S. 92), ohne dass jedoch ein Vulkanitvorkommen an dieser Stelle dokumentiert worden ist. Im Subsalinar wurde östlich dieses Sylvinitbereiches eine N-S streichende Störung konstruiert.

Eine Korrelation der Faziesverteilung mit Streichrichtungen von Störungen im Subsalinar und Suprasalinar ist nicht in jedem Fall eindeutig zuweisbar. In drei Fällen sind in der Verlängerung sowie im Bereich herzyn verlaufender Störungen im Hangenden bzw. Liegenden ebenfalls herzyn verlaufende Faziesbereiche dokumentiert (Abbildung 34 D, E, F, S. 92). Ferner wurde unabhängig von den in ANLAGE 23 dargestellten Störungen in einem besonders Hartsalz-reichen Revier eine N-S bzw. W-E verlaufende Ausrichtung von Faziesbereichen aufgeschlossen (Abbildung 34 G, S. 92). Zwar sind die Verläufe der Isobathen der Basis des Kaliflöz Thüringen (ANLAGE 25) in diesem Bereich ebenfalls ungefähr W-E verlaufend, doch eine Korrelation mit der Aufrichtung der Fazies in diesem Revier ist nicht eindeutig. Demgegenüber entspricht die Tiefenlage der Basis des Kaliflöz Thüringen im südöstlichsten Teil des Arbeitsgebietes dem N-S-Verlauf einer Vertaubung, in deren Zentrum vier N-S-streichende Vulkanitvorkommen angetroffen worden sind (ANLAGE 23). Weiterhin ist ungefähr 500 m östlich dieser Vertaubung eine zum Verlauf der Vulkanitvorkommen parallele Störungszone im Suprasalinar modelliert. Diese Störungsrichtung findet sich auch nördlich und östlich im Suprasalinar wieder. Westlich dieser Vertaubungszone befindet sich ein lateral weit aushaltender Carnallititbereich, der von geringen Schwankungen der Tiefenlage geprägt ist (ANLAGE 25). Doch auch lateral engräumige Fazieswechsel sind in Bereichen geringer Tiefenschwankungen dokumentiert, wie im Nordwesten des Arbeitsgebietes dargestellt ist. Daher schließt sich eine Korrelation der beschriebenen, konzentrischen Langbeinitbereiche mit der Tiefe der Basis des Kaliflöz Thüringen aus. Dies gilt ebenso für die Mächtigkeit des Kaliflöz in den Langbeinit- bzw. Hartsalz-höffigen Bereichen im westlichen Teil des Arbeitsgebietes (ANLAGE 27).

Weiterhin sind innerhalb der Carnallititfazies starke Anstauungen bzw. Ausdünnungen belegt, die bereits in der Vergangenheit untersucht worden sind (SCHWARZ, 1992, [179], WAGENKNECHT, 1986, [199], WENZEL, 1983, [205]). Darüber hinaus sind Mächtigkeitsanstauungen auch im Bereich sylvinitischer Fazies vorhanden. So ist im zentralen Teil des Arbeitsgebietes ein engräumiger Fazieswechsel innerhalb des Kaliflöz Thüringen mit starken Mächtigkeitsvariationen dargestellt (ANLAGE 27). Derartige Mächtigkeitsvariationen sind jedoch nicht Bedingung der Fazieswechsel, wie am Beispiel der im nordwestlichen Teil des Arbeitsgebietes abgebildet ist. Insgesamt kann keiner Fazies eine definierte Mächtigkeitsspanne zugewiesen werden.

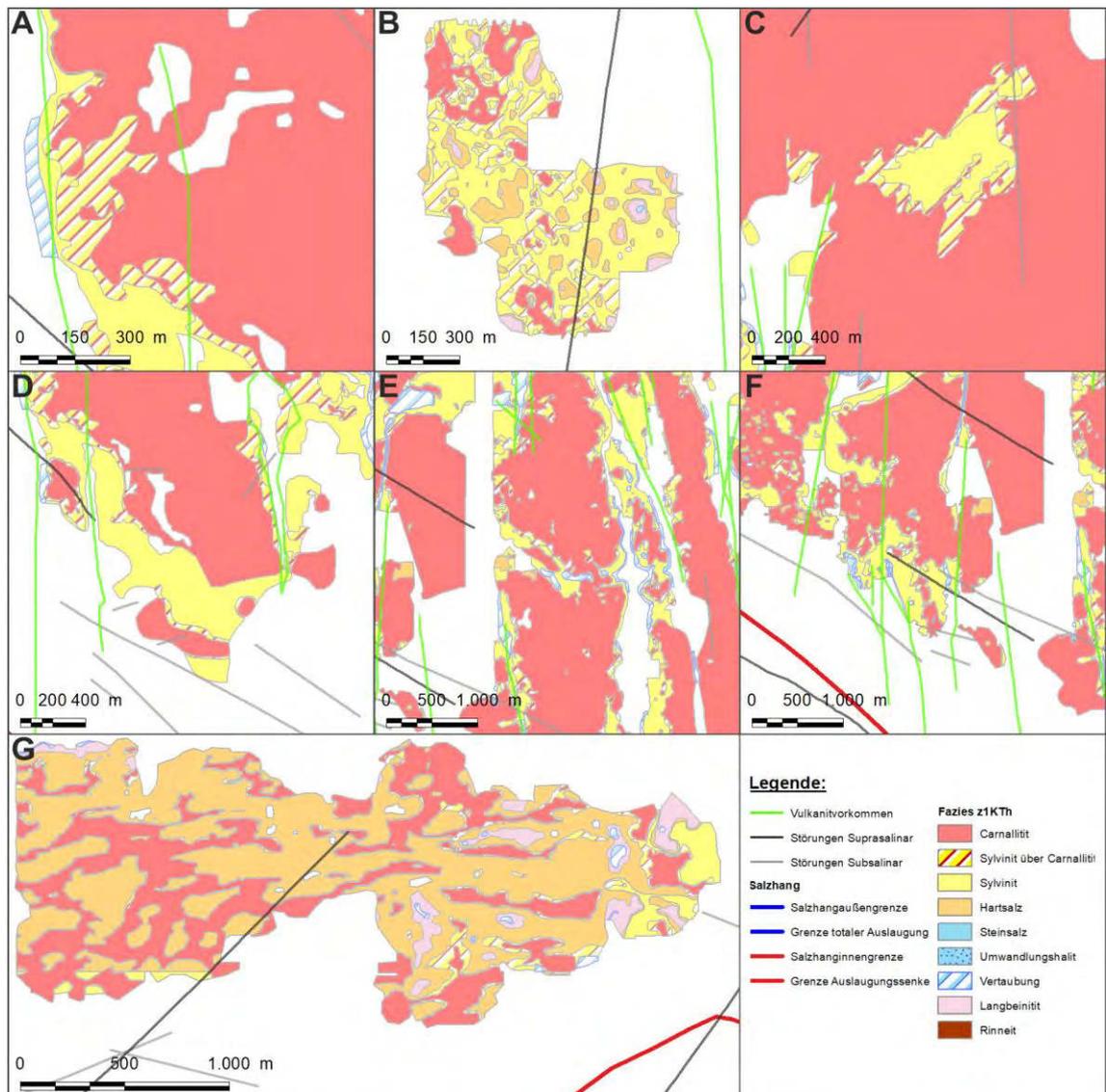


Abbildung 34 Darstellung ausgewählter Faziesbereiche des Kaliflöz Thüringen im Arbeitsgebiet (A – G)

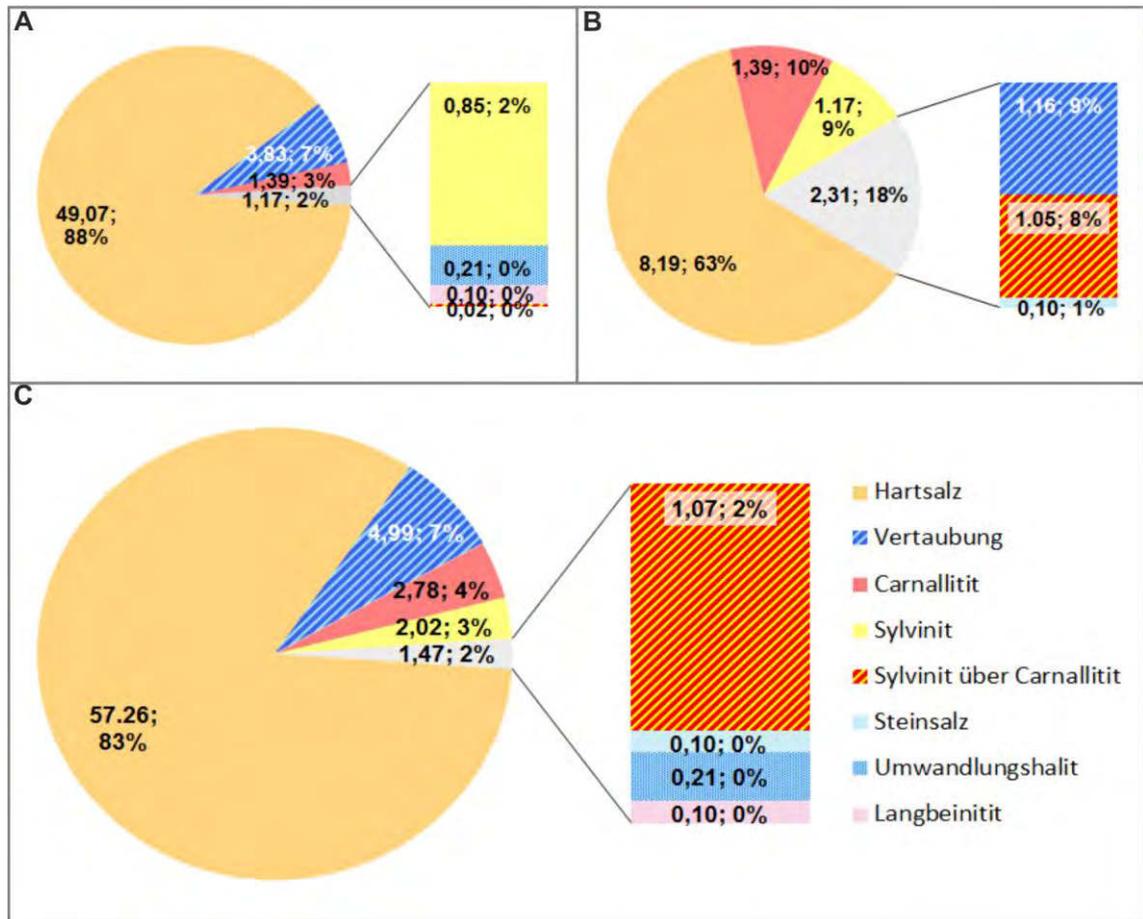


Abbildung 35 Grafische Darstellung der Faziesanteile des Kaliflöz Hessen in der Grube Hattorf (A), der Grube Unterbreizbach (B) sowie den beiden Gruben Hattorf und Unterbreizbach (C); Angaben zu Quadratkilometern bzw. Prozent gerundet auf zwei Dezimalstellen bzw. die ganze Zahl

In Abbildung 35 ist die Faziesverteilung des Kaliflöz Hessen (ANLAGE 24) im Hinblick auf die Flächenanteile dargestellt. Hartsalz nimmt im Arbeitsgebiet mit 83 % den größten Teil der Gesamtfläche in Anspruch. Zwischen 7 % und 9 % der dargestellten Anteile sind Vertaubungen zuzurechnen. Im Unterschied zu der Grube Hattorf, in der 3 % Carnallit bzw. 2 % Sylvinit aufgeschlossen sind, ist der relative Flächenanteil in der Grube Unterbreizbach bis zu 4,5-fach höher. Die Übergangsfazies Sylvinit über Carnallit ist in der Grube Unterbreizbach mit einer Fläche von ca. 1,05 km² großflächiger aufgeschlossen als in der Grube Hattorf, wo ca. 0,02 km² aufgeschlossen sind. Allein im südwestlichen Bereich des Kaliflöz Hessen (ANLAGE 24) konnte entlang eines Vulkanitvorkommens lokal begrenzt mit einem Flächenanteil von < 1 % Langbeinititfazies nachgewiesen werden. Einerseits säumt der Langbeinitit eine Vertaubungszone und andererseits wurden vereinzelte „Langbeinititinseln“ im Hartsalz dokumentiert. Konzentrische Anordnungen wie im Kaliflöz Thüringen wurden hingegen nicht bestätigt. Im östlichen Teil des Arbeitsgebietes ist das Kaliflöz Hessen faziiell differenzierter ausgebildet als im westlichen Teil. Nördlich der Auslaugungssenke von Unterbreizbach ist Carnallit in die Hartsalzfazies eingebettet, ohne dass jedoch die Über-

gangsfazies Sylvinit über Carnallit dokumentiert wurde, wie es ca. 3,0 km südlich der Auslaugungssenke der Fall ist. Dort geht die carnallitische Fazies zumeist in sylvinitische Fazies über. Die östliche Verbreitungsgrenze des Kaliflöz Hessen ist in Form von Vertaubungsbereichen als auch durch Ausdünnung des Hartsalzes dargestellt. Ausdünnungen wurden in der Grube Hattorf nicht explizit ausgehalten. Weiterhin treten Vertaubungen entlang von Vulkanitvorkommen auf. Die Breite der Vertaubungssäume variiert von wenigen Metern bis hin zu einigen 100 m. Dennoch ist nicht in jedem Vertaubungsbereich ein Vulkanit aufgeschlossen (Abbildung 36 A). Im Bereich einer großflächigen Vertaubung durchschlagen fünf Vulkanitvorkommen das Kaliflöz Hessen, wobei im Umfeld der Vulkanite im Subsalinar Störungen unterschiedlicher Streichrichtung verlaufen (Abbildung 36 B). Auch im Suprasalinar sind an dieser Stelle eine NNW-SSE- bzw. NNE-SSW-streichende Störungen dargestellt. Im Südosten des Arbeitsgebietes sind weiterhin Steinsalz- und Carnallitfazies dokumentiert, die ebenso mit dem herzynen Verlauf von Störungen im Sub- und Suprasalinar korrelieren (Abbildung 36 C).

Dies ist der einzige Bereich, in der die dargestellte Faziesverteilung mit dem Verlauf der Isobathen der Basis des Kaliflöz Hessen korrelieren (ANLAGE 26). Die Ausdünnungs- und Vertaubungsbereiche des Kaliflöz Hessen im östlichen Teil des Arbeitsgebietes korrelieren nicht mit der Tiefe des Kaliflöz. Insgesamt ist eine Abweichung von der Hartsalzfazies zumeist an Vulkanitvorkommen gebunden, sodass eine Korrelation der Tiefe mit der Fazies des Kaliflöz Hessen nicht generell möglich ist.

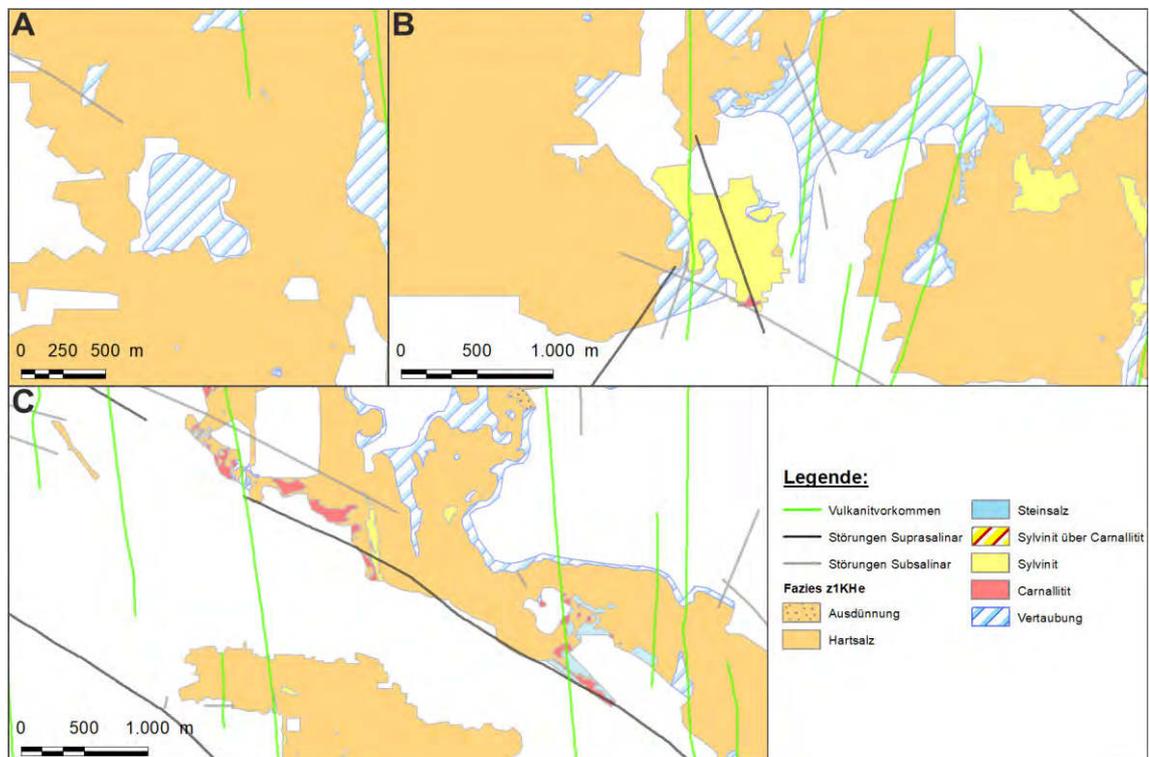


Abbildung 36 Darstellung ausgewählter Faziesbereiche des Kaliflöz Hessen im Arbeitsgebiet (A – C)

5.3.5 Ergebnisse zu Wertstoffgehalten

Lokal begrenzte Bereiche von An- und Abreicherungen der K_2O -Gehalte der Kaliflöze Hessen und Thüringen sind anhand von stichprobenartigen Messungen mittels Kalimeter (Kap. 4.1.4.5) belegt worden (MARKS, 2015, [138]). In der hier vorliegenden Arbeit wurde die Datengrundlage für K_2O -Gehalte auf den südöstlichen Bereich des Arbeitsgebietes erweitert. Darüber hinaus sind erstmalig Untersuchungen zu Wertstoffverteilungen von Kieserit innerhalb des Arbeitsgebietes durchgeführt worden.

Auf Grundlage der in Kap. 4.1.4.5 festgelegten Gehaltsklassen (Tabelle 10, S. 45) werden nachfolgend die Wertstoffgehalte für K_2O und Kieserit hinsichtlich ihrer räumlichen Verteilung in Bezug zur Fazies bzw. Vulkanitvorkommen und Störungen im Sub- bzw. Suprasalinar untersucht. Weiterführend wird geprüft, inwiefern die Tiefen bzw. Mächtigkeiten der Kaliflöze ggf. mit Wertstoffgehalten korrelieren.



Abbildung 37 Darstellung der Verteilung der K_2O -Gehalte und der Fazies innerhalb ausgewählter Bereiche des Kaliflöz Thüringen (A – C)

Zwar beträgt der mittlere K_2O -Gehalt des Kaliflöz Thüringen 10,7 % (Abbildung 15, S. 44), doch die Verteilung der K_2O -Gehalte (ANLAGE 28) variiert innerhalb des Arbeitsgebietes je nach Bereich. Im nördlichen Bereich (Abbildung 37 A, S. 95), in dem der durchschnittliche K_2O -Gehalt 11,5 % ($n=1.424$)²⁰ beträgt, sind die K_2O -Gehalte für Hartsalz im Vergleich zum gesamten Arbeitsgebiet erhöht. Demgegenüber weisen jene für Carnallit in diesem Bereich überwiegend reduzierte bis durchschnittliche K_2O -Gehalte auf. Innerhalb sylvinitischer Fazies treten vermehrt erhöhte bis stark erhöhte K_2O -Gehalte auf, die typisch für dieses Gestein sind (Tabelle 8, S. 43). Eine Korrelation der Wertstoffverteilung besteht in diesem Bereich (Abbildung 37 A, S. 95) weder mit der Tiefe des Kaliflöz Thüringen (ANLAGE 25) noch mit dessen Mächtigkeitsschwankungen (ANLAGE 27) oder bekannten tektonischen Elementen.

Im südwestlichen Bereich (Abbildung 37 C, S. 95) liegt der durchschnittliche K_2O -Gehalt bei 9,0 % ($n=857$). Sowohl für Carnallit als auch innerhalb der Hartsalzfazies sind vereinzelt erhöhte bis stark erhöhte Gehalte dargestellt. Dennoch sind die überwiegenden K_2O -Gehalte unabhängig von der faziellen Verteilung eher reduziert bis stark reduziert. Die Mächtigkeit des Kaliflöz Thüringen liegt in diesem Bereich (Abbildung 37 C, S. 95) bei ca. 5 m (ANLAGE 27) und ist damit verglichen mit der mittleren Mächtigkeit (Tabelle 17, S. 83) von 13,4 m gering. Weder die Tiefe des Kaliflöz noch die nahegelegenen Vulkanitvorkommen bzw. die Störung im Suprasalar korrelieren mit der Verteilung der K_2O -Gehalte.

Im südöstlichen Bereich (Abbildung 37 B, S. 95) beträgt der durchschnittliche K_2O -Gehalt des Kaliflöz Thüringen 11,1 % ($n=2.911$). Die Gehalte für Carnallit sind in Bezug zum gesamten Arbeitsgebiet durchschnittlich (Abbildung 15, S. 44). Die Basis des Kaliflöz Thüringen verläuft dort gleichmäßig in einem Niveau zwischen -600 m NN und -620 m NN (ANLAGE 25). In südlicher Richtung fällt das Flöz nach SE ein, während die K_2O -Gehalte des Carnallits überwiegend dem Durchschnitt entsprechen. Die Mächtigkeit des Kaliflöz Thüringen reduziert sich in diesem Bereich (Abbildung 37 B, S. 95) von Nord nach Süd von ca. 35 m auf ca. 5 m (ANLAGE 27). Die K_2O -Gehalte für Sylvinit sind hingegen sehr unterschiedlich. Die westlichen und südwestlichen Sylvinitvorkommen weisen, ebenso wie das dort anstehende Hartsalz, reduzierte bis stark reduzierte Gehalte auf. Im nördlichen Teil des Bereiches (Abbildung 37 B, S. 95) dominieren engräumige starke Gehaltsvariationen, während in östliche Richtung vermehrt erhöhte bis stark erhöhte K_2O -Gehalte innerhalb sylvinitischer Fazies auftreten. Die Verteilung der K_2O -Gehalte korreliert nicht mit Verläufen bekannter Strukturen.

²⁰ n...Anzahl der Messungen

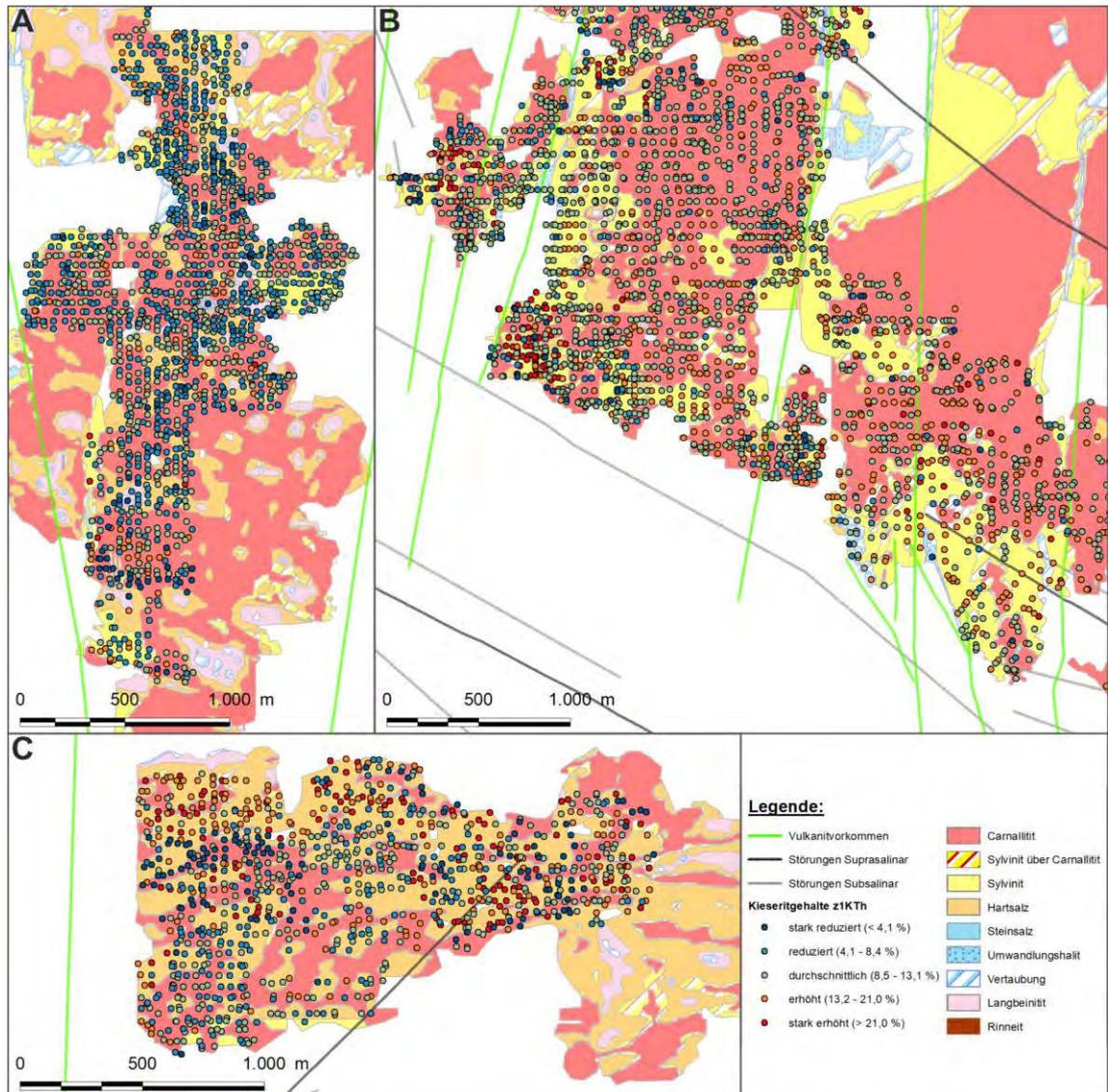


Abbildung 38 Darstellung der Verteilung der Kieseritgehalte und der Fazies innerhalb ausgewählter Bereiche des Kaliflöz Thüringen (A – C)

Der mittlere Kieseritgehalt des Kaliflöz Thüringen liegt bei 10,6 % (Abbildung 15, S. 44). Der in Abbildung 38 A dargestellte, nördliche Bereich zeichnet sich durch einen geringen durchschnittlichen Kieseritgehalt von 8,9 % (n=1.519) aus, was sich auch in mehrheitlich reduzierten bis durchschnittlichen Werten widerspiegelt. Keine fazielle Ausbildung in diesem Bereich hebt sich durch auffällige Wertstoffverteilungen hervor. Korrelationen der Wertstoffverteilung mit der Mächtigkeit, der Tiefe oder mit tektonischen Strukturen bestehen nicht (ANLAGE 25, ANLAGE 27). Im südlichen Teil des Bereiches (Abbildung 38 A) bilden stark reduzierte Kieseritgehalte ein ca. 50 m breites Band. Unmittelbar nördlich davon treten vermehrt durchschnittliche bis erhöhte Kieseritgehalte auf. Dies stellt eine Umkehr zur dortigen Verteilung der K_2O -Gehalte dar (Abbildung 37 A, S. 95).

Dieses Phänomen ist ebenso im nordwestlichen Teil des südwestlichen Bereiches (Abbildung 38 C, S. 97) zu beobachten. Dort erreicht der durchschnittliche Kieseritgehalt 11,6 % (n=977). Vor allem die nördlichen und zentralen Hartsalzvorkommen dieses Bereiches zeichnen sich durch erhöhte bis stark erhöhte Kieseritgehalte aus. Südlich davon, dominieren stark reduzierte Kieseritgehalte, die im weiteren Verlauf, unabhängig von der Fazies, überwiegend reduzierte bis durchschnittliche Kieseritgehalte aufweisen. Korrelationen mit Tiefen- (ANLAGE 25) oder Mächtigkeitsverteilungen (ANLAGE 27) des Kaliflöz Thüringen sind ebenso wie Abhängigkeiten zu Verläufen tektonischer Elemente nicht vorhanden.

Im südöstlichen Bereich (Abbildung 38 B, S. 97) liegt der durchschnittliche Kieseritgehalt bei 12,1 %. Dort sind überwiegend durchschnittliche bis erhöhte Kieseritgehalte für Carnallitit abgebildet, wobei im Südosten des Bereiches gehäuft erhöhte Kieseritgehalte belegt sind. Innerhalb der sylvinitischen Fazies dominieren erhöhte bis durchschnittliche Kieseritgehalte. Die westlichen und südwestlichen Sylvinit- bzw. Hartsalzvorkommen, die reduzierte bis stark reduzierte K_2O -Gehalte aufweisen (Abbildung 37 B, S. 95), zeichnen sich hingegen durch überwiegend erhöhte bis stark erhöhte Kieseritgehalte aus. Diese Umkehr der Kieserit- bzw. K_2O -Verteilungen kann jedoch nicht in allen Bereichen ausgehalten werden. Die Wertstofferhöhungen und -reduktionen erscheinen lokal begrenzt, sodass keine direkte Korrelation mit der Tiefe (ANLAGE 25) bzw. Mächtigkeit (ANLAGE 27) des Kaliflöz Thüringen noch mit den tektonischen Strukturen erkennbar ist.

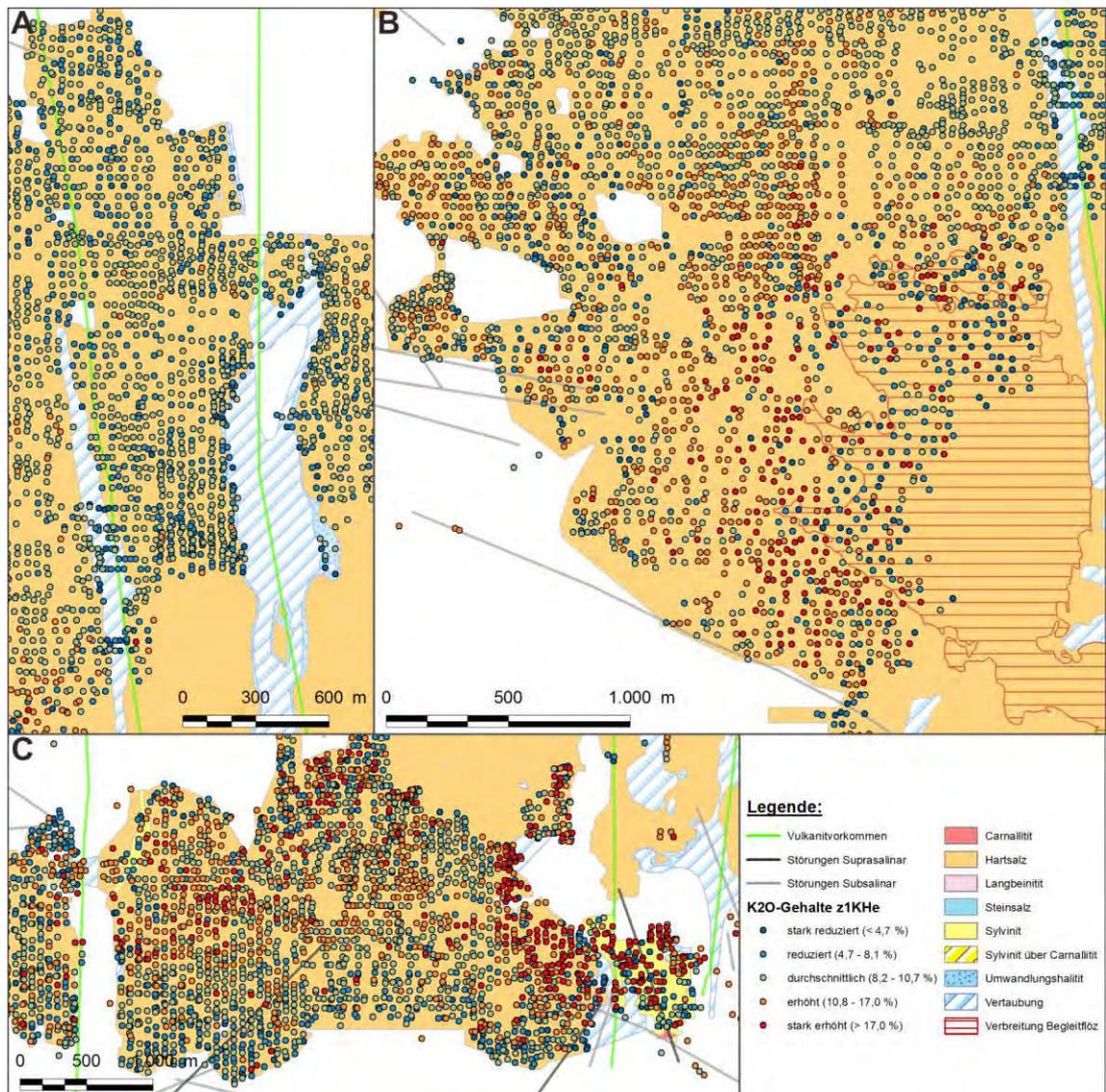


Abbildung 39 Darstellung der Verteilung der K₂O-Gehalte und Fazies innerhalb ausgewählter Bereiche des Kaliflöz Hessen (A – C)

Auch innerhalb des Kaliflöz Hessen, das sich vor allem durch die weite Verbreitung von Hartsalzfazies auszeichnet, sind Bereiche reduzierter und erhöhter Wertstoffgehalte aushaltbar (ANLAGE 30, ANLAGE 31). Der K₂O-Gehalt des nördlichen Bereiches (Abbildung 39 B) erreicht durchschnittlich 9,3 % (n=6.555), wobei sie von Nord nach Süd sukzessive von überwiegend durchschnittlich bis hin zu stark erhöht zunehmen. Dieser Trend ist unabhängig von der Verbreitung des carnallitischen Begleitflözes des Kaliflöz Hessen, das im südöstlichen Teil des Bereiches mit abgebaut wurde. Abhängigkeiten der Wertstoffverteilung von der Tiefe des Kaliflöz (ANLAGE 26) oder von bekannten tektonischen Strukturen sind nicht darstellbar, wie am Beispiel der Verteilung der K₂O-Gehalte entlang von Vulkanitvorkommen (Abbildung 39 A) veranschaulicht ist.

Der durchschnittliche K_2O -Gehalt im südlichen Bereich (Abbildung 39 C, S. 99) liegt mit 10,6 % ($n=4.787$) höher als im Nördlichen. Im gesamten, in Abbildung 39 C dargestellten, südöstlichen Teil ist das Begleitflöz des Kaliflöz Hessen aushaltbar. Es läuft nach Südwesten aus. Über die gesamte Fläche des südlichen Bereiches sind alle Gehaltskategorien vertreten, wobei Häufungen von erhöhten bis stark erhöhten K_2O -Gehalten im südöstlichen Teil des Bereiches nachweisbar sind. Im Umfeld der Kreuzung eines Vulkanitvorkommens mit Störungen im Sub- und Suprasalinar kommen überwiegend stark erhöhte K_2O -Gehalte vor, die sowohl in der Hartsalz- als auch in der Sylvinitfazies belegbar sind. Westlich davon treten, in der Verlängerung einer herzsyn streichenden Störung im Suprasalinar, vermehrt erhöhte bis durchschnittliche K_2O -Gehalte auf. Nordwestlich dieser Störung ist eine Zunahme von stark erhöhten K_2O -Gehalten zu verzeichnen, deren Verteilung ebenfalls herzsyn verläuft. Zusammenhänge zwischen Tiefe (ANLAGE 26) und Gehalt können nicht festgestellt werden.

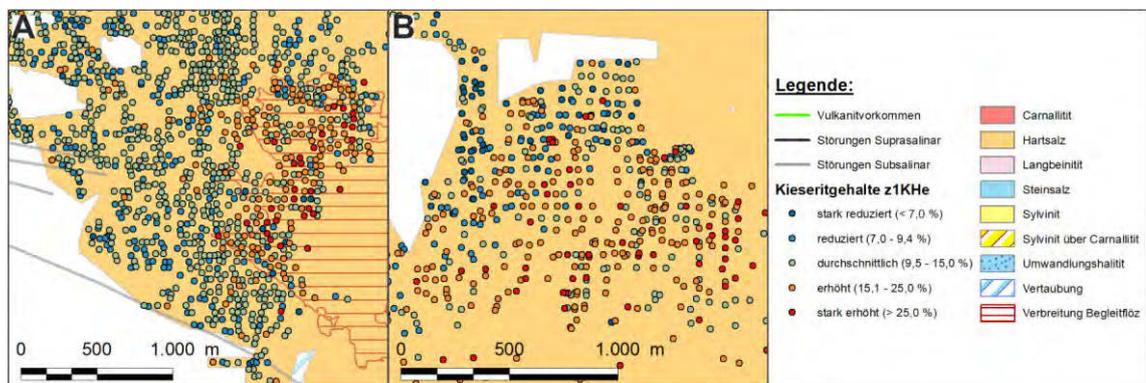


Abbildung 40 Darstellung der Verteilung der Kieseritgehalte und Fazies innerhalb ausgewählter Bereiche des Kaliflöz Hessen (A; B)

Der durchschnittliche Kieseritgehalt im nördlichen Bereich entspricht mit 11,5 % ($n=1.577$) dem mittleren Kieseritgehalt (Abbildung 15, S. 44) für das Kaliflöz Hessen, was sich auch im Vorhandensein von überwiegend durchschnittlichen Werten widerspiegelt (Abbildung 40 A). Innerhalb der Verbreitung des carnallitisch ausgebildeten Begleitflözes dominieren jedoch erhöhte bis stark erhöhte Kieseritgehalte. Tektonische Strukturen sind dort nicht bekannt. Im südlichen Bereich des Kaliflöz Hessen ist der durchschnittliche Kieseritgehalt bei 13,8 % ($n=1.957$), wobei die Gehalte im südöstlichen Teil (Abbildung 40 B) höher sind als im Südwestlichen. Es gibt dort keine Korrelation mit bekannten tektonischen Strukturen oder der Tiefe des Kaliflöz Hessen (ANLAGE 26).

5.3.6 Ergebnisse zu Gasereignissen und Vulkanitvorkommen

Nachfolgend wird erstmalig die räumliche Verteilung von Gasereignissen innerhalb des Arbeitsgebietes statistisch ausgewertet und die daraus resultierende Häufigkeit in Bezug zur jeweiligen Fazies untersucht (Kap. 5.3.6.1). Neben der Verteilung der Häufigkeit von Gasereignissen werden erstmals Größen von Gas-Salz-Ausbrüchen in einen räumlichen Bezug gesetzt und hinsichtlich struktureller Merkmale analysiert (Kap. 5.3.6.2). Darüber hinaus werden geochemische und mineralogische Eigenschaften von Vulkanitvorkommen zum ersten Mal in Relation zu Gasereignissen untersucht (Kap. 5.3.6.3).

5.3.6.1 Häufigkeit der Gasereignisse

Die Häufigkeit von Gasereignissen ist für das Kaliflöz Thüringen in ANLAGE 32 und für das Kaliflöz Hessen in ANLAGE 34 in Bezug zur Fazies sowie Strukturelementen abgebildet. Dabei ist die Darstellung der Gasereignisse für die Gruben Hattorf und Untereibzsch farblich differenziert, da sich die Dokumentation in den jeweiligen Gruben unterscheidet (Kap. 4.1.4.4).

Die Gasereignisse innerhalb des Kaliflöz Thüringen (ANLAGE 32) zeigen einen räumlichen Bezug zu Vulkanitvorkommen und treten in allen Fazies auf, wie auch anhand von Abbildung 41 (S. 102) ersichtlich ist. Gasereignisse, die keiner Fazies zugewiesen werden können, finden in Abbildung 41 keine Berücksichtigung, sodass für das Kaliflöz Hessen 7.485 und für das Kaliflöz Thüringen 6.598 Gasereignisse zur statistischen Auswertung dienen.

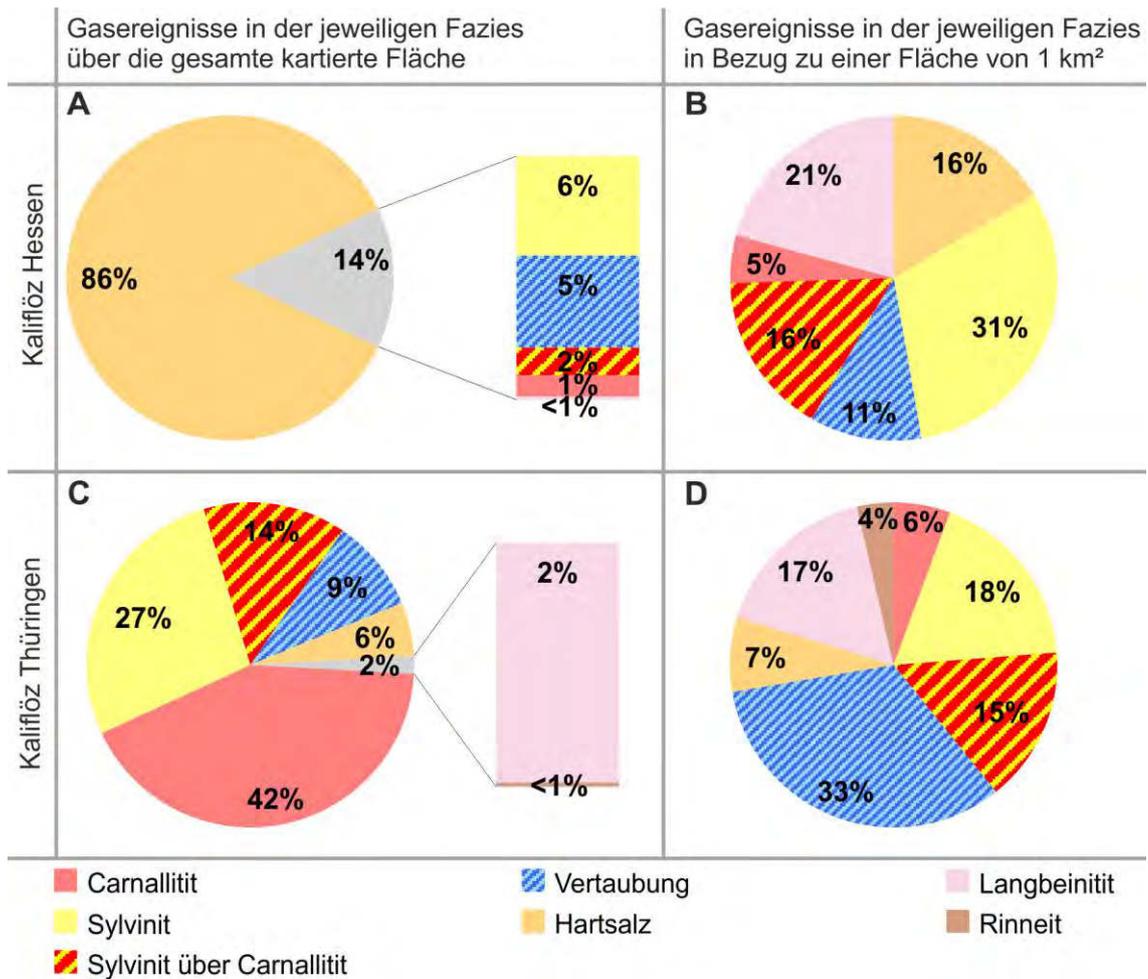


Abbildung 41 Relativer Anteil der Gasereignisse in Bezug zur Fazies über die gesamte kartierte Fläche des jeweiligen Kaliflöz (A; C) sowie in Bezug zu einer Fläche von 1 km² (B; D)

27 % der Gasereignisse für das Kaliflöz Thüringen (Abbildung 41 C) sind im Sylvinit dokumentiert, jedoch nicht darauf begrenzt. Die Mehrzahl der Gasereignisse tritt, entsprechend der großen flächenhaften Verteilung (Abbildung 33, S. 90), im Carnallit auf. In Bezug zur gesamten kartieren Fläche wurden Gasereignisse mit abnehmender Häufigkeit in den Fazies Sylvinit über Carnallit, Vertaubungen²¹, Hartsalz, Langbeinitit und Rinneit verzeichnet. Zur besseren Vergleichbarkeit wird die Anzahl der Gasereignisse in der jeweiligen Fazies in Bezug zu einer einheitlich großen Fläche von 1 km² gesetzt (Abbildung 41 D). Im Ergebnis dessen wird ersichtlich, dass die Anzahl der Gasereignisse im Kaliflöz Thüringen in Vertaubungsbereichen am höchsten ist. In abnehmender Häufigkeit folgen Sylvinit, Langbeinitit bzw. Sylvinit über Carnallit. Im Gegensatz zum Anteil der Gasereignisse in Carnallit über die gesamte kartierte Fläche

²¹ Zur statistischen Auswertung werden die in der Grube Hattorf als Umwandlungshalit (vgl. ANLAGE 23, ANLAGE 24) ausgehaltenen Flächen zu Vertaubungen gerechnet. Auffahrungen im Steinsalz beziehen sich auf das im Liegenden oder Hangenden der Kaliflöze anstehende Untere, Mittlere oder Obere Werra-Steinsalz und blieben in Bezug zu Gasereignissen unberücksichtigt.

sind Gasereignisse im Carnallit in Bezug zu einer einheitlichen Fläche von geringerer Bedeutung (Abbildung 41 C-D, S. 102).

Gemäß der faziellen Ausbildung des Kaliflöz Hessen (Abbildung 35, S. 93) dominieren Gasereignisse im Hartsalz (Abbildung 41 A, S. 102) in Bezug zur gesamten kartierten Fläche. Mit abnehmender Häufigkeit wurden Gasereignisse in Sylvinit, Vertaubungen, Sylvinit über Carnallit und Carnallit dokumentiert. Die geringste Anzahl an Gasereignissen in Bezug zur gesamten kartierten Fläche ist innerhalb langbeinitischer Fazies belegt. In Bezug zu einer einheitlichen Fläche von 1 km² kommen jedoch die meisten Gasereignisse in Sylvinit vor (Abbildung 41 B, S. 102). Das trifft vor allem auf sylvinitische Fazies im nordöstlichen Teil des Arbeitsgebietes zu (ANLAGE 34). Gasereignisse in der Hartsalzfazies bzw. in der Fazies Sylvinit über Carnallit treten mit je 16 % gleich häufig auf. Mit 0,10 km² (Abbildung 35, S. 93) umfasst Langbeinitit den geringsten Flächenanteil und ist im Westen des Arbeitsgebietes nahe eines Vulkanitvorkommens aufgeschlossen (ANLAGE 34). In Bezug zu einer einheitlichen Fläche ist daher die relative Häufigkeit von Gasereignissen mit 21 % angegeben.

Die Anzahl der Gasereignisse für das Kaliflöz Hessen ist in der Grube Hattorf im zentralen und nördlichen Teil höher als im Süden. Ebenso wie für das Kaliflöz Thüringen ist eine Häufung der Gasereignisse in der Nähe von Vulkanitvorkommen belegbar. Die Verteilung der Gasereignisse ist jedoch in beiden Kaliflözen entlang von Vulkanitvorkommen nicht gleich. Auch unterscheidet sich die Anzahl der Gasereignisse die an einzelne Vulkanite gebunden sind. Große Häufigkeiten von Gasereignissen an einer bestimmten Lokation für das Kaliflöz Thüringen (ANLAGE 32) gehen nicht zwingend mit gehäuften Auftreten von Gasereignissen im Hangenden für das Kaliflöz Hessen (ANLAGE 34) einher (z. B. L21 ANLAGE 39). Weiterhin ist nicht in jedem Fall ein Vulkanitvorkommen in der Nähe von Gasvorkommen belegt (z. B. L11 ANLAGE 39).

5.3.6.2 Größe der Gas-Salz-Ausbrüche

Innerhalb des Arbeitsgebietes konnten die Größen von 1.808 Gas-Salz-Ausbrüchen (Tabelle 18, S. 104, Tabelle 19, S. 104) bestimmt und den in Kap. 4.1.4.4 beschriebenen Kategorien (Tabelle 6, S. 40) zugeordnet werden. Die räumliche Verteilung dieser Gas-Salz-Ausbrüche ist für das Kaliflöz Thüringen (ANLAGE 33) und das Kaliflöz Hessen (ANLAGE 35) dargestellt. ANLAGE 36 gibt einen Überblick über die statistische Verteilung der Kategorien von Gas-Salz-Ausbrüchen in Bezug zu ihrer Häufigkeit bzw. der Größe. Im Ergebnis dessen ist festzuhalten, dass

- Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 2 sowohl für das Kaliflöz Thüringen als auch für das Kaliflöz Hessen in beiden Gruben dominieren.
- Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 3 im gesamten Arbeitsgebiet die in Summe größten Tonnagen an ausgeworfenem Salzhauwerk verursachen.

- Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 3 für beide Kaliflöze in der Grube Unterbreizbach häufiger sind als in der Grube Hattorf. In der Grube Hattorf hingegen sind Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 1 häufiger als jene der Kategorie 3.
- Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 4 für das Flöz Hessen in der Grube Unterbreizbach nicht aushaltbar sind, während sie in der Grube Hattorf die größten Tonnagen an ausgeworfenem Salzhautwerk verursachen.
- im Bereich der Grube Hattorf für das Kaliflöz Hessen neun Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 4 für die größte Tonnage für das Kaliflöz im gesamten Arbeitsgebiet verantwortlich sind.

Tabelle 18 Anzahl und Größe der Gas-Salz-Ausbrüche für das Kaliflöz Hessen

Grube	Kategorie	Anzahl	Summe des abgeführten Hautwerkes [t] nach Gas-Salz- Ausbrüchen
Unterbreizbach	1	14	580
	2	35	9.350
	3	16	41.300
	4	0	0
Hattorf	1	12	565
	2	24	8.250
	3	10	37.000
	4	9	210.000

Tabelle 19 Anzahl und Größe der Gas-Salz-Ausbrüche für das Kaliflöz Thüringen

Grube	Kategorie	Anzahl	Summe des abgeführten Haut- werkes [t] nach Gas-Salz- Ausbrüchen
Unterbreizbach	1	98	5.050
	2	912	27.1450
	3	459	1.331.700
	4	31	715.700
Hattorf	1	49	1.885
	2	91	23.900
	3	43	142.300
	4	5	75.000

5.3.6.3 Beziehungen der Häufigkeit von Gasereignissen, der Größe von Gas-Salz-Ausbrüchen, der Fazies und der Eigenschaften der Vulkanite

Der Einfluss von Vulkaniten auf die Kaliflöze Thüringen und Hessen ist bereits bekannt (Kap. 3.2.3.2). Inwiefern quantifizierbare Eigenschaften von Vulkaniten mit Eigenschaften der Lagerstätte in Beziehung gesetzt werden können, wird nachfolgend erstmals anhand ausgewählter Vulkanitproben dargestellt (ANLAGE 37, ANLAGE 38). Dies erfolgt auf Grundlage

- von Haupt- und Spurenelementanalysen von 21 Vulkanitproben mittels ICP-MS²² (REINHARDT, 2014, [157]),
- der Altersbestimmung von sechs Vulkaniten mittels $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Datierung (REINHARDT, 2015, [158])

und

- der modalen mineralogischen Zusammensetzung von 13 Vulkanitproben mittels MLA²³-Untersuchungen (SCHMAUCKS, 2015, [170]).

Auf Basis dieser Analysen wurde anhand des TAS²⁴-Diagramms (LE BAS et al., 1986, [130]) eine Einordnung der Vulkanite vorgenommen. Nachfolgend wird je eine in Bezug zu Gasereignissen auffällige Lokation für das Kaliflöz Thüringen a) und das Kaliflöz Hessen b) näher beschrieben. Dabei werden Auffälligkeiten bezüglich der Gasereignisse, in Beziehung zu

- Strukturelementen
- der Anzahl an Gasereignissen
- der Größe von Gas-Salz-Ausbrüchen
- der anstehenden Fazies

sowie

- den an ggf. vorhandenen Vulkanitproben bestimmten geochemischen und mineralogischen Eigenschaften bzw. des $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alters

gesetzt. In ANLAGE 39 sind neben den beiden ausführlich beschriebenen Lokationen weitere ausgewählte Lokationen für die Kaliflöze Thüringen und Hessen unter Berücksichtigung der genannten Eigenschaften dargestellt. Die ausgewählten Lokationen (ANLAGE 39) sind in ANLAGE 32, ANLAGE 33, ANLAGE 34 und ANLAGE 35 mit L1 bis L22 gekennzeichnet.

- a) Eine starke Häufung von Gasereignissen für das Kaliflöz Thüringen (L1 ANLAGE 39) befindet sich im Norden des Arbeitsgebietes (ANLAGE 32, Abbildung 42, S. 106). Dort sind östlich eines Vulkanitvorkommens zwischen 55 und

²² Inductively coupled plasma mass spectrometry

²³ Mineral Liberation Analysis

²⁴ Total Alkalis versus Silica

136 Gasereignisse pro Rasterfläche (100 m x 100 m, vgl. Kap. 4.1.4.4) dokumentiert.

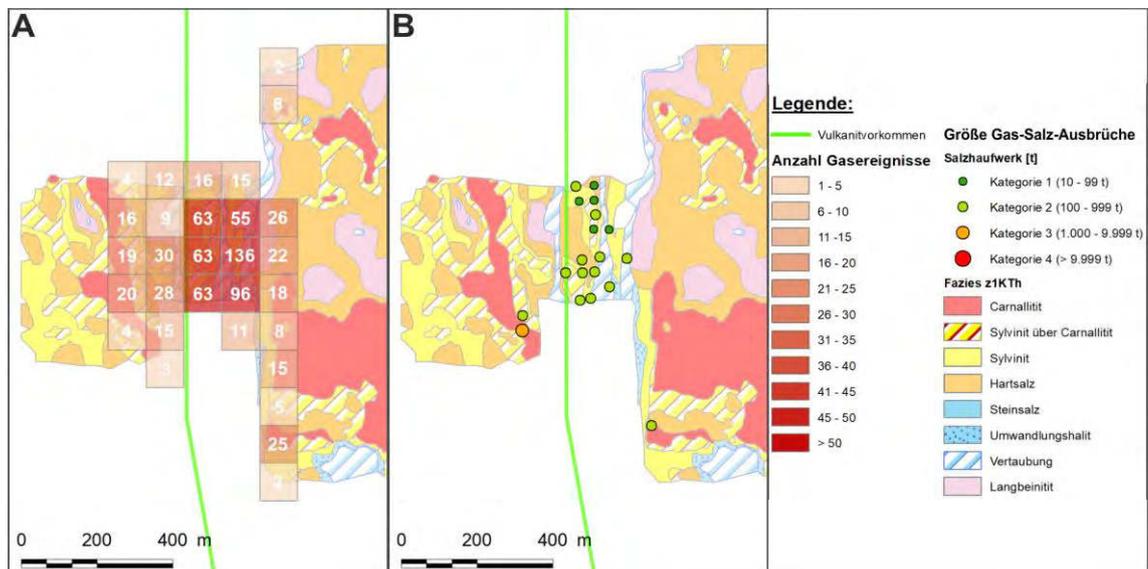


Abbildung 42 Anzahl (A) der Gasereignisse und Größe (B) der Gas-Salz-Ausbrüche für das Kaliflöz Thüringen im Norden des Arbeitsgebietes

Im Umfeld dieses Vulkanitvorkommens sind, unabhängig von der anstehenden Fazies, 809 Gasereignisse verzeichnet. Davon können 31 Gasereignisse als Gas-Salz-Ausbrüche mit Tonnagen von 20 t bis 1.000 t ausgewiesen werden (ANLAGE 33, Abbildung 42 B). Neben je einem weiteren Vulkanitvorkommen im Westen bzw. Osten des besagten Vorkommens sind keine weiteren Strukturelemente bekannt (Kap. 5.3.1).

Das Vulkanitvorkommen wurde übertägig ca. 1,4 km nördlich der Anhäufung der Gasereignisse beprobt (ANLAGE 37) und analysiert (ANLAGE 38). Es handelt sich hierbei um den einzigen Basalt im Arbeitsgebiet (nach LE BAS et al., 1986, [130]). Die geochemische Analyse der übertägig genommenen Probe 130905_B ergab im Vergleich zu den anderen Vulkaniten mit 46,12 % den höchsten Gewichtsanteil an Siliziumdioxid (SiO₂). Auch die Gehalte an Barium und Strontium sind mit 1.068 ppm bzw. 975 ppm vergleichsweise hoch. Mit ca. 46,0 % Kaersutit²⁵ ist in der Probe 130905_B der höchste Anteil an diesem Mineral vorhanden. Ebenso liegt der Anteil an Glas mit ca. 8,0 % um ein Vielfaches über dem für das Arbeitsgebiet durchschnittlichen Wert von ca. 0,9 %.

- b) Im südlichen Bereich der Grube Unterbreizbach (L21 ANLAGE 39) befindet sich im Kaliflöz Hessen eine Häufung von Gasereignissen entlang eines Vulkanitvorkommens (ANLAGE 34, Abbildung 43 A, S. 107). Es wurden 78 Gasereignisse dokumentiert von denen vier Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 2 und

²⁵ Kaersutit besitzt die chemische Formel $\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe}^{2+})_4\text{Ti}(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ und gehört zu den Ca-Amphibolen.

ein Gas-Salz-Ausbruch mit einer Tonnage von 5.500 t der Kategorie 3 zugeordnet werden können (ANLAGE 35, Abbildung 43 B).

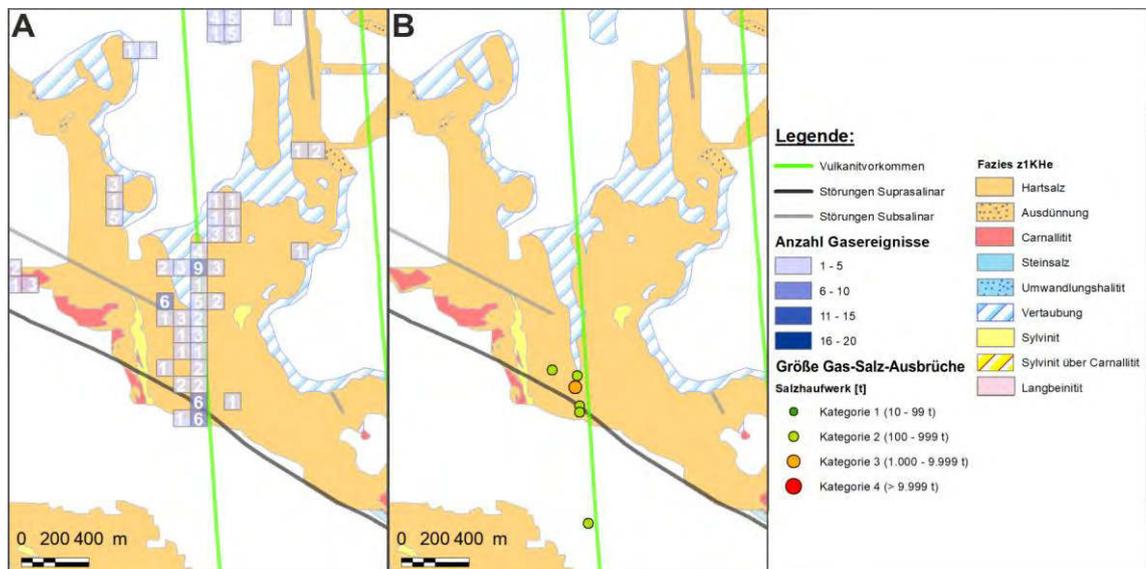


Abbildung 43 Anzahl (A) der Gasereignisse und Größe (B) der Gas-Salz-Ausbrüche für das Kaliflöz Hessen im südlichen Bereich der Grube Unterbreizbach

Diese Gas-Salz-Ausbrüche akkumulieren sich in einem Kreuzungsbereich des Vulkanitvorkommens mit einer herzyn streichenden Störung im Suprasalinar. Auch im Subsalinar wurde nordöstlich in ca. 420 m Entfernung eine parallel dazu streichende Störung modelliert. Die Gasereignisse sind im Bereich von Hartsalz bzw. Vertaubung dokumentiert. Dort wurde untertägig ein Vulkanit beprobt, der als Basanit einzuordnen ist (nach LE BAS et al., 1986, [130]). Anhand der Probe 130905_A5 konnte das $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter von $21,0 \pm 0,5$ Mio. Jahre ermittelt werden. Der Basanit zeichnet sich durch vergleichsweise erhöhte Gehalte an SiO_2 mit ca. 41,6 % und Magnesiumoxid (MgO) mit ca. 11,1 % aus. Auch die Elemente Chrom (Cr), Nickel (Ni) und Strontium (Sr) sind mit 383 ppm, 207 ppm und 790 ppm im Vergleich zu den weiteren Vulkaniten im Arbeitsgebiet mit einem höheren Gehalt versehen. Gehalte für Lanthanoide bewegen sich in einem mittleren Niveau. Im Hinblick auf die mineralogische Zusammensetzung sind die hohen Gehalte an Nephelin²⁶, der mit 17,7 % den Maximalwert aller MLA-Analysen darstellt, und mit 3,99 % der überdurchschnittlich hohe Anteil an Quarz auffällig. Letzterer ist in Verbindung zu vielfach im Vulkanitdyke angetroffenen Sandsteinschollen zu sehen (Abbildung 44, S. 108).

²⁶ Nephelin besitzt die chemische Formel $(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ und gehört zu den Vertretern der Feldspäte.

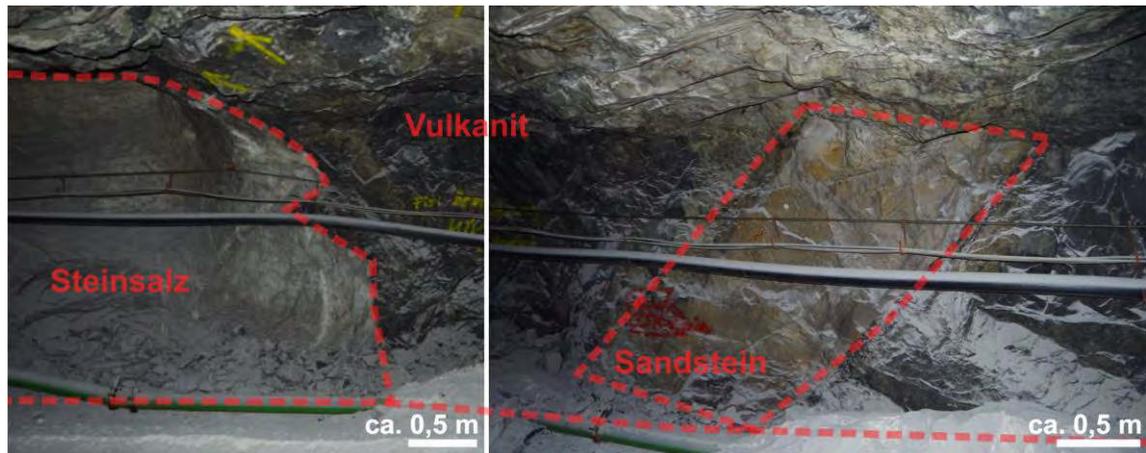


Abbildung 44 Vulkanit mit Sandsteinschollen im südlichen Bereich der Grube Unterbreizbach. Blickrichtung nach Osten.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Beziehungen der Häufigkeit von Gasereignissen, der Größe von Gas-Salz-Ausbrüchen, der Fazies und der Eigenschaften der Vulkanite zusammenfassend aufgelistet.

- Gasereignisse sind gehäuft entlang von Vulkanitvorkommen bzw. in der Verlängerung des Streichens von Vulkaniten zu verzeichnen. Dabei ist die Verteilung der Gasereignisse entlang der Vulkanitvorkommen jedoch nicht gleichmäßig (ANLAGE 32, ANLAGE 34).
- Eine starke Häufung von Gasereignissen korreliert in einigen Fällen (ANLAGE 32, ANLAGE 34, [L2, L3, L4, L 7 etc.] ANLAGE 39) mit Kreuzungsbereichen von Vulkanitvorkommen und Störungen im Sub- sowie Suprasalinar.
- In einigen Fällen treten Gasereignisse in größerer Distanz zu Vulkanitvorkommen auf (ANLAGE 32, ANLAGE 34, [z. B. L2, L5, L6, L11] ANLAGE 39).
- Im Kaliflöz Thüringen treten Gasereignisse insgesamt am häufigsten im Carnalinit, in Bezug zu gleichen Flächenanteilen der Fazies am häufigsten im Bereich von Vertaubungen auf. Gasereignisse im Kaliflöz Hessen sind in Bezug zur gesamten kartierten Fläche am häufigsten im Hartsalz dokumentiert. In Bezug zu einer Fläche von 1 km² treten sie am meisten im Sylvinit auf.
- Für das Kaliflöz Thüringen ist innerhalb eines besonders Hartsalz-führenden Bereiches (Abbildung 34 G, S. 92) mit 20 Gasereignissen (ANLAGE 32) eine sehr geringe Anzahl dokumentiert. Auch für das Kaliflöz Hessen (ANLAGE 35) sind in diesem Bereich wenige Gasereignisse verzeichnet.
- Gasereignisse der Kategorien 3 und 4 sind im direkten nördlichen Umfeld der Treischfeld-Schwelle häufiger als im nördlichen Bereich des Arbeitsgebietes (ANLAGE 33, ANLAGE 35).
- Gasereignisse der Kategorie 4 lassen sich nicht auf eine bestimmte Fazies begrenzen. Weiterhin sind sie sowohl direkt an einem jeweiligen Vulkanitvor-

kommen als auch in einigen hundert Metern Entfernung zum nächsten Vulkanitvorkommen dokumentiert (ANLAGE 33, ANLAGE 35).

- Eine Beziehung zwischen der Häufigkeit von Gasereignissen und der Größe von Gas-Salz-Ausbrüchen sind nicht feststellbar. So sind beispielsweise große Gas-Salz-Ausbrüche dort dokumentiert, wo sowohl eine geringe Häufigkeit von Gasereignissen (z. B. L8 ANLAGE 39) als auch eine Vielzahl von Gasereignissen verzeichnet ist (z. B. L4, L7 ANLAGE 39).
- Eine Korrelation der Anzahl von Gasereignissen (ANLAGE 32, ANLAGE 34) bzw. der Größe von Gas-Salz-Ausbrüchen (ANLAGE 33, ANLAGE 35) mit den Verteilungen der Wertstoffgehalten der Kaliflöze (ANLAGE 28 - ANLAGE 31) wurde ebenfalls untersucht und konnte nicht bestätigt werden.
- Eindeutige Beziehungen von Tiefe und Mächtigkeit der Kaliflöze Thüringen (ANLAGE 10, ANLAGE 17) und Hessen (ANLAGE 9, ANLAGE 16) zur Häufigkeit der Gasereignisse oder Größe der Gas-Salz-Ausbrüche lassen sich nicht belegen.
- Jeweilige Besonderheiten der geochemischen und mineralogischen Analyse von Vulkanitvorkommen in Bezug zu Gasereignissen und Gas-Salz-Ausbrüchen wurden genannt (ANLAGE 39). Wiederkehrende Muster in Bezug zu geochemischen und mineralogischen Analyseergebnissen sowie der Altersdatierungen von Vulkanitvorkommen und Gasereignissen bzw. Gas-Salz-Ausbrüchen sind nicht erkennbar. Es existiert weiterhin keine Tendenz der Zu- oder Abnahme von Gehalten und Anteilen mit der Tiefe bzw. Himmelsrichtung.

6 Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Kap. 5 diskutiert, wobei zum einen die Subsidenz des gesamten Arbeitsgebietes im Allgemeinen (Kap. 6.1) dargestellt und zum anderen auf die jeweilige Entwicklung einzelner Bereiche innerhalb des Arbeitsgebietes eingegangen wird (Kap. 6.2). Weiterhin sind besondere Aspekte in Bezug zur Wertstoffverteilung im Niveau der Kaliflöze beschrieben (Kap. 6.3). Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können mit Hilfe von Analogieschlüssen Aussagen zu zukünftigen Abbaubereichen getroffen werden (Kap. 6.6).

6.1 Ableitung zur Senkungsentwicklung des Arbeitsgebietes

Anhand der aus dem 3D-Strukturmodell errechneten mittleren Mächtigkeiten ausgewählter stratigraphischer Abschnitte (Kap. 5.3.2) innerhalb des Arbeitsgebietes sind indirekt Ableitungen zur Senkung des Arbeitsgebietes vom Beginn des Zechstein bis zum Ende des Muschelkalk möglich (Abbildung 45, S. 111). Die Mächtigkeit der Sedimente des Oberrotliegend entspricht der Normalmächtigkeit im gesamten Werra-Kaligebiet (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2011, [88]). Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit bestätigen und präzisieren die bereits in der Literatur dargestellte, generelle Senkung des Werra-Kaligebietes von Beginn des Zechstein bis hin zur Ablagerung der Sedimente des Muschelkalk (Kap 3.2.1). Dabei stellt die Ablagerung der Sedimente und Salze der Werra-Formation eine Phase hoher Senkungsraten dar, was mit der marinen Transgression nach Süden korreliert (WALTER, 2007, [200], ZIEGLER, 1990, [213]). Im weiteren Verlauf des Zechstein bestätigen sich geringere Senkungsraten, die in der sukzessiven Regression des Zechsteinmeeres begründet sind (Kap. 3.2.1). Diese ist auch anhand fazieller und lithologischer Aspekte nachvollziehbar, denn lateral weit verbreitete, mächtige Steinsalzpakete innerhalb des Arbeitsgebietes sind lediglich in der Werra-Formation entwickelt. Die mit einer NE-SW gerichteten Extension einhergehende Senkung zum Ende des Zechstein (Kap. 3.2.2, PUFF & LANGBEIN, 2003, [154]) dauerte während des Buntsandstein an, wobei die Senkungsraten insgesamt höher waren als zum Ende des Zechstein (Abbildung 45, S. 111). Während des Muschelkalk setzte sich die Senkung innerhalb des Arbeitsgebietes fort, wobei es zu einer erneuten Transgression des Meeres kam, sodass vom Muschelkalk bis Jura eine Verbindung des Norddeutschen Beckens mit der Tethys bestand. Das Depotzentrum der Sedimentation war dabei südlich des Arbeitsgebietes (LANGBEIN & SEIDEL, 2003, [127]), was sich auch in der geringeren Senkungsraten während des Muschelkalk wiederfindet. Mit Ausnahme der quartären und tertiären Überdeckung bzw. der Vulkanitvorkommen, sind jüngere Gesteine als die des Muschelkalk nicht erhalten (u. a. BÜCKING, 1921, [18], LAEMMLEN, 1963, [121], LAEMMLEN, 1965, [122], LAEMMLEN & KOENEN, 1975, [126], LÜTZNER et al., 1997, [133], LÜTZNER et al., 2000, [135], MOTZKA & LAEMMLEN, 1966, [144]). Dies liegt in der nachfolgenden Hebung des Arbeitsgebietes begründet (Kap. 3.2.1) und der und damit verbundenen Erosion.

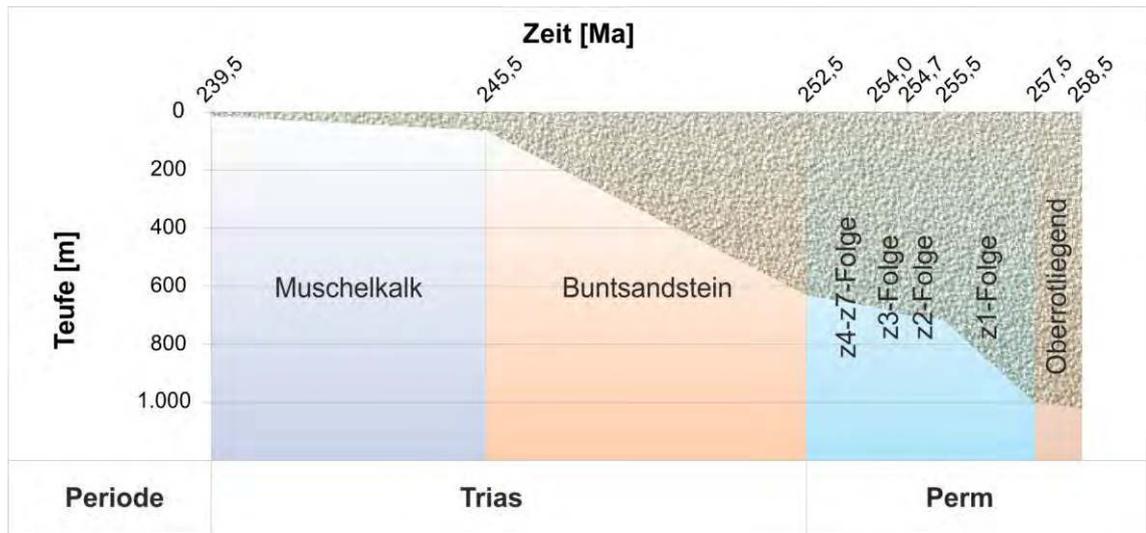


Abbildung 45 Darstellung der Akkumulation von Sedimenten innerhalb des Arbeitsgebietes in Bezug zu der Zeit (Zeitangaben nach DSK, 2017, [37])

Die geologische Entwicklung des Arbeitsgebietes seit dem Oberen Perm lässt sich anhand der gewonnenen Erkenntnisse (Kap. 5.3) differenzierter und detaillierter als bisher (Kap. 3) darstellen. Das hierzu eigens erarbeitete 3D-Strukturmodell liefert dabei entscheidende Angaben zur Tiefe (Kap. 5.3.1) und zur Mächtigkeit (Kap. 5.3.2) einzelner stratigraphischer Horizonte sowie zu Störungen, die in den verschiedenen Phasen der Beckenentwicklung aktiviert bzw. reaktiviert wurden.

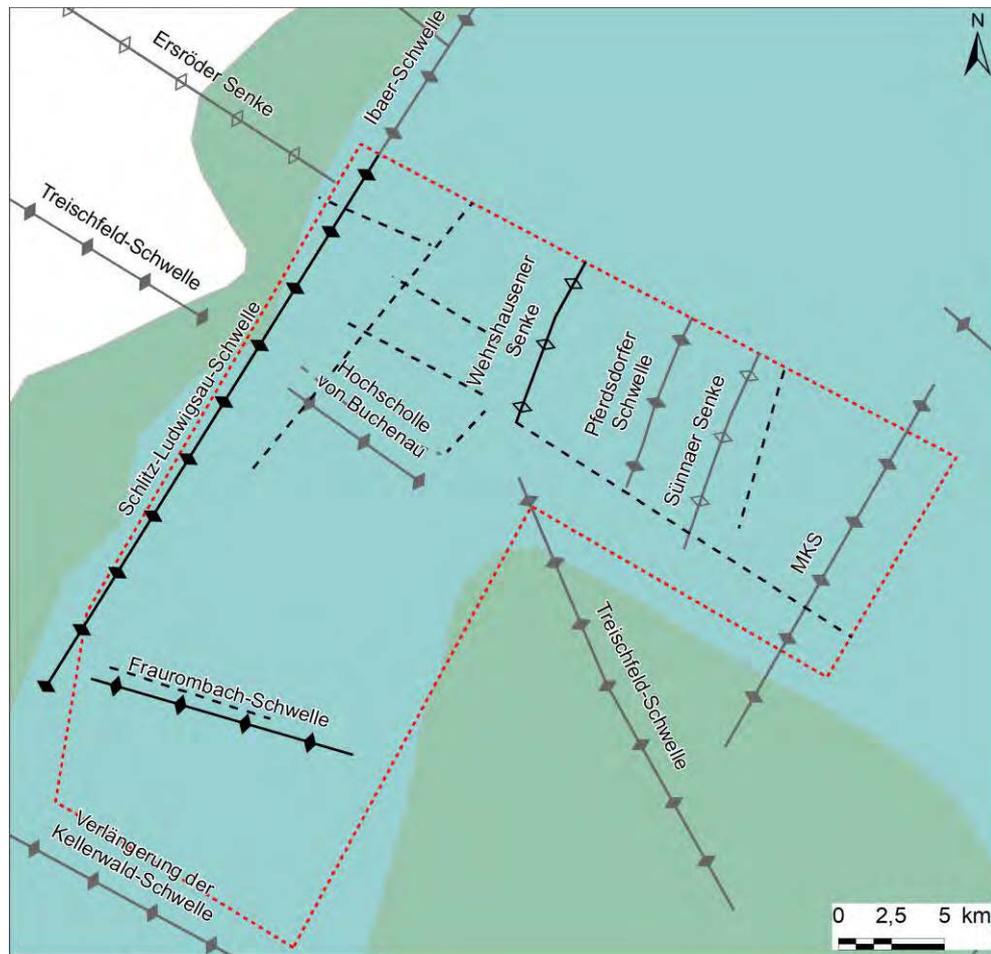
Es werden unter anderem Bereiche hoher Mächtigkeiten für einzelne das Obere Werra-Steinsalz überlagernde stratigraphische Abschnitte dargestellt, was Rückschlüsse auf relative Hebungen und Senkungen einzelner Bereiche zu den jeweiligen Zeiten der Sedimentation zulässt. Weiterhin ist die Lagerstätte durch halokinetische und halotektonische Prozesse überprägt.

6.2 Differenzierte geologische Entwicklung des Arbeitsgebietes unter Berücksichtigung einzelner Strukturelemente

6.2.1 Beginn des Zechstein

Zu Beginn des Zechstein erfolgte eine Transgression des Zechsteinmeeres nach Süden (ZIEGLER, 1990, [213]), was sich auch unter Berücksichtigung der Untersuchungsergebnisse (Kap. 5.1) bestätigt. Dabei kam es im nördlichen Teil des Arbeitsgebietes, dem Werra-Becken, und im südlichen Teil des Arbeitsgebietes, dem Haune-Becken, zur Ab-

lagerung von Anhydrit (KULICK et al., 1984, [118]). Es bestätigt sich auch der generelle SW-NE Verlauf des gesamten Werra-Fulda-Beckens (JAHNE, 1990, [80], KNIPPING, 1989, [110]), das zu Beginn des Zechstein bereits durch Senken und Schwellen konturiert war (Abbildung 46). Die aus der Literatur bekannten Strukturelemente (Kap. 3.2) sind in Abbildung 46 in Grau ausgewiesen; anhand des 3D-Strukturmodells neu beschriebene in Schwarz dargestellt. Zu den im näheren Umfeld des Arbeitsgebietes bekannten Strukturelementen zählen die herzyn verlaufende Ersröder Senke, die Verlängerung der Kellerwald-Schwelle und die Hochscholle von Buchenau. Nördlich der Hochscholle von Buchenau schließt sich die Eitratalsörung an, die bereits im Präzechstein angelegt worden war (KÄDING, 1962, [104]).



Legende:

 Arbeitsgebiet	Anlage Störung	Antiklinale	Synklinale
 Unterer Werra-Steinsalz	- - - neu	◆ neu	◇ neu
 Unterer Werra-Anhydrit	- - - bestätigt	◆ bestätigt	◇ bestätigt

Abbildung 46 Schematische Darstellung der paläogeographischen Situation im Arbeitsgebiet zu Beginn des Zechstein

Weiterhin ist die Treischfeld-Schwelle in zweigeteilter Form dargestellt (KULICK et al., 1984, [118]), wobei die herzyn bis steil-herzyn verlaufenden Hochlage westlich und östlich der Hochscholle von Buchenau verläuft. Die Treischfeld-Schwelle wird als „paläozoische Hochscholle“ (JAHNE, 1990, [80]) beschrieben und gilt als salzfrei (JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85], KÄDING, 1962, [104]). Die Entwicklung dieser Schwelle deutet auf eine synsedimentäre Tektonik hin, wie aufgrund von Mächtigkeits- und Faziesverteilungen der Kaliflöze Thüringen und Hessen bereits in der Vergangenheit vermutet wurde (JAHNE & ZEIBIG, 2002, [85]). Dies lässt sich anhand der Auswertungen des 3D-Strukturmodells ebenfalls nachvollziehen, wie in Kapitel 6.2.2 erläutert wird.

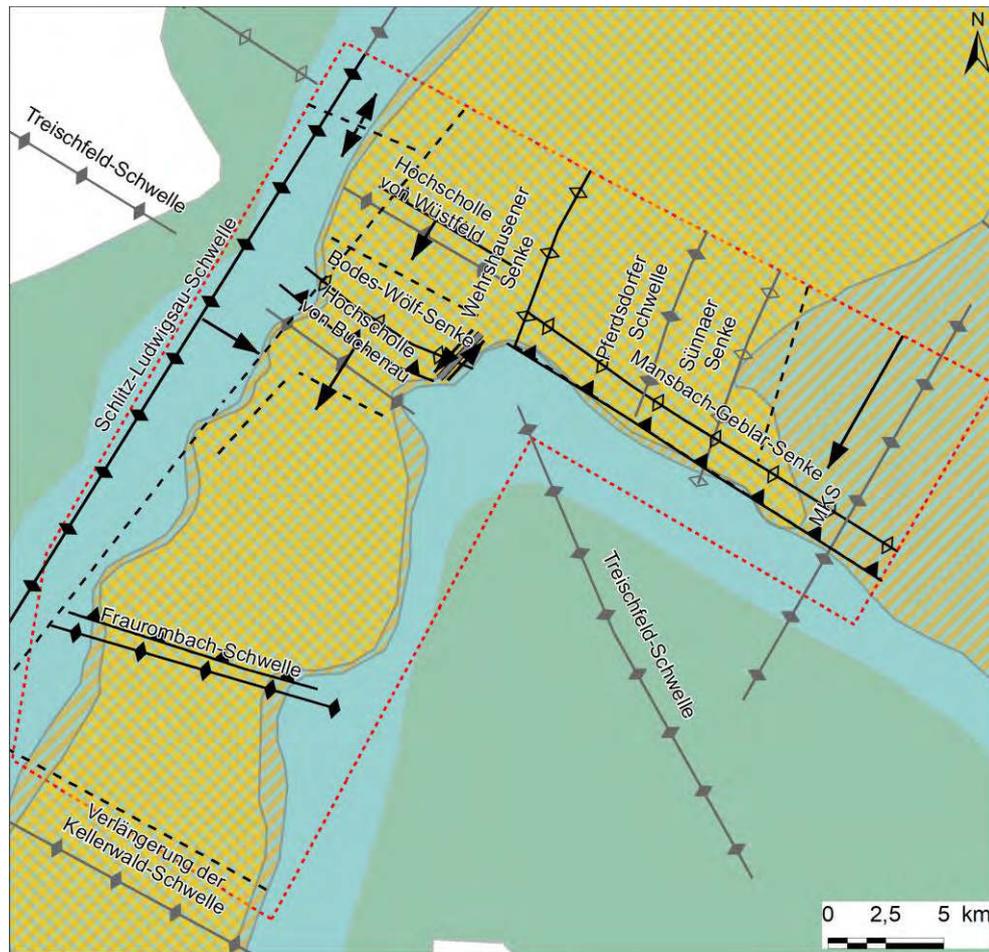
Nördlich der Hochscholle von Buchenau deutet sich die Anlage der Hochscholle von Wüstfeld mit den im Zuge der vorherrschenden, NE-SW-gerichteten Extension herzyn verlaufenden Störungen bereits zu Beginn des Zechstein an. Analog dazu wird die Anlage der ebenfalls herzyn verlaufenden Störung im Nordosten der Treischfeld-Schwelle zeitlich dem Beginn des Zechstein zugeordnet. Unter Berücksichtigung des vorherrschenden Strukturbaus wurde die im Isobathenplan des Unteren Werra-Anhydrit (ANLAGE 11) deutlich ausgebildete, als Frauombach-Schwelle bezeichnete, Sattelstruktur inklusive der ihr nördlich vorgelagerten Störung ebenfalls dem bestehenden variszischen Bauplan zugeordnet.

Daneben werden erzgebirgisch streichende Elemente, wie die Schlitz-Ludwigsau-Schwelle im Westen des Arbeitsgebietes, ausgewiesen. Diese schließt sich in der Verlängerung der im Norden beschriebenen Ibaer-Schwelle an (KULICK et al., 1984, [118]) und korreliert mit der Grenze des Sedimentationsraumes der salinaren Phase im Werra-Kaligebiet (Kap. 5.3.1, Kap. 5.3.2), was die Anlage der Schwelle bereits vor der Transgression des Zechsteinmeeres wahrscheinlich macht. Der Schlitz-Ludwigsau-Schwelle ist im Osten eine Schwächezone vorgelagert, die sich rezent in Form von komplexen Schollenbildungen im Subsalinar (ANLAGE 11) darstellt.

Neben den Strukturelementen der näheren Umgebung des Arbeitsgebietes, sind im Zentrum des Werra-Beckens zwei wesentliche NNE-SSW verlaufende Senken, die Wehrshausener-Senke und die Sünnaer-Senke, sowie die zwischen diesen Senken gelegene Pferdsdorfer Schwelle dargestellt (ANLAGE 11). Diese Sattel- und Muldenstrukturen korrelieren mit den im Suprasalinar beschriebenen Strukturen (LAEMMLEN & KOENEN, 1975, [126]), die sich auch im 3D-Strukturmodell wiederfinden (u. a. ANLAGE 5, ANLAGE 2). Dabei wirkt das Salinar entkoppelnd, weshalb nahe liegt, dass Anlage der Senken und der Schwelle ebenfalls dem zu Beginn des Zechstein bestehenden, variszischen Strukturplan zugeordnet werden müssen.

Ein weiteres bedeutsames Strukturelement ist die Mitteldeutsche Kristallinschwelle (MKS), die im Osten des Arbeitsgebietes eine präzechsteinzeitliche Hochlage bildet (Kap. 3.2.2). Westlich von dieser lässt sich im Übergang zum tieferen Teil des Werra-Beckens die Anlage einer Schwächezone ableiten, die im Verlauf der geologischen Entwicklung mehrfach reaktiviert wurde (Kap. 6.2.2, Kap. 6.2.5).

6.2.2 Verlauf Zechstein



Legende:

Arbeitsgebiet	Anlage Störung	Bewegung Synklinale
Unteres Werra-Steinsalz -- neu	-- bestätigt	Richtung neu
Unterer Werra-Anhydrit	Abschiebung	Antiklinale bestätigt
Kaliflöz Thüringen	Blattverschiebung	neu
Kaliflöz Hessen		bestätigt

Abbildung 47 Schematische Darstellung der paläogeographischen Situation im Arbeitsgebiet während der Ablagerung der Werra-Salze

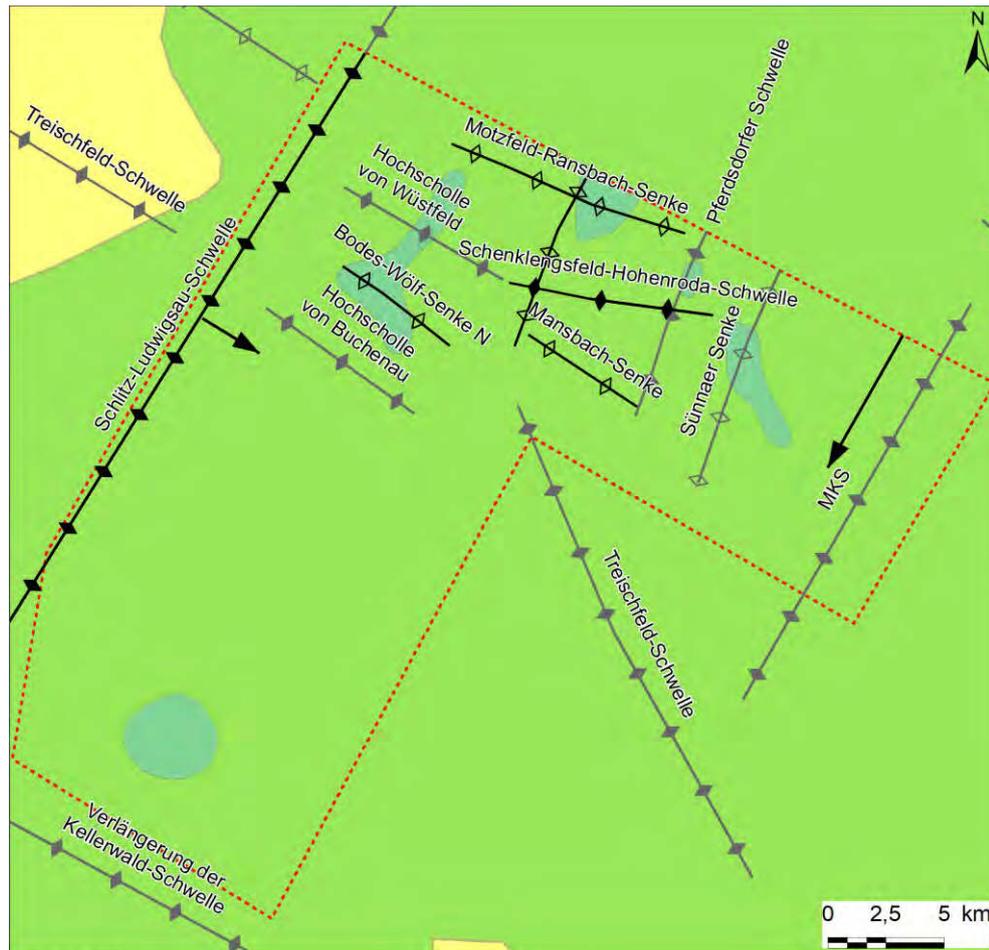
Während der Ablagerung der Werra-Salze besteht weiterhin eine NE-SW gerichtete Extension. Die Präzipitation der Salze orientiert sich dabei am variszischen Strukturplan (WALTER, 2007, [200]), wie auch der Sedimentationsraum im Arbeitsgebiet vermuten lässt. Unter Einbeziehung der Mächtigkeiten der Werra-Salze (ANLAGE 15, ANLAGE 16, ANLAGE 17) wird deutlich, dass sich auch im Verlauf der nachfolgend dargestellten geologischen Entwicklung, alt angelegte Strukturen (Kap. 6.2.1) des variszischen Bauplanes widerspiegeln.

So erfährt die Hochscholle von Buchenau eine Kippung nach SW, wobei sich vermutlich zeitgleich vermehrt herzyn verlaufende Staffelbrüche im Subsalinar entwickeln. Diese werden anhand von Seismikprofilen (Kap. 4.1.6) rezent als Störungen interpretiert. Daneben bewirkt die NW-SE gerichtete Kompression eine Kippung der Schlitz-Ludwigsau-Schwelle nach SE, wodurch sich die östlich daran anschließende Wipershainer-Störung nach Südwesten verlängert.

Sowohl nordöstlich der Hochscholle von Buchenau als auch der Treischfeld-Schwelle entwickeln sich entlang der bereits zu Beginn des Zechstein (Abbildung 46, S. 112) angelegten Störungszonen Abschiebungen. Mit diesen Abschiebungen bilden sich im Vorfeld der Schwellen Senken aus, die nachfolgend als Bodes-Wölf-Senke bzw. als Mansbach-Geblar-Senke bezeichnet werden. Die Isobathenpläne der Salzbasis (ANLAGE 11) bzw. der Werra-Salze (ANLAGE 10, ANLAGE 9) zeigen ein Einfallen der Mansbach-Geblar-Senke nach SW, wobei das Tiefste in etwa mit der Störung im Norden der Treischfeld-Schwelle korreliert. Daher wird die Senke in Folge einer listrischen Abschiebung entlang der nördlichen Treischfeld-Störung als Halbgraben interpretiert.

Im Gegensatz dazu ist die Muldenachse der Bodes-Wölf-Senke räumlich nicht so nah an die Eitratalsstörung gebunden. Die Senke ist das Ergebnis der Herausbildung der Hochschollen von Buchenau bzw. von Wüstfeld (Kap. 5.3.2, ANLAGE 14). Die Hochscholle von Wüstfeld wird im Verlauf der NE-SW gerichteten Extension nach Südwesten gekippt, sodass sich entlang der nördlichen Störung eine NE-gerichtete Abschiebung entwickelt. Die Bildung der Hochscholle beeinträchtigt die Präzipitation der Kalisalze an dieser Stelle nicht, sodass die Flöze vollständig entwickelt sind und ihre typische stratigraphische Feingliederung aufweisen.

Ebenso wirkten sich die erzgebirgisch streichenden Schwellen und Senken im zentralen Bereich nicht als Hindernis für die Bildung von Kalisalzen in diesem Bereich aus, wie anhand ihrer Verbreitung belegt werden kann. Im Gegensatz dazu ist die Entwicklung im Umfeld der als Hochlage ausgebildeten MKS zu sehen. Noch während der Ablagerung des Unteren Werra-Steinsalz tritt im Bereich der MKS keine bedeutende Mächtigkeitsreduktion (ANLAGE 21, ANLAGE 22) auf und auch das Kaliflöz Thüringen ist dort entwickelt. Daher ist anzunehmen, dass im Zuge der Transgression des Zechsteinmeeres zunächst eine gleichmäßige Auffüllung des Werra-Beckens geschah. Die Mächtigkeiten des darüber folgenden Mittleren- und Oberen Werra-Steinsalz sind im Vergleich zum westlichen Beckenteil deutlich geringer (ANLAGE 19, ANLAGE 20), was als Indiz für die Hebung der MKS während dieses Zeitraums gelten kann. Weiterhin deutet die Verbreitung des Kaliflöz Hessen sowie seiner Begleitflöze (JAHNE & PIELERT, 1964, [83]) im Vergleich zum Kaliflöz Thüringen auf eine sukzessive Einengung des Sedimentationsraumes hin. Die Verbreitung des Kaliflöz Hessen im Streichen der Mansbach-Geblar-Senke (Abbildung 47, S. 114) legt für den Bereich der MKS eine synsedimentär ablaufende Kippung nach SW nah. Diese Entwicklung stellt sich analog zu der der Hochschollen von Buchenau bzw. Wüstfeld dar.



Legende:

Arbeitsgebiet	Antiklinale	Synklinale	Bewegung
Oberer Werra-Ton	neu	neu	Richtung
Oberer Werra-Anhydrit	bestätigt	bestätigt	
Oberstes Werra-Steinsalz			

Abbildung 48 Schematische Darstellung der paläogeographischen Situation im Arbeitsgebiet während der Ablagerung des Obersten Werra-Steinsalz

Im weiteren Verlauf des Zechstein erfolgt die Abscheidung des Oberen Werra-Steinsalz, bevor die Ablagerung des Oberen Werra-Ton eine Unterbrechung der salinaren Abscheidung darstellt (Abbildung 48). Der Obere Werra-Ton ist im gesamten Arbeitsgebiet angetroffen worden (Kap. 4.2.3) und wird vom Oberen Werra-Anhydrit überlagert. In den Oberen Werra-Anhydrit ist lokal das Oberste Werra-Steinsalz eingeschaltet (ANLAGE 7). Die Verbreitung des Obersten Werra-Steinsalz korreliert mit den Bereichen der Sünnaer-Senke, der Wehrshausener-Senke sowie der Bodes-Wölf-Senke. Auch im Perspektivfeld Machbach-Süd ist Oberstes Werra-Steinsalz dokumentiert, was für einen weit nach Süden reichenden, regionalen Sedimentationsraum zur Zeit der Ablagerung spricht²⁷. Die Verbreitung des nordwestlichen Vorkommens des Obersten

²⁷ Aufgrund der Aufschlussituation im Perspektivfeld Marbach-Nord können keine verlässlichen Aussagen über die Verbreitung des Obersten Werra-Steinsalz in diesem Gebiet getroffen werden.

Werra-Steinsalz entspricht dem Verlauf der Wippershainer-Störung (Abbildung 47, S. 114) und weist nach, dass das Oberste Werra-Steinsalz im Hangenden der Hochscholle von Wüstfeld abgelagert wurde.

Anhand von Tagesbohrungen dokumentierte, mit Steinsalz und Fasergips bzw. Kalzit verheilte Klüfte belegen die Migration von Wässern im stratigraphischen Abschnitt vom Oberen Werra-Ton bis zum Leine-Karbonat (ENGLER, 2012, [41]). Derartige Strukturen hätten eine Auflösung des Obersten Werra-Steinsalz zur Folge gehabt. Eine solche Lösung ist im Hangenden der Hochscholle von Wüstfeld nicht von Statten gegangen, wie Bezug nehmend auf die Tagesbohrung 186 im 3D-Strukturmodell abgebildet werden konnte. Da sich anhand des Schichtenverzeichnisses der Tagesbohrung 186 keine Hinweise auf Klüfte oder sonstige Strukturen im betreffenden stratigraphischen Abschnitt feststellen lassen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]), sind die im Bereich der Hochscholle von Wüstfeld reduzierten Mächtigkeiten des stratigraphischen Abschnittes vom Oberen Werra-Ton bis zum Oberen Leine-Ton wahrscheinlich nicht postsedimentär. Auffällige Mächtigkeitsreduktionen des Oberen Werra-Ton sind, im Gegensatz zu den darüber folgenden Schichtpaketen bis einschließlich des Leine-Karbonat, nicht zu beobachten (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Demnach war vermutlich eine relative Hebung während der Ablagerung der zechsteinzeitlichen Gesteine im Hangenden des Oberen Werra-Ton aktiv, die analog zum Sedimentationsmilieu und der Paläospannungsrichtung zu Beginn des Zechstein wirkte (Kap. 5.3.2, ANLAGE 14). Dennoch muss die aus der NW-SE gerichteten Kompression und der daraus resultierenden SE-Kippung der Schlitz-Ludwigsau-Schwelle die relative Hebung im Bereich der Hochscholle von Wüstfeld überlagert haben.

Währenddessen sind nordöstlich der Hochscholle von Wüstfeld, im Bereich der Motzfeld-Ransbach-Senke, und südwestlich im Bereich der Bodes-Wölf-Senke erhöhte Mächtigkeiten abgebildet, die auf eine verstärkte Sedimentation in diesem Bereich schließen lassen. Die Muldenachse der Bodes-Wölf-Senke ist dabei im Vergleich zu Abbildung 47 (S. 114) nach Nordosten verlagert, was als Verlagerung des Sedimentationsraumes gedeutet wird. Unter Berücksichtigung der betreffenden Isobathen- und Isopachenpläne (ANLAGE 8, ANLAGE 7, ANLAGE 6, ANLAGE 15) deutet das auf eine relative Senkung der Gebiete während der Ablagerung des jüngeren Zechstein hin. Diese Entwicklung ist analog zu der des nordwestlichen Teils der Mansbach-Geblar-Senke.

Die im Subsalinar entwickelte Mansbach-Geblar-Senke (Abbildung 46, S. 112) erfährt während der Ablagerung des jüngeren Zechstein eine zweigeteilte Entwicklung. Im Südosten der Senke zeigt sich trotz rezenter engräumiger Schwankungen eine generalisierte Reduktion der Mächtigkeit, während im nordwestlichen Verlauf eine deutliche Mächtigkeitserhöhung dargestellt ist (ANLAGE 14). Daher findet die Synklijalstruktur in Abbildung 48 (S. 116) als Mansbach-Senke Eingang. Der herzyne Senkungsbereich ist nordöstlich und südwestlich von ebenfalls herzyn streichenden Störungen im Suprasalinar begrenzt (ANLAGE 14). Im Osten fällt die Grenze des Teilbereichs mit dem Verlauf der Pferdsdorfer Schwelle zusammen (Abbildung 48, S. 116, ANLAGE 6). Da die Mansbach-Geblar-Senke in den Isobathenplänen des jüngeren Zechstein deutlich

erkennbar ist, wird die Mächtigkeitserhöhung als verstärkte Sedimentation im Zuge synsedimentärer Senkung in dem nordwestlichen Teilbereich interpretiert.

Nördlich der Mansbach-Senke verläuft die Schenkklengsfeld-Hohenroda-Schwelle, die im Vergleich zur Hochscholle von Wüstfeld geringer gehoben ist. Sie stellt den Übergang zur weitflächigen Motzfeld-Ransbach-Senke dar.

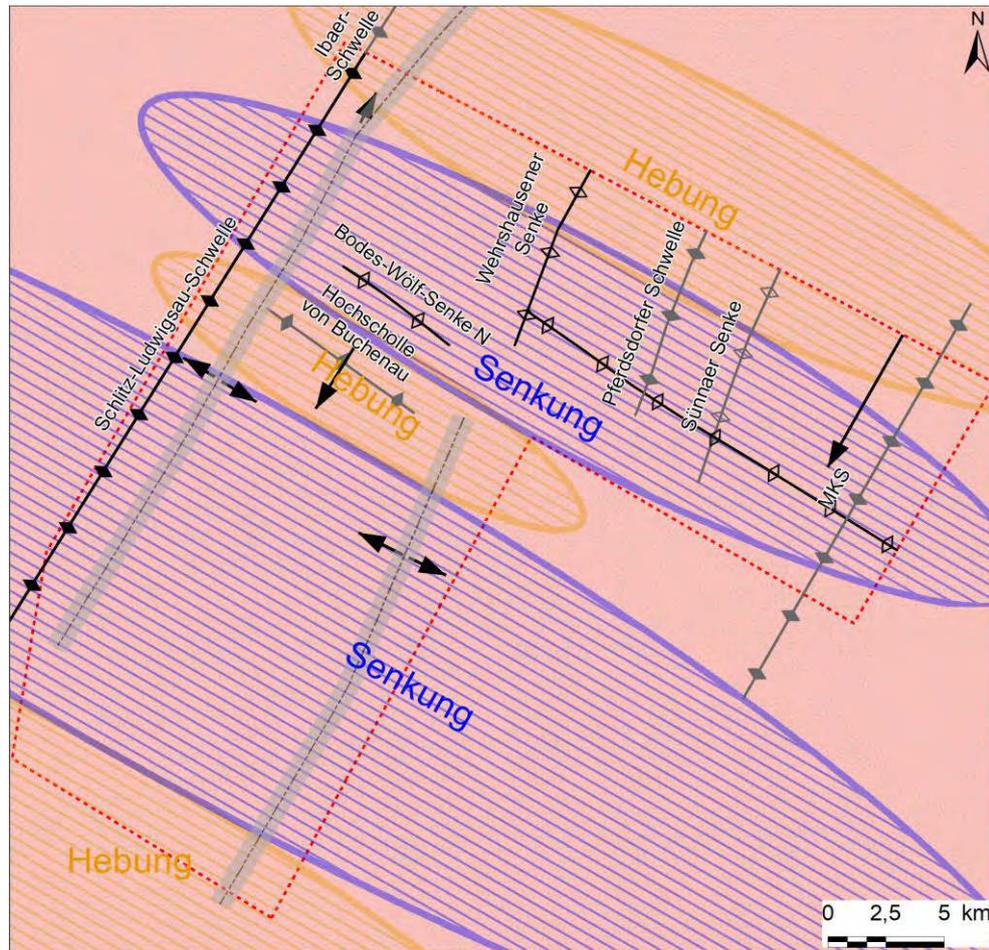
Im Bereich der MKS zeigt der Abschnitt von der Basis des Oberen Werra-Ton bis zur Basis des Leine-Karbonat ebenfalls eine deutliche Reduktion der Mächtigkeit im Vergleich zum zentralen Teil des Werra-Beckens (ANLAGE 15). Diese geringen Mächtigkeiten geben einen Hinweis auf die in Relation zur MKS stärkere Senkung des Zentrums des Werra-Beckens. Aufgrund der Mächtigkeitszunahme nach SW wird eine fortlaufende Kippung der MKS in diese Richtung interpretiert.

Die Hochscholle von Buchenau scheint zur Ablagerung des jüngeren Zechstein keiner bedeutenden Hebung unterlegen gewesen zu sein, wie am Vergleich der Mächtigkeit des Abschnittes von der Basis des Leine-Karbonat bis zum Buntsandstein im 3D-Strukturmodell verdeutlicht wird. Der Mächtigkeitsunterschied des stratigraphischen Abschnittes zwischen dem südlichen Teilbereich der Bodes-Wölf-Senke und der Hochscholle von Buchenau beträgt ca. 15 m und ist gering.

Auffällig ist die hohe Zahl an erzgebirgischen und herzynen Strukturelementen (Abbildung 48, S. 116), die sich im jüngeren Zechstein abzeichnen. Diese spiegeln die bereits aus der Literatur bekannten, vorherrschenden Paläostressrichtungen (Tabelle 2, S. 11) zu dieser Zeit wider.

6.2.3 Trias

Nach der Regression des Zechsteinmeeres zum Ende des Zechstein, hält die Phase der regionalen Senkung des Arbeitsgebietes an (Kap. 6.1). Es beginnt die Auffüllung des Buntsandsteinbeckens durch die Erosion variszischer Abtragungsgebiete im Süden (ZIEGLER, 1990, [213]). Dabei verändert sich das Paläostressfeld, sodass die Richtung der Extension im Verlauf der Trias von NNW-SSE bis NW-SE gerichtet ist (Tabelle 2, S. 11). Die damit einhergehende NE-SW gerichtete Kompression und äußert sich in Form von NW-SE streichenden, großräumigen Sätteln und Mulden (Abbildung 49, S. 119).



Legende:

- | | | | | |
|----------------------|--------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| Arbeitsgebiet | Antiklinale | Synklinale | Bewegung | Senkung Trias |
| Buntsandstein | neu | neu | Richtung | Hebung Trias |
| Extension (Salzhang) | bestätigt | bestätigt | | |

Abbildung 49 Schematische Darstellung der paläogeographischen Situation im Arbeitsgebiet während der Ablagerung des Buntsandstein

So erfährt der nordöstliche Rand des Arbeitsgebietes eine Hebung, was mit leicht erhöhten Mächtigkeiten der Buntsandsteinablagerungen im Bereich der Mansbach-Geblar-Senke einhergeht (ANLAGE 3, ANLAGE 4, ANLAGE 5, ANLAGE 13, ANLAGE 20). Aufgrund der vorherrschenden Kompressionsrichtung ist anzunehmen, dass die Kippung der Hochlage der MKS auch im Verlauf der Trias von statten gegangen ist. Doch das lässt sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht mit Gewissheit feststellen. Hierzu wären detaillierte Untersuchungen der faziellen Ausbildung notwendig.

Die Hochscholle von Wüstfeld zeichnet sich in der Tiefenlage bzw. Mächtigkeitsentwicklung in den triassischen Sedimenten nicht ab (ANLAGE 5, ANLAGE 18, ANLAGE 19). Im Bereich der Hochscholle von Buchenau ist aufgrund der im Vergleich zur Bodes-Wölf-Senke ca. 20 m bis 40 m geringeren Mächtigkeit des Buntsandstein auf eine geringe relative Hebung zu schließen (ANLAGE 18, ANLAGE 19). Das Gebiet

des Haune-Beckens weist erhöhte Senkungen auf (ANLAGE 18, ANLAGE 19), wobei das Gebiet des Perspektivfeldes Marbach-Süd unter Einbeziehung der Mächtigkeitsverteilung des Buntsandstein im Bereich des Perspektivfeldes Marbach-Nord ebenfalls gesenkt ist (ANLAGE 13).

Die Ausprägung der NE-SW bzw. NNE-SSW verlaufenden Sattel- und Muldenstrukturen (Abbildung 49, S. 119) lässt sich anhand des vorherrschenden Kompressionsregimes jedoch nicht erklären. Denkbar wäre, dass die zur Zeit der Ablagerung des jüngeren Zechstein angelegten synsedimentären Senken im Bereich der Sünnaer-Senke und der Wehrshausener-Senke weiterhin bestanden haben (Kap. 6.2.2). Diese Sedimentationsbereiche wurden so im Verlauf des Buntsandstein bevorzugt aufgefüllt, was dort zu einer erhöhten Überdeckung führte. Die dadurch erhöhte Auflast wurde durch den plastisch reagierenden stratigraphischen Abschnitt vom Unteren Werra-Steinsalz bis zum Oberen Werra-Steinsalz (ANLAGE 15) ausgeglichen, indem in Bereichen geringer Auflast ein Aufstieg der Salze geschah, was anhand der Isobathenkarte des Oberen Werra-Ton bekräftigt werden kann (ANLAGE 8).

Mit der halokinetisch bedingten Senkung der Wehrhäuser-Senke und der Sünnaer-Senke wurde die Pferdsdorfer Schwelle relativ dazu gehoben. Die Hebung der Pferdsdorfer Schwelle korreliert im Streichen mit einer erhöhten Mächtigkeit der Werra-Salze an dieser Stelle. Im Zuge der relativen Hebung kam es dort verstärkt zur Erosion der überlagernden triassischen Sedimente. Im Verlauf des Buntsandstein wurde die Pferdsdorfer Schwelle durch ein herzyn verlaufendes Element zergliedert, wie im Vergleich der Isobathenpläne des Unteren und Mittleren Buntsandstein deutlich wird (ANLAGE 4, ANLAGE 5).

Informationen über die Entwicklung der Treischfeld-Schwelle zur Zeit des Buntsandstein sind aufgrund der vergleichsweise einheitlichen Mächtigkeiten der Buntsandsteinsedimente nur eingeschränkt möglich (ANLAGE 13). Allein eine lokal begrenzte Synklinalstruktur nordöstlich des Perspektivfeldes Marbach-Nord konnte auf Basis der Erkundungsdaten der Tagesbohrungen 222 und 775 modelliert werden. Vor allen in der detaillierten Beschreibung der Tagesbohrung 775 können Hinweise auf eine überlagernde Subrosion entnommen werden (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Neben einer dunkelrotbraunen Tonstein-Brekzie wird auch eine 0,8 m mächtige Kalkstein-Anhydrit-Brekzie im Hangenden des Unteren Werra-Anhydrit²⁸ ausgehalten, wobei letztere teils offene Hohlräume mit Kalzitkristallen aufweist. Weiterhin sind im Buntsandstein vermehrt Brekzien, Gipskristalle und Fasergips beschrieben. Dies sind starke Indizien für eine Subrosion an dieser Stelle. Dabei sind vor allem die Abschnitte vom Oberen Werra-Ton bis zum Buntsandstein beeinflusst. Diese Senke deutet sich zwar in der Isobathenkarte des Oberen Werra-Ton an, bildet jedoch noch kein Depotzentrum (ANLAGE 8, ANLAGE 14). Für die Ablagerungen des Muschelkalk wurden keine Störungsmerkmale dokumentiert. Daher wird die Senke als lokaler Bereich der Ablaugung während der Mittleren Trias interpretiert. Mit der Verbindung des Norddeutschen Beckens und der Tethys (WALTER, 2007, [200], ZIEGLER, 1990, [213]) standen hierfür

²⁸ Der Untere Werra-Anhydrit ist in der Tagesbohrung 775 in einer Tiefe von 1.101,55 m bis zu 1.116,00 m aufgeschlossen und ungestört ([91]).

Wässer zur Verfügung, was eine wesentliche Bedingung für die stattfindenden Subrosionen im Untergrund ist. Darüber hinaus müssen Wegsamkeiten zum Salzgestein existieren (HOPPE, 1944, [77]). Es wäre denkbar, dass diese im Verlauf der Trias im Zuge einer NNW-SSE bzw. NW-SE gerichteten Extension begründet sind. Mit der Extension boten NNE-SSW bzw. NE-SW verlaufende Riftsysteme im Suprasalinar Wegsamkeiten für Wässer (Abbildung 49, S. 119). Auf diese Weise wurde vermutlich auch der westliche, der Schlitz-Ludwigsau-Schwelle vorgelagerte, sowie der östliche Salzhang konturiert.

6.2.4 Jura und Kreide

Die Ablagerungen des Muschelkalk, die von quartären und tertiären Sedimenten und Gesteinen überlagert sein können (Kap. 3.2), sind die letzten Überlieferungen mesozoischer Gesteine im Arbeitsgebiet. Nur südlich des Arbeitsgebietes sind lokal Keupersedimente aufgeschlossen. Damit ergibt sich ein Hiatus, der ca. 170 Ma umfasst (DSK, 2017, [37]). Mit Beginn des Jura setzte im Arbeitsgebiet eine Hebung ein, wobei sich eine NE-SW gerichtete Extension einstellte (Kap. 3.2.2). Das führte vor allem zur Aktivierung herzyn verlaufender Strukturelemente. So bildete sich auch in der Folge im Oberen Jura der Fuldaer Graben aus (Kap. 3.2.1), der im Südwesten des Perspektivfeldes Marbach-Süd das Werra-Kaligebiet vom Fulda-Kaligebiet trennt.

Auch die Ausbildung des Hersfelder Grabens (ANLAGE 4), der sich im Nordwesten deutlich als herzynes Element im westlichen Salzhangbereich darstellt, ist wahrscheinlich das Ergebnis der NE-SW gerichteten Extension im Jura. In diesem Paläostressregime wurden daher vermutlich auch die herzynen Salzhangbereiche konturiert. Zu diesen zählen die Treischfeld-Schwelle, die Einengung des Salzhangs entlang des Eitratals und der Hochscholle von Buchenau.

Im Bereich der Treischfeld-Schwelle sind im Suprasalinar engräumig stark variierende Mächtigkeiten und hohe Versätze modelliert worden (ANLAGE 3, ANLAGE 4, ANLAGE 5, ANLAGE 12, ANLAGE 13), was als Hinweis auf dessen komplexe Ausbildung gedeutet werden kann (Kap. 4.2.2). Da das Gebiet der Treischfeld-Schwelle den südöstlichen Randbereich des Arbeitsgebietes darstellt, können gewisse Randeffekte bei der Modellierung nicht ausgeschlossen werden. Doch auch die dort abgeteuften Tagesbohrungen weisen oftmals gestörte Formationen auf.

So erreicht die Tagesbohrung 219 beispielsweise in einer Endteufe von 813,10 m Gesteine des Oberrotliegend, die von 773,3 m bis 781,1 m vom Unteren Werra-Anhydrit überlagert werden. Der Anhydrit liegt als „fast ungestörte Schichtenfolge“ (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]) vor. Oberhalb des Unteren Werra-Anhydrit ist eine Brekzie aufgeschlossen, die sich aus unterschiedlich großen Bruchstücken von Buntsandstein, Dolomit, Anhydrit und Tonsteinen zusammensetzt und durch toniges Material verkittet ist. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch in weiteren Tagesbohrungen entlang der Treischfeld-Schwelle; über tektonisch unauffälligem Unteren Werra-Anhydrit sind (Ton-Anhydrit-)Brekzien dokumentiert (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]).

Diese vielfache Erfassung von Brekzien im Hangenden der Treischfeld-Schwelle oberhalb des Unteren Werra-Anhydrit legt nahe, dass sich eine Ablaugung in diesem Gebiet ereignet hat. Das weist darauf hin, dass die Treischfeld-Schwelle, obwohl sie als früh angelegte Hochlage definiert wird (KULICK et al., 1984, [118], ZIEGLER, 1990, [213]), nicht als primär salzfrei gelten kann. Mit der Ablaugung der Salze verliert die Treischfeld-Schwelle im Suprasalinar die Bedeutung als Antiklinale. Es bildete sich eine Senke, die mit dem heutigen Bereich der sog. Spahl-Eiterfelder Mulde korreliert (MOTZKA & LAEMMLEN, 1967, [145]). Auch die Mansbach-Geblar-Senke, die im Suprasalinar von zwei Abschiebungen begrenzt wird, deutet im Zuge der NE-SW gerichteten Extension die Bildung einer Grabenstruktur an (ANLAGE 4). Das in diesem Bereich verbreitete Werra-Steinsalz zeigt lokal stark variierende Mächtigkeitsverteilungen. So weisen das Untere und Mittlere Werra-Steinsalz geringere Mächtigkeiten im Westen und erhöhte Mächtigkeiten im Norden und Osten dieses Bereiches auf, während das Obere Werra-Steinsalz entlang der gesamten Mansbach-Geblar-Senke im Vergleich zum zentralen Werra-Becken höhere Mächtigkeiten erreicht (ANLAGE 20, ANLAGE 21). Auch die Kaliflöze waren in diesem Fließen der Salze inbegriffen. Dabei lässt sich jedoch anhand des 3D-Strukturmodells nicht unterscheiden, wie groß der Anteil halokinetischer oder halotektonischer Überprägung war.

Die mit der NE-SW gerichteten Extension einhergehende NW-SE wirkende Kompression muss sich in Verbindung mit der Hebung der Hessischen Senke (SCHECK & BAYER, 1999, [167]) vor allem auf die erzgebirgischen und rheinischen Strukturelemente im Arbeitsgebiet ausgewirkt haben. So wird die Kippung der Schlitz-Ludwigsau-Schwelle nach SE als Ergebnis dieses Paläostressregimes gewertet. In Profil 5 (ANLAGE 22) wird deutlich, dass sich die Hebung vom Subsalinar bis ins Suprasalinar fortsetzt. Das lässt sich mit der verminderten Mächtigkeit der plastisch reagierenden Salze im Bereich des Salzhangs und der damit verminderten „Pufferwirkung“ (Kap. 3.2.3) in Einklang bringen. Die Hebung ging mit der Erosion der triassischen Sedimente einher, wobei rezent sogar Gesteine des Unteren Buntsandstein im Bereich des Salzhangs austreichen (ANLAGE 4, ANLAGE 5). In Verbindung mit der Kippung der Schlitz-Ludwigsau-Schwelle erfolgt die Reaktivierung der östlich vorgelagerten Wippershainer-Störung im Subsalinar, die sich in Form von mannigfaltiger Zergliederung der Salzbasis (ANLAGE 11) äußert. Auch im Suprasalinar bildet sich eine parallel zum westlichen Salzhang verlaufende Störung (ANLAGE 4, ANLAGE 5), deren Streichen sich jedoch um ca. 5° von der Streichrichtung der erzgebirgischen Störungszone im Liegenden unterscheidet. Daher wird ein Gleiten der Deckgebirgsscholle interpretiert, das eine gewisse Rotationskomponente aufweist (ANLAGE 4, ANLAGE 11).

Während der Kreide führte die von Süden her wirkende, NE-SW gerichtete Kompression zu einer Reaktivierung der herzynen Strukturelemente im Arbeitsgebiet. So wird auf Basis des 3D-Strukturmodells (Kap. 5.3) auch ein Einfluss dieses Stressregimes auf die Hochscholle von Wüstfeld vermutet. Die Hochscholle zeigt im Isobathenplan des Unteren Werra-Anhydrit eine Heraushebung von ca. 70 m im Vergleich zum umliegenden Becken (ANLAGE 11). Auch ist ein deutliches Einfallen nach SW dargestellt, sodass der Charakter einer geneigten Pultscholle unterstrichen wird. Im Zuge der Kompression

wird eine stärkere Kippung der Hochscholle interpretiert. Dies bildet sich auch in der Mächtigkeitsverteilung der darüber auflagernden Salze ab (ANLAGE 15). Die Gesamtmächtigkeit der Salze der Werra-Formation ist im Hangenden der Hochscholle mit ca. 180 m modelliert. Das Mittlere Werra-Steinsalz ist im Umfeld der Hochscholle von Wüstfeld mit weniger als 60 m Mächtigkeit entwickelt (ANLAGE 18), wobei sich diese Reduktion nach SE fortsetzt und die Kontur der Hochscholle weniger deutlich herausbildet als im Vergleich zum Unteren Werra-Steinsalz. Auch die Kaliflöze Thüringen und Hessen sind in ihren Mächtigkeiten im Bereich der Hochscholle von Wüstfeld stark reduziert ausgebildet, was auch anhand von Tagesbohrungen und untertägigen Aufschlüssen bestätigt wird. Neben dieser Reduktion verläuft das Kaliflöz Thüringen im Norden der Hochscholle mit steilem Einfallen und ist stärker verfaltet als im Süden der Hochscholle von Wüstfeld. Auch in den Isobathenplänen (ANLAGE 9, ANLAGE 10, ANLAGE 11) bildet sich die Hochscholle deutlich ab. Die Reduktion der Mächtigkeit und die rezente Ausbildung der Kaliflöze werden daher als das Produkt halotektonischer Überprägung interpretiert. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass mit Kompression während der Kreide und der damit interpretierten Kippung der Hochscholle von Wüstfeld im Subsalinar, durch die Salze eine Entkopplung vom Suprasalinar stattgefunden hat. Dies erklärt, weshalb die Isolinienpläne im Suprasalinar keine Hinweise auf die Hochscholle geben (ANLAGE 4, ANLAGE 5, ANLAGE 18).

So ist auch die südlich der Hochscholle von Wüstfeld dargestellte Bodes-Wölf-Senke von dieser Kompression überprägt worden. Dort ist eine generelle Mächtigkeitserhöhung der Werra-Salze dargestellt (ANLAGE 15), wobei vor allem die des Unteren Werra-Steinsalz in südöstliche Richtung zunimmt. In diesem Bereich befindet sich der Salzkavernenspeicher von Reckrod. Dort ist ein Mächtigkeitsanstieg des Werra-Steinsalz auf ca. 450 m modelliert (ANLAGE 18). Die erhöhte Mächtigkeit der Salze, die von einer unruhigen Lagerung der Kaliflöze Thüringen und Hessen begleitet wird, findet ihren Ursprung in der Senkung der Salzbasis und der Antiklinalstruktur im Salztop (Kap. 5.3.3, ANLAGE 18, ANLAGE 19). Dabei fällt insbesondere in Bezug zur Verbreitung des Obersten Werra-Steinsalz auf, dass es der Hebung der suprasalinen Horizonte folgt.

Diese Hebung ist mit dem Fließen der plastisch reagierenden Salze im Zuge der tektonischen Impulse zu erklären. Das rezente Vorhandensein des Obersten Werra-Steinsalz in diesem, im Suprasalinar gestörten Bereich lässt auf eine gute Abdichtung der überlagernden, überwiegend tonigen Gesteine (Tabelle 4, S. 23) schließen, da sonst im Zuge der Migration von Wässern eine Lösung der Salze stattgefunden hätte. Die Fließbewegungen müssen entsprechend langsam von Statten gegangen sein.

Anders gestaltet sich der Fall der Eitratalsörung. Diese ist im Subsalinar als Abschiebung interpretiert (Kap. 6.2.2), die entsprechend des 3D-Strukturmodells Versatzbeträge von ca. 200 m aufweist. Anhand der leicht unterschiedlichen erzgebirgischen Streichrichtungen im Subsalinar und Suprasalinar wird eine Drehung der suprasalinen Scholle auf dem Salz interpretiert (Kap. 5.3.1, ANLAGE 4, ANLAGE 11). Diese ging mit dem Salzfließen in Richtung der Bodes-Wölf-Senke einher. Derart hohe Versätze wie

im Subsalinar sind im Suprasalinar nicht nachgewiesen. Allein das Eitratral selbst könnte als Schwächezone interpretiert werden.

Die Entwicklung der Eitratralstörung ist eng mit der der Hochscholle von Buchenau verknüpft. Die Schichten des Suprasalinars sind im Bereich der Hochscholle über 100 m höher als nördlich von ihr im Bereich der Bodes-Wölf-Senke, was auf die Hebung der Hochscholle von Buchenau zurückzuführen ist, die in die Kreidezeit eingeordnet wird. Abbildung 50 zeigt einen Ausschnitt aus dem 3D-Strukturmodell und eine daraus entwickelte schematische Blockdarstellung der Eitratralstörung in ihrer Ausbildung vom Subsalinar bis zum Suprasalinar.

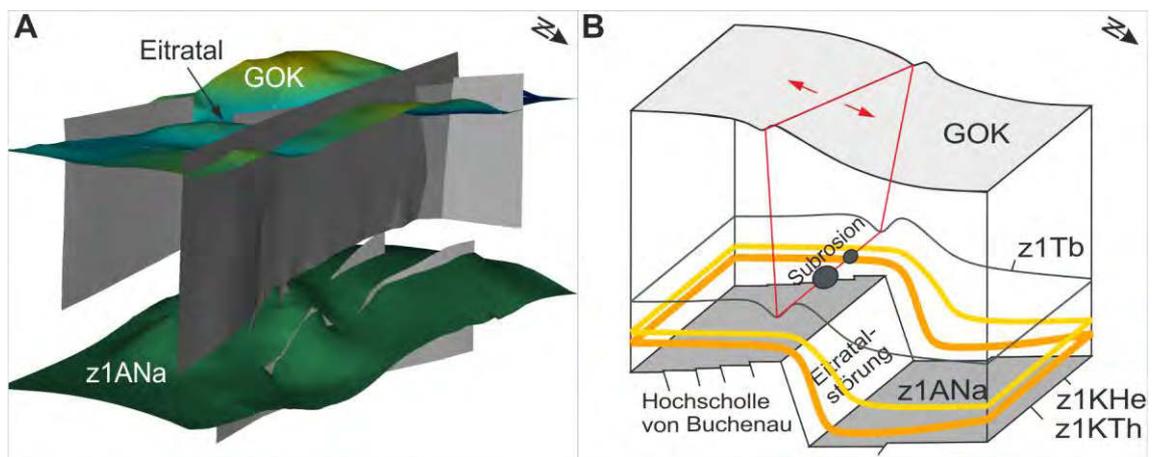


Abbildung 50 Ausschnitt aus dem 3D-Strukturmodell (A), Schematische Darstellung der Eitratralstörung vom Subsalinar zum Suprasalinar (B). Die Kürzel entsprechen denen in Tabelle 3 (S. 22) und Tabelle 4 (S. 23)

In der Folge der Hebung der Hochscholle von Buchenau und dem damit einhergehenden Salzfließen in Richtung der Bodes-Wölf-Senke erfolgte das mit einer leichten Rotation verbundene Abgleiten der nördlichen Deckgebirgsscholle, was im Suprasalinar zu Bildung von Extensionsstrukturen geführt haben muss. Diese wurden als Wegsamkeiten von Wässern genutzt. Es kam zur Ablaugung des Oberen Werra-Steinsalz und zur Bildung von Subrosionssenken entlang der entstandenen Schwächezone des Eitratals. Diese Subrosionserscheinungen im Bereich der Eitratralstörung sind belegt. Auf diese Weise ist vermutlich auch die Einengung des Salzhangs an dieser Stelle zu erklären.

Im Zuge dieser Extension (Abbildung 50 B) sind vermutlich Bruchstücke des überlagernden Buntsandstein in das Salinar gelangt. Diese wurden bei der bergmännischen Überführung der Eitratralstörung aufgeschlossen und sind in trockenem Zustand angetroffen worden (Abbildung 51, S. 125).

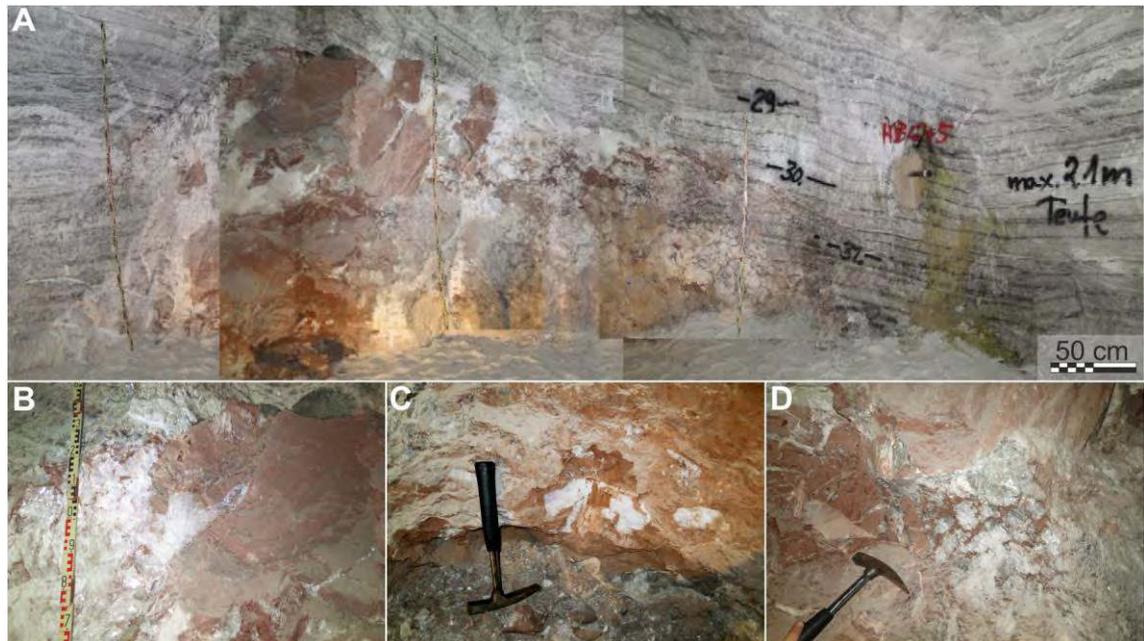


Abbildung 51 Übersicht Aufschluss Sandsteinbrekzie (A) mit Detailaufnahmen (B, C, D)

Abbildung 51 gibt eine Übersicht über den untertägigen Aufschluss der Sandsteinbrekzie sowie Detailansichten. Im feingeschichteten Sandstein ist z. T. eine Wechsellagerung roter und hellgrauer Lagen ausgebildet. Einzelne Bruchstücke weisen lagig eingeregelt dunkelrotbraune Tonklasten auf. Die Sandsteinbruchstücke sind von weißem und teilweise violett gefärbtem Kristallsalz umgeben. Im Übergang zum anstehenden Werra-Salz sind Tonschmitzen aufgeschlossen. Die mit Kristallsalz versehenen Bereiche lassen auf den Einfluss von Wässern schließen, während die partielle Färbung des Salzes als Indiz für hohen Stress zu werten ist (SONNENFELD, 1995, [184], ZELEK et al., 2014, [211]). Einige Hundertmeter westlich der Buntsandsteinbrekzie ist parallel zur Eitralstörung im Zuge der Auffahrungen eine Salzsollenbrekzie durchörtert worden, die Zehnermetergroße geschichtete Salzsollen in Kristallsalz aufweist.

Beide Strukturen lassen den Schluss auf eine abrupte Energiefreisetzung zu, die zu Sprödbriichen im Salz führten. Anders als bei der Hochscholle von Wüstfeld konnten die geringmächtigeren Werra-Salze im Bereich der Hochscholle von Buchenau keine vollständige Entkopplung des Subsalinar vom Suprasalinar gewährleisten. Dies wird auch in den Isobathenpläne (ANLAGE 4 - ANLAGE 11) ersichtlich, die für die Horizonte vom Unteren Werra-Anhydrit bis zum Mittleren Buntsandstein eine generelle Hebung der Hochscholle von Buchenau im Subsalinar, Salinar und Suprasalinar nahelegt.

Neben dem Salzfließen nach Norden in die Bodes-Wölf-Senke kam es vermutlich auch zu einem Fließen nach Süden. Im Südwesten der Hochscholle von Buchenau werden ca. 290 m mächtige Folgen des Werra-Steinsalz ausgehalten. Für eine Kippung dieser Hochscholle nach SW spricht, dass vergleichbar hohe Mächtigkeiten wie im Bereich von Reckrod nach derzeitigem Stand der Exploration im Süden der Hochscholle von

Buchenau nicht zu erwarten sind, da im NE mehr Salz verdrängt wurde (ANLAGE 11, ANLAGE 15, ANLAGE 18). Im Zuge der Kompression während der Kreide kam es nicht nur zur Hebung der Hochscholle von Buchenau, sondern vermutlich auch zu einer Reaktivierung der in dieser Arbeit festgestellten, herzyn verlaufenden Staffelbrüche (Kap. 4.2.2) im Subsalinar, was ein komplexes Störungsmuster der Salzbasis vermuten lässt.

In der Isobathenkarte des Unteren Werra-Anhydrit stellt die Treischfeld-Schwelle rezent als Hochscholle dar (ANLAGE 11). Die herzyn streichende Schwelle ist jedoch in sich gegliedert, was sich auch anhand der differenzierten Mächtigkeitsverteilungen der Werra-Salze in der Mansbach-Geblar-Senke äußert (ANLAGE 14, ANLAGE 15). So finden sich im Unteren Werra-Anhydrit spornartige Einspießungen nach Norden wieder, die auf eine Kompression aus südlicher Richtung hindeuten. Ob diese im Zuge der kreidezeitlichen Inverstektonik (Kap. 6.2.4) bzw. den Kompressionsregimen im Tertiär (Tabelle 2, S. 11) entstanden sind, lässt sich anhand des 3D-Strukturmodells nicht eindeutig klären.

Südlich der Hochscholle von Buchenau schließt sich eine Störung im Suprasalinar an (ANLAGE 4, ANLAGE 5). Im diesem Bereich weist die Mächtigkeitsverteilung des Suprasalinars keine bedeutsamen Schwankungen auf. Die Versatzbeträge im Suprasalinar erreichen einige Zehnermeter (ANLAGE 5). Oberhalb des Leine-Karbonat sind brekziierte Bereiche beschrieben (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]), die ein Indiz für Extension bzw. Subrosion sind. Der Entstehung dieser wird daher in den Zeitraum von Jura und Kreide datiert, wobei die während des Jura stattgefundenene Extension in NE-SW Richtung sowie anschließende Kippung der Hochscholle von Buchenau im Zuge der Kompression während der Kreidezeit als Ursache der Subrosion betrachtet wird. Diese Bewegungen müssen mit dem Eindringen von Wässern verbunden gewesen sein, die zur Lösung der Salze und, ebenso wie im Fall der Eitralstörung, zur Einengung des Salzhangbereiches an dieser Stelle führte.

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse und des Salzhangverlaufs im Bereich der neu interpretierten Frauombach-Schwelle ist ebenfalls eine Hebung der Salzbasis zu erwarten. Da die derzeitige Erkundungsdichte im Perspektivfeld Marbach nicht mit der im nördlichen Arbeitsgebiet zu vergleichen ist, darf vor allem im Haune-Becken keine Überinterpretation der Isolinienpläne (Kap. 5.3.1, Kap. 5.3.2) und Profilschnitte (Kap. 5.3.3) erfolgen. Dort sind nur wenige Strukturelemente modelliert. Doch unter Anwendung eines Analogieschlusses kann die Entwicklung der Frauombach-Schwelle zu jener der Hochscholle von Buchenau gleichgesetzt werden.

6.2.5 Tertiär

Das Tertiär ist, mit Ausnahme des Oligozän, durch eine weitere Hebung des Arbeitsgebietes geprägt und zeichnet sich durch eine rasche Veränderung der Kompressionsrichtungen zwischen NNE-SSW und NNW-SSE aus (Tabelle 2, S. 11). Während des Miozän wirkte sich die letzte Hochphase der Alpidischen Orogenese im Arbeitsgebiet in

Form einer ca. E-W gerichteten Extension aus. Die so entstandenen N-S verlaufenden Schwächezonen wurden als bevorzugte Aufstiegswege der Vulkanite genutzt, die die Lagerstätte nachhaltig beeinflusst haben (Kap. 3.2.2, Kap. 3.2.3.3).

Ein Beispiel im Arbeitsgebiet ist die früh angelegte N-S streichende Schwächezone im Übergang der MKS zum Beckenzentrum (Kap. 6.2.1), entlang derer das Vulkanitvorkommen von Öchsen und Dietrichsberg intrudiert ist. Dort zeigt sich im Übergang der MKS zum zentralen Teil des Werra-Beckens eine Hebung des Suprasalinars, was mit einer Erosion im Umfeld der Öchse einhergeht (ANLAGE 22). Dabei zeigen die Altersdatierungen am Dietrichsberg, jeweils unter Verwendung der $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Methode, mit $17,9 \pm 0,9$ Ma (REINHARDT, 2015, [158]) und $19,0 \pm 0,1$ Ma (ABRATIS et al., 2007, [1]) ähnliche Alter. Eine Unterscheidung in eine frühe bzw. späte Phase (KÄDING, 1962, [104]) ist in diesem Fall unter Berücksichtigung des Fehlerbereiches nicht eindeutig möglich.

Dennoch ist eine mehrphasige Entwicklung des Vulkanismus wahrscheinlich. Dafür sprechen wechselnde Spannungsrichtungen (Tabelle 2, S. 11), die durch verschiedene Streichrichtungen der Vulkanitvorkommen von NNE-SSW bis NNW-SSE (Kap. 4.1.2, Kap. 4.1.4.3) belegt sind. Zum Ende des Miozän war die Extension eine NE-SW gerichtet, was zur Intrusion von Vulkaniten entlang reaktivierter, herzyn streichender Schwächezonen führte, wie am Beispiel der Treischfeld-Schwelle ersichtlich ist (u. a. ANLAGE 23). Auch im zentralen Teil des Arbeitsgebietes streichen einige fiederförmig abgesetzte Vulkanitvorkommen sowie Schnitte NW-SE.

Nordwestlich der Treischfeld-Schwelle ist weiterhin eine für das Salinar ungewöhnliche Abschiebung im Niveau des Kaliflöz Hessen zu beobachten (Abbildung 52 A und C, S. 128). Die Abschiebung ist über eine Länge von ca. 250 m aufgeschlossen und weist ein Streichen von ca. 130° ²⁹ und ein Einfallen von 55° nach SW auf, wobei der Versatz im Salz ungefähr 2,0 m beträgt. Die Schichtung der Salze fällt mit 5° nach Westen ein (Abbildung 52 B, S. 128). Innerhalb der Abscherungszone ist in geringen Mengen blaues Salz vorhanden, was als Indiz für starken lokalen Stress gewertet wird (SONNENFELD, 1995, [184]). Im Bereich der Firste ist im Verlauf der Störung ein Salzlösungsvorkommen dokumentiert, das jedoch nur geringe Tropfmengen aufwies. Ungefähr 460 m südwestlich der Abschiebung im Niveau des Kaliflöz Hessen ist im Suprasalinar eine lang aushaltende Störung ausgewiesen (Abbildung 52 B, S. 128). Auch das Subsalinar weist in diesem Bereich herzyn streichende Störungen auf, wobei der Versatz ca. 120 m beträgt und das Einfallen der Störung entgegen der Abschiebung im Niveau des Kaliflöz Hessen nach NE interpretiert wird. Die Abschiebung im Subsalinar ist an die NE-SW gerichtete Extension während des Zechstein gekoppelt (Abbildung 52 D Schritt 1, S. 128), die mit der Bildung einer Halbgrabenstruktur im NE der Treischfeld-Schwelle einherging. Während der Trias veränderte sich das Spannungsregime und erst mit der Hebung der Hessischen Senke im Jura erfolgte eine erneute NE-SW gerichtete Dehnung, die zur Bildung eines Grabens im Suprasalinar führte (Abbildung 52 D Schritt 2, S. 128). Zwar passt das Extensionsregime des Jura (Tabelle 2, S. 11) zu der herzyn

²⁹ Streichen der Störung wurde gepeilt.

streichenden Abschiebung im Niveau des Kaliflöz Hessen, doch wäre die Störung vermutlich während der Kreide im Zuge der Inverstektonik überprägt worden, weshalb sie nicht jurassisch sein kann. Die Abschiebung zeugt von einer postsedimentären, raschen NE-SW gerichteten Extension, die in einem nicht-plastischen Verhalten der Salze resultiert und wird daher dem späten Miozän zugeordnet.

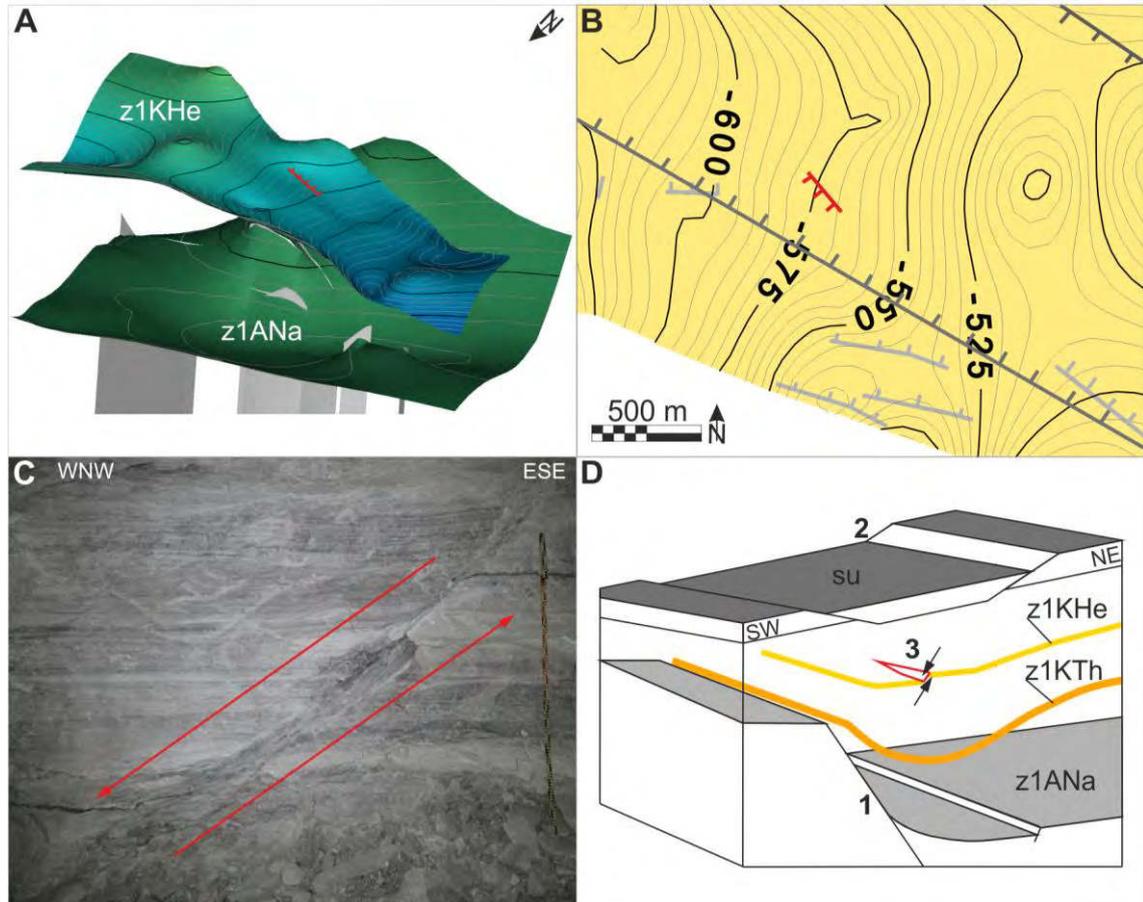


Abbildung 52 Abschiebung im Niveau des Kaliflöz Hessen (rot) mit Ansicht im 3D-Strukturmodell (A), Ausschnitt des Isobathenplanes der Basis des Kaliflöz Hessen mit Darstellung von Störungen im Suprasalinar (grau) und Subsalinar (hellgrau) (B), untertägigem Aufschluss (C) und Blockbild (D) der geologischen Verhältnisse im Bereich der Abschiebung.³⁰

Darüber hinaus wurden an mehreren Vulkaniten zum Teil steil einfallende Störungen mit einem Versatz von Millimetern bis hin zu einigen Zentimetern beschrieben (ENGLER, 2012, [41], REINHARDT, 2014, [157], SCHMAUCKS, 2015, [170]). Ihre Längserstreckung ist jedoch nur über wenige Meter zu verfolgen. Die Beeinflussung der Lagerstätte durch die Vulkanite hinsichtlich der faziellen Ausbildung und der Imprägnation mit Gasen ist unstrittig (Kap. 3.2.3.2) und wird bezüglich der in Kap. 2 präzisierten Fragestellungen nachfolgend diskutiert (Kap. 6.3, Kap. 6.5).

³⁰ Die stratigraphischen Kürzel sind Tabelle 4 (S. 21) zu entnehmen.

Der tertiäre Vulkanismus wird mit den irregulären Subrosionssenken im Arbeitsgebiet in Verbindung gebracht. Die Dokumentation von tertiären Kiesen und Braunkohlen in den Senken lässt auf eine Aktivität der Subrosionen während des Tertiär schließen (HOPPE, 1944, [77], KÄBEL & TROTTNER, 1981, [103]). Die Auslaugungssenke von Gehaus, die von Nord nach Süd verläuft, weist darüber hinaus die für die während der Intrusion der Vulkanite typische Streichrichtung auf. Die Auslaugungssenke wurde in mehreren Tagesbohrungen erkundet. Im 3D-Strukturmodell ist sie deutlich durch Störungen und Absenkungen der suprasalinaren Schollen dargestellt. Der anhand der Ausführungen in den Schichtenverzeichnissen dokumentierte (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]), komplexe Internbau der Subrosionssenke konnte jedoch in dem gewählten Bearbeitungsmaßstab des 3D-Strukturmodells nicht im Detail abgebildet werden. Im Zentrum sind die Deckgebirgsschichten einschließlich der Gesteine des Buntsandstein verbrochen (Tagesbohrung 258). Im Übergang zum intakten Salinar lagern die Ablagerungen des Buntsandstein ungestört über dem Auslaugungsrückstand im Niveau des gelösten Oberen Werra-Steinsalz (Tagesbohrungen 257, 747, 754 748, 758). Im Zentrum der Subrosionssenke wurden vermutlich Teile des Mittleren Werra-Steinsalz abgelaugt (Kap. 5.3). Daneben wurden im Zuge der Bohrarbeiten Vulkanitbrekzien und Sills sowie vereinzelt CO₂-Vorkommen aufgeschlossen (Tagesbohrungen 748, 756, 757, 758, 763).

Der Einflussbereich der Auslaugungssenke von Stadtlengsfeld ist im Vergleich zur dem der Auslaugungssenke von Gehaus geringer, wie auch anhand der Isolinienpläne verdeutlicht wird (ANLAGE 8, ANLAGE 14). Die Gesamtmächtigkeit des Werra-Salzes scheint im Vergleich zum Umfeld nicht deutlich reduziert (ANLAGE 15). Vor allem die jüngeren zechsteinzeitlichen Ablagerungen sind beeinflusst, wie die Tagesbohrungen 108, 111, 227 belegen (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013, [91]). Auch hier liegt die Vermutung nahe, dass der im Zentrum der Auslaugungssenke von Stadtlengsfeld aufgeschlossen Vulkanit (Kap. 4.1.2) Wegsamkeiten für Wasser geboten hat, die begrenzt zur Lösung des Salinars geführt haben.

Nur der südliche Rand Auslaugungssenke von Unterbreizbach im Südwesten der Auslaugungssenke von Oberzella ist Teil des Arbeitsgebietes. Trotz der begrenzten Darstellung der Auslaugungssenke von Unterbreizbach ist eine deutliche Mächtigkeitsreduktion des Werra-Steinsalz auf unter 200 m (ANLAGE 15) modelliert. Die Auslaugungssenke paust sich vom Oberen Werra-Ton bis zum Unteren Buntsandstein durch (ANLAGE 4 - ANLAGE 8, ANLAGE 14). Konkrete Aussagen zum Zeitpunkt der Entstehung lassen sich anhand des 3D-Strukturmodells aufgrund der randlichen Lage im Arbeitsgebiet nicht ableiten. Der zeitlichen Einordnung der Auslaugung in den Tertiär (HOPPE, 1944, [77]) spricht jedoch unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Auslaugungssenken von Gehaus und Stadtlengsfeld nichts entgegen.

6.3 Fazielle Ausbildung der Kaliflöze in Bezug zu der geologischen Entwicklung des Arbeitsgebietes

Der Zusammenhang zwischen der Umbildung von Kalisalzen und Schnitten (JAHNE et al., 1983, [84]) im Salinar bzw. Störungen im Suprasalinar (HERBERT et al., 2007, [62], SCHWANDT, 1972, [174]) wurde in der Literatur bereits dargelegt und lässt sich auch anhand der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse bestätigen (Kap. 5.3). Entlang von Vulkanitspalten und –schlechten sind Wässer migriert und haben fazielle Veränderungen bewirkt (GUTSCHE & HERRMANN, 1988, [58], KOCH & VOGEL, 1980, [115]). Deren Einfluss auf die unmittelbar im Übergang anstehenden Salze ist vielfach belegt (Kap. 5.3.4). Bestätigen lassen sich auch großflächige Vertaubungsbereiche im Kreuzungsbereich von Störungszonen und Vulkaniten (Kap. 3.2.3.2), wie am Beispiel des Soisberges abgeleitet werden kann (ANLAGE 24, Kap. 5.3.4).

Weiterhin ist auch die Beeinflussung von im Liegenden steckengebliebenen Vulkaniten auf die fazielle Ausbildung der Kaliflöze denkbar, wie am Beispiel sylvinitischer Umbildungen im Niveau des Kaliflöz Thüringen (z. B. Abbildung 34 C, S. 92, ANLAGE 23) gefolgert werden kann. Auch ist nicht in jedem Vertaubungsbereich des Kaliflöz Hessen ein Vulkanit aufgeschlossen (Abbildung 36 A, S. 94, ANLAGE 24), sodass an unterschiedlichen Lokationen im Arbeitsgebiet ein Steckenbleiben des Vulkanits im Liegenden zu vermuten ist.

Mit Hilfe der geostatistischen Auswertung konnten regionale Unterschiede der Faziesverteilung herausgearbeitet werden (Abbildung 33, S. 90, Abbildung 35, S. 93). Dabei fällt die Häufung des Auftretens der Übergangsfazies Sylvinit über Carnallit im Kaliflöz Thüringen im östlichen Teil des Arbeitsgebietes (Kap. 5.3.4, ANLAGE 23) auf, die im Zusammenhang mit dem engen räumlichen Bezug zur Rhön und dem daraus resultierenden starken Einfluss des tertiären Vulkanismus zu sehen ist. Das einst carnallitisch ausgebildete Kaliflöz Thüringen wurde in diesem Bereich demzufolge sekundär umgewandelt (KOCH & VOGEL, 1980, [115]). Auch das Auftreten von Rinneit, das sich auf den östlichen Teil des Arbeitsgebietes beschränkt (ANLAGE 23), ist räumlich an die Vulkanite gebunden, was dessen Charakter als Sekundärmineral unterstreicht.

Demzufolge muss angenommen werden, dass im östlichen Teil des Arbeitsgebietes andere primäre, fazielle Ausbildungen vorhanden waren als im Westen. Das verstärkte Vorkommen von Hartsalz und Langbeinit im Niveau des Kaliflöz Thüringen im westlichen Teil des Arbeitsgebietes (Kap. 5.3.4, ANLAGE 23) wird demnach nicht als Ergebnis sekundärer Umwandlungen interpretiert. Die Annahme, dass die historisch gewachsenen Unterschiede in der Bezeichnung der Gesteine zu den vorliegenden Kartierergebnissen geführt haben könnte, muss verworfen werden, da auch in den westlichen Grubenbetrieben im zentralen Bereich des Werra-Beckens sylvinitische Fazies kartiert worden ist. Unter Berücksichtigung der geologischen Entwicklung während der Präzipitation der Kalisalze (Kap. 6.2.2) ist eine Einengung des westlichen Sedimentationsraumes denkbar, die dazu geführt hat, dass sich besonders Sulfat-haltige Wässer auf diesen westlichen Bereich beschränkten.

Auch lässt sich die konzentrische Anordnung der Langbeinitvorkommen mit keiner der in Kap. 6.2 beschriebenen Entwicklungsschritte des Arbeitsgebietes in Einklang bringen. Eine sekundäre Beeinflussung durch den tertiären Vulkanismus hätte sehr wahrscheinlich, analog zur Sylvinitisierung des Flözes, im Wesentlichen N-S gerichtete Strukturen erzeugt. Eine vergleichsweise engräumige N-S- bzw. E-W-Ausrichtung der durch Hartsalz- und Langbeinit geprägten Faziesbereiche im Südwesten des Arbeitsgebietes (Abbildung 34 G, S. 92) erscheint jedoch ebenso losgelöst von Vulkanitvorkommen und Störungen in Sub- und Suprasalinar (ANLAGE 23).

Die Beeinflussung des Kaliflöz Hessen durch die Vulkanite hat im Vergleich zum Kaliflöz Thüringen eher zur Vertaubung entlang der intrudierten Vorkommen geführt (ANLAGE 24). Allein im nördlichen Teil des östlichen Arbeitsgebietes sind sylvinitische Umwandlungsbereiche dokumentiert, die im Ergebnis einer vermutlich primären carnallitischen Ausbildung zu sehen sind. Die carnallitischen bzw. sylvinitischen Bereiche befinden sich in dem zentralen Teil des Werra-Beckens, der rezent als Hochlage ausgebildet ist (ANLAGE 26) und auch während der Ablagerung der Salze (Kap. 6.2.2) als Schwellenlage interpretiert wurde. Damit ergäben sich spezielle, regional begrenzte Präzipitationsbedingungen, die die im Arbeitsgebiet vergleichsweise seltene (Abbildung 35, S. 93) fazielle Ausbildung in diesem Niveau bedingen. Die Bildung von Carnallitit und Sylvinit wird u. a. mit einer Abkühlung der Salzlösung während der Präzipitation nahe der Wasseroberfläche in Verbindung gebracht (WARREN, 2006, [201]), was die These der Schwellenlage zusätzlich untermauert.

Aus der unterschiedlichen Verbreitung der Vertaubungs- und Sylvinitbereiche leitet sich ab, dass die Umwandlung durch die Fluide in unterschiedliche Richtungen unterschiedlich gewirkt haben muss (Kap. 5.3.4, ANLAGE 23). Während der Einfluss der Vulkanite auf die fazielle Ausprägung der beiden Kaliflöze eindeutig nachweisbar ist, kann die Faziesverteilung nicht in jedem Fall mit den Streichrichtungen von Störungen im Sub- und Suprasalinar korreliert werden (Kap. 5.3.4). In diesem Zusammenhang ist die bisher aufgefundene, herzyn verlaufende Sylvinitfazies im Bereich der Mansbach-Geblarsenke (Abbildung 48, S. 116, ANLAGE 23) auffällig. Diese wird von Störungen im Sub- und Suprasalinar umgrenzt, die eine lang aushaltende Verbindung der in diesem Bereich dokumentierten Vulkanitvorkommen darstellt. Diese Verbindung durch die Störungen im Subsalinar können potentielle Migrationswege von Wässern dargestellt haben, was zu einer weitläufigen, herzyn orientierten Sylvinitisierung geführt hat.

Aussagen zur Beschaffenheit der Salzbasis im Bereich des ENE-WSW verlaufenden „Sylvinitbandes“ im Niveau des Kaliflöz Thüringen im zentralen Teil des Werra-Beckens lassen sich unter Anwendungen des Analogieschlusses nur vermuten (ANLAGE 23). In diesem Bereich müssten weitere Erkundungen durchgeführt werden (Kap. 4.1.5), um einen genetischen Zusammenhang zwischen Störungen im Subsalinar und Faziesausbildung zu untersuchen.

Die Analyse der Mächtigkeitenvariationen und der Faziesverteilung des Kaliflöz Thüringen hat keinen Zusammenhang zwischen der Faziesausbildung und dessen Mächtigkeit nachgewiesen. Eine Volumenminderung des Kaliflöz Thüringen in Folge der Wegführung von Salzkomponenten (PIPPIG, 1992, [152]) lässt sich unter Berücksichtigung der

in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse demnach nicht bestätigen, wie anhand der ANLAGE 27 ersichtlich wird. Im Bereich der Sylvinitfazies ist keine generelle Mächtighkeitsreduktion des Kaliflöz Thüringen aushaltbar (Kap. 5.3.4).

Ein wesentliches Strukturelement ist die MKS, deren Funktion als Hochlage auch während des Zechstein fortbestand und dadurch die Ausbildung des Kaliflöz Hessen in diesem Bereich primär verhinderte (Kap. 6.2.2). Das zeigt sich aufgrund der Ausdünnung des Kaliflöz Hessen in östlicher Richtung (ANLAGE 26). Auch die Mansbach-Geblarsenke führte zur weiteren räumlichen Differenzierung des Kaliflöz Hessen. Hier sind wiederum Einflüsse der herzynen Störungen im Sub- und Suprasalinar zu vermuten, die sich auch in der faziellen Ausbildung zeigen (Abbildung 36 C, S. 94). Ebenso ist der Bereich des Übergangs von der MKS zur Sünnaer-Senke, in dem eine früh angelegte Schwächezone interpretiert wird (Kap. 6.2.1), die prominenteste Lokation, die einen Zusammenhang des Verlaufs der Isobathenlinien und dem faziellen Erscheinungsbild des Kaliflöz Thüringen (ANLAGE 25) nahelegen. Die fazielle Veränderung ist jedoch eher Ergebnis der vulkanischen Intrusion, sodass die Isolinien nur indirekt Hinweise auf die Schwächezone im Liegenden geben.

6.4 Wertstoffverteilung der Kaliflöze im Hinblick auf die geologische Entwicklung des Arbeitsgebietes

Entsprechend der faziellen Überprägung der Lagerstätte wären generelle Wertstoffanreicherungen bzw. –abreicherungen (Kap. 4.1.4.5) zu erwarten, die die jeweilige Gesteinszusammensetzung bzw. fazielle Ausbildung (Kap. 6.3) widerspiegeln. Allerdings wird anhand der Auswertungen der Wertstoffgehalte deutlich, dass es innerhalb einer jeden Fazies Zonen stark erhöhter bzw. reduzierter Wertstoffgehalte gibt (Kap. 5.3.5), die zunächst nicht anhand der anstehenden Gesteine erklärbar sind. Dies ist sowohl für die K_2O -Gehalte (ANLAGE 28, ANLAGE 30) als auch für die Kieseritgehalte (ANLAGE 29, ANLAGE 31) zu beobachten. Die Bereiche der An- und Abreicherungen sind zum einen über einige Quadratkilometer aushaltbar und zum anderen lokal begrenzt.

Im Kaliflöz Thüringen sind die K_2O -Gehalte der Carnallitfazies im Nordwesten des Arbeitsgebietes (ANLAGE 28, Abbildung 37 A, S. 95) im Vergleich zu den im Südosten dokumentierten mittleren K_2O -Gehalten (Abbildung 37 A, S. 95) weitflächig abgereichert. Dabei erreichen die Mächtigkeiten des Kaliflöz Thüringen in den beiden Bereichen mit ca. 5 m bis 25 m (ANLAGE 27) sehr ähnliche Werte, sodass ein Einfluss der jeweiligen Flözmächtigkeit auf diese großräumige Abreicherung ausgeschlossen wird. Zwar ist das Kaliflöz im Südosten des Arbeitsgebietes ca. 50 m tiefer als im Nordwesten, doch die Verteilung des Wertstoffgehaltes orientiert sich offensichtlich ebenso wenig an der Tiefenlage des Flözes (ANLAGE 25, ANLAGE 28) wie an den Mächtigkeiten.

Die Ursache für die großräumig unterschiedlichen K_2O -Gehalte des Carnallitits müsste demnach vielmehr in der Gesteinszusammensetzung liegen, die sich je nach Lokation im Werra-Becken, trotz einheitlicher Fazies, vermutlich primär unterschiedlich entwickelt hat. Diese Heterogenität wäre ebenfalls mit der Schwellenlage zu erklären, wie aufgrund der Dokumentation von Langbeinit im nordwestlichen Teil des Arbeitsgebietes bereits vermutet wurde (Kap. 6.3). Diese könnte auch die großflächig eher geringen bis durchschnittlichen Kieseritgehalte im Nordwesten erklären (ANLAGE 29, Abbildung 38 A, S. 97). Bei der Auswertung der Verteilung der Kieseritgehalte unter Einbeziehung des 3D-Strukturmodells wird ebenfalls ersichtlich, dass im Nordwesten des Arbeitsgebietes im Niveau des Kaliflöz Thüringen keine Korrelationen der Wertstoffgehalte mit der Mächtigkeit, der Tiefe oder tektonischen Strukturen besteht (Kap. 5.3.5).

Die K_2O -Gehalte innerhalb sylvinitischer Fazies (ANLAGE 28) des Kaliflöz Thüringen sind im Vergleich zur carnallitischen Fazies eher heterogen und engräumig variabel verteilt. Es kommen sowohl reduzierte bis stark reduzierte als auch stark erhöhte Gehalte nebeneinander vor. Dies spiegelt sich in der Angabe Spanne der K_2O -Gehalte von Sylvinit wider, die zwischen 10 % und 35 % liegt (WARREN, 2006, [201]), wobei die Kategorie der reduzierten bis stark reduzierten Gehalte ($< 8,1$ % K_2O) im Arbeitsgebiet als besonders gelten muss. Diese Art der Abreicherung ist innerhalb der heterogen verteilten K_2O -Gehalte in dieser Fazies eher lokal vertreten, was wahrscheinlich mit der lithologischen Ausbildung in Zusammenhang zu betrachten ist und daher ggf. an einen erhöhten Anteil an Halit gekoppelt sein könnte.

Eine weitere Besonderheit besteht in Bezug zu den in Kap. 5.3.5 beschriebenen Lokationen reduzierter K_2O -Gehalte innerhalb sylvinitischer Fazies im Einflussbereich von Vulkaniten. Hier treten Abreicherungen nicht in Form von Einzelwerten innerhalb einer heterogenen Verteilung auf, sondern gehäuft (Abbildung 37 B, S. 95). Unter Berücksichtigung des Zusammenhanges zwischen dem Vulkanismus und der Bildung von Sylvinit (KOCH & VOGEL, 1980, [115]) erschiene die sekundäre Beeinflussung der Wertstoffverteilung im Arbeitsgebiet logisch. Dabei wäre eine generelle Erhöhung der K_2O -Gehalte in sylvinitischer Fazies zu erwarten, wie sie sich im Nordwesten des Arbeitsgebietes andeutet (Abbildung 37 A, S. 95), jedoch keine Reduktion, wie sie im Bereich des Soisberges dargestellt ist (Abbildung 37 B, S. 95). Eine Korrelation einer bestimmten Kategorie an Wertstoffgehalten entlang der gesamten Ausdehnung eines Vulkanitvorkommens ist, wie schon in Kap. 5.3.5 beschrieben, nicht nachvollziehbar.

Die gehäuft auftretenden reduzierten K_2O -Gehalte innerhalb der sylvinitischen Fazies im Bereich des Soisberges korrelieren auffällig mit erhöhten Kieseritgehalten (Abbildung 38 B, S. 97). Die Umwandlung im Sinne einer Sylvinitisierung im Zuge des Vulkanismus (Kap. 3.2.3.2) scheint eine Beeinflussung der Wertstoffgehalte nach sich gezogen zu haben, was sich mit der Bildung kieseritischer Salze durch Tiefenwässer im Zuge postkretazischer Tektonik deckt (D'ANS & KÜHN, 1960, [27]). Diese ist jedoch nicht in allen sylvinitischen Bereichen nachvollziehbar. Auch können innerhalb carnallitischer Fazies Zonen starker Abreicherung ausgewiesen werden, wie sie im Nordwesten des Arbeitsgebietes bereits beschrieben wurden (Kap. 5.3.5). Dort befindet sich eine ca. 50 m breite bänderförmige Zone der starken Abreicherung direkt südlich eines kon-

zentrischen, von durchschnittlichen bis erhöhten Kieseritgehalten geprägten Bereichs, in dem die K_2O -Gehalte hingegen eher reduziert bis durchschnittlich dokumentiert sind. Das spricht für eine nachträgliche Differenzierung der Wertstoffgehalte, die jedoch nicht mit einer faziellen Überprägung im Zuge des Vulkanismus (Kap. 3.2.3.2) stattgefunden hat.

Das Phänomen der Korrelation hoher Kieseritgehalte und geringer K_2O -Gehalte bzw. umgekehrt lässt sich, trotz der überwiegend durch Hartsalz geprägten Ausbildung des Kaliflöz Hessen, auch dort nachvollziehen. Die K_2O -Gehalte des Kaliflöz Hessen zeigen entsprechend der überwiegend vorkommenden Hartsalzfazies vor allem allmähliche Übergänge im Vergleich zu den K_2O -gehalten des Kaliflöz Thüringen. Dies wird als Indiz für die primäre Verteilung der Gehalte im Zuge der Präzipitation der Kalisalze gewertet. So nimmt der K_2O -Gehalt von Nord nach Süd, mit zunehmender Annäherung an die Hochscholle von Wüstfeld (Kap. 6.2.2), sukzessive zu (Abbildung 39 B, S.99, ANLAGE 30), wobei im Bereich des in Teilen mit hereingewonnenen Begleitflözes entgegen des zunehmenden Trends vermehrt reduzierte und stark reduzierte K_2O -Gehalte dokumentiert worden sind. Ob diese vermeintliche Abreicherung mit der Tatsache begründet ist, dass zwischen Kaliflöz Hessen und Begleitflöz eine mächtige Steinsalzbank ausgebildet ist, oder doch das Ergebnis der primären Präzipitation müsste in systematischen Befahrungen und Detailkartierungen untersucht werden.

Die Anreicherung im Bereich sylvinitischer Fazies im Kaliflöz Hessen (Abbildung 39 C, S.99, ANLAGE 30), die sich durch die Häufung stark erhöhter K_2O -Gehalte auszeichnet, ist für Sylvinit nicht ungewöhnlich (Kap. 4.1.4.5). Die Häufung erhöhter und stark erhöhter K_2O -Gehalte innerhalb der Hartsalzfazies westlich des sylvinitischen Bereiches ist hingegen auffällig. Die großräumige Anreicherung im Kreuzungsbereich von Störungen im Subsalinar bzw. Suprasalinar mit dem Vulkanitvorkommen im Bereich des Soisberges ließe eine sekundäre Anreicherung der Kalisalze vermuten, die mit der Migration von Wässern während des Vulkanismus zusammenhängt. Belege hierzu kann das 3D-Strukturmodell nicht liefern. Zur Klärung bedarf es weiterführender mineralogischer und geochemischer Untersuchungen.

Im Ergebnis der Interpretation der Wertstoffgehalte und ihrer Verteilung lässt ich festhalten, dass

- sowohl primäre als auch sekundäre Wertstoffverteilungen für K_2O - und Kieseritgehalte abgebildet werden können,
- primäre Wertstoffverteilungen eher großflächig ausgebildet sind,
- sekundäre Wertstoffverteilungen eher lokal ausgebildet sind,
- in einigen Fällen für beide Kaliflöze eine Korrelation geringer K_2O -Gehalte und hoher Kieseritgehalte bzw. umgekehrt besteht,
- eine Korrelation der Wertstoffgehalte mit Tiefen und Mächtigkeiten der Kaliflöze im Arbeitsgebiet nicht, mit der Fazies und beschriebenen Strukturelementen teilweise nachvollzogen werden kann.

6.5 Gasimprägnationen

Die vielfach in den Vulkaniten beobachteten Pyroxen- und Olivinkristalle (KNIPPING, 1989, [110], REINHARDT, 2014, [157], SCHMAUCKS, 2015, [170], ANLAGE 38) werden als Ergebnis gravitativer Differentiation interpretiert (KNIPPING, 1991, [111]). Diese Differentiation führte demnach ebenso zu einer Anreicherung mobiler Komponenten wie H₂O und CO₂, wobei letzteres in der vorliegenden Arbeit unter besonderer Berücksichtigung untersucht worden ist.

Im Allgemeinen befinden sich die Gasimprägnationen³¹ vornehmlich im Niveau der Kaliflöze. Sie kommen in Form von Gasereignissen und Gas-Salz-Ausbrüchen in allen Fazies vor (Kap. 5.3.6.1). Die Horizonte des Unteren, Mittleren und Oberen Werra-Steinsalz sind kaum durch CO₂-Imprägnationen betroffen. In der Auswertung der Vielzahl von im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit durchgeführten untertägigen Befahrungen wurde deutlich, dass die Gasracheln, die als Folge von Gas-Salz-Ausbrüchen im Grubengebäude aufgeschlossen sind, vor allem am Top der Kaliflöze entwickelt sind. Das Steinsalz fungiert daher vermutlich als Barriere für die Gase, die während der Intrusion der Vulkanite vornehmlich im Niveau der Kalisalze eingedrungen sind. Das mag in der generell höheren Löslichkeit, geringeren Dichte und Festigkeit sowie anderer Permeabilität als auch weiteren unterschiedlichen thermomechanischen Gesteinseigenschaften der Kalisalze (KERN & FRANKE, 1986, [108]) im Vergleich zu Steinsalz begründet liegen.

Weiterhin wird im Ergebnis der Untersuchungen (Kap. 5.3.4, Kap. 5.3.6) angenommen, dass die Gasphase während der Intrusion mit hohem Druck in die Kaliflöze vor der Lösungsphase „hergetrieben“ worden sein muss. Das erklärt die Imprägnation des primär abgelagerten Carnallitits. Die carnallitische Fazies, die im Zuge des tertiären Vulkanismus nicht in Sylvinit umgewandelt worden war, scheint vermeintlich nicht beeinflusst. Die Gasereignisse, die im Carnallitit dokumentiert sind (ANLAGE 32), sind wahrscheinlich z. T. entlang von Schnitten migriert. Diese freien Gase äußern sich erfahrungsgemäß eher in Form von Gasbläsern (Kap. 4.1.4.4). Die inter- bzw. intrakristallin gebundenen Gase stehen hingegen in Verbindung mit den Gas-Salz-Ausbrüchen. Diese konnten auch im Carnallitit nachgewiesen werden (ANLAGE 33), was durch die vorausseilende Verbreitung der Gasphase vor der Lösungsphase erklärbar wäre.

Die Anzahl der Gasereignisse ist ohne weitere Zuordnungen von Eigenschaften aus dem jeweiligen Risswerk der Gruben (K+S AKTIENGESELLSCHAFT, 2013-2016, [90]) entnommen und kann als sehr verlässlich angesehen werden. In Bezug zur Größe der Gas-Salz-Ausbrüche muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass evtl. weitere Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorien 1 bis 4 vorhanden sind, die jedoch keine eindeutige Zuordnung von Koordinaten und Tonnagen zulassen (Kap. 4.1.4.4) und daher nicht in die Darstellungen (ANLAGE 33, ANLAGE 35) und Auswertung (Kap. 5.3.6.1, Kap. 5.3.6.2) eingeflossen sind. Daher darf an dieser Stelle zwar keine Überinterpretation erfolgen, doch können erste Ableitungen getroffen werden.

³¹ In Bezug zu CO₂

Aus der Verteilung der Häufigkeit der Gasereignisse wird deutlich, dass die in Bezug zu einer normierten Fläche meisten Gasereignissen im Kaliflöz Thüringen im Bereich von Vertaubungen vorkommen. Mit abnehmendem Anteil sind die durch sekundäre Umwandlung geprägten Fazies Sylvinit und Sylvinit über Carnallit durch Gasimprägnationen beeinflusst. Die geringere Beeinflussung kommt Carnallit zu. Die abnehmende Anzahl von Gasereignissen in dieser Reihenfolge der Fazies spiegelt die zunehmende Distanz von einem Vulkanitvorkommen wider. Dies suggeriert einen geringeren Einfluss der Gase mit zunehmender Entfernung zum Vulkanit (Kap. 5.3.6.1). Eine Sonderstellung nimmt die langbeinitische Fazies im westlichen Teil des Arbeitsgebietes ein. Hier wird eine primäre Ablagerung interpretiert (Kap. 6.2). In ANLAGE 32 und ANLAGE 33 wird deutlich, dass die Gasereignisse im Nordwesten des Arbeitsgebietes unabhängig von der Fazies vor allem im Umfeld der Vulkanite dokumentiert sind. Die sylvinitische Fazies ist im Nordwesten bedeutend geringer ausgeprägt als im Südosten des Arbeitsgebietes.

Ein möglicher Bezug zur Häufigkeit der Gasereignisse bzw. der z. T. ungleichförmigen Verbreitung der Häufigkeit im Umfeld von Vulkanitvorkommen lässt sich nicht mit der Tiefe der Kaliflöze in Verbindung bringen (ANLAGE 25, ANLAGE 26, ANLAGE 32, ANLAGE 34). Auch die starken Mächtigkeitenvariationen im Kaliflöz Thüringen korrelieren nicht mit der Verteilung der Häufigkeit der Gasereignisse (ANLAGE 27, ANLAGE 32). Es muss daher abgeleitet werden, dass nicht potentiell mehr oder weniger Gasereignisse in tieferen oder mächtigeren Bereichen der Kaliflöze vorkommen. Weiterhin lässt sich kein genereller Zusammenhang zwischen einer starken Häufung von Gasereignissen und dem Vorkommen von Gas-Salz-Ausbrüchen der Kategorie 4 feststellen (Kap. 5.3.6.1, Kap. 5.3.6.2). Das Antreffen einer Vielzahl von Gasereignissen in einer bestimmten Region kann demnach nicht als Indiz für oder gegen ein potentielles Ereignis der Kategorie 4 gelten.

Die Stärke der Gasimprägnationen, die generell mit der Häufigkeit der Gasereignisse einhergeht, ist daher vor allem in Bezug zur geographischen Entfernung von Vulkaniten, aber auch hinsichtlich der vorhandenen Fazies zu betrachten. Letzteres ist am Beispiel der vermehrten Häufigkeit von Gasereignissen im Bereich sylvinitischer und carnallitischer Fazies im Kaliflöz Hessen (L19³² in ANLAGE 34, ANLAGE 39) ableitbar. Dort war wahrscheinlich primär Carnallit ausgebildet, der im Vergleich zum Hart-salz stärker durch die Imprägnation beeinflusst wurde. Die Lage des Carnallit korreliert mit der Hochlage der Pferdsdorfer-Schwelle (Kap. 6.2.2), die ein entsprechendes Ablagerungsmilieu darstellte. Darüber hinaus ist in Bezug zur Position der Vulkanite in südöstlicher Richtung eine allgemeine Zunahme der Häufigkeit und der Größe der Gas-Salz-Ausbrüche dargestellt (ANLAGE 32, ANLAGE 33, ANLAGE 34, ANLAGE 35, ANLAGE 36). Diese stehen in Zusammenhang mit der Nähe zu den Vulkaniten der Rhön, allem voran dem Hohen Stern.

Die Dokumentation von Gas-Salz-Ausbrüchen der Kategorie 4 im westlichen Teil des Arbeitsgebietes im Niveau des Kaliflöz Hessen (L7 und L8 ANLAGE 35, ANLAGE

³² „L“ bezieht sich auf die Bezeichnung der in ANLAGE 32 - ANLAGE 39 gekennzeichneten bzw. beschriebenen Lokationen.

39) beweist jedoch, dass auch in einiger Entfernung zur Rhön Gas-Salz-Ausbrüche großer Intensität vorkommen. In diesem Fall scheint die Nähe zum Vulkanit Soisberg von Bedeutung für die starke Gasimprägation. Im südöstlichen Teil des Arbeitsgebietes sind im Niveau des Kaliflöz Hessen hingegen keine Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 4 dokumentiert. Diese sind aufgrund ihrer hohen Auswurfmengen von besonderer Bedeutung.

Unter Berücksichtigung der These, dass die Gasimprägation mit zunehmender Entfernung vom Vulkanitvorkommen in einer geringeren Anzahl von Gasereignissen resultiert, wäre anzunehmen, dass auch die Menge der Gase und somit die Größe der Gas-Salz-Ausbrüche zurückgehen müsste. Dennoch sind im Niveau des Kaliflöz Thüringen Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 4 auch in größerer Entfernung dokumentiert. Die Mehrzahl der untersuchten Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 4 im Kaliflöz Thüringen kommt im Bereich der Übergangsfazies Sylvinit über Carnallit bzw. in der sylvinitischen Fazies selbst vor (ANLAGE 33). Die Lokation L3 des Gas-Salz-Ausbruchs mit ca. 10.000 t Salzhautwerk ca. 200 m westlich eines Vulkanits im Carnallit erscheint, trotz der Dokumentation mehrerer Gasereignisse über eine Fläche von einigen hundert Quadratmetern, daher ungewöhnlich. Grund hierfür könnte der in der geochemischen Analyse (ANLAGE 38, ANLAGE 39) festgestellte vergleichsweise hohe Gehalt an volatilen Phasen im Gestein sein, die ein bereits stark mit Gasen angereichertes Magma suggeriert.

Daneben können weitere Besonderheiten im Zusammenhang mit Gasereignissen benannt werden. Das Vorkommen von Gasereignissen, ohne dass ein Vulkanit aufgeschlossen ist (L6 in ANLAGE 34, ANLAGE 39), ließe sich unter Berücksichtigung der These erklären, dass der Vulkanit im Liegenden „steckengeblieben“ ist (Kap. 6.3) bzw. dass Schnitte als Wegsamkeiten genutzt worden sind. Eine Erklärung fehlender Gasereignisse im Umfeld eines untertägig aufgeschlossenen Vulkanits (L10 in ANLAGE 34, ANLAGE 39), der nördlich und südlich zur Imprägation von Gasen geführt hat (L9 und L12 in ANLAGE 34, ANLAGE 39), ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich und bedarf weiterer Untersuchungen (Kap. 8). Auch müsste die festgestellte Korrelation der starken Häufung von Gasereignissen im Kreuzungsbereich von Vulkanitvorkommen und Störungen im Sub- und Suprasalinar in weiterführenden Arbeiten näher beleuchtet werden (Kap. 5.3.6.1).

6.6 Auswirkungen und Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse dieser Arbeit auf weitere Kalilagerstätten kann nur in sehr allgemeiner Form gelten. Synsedimentäre Anlagen wirken sich beispielsweise ebenso wie halokinetische und halotektonische Überprägungen auf die Tiefe und Mächtigkeit von Kalihorizonten aus. Die Beeinflussung der Kalisalze durch die Vulkanite in Bezug zur Fazies, Gasimprägationen und der Wertstoffgehalte ist lagerstätten-spezifisch differenziert zu bewerten. Kalilagerstätten mit Vulkanitvorkommen sind u. a. im Khorat Becken (Thailand) (HITE & JAPAKASETR, 1979, [74]) und der Salado-

Formation (New Mexico) (BROOKINS, 1981, [14], BROOKINS, 1986, [15]) bekannt. Deren lithologische Abfolge und mineralogische Ausbildung ist jedoch nicht uneingeschränkt mit der der Werra-Kalilagerstätte zu vergleichen. Die geochemische Untersuchung der Evaporite in der Salado-Formation an der Kontaktzone zu einem Lamprophyrgabbau ergaben, dass der chemische Austausch zwischen dem Vulkanit und dem evaporitischen Abfolge gering war (BROOKINS, 1981, [14]). Die Salze wurden ebenfalls durch flüssige und gasförmige Fluide beeinflusst, was allerdings auf die Kontaktzone beschränkt ist. Dies deckt sich mit den Auffahrungen im Niveau der Werra-Steinsalze, jedoch nicht mit denen im Bereich der Kaliflöze (ENGLER, 2012, [41]). Auch scheint eine Interaktion der miozänen Evaporitablagerungen nahe des Roten Meeres mit den dortigen Vulkanitintrusionen (WARREN, 2006, [201]) möglich. Dort wird jedoch derzeit kein Abbau betrieben, sodass die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit momentan nicht auf dieses Gebiet angewandt werden können.

Im Gegensatz zur Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf weitere Lagerstätten weltweit, lassen die Ergebnisse und Interpretationen der durchgeführten Untersuchungen Aussagen und Empfehlungen zu zukünftigen Abbaubereichen der Werra-Kalilagerstätte selbst zu. Geostatistische Betrachtungen in Kombination mit tektonisch strukturellen Merkmalen einer Lagerstätte können beispielsweise bei der Bewertung der Rohstoffmengen, der Abschätzung von Risikopotentialen und der Planung der ökonomischen Nutzung der Lagerstätte dienen. Die Auswertung der strukturellen und geologischen Entwicklung der Werra-Kalilagerstätte ermöglicht Rückschlüsse bzgl. synsedimentärer Hebungen und Senkungen innerhalb des Arbeitsgebietes (Kap. 6.1). Unter Berücksichtigung des erarbeiteten Wissensstandes lassen sich anhand von Analogien Aussagen für zukünftige Perspektivfelder ableiten. So ist die Mächtigkeit des Werra-Steinsalz im Perspektivfeld Marbach-Süd aufgrund der paläogeographischen, beckenrandnahen Lage im Zechsteinmeer (Kap. 3.2.1) geringer als im Bereich der bisherigen Auffahrungen, die beckenzentraler liegen.

Das 3D-Strukturmodell steht für weitere konkrete Abfragen zur Verfügung, sodass beispielsweise Bereiche verringerter Mächtigkeiten des Oberen und Unteren Werra-Steinsalz mit geringem Aufwand dargestellt werden können. Dies dient vor allem der Wahrung der notwendigen Barrieremächtigkeit gegenüber hangenden und liegenden wasserführenden Horizonten, die vor allem zum Ausgehenden der Lagerstätte, aber auch im Hinblick auf den Betrieb untertägiger Deponien und Verwertungen von großer Bedeutung sind. Der westliche Salzhang innerhalb des Arbeitsgebietes wurde steiler modelliert als der östliche Salzhang (ANLAGE 11), was sich wiederum in der vorhandenen Mächtigkeit widerspiegelt.

Es ist davon auszugehen, dass die in ANLAGE 25 und Kap. 6.2.1 beschriebene Schwächezone im Übergang von der MKS zur Sünnaer Senke, die sich sowohl in der Ausbildung der Fazies auswirkt als auch in den Isolinienplänen des Kaliflöz Thüringen nachvollziehbar ist, im Süden nicht minder schwach in Erscheinung tritt. Daher sind in zukünftigen südöstlichen Auffahrungen im östlichen Teil des Arbeitsgebietes sowohl weitreichende sylvinitische Fazies, als auch Vertaubungsbereiche zu erwarten. Der Abbau in diesem Bereich entwickelt sich auf einen Kreuzungspunkt zweier bedeutsamer

Störungen im Subsalinar hin, die zudem aufgrund der zunehmenden Nähe zur Rhön starke Gasimprägnationen vermuten lassen.

Eine Besonderheit ist die Störung im Übergang der Treischfeld-Schwelle und der Mansbach-Gebirgs Senke, die als verbindendes Element zu diversen Kreuzungspunkten mit Vulkaniten führt und daher nicht nur Wegsamkeiten für die Migration von Wässern schafft, wie anhand der Verbreitung der sylvinitischen Fazies ablesbar ist, sondern auch die Voraussetzungen für die verstärkte Schaffung von Wegsamkeiten für Vulkanite und somit von potentiellen Gasereignissen darstellt. Das 3D-Strukturmodell bietet also nicht nur einen Überblick über die komplexe Situation räumlicher Strukturen und Horizonte im Arbeitsgebiet, sondern verknüpft auch Eigenschaften, wie die Verteilung der Wertstoffgehalte und Gasereignisse bzw. Gas-Salz-Ausbrüche.

Im südlichen bzw. südöstlichen zukünftigen Abbaubereich der Gruben Unterbreizbach und Hattorf ist vor allem im Niveau des Kaliflöz Thüringen mit sylvinitischer Fazies zu rechnen, die mit einer starken CO₂-Imprägnation einhergeht (Kap. 5.3.6.1). Wie anhand der Untersuchung der Größe von Gas-Salz-Ausbrüche (Kap. 5.3.6.2) deutlich wird, ist dort von einer verstärkten CO₂-Imprägnation auszugehen. Sowohl für die Grube Unterbreizbach als auch für die Grube Hattorf ist in südlicher Abbaurichtung weiterhin generell mit weiteren Gasereignissen zu rechnen. Dabei ist eine wesentliche Feststellung der Untersuchungen, dass Gas-Salz-Ausbrüche der Kategorie 4 sowohl im Kaliflöz Thüringen als auch im Kaliflöz Hessen im gesamten Arbeitsgebiet vorkommen können. Dies gilt es im Zuge weiterer Auffahrungen zu berücksichtigen.

Darüber hinaus sind konkrete Empfehlungen zur weiterführenden Erkundung der Lagerstätte ableitbar. Generell sollte im Verlauf der Auffahrungen im Perspektivfeld Marbach ebenso wie in dem Perspektivfeld von Unterbreizbach auf die vorhandenen untertägigen Explorationsmethoden zurückgegriffen werden. Im Zuge der Vorfeldebetrachtungen sind das Erstellen von Untertagebohrungen sowie die Anwendung von Georadarerkundungen unerlässlich. Die Ergebnisse weiterer Erkundungen dienen der Konkretisierung des 3D-Strukturmodells, dass unter der Prämisse der Aktualität für weiterführende Erkundungstätigkeit und Abbauplanung herangezogen werden kann.

Im Bereich der südöstlichen und südlichen Grubenbaue von Unterbreizbach wird empfohlen, verstärkt untertägige Fernerkundungsmethoden anzuwenden. Mit Hilfe von Georadaruntersuchungen sind vor allem Lokationen von Vulkanitvorkommen und Salz-basis-Reflektoren im Vorfeld der Auffahrungen zu erkunden. Darüber hinaus werden vor allem mittelfristig weitere Geomagnetik-Kampagnen im Bereich des Perspektivfeldes Marbach-Nord empfohlen, um Vulkanitvorkommen frühzeitig zu erkennen.

Im Perspektivfeld Marbach sind bisher an strategischen Punkten 11 Tagesbohrungen abgeteuft worden, die Aufschlüsse zum Schichtpaket im Liegenden des Oberen Werra-Ton geben und sich vornehmlich auf den nördlichen Bereich des Perspektivfeldes konzentrieren. Es wird im Ergebnis der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse empfohlen, weitere Tagesbohrungen im Süden des Perspektivfeldes abzuteufen. Speziell entlang des Haunetals wird zukünftig eine verstärkte Erkundung empfohlen. Es wird vorgeschlagen, eine Tagesbohrung nördlich der prognostizierten Störung im Suprasalinar

niederzubringen. Dies würde Hinweise auf die Wirkungstiefe der sich in diesem Bereich anhand der geologischen Kartierung (GK25) und dem digitalen Geländemodell andeutenden Auslaugungssenke und darüber hinaus Informationen zur tatsächlichen Tiefe und dem Zustand der Salzbasis geben.

Weiterhin bieten Tagesbohrungen den Vorteil, dass bereits im Vorfeld einer untertägigen Streckenauffahrung neben gebirgsmechanischen Informationen auch Kenntnisse im Hinblick zur faziellen Beschaffenheit der Kaliflöze gewonnen werden können. Im Übergang des Perspektivfeldes Marbach-Nord zu Marbach-Süd sollte auf das Abteufen einer weiteren Tagesbohrung im Bereich des intakten Salinars verzichtet werden, um die Entwicklung der bergmännischen Auffahrungen in diesem Bereich nicht weiter zu beschränken. Es wird empfohlen, in diesem Bereich seismische Untersuchungen unter Einbeziehung vorhandener Tagesbohrungen durchzuführen, um die Tiefe der Reflektoren möglichst korrekt darzustellen.

Aus wissenschaftlicher Sicht wäre die weitere seismische Erkundung sinnvoll, um mit fortentwickelten Untersuchungsmethoden die Informationsdichte, vor allem südlich der Hochscholle von Buchenau (Kap. 4.1.6), zu erhöhen und an die Seismikuntersuchungen von 2001 anzuknüpfen. In Bezug zur optimalen Einschätzung zu Reflektorverläufen und Horizontentwicklungen in größerer Tiefe wäre eine 3D-Seismik zu empfehlen. Die Tiefen der Reflektoren bestehender Seismik-Kampagnen weisen z. T. große Diskrepanzen auf, die von den Ergebnissen Tagesbohrungen um einige Zehnermeter abweichen.

Im Übergang des Perspektivfeldes Marbach-Nord nach Marbach-Süd ist im Umfeld des Rombachs ein herzyner Einschnitt des Salzhangs dokumentiert. Dort ist aufgrund der Tiefenlage der Salzbasis und der geringen Salzmächtigkeiten (ANLAGE 15) von dem Vorhandensein einer weiteren Hochscholle auszugehen. Diese würde mit einer Subrosion im Deckgebirge (GK25) korrelieren und damit eine Analogie zur Eitrataltörung bzw. der Hochscholle von Buchenau darstellen. Dabei sind Mächtigkeiten des Werra-Steinsalz von ca. 250 m im Übergang des Perspektivfeldes Marbach-Nord nach Marbach-Süd modelliert worden. Wie stark die Subrosion das Steinsalz tatsächlich beeinflusst, ist anhand der bisherigen Erkundung jedoch nicht abzuschätzen.

Die Bedeutung der Kenntnis von Störungszonen im Subsalinar wird offensichtlich, wenn die möglichen Auswirkungen dieser auf das Salinar berücksichtigt werden. Dies wird im Vergleich zweier untertägiger Erkundungsbohrungen deutlich. Eine Bohrung (Abbildung 53 A, S. 141) zeigt das Werra-Karbonat im Liegenden des Unteren Werra-Anhydrit. Das Karbonat besteht aus dunkelgrauem massigem Kalkstein, der teilweise von mit Kalzit verheilten Klüften unterschiedlicher Streichrichtungen durchzogen ist. Die Klüfte im Werra-Karbonat belegen die Migration von Wässern. Der in der gleichen Bohrung dokumentierte scharfe Übergang vom Unteren Werra-Anhydrit zum Unteren Werra-Steinsalz zeigt jedoch, dass diese Wässer keinen Einfluss auf das leicht lösliche Steinsalz hatten (Abbildung 53 B, S. 141).

Im Gegensatz dazu ist in einer weiteren Erkundungsbohrung (Abbildung 53 C, S. 141), die nahe einer Störung des Subsalinars abgeteuft wurde, nur Bohrklein im Niveau des Unteren Werra-Steinsalz erhalten.

Dieses weist idiomorphe Gipskristalle mit Kantenlängen von bis zu ca. 5 cm auf. Die Mächtigkeit des Werra-Anhydrit beträgt dort ca. 9,0 m. Es liegt nahe, dass es sich bei diesem Aufschluss um eine Durchfeuchtungszone handelt, die auf die Störung des Sub-salinars zurückzuführen ist. Im Ergebnis dieser Beobachtung ist vor allem die tektonischen Auswertung und Modellierung des Unteren Werra-Anhydrit für zukünftige Auf-fahrungen von Bedeutung.

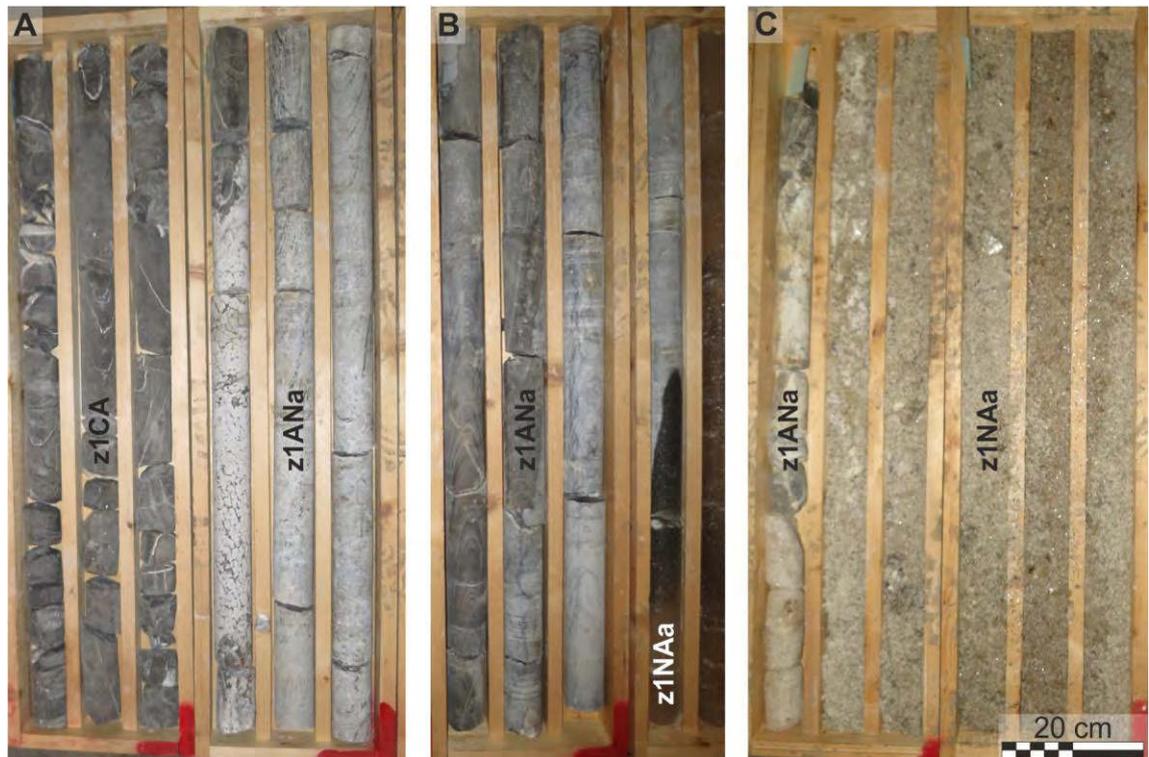


Abbildung 53 Unterer Werra-Anhydrit in den untertägigen Erkundungsbohrungen Hz 116/01 (A, B) und Hz 113/99 (C)

7 Zusammenfassung

Mit dem Ziel, die seit über 120 Jahren gewonnenen vielfältigen geologischen Informationen der Werra-Kalilagerstätte zur Ableitung geologischer Zusammenhänge zusammenzuführen, wurde ein 3D-Strukturmodell erstellt. Dieses bezieht das Subsalinar, Salinar und Suprasalinar ein und bietet die Möglichkeit, Potentiale und Risiken abzuschätzen, was ein Beitrag zur nachhaltigen Lagerstättennutzung ist.

Unter Einbeziehung und Aufbereitung von den in Kapitel 4 beschriebenen

- übertägigen und untertägigen Bohrungen,
- Fernerkundungsergebnissen,
- Georadarmessergebnissen,
- seismischen Messergebnissen,
- eigens durchgeführten über- und untertägigen Geländekampagnen,
- Informationen aus Magnetik-Kampagnen

und

- Informationen aus bestehenden Isolinien- und Fazieskarten

wurde eigens eine komplexe geologische Interpretation des Werra-Kaligebietes unter Berücksichtigung diverser Untersuchungsverfahren vorgelegt. Auf Basis des wissenschaftlichen Kenntnisstandes zum Werra-Kaligebiet (Kap. 3) und technisch fortentwickelter Erkundungsmethoden (Kap. 4.1.5, Kap. 4.1.6) wurden Daten unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Herkunft zusammengetragen, geprüft und aufbereitet (Kap. 4.1), um sie zur Erstellung des geologischen 3D-Strukturmodells zu verwenden. Einzelne Schritte der Modellierung sowie die Überarbeitung der Datengrundlage sind in Kapitel 4.2 eingehend beschrieben. Mit Hilfe des Programms Paradigm SKUA[®] sind die aufbereiteten Daten in ein geologisches 3D-Strukturmodell überführt worden (Kap. 5.1), das im Ergebnis insgesamt 18 Horizonte und eine Vielzahl Störungen beinhaltet. Das 3D-Strukturmodell, das in sich konsistent und plausibel ist (Kap. 5.2), dient als Grundlage der geologischen Auswertung mittels der Erstellung ausgewählter Isobathen- und Isopachenpläne sowie diverser geologischer Profile durch das Werra-Kaligebiet (Kap. 5.3.1, Kap. 5.3.2, Kap. 5.3.3). Die während der Modellierung andauernde Überprüfung des Strukturmodells wurde durch eine Vielzahl von untertägigen Befahrungen sowie übertägiger Geländekampagnen unterstützt.

Mit Hilfe von Fazieskarten der beiden Kaliflöze konnten ebenfalls strukturelle und geostatistische Untersuchungen vorgenommen werden (Kap. 5.3.4), die unter anderem die Wertstoffverteilung von Kaliumoxid und Kieserit innerhalb der Lagerstätte berücksichtigt (Kap. 5.3.5) und die Herstellung von Beziehungen zu Strukturelementen im Sub- und Suprasalinar ermöglicht.

Ergebnisse zu Gasereignissen und Vulkanitvorkommen innerhalb des Arbeitsgebietes sind in Kapitel 5.3.6 dargestellt. Erstmals wurde nicht nur die Verteilung der Häufigkeit der Gasereignisse in den jeweiligen Kaliflözen beschrieben, sondern auch eine geosta-

tistische Untersuchung der Größe von Gas-Salz-Ausbrüchen in Bezug zu Fazies, Mächtigkeit und Teufe der Kaliflöze durchgeführt.

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse folgender Themenbereiche darstellen:

1) Ableitung zur Senkungsentwicklung des Arbeitsgebietes

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit bestätigen und präzisieren die bereits in der Literatur dargestellte, generelle Senkung des Werra-Kaligebietes von Beginn des Zechstein bis hin zur Ablagerung der Sedimente des Muschelkalk. Dabei stellt die Ablagerung der Sedimente und Salze der Werra-Formation eine Phase hoher Senkungsraten dar, was mit der marinen Transgression nach Süden korreliert. Im weiteren Verlauf des Zechstein bestätigen sich geringere Senkungsraten, die in der sukzessiven Regression des Zechsteinmeeres begründet sind. Die während der Trias andauernde Senkung des Arbeitsgebietes war durch im Vergleich zum ausgehenden Zechstein höhere Senkungsraten während des Buntsandstein und einer geringeren Senkungsraten zur Zeit des Muschelkalk geprägt.

2) Differenzierte geologische Entwicklung des Arbeitsgebietes unter Berücksichtigung einzelner Strukturelemente

Mit Hilfe der aus dem 3D-Strukturmodell abgeleiteten Isobathen- und Isopachenpläne sowie geologischen Profile durch das Arbeitsgebiet wurden zunächst geologische Elemente ausgewiesen. Diese sind z. T. aus der Literatur bekannt und konnten darüber hinaus in ihrem Verlauf präzisiert werden. Weiterhin wurden auch neue Elemente bestimmt. Die Entwicklung aller Strukturelemente, die neben Störungszonen auch Schwellen und Senken beinhalten, wurde in Einklang der in Kapitel 3 beschriebenen paläogeographischen und paläotektonischen Entwicklung der Werra-Kalilagerstätte interpretiert.

Zu Beginn des Zechstein war das Arbeitsgebiet durch NW-SE und NE-SW streichende Schwellen und Senken vorkonturiert, die durch Schwächezonen begleitet waren. Diese sollten sich im weiteren Verlauf der geologischen Entwicklung zu Störungszonen entwickeln, die die Lagerstätte nachhaltig beeinflussten.

Dies lässt sich bereits im weiteren Verlauf des Zechstein anhand der Präzipitation der Stein- und Kalisalze der Werra-Formation ableiten, die Hinweise auf synsedimentäre Senkungen bzw. Hebungen im Arbeitsgebiet zulassen. Die Strukturen im Salinar selbst spiegeln den variszischen Bauplan des Subsalinars wider. Die Verbreitung des Obersten Werra-Steinsalz korreliert mit den Verläufen von Senken, z. T. aber auch mit dem Verlauf von im Subsalinar interpretierten Störungszonen, was auch nach Ablagerung des stratigraphischen Abschnittes vom Unteren bis zum Oberen Werra-Steinsalz die Differenzierung von Sedimentationsräumen zulässt. Auffällig ist die hohe Zahl an erzgebirgischen und herzynen Strukturelementen, die sich im jüngeren Zechstein abzeichnen. Diese spiegeln die bereits aus der Literatur bekannten, vorherrschenden Paläostressrichtungen zu dieser Zeit wider.

Während des Buntsandstein wurden bevorzugt Senken aufgefüllt, was an diesen Stellen zu erhöhten Überdeckungen führte. Die dadurch erhöhte Auflast wurde durch den plastisch reagierenden stratigraphischen Abschnitt vom Unteren Werra-

Steinsalz bis zum Oberen Werra-Steinsalz aufgrund von Halokinese ausgeglichen. Damit ging eine teilweise Zergliederung von größeren Elementen einher.

Die geologische Entwicklung während des Jura und der Kreide ist durch wechselnde Paläostressfelder geprägt, die auf das Arbeitsgebiet einwirkten. Jene wurden zumeist anhand von Literaturquellen zum näheren Umfeld des Werra-Kaligebietes abgeleitet, da im Arbeitsgebiet selbst keine Gesteine dieses Alters erhalten sind.

In die Zeit des Jura fällt beispielsweise die Ablaugung der Salze im Bereich der Treischfeld-Schwelle unter Ausbildung des südlichen Salzhangbereichs. Die Schwelle verliert im Suprasalinar die Bedeutung als Antiklinale. Es bildete sich eine Senke, die mit dem heutigen Bereich der sog. Spahl-Eiterfelder Mulde korreliert.

Es erfolgten sowohl im Jura als auch in der Kreide, neben kleinräumigen Senkungen, Hebungen, in deren Folge weitflächige Erosion triassischer Sedimente stattfand. Dabei erfolgte eine Zergliederung des Suprasalinars in verschiedene Schollen, die aufgrund der Ausgleichsbewegungen der viskoplastisch reagierenden Salze auf diesen glitten und z. T. rotierten. Dies ist anhand der Streichrichtungen von Störungen im Sub- und Suprasalinar ableitbar. In diesem Zusammenhang wurde die besondere Entwicklung der Eitratel-Störung dargestellt.

Mit dem im Tertiär datierten Vulkanismus ist nicht nur eine weitere Veränderung der Paläostressrichtung darstellbar, sondern wurde auch eine in dieser Form einzigartige, untertägig aufgeschlossene Störung im Niveau der Salze im Hinblick auf die geologische Entwicklung im Tertiär diskutiert. Diese ist darüber hinaus auch Ausgangspunkt von Subrosionen innerhalb des Arbeitsgebietes.

3) Fazielle Ausbildung der Kaliflöze in Bezug zu der geologischen Entwicklung des Arbeitsgebietes

Neben den bereits aus der Literatur bekannten Einflüssen auf die fazielle Entwicklung der Kaliflöze im Arbeitsgebiet, die vor allem in Bezug zu den offensichtlichen Umbildungen im Zusammenhang mit intrudierten Vulkanitvorkommen stehen, sind neben sekundären auch primäre Faziesausbildung untersucht worden. Diese wurden im Kontext mit der differenzierten geologischen Entwicklung des Arbeitsgebietes bewertet, wobei in einigen Fällen Beziehungen zu Streichrichtungen von Störungen im Sub- und Suprasalinar hergestellt werden konnten. Korrelationen der Fazies mit der Mächtigkeit der Kaliflöze konnten nicht bestätigt werden.

4) Wertstoffverteilung der Kaliflöze im Hinblick auf die geologische Entwicklung des Arbeitsgebietes

Für die Verteilung der Wertstoffgehalte im Arbeitsgebiet wurden sowohl für Kaliumoxid als auch für Kieserit Beziehungen zu der faziellen Ausbildung, den Tiefen und Mächtigkeiten der Kaliflöze untersucht. Die Verteilung des Wertstoffgehaltes orientiert sich offensichtlich ebenso wenig an der Tiefenlage der Kaliflöze wie an deren Mächtigkeiten. Mit der Fazies und einigen beschriebenen Strukturelementen können teilweise Korrelationen nachvollzogen werden. Es wurden ebenso großflächige Bereiche reduzierter bzw. erhöhter Gehalte ausgewiesen, wie solche lokaler An- und Abreicherungen. Besonders auffällig sind lokale Bereiche reduzierter K_2O -

Gehalte, die in ihrer Verbreitung mit erhöhten Kieseritgehalten korrelieren und umgekehrt. Dieses Phänomen ist sowohl im Kaliflöz Thüringen als auch im Kaliflöz Hessen nachvollziehbar, wobei eine abschließende Erklärung hierfür im Rahmen dieser Arbeit nicht gegeben werden kann.

5) Gasimprägnationen

Im Zuge gravitativer Differentiation von Magmen erfolgte die Anreicherung von mobilen Komponenten, zu denen auch Kohlenstoffdioxid zählt, das für die bergmännische Gewinnung der Kalisalze von entscheidender Bedeutung ist. Im Ergebnis der Untersuchungen wurde angenommen, dass die Gasphase während der Intrusion mit hohem Druck in die Kaliflöze vor der Lösungsphase, die zur faziellen Überprägung beigetragen hat, „hergetrieben“ wurde. Neben dem eigentlichen Vorgang der Imprägnation wurden geostatistische Analysen in Bezug zur Verteilung der Häufigkeit der Gasereignisse sowie der Größe von Gas-Salz-Ausbrüchen vorgenommen.

Aus der Verteilung der Häufigkeit der Gasereignisse wird deutlich, dass die in Bezug zu einer normierten Fläche meisten Gasereignissen im Kaliflöz Thüringen im Bereich von Vertaubungen vorkommen. Mit abnehmendem Anteil sind die durch sekundäre Umwandlung geprägten Fazies Sylvinit und Sylvinit über Carnallit durch Gasimprägnationen beeinflusst. Die geringere Beeinflussung kommt Carnallit zu. Die abnehmende Anzahl von Gasereignissen in dieser Reihenfolge der Fazies spiegelt die zunehmende Distanz von einem Vulkanitvorkommen wider.

Die Verteilung der Häufigkeit der Gasereignisse lässt sich nicht in Bezug zur Tiefe oder Mächtigkeit der Kaliflöze bringen. Dagegen liegt die Beeinflussung durch geologische Strukturelemente nahe. Diese wurde im Kontext mit vorliegenden geochemischen und mineralogischen Untersuchungen der Vulkanite bewertet.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Kalilagerstätten ist nur eingeschränkt möglich, da verschiedene Lagerstätten durch unterschiedliche Lagerung, lithologische Abfolge, mineralogische Zusammensetzungen etc. geprägt sind. Eine Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf die zukünftig zu gewinnende Lagerstättenteile des Werra-Kaligebietes ist im Sinne von Analogieschlüssen durchaus möglich. Weiterhin können konkrete Hinweise zur Erkundung gegeben werden.

Im Verlauf der wissenschaftlichen Bearbeitung zum vorliegenden Thema konnten die eingangs genannten Fragestellungen beantwortet werden. Darüber hinaus sind naturgemäß neue Fragen aufgeworfen worden, die im Rahmen der Bearbeitung nur in Ansätzen geklärt werden konnten. Daraus leitet sich der nachfolgend formulierte Ausblick ab (Kap 8).

8 Fazit und Ausblick

Das bestehende geologische 3D-Strukturmodell der Werra-Kalilagerstätte bildet den Datenbestand bis Ende des Jahres 2014 ab und gibt einen Überblick über ein großräumiges Arbeitsgebiet. Dabei sind beliebige Eingangsdaten und modellierte Flächen im dreidimensionalen Raum darstellbar und in zweidimensionaler Form exportierbar. Mit fortschreitender Dauer der Gewinnung von Rohsalzen erreichen die Abbaue zunehmend Grenzbereiche der Lagerstättenausdehnung. Vor diesem Hintergrund ist eine Abwägung von Risiken und Potentialen von größer werdender Bedeutung. Daher wäre in Zukunft eine Verfeinerung des Modells im Bereich des Salzhangs anzustreben. Höhere Auflösungen waren nicht mit der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Rechnerleistung vereinbar, wären aber im Hinblick auf die Grundlagendaten durchaus denkbar und sollten vor allem in kleineren Teilgebieten genutzt werden. Auf diese Weise ist eine größere Genauigkeit der Flächen und damit einhergehend eine optimierte Aussagekraft erreichbar. Um das Modell zukünftig aktuell zu halten, sollten weitere Daten, die seither erhoben worden sind, im Modell gepflegt werden.

Es wäre darüber hinaus möglich, die Auffahrungen, die bisher als Umring im Modell integriert sind, höhengerecht einzuarbeiten, um im Zuge der Abbauplanung alle notwendigen geologischen Informationen lagegetreu im Hangenden bzw. Liegenden darstellen zu können. Störungen und Flözverläufe im Umfeld wären in einer 3D-Ansicht in kurzer Zeit abrufbar. Weiterhin wäre eine Ausweitung des 3D-Modells auf die Grube Wintershall im Norden des Arbeitsgebietes denkbar, da sich dort weitere Abbaubereiche befinden.

Außerdem ist die Darstellung von Gehalten und deren Verteilung Grundlage für die Berechnung von Reserven und Ressourcen. In Kombination mit weiterführender Bergbauplanungssoftware können Bauscheiben für den zukünftigen Abbau generiert werden.

Neben dem Risiko von Gas-Salz-Ausbrüchen bestimmen auch Salzlösungsvorkommen das Abbaugeschehen. Unter Berücksichtigung der Lokation könnten analog zu der Untersuchung der Gasvorkommen Eigenschaften der Salzlösungsvorkommen, wie geochemische Entwicklung oder Zuflussraten, im Zusammenhang mit dem 3D-Strukturmodell untersucht werden. Dazu wäre eine räumliche Zuweisung der Informationen der vorhandenen Lösungskataster notwendig. Gegebenenfalls können Verbindungen zu Strukturelementen hergestellt werden.

Zur Klärung der offenen Fragestellungen im Zusammenhang mit Gasimprägnationen bzw. deren räumlicher Verteilung in Bezug zu Schnitten oder der Fazies wären systematische Fluid-Inclusion Untersuchungen zu empfehlen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] ABRATIS, M., MÄDLER, J., HAUTMANN, S., LEYK, H.-J., MEYER, R., LIPPOLT, H. J. & VIERECK-GÖTTE, L.: *Two distinct Miocene age ranges of basaltic rocks from the Rhön and Heldburg areas (Germany) based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step heating data* : *Chemie der Erde* 67 (2007), S. 133–150
- [2] ADV: *Produktstandard für Digitale Geländemodelle (ATKIS - DGM). Version 2.2.* 23.02.2017, 6 Seiten
- [3] AHORNER, L. & SOBISCH, H.-G.: *Ein untertägliches Überwachungssystem Kalibergwerk Hattorf zur Langzeiterfassung von seismischen Ereignissen im Werra-Kaligebiet : Kali und Steinsalz, Band 10* (1988), Nr. 2, S. 38–49
- [4] ARNDT, D.: *Geologische Strukturmodellierung von Hessen zur Bestimmung von Geopotenzialen.* Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Material- und Geowissenschaften. Dissertation. 2012
- [5] BECKER, F.: *Zechsteinkalk und Unterer Werra-Anhydrit (Zechstein 1) in Hessen : Fazies, Sequenzstratigraphie und Diagenese.* Wiesbaden, 2002
- [6] BEER, W. & KLUGE, S.: *Grundwasserspiegelmessungen zur Überwachung der Salzabwasserversenkung im Werra-Kaligebiet : Kali und Steinsalz Glückauf* 135 (1999), Nr. 12, S. 823–827
- [7] BERTHELSEN, A., BUROLLET, P., DAL PIAZ, G. V., FRANKE, W. & TRÜMPY, R.: *A Continent revealed : The European Geotraverse.* Atlas of compiled data - Tectonics. 1992
- [8] BESSERT, F.: *Geologisch-petrographische Untersuchungen der Kalilager des Werragebietes : Archiv für Lagerstättenforschung* (1933), Nr. 57
- [9] BGR; SIEMON, B. (Mitarb.); IBS-VON SEHT, M. (Mitarb.); VASTERLING, M. (Mitarb.); ULLMANN, A. (Mitarb.); VOß, W. (Mitarb.); PIELAWA, J. (Mitarb.) : *Technischer Bericht zur Befliegung Heringen (Werra), Mai–Juli 2008.* unveröffentlichter Bericht. 15.04.2009
- [10] BORCHERT, H.: *Ozeane Salzlagerstätten: Grundzüge der Entstehung und Metamorphose ozeaner Salzlagerstätten sowie des Gebirgsverhaltens von Salzgesteinsmassen.* Berlin-Nikolassee : Gebrüder Bornträger, 1959
- [11] BORCHERT, H.: *Der Wasserhaushalt bei der Metamorphose der Kalisalze.* In: *Berichte Geol. Ges. Sonderheft 1* (1963), S. 145–194
- [12] BORG, G., PIESTRZYNSKI, A., BACHMANN G. H., PÜTTMANN, W., WALTHER, S. & FIEDLER, M.: *An Overview of the European Kupferschiefer Deposits : Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication 16* (2012), S. 455–486
- [13] BRAITSCH, O.: *Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten.* Berlin, Göttingen, Heidelberg : Springer, 1962 (Mineralogie und Petrographie in Einzeldarstellungen 3)

- [14] BROOKINS, D. G.: Geochemical study of a lamprophyre dike near the WIPP site. In: MOORE, J. G. (Hrsg.): *Scientific basis for nuclear waste management*. 3. Aufl. New York : Plenum Press, 1981, S. 307–313
- [15] BROOKINS, D. G.: *Natural analogues for radwaste disposal: elemental migration in igneous contact zones*. In: *Chem. Geol.* 55 (1986), S. 337–344
- [16] BÜCHEL, G., BURGHARDT, Th., LONSCHINSKI, M., LÜTZNER, H. & PUDLO, D.: *Plausibilitätsanalyse und Neukartierung von Störungen im Modellgebiet Werra*. Kassel, Jena, 01.01.2012
- [17] BÜCKING, H.: *Erläuterungen zur geologischen Specialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten - Blatt Altenbreitungen (Nr. 5227 Bad Salzungen Süd / Immelborn)*. Berlin : 1889, 21 Seiten
- [18] BÜCKING, H.: *Geologische Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern - Blatt Friedewald (Nr. 5125)*. Berlin : 1921
- [19] BÜCKING, H.: *Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern - Blatt Vacha, Nr. 2990 (Nr. 5126 Vacha)*. Berlin : 1925, 43 Seiten
- [20] BÜCKING, H.: *Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern - Blatt Lengsfeld (Nr. 5226 Stadtlengsfeld)*. Berlin : 1926, 43 Seiten
- [21] BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE & STAATLICHE GEOLOGISCHE DIENSTE: *Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:200.000 (GÜK200) : Kartenblatt CC 5518 Fulda*. Hannover, 1988
- [22] BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE & STAATLICHE GEOLOGISCHE DIENSTE: *Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:200.000 (GÜK200) : Kartenblatt CC 5526 Erfurt*. Hannover, 1998
- [23] *Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. | S. 1310), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 20. Juli (BGBl. | S. 2808) geändert worden ist* (idF v. Zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 4 G v. 20. 7. 2017 | 2808) (1980-08-13). URL <https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/BBergG.pdf> – Überprüfungsdatum 2018-08-12
- [24] BURCHERT, U., FRITZE, F., GILCH, W., GRIESBACH, H., LÖWE, K., NIQUET, P. & ROHLEDER, R.: *Grundprojekt für die Vorbereitungen zur hydrodynamischen Erkundung der Gerstunger Mulde*. 01.01.1984
- [25] CARLOWITZ, H. C. von: *Sylvicultura oeconomica : Anweisung zur wilden Baumzucht*. Reprint der Ausg. Leipzig, Braun, 1713 / bearb. von Klaus Irmer und Angela Kießling. Freiberg, Freiberg : TU Bergakad; Akad. Buchh, 2000
- [26] CHERPEAU, N., CAUMON, G. & LEVY, B.: *Stochastic simulations of fault networks in 3D structural modeling*. In: *Comptes Rendus Geosciences* 342 (2010), Nr. 9, S. 687–694

- [27] D'ANS, J. & KÜHN, R.: *Bemerkungen zur Bildung und zu Umbildungen ozeaner Salzlagerstätten*. In: *Kali und Steinsalz* 3 (1960), S. 69–84
- [28] DEPPE, S. & PIPPIG, M.: *Erkundung und Maßnahmen zur Beherrschung der Salzlösungszuflüsse im Grubenfeld Merkers*. In: *Kali und Steinsalz* (2002), S. 40–49
- [29] DIETRICH, A. & STAHL, I.: *Neuere Entwicklungen im Bereich der K2O-Online-Analytik* : *Kali und Steinsalz* (2003), Nr. 2, S. 18–25
- [30] DIETZ, C.: *Einflüsse der Tektonik auf die Auslaugung im Gebiete des Werra-Kalireviere* : *Sitzungsberichte der geologischen Landesanstalt* (1926), Nr. 1, S. 41–47
- [31] DIETZ, C.: *Die Salzlagerstätte des Werra-Kaligebietes*. Berlin : 1928, 129 Seiten
- [32] DITTRICH, E.: *Zur Gliederung der Werra-Serie (Zechstein 1) im Werra-Kaligebiet*. In: *Berichte Geol. Ges. der DDR* 6 (1962), S. 296–301
- [33] DITTRICH, E.: *Bearbeitungsnachweis Projektstudie UGS Gerstungen*. Interner Bericht. 01.01.1979
- [34] DOCKTER, J. & LANGBEIN, R.: Keuper. In: SEIDEL, G. (Hrsg.): *Geologie von Thüringen*. 2. Aufl. Stuttgart : Schweizerbart'sche Verlagsbuchh., 2003, 357–391
- [35] DÖHNER, Ch., ELERT, K.-H., KOCH, K. & MÖTZINGER, R.: Gegenüberstellung unterschiedlicher Umbildungsprozesse im Kaliflöze Staßfurt der DDR. In: *Report XXIII. Sess. Internat. Geol. Congr.* 8, 1968
- [36] DSK: *Zum Genitiv-s in strigraphischen Termini*. 2009. URL www.straigraphie.de/perm-trias/genitiv_s.html
- [37] DSK: *Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2017*. Potsdam : 2017
- [38] ELLENBERG, J.: *Auslaugung und Sedimentation im Gebiet von Gerstungen* : *Mitteilung aus dem Zentralinstitut Physik der Erde*. In: *Geologie* 21 (1972), Nr. 3, S. 295–304
- [39] ELLENBERG, J.: *Die Subrosion im Werra-Kaligebiet der DDR, quartärgeologische, geomorphologische und tektonische Aspekte* : *Z. geol. Wiss* 10 (1982), Nr. 1, S. 61–71
- [40] ELLENBERG, J.: *Exkursion B2: Struktur- und Landschaftsgeschichte der Rhön und Südwestthüringens*. In: LÜTZNER, H. (Hrsg.): *Regionale Geologie von Mitteleuropa. Exkursionsführer zur 149. Hauptversammlung des DGG*, 1997
- [41] ENGLER, A.: *Bewertung der Ausbildung und Mächtigkeit des Abschnittes vom Oberen Werra-Ton (z1Tb) bis zum Leine-Karbonat (z3CA)*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Masterarbeit. 2012-11-01
- [42] ERNST, W.: Jura. In: SEIDEL, G. (Hrsg.): *Geologie von Thüringen*. 2. Aufl. Stuttgart : Schweizerbart'sche Verlagsbuchh., 2003, S. 392–399
- [43] FEIST-BURKHARDT, S., GÖTZ, A. E., SZULC, J., BORKHATARIA, R., GELUK, M., HAAS, J., HORNING, J., JORDAN, P., KEMPF, O., MICHALIK, J., NAWROCKI, J.,

- REINHARDT, L., RICKEN, W., RÖHLING, H.-G., RÜFFER, T., TÖRÖK, A. & ZÜHLKE, R.: Triassic. In: MCCANN, T. (Hrsg.): *The Geology of central Europe. : Mesozoic and Cenozoic*. London, 2008 (2), S. 749–821
- [44] FRANKE, W.: The mid-European segment of the Variscides : tectonostratigraphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution, Bd. 179. In: FRANKE, W.; HAAK, V.; ONCKEN, O.; TANNER, D. (Hrsg.): *Orogenic Processes : Quantification and Modelling in the Variscan Belt*. London, 2000, S. 35–61
- [45] FRICK, F.: *Feinstratigraphische und mikrofazielle Untersuchungen im Plattendolomit (Ca 3-Leine-Serie) des nordostthessischen Zechsteins*. Dissertation. Aachen, 01.01.1969
- [46] FULDA, E.: *Salzspiegel und Salzhang*. In: *Z. d. Geol. Ges.* 75 (1923), S. 10–14
- [47] GGL; SERFLING, U. (Mitarb.); SEIDEL, K. (Mitarb.) : *Ergebnisbericht Magnetische Messungen zur Basalterkundung im Erlaubnisfeld Marbach*. unveröffentlichter Bericht. 01.07.2010
- [48] GGL; SERFLING, U. (Mitarb.); SEIDEL, K. (Mitarb.) : *Ergebnisbericht Magnetische Messungen zur Basalterkundung im Erlaubnisfeld Marbach*. unveröffentlichter Bericht. 26.05.2011
- [49] GGL; SERFLING, U. (Mitarb.); SEIDEL, K. (Mitarb.) : *Ergebnisbericht Magnetische Messungen zur Basalterkundung im Erlaubnisfeld Marbach Rothenkirchen 2012*. unveröffentlichter Bericht. Leipzig, 16.04.2012
- [50] GGL; SERFLING, U. (Mitarb.): *Ergebnisbericht Magnetische Messungen zur Basalterkundung im Erlaubnisfeld Marbach Malges 2013*. unveröffentlichter Bericht. 28.03.2013
- [51] GRUMBT, E.; ELLENBERG, J. (Mitarb.); FALK, F. (Mitarb.); LÜTZNER, H. (Mitarb.); HAASE, G. (Mitarb.); HOPPE, W. (Mitarb.); KÄSTNER, H. (Mitarb.); WÜSTNER, L. (Mitarb.) : Stratigraphie des Buntsandsteins, Tektonik und Auslaugung im Werra-Kaligebiet. Exkursion 6. In: Geologische Gesellschaft DDR (Hrsg.): *11. Jahrestagung der Geologischen Gesellschaft der DDR. Exkursionsführer*, 1964, S. 131–159
- [52] GRUMBT, E.; ELLENBERG, J. (Mitarb.); FALK, F. (Mitarb.); LÜTZNER, H. (Mitarb.) : *Geologische Erkundung des Deckgebirges im Werra-Kaligebiet*. Berlin, 01.06.1967
- [53] GRUMBT, E.; JUBITZ, K.-B. (Mitarb.); LÜTZNER, H. (Mitarb.) : *Geologische Aufnahme des Deckgebirges im nördlichen Werra-Kaligebiet: Beckendynamik der Norddeutsch-Polnischen Senke : Beckendynamik der Norddeutsch-Polnischen Senke*. Jena, 22.12.1980
- [54] GRUMBT, E., ELLENBERG, J., FALK, F. & LÜTZNER, H.: *Geologische Erkundung des Deckgebirges des Werra-Kaligebietes*. Berlin, 30.06.1967

- [55] GRUMBT, E. & LÜTZNER, H.: *Störungszonen im Deckgebirge des thüringischen Werra-Kaligebietes und ihre Beziehungen zum Basaltvulkanismus und zur Auslaugung* : *Geologie* 15 (1966), 4/5, S. 531-544
- [56] GRUMBT, E. & LÜTZNER, H.: *Saxonische Tektonik und Basaltvulkanismus zwischen Thüringer Wald und Vorderrhön* : *Z. geol. Wiss* 11 (1983), Nr. 8, S. 943–954
- [57] GRUNER, M., ELERT, K.-H., SCHWANDT, A. & SITZ, P.: *Salzton - natürliches Analogon für Bentonitdichtelemente im Salinar*. In: *Kali und Steinsalz* (2003), Nr. 2, S. 12–17
- [58] GUTSCHE, A. & HERRMANN, A. G.: *Wechselwirkungen zwischen fluiden Phasen und Evaporiten im Nahbereich von Basaltgängen* : *Fortschritte der Mineralogie* 66 (1988), Nr. 1, S. 49
- [59] GWOSDZ, W., LORENZ, W. & RÖHLING, S.: *Bewertungskriterien für die Industrieminerale, Steine und Erden : Teil 10: Phosphate, Schwefel, Natrium-, Kalium- und Magnesiumsalze*. In: *Geol. Jahrb.* (2006), Nr. 12, S. 13–112
- [60] HAASE, G.: *Der gegenwärtige Stand in der Kenntnis der Auslaugungserscheinungen im Werra-Kaligebiet*. Merkers, 25.05.1962
- [61] HECHT, G.: *Zur Entwicklung der Salzwasserversenkung im Werra-Kaligebiet* : *Geowiss. Mitt. von Thüringen* (2000), Nr. 9, S. 125–138
- [62] HERBERT, H.-J., SCHWANDT, A., REICHEL, C., DITTRICH, E., MARTIN, J. & GAST, H.-D.: *Salzlösungszuflüsse im Salzbergbau Mitteldeutschlands : Erfassung und Bewertung der chemischen und physikalischen Analyseergebnisse*, 2007
- [63] HERRMANN, A. G., KNIPPING, B., SCHRÖDER, K. & BORSTEL, L. E. v.: *The quantitative analysis of fluid inclusions in marine evaporites* : *N. Jb. Miner. Mh* (1991), Nr. 1, S. 39–48
- [64] HERRMANN, A. G., SIEBRASSE, G. & KÖNNECKE, K.: *Computerprogramme zur Berechnung von Mineral- und Gesteinsumbildungen bei der Einwirkung von Lösungen aus Kali- und Steinsalzlagerstätten (Lösungsmetamorphose)*. In: *Kali und Steinsalz* 7 (1978), S. 288–299
- [65] HERRMANN, A. G., SIEWERS, U., HARAZIM, B. & USDOWSKI, E.: *Kriterien zur Beurteilung von Salzlösungen in den Zechsteinevaporiten Mittel- und Norddeutschlands*. In: *Kali und Steinsalz* (2003), Nr. 3
- [66] HEßMANN, W.; BERGERHOFF, J. (Mitarb.); KÄBEL, H. (Mitarb.); KULKE, I. (Mitarb.) : *Montanhydrogeologische Verhältnisse des Deckgebirges im südlichen Werra-Kaligebiet*. VVS B 236-41/77. Berlin, 01.06.1977
- [67] HEßMANN, W.; SCHMIDT, K. (Mitarb.); ZIEGENHARDT, W. (Mitarb.) : *Strukturgeologisch-tektonische und hydrogeologische Beiträge zu Fragen der Bergbausicherheit im Werra-Kalirevier der DDR : Spezielle strukturelle Untersuchungen und tektonische Analyse ausgewählter Räume - Südliche Vorfelder der Grube "Ernst Thälmann", Westfeld der Grube "Wilhelm Pieck"*. Bericht Nr. 114/79. 01.01.1979

- [68] HEßMANN, W.: *Tektonische Beanspruchung und Verformung, strukturelle Position und Dislokationsintensität : Kriterien zur Einschätzung hydrogeologischer Verhältnisse des Gebirges*. In: *Z. Geol. Wiss* 10 (1982), Nr. 1, S. 31–52
- [69] HEßMANN, W.: *Zur strukturellen Formung und Beanspruchung des postvariszischen Gebirges im Südwesten der DDR* : *Z. geol. Wiss* 11 (1983), Nr. 8, S. 955–971
- [70] HEßMANN, W., KÄBEL, H. & TROTTNER, D.: *Strukturgeologisch-tektonische Analyse des Deckgebirges im Werra-Kaligebiet der DDR (Abschlußbericht)*. Ber.-Nr. 11/81. Berlin, 30.06.1981
- [71] HEßMANN, W. & KULKE, I.: *Zur hydrogeologischen Situation des Deckgebirges (Suprasalinar) im Raum Unterbreizbach und seiner Umgebung (Werra-Kaligebiet)*. Ber.-Nr. 73/76. Berlin, 17.05.1976
- [72] HEßMANN, W. & RICHTER, E.: *Strukturgeologisch-tektonische Verhältnisse im südöstlichen Werra-Kaligebiet auf dem Territorium der DDR*. HEßMANN, W. (Hrsg.); RICHTER, E. (Hrsg.); Rektor der Bergakademie Freiberg (Mitarb.). Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1979
- [73] HEßMANN, W. & SCHWANDT, A.: *Zur Bruchtektonik im Salinar und Deckgebirge* : *Z. geol. Wiss* 9 (1981), Nr. 3, S. 283–292
- [74] HITE, R. J. & JAPAKASETR, T.: *Potash deposits of the Khorat Plateau, Thailand and Laos*. In: *Econ. Geol.* 74 (1979), S. 448–458
- [75] HOLDEN, L., MOSTARD, P., NIELSEN, B. F., GJERDE, H., TOWNSEND, C. & OTTESEN, S. (2003): *Stochastic Structural Modeling*. In: *Math. Geol.* 35 (2003), Nr. 8, S. 899–914
- [76] HOLLEMAN, A. F., WIBERG, E. & WIBERG, N.: *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. 101. Aufl. Berlin : de Gruyter, 1995
- [77] HOPPE, W.: *Die Auslaugungserscheinungen im Werra-Kaligebiet, ihre Bedeutung für die Lagerstätte und die Landschaftsformen*. In: *Jb. Reichsanst. Bodenforschung* 62 (1944), S. 248–271
- [78] HOPPE, W.: *Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der Deutschen Demokratischen Republik: Das Werra-Gebiet* : Das Werra-Gebiet. Teil 1, C97/1. In: Rektor der Bergakademie Freiberg (Hrsg.): *Freiberger Forschungshefte. Geologie*, 1960, S. 1–166
- [79] JAGSCH, R., WERNER, R., BRANDT, W., GRIESBACH, H., JAGSCH, U., LÖWE, K., REH, B., ROHLER, R. & WEBER, W.: *Ergebnisbericht Suchvorhaben Gerstunger Mulde*. 01.01.1980
- [80] JAHNE, H.: *Geologische Gesetzmäßigkeiten des Werra-Salinar im Baufeld der Grube Unterbreizbach (Werra-Kaligebiet)*. In: ANDREAS, D. (Hrsg.): *Regionale und angewandte Geologie Thüringens. : Kurzreferate der Vorträge und Poster*, 1990

- [81] JAHNE, H., OETTEL, S. & VOITEL, R.: *Die feinstratigraphische Gliederung des Salinars im Zechstein I des Werra-Kaligebietes* : Ber. Deutsch. Ges. geol. Wiss, A, geol. Paläont 15 (1970), Nr. 4, S. 505–515
- [82] JAHNE, H. & PADER, D.: *Untertageaufschluß eines Basaltschlotes durch den Bergbau im Werra-Kaligebiet* : Kali und Steinsalz 11 (1994), Nr. 7, S. 218–224
- [83] JAHNE, H. & PIELERT, P.: *Beitrag zu Ausbildung des hangenden Begleitflözes zum Kaliflöz "Hessen" im Werrakaligebiet unter besonderer Berücksichtigung der Schachanlage "Marx-Engels" Unterbreizbach* : Ber. Geol. Ges. DDR 9 (1964), Nr. 6, S. 641–665
- [84] JAHNE, H., VOITEL, R. & HAASE, G.: *Tektonische Erscheinungsformen im Salinar des Werra-Kaligebiets auf dem Territorium der DDR* : Z. geol. Wiss 11 (1983), Nr. 9, S. 1085–1100
- [85] JAHNE, H. & ZEIBIG, S.: *Zur Entwicklung, Ausbildung und Verbreitung der Kaliflöze im Werra-Becken* : Z. geol. Wiss 30 (2002), 4/5, S. 327–336
- [86] JOL, H. M. (Hrsg.): *Ground penetrating radar theory and applications*. Amsterdam, Heidelberg [u.a.] : Elsevier, 2009
- [87] JUBITZ, K.-B.; GRUMBT, E. (Mitarb.); ELLENBERG, J. (Mitarb.); LÜTZNER, H. (Mitarb.) : *Führer zu den Exkursionen anlässlich der 11. Jahrestagung vom 24. bis 30. Mai 1964 in Leipzig: Stratigraphie des Buntsandsteins, Tektonik und Auslaugung im Werra-Kaligebiet* : Stratigraphie des Buntsandsteins, Tektonik und Auslaugung im Werra-Kaligebiet. Berlin, 1964
- [88] K+S AKTIENGESELLSCHAFT; ZEIBIG, S. (Mitarb.); BARNASCH, J. (Mitarb.); BEER, W. (Mitarb.) : *Nachweis und Bewertung der hangenden geologischen Barriere (Schutzschichten) für die Verbundgrube Hattorf/Wintershall*. Interner Bericht. Kassel, 01.01.2011
- [89] K+S AKTIENGESELLSCHAFT; ZEIBIG, S. (Mitarb.); BARNASCH, J. (Mitarb.); BEER, W. (Mitarb.); HÖNTZSCH, S. (Mitarb.); KÄDING, K.-Ch. (Mitarb.); KLUGE, S. (Mitarb.); PLÜMACHER, J. (Mitarb.); REUTHER, J. (Mitarb.) : *Zur Ausbildung, Mächtigkeit und hydrogeologischen Bewertung der Schichtenfolge vom Oberen Werra-Steinsalz bis Leine-Karbonat (Plattendolomit) unter besonderer Berücksichtigung ihrer tektonischen und atektonischen Beanspruchung im Werra-Kaligebiet*. Interner Bericht K+S Aktiengesellschaft. Kassel, 01.12.2012
- [90] K+S AKTIENGESELLSCHAFT: *Digitale rissliche Unterlagen in Form von CAD-Dateien*. unveröffentlicht. 2013-2016
- [91] K+S AKTIENGESELLSCHAFT: *Schichtenverzeichnisse von Tagesbohrungen im Werra-Kaligebiet*. 2013
- [92] K+S AKTIENGESELLSCHAFT: *Besprechung zur Georadarerkundung im Werk Werra der K+S Aktiengesellschaft*. Frdl. mdl. Mitt durch Leipold, A. 2013-07-24. ENGLER, A. (Adressat)

- [93] K+S AKTIENGESELLSCHAFT; BARNASCH, J. (Mitarb.); PLÜMACHER, J. (Mitarb.); SCHÄFER, S. (Mitarb.); ZEIBIG, S. (Mitarb.) : *Erläuterung zur Auswahl und Bewertung des tektonischen Inventars des Werra-Kaligebietes*. Kassel, 01.12.2013
- [94] K+S AKTIENGESELLSCHAFT: *Altseismik : Projektdaten und Messberichte*. 2014
- [95] K+S AKTIENGESELLSCHAFT; Weigert, D., Lohrbach, J. (Mitarb.); HUNSTOCK, F. (Mitarb.); Günther (Mitarb.) : *Vereinheitlichung der Erfassung von CO₂-Ereignissen im Werk Werra - Besprechung vom 21.01.2013*. Unveröffentlichte Notiz. Kassel, 27.01.2014
- [96] K+S AKTIENGESELLSCHAFT: *Stand der Kartierungen in der Grube Hattorf*. Frdl. mdl. Mitt. durch Nürnberger, Th. 2015-11-04. ENGLER, A. (Adressat)
- [97] K+S ANALYTIK- UND FORSCHUNGSZENTRUM; ECKERT, S. (Mitarb.): *Prüfbericht Nr. 142792 : Gasuntersuchung*. unveröffentlicht. Unterbreizbach, 01.01.2014
- [98] K+S ANALYTIK- UND FORSCHUNGSZENTRUM; ECKERT, S. (Mitarb.): *Prüfbericht Nr. 151188 : Gasuntersuchung*. unveröffentlicht. Unterbreizbach, 01.01.2015
- [99] K+S ANALYTIK- UND FORSCHUNGSZENTRUM; ECKERT, S. (Mitarb.): *Prüfbericht Nr. 151987 : Gas-Untersuchung*. unveröffentlicht. Unterbreizbach, 01.01.2015
- [100] K+S ANALYTIK- UND FORSCHUNGSZENTRUM; ECKERT, S. (Mitarb.): *Prüfbericht Nr. 151989 : Gasuntersuchung*. unveröffentlicht. Unterbreizbach, 01.01.2015
- [101] K+S KALI GMBH: *Verzeichnis über Austritts- oder Ausbruchstellen von Gasen : Gasverzeichnis der Grube Unterbreizbach "Gas-Verz-2013.xls"*. unveröffentlicht. Unterbreizbach, 2013
- [102] K+S KALI GMBH: *Gasverzeichnis der Grube Hattorf "Gas-Ha-2005-2015.xlsx"*. unveröffentlicht. Philippsthal, 11.08.2015
- [103] KÄBEL, H. & TROTTNER, D.: *Die Hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge des Werra-Kaligebietes der DDR*. Bericht Nr. 36/81. 01.01.1981
- [104] KÄDING, K.-Ch.: *Geologische, magnetische und petrographische Untersuchungen tertiärer Vulkanite und ihrer Begleiterscheinungen im Bereich des hessischen Werra-Kaligebietes*. Dissertation. Berlin, 01.01.1962
- [105] KÄDING, K.-Ch.: *Kapitel 2. Zechstein : Erl. Geol. Kte. Hessen, Bl. 5225 Geisa*. Wiesbaden : 1975, S. 30–45
- [106] KÄDING, K.-Ch.: *Kali und Steinsalzbergwerk Hattorf der Kali und Salz AG, Schachtanlage Hera*. In: KULICK, J.; RICHTER-BERNBURG, G.; THEUERJAHR, A.-K (Hrsg.): *Exkursion D1, D2, M: der über Tage anstehende Zechstein in Hessen*, 1987, S. 57–68
- [107] KÄDING, K.-Ch.: *Die Werra-Fulda-Kalilagerstätte: 100 Jahre Förderung : Kali und Steinsalz / 100 Jahre Förderung 16 (2001), Nr. 14, S. 433–438*

- [108] KERN, H. & FRANKE, J.-D.: *Carnallit - thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken* : Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 137 (1986), S. 1–27
- [109] KHAN, M. I. & ISLAM, M. R.: *True Sustainability in Technological Development and Natural Resource Management*. New York : Nova Science Publishers Inc., 2007
- [110] KNIPPING, B.: Basalt Intrusions in Evaporites, Bd. 24. In: BHATTACHARJI, S.; FRIEDMAN, G. M.; NEUGEBAUER, H. J.; SEILACHER, A. (Hrsg.): *Lecture Notes in Earth Sciences*. Berlin : Springer-Verlag, 1989 (24), S. 1–131
- [111] KNIPPING, B.: *Basaltische Gesteine in Zechsteinevaporiten* : Zbl. Geol. Paläont. Teil 1 (1991), Nr. 4, S. 1149–1163
- [112] KNIPPING, B. & HERRMANN, A. G.: *Mineralreaktion und Stofftransporte an einem Kontakt Basalt-Carnallit im Kalisalzhorizont Thüringen der Werra-Serie des Zechsteins* : Kali und Steinsalz 9 (1985), Nr. 4, S. 111–124
- [113] KNÖDEL, K., KRUMMEL, H. & LANGE, G.: *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg New York : Springer, 2005 (Geophysik)
- [114] KOCH, K.: *Hydrogeologische Modellvorstellungen zu Salzlösungsvorkommen im Salinar des Werra-Kaligebietes der DDR*. unveröff. Freiberg, 1986
- [115] KOCH, K. & VOGEL, J.: Zu den Beziehungen von Tektonik, Sylvinitbildung und Basaltintrusion im Werra-Kaligebiet (DDR). In: Rektor der Bergakademie Freiberg (Hrsg.): *Freiberger Forschungshefte*. Leipzig, 1980
- [116] KÜHN, R.: *Zur Kenntnis der Rubidiumgehalte von Kalisalzen ozeanischer Salzlagerstätten nebst einigen lagerstättenkundlichen Ausdeutungen*. In: *Geol. Jahrb.* 90 (1972), S. 127–220
- [117] KÜHN, R.: *Diagenese in Evaporiten* : *International Journal of Earth Sciences*. In: *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 68 (1979), Nr. 3, S. 1066–1075
- [118] KULICK, J., LEIFELD, D., MEISL, S., PÖSCHL, W., STELLMACHER, R., STRECKER, G., THEUERJAHR, A.-K & WOLF, M.: *Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupferschiefers der Hessischen Senke und des Harz Westrandes*. In: *Geol. Jahrb.* D 68 (1984), S. 3–223
- [119] KULICK, J. & PAUL, J. (Hrsg.): *Internationales Symposium Zechstein 1987 Kassel - Hannover: Abstracts/Posters Program*, 1987
- [120] LAEMMLEN, M.: *Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000 - 5223 Queck*. Wiesbaden : 1963, 327 Seiten
- [121] LAEMMLEN, M.: *Geologische Karte von Hessen 1:25.000 - 5223 Queck*. Wiesbaden : 1963
- [122] LAEMMLEN, M.: *Geologische Karte von Hessen 1:25.000 - 5124 Bad Hersfeld*. Wiesbaden : 1965

- [123] LAEMMLEN, M.: *Die Gliederung des Röt im Raum Bad Hersfeld/Eiterfeld* : Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch 94 (1966), S. 373–378
- [124] LAEMMLEN, M.: *Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000 - 5124 Bad Hersfeld*. Wiesbaden : 1967, 280 Seiten
- [125] LAEMMLEN, M.: *Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000 - 5225 Geisa*. Wiesbaden : 1975, 272 Seiten
- [126] LAEMMLEN, M. & KOENEN, A. v.: *Geologische Karte von Hessen 1:25.000 - 5225 Geisa*. Wiesbaden : 1975
- [127] LANGBEIN, R. & SEIDEL, G.: Muschelkalk. In: SEIDEL, G. (Hrsg.): *Geologie von Thüringen*. 2. Aufl. Stuttgart : Schweizerbart'sche Verlagsbuchh., 2003, S. 342–357
- [128] LANGE, P. R. & KÄDING, K.-Ch.: *Stratigraphie und Tektonik im Buntsandstein des hessischen Werra-Kaligebietes östlich von Bad Hersfeld* : Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch 89 (1961), S. 242–265
- [129] LBEG: *Symbolschlüssel Geologie : Symbole für die Dokumentation geologischer Feld- und Aufschlussdaten*. Digitale Fassung des Symbolteiles. Hannover, 2017
- [130] LE BAS, M., MAITRE, R., STRECKEISEN, A. & ZANETTIN, B.: *A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram*. In: *Journal of Petrology* 27 (1986), S. 745–750
- [131] LELLIOTT, M. R., CAVE, M. R. & WEALTHALL, G. P.: *A structured approach to the measurement of uncertainty in 3D geological models*. In: *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 42 (2009), S. 95–105
- [132] LOTZE, F.: *Steinsalz und Kalisalze*. 1. Teil. 2. Aufl. Berlin-Nikolassee : Gebrüder Bornträger, 1957
- [133] LÜTZNER, H., ELLENBERG, J., FALK, F. & GRUMBT, E.: *Geologische Karte von Thüringen 1:25.000 - 5226 Stadtlengsfeld*. Weimar : 1997
- [134] LÜTZNER, H., ELLENBERG, J., FALK, F., GRUMBT, E., STACKEBRANDT, W., STOLL, A., WENDLAND, F. & SEIFERT, J.: *Geologische Aufnahme des Deckgebirges im südlichen Werra-Kaligebiet*. Jena, 01.01.1976
- [135] LÜTZNER, H., GRUMBT, E., ELLENBERG, J. & REDLICH, S.: *Geologische Karte von Thüringen 1:25.000 - 5126 Vacha*. Weimar : 2000
- [136] MALLET, J. L.: *Discrete smooth interpolation*. In: *ACM Transactions on Graphics* 8 (1989), Nr. 2, S. 121–144
- [137] MALLET, J. L.: *Geomodeling* : Oxford University Press, 2002
- [138] MARKS, A.: *Geologische Untersuchungen des Werra-Salinars der Grube Hattorf im Werra-Kalirevier* : *Geological investigations of the Werra salt unit at the*

Hattorf mine in the Werra potash district. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Bachelorarbeit. 2015-08-14

- [139] MCCANN, T., SKOMPSKI, S., POTY, E., DUSAR, M., VOZÁROVÁ, A., SCHNEIDER, J., WETZEL, A., KRAINER, K., KORNIPIHL, K., SCHÄFER, A., KRINGS, M., OPLUSTIL, S. & TAIT, J.: Carboniferous. In: MCCANN, T. (Hrsg.): *The geology of central Europe : Precambrian and Palaeozoic*. London, 2008 (1), S. 411–529
- [140] MESSER, E.: *Die nordhessischen Kaligruben : Kali und Steinsalz* 7 (1978), Nr. 7, S. 306–318
- [141] MEYER, R. K. & SCHMIDT-KALER, H.: *Gesteinsabfolge des Deckgebirges nördlich der Donau und im Molasseuntergrund : Jura*. Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:50.000. München : 1996, S. 90–111
- [142] MINDAT.ORG: *Halite*. URL <https://www.mindat.org/min-1804.html>. – Aktualisierungsdatum: 2017-05-22 – Überprüfungsdatum 2017-05-25
- [143] MÖLLER, H.: *Petrographie und Fazies des Plattendolomit (Leine-Karbonat, Ca3) im hessischen Zechstein-Becken*. Dissertation. Bochum, 01.01.1985 (20)
- [144] MOTZKA, R. & LAEMMLEN, M.: *Geologische Karte von Hessen 1:25.000 - 5224 Eiterfeld*. Wiesbaden : 1966
- [145] MOTZKA, R. & LAEMMLEN, M.: *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25.000 - 5224 Eiterfeld*. Wiesbaden : 1967, 213 Seiten
- [146] MÜLLER, W.: *Über das Auftreten von Kohlensäure im Werra-Kaligebiet*. 1958, 100 Seiten
- [147] NAWA, L.: *Geologie des Werra-Salinars in den Thüringischen Gruben des Werra-Kalireviers unter besonderer Berücksichtigung der Einflüsse von Strukturelementen auf die Kaliflöze Thüringen (zIKTh) und Hessen (zIKH)*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Masterarbeit. 2014-01-01
- [148] OPENSTREETMAP: *Weltweite topographische Karte*. Online: www.openstreetmap.de, Zugriff 2017
- [149] PARADIGM: *SKUA : Structure and Stratigraphy*. 2011, 6 Seiten
- [150] PARADIGM: <http://www.pdgm.com/products/GOCAD>
- [151] PARADIGM: file:///C:/Program%20Files/Paradigm/SKUA-GOCAD-15/doc/SKUA_GOCAD/help/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm#href=GridBuilding/StructureAndStratigraphy/SSWF.2.32.html. Zugriff 07.01.16, 11:15 Uhr
- [152] PIPPIG, M.: *Über das Vorkommen einer Kristallsalzschlote im Kalibergwerk Merkers : Kali und Steinsalz* 11 (1992), 1/2, S. 2–7
- [153] PRINZ, H.: *Fossile Einbruchsschlote im mittleren Buntsandstein der Vorderrhön, entstanden durch Auslaugung von Salzgesteinen in tiefen Zechstein : Rock Mechanics* (1970), S. 35–42

- [154] PUFF, P. & LANGBEIN, R.: Buntsandstein. In: SEIDEL, G. (Hrsg.): *Geologie von Thüringen*. 2. Aufl. Stuttgart : Schweizerbart'sche Verlagsbuchh., 2003, S. 326–341
- [155] RAUCHE, H. & FRANZKE, H. J.: *Stress field evolution at the northern part of the South German Block on the territory of the GDR : Gerlands Beitr. Geophysik* 99 (1990), Nr. 5, S. 441–461
- [156] REDLICH, S.: *Tektonik am Nordrand der Gerstunger Mulde : Auszugsweise Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und petrographischen Beschreibungen*. Jena, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geowissenschaften. Diplomarbeit. 2000
- [157] REINHARDT, T.: *Meso- und Känozoische Bruchtektonik im Bereich des Werra-Kaligebietes*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Masterarbeit. 2014-01-01
- [158] REINHARDT, T.; PFÄNDER, J. (Mitarb.); STANEK, K.-P. (Mitarb.) : *Bericht zur Altersbestimmung ausgewählter Vulkanitproben aus dem Bereich des Werra-Kaligebiets mittels $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ -Datierungsmethode*. Freiberg, 2015
- [159] RICHTER-BERNBURG, G.: *Über salinare Sedimentation*. In: *Z. d. Geol. Ges.* 105 (1953), S. 593–645
- [160] RICHTER-BERNBURG, G.: *Stratigraphie des deutschen Zechsteins*. In: *Z. d. Geol. Ges.* 105 (1955), S. 843–854
- [161] RICHTER-BERNBURG, G.: *Saxonische Tektonik als Indikator erdtiefer Bewegungen*. In: *Geol. Jahrb.* (1968), S. 997–1030
- [162] ROCKEL, W. & ZIEGENHARDT, W.: *Strukturelle Kriterien der Lagunenbildung im tiefen Zechstein im Raum südlich Berlin : Z. geol. Wiss* 7 (1979), Nr. 7, S. 847–860
- [163] ROTH, H.: *Staßfurt-Salinar im Werra-Gebiet : Geol. Jb. Hessen* 106 (1978), S. 117–122
- [164] SATTLER, S.: Building a small scale 3D geological model of the Thuringian Basin. In: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geowissenschaften (Hrsg.): *Sedimentary Basins Jena 2013. Research Modelling Exploration*, 2013, S. 51
- [165] SCHARBRODT, Th., BAUMANN, L. & ALEXOWSKY, H.: *Zur Rekonstruktionsmethodik von Paläobruchstrukturen im Salinar : Z. geol. Wiss* 17 (1989), Nr. 2, S. 89–96
- [166] SCHARBRODT, Th., BAUMANN, L. & KOCH, K.: *Untersuchung zum Zusammenhang zwischen der Beckenentwicklung und der Halititsedimentation im Werra-Kaligebiet : Z. geol. Wiss* 14 (1986), Nr. 4, S. 427–435
- [167] SCHECK, M. & BAYER, U.: *Evolution of the Northeast German Basin — inferences from a 3D structural model and subsidence analysis*. In: *Tectonophysics* 313 (1999), 1-2, S. 145–169 – Überprüfungsdatum 2015-10-01

- [168] SCHILDER, Ch. & SCHWANDT, A.: *Zur Tektonik und Auslaugung im Kali- und Steinsalzabbaugebieten*. In: *Z. Geol. Wiss.* 11 (1983), Nr. 8, S. 1023–1033
- [169] SCHIRMER, B. & SCHWARZ, R.: *Zum geologisch-tektonischen Bau des Deckgebirges und Subsalinar im thüringischen Werra-Kaligebiet* : *Geol. Jb. Hessen* 119 (1991), S. 91–101
- [170] SCHMAUCKS, A.: *Petrographie der Basalte des Werra-Kali-Reviers* : *Petrography of basalts of the Werra Potash District*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. 2015-07-15
- [171] SCHMIEDEL, T.: *Geometrische Modellierung (GOCAD) der Randzonen zweier benachbarter Lakkolith-Körper und der Zwischensedimente anhand von Bohrungsdaten aus dem östlichen Halle Vulkanit Komplex (Spätpaläozoikum)* : *Geometric modelling (GOCAD) of the marginal zone of two neighboring laccoliths and the interstitial host sediments based on well data (eastern Halle Volcanic Complex, late Paleozoic)*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Bachelorarbeit. 2012-03-29
- [172] SCHULZ, B.: *Dreidimensionale geologische Modellierung eines spätpaläozoischen intermediären subvulkanischen Komplexes nördlich von Halle (Saale)*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Diplomarbeit. 2010-07-15
- [173] SCHULZ, R. (Hrsg.): *Angewandte Geophysik - Neue Geräte und ihre Anwendungen*. Hannover : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2000 (Reihe E Geophysik, 52)
- [174] SCHWANDT, A.: *Beziehung zwischen untertägigen Salzlösungszuflüssen und Tektonik im Kalibergbau der DDR* : *Ber. Deutsch. Ges. geol. Wiss., A, geol. Paläont* 17 (1972), Nr. 2, S. 177–190
- [175] SCHWANDT, A.: *Zusammenhänge zwischen Geologie und Zuflüssen von Salzlösungen und Wässern in Kali- und Steinsalzgrubenfeldern des Saale-Unstrut- und Nordharz-Kaligebietes* : *Jb. Geol* 9/10 (1978), S. 175–260
- [176] SCHWANDT, A.: *Salinare Sedimentations- und Umbildungsprozesse. Kurzreferate; Vortragsveranstaltung am 26. und 27. April 1988 in Erfurt*. Sondershausen : GGW, AK Kali, 1988
- [177] SCHWANDT, A.: *Zum Einfluss der Bruchtektonik im Kalialtbergbau* : *Influence of fracture-tectonic at reclaimed potash-mines*. In: BUSCH, W.; MAAS, K.; MEIER, M.; SROKA, A.; LÖBEL, K.-H.; KLAPPERICH, H.; TONDERA, D. (Hrsg.): *5. Altbergbau-Kolloquium*. Essen : VGE-Verlag Glückauf GmbH, 2005, S. 345–355
- [178] SCHWANDT, A., SCHMIEDL, H.-D., SPILKER, M., HERBERT, D., FRÖHLICH, K. & JORDAN, H.: *Neue Aspekte zur Auslaugung in Kali- und Kupferschieferabbaugebieten der DDR* : *Z. geol. Wiss* 14 (1986), Nr. 2, S. 183–192
- [179] SCHWARZ, R.: *Mächtighkeitsanstauungen ("Kuppen") von Carnallit im Kaliflöz "Thüringen" des Werra-Kali-Gebietes als Ausdruck halotektonischer Prozesse* : *Geol. Jb. Hessen* 120 (1992), S. 161–170

- [180] SCHWARZ, R., SCHIRMER, B., TESCH, M. & TROTTNER, D.; BERGMANN, E. (Mitarb.); HERRMANN, H. (Mitarb.); KRULL, P. (Mitarb.); RUTHSATZ, H. (Mitarb.) : *Geologisch-tektonische Komplexinterpretation des Deckgebirges und Subsalinars im Werra-Kaligebiet der DDR : Abschlußbericht*. Bericht Nr. 81/87. Berlin, 04.09.1987
- [181] SEIDEL, G.: *Zur Ausbildung des Muschelkalkes in NW-Thüringen*. In: *Geologie* 14 (1965), S. 58–63
- [182] SIEMENS, S.: *Magnetische δ -Messungen im Werra-Kaligebiet zur Erkundung von Basaltgängen*. In: *Kali und Steinsalz* 5 (1971), Nr. 11, S. 385–390
- [183] SMITH, D. B.: *Rapid marine transgressions and regressions of the Upper Permian Zechstein sea* : *J. geol. Soc* 136 (1979), S. 155–156
- [184] SONNENFELD, P.: *The color of rock salt - a review* : *Sedimentary Geology* 94 (1995), S. 267–276
- [185] STÄUBERT, A.: *Zu einigen Einflußfaktoren auf das Kluftgefüge am Zechsteinausbiß des Südharzrandes* : *Z. geol. Wiss* 17 (1989), Nr. 4, S. 431–439
- [186] STÄUBERT, U. & STÄUBERT, A.: *Zum Einfluss der Tektonik auf die Gasführung im Salinar* : *Z. geol. Wiss* 17 (1989), Nr. 4, S. 369–380
- [187] STEINBORN, H.: *3D-Modellierung der strukturellen Entwicklung der Vorerzgebirgssenke im Raum der Altbergbaugebiete Zwickau und Lugau/Oelznitz*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Dissertation. 2008-10-30
- [188] STEINMANN, M. & STILLE, P.: *Basaltic dykes in evaporites: a natural analogue* : *Geological Society of London, Special Publications* 236 (2004), S. 135–141
- [189] STEINMANN, M., STILLE, P., BERNOTAT, W. & KNIPPING, B.: *The corrosion of basaltic dykes in evaporites: Ar-Sr-Nd isotope and rare earth elements evidence* : *Chemical Geology* 153 (1999), S. 259–279
- [190] STORCH, S.: *Untersuchungen zur faziellen Ausbildung des Kaliflözes "Hessen" im Werra-Kaligebiet in Abhängigkeit von der Beckenstruktur*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Diplomarbeit. 1976-06-30
- [191] STRUNZ, Hugo: *Mineralogische Tabellen : e. Klassifizierung d. Mineralien auf kristallchemischer Grundlage; mit einer Einführung in die Kristallchemie* /. 8. Aufl. Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft Geest. u. Portig, 1982
- [192] SZULC, J.: *Middle Triassic evolution of the northern Peri-Tethys area as influenced by early opening of the Tethys ocean*. In: *Ann. Soc. Geol. Pol.* 70 (2000), S. 1–48
- [193] TACHER, L., POMIAN-SRZEDNICKI, I. & PARRIAUX, A.: *Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models*. In: *Computers & Geosciences* 32 (2006), Nr. 2, S. 212–221

- [194] THORE, P., SHTUKA, A., LECOUR, M., AIT-ETTAJER, T. & COGNOT, R.: *Structural uncertainties : Determination, management and applications*. In: *Geophysics* 63 (2002), Nr. 3, S. 840–852
- [195] TRÖGER, S.: *Erstellung eines Baugrundmodells im Bereich des Domes "St. Marien" zu Zwickau mittels Modellierungssoftware GOCAD-SKUA*". Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Bachelorarbeit. 2014-12-15
- [196] VALJASKO, M. G.: Die wichtigsten geochemischen Parameter für die Bildung der Kalisalzlagerstätten, H.A 123. In: Rektor der Bergakademie Freiberg (Hrsg.): *Freiberger Forschungshefte. Geologie*, 1960, S. 197–233
- [197] VENDEVILLE, B. C., HONGXING, G. & JACKSON, M. P. A.: *Scale models of salt tectonics during basement involved extension*. In: *Pet. Geosci.* 1 (1995), S. 179–183
- [198] VOGT, C.: *Optimization of Geothermal Energy Reservoir Modeling using Advanced Numerical Tools for Stochastic Parameter Estimation and Quantifying Uncertainties*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät Georessourcen und Materialtechnik. Dissertation. 2013-02-18
- [199] WAGENKNECHT, R.: *Qualitative und quantitative Modellierung von Carnallitkuppen im Grubenbetrieb "Marx-Engels" des VEB Kalibetrieb "Werra-Merkers"*. Ber.-Nr. 25/86. Berlin, 25.02.1986
- [200] WALTER, R.; DORN, P. (Mitarb.): *Geologie von Mitteleuropa*. 7. Aufl. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2007
- [201] WARREN, J.: *Evaporites : Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Berlin Heidelberg New York : Springer, 2006
- [202] WEBER, W.: *Zur synsedimentären Tektonik des Oberperms in Mitteleuropa : Z. geol. Wiss* 7 (1979), Nr. 7, S. 871–878
- [203] WEDEPOHL, K. H.: *Die basaltischen Gesteine der nördlichen Hessischen Senke und ihrer Umgebung*. In: *Geol. Jahrb. Hessen* 111 (1983), S. 261–302
- [204] WELLMER, F.-W. & KOSINOWSKI, M.: *Sicherheit der Rohstoffversorgung unter dem Aspekt der nachhaltigen Entwicklung*. In: *Berg- und hüttenmännische Monatshefte* 150 (2005), Nr. 4, S. 117–121
- [205] WENZEL, T.: *Mineralogische und geochemische Merkmale des Carnallitits im Flöz "Thüringen" des Werra-Kaligebietes, insbesondere des Kuppen-Carnallitits*. Freiberg, Bergakademie Freiberg. Diplomarbeit. 1983-01-01
- [206] WINTERSHALL HOLDING GMBH: *Laborbericht 34.446 : Gas-Untersuchung*. Ort der Probenahme 299 Dh zw. W121 u. W122. 2015
- [207] WINTERSHALL HOLDING GMBH: *Laborbericht 34.463 : Gas-Untersuchung*. Ort der Probenahme Rev. 12 Morbach 13m in 299. Dh / W121. 2015

- [208] WÜSTNER, L.: *Untersuchungen von Salzauslaugung und Tektonik im Zechstein des Werra-Kaligebietes und der Vorderrhön mittels geophysikalischer Methoden*. Freiberg, Bergakademie Freiberg. 1965-01-01
- [209] ZEHNER, B., BÖRNER, J. H., GÖRZ, I. & SPITZER, K.: *Workflow for generating tetrahedral meshes for finite simulations on complex geological structures*. In: *Computers & Geosciences* 79 (2015), S. 107–117
- [210] ZEIBIG, S. & JAHNE, H.: *Struktureller und petrographischer Aufbau einer Carnallititanstauung des Kaliflöztes Thüringen im Werra-Gebiet : Kali und Steinsalz* 11 (1993), 3/4, S. 74–85
- [211] ZELEK, S. M., STADNICKA, K. M., TOBOLA, T. & NATHANIEC-NOWAK, L.: *lattice deformation of blue halite from Zechstein evaporite basin: Klodowa Salt Mine, Central Poland : Mineralogy and Petrology* (2014)
- [212] ZIEGLER, M. A.: *North German Zechstein facies patterns in relation to their substrate : Geologische Rundschau* 78 (1989), Nr. 1, S. 105–127
- [213] ZIEGLER, P.: *Geological atlas of Western and Central Europe*. 2., completely rev. ed. The Hague : Shell Internationale Petroleum Maatschappij, 1990
- [214] ZIEGLER, W. H., DOERY, R. & SCOTT, J.: Tectonic habitat of Norwegian oil and gas. In: SPENCER, A. M. (Hrsg.): *Habitat of Hydrocarbons on the Norwegian Continental Shelf*. London : Graham & Trotman, 1986, S. 3–19

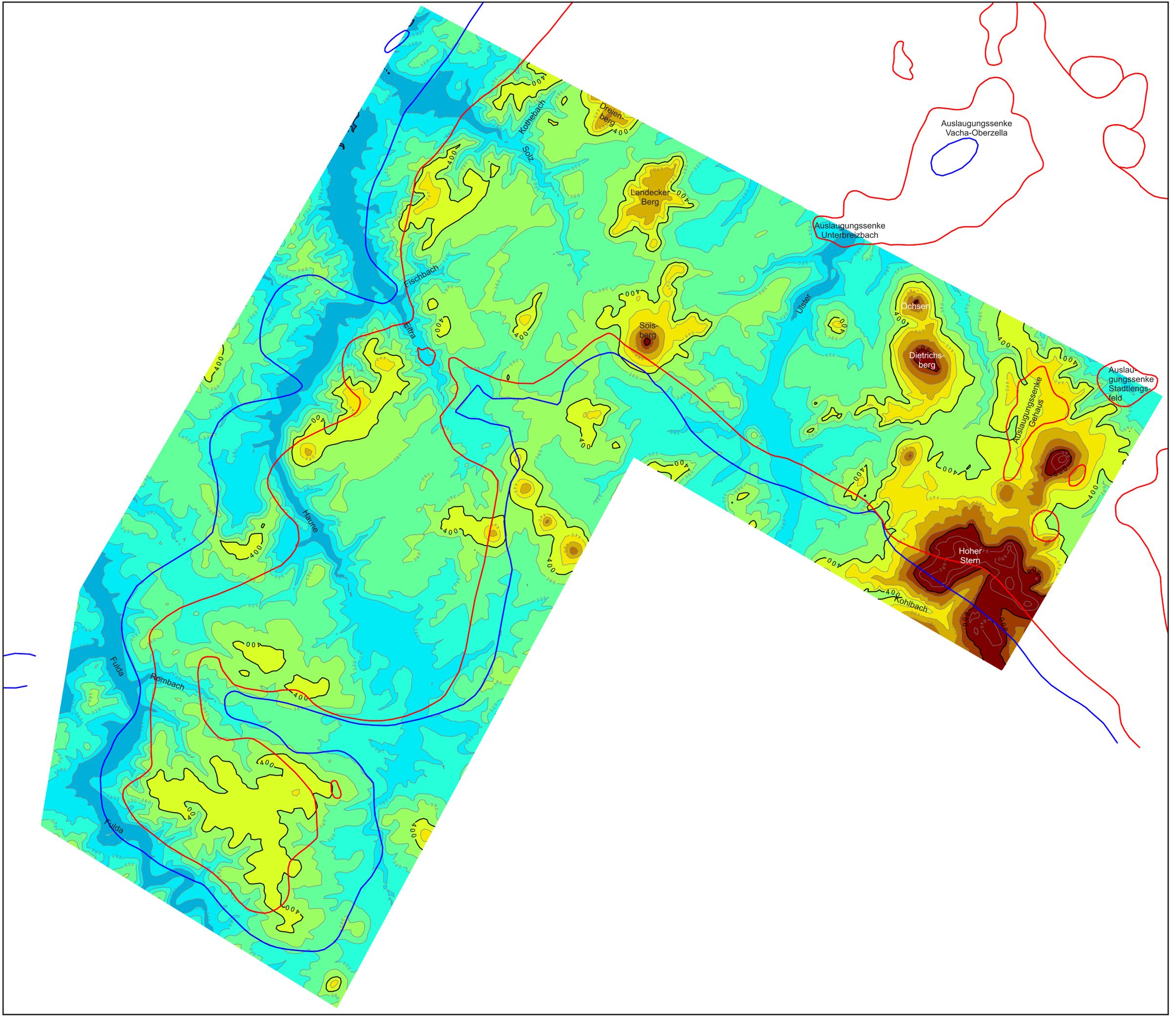
Anlagenverzeichnis

ANLAGE 1	Isolinienplan der Geländeoberkante
ANLAGE 2	Isobathenplan der Basis des Unteren Muschelkalk
ANLAGE 3	Isobathenplan der Basis des Oberen Buntsandstein
ANLAGE 4	Isobathenplan der Basis des Mittleren Buntsandstein
ANLAGE 5	Isobathenplan der Basis des Unteren Buntsandstein
ANLAGE 6	Isobathenplan der Basis des Leine-Karbonat
ANLAGE 7	Isobathenplan der Basis des Oberen Werra-Anhydrit (farbig) mit Isobathenplan der Basis des Obersten Werra-Steinsalz (grau)
ANLAGE 8	Isobathenplan der Basis des Oberen Werra-Ton
ANLAGE 9	Isobathenplan der Basis des Kaliflöz Hessen
ANLAGE 10	Isobathenplan der Basis des Kaliflöz Thüringen
ANLAGE 11	Isobathenplan der Basis des Unteren Werra-Anhydrit
ANLAGE 12	Isopachenplan des stratigraphischen Abschnittes von der Geländeoberkante bis zur Basis des Unteren Muschelkalk
ANLAGE 13	Isopachenplan des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Unteren Muschelkalk bis zur Basis des Unteren Buntsandstein
ANLAGE 14	Isopachenplan des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Oberen Leine-Ton bis zur Basis des Oberen Werra-Ton
ANLAGE 15	Isopachenplan des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Oberen Werra-Ton bis zur Basis des Unteren Werra-Anhydrit
ANLAGE 16	Isopachenplan des Kaliflöz Hessen
ANLAGE 17	Isopachenplan des Kaliflöz Thüringen
ANLAGE 18	Profilschnitt durch das 3D-Strukturmodell - Profil 1
ANLAGE 19	Profilschnitt durch das 3D-Strukturmodell - Profil 2
ANLAGE 20	Profilschnitt durch das 3D-Strukturmodell - Profil 3
ANLAGE 21	Profilschnitt durch das 3D-Strukturmodell - Profil 4
ANLAGE 22	Profilschnitt durch das 3D-Strukturmodell - Profil 5
ANLAGE 23	Fazies des Kaliflöz Thüringen mit Darstellung von Störungen und Vulkanitvorkommen
ANLAGE 24	Fazies des Kaliflöz Hessen mit Darstellung von Störungen und Vulkanitvorkommen
ANLAGE 25	Fazies und Tiefe des Kaliflöz Thüringen

ANLAGE 26	Fazies und Tiefe des Kaliflöz Hessen
ANLAGE 27	Fazies und Mächtigkeit des Kaliflöz Thüringen
ANLAGE 28	Fazies und K ₂ O-Gehalte des Kaliflöz Thüringen
ANLAGE 29	Fazies und Kieseritgehalte des Kaliflöz Thüringen
ANLAGE 30	Fazies und K ₂ O-Gehalte des Kaliflöz Hessen
ANLAGE 31	Fazies und Kieseritgehalte des Kaliflöz Hessen
ANLAGE 32	Fazies und Anzahl Gasereignisse für das Kaliflöz Thüringen
ANLAGE 33	Fazies und Größe Gasereignisse für das Kaliflöz Thüringen
ANLAGE 34	Fazies und Anzahl Gasereignisse für das Kaliflöz Hessen
ANLAGE 35	Fazies und Größe Gasereignisse für das Kaliflöz Hessen
ANLAGE 36	Statistische Verteilung der Kategorien der Gas-Salz-Ausbrüche in Bezug zu ihrer Häufigkeit und den jeweiligen Tonnagen des abgeförderten Haufwerkes in Folge von Gas-Salz-Ausbrüchen
ANLAGE 37	Topographische Karte mit Lokationen der Vulkanitproben
ANLAGE 38	Ergebnisse geochemischer und mineralogischer Untersuchungen ausgewählter Vulkanitproben
ANLAGE 39	Ausgewählte Lokationen – Übersicht über Beziehungen von Gasereignissen, Struktur und Vulkaniten für die Kaliflöze Thüringen und Hessen

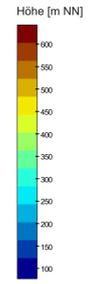
Anhangverzeichnis

ANHANG 1	Fehlerbetrachtung – Qualität der modellierten Flächen
----------	---

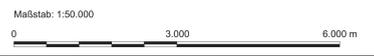


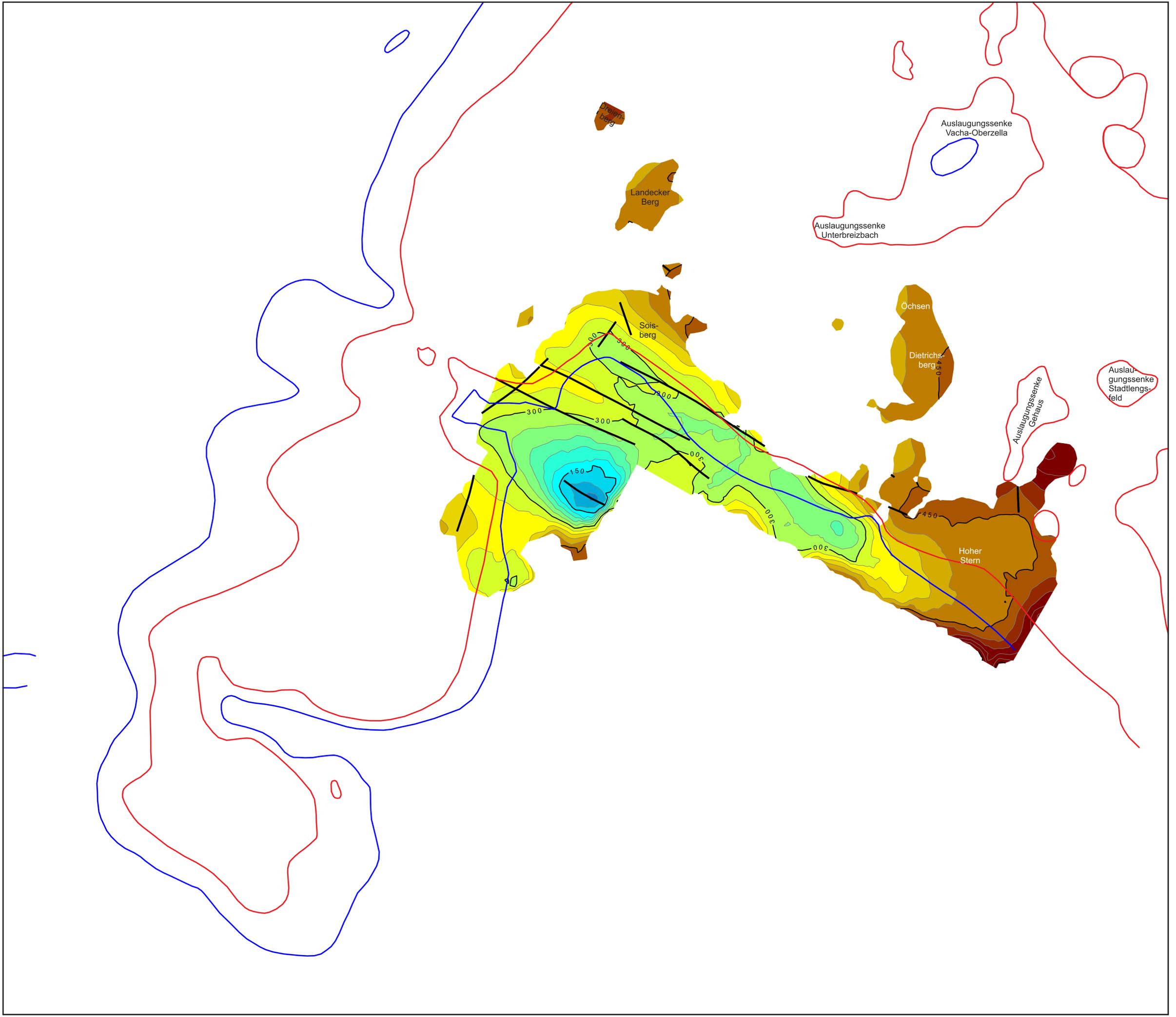
Legende

- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze



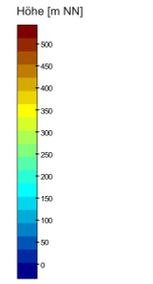
Geologie und Tektonik im Warma-Kulturgebiet
 M.Sc. Anna Engler
Anlage 1
 Isolinenplan der Geländeoberkante





Legende

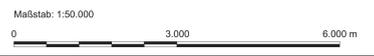
- Störung
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

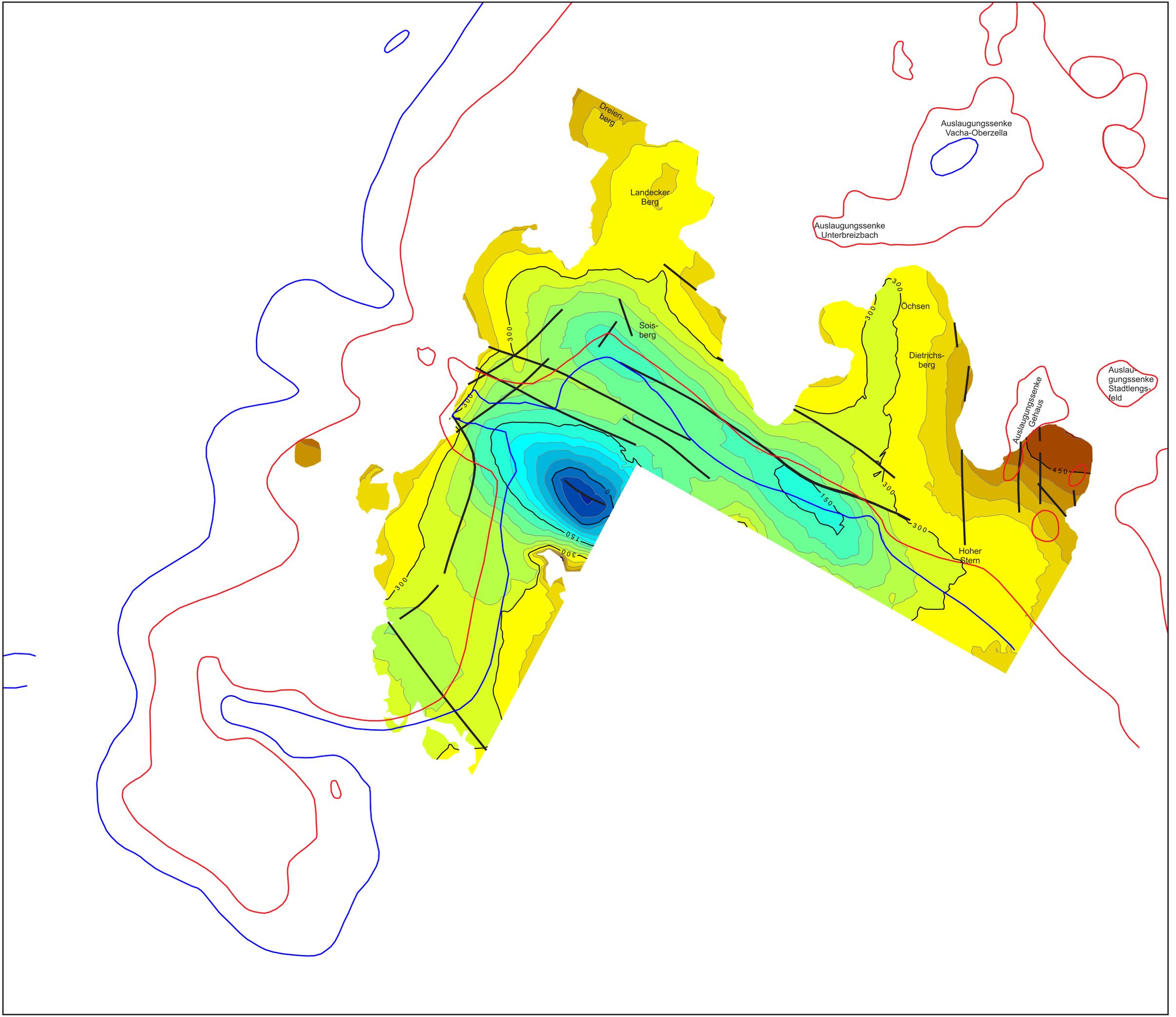


Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

M.Sc. Anna Engler

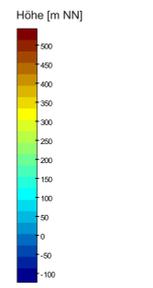
Anlage 2
Isobathenplan der Basis
des Unteren Muschelkalk





Legende

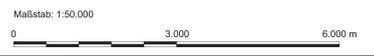
- Störung
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

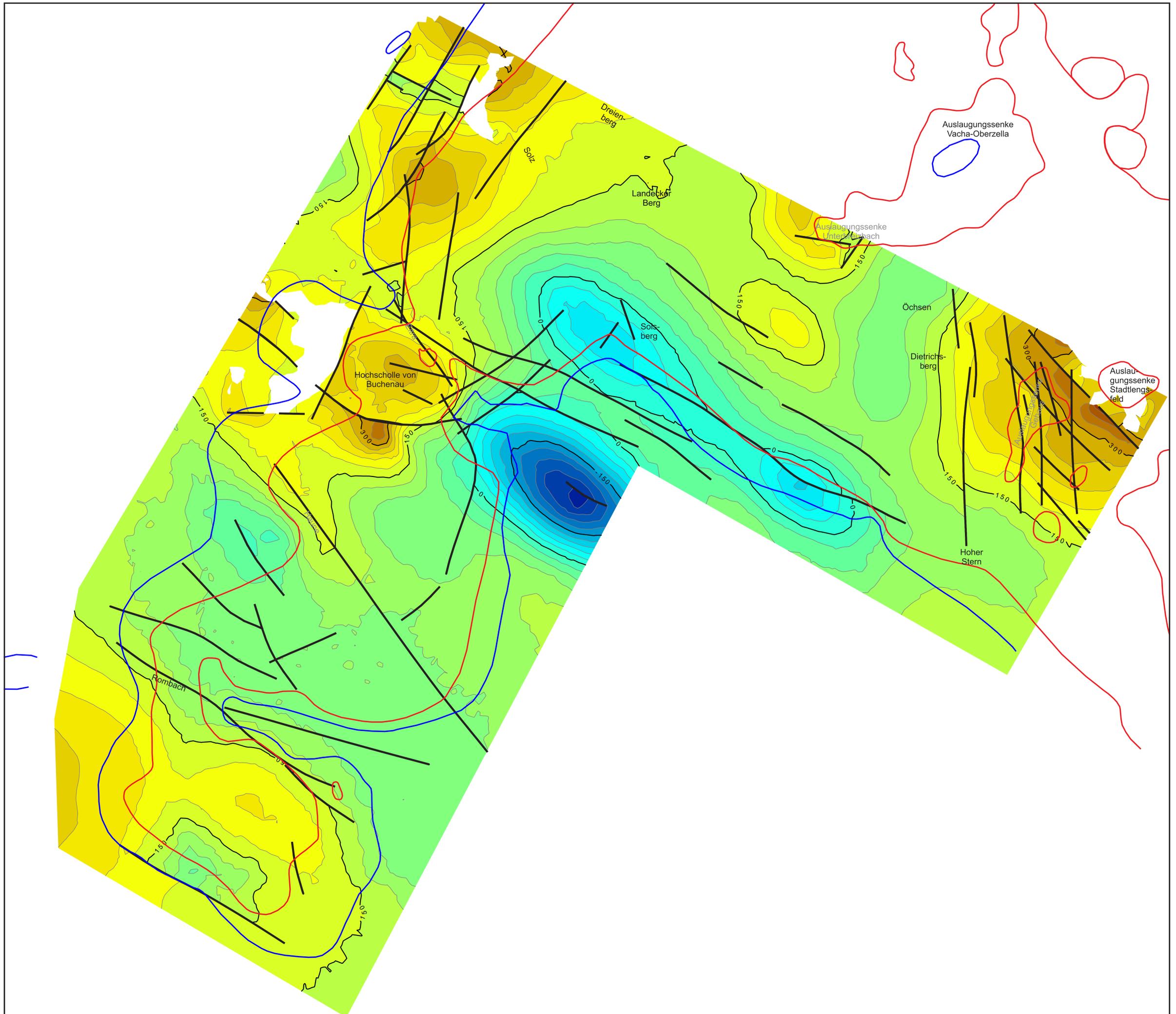


Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Warma-Kalztalgebiet
M.Sc. Anne Engler

Anlage 3
Isobathenplan der Basis
des Oberen Buntsandstein

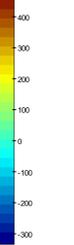




Legende

- Störung
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

Höhe [m NN]



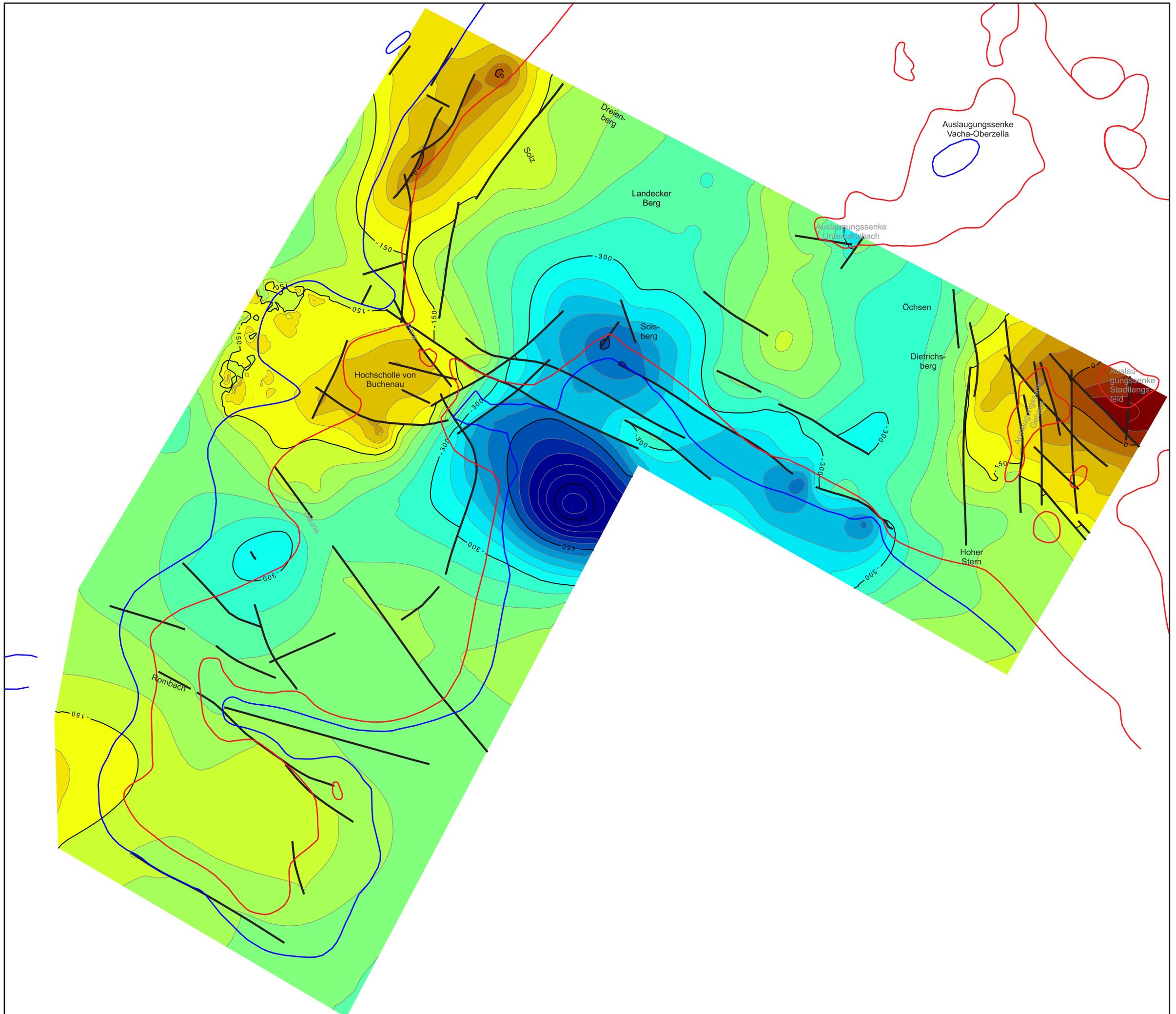
Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Warra-Kaligebiet
M.Sc. Anna Engler

Anlage 4
Isobathenplan der Basis
des Mittleren Buntsandstein

Maßstab: 1:50.000

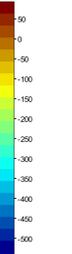




Legende

- Störung
- Salzhanginngrenze
- Salzhangaußengrenze

Höhe [m NN]



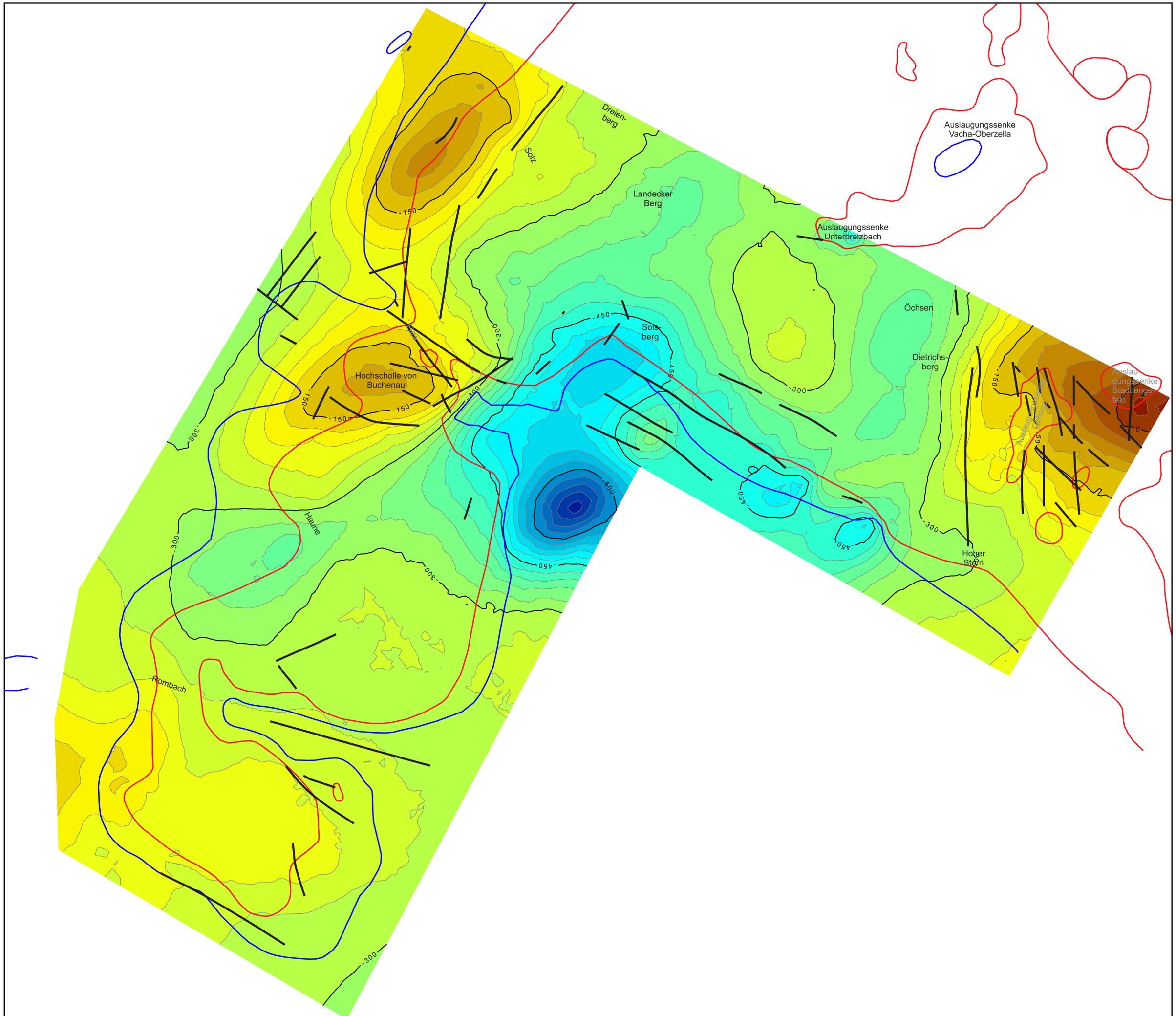
Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Warra-Kalgebiet
M.Sc. Anne Engler

Anlage 5
Isobathenplan der Basis
des Unteren Buntsandstein

Maßstab: 1:50.000

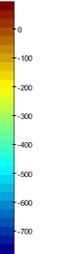




Legende

- Störung
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

Höhe [m NN]



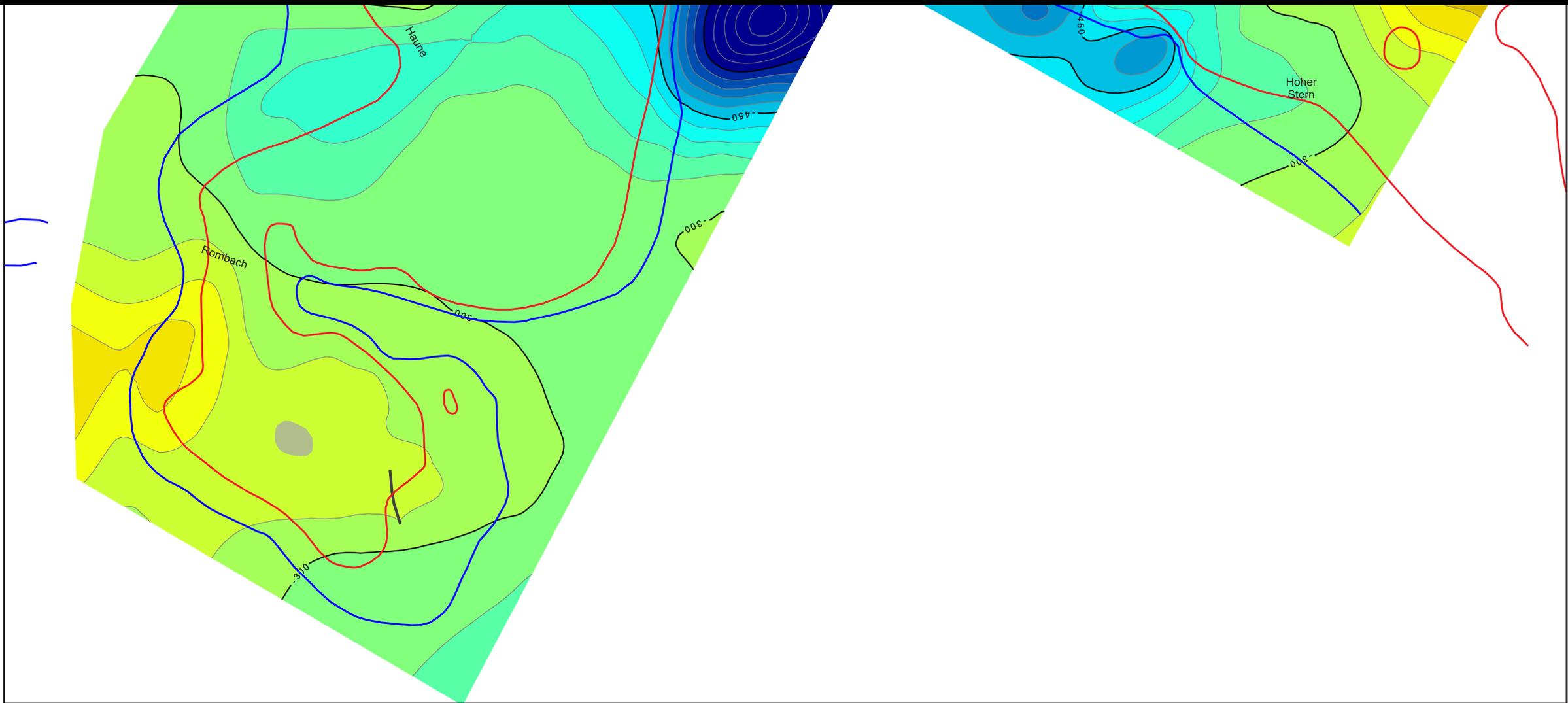
Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Warra-Kaligebiet
M.Sc. Anne Engler

Anlage 6
Isobathenplan der Basis
des Leine-Karbonat

Maßstab: 1:50.000

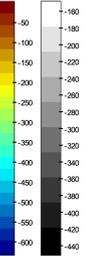




Legende

- Störung
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

Höhe (m NN)



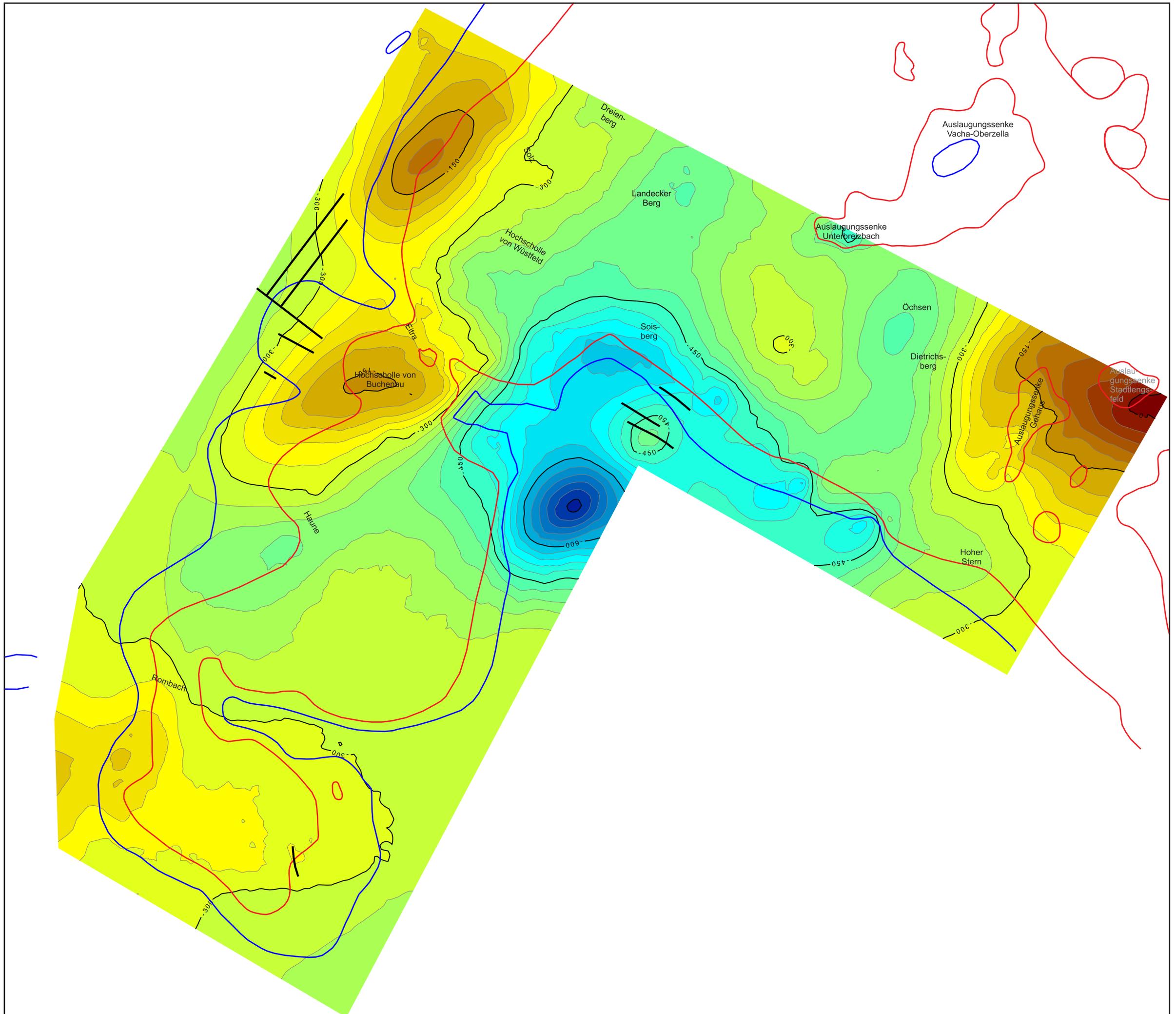
Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kulgebiet
M.Sc. Anne Engler

Anlage 7
Isobathenplan der Basis
des Oberen Werra-Anhydrit
(farbig) mit Isobathenplan
der Basis des Obersten
Werra-Steinsalz (grau)

Maßstab: 1:50.000

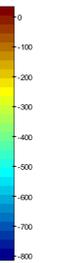




Legende

- Störung
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

Höhe [m NN]



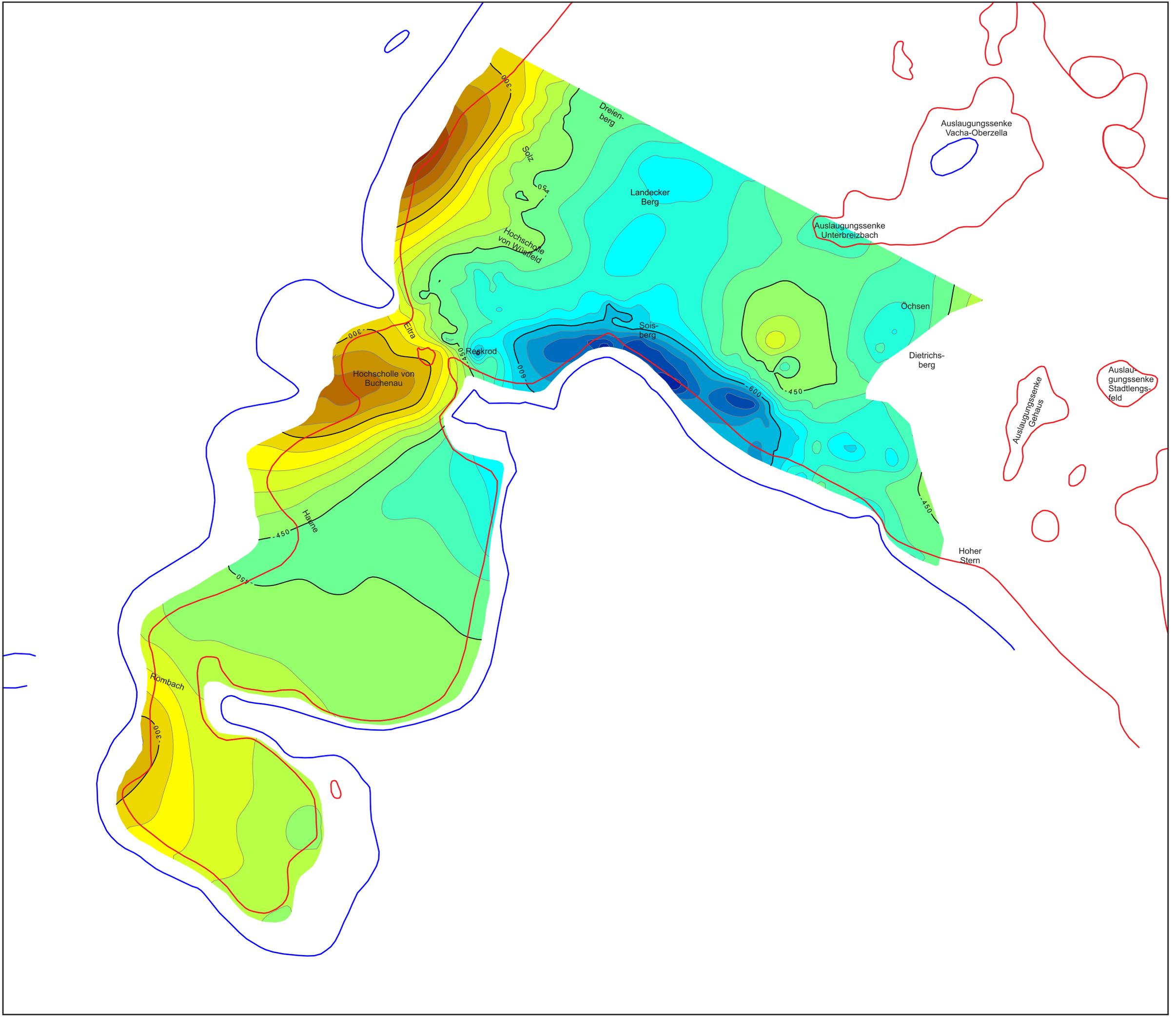
Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kalbtal
M.Sc. Anne Engler

Anlage 8
Isobathenplan der Basis
des Oberen Werra-Ton

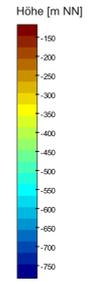
Maßstab: 1:50.000





Legende

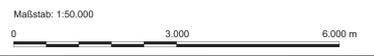
- Salzhänginnengrenze
- Salzhängaußengrenze

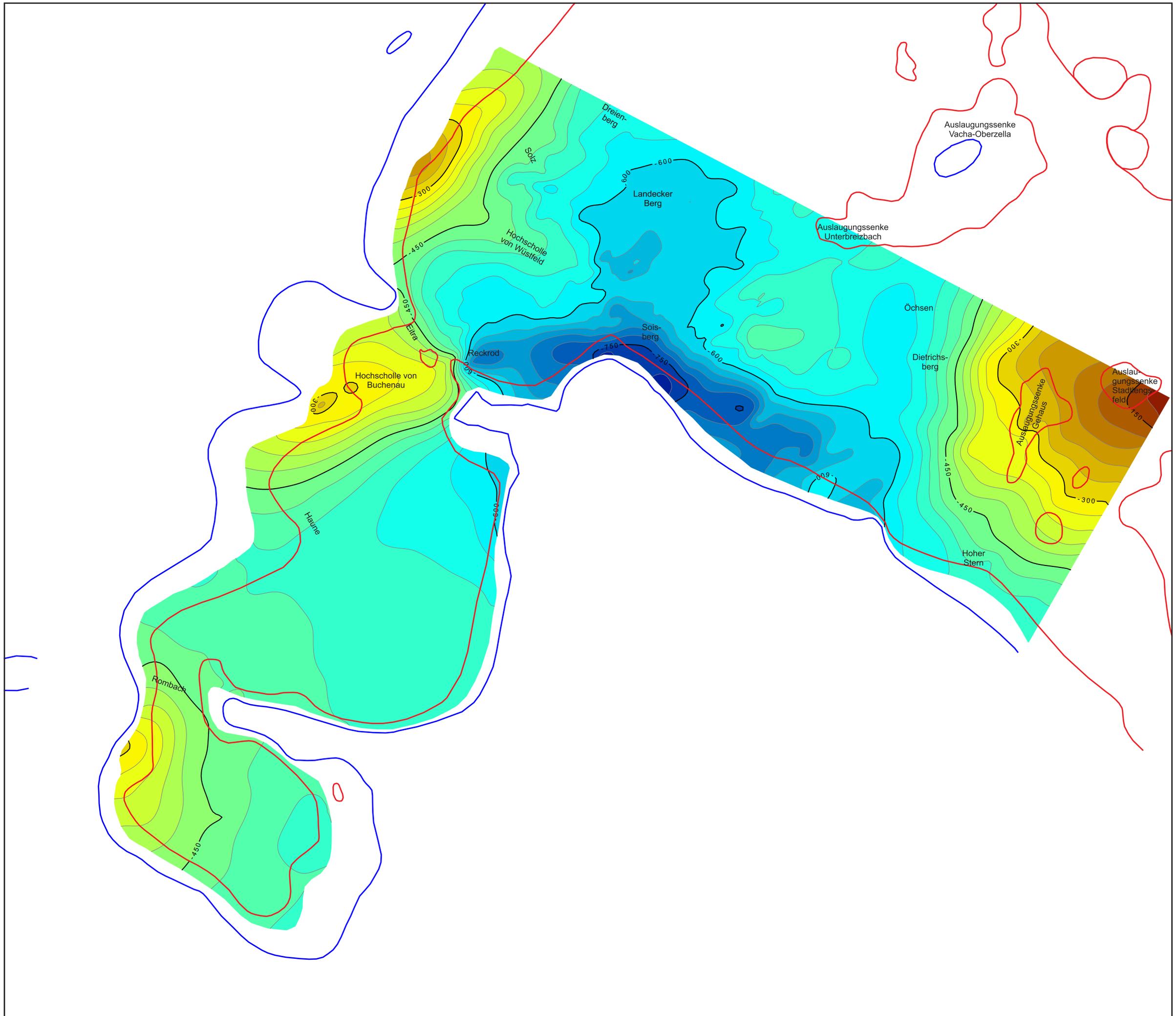


Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Warra-Kaligebiet
M.Sc. Anna Engler

Anlage 9
Isobathenplan der Basis
des Kallföz, Hessen

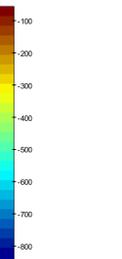




Legende

- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

Höhe [m NN]



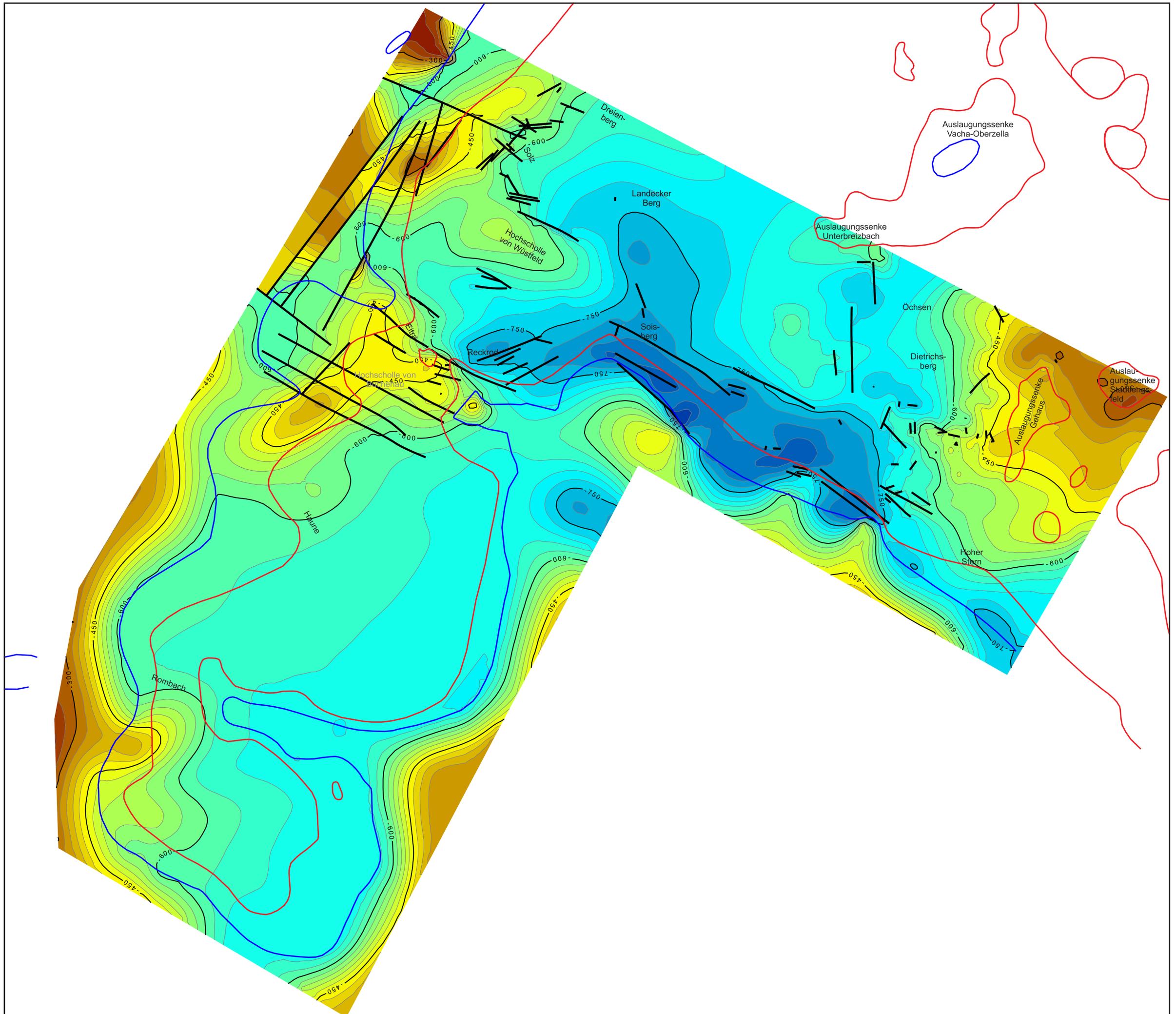
Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Warra-Kaligebiet

M.Sc. Anna Engler

Anlage 10
Isobathenplan der Basis
des Kallitz Thüringen

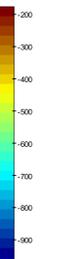




Legende

- Störung
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

Höhe [m NN]



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

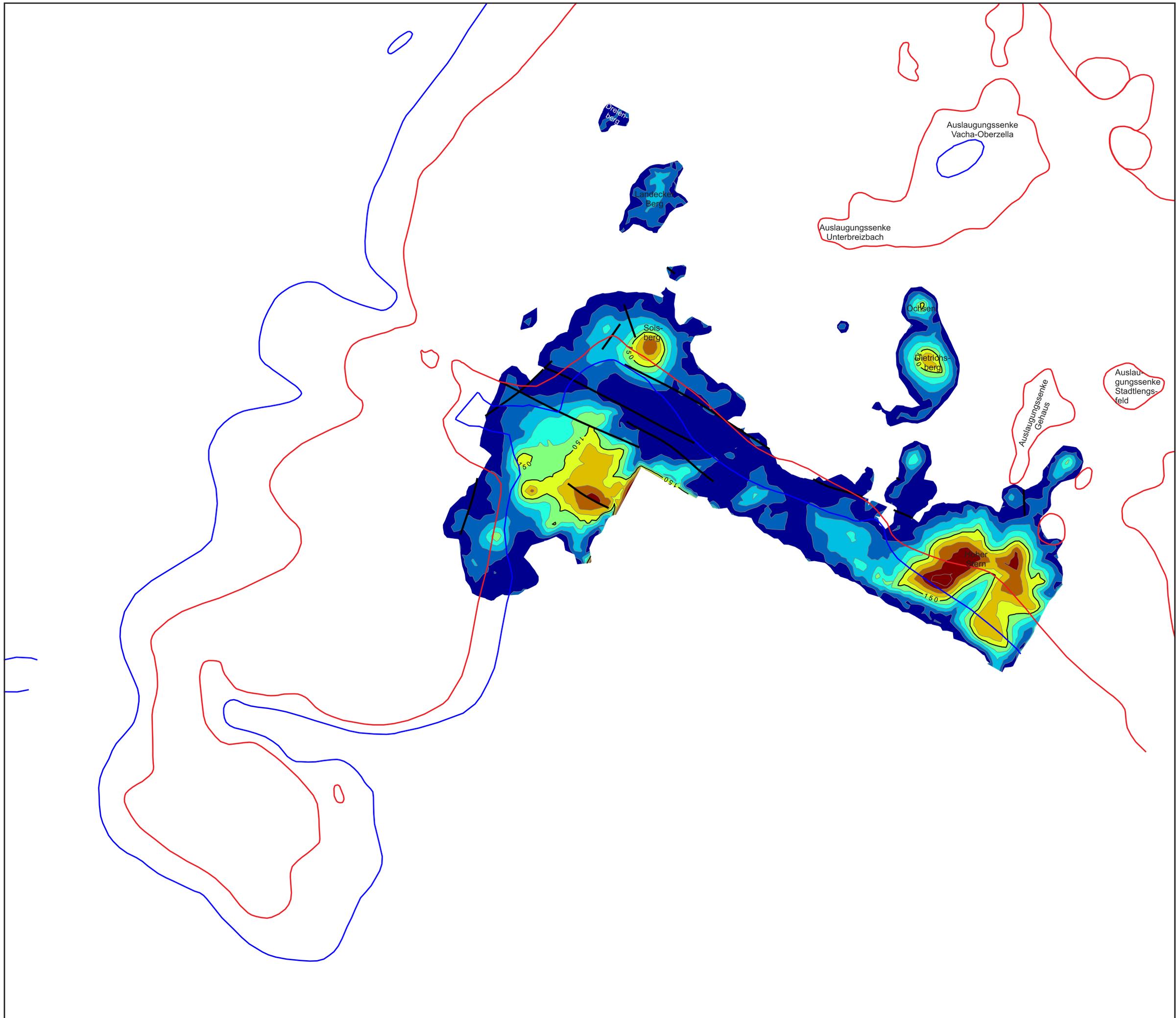
Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet

M.Sc. Anna Engler

Anlage 11
Isobathenplan der Basis
des Unteren Werra-Anhydrit

Maßstab: 1:50.000

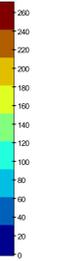




Legende

- Störung
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

Mächtigkeit [m]



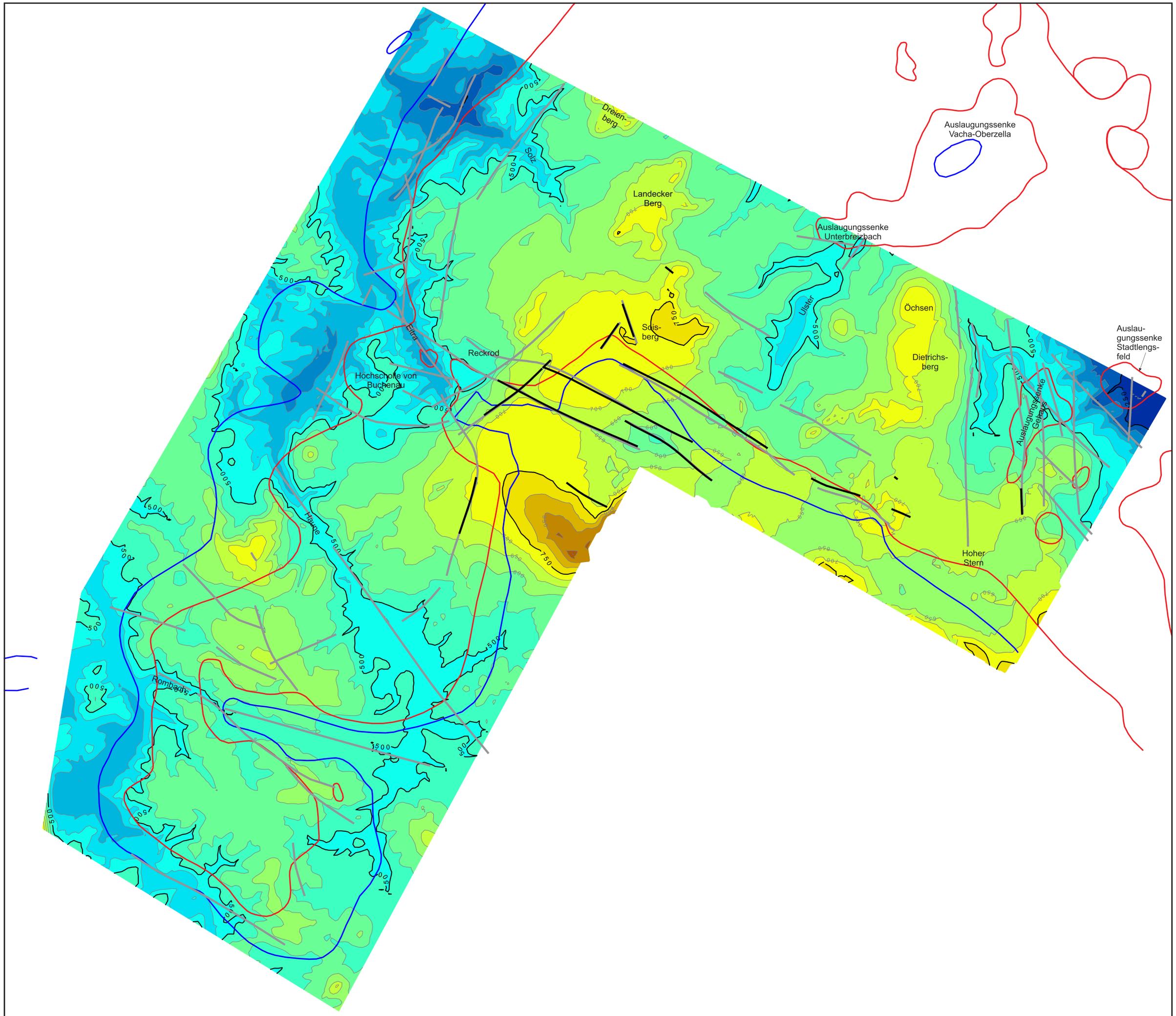
Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Warma-Kalztal

M.Sc. Anna Engler

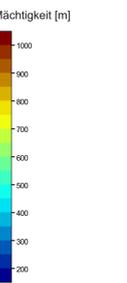
Anlage 12
Isopachenplan des
stratigraphischen Abschnittes
von der Geländeoberkante
bis zur Basis des Unteren
Muschelkalk





Legende

- Störung Basis Unterer Muschelkalk
- Störung Basis Unterer Buntsandstein
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze



Technische Universität Bergakademie Freiberg
 Institut für Mineralogie
 Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

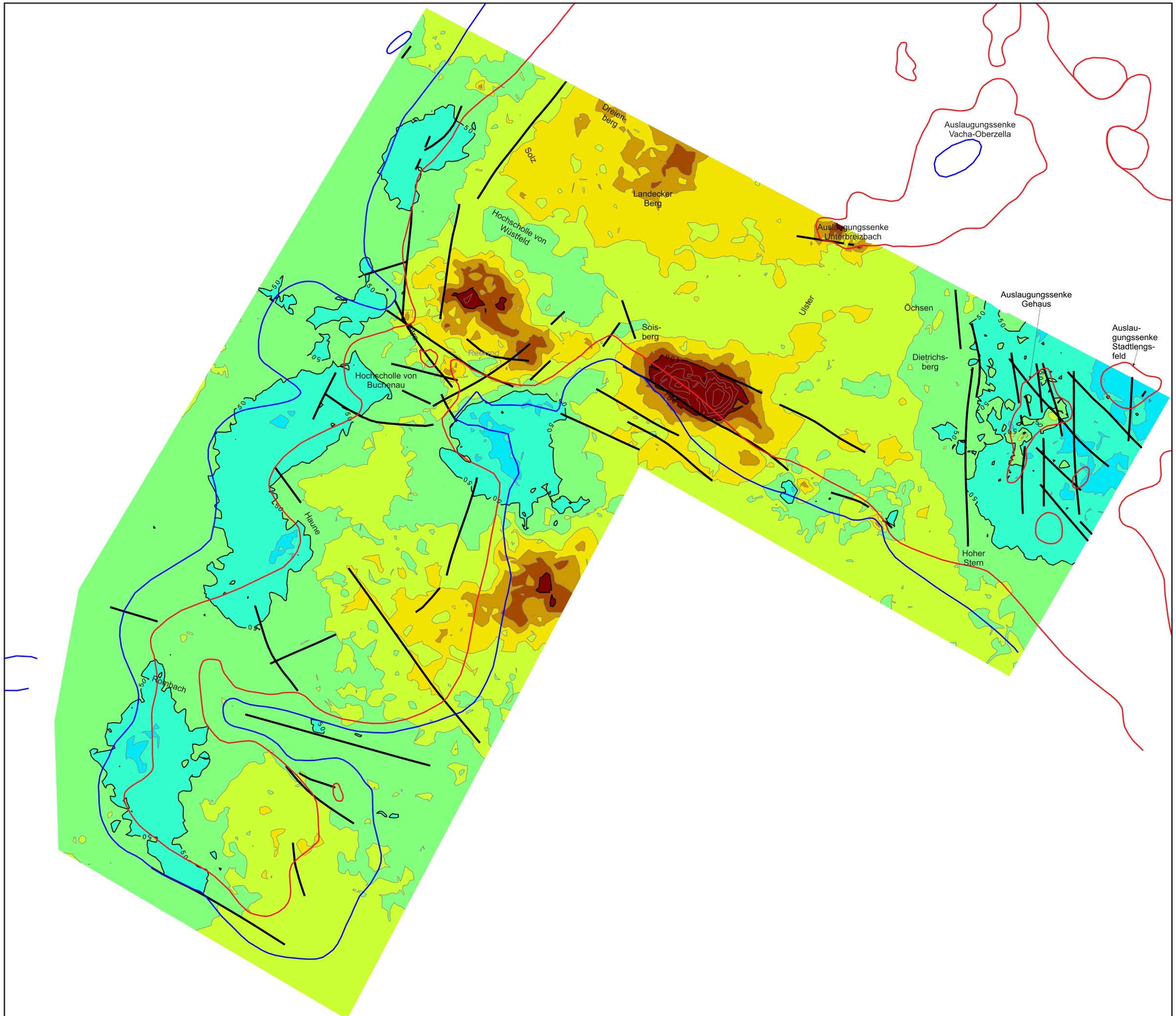
Geologie und Tektonik im Werra-Kalztal

M.Sc. Anna Engler

Anlage 13
 Isopachenplan des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Unterer Muschelkalk bis zur Basis des Unterer Buntsandstein

Maßstab: 1:50.000

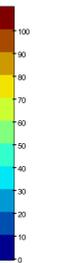




Legende

- Störung Oberer Leine-Ton
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

Mächtigkeit [m]



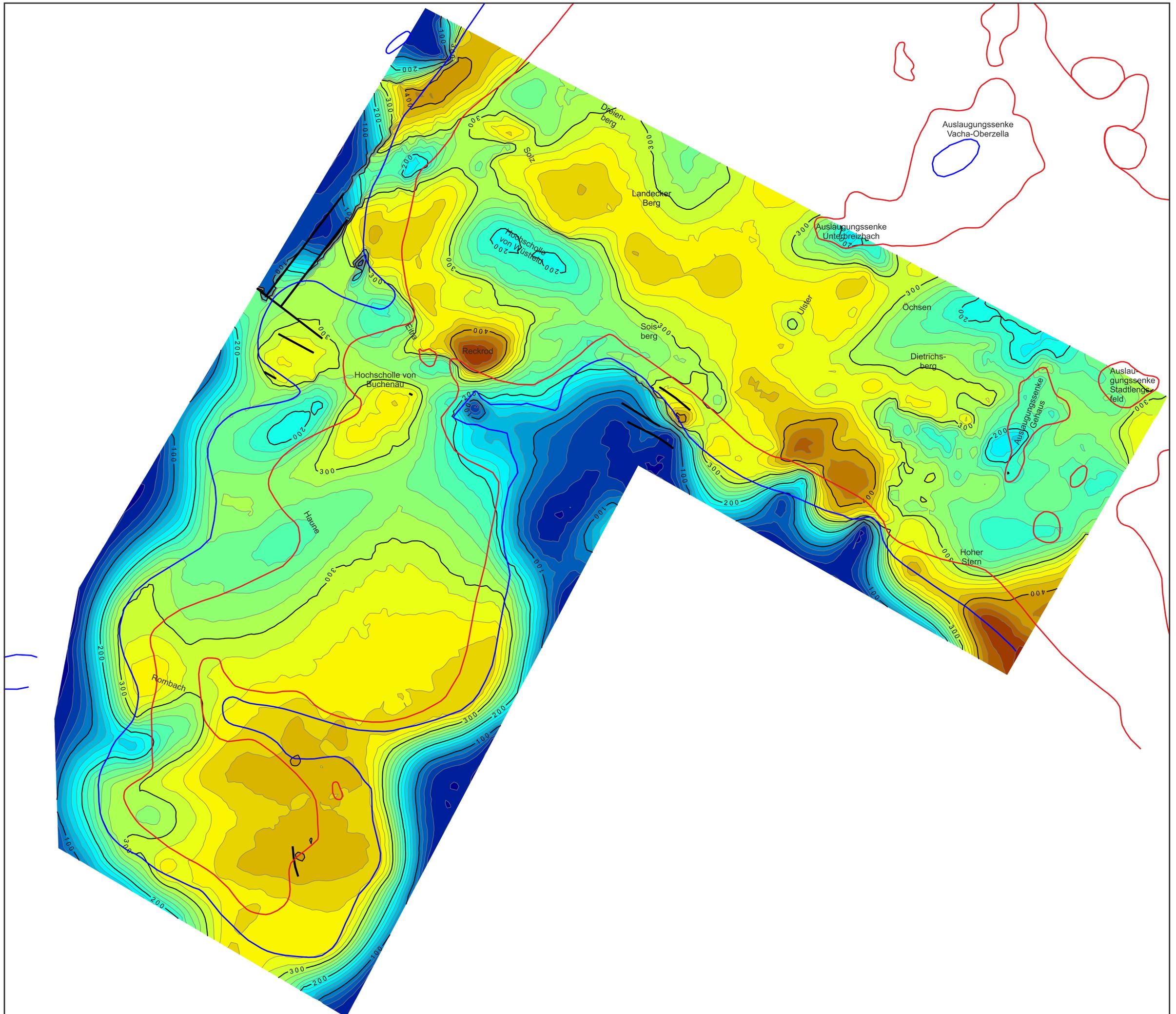
Technische Universität Bergakademie Freiberg
 Institut für Mineralogie
 Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kalgtal

M.Sc. Anna Engler

Anlage 14
 Isopachenplan des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Oberen Leine-Ton bis zur Basis des Oberen Werra-Ton

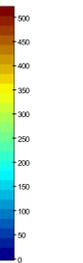
Maßstab: 1:50.000
 0 3.000 6.000 m



Legende

- Störung der Basis des Oberen Werra-Ton
- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze

Mächtigkeit [m]



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

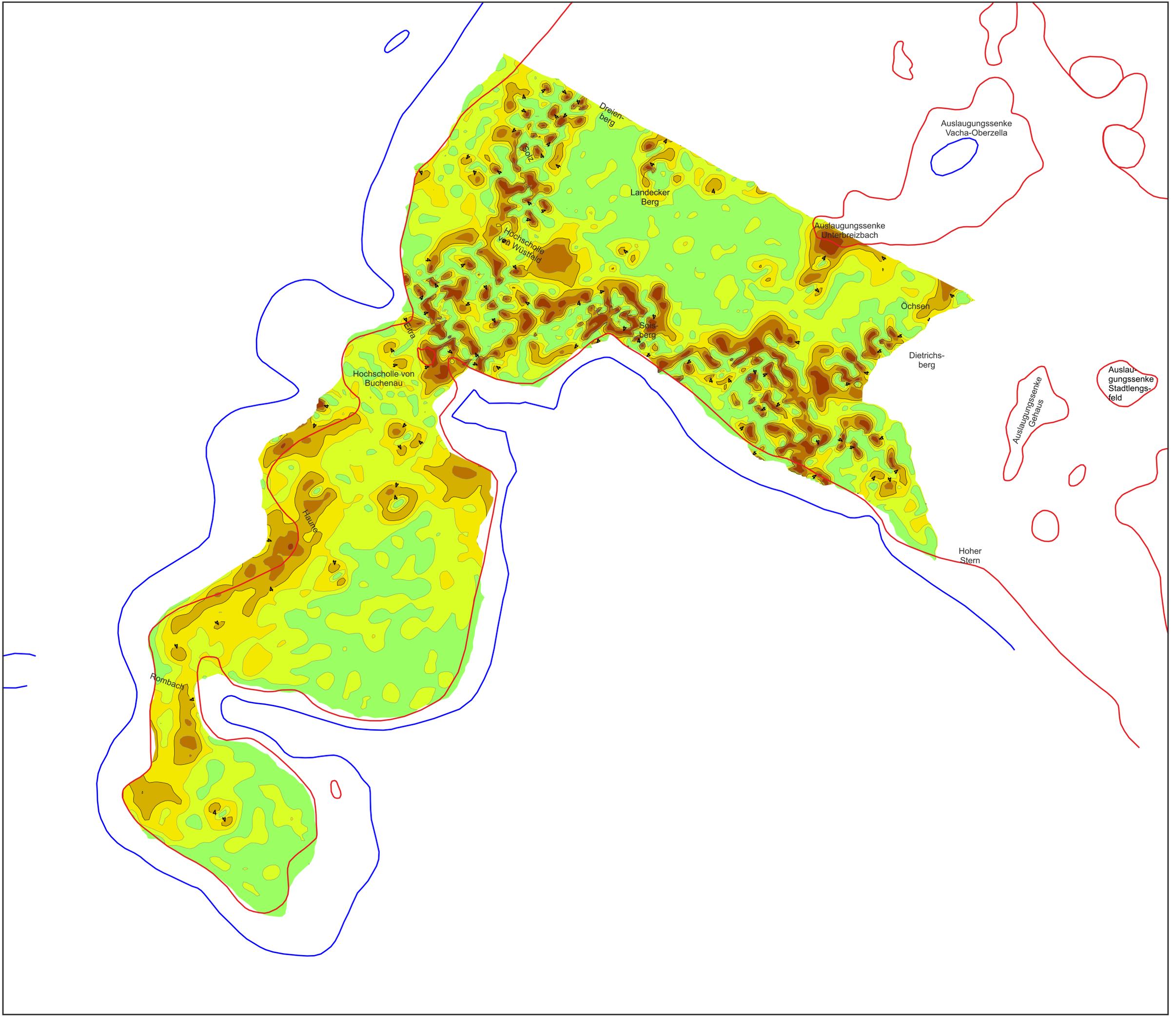
Geologie und Tektonik im Werra-Kalbtal

M.Sc. Anna Engler

Anlage 15
Isopachenplan des stratigraphischen Abschnittes von der Basis des Oberen Werra-Ton bis zur Basis des Unteren Werra-Anhydrit

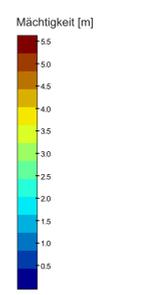
Maßstab: 1:50.000



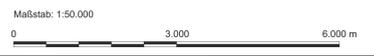


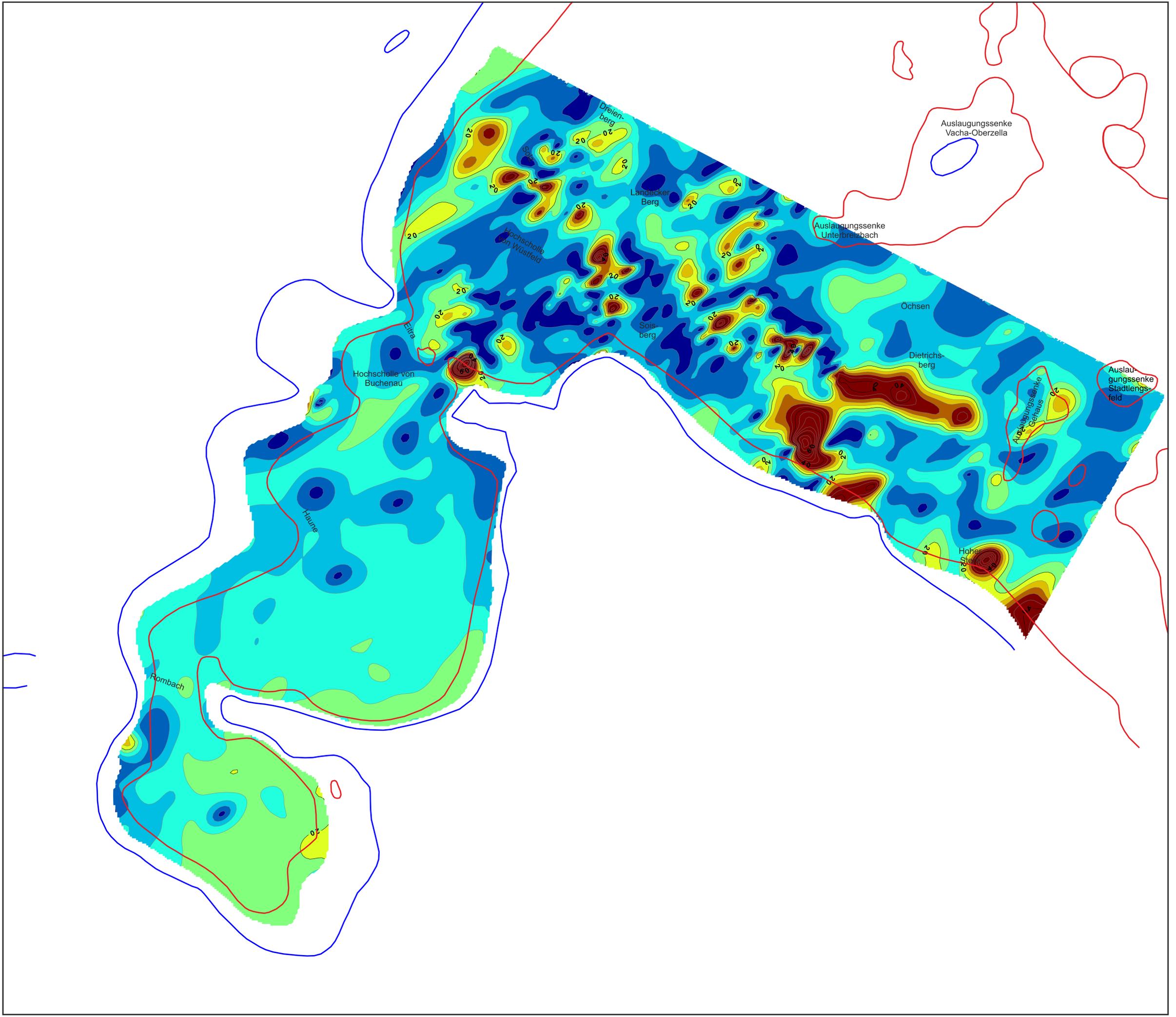
Legende

- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze



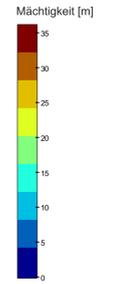
Geologie und Tektonik im Warra-Kaligebiet
 M.Sc. Anna Engler
Anlage 16
 Isopachenplan des
 Kaliföz Hessen





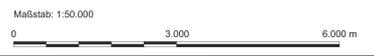
Legende

- Salzhanginnengrenze
- Salzhangaußengrenze



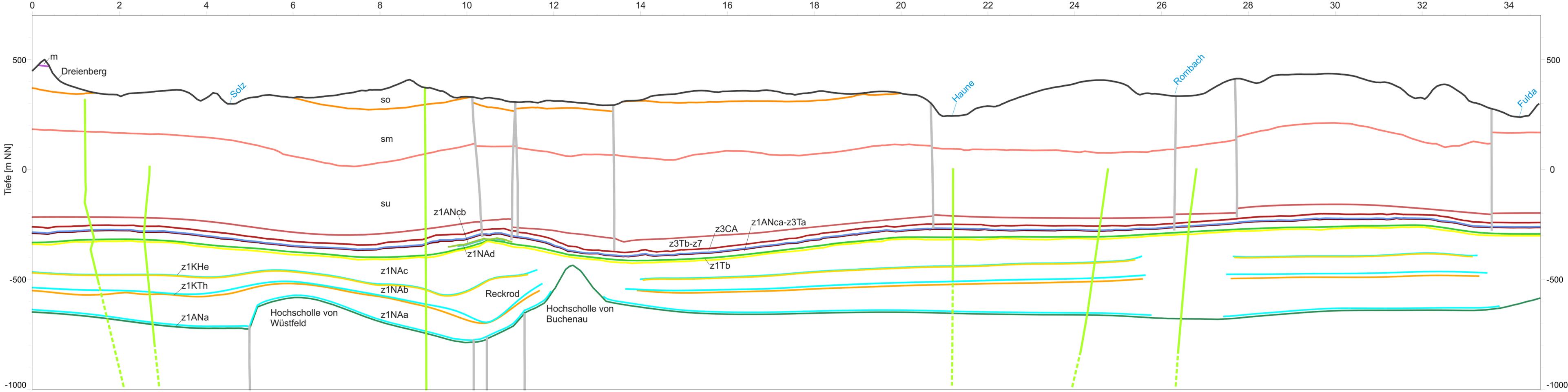
Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet
M.Sc. Anne Engler
Anlage 17
Isopachenplan des
Kaliföz Thüringen



NNE Profil 1 SSW

Laterale Erstreckung (Profilkilometer PKM) [km]



- Legende**
- Gewässer
 - Geländeoberkante
 - Muschelkalk
 - Oberer Buntsandstein
 - Mittlerer Buntsandstein
 - Unterer Buntsandstein
 - Oberer Leine-Ton bis Fulda-Folge
 - Leine-Karbonat
 - Unterer Leine-Ton
 - Oberer Werra-Anhydrit, Oberbank
 - Oberstes Werra-Steinsalz
 - Oberer Werra-Anhydrit, Unterbank
 - Oberer Werra-Ton
 - Werra-Steinsalz
 - Kaliföz Hessen
 - Kaliföz Thüringen
 - Unterer Werra-Anhydrit
 - - - Vulkanitvorkommen, vermutet
 - - - Vulkanitvorkommen
 - Störungszone

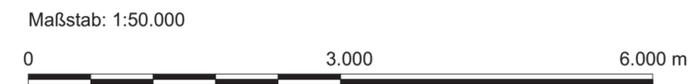


**Technische Universität
Bergakademie Freiberg**
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet

M.Sc. Anne Engler

Anlage 18
Profilschnitt durch das
3D-Strukturmodell - Profil 1
(5-fache Überhöhung)

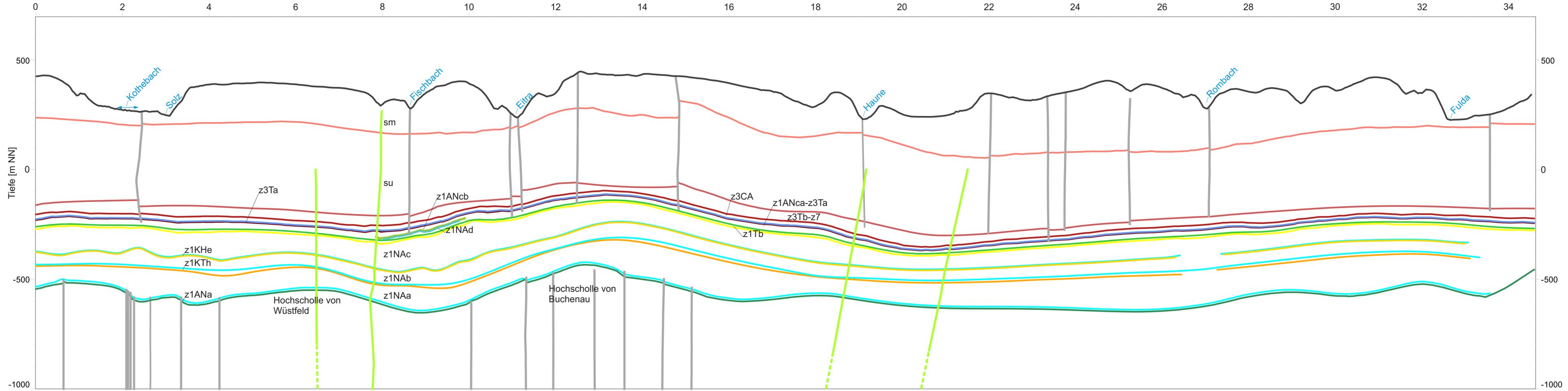


NNE

Profil 2

SSW

Laterale Erstreckung (Profilkilometer PKM) [km]



Legende

- Gewässer
- Geländeoberkante
- Mittlerer Buntsandstein
- Unterer Buntsandstein
- Oberer Leine-Ton bis Fulda-Folge
- Leine-Karbonat
- Unterer Leine-Ton
- Oberer Werra-Anhydrit, Oberbank
- Oberstes Werra-Steinsalz
- Oberer Werra-Anhydrit, Unterbank
- Oberer Werra-Ton
- Werra-Steinsalz
- Kaliflöz Hessen
- Kaliflöz Thüringen
- Unterer Werra-Anhydrit
- Vulkanitvorkommen, vermutet
- Vulkanitvorkommen
- Störungszone



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet

M.Sc. Anne Engler

Anlage 19
Profilschnitt durch das
3D-Strukturmodell - Profil 2
(5-fache Überhöhung)

Maßstab: 1:50.000

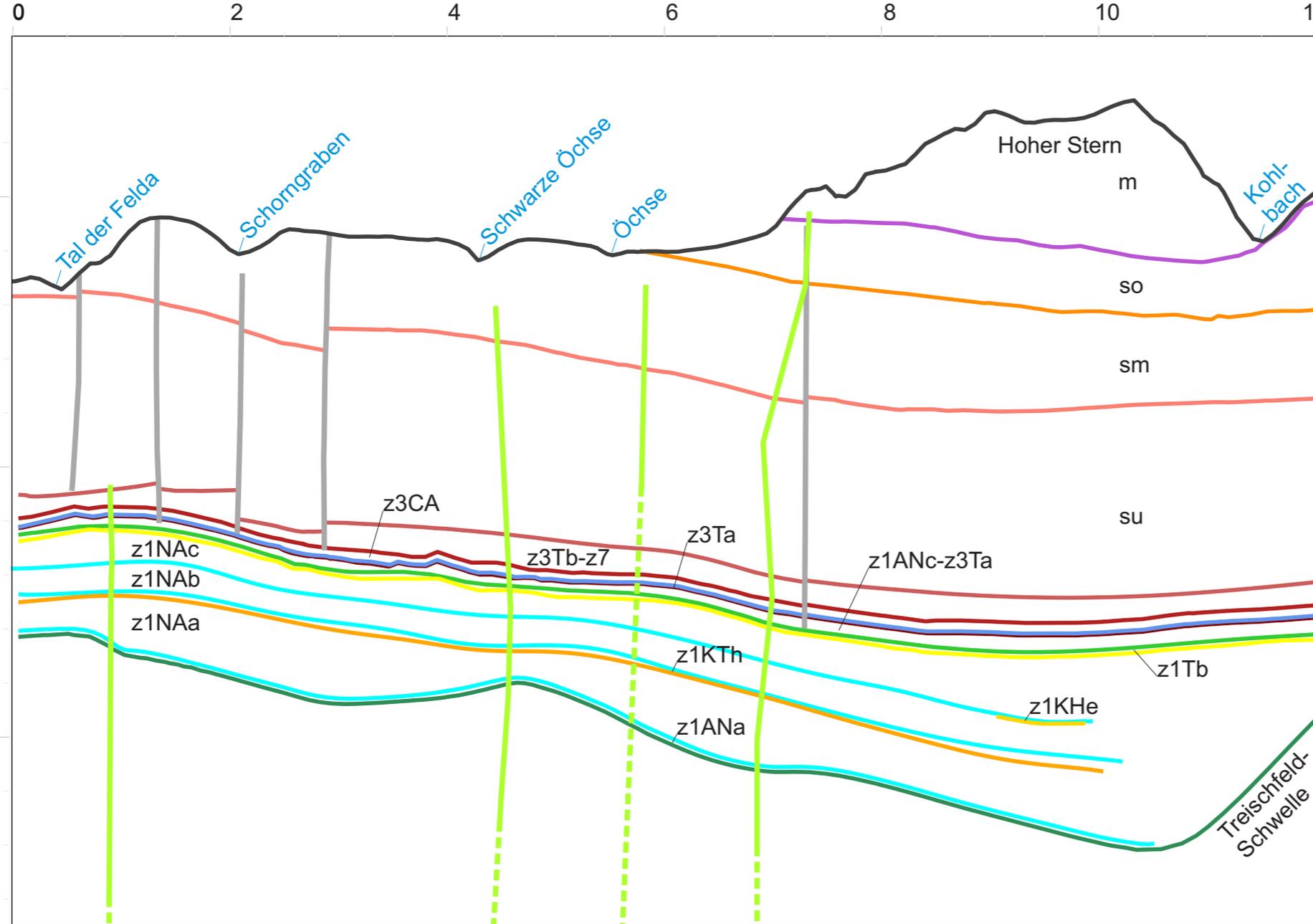


NNE

Profil 4

SSW

Laterale Erstreckung (Profilkilometer PKM) [km]



Legende

- Gewässer
- Geländeoberkante
- Muschelkalk
- Oberer Buntsandstein
- Mittlerer Buntsandstein
- Unterer Buntsandstein
- Oberer Leine-Ton bis Fulda-Folge
- Leine-Karbonat
- Unterer Leine-Ton
- Oberer Werra-Anhydrit
- Oberer Werra-Ton
- Werra-Steinsalz
- Kaliflöz Hessen
- Kaliflöz Thüringen
- Unterer Werra-Anhydrit
- Vulkanitvorkommen, vermutet
- Vulkanitvorkommen
- Störungszone



Technische Universität Bergakademie Freiberg
 Institut für Mineralogie
 Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet

M.Sc. Anne Engler

Anlage 21
 Profilschnitt durch das
 3D-Strukturmodell - Profil 4
 (5-fache Überhöhung)

Maßstab: 1:50.000

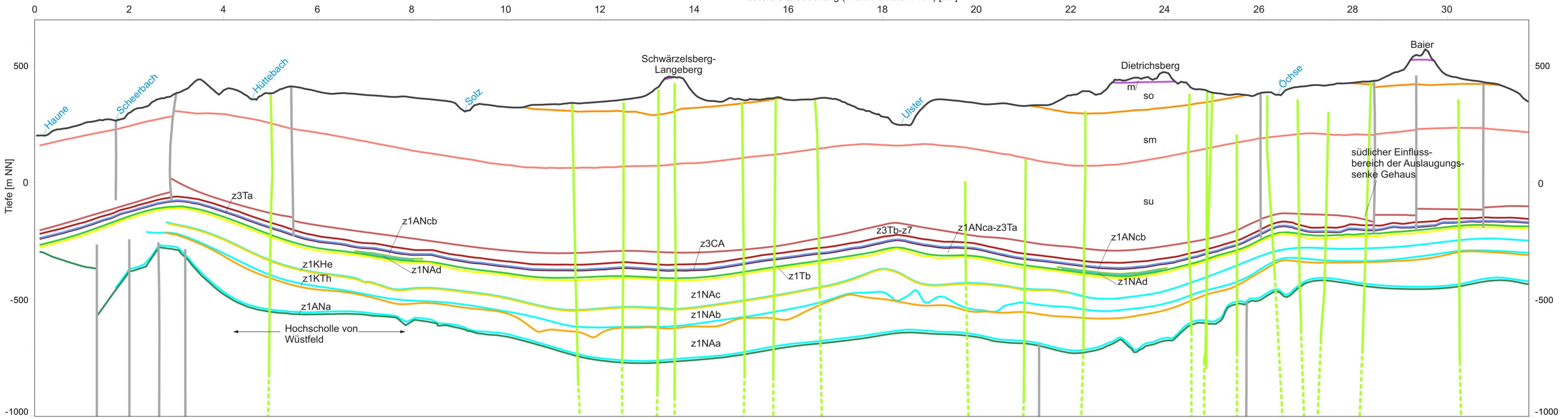


WNW

Profil 5

ESE

Laterale Erstreckung (Profilkilometer PKM) [km]



Legende

- Gewässer
- Geländeoberkante
- Muschelkalk
- Oberer Buntsandstein
- Mittlerer Buntsandstein
- Unterer Buntsandstein
- Oberer Leine-Ton bis Fulda-Folge
- Leine-Karbonat
- Unterer Leine-Ton
- Oberer Werra-Anhydrit, Oberbank
- Oberstes Werra-Steinsalz
- Werra-Steinsalz
- Unterer Werra-Anhydrit, Unterbank
- Werra-Steinsalz
- Kaliflöz Hessen
- Kaliflöz Thüringen
- Unterer Werra-Anhydrit
- Vulkanitvorkommen, vermutet
- Vulkanitvorkommen
- Störungszone



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet

M.Sc. Anne Engler

Anlage 22
Profilschnitt durch das
3D-Strukturmodell - Profil 5
(5-fache Überhöhung)

Maßstab: 1:50.000





- Legende:**
- Vulkanorkommen
 - Störungen Supersalinar
 - Störungen Subsalinar
 - - - Arbeitsgebiet
- Salzhang**
- Salzhangaußengrenze
 - Grenze totaler Auslaugung
 - Salzhanginnengrenze
 - Grenze Auslaugungsenke
- Fazies #1KTh**
- Carnallit
 - Spinit über Carnallit
 - Spinit
 - Halbsalz
 - Salzsatz
 - Umwandlungshalt
 - Vertaubung
 - Langbeinit
 - Rennit

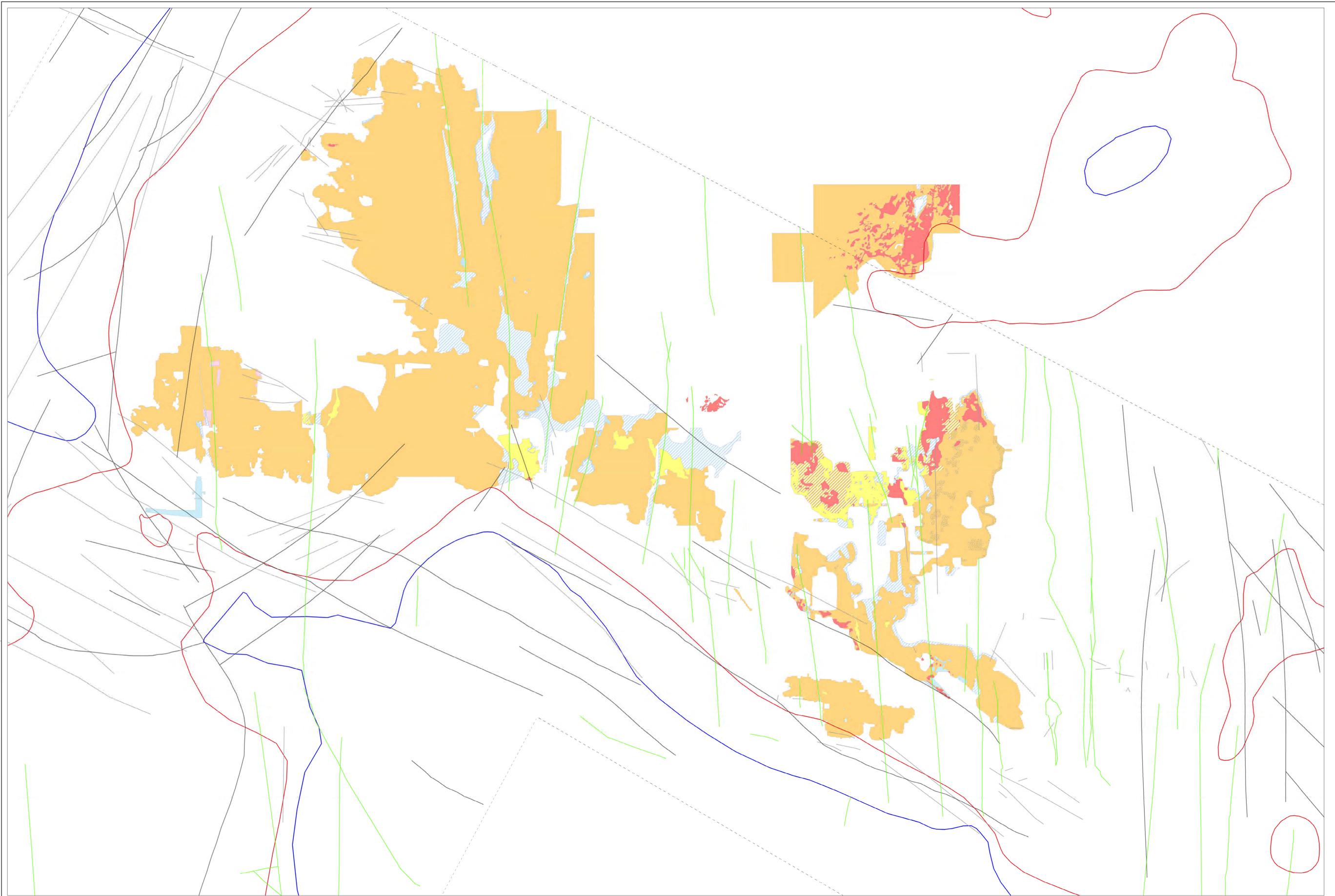


Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kalীগেৰ

M.Sc. Anne Engler
Anlage 23
Fazies des Kalkföz Thüringen
mit Darstellung von Störungen
und Vulkanitvorkommen

Maßstab: 1:25.000
0 1.500 3.000 m
Koordinatensystem: DHDN 3 Degree Gauss Zone 3



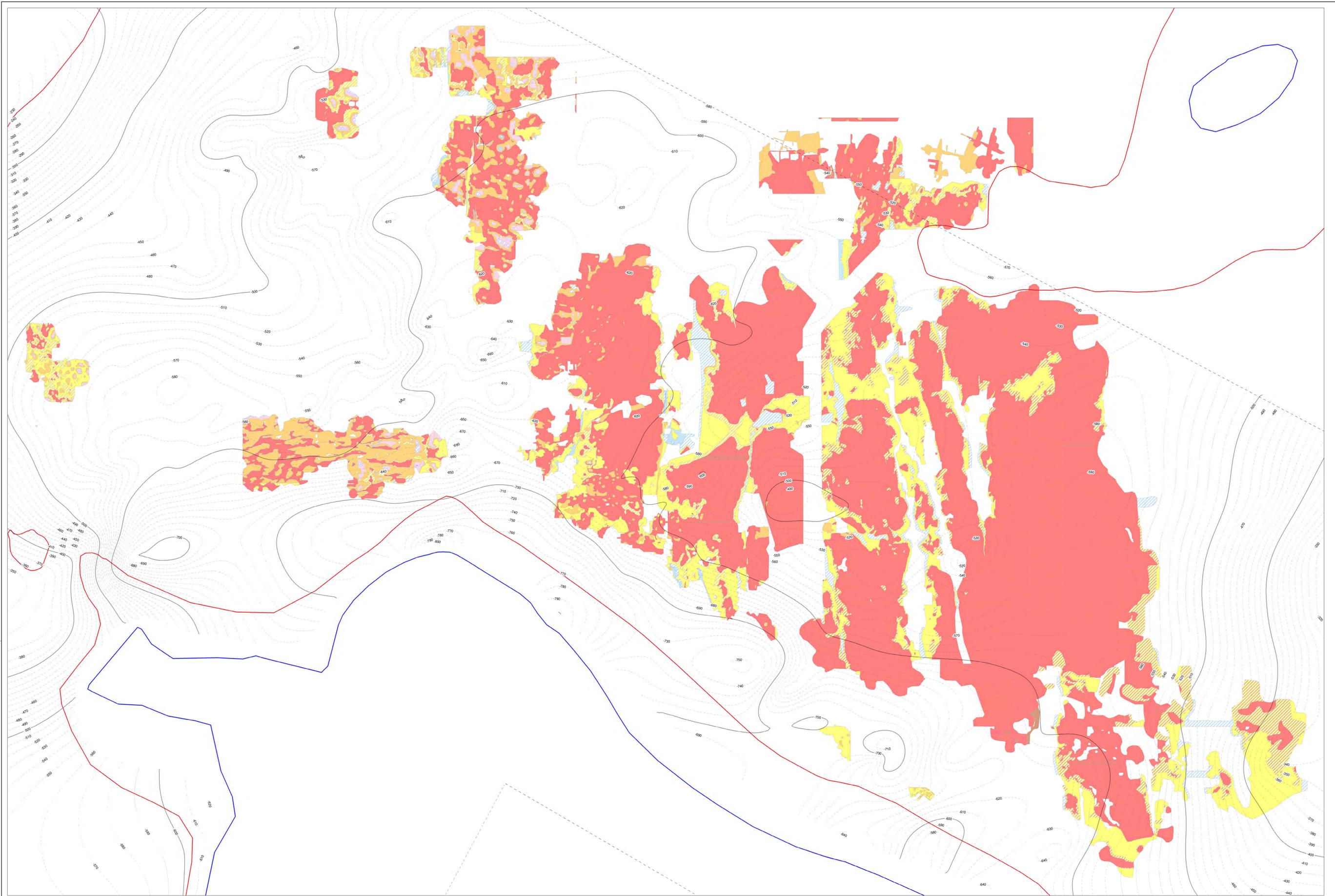
- Legende:**
- Vulkanorkommen
 - Störungen Superseiner
 - Störungen Subseiner
 - - - Arbeitsgebiet
 - Salzhangäußergrenze
 - Grenze totaler Auslaugung
 - Salzhanginnengrenze
 - Grenze Auslaugungsenke
 - Facies #11/16**
 - Carnalit
 - Sphint über Carnalit
 - Hartsalz
 - Auszümmung
 - Steinsalz
 - Umwandlungshalt
 - Vertaubung
 - Langbeinit



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie
Geologie und Tektonik im Werra-Kaliberg
M.Sc. Anne Engler

Anlage 24
Fazies des Kaliföz Hessen
mit Darstellung von Störungen
und Vulkanitvorkommen

Maßstab: 1:25.000
0 1.500 3.000 m
Koordinatensystem: DHDN 3 Degree Gauss Zone 3

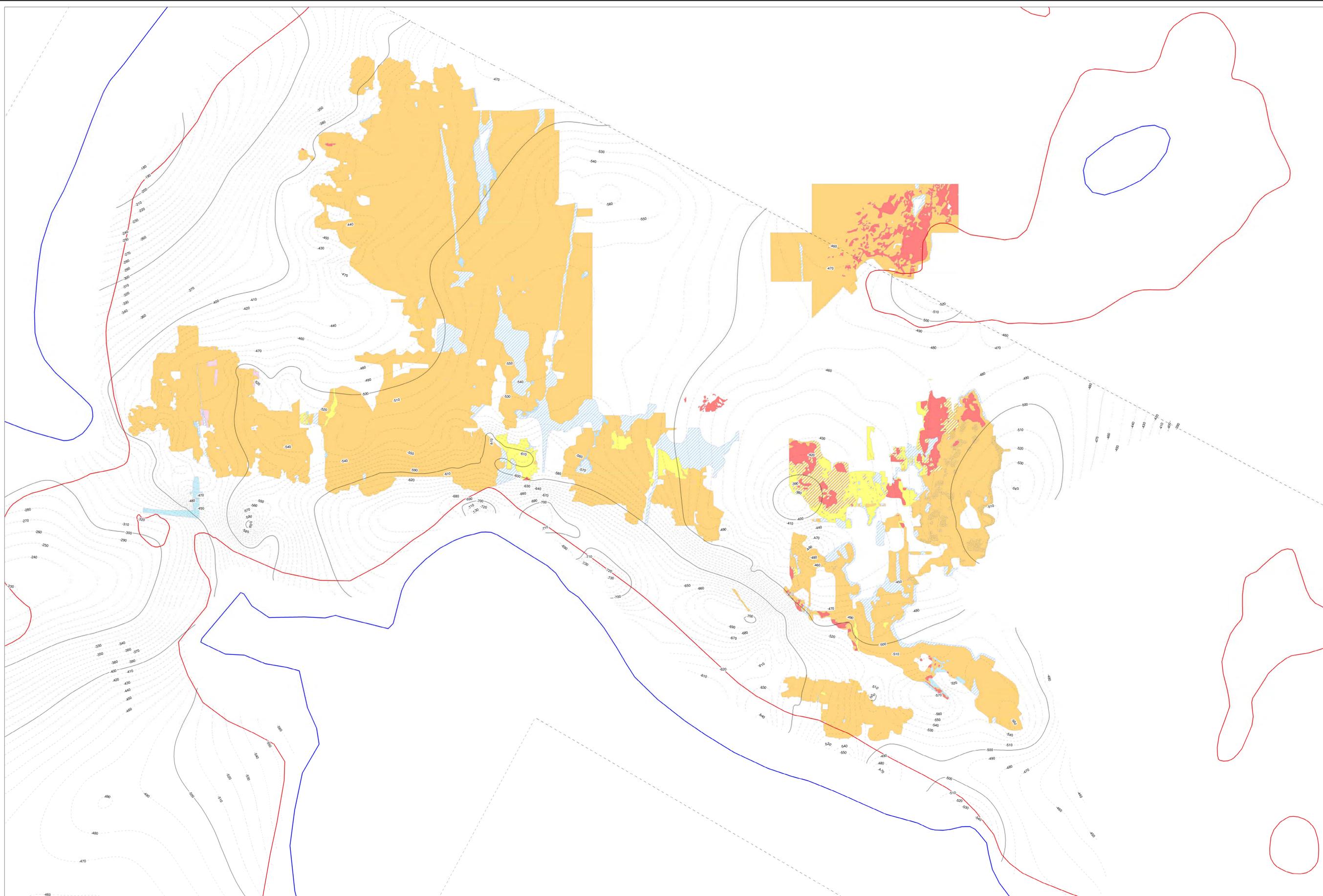


- Legende:**
- Anstaltsgebiet
 - Salzhang
 - Salzhängengrenze
 - Grenze bölder Ausläugung
 - Salzhängengrenze
 - Grenze Ausläugungsenke
 - Fazies z1KTh
 - Camalitt
 - Syvint über Camalitt
 - Hainzsch
 - Steinsalz
 - Umwandlungshalt
 - Vortaubung
 - Langbeint
 - Rinneit
 - Tiefe z1KTh [m NN]
 - Hauptschritte
 - untergeordnete Schritte



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenkunde und Petrologie
Geologie und Tektonik im Werra-Kalkegebiet
M.Sc. Anne Engler
Anlage 25
Fazies und Tiefe des
Kaltflöz Thüringen

Maßstab: 1:20.000
0 1.500 3.000 m
Koordinatensystem: DHDN 3 Degree Gauss Zone 3

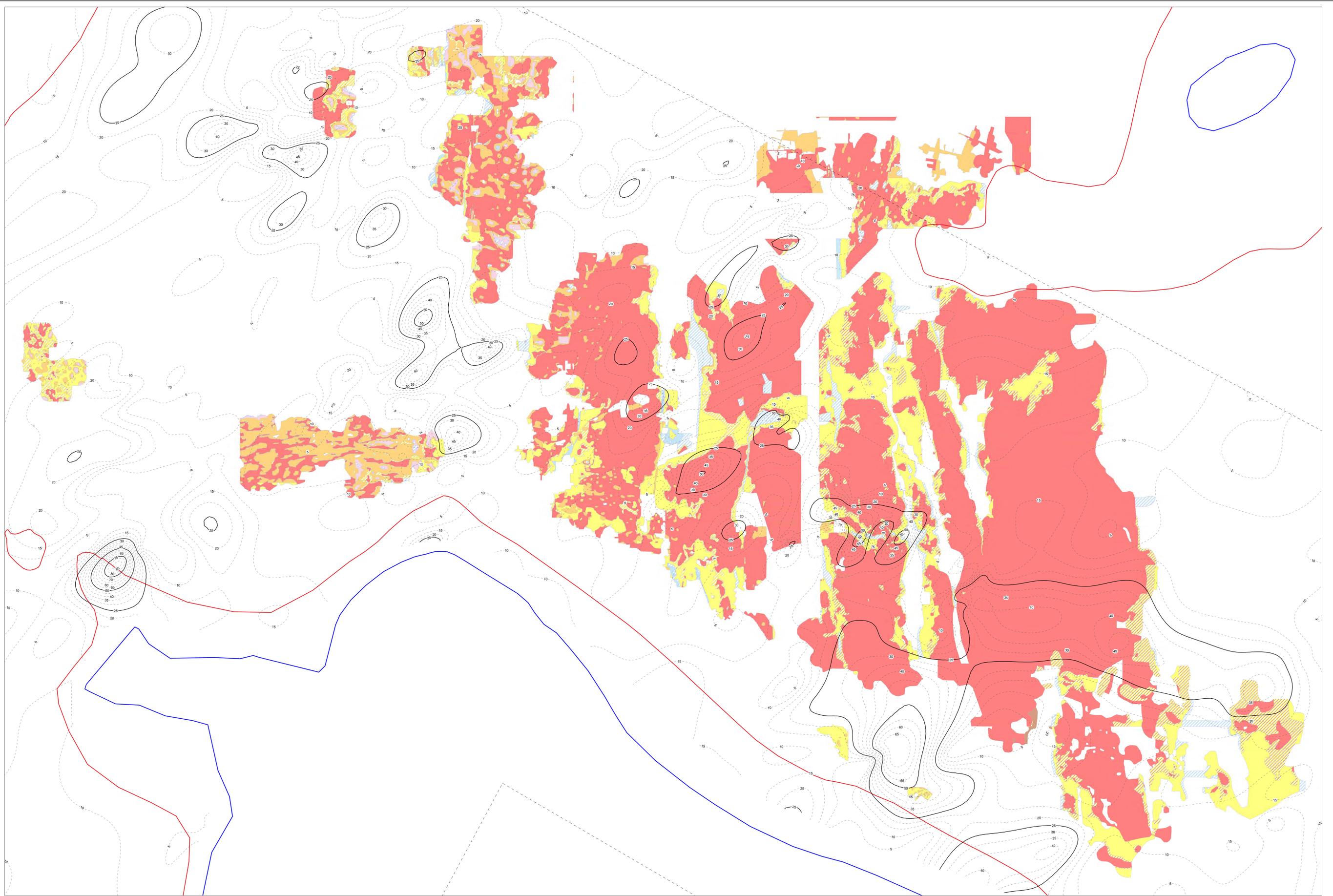


- Legende:**
- Anstößgebiet
 - Salzhang**
 - Salzhangäußergrenze
 - Grenze totaler Auslaugung
 - Salzhanginnengrenze
 - Grenze Auslaugungssenke
 - Fazies z1KHe**
 - Camalitt
 - Syvint über Camalitt
 - Harzsch
 - Amdöring
 - Steinatz
 - Umwandlungsschicht
 - Vertaubung
 - Langbeint
 - Tiefe z1KHe [m NN]**
 - Hauptschritte
 - untergeordnete Schritte



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie
Geologie und Tektonik im Werra-Kaliberg
M.Sc. Anne Engler
Anlage 26
Fazies und Tiefe des
Kaitlflöz Hessen

Maßstab: 1:25.000
0 1.500 3.000 m
Koordinatensystem: DHDN 3 Degree Gauss Zone 3

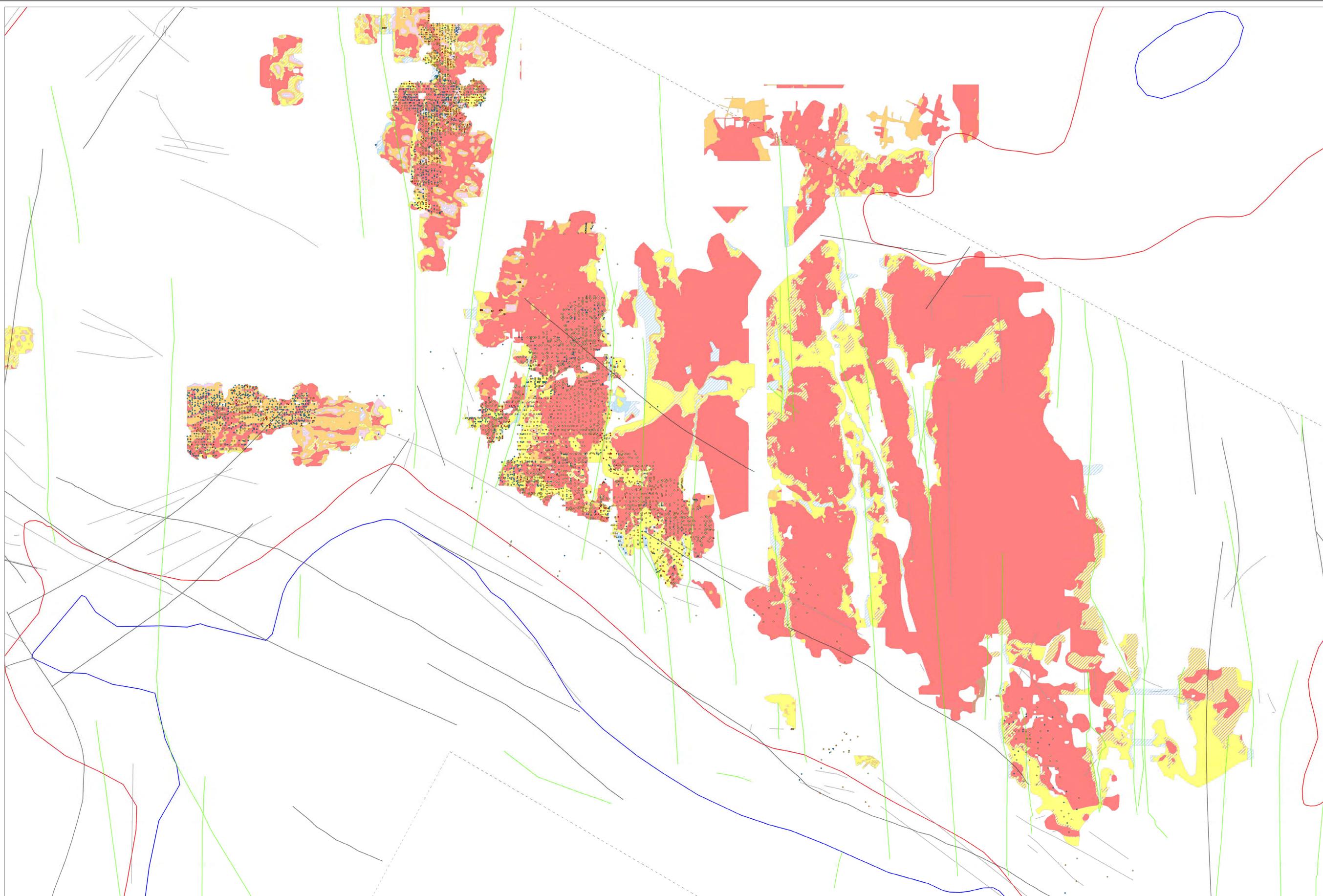


- Legende:**
- Anstaltsgebiet
 - Salzhang**
 - Salzhängeäußergrenze
 - Grenze totaler Auslaugung
 - Salzhängeinnergrenze
 - Grenze Auslaugungsenke
 - Facies z1KTh**
 - Camalitt
 - Syvint über Camalitt
 - Syvint
 - Stalissatz
 - Umwandlungshalt
 - Langbeint
 - Renett
 - Mächtigkeit z1KTh [m]**
 - Hauptschritte
 - untergeordnete Schritte



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenkunde und Petrologie
Geologie und Tektonik im Weira-Kaligebiet
M.Sc. Anne Engler
Anlage 27
Fazies und Mächtigkeit
des Kalifloz Thüringen

Maßstab: 1:20.000
0 1.500 3.000 m
Koordinatensystem: DHDN 3 Degree Gauss Zone 3

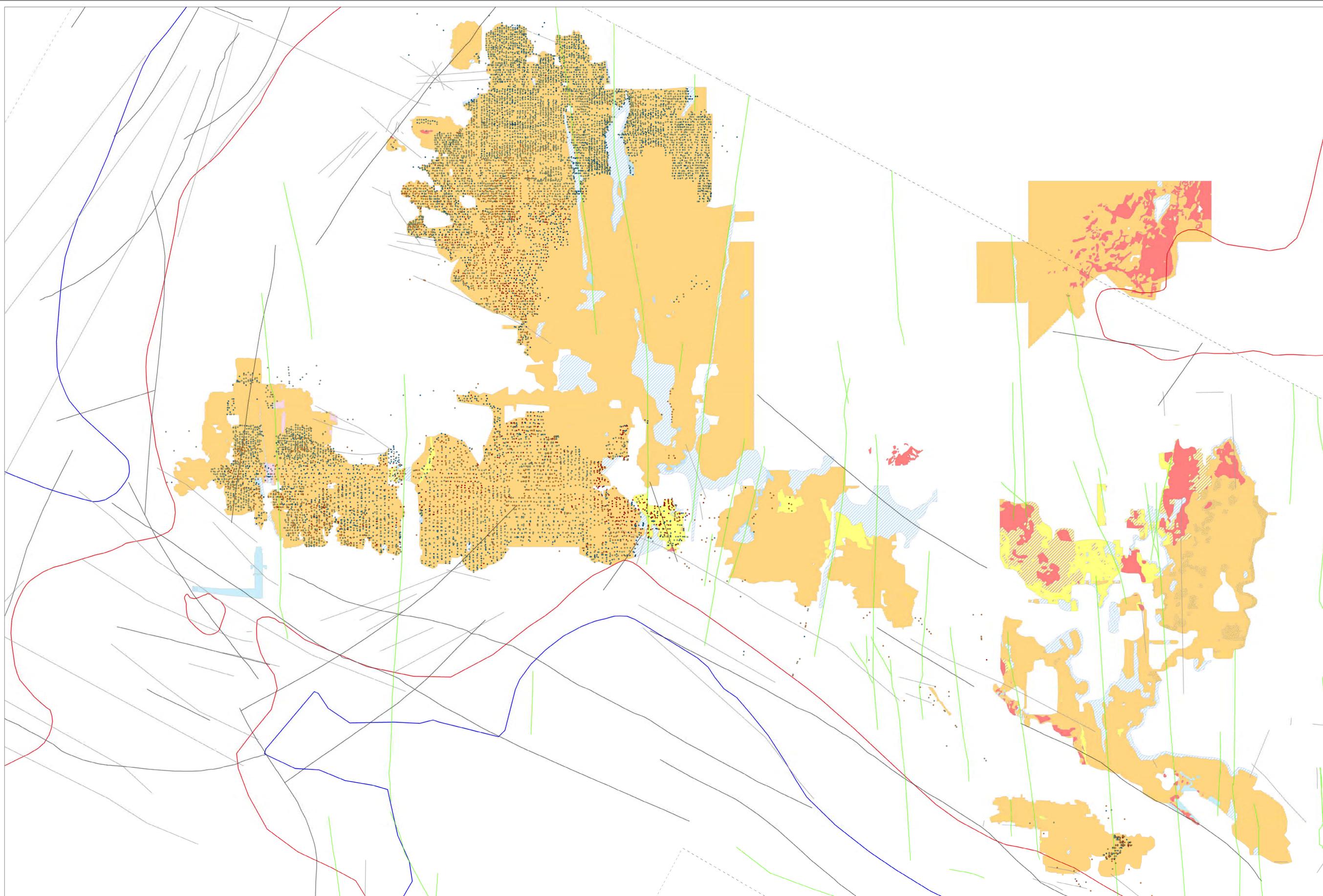


- Legende:**
- Vulkanitkorrenen
 - Siluriger Sagenstrich
 - Siluriger Sagenstrich
 - Ackergraben
 - Selenweg
 - Schieferungsangewinn
 - Grenze Iseler Ausläufer
 - Galtlangengrenze
 - Grenze Ausläuferzone
 - Grenze Ausläuferzone
 - Fazies zIKTh**
 - Cornubi
 - Bereich über Cornubi
 - Syenit
 - Hartau
 - Galtlang
 - Uffersberggraben
 - Verblühung
 - Langhau
 - Brand
 - K2O-Gehalte zIKTh**
 - höher als 200 mg/kg (≥ 0,2 %)
 - 100 bis 200 mg/kg (0,1 - 0,2 %)
 - 50 bis 100 mg/kg (0,05 - 0,1 %)
 - 20 bis 50 mg/kg (0,02 - 0,05 %)
 - 10 bis 20 mg/kg (0,01 - 0,02 %)



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie
Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet
M.Sc. Anne Engler
Anlage 28
Fazies und K2O-Gehalte
des Kaliflöz Thüringen

Maßstab: 1:20.000
0 1.000 2.000 m
Koordinatensystem: DHDN 3 Degree Gauss Zone 3

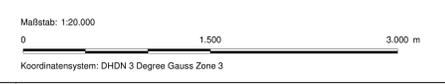


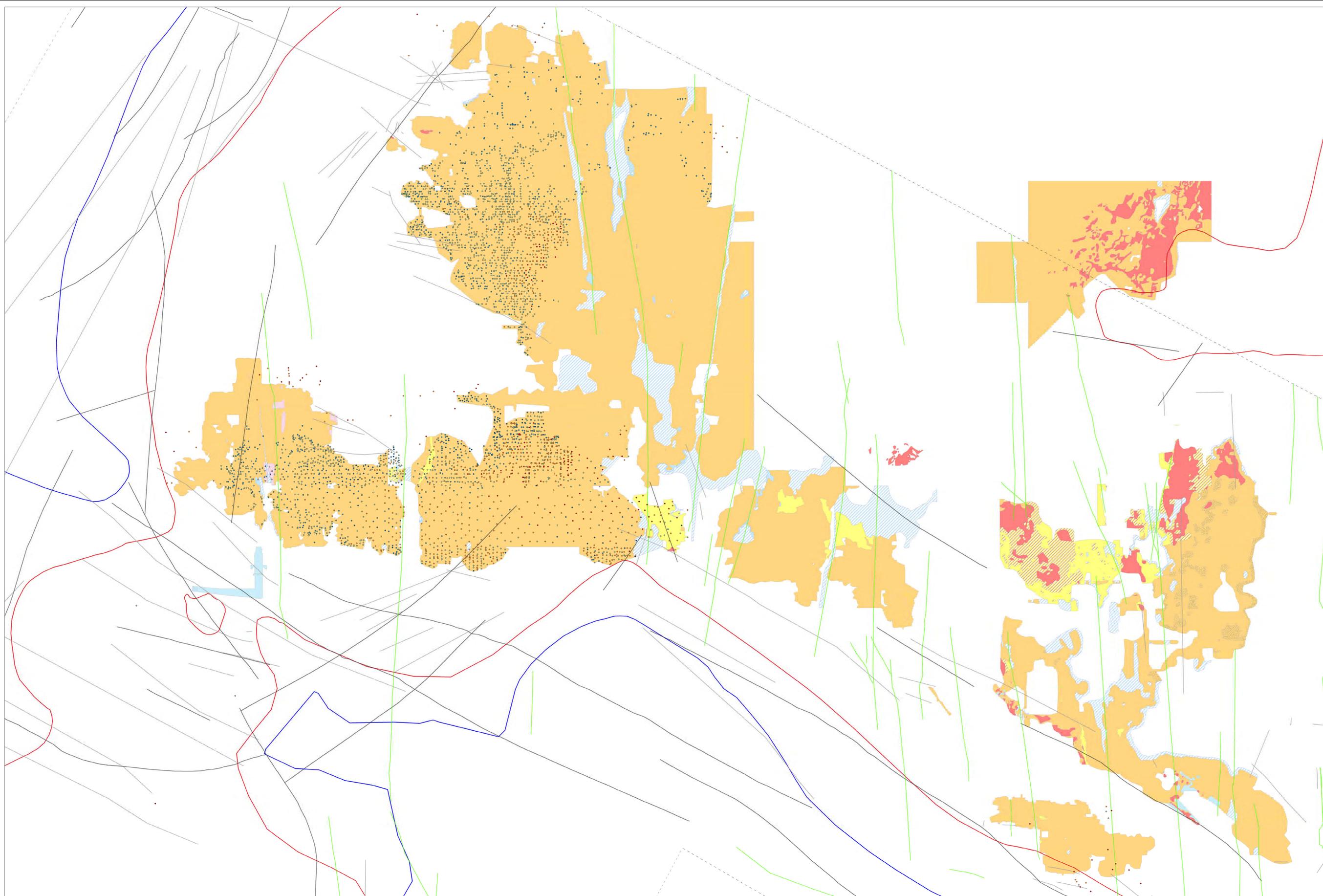
- Legende:**
- Vulkanitkammen
 - Störungen Supressiv
 - Störungen Subseiner
 - Störungen
 - Abbaugröße
 - Abbaugröße
 - Salzberg**
 - Salzhangaufliegengrenze
 - Grenze tiefer Ausblugung
 - Salzhangmergengrenze
 - Grenze Ausblugungsmarke
 - Fazies z/KHw**
 - Carnallit
 - Byknit über Carnallit
 - Byknit
 - Hertsalz
 - Ausblugung
 - Steinsalz
 - Umwandlungskalt
 - Verleubung
 - Langemitt
 - K2O-Gehalte z/KHw**
 - stark reduziert (< 4.6 %)
 - reduziert (4.7 - 8.1 %)
 - durchschnittlich (8.2 - 10.7 %)
 - erhöht (10.8 - 17.0 %)
 - stark erhöht (> 17.0 %)



Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie
Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet
M.Sc. Anne Engler

Anlage 30
Fazies und K2O-Gehalte
des Kaliföz Hessen



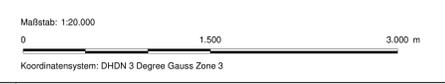


- Legende:**
- Vulkanitkummen
 - Störungen Supressiv
 - Störungen Subseiner
 - Absteigende
 - Absteigende
 - Salzberg**
 - Salzhangaufliegengrenze
 - Grenze tiefer Ausblugung
 - Salzhangmergengrenze
 - Grenze Ausblugungsmarke
 - Fazies z1KHe**
 - Carnallit
 - Byknit über Carnallit
 - Byknit
 - Hertsalz
 - Ausblugung
 - Steinsalz
 - Umwandlungshalt
 - Verleubung
 - Langemitt
 - Kieseritgehalte z1KHe**
 - stark reduziert (< 0,5 %)
 - reduziert (0,5 - 0,9 %)
 - durchschnittlich (0,9 - 15,0 %)
 - erhöht (15,1 - 25,0 %)
 - stark erhöht (> 25,0 %)



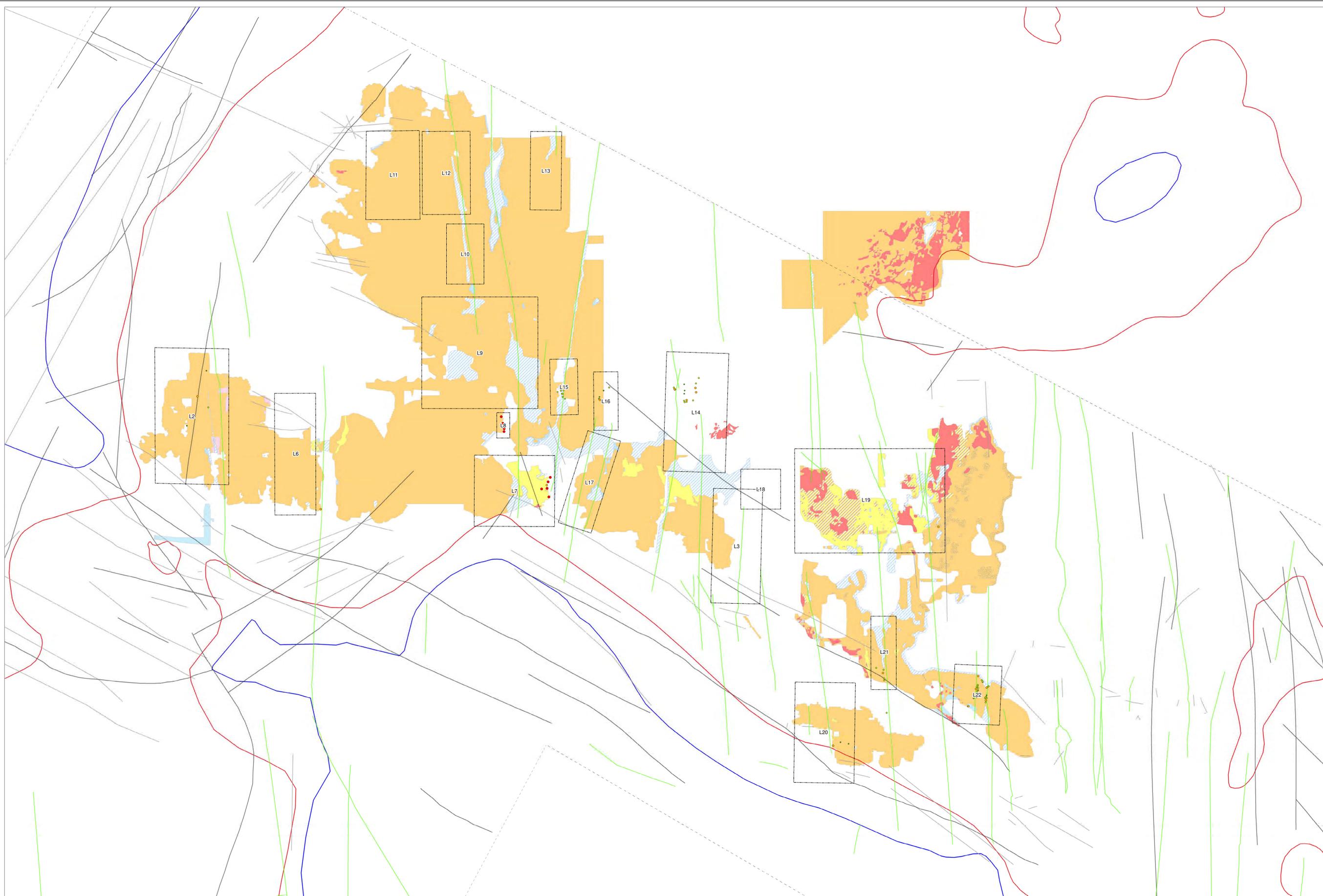
Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie
Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

Geologie und Tektonik im Werra-Kaligebiet
M.Sc. Anne Engler
Anlage 31
Fazies und Kieseritgehalte
des Kaliföz Hessen





- Legende:**
- Vulkankontakten
 - Störungen/Spannsprünge
 - Störungen/Schiefer
 - Antriebsprünge
 - Schiefer**
 - Sedimentationsgrenzen
 - Grenz über Ausdehnung
 - Sedimentationsgrenze
 - Grenz Ausdehnungsgrenze
 - Lithologie/Struktur
 - Lithologie/Struktur
 - Fazies (Kfz)**
 - Carnolith
 - Spinit über Carnolith
 - Spinit
 - Mikazit
 - Hornfels
 - Umwandlungsschiefer
 - Verfestigung
 - Lagerstätte
 - Riesel
- Anzahl Gasereignisse - Grube Untereibitzsch**
- 0 - 5
 - 6 - 10
 - 11 - 15
 - 16 - 20
 - 21 - 25
 - 26 - 30
 - 31 - 35
 - 36 - 40
- Anzahl Gasereignisse - Grube Hattorf**
- 1 - 5
 - 6 - 10
 - 11 - 15
 - 16 - 20
 - 21 - 25
 - 26 - 30
 - 31 - 35
 - 36 - 40
 - 41 - 45
 - 46 - 50



- Legende:**
- Vulkanstrukturen
 - Südring-Supradior
 - Südring-Subradior
 - Aufschlag
 - Schiebung
 - Schiebungshorizont
 - Diene-Isotop-Ausgang
 - Schiebungshorizont
 - Diene-Ausgangspunkte
 - Luftlinien in Bezug zu Anlage 01
 - Fazies 1 (Kalkstein)
 - Fazies 2 (Mergel)
 - Fazies 3 (Tonstein)
 - Fazies 4 (Sandstein)
 - Fazies 5 (Schieferung)
 - Fazies 6 (Schieferung)
 - Fazies 7 (Schieferung)
 - Fazies 8 (Schieferung)
 - Fazies 9 (Schieferung)
 - Fazies 10 (Schieferung)
 - Fazies 11 (Schieferung)
 - Fazies 12 (Schieferung)
 - Fazies 13 (Schieferung)
 - Fazies 14 (Schieferung)
 - Fazies 15 (Schieferung)
 - Fazies 16 (Schieferung)
 - Fazies 17 (Schieferung)
 - Fazies 18 (Schieferung)
 - Fazies 19 (Schieferung)
 - Fazies 20 (Schieferung)
 - Fazies 21 (Schieferung)
 - Fazies 22 (Schieferung)
 - Fazies 23 (Schieferung)
 - Fazies 24 (Schieferung)
 - Fazies 25 (Schieferung)
 - Fazies 26 (Schieferung)
 - Fazies 27 (Schieferung)
 - Fazies 28 (Schieferung)
 - Fazies 29 (Schieferung)
 - Fazies 30 (Schieferung)
 - Fazies 31 (Schieferung)
 - Fazies 32 (Schieferung)
 - Fazies 33 (Schieferung)
 - Fazies 34 (Schieferung)
 - Fazies 35 (Schieferung)
 - Fazies 36 (Schieferung)
 - Fazies 37 (Schieferung)
 - Fazies 38 (Schieferung)
 - Fazies 39 (Schieferung)
 - Fazies 40 (Schieferung)
 - Fazies 41 (Schieferung)
 - Fazies 42 (Schieferung)
 - Fazies 43 (Schieferung)
 - Fazies 44 (Schieferung)
 - Fazies 45 (Schieferung)
 - Fazies 46 (Schieferung)
 - Fazies 47 (Schieferung)
 - Fazies 48 (Schieferung)
 - Fazies 49 (Schieferung)
 - Fazies 50 (Schieferung)
 - Fazies 51 (Schieferung)
 - Fazies 52 (Schieferung)
 - Fazies 53 (Schieferung)
 - Fazies 54 (Schieferung)
 - Fazies 55 (Schieferung)
 - Fazies 56 (Schieferung)
 - Fazies 57 (Schieferung)
 - Fazies 58 (Schieferung)
 - Fazies 59 (Schieferung)
 - Fazies 60 (Schieferung)
 - Fazies 61 (Schieferung)
 - Fazies 62 (Schieferung)
 - Fazies 63 (Schieferung)
 - Fazies 64 (Schieferung)
 - Fazies 65 (Schieferung)
 - Fazies 66 (Schieferung)
 - Fazies 67 (Schieferung)
 - Fazies 68 (Schieferung)
 - Fazies 69 (Schieferung)
 - Fazies 70 (Schieferung)
 - Fazies 71 (Schieferung)
 - Fazies 72 (Schieferung)
 - Fazies 73 (Schieferung)
 - Fazies 74 (Schieferung)
 - Fazies 75 (Schieferung)
 - Fazies 76 (Schieferung)
 - Fazies 77 (Schieferung)
 - Fazies 78 (Schieferung)
 - Fazies 79 (Schieferung)
 - Fazies 80 (Schieferung)
 - Fazies 81 (Schieferung)
 - Fazies 82 (Schieferung)
 - Fazies 83 (Schieferung)
 - Fazies 84 (Schieferung)
 - Fazies 85 (Schieferung)
 - Fazies 86 (Schieferung)
 - Fazies 87 (Schieferung)
 - Fazies 88 (Schieferung)
 - Fazies 89 (Schieferung)
 - Fazies 90 (Schieferung)
 - Fazies 91 (Schieferung)
 - Fazies 92 (Schieferung)
 - Fazies 93 (Schieferung)
 - Fazies 94 (Schieferung)
 - Fazies 95 (Schieferung)
 - Fazies 96 (Schieferung)
 - Fazies 97 (Schieferung)
 - Fazies 98 (Schieferung)
 - Fazies 99 (Schieferung)
 - Fazies 100 (Schieferung)
- Größe Gas-salz-Ausbrüche**
- Kategorie 1 (10 - 99 t)
 - Kategorie 2 (100 - 999 t)
 - Kategorie 3 (1.000 - 9.999 t)
 - Kategorie 4 (> 9.999 t)

Tabelle 1 Statistische Verteilung der Kategorien der Gas-Salz-Ausbrüche in Bezug zu ihrer Häufigkeit

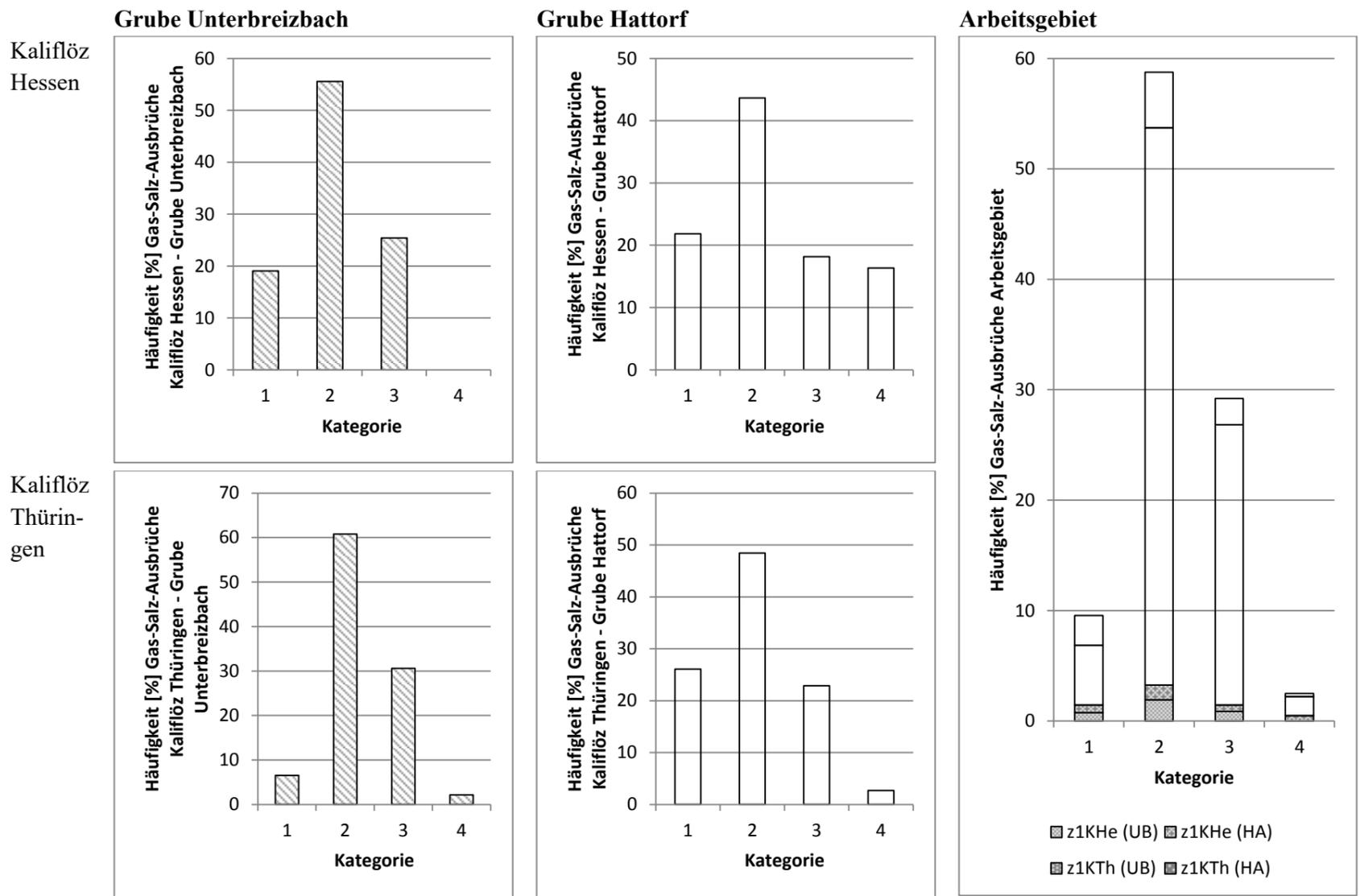


Tabelle 2 Statistische Verteilung der Kategorien der Gas-Salz-Ausbrüche in Bezug zu den jeweiligen Tonnagen des abgeführten Haufwerkes

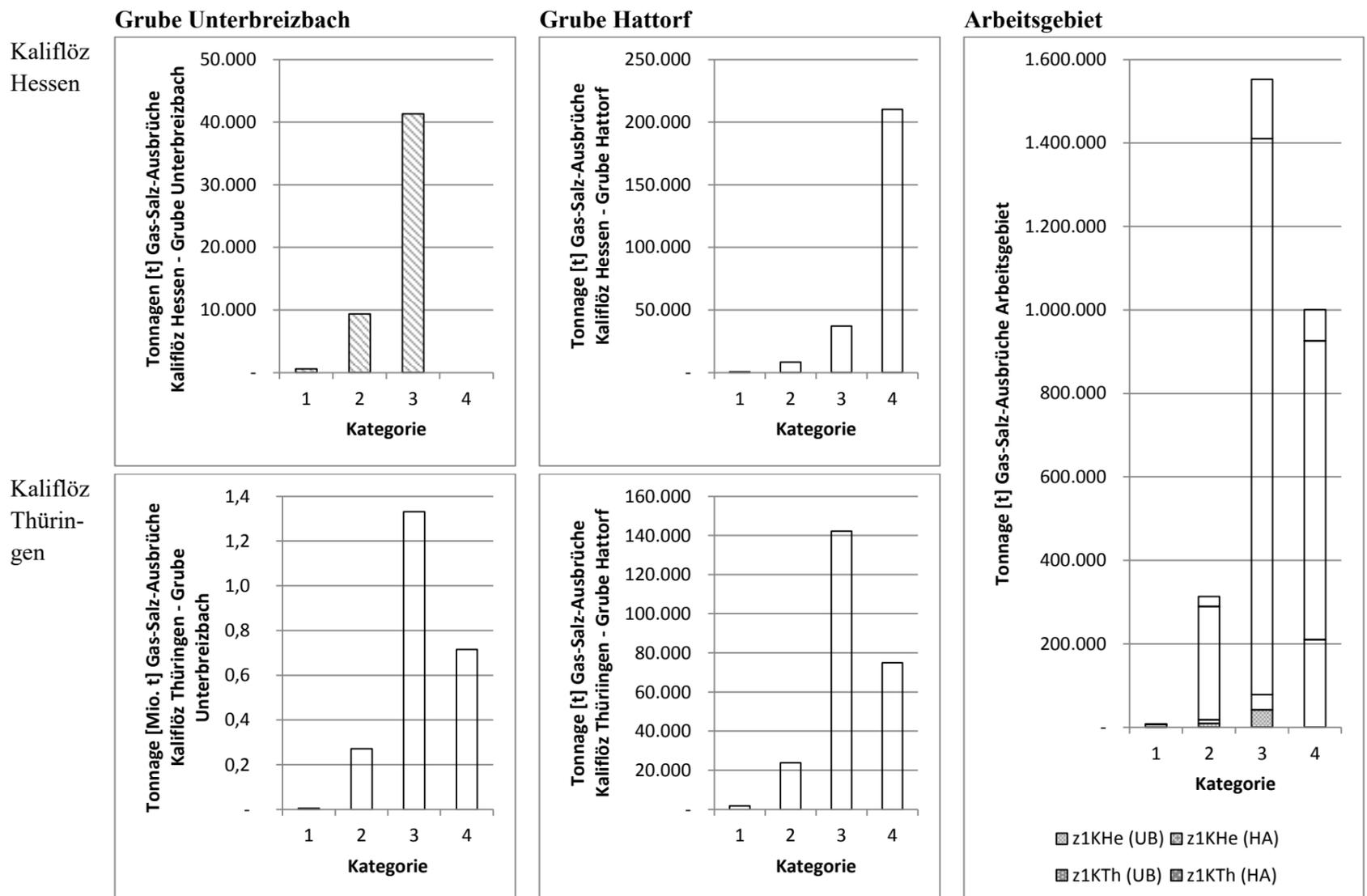


Tabelle 1 Ergebnisse der ⁴⁰Ar/³⁹Ar-Datierung (Reinhardt 2015) der geochemischen Analysen – Hauptelemente (Reinhardt 2014)

Probe	Rechtswert	Hochwert	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar- Alter Mio. a	Gestein	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	MnO %	Cr ₂ O ₃ %	TOT/C %	TOT/S %	LOI %	Sum %
130902_A	3572410	5629992	-- ¹	Foidit	40,26	10,52	12,45	14,49	11,03	2,92	1,51	2,42	0,87	0,20	0,12	0,05	-	2,80	99,60
130903_A1	3560150	5634498	24.7±2.5	Foidit	39,31	11,40	11,18	10,68	11,38	5,20	1,14	2,27	0,68	0,15	0,06	0,08	0,17	6,30	99,73
130903_B1	3561239	5631616	--	Foidit	40,77	14,19	12,94	6,78	11,68	3,74	1,27	3,49	0,77	0,20	0,01	0,50	0,04	3,80	99,62
130904_A	3575700	5631620	xx ²	Foidit	37,87	12,20	11,09	12,00	10,58	3,12	2,74	2,62	0,59	0,17	0,05	0,51	0,81	6,60	99,66
130905_A1	3570648	5625038	xx	Foidit	39,18	12,89	12,07	8,62	9,64	4,98	2,75	2,79	0,85	0,19	0,03	0,11	0,12	5,60	99,61
130905_A2	3572444	5623543	30.6±2.7	Tephrit	42,15	12,41	10,72	8,89	9,13	3,83	1,19	2,17	0,45	0,14	0,03	0,99	0,07	8,60	99,75
130905_A4	3575654	5625417	26.1±0.9	Foidit	39,09	13,90	11,81	7,51	9,04	2,19	3,55	3,21	0,91	0,28	0,01	0,03	0,08	8,10	99,59
130905_A5	3568962	5626198	21.0±0.5	Basanit	41,59	11,76	10,87	11,14	10,43	3,86	2,28	2,26	0,66	0,17	0,06	0,06	0,06	4,60	99,67
130905_B	3560615	5637993	--	Basalt	46,12	13,24	11,38	7,40	10,10	2,77	1,20	2,53	0,52	0,15	0,03	0,03	-	4,10	99,61
130906_A1	3572856	5627818	--	Basanit	42,10	11,66	11,80	13,07	11,07	3,50	0,91	2,37	0,78	0,18	0,09	0,12	-	2,10	99,63
130906_A2	3573022	5627886	17.9±0.9	Basanit	41,66	11,45	11,98	13,20	10,89	3,23	1,72	2,40	0,79	0,18	0,09	0,02	-	2,00	99,65
130906_A3	3573299	5627364	--	Basanit	42,03	11,43	12,08	13,33	11,08	3,17	1,27	2,37	0,80	0,18	0,10	0,06	-	1,80	99,66
140204_A4	3573303	5625068	--	Basanit	41,30	12,10	10,84	11,03	10,26	4,73	1,91	2,24	0,56	0,16	0,07	0,16	0,08	4,40	99,59
140204_A5	3569177	5627467	--	Foidit	39,22	11,34	11,95	11,62	10,43	3,63	2,34	2,33	0,80	0,18	0,06	0,61	0,13	5,60	99,50
140204_A6	3568701	5630273	xx	Foidit	39,19	12,70	11,93	8,10	11,50	4,58	2,46	2,59	0,87	0,19	0,04	0,14	0,12	5,40	99,54
140219_A1	3571559	5638090	--	Foidit	39,49	13,79	12,69	5,91	9,04	7,47	1,41	3,46	1,26	0,19	-	0,03	0,20	4,90	99,57
140219_A2	3569054	5637245	--	Foidit	39,30	11,30	11,37	11,94	8,97	4,32	1,36	2,64	0,55	0,15	0,05	0,26	0,17	7,60	99,56
140219_A3	3565206	5636513	--	Foidit	39,16	12,27	12,09	11,06	11,26	3,17	2,29	2,61	0,87	0,20	0,05	0,18	0,14	4,40	99,46
140219_A4	3565720	5626758	31.1±1.1	Foidit	39,15	11,98	11,75	11,61	11,05	2,92	2,62	2,54	0,85	0,19	0,06	0,24	0,27	4,70	99,47
140219_A5	3565810	5629069	--	Foidit	39,75	12,23	11,76	10,90	10,57	2,62	2,34	2,96	0,48	0,17	0,05	1,11	0,15	5,70	99,55
140219_A6	3562197	5631174	xx	Foidit	40,64	12,87	10,43	10,17	9,53	4,44	1,67	2,73	0,43	0,14	0,04	0,30	0,08	6,50	99,60

¹ -- ... Es wurde keine Altersbestimmung für die jeweilige Probe durchgeführt.

² xx ... Die durchgeführte Altersbestimmung ergab kein verlässliches Ergebnis.

Tabelle 2 Ergebnisse der geochemischen Analysen – Nebenelemente (Reinhardt 2014). Ag und Bi wurden in keiner Probe nachgewiesen.

Probe	As	Au	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Hf	Hg	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Ta	Th	Tl	U	V	W	Zn	Zr	Y
	ppm	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
130902_A	0,7	1,5	675	-	-	53,0	800,50	0,5	57,0	17,2	6,0	0,01	3,9	83,8	346,4	4,1	33,5	-	22	0,7	1	1171,3	4,6	8,5	-	2,1	228	1,6	91	268,5	23,9
130903_A1	-	-	508	-	-	42,8	410,51	0,1	34,3	15,9	4,2	-	1,3	85,3	155,4	1,5	18,2	-	22	-	1	569,7	4,6	5,5	-	1,2	219	0,6	60	169,8	19,7
130903_B1	2,8	-	622	1	-	44,8	95,79	2,5	67,2	21,8	6,8	-	1,9	77,6	46,1	1,8	10,7	-	25	-	2	977,0	4,9	6,1	0,2	1,5	347	0,6	90	278,2	28,5
130904_A	8,6	-	743	-	-	48,3	328,41	0,6	57,6	18,3	4,6	-	2,5	81,5	159,4	4,8	55,4	-	23	-	1	774,9	4,8	7,3	-	1,8	263	2,8	68	201,2	20,4
130905_A1	1,0	-	834	3	0,2	41,0	184,73	0,7	41,1	19,2	6,3	-	3,3	97,2	99,9	3,1	60,7	-	19	-	2	943,0	5,5	8,8	-	2,2	235	1,4	92	277,4	25,9
130905_A2	-	-	426	-	0,1	42,1	232,62	0,5	47,4	17,8	3,4	-	1,3	41,6	134,6	1,7	25,9	-	18	-	-	593,1	2,5	3,6	-	1,0	198	0,8	76	133,0	17,6
130905_A4	-	-	885	-	0,6	29,4	34,21	0,2	33,3	20,5	6,5	-	2,3	72,1	23,9	2,9	62,0	-	15	-	2	1.157,8	4,5	5,3	-	1,5	227	0,9	74	282,9	28,9
130905_A5	0,8	-	649	-	-	46,6	383,15	1,0	54,1	16,6	4,7	-	2,2	69,4	207,1	2,8	48,4	-	22	-	1	790,8	3,7	6,0	-	1,4	228	0,8	73	190,5	23,1
130905_B	1,3	-	1.068	-	0,1	40,4	205,26	9,0	33,9	19,4	4,5	-	0,9	62,8	165,8	2,3	31,8	-	18	-	1	975,4	3,4	5,4	-	1,3	220	0,5	102	209,7	25,4
130906_A1	-	0,7	617	2	-	51,9	602,09	0,4	67,2	17,5	5,7	-	2,5	85,4	273,6	3,1	42,4	-	24	-	1	874,3	4,7	7,7	-	2,3	240	1,0	80	258,5	23,1
130906_A2	0,6	-	610	4	-	52,4	595,25	0,2	71,1	16,6	5,8	0,01	3,0	82,4	287,3	3,6	32,3	-	23	-	1	872,3	4,6	7,9	-	2,2	225	1,8	89	255,2	23,6
130906_A3	0,9	-	560	2	0,2	52,5	649,98	0,5	66,1	17,7	5,7	0,01	3,2	80,0	286,8	3,8	30,4	-	23	-	2	859,6	4,1	8,0	-	2,2	233	1,2	84	250,7	22,8
140204_A4	-	-	545	-	0,2	49,0	-	1,3	57,1	15,9	4,3	-	1,7	63,8	203,7	3,7	34,6	-	23	-	2	543,6	3,9	5,2	-	1,3	220	0,5	67	179,7	19,3
140204_A5	1,4	-	724	-	-	49,0	-	0,5	55,4	15,2	5,0	-	3,1	86,8	260,8	3,7	44,8	-	21	-	1	811,2	4,7	7,7	-	1,8	225	1,4	87	207,3	24,7
140204_A6	1,1	0,9	785	3	-	38,3	-	0,8	65,0	17,7	5,3	-	3,0	95,9	75,8	3,7	57,3	-	23	-	1	818,0	5,4	8,2	-	1,7	251	1,7	75	228,5	26,7
140219_A1	1,0	-	601	-	-	29,9	-	0,1	9,6	18,8	6,9	-	0,7	76,7	7,7	1,1	20,1	-	14	-	2	1.094,6	5,3	5,2	-	1,2	228	-	68	288,6	33,2
140219_A2	1,7	1,0	459	-	0,1	50,0	-	1,6	21,6	14,9	5,5	-	1,8	65,9	215,0	3,5	36,2	-	23	-	1	572,4	4,0	6,3	-	1,7	249	1,1	116	218,6	22,4
140219_A3	0,9	2,5	878	4	0,3	48,2	-	0,6	56,7	15,4	6,0	-	3,4	102,9	195,4	5,4	60,3	-	24	-	1	956,3	6,0	9,6	0,1	2,2	255	2,0	83	266,0	25,0
140219_A4	1,4	2,0	826	-	-	45,3	-	0,7	55,0	15,5	6,4	-	3,5	99,2	195,5	1,6	68,6	-	24	-	1	927,4	5,0	8,9	-	2,2	250	2,1	68	267,2	28,2
140219_A5	0,9	-	531	3	-	51,4	-	0,4	77,4	17,2	4,7	-	1,9	57,4	170,4	1,5	39,8	-	28	-	1	695,5	3,4	5,1	-	1,2	290	1,0	75	205,2	20,7
140219_A6	0,8	3,1	412	-	0,1	44,4	-	0,3	40,2	16,6	4,2	-	1,1	50,2	158,2	1,2	25,6	-	24	-	1	603,3	2,6	4,3	-	1,2	275	-	61	184,3	19,4

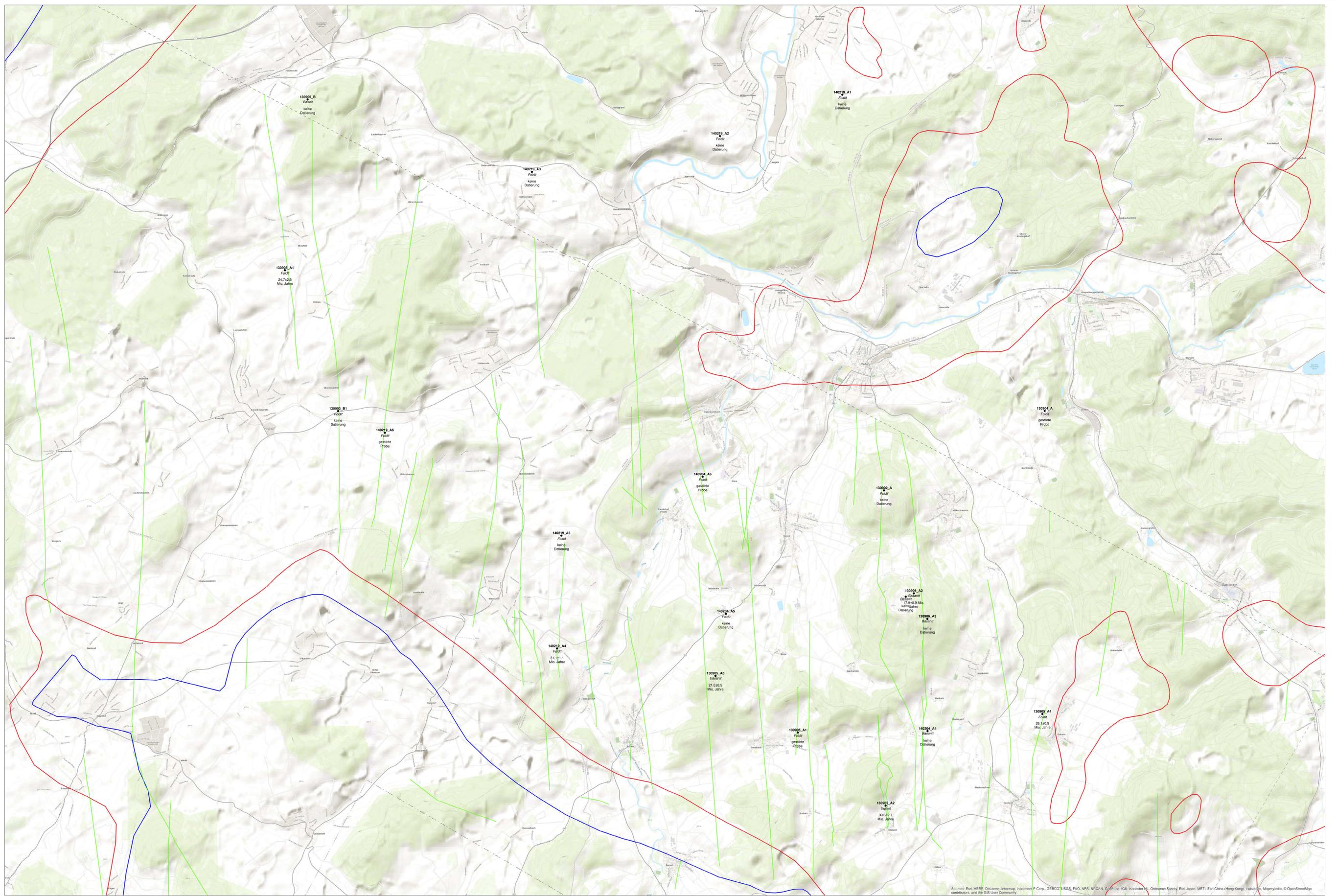
Tabelle 3 Ergebnisse der geochemischen Analysen –Lanthanoide (Reinhardt 2014)

Probe	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
-	ppm						
130902_A	75,00	140,00	15,41	55,00	9,43	2,83	8,03
130903_A1	47,30	89,10	10,33	39,50	7,32	2,25	6,58
130903_B1	60,90	124,40	14,91	57,60	10,53	3,17	8,91
130904_A	56,10	107,30	11,74	44,20	7,95	2,44	6,78
130905_A1	72,90	139,60	15,00	54,10	9,74	3,00	8,38
130905_A2	31,40	62,00	6,98	29,00	5,49	1,86	5,14
130905_A4	60,30	128,80	15,56	63,00	11,86	3,78	10,11
130905_A5	56,30	105,50	11,87	43,70	8,21	2,50	7,02
130905_B	46,70	90,70	10,77	42,70	7,91	2,43	7,19
130906_A1	68,00	129,70	14,16	52,90	8,58	2,67	7,57
130906_A2	65,40	127,80	13,97	51,40	9,02	2,59	7,51
130906_A3	65,20	128,40	13,95	51,90	8,91	2,57	7,36
140204_A4	45,90	77,50	9,11	35,10	6,82	2,11	6,10
140204_A5	67,20	113,00	13,33	49,20	8,40	2,64	7,48
140204_A6	73,90	128,50	14,57	55,00	9,48	2,90	8,54
140219_A1	66,10	132,20	17,16	72,10	12,70	4,05	11,19
140219_A2	53,00	90,50	10,81	41,80	7,81	2,27	7,08
140219_A3	84,20	140,10	15,66	58,60	10,02	2,96	8,39
140219_A4	82,90	136,50	15,33	55,70	9,52	2,93	8,13
140219_A5	44,60	84,80	9,83	38,80	7,18	2,24	6,74
140219_A6	41,50	73,20	8,58	33,80	6,37	2,00	5,85

Tabelle 4 Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen (Schmaucks 2015)

Probe	Augit	Klinochlor	Sodalith	Nephelin	Hauyn	Kaersutit	Antigorit	Plagioklas	Biotit	Ilmenit	Enstatit	Diopsid	Pargasite	Forsterit	Apatit	Jadeit	Magnetit
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
130902_A	40,73	9,21	6,56	6,55	4,57	5,67	3,57	3,33	2,91	5,27	2,59	2,12	1,78	1,20	1,65	0,84	0,42
130903_A1	31,10	0,33	0,15	2,20	1,05	15,18	0,14	26,31	2,46	8,20	0,00	0,12	0,19	0,15	1,01	6,66	0,09
130903_B1	39,58	2,36	0,00	9,03	0,82	11,96	0,17	5,54	4,46	1,34	2,48	0,63	0,09	7,64	0,00	9,14	1,91
130905_A1	23,53	2,22	0,00	3,27	0,13	11,63	0,49	32,50	2,63	1,18	9,42	1,10	0,28	0,18	0,27	0,09	0,03
130905_A4	30,78	0,95	2,10	17,70	3,52	7,65	0,80	11,46	4,05	4,47	2,72	0,49	1,24	5,19	1,98	0,02	0,15
130905_A5	16,88	0,23	0,00	1,05	0,18	46,08	1,13	18,86	0,04	0,57	0,99	0,32	0,00	5,36	0,15	0,05	0,07
130906_A1	39,52	0,18	3,22	12,32	2,27	7,13	0,13	5,12	0,16	2,69	0,86	0,26	0,02	17,09	2,16	3,38	2,63
130906_A3	33,93	4,57	6,07	7,74	3,57	9,31	0,33	5,67	7,03	4,09	6,73	0,78	1,12	3,21	2,15	2,47	0,16
140219_A1	23,89	6,51	0,24	3,52	2,43	27,42	0,02	5,94	1,66	1,86	11,80	3,38	4,53	1,60	0,40	0,14	0,94
140219_A2	37,90	5,30	0,43	9,43	4,63	11,93	0,05	2,14	3,93	3,24	6,84	3,01	1,85	1,06	1,23	2,98	2,86
140219_A3	39,87	7,85	0,02	10,84	2,25	5,92	0,11	1,29	4,39	3,61	6,15	1,79	1,50	2,46	1,80	6,34	1,61
140219_A4	34,13	1,58	0,02	13,00	1,78	16,08	0,71	9,22	2,07	2,53	0,89	0,17	0,20	8,18	0,54	0,04	1,23
140219_A5	35,76	9,75	0,03	9,82	0,66	6,23	0,12	14,53	3,00	5,36	7,81	1,30	0,43	0,64	0,84	0,04	0,54

Probe	Ferrosilit	Kalzit	Pyrrhotin	Titanit	Glas	Gips	Ankerit	Chalcopyrit	Chromit	Brucit	Magnesium- hydrophosphat	Dolomit	Periklas	Quarz	Rutil	Celestin	Pentlandit
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
130902_A	0,31	0,26	0,19	0,13	0,10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
130903_A1	3,13	0,21	0,01	0,00	0,92	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
130903_B1	1,85	0,00	0,01	0,00	0,03	0,04	0,00	0,00	0,09	0,45	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
130905_A1	6,14	0,48	0,01	0,00	1,54	0,00	0,19	0,00	0,02	2,63	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
130905_A4	0,14	0,09	0,09	0,05	0,31	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,99	0,03	0,00	0,00
130905_A5	0,08	0,00	0,00	0,00	7,84	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
130906_A1	0,27	0,05	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
130906_A3	0,11	0,77	0,06	0,01	0,06	0,01	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
140219_A1	1,63	0,01	0,18	0,00	0,36	0,14	0,01	0,00	0,08	0,01	0,00	1,14	0,01	0,09	0,00	0,00	0,00
140219_A2	0,58	0,48	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,05	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
140219_A3	1,40	0,23	0,07	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,08	0,18	0,00	0,13	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00
140219_A4	4,44	0,13	0,13	0,00	0,16	0,01	0,03	0,01	0,06	1,79	0,00	0,18	0,43	0,25	0,00	0,00	0,00
140219_A5	1,33	1,37	0,08	0,00	0,05	0,00	0,05	0,01	0,06	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01



Legende:
 Vulkanströme
 L. Ausstiege
 Schichtungsangrenzzone
 Grenze tiefer Ausstiege
 Schichtungsangrenzzone
 Grenze Aufstiegszone
 Probenpunkte



Technische Universität
 Bergakademie Freiberg
 Institut für Mineralogie
 Professur für Lagerstättenkunde und Petrologie
 Geologie und Tektonik im Werra-Kaldergebiet
 M.Sc. Anne Engler
Anlage 38
 Topographische Karte
 mit Lokationen der
 Vulkanproben

Maßstab: 1:25.000
 0 1.000 2.000 m
 Koordinatensystem: DHDN 3 Degree Gauss Zone 3

Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GEBCO, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Swisstopo, Mapbox, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Tabelle 1 Ausgewählte Lokationen – Übersicht über Beziehungen von Gasereignissen, Struktur, und Vulkaniten für das Kaliflöz Thüringen

Lokation	Strukturelemente	Anzahl Gasereignisse	Anzahl und Tonnage [t] von Gas-Salz-Ausbrüchen	Fazies	Bemerkungen	Besonderheiten Zusammensetzung Vulkanit
L1	<ul style="list-style-type: none"> ein N-S streichender Vulkanit 	809	<ul style="list-style-type: none"> 31 Gas-Salz-Ausbrüche 20 t bis 1.000 t 	Vertaubung Umwandlungshalit Sylvinit über Carnallit Carnallit Sylvinit Hartsalz Langbeinit	<ul style="list-style-type: none"> Gasereignisse unabhängig der Fazies Starke Häufung der Gasereignisse westlich des Vulkanits 	130905_B - übertägig <ul style="list-style-type: none"> 1,4 km nördlich von L1 Basalt hohe Gehalte / Anteile¹: SiO₂, Ba, Sr, Cr, Kaersutit, Plagioklas, Glas geringe Gehalte / Anteile: an MgO, V, Augit, Nephelin
L2	<ul style="list-style-type: none"> ein N-S streichender Vulkanit ca. 100 östlich des Vulkanits eine NNE-SSW streichende Störung im Suprasalinar 	156	<ul style="list-style-type: none"> keine Angabe 	Sylvinit Hartsalz Carnallit Sylvinit über Carnallit Langbeinitit	<ul style="list-style-type: none"> Gasereignisse in einer Entfernung von bis zu ca. 1,0 km westlich des Vulkanits 	<ul style="list-style-type: none"> keine Analyse
L3	<ul style="list-style-type: none"> ein N-S streichender Vulkanit zwei NW-SE streichende Störungen im Suprasalinar eine NW-SE streichende Störung im Subsalinar 	473	<ul style="list-style-type: none"> 11 Gas-Salz-Ausbrüche 50 t bis 10.000 t 	Carnallit Vertaubung Sylvinit über Carnallit Sylvinit Hartsalz	<ul style="list-style-type: none"> Besondere Häufung von Gasereignissen in Carnallit Großer Gas-Salz-Ausbruch mit 10.000 t Haufwerk im Carnallit ca. 200 m westlich des Vulkanitvorkommens; hier kein Kreuzungspunkt mit Störungen im Sub- bzw. Subsalinar 	140219_A5 - untertägig <ul style="list-style-type: none"> im nördlichen Teil von L3 Foidit hohe Gehalte / Anteile: C, LOI², Forsterit, Ferrosilit, Brucit geringe Gehalte / Anteile: Na₂O, Lanthanoide 140219_A4 - untertägig <ul style="list-style-type: none"> ca. 200 m südlich von L3 hohe Gehalte / Anteile: MgO, Ba, Sr, Ni, Rb, Zr, Lanthanoide, Augit, Jadeit, Enstatit geringe Gehalte / Anteile: Na₂O, Kaersutit, Plagioklas

¹ Die Relation der Gehalte bzw. Anteile versteht sich in Bezug zu den Vulkanitanalysen im Arbeitsgebiet.

² LOI – Loss on ignition ist eine Analyse zur Bestimmung volatiler Anteile in Gesteinen.

Lokation	Strukturelemente	Anzahl Gasereignisse	Anzahl und Tonnage [t] von Gas-Salz-Ausbrüchen	Fazies	Bemerkungen	Besonderheiten Zusammensetzung Vulkanit
L4	<ul style="list-style-type: none"> drei N-S streichende Vulkanite drei ± N-S streichende und eine W-E streichende und eine WNW-ESE streichende Störung im Subsalinar eine N-S streichende Störung im Suprasalinar 	1.224	<ul style="list-style-type: none"> 316 Gas-Salz-Ausbrüche 50 t bis 25.000 t 	Sylvinit Sylvinit über Carnallit Carnallit Vertaubung	<ul style="list-style-type: none"> Keine besondere Häufung von Gasereignissen entlang von Vulkanitvorkommen bzw. im Hangenden von Störungen im Subsalinar 	<ul style="list-style-type: none"> keine Analyse
L5	<ul style="list-style-type: none"> kein Vulkanit – nächste Vulkanitvorkommen in ca. 1,4 km bis 1,8 km Entfernung vom Zentrum von L5 zwei N-S streichende Störungen und eine W-E streichende Störung im Subsalinar eine WNW-ESE und eine NE-SW streichende Störung im Suprasalinar 	14	<ul style="list-style-type: none"> keine Angabe 	Carnallit Sylvinit über Carnallit Sylvinit Vertaubung	<ul style="list-style-type: none"> Gasereignisse diffus im Carnallit 	<ul style="list-style-type: none"> keine Analyse

Tabelle 2 Ausgewählte Lokationen – Übersicht über Beziehungen von Gasereignissen, Struktur, und Vulkaniten für das Kaliflöz Hessen

Lokation	Strukturelemente	Anzahl Gasereignisse	Anzahl und Tonnage [t] von Gas-Salz-Ausbrüchen	Fazies	Bemerkung	Besonderheiten Zusammensetzung Vulkanit
L2	<ul style="list-style-type: none"> 1 N-S streichender Vulkanit ca. 100 östlich des Vulkanits eine NNE-SSW streichende Störung im Suprasalinar 	969	<ul style="list-style-type: none"> 4 Gas-Salz-Ausbrüche 20 t bis 9.000 t 	Hartsalz Langbeinit Vertaubung Umwandlungshalit	<ul style="list-style-type: none"> Gasereignisse akkumulieren sich westlich des Vulkanits im Liegenden der Störung im Suprasalinar unmittelbar im Bereich der Störung Gasereignis mit 9.000 t im südlichen Teil von L2 im Bereich der Störung Häufung von Gasereignissen 	keine Analysen
L6	<ul style="list-style-type: none"> 1 N-S streichender Vulkanit ca. 450 m westlich der Gasanhäufung drei ± NW-SE streichende Störungen im Subsalinar im nördlichen Teil von L6 	273	<ul style="list-style-type: none"> keine Angaben 	Hartsalz	<ul style="list-style-type: none"> Gasereignisse N-S orientiert 	keine Analysen

Lokation	Strukturelemente	Anzahl Gasereignisse	Anzahl und Tonnage [t] von Gas-Salz-Ausbrüchen	Fazies	Bemerkung	Besonderheiten Zusammensetzung Vulkanit
L7	<ul style="list-style-type: none"> zwei N-S streichende Vulkanitvorkommen eine WNW-ESE und eine NNE-SSW streichende Störung im Subsalinar eine NNW-SSE und eine NE-SW streichende Störung im Suprasalinar: 	686	<ul style="list-style-type: none"> 6 Gas-Salz-Ausbrüche 3.000 t bis 30.000 t 	Hartsalz Vertaubung Sylvinit Carnallit	<ul style="list-style-type: none"> besondere Häufung von Gas-Salz-Ausbrüchen der Kategorie 4 im näheren Umfeld des Vulkanits im Osten von L7 besondere Häufung von Gasereignissen im Liegenden von Störungen im Suprasalinar Gasereignisse gleichwertig im Hartsalz bzw. Sylvinit 	140219_A6 - untertägig <ul style="list-style-type: none"> ca. 1,6 km nördlich von L7 siehe L9
L8	<ul style="list-style-type: none"> ca. 100 m westlich der Gas-Salz-Ausbrüche ein N-S streichendes Vulkanitvorkommen 	4	<ul style="list-style-type: none"> 4 Gas-Salz-Ausbrüche 20.000 t bis 25.000 t 	Hartsalz	<ul style="list-style-type: none"> keine weiteren Gasereignisse dokumentiert N-S-Anordnung der Gas-Salz-Ausbrüche Gas-Salz-Ausbrüche in Verlängerung einer NNW-SSE streichenden Störung im Suprasalinar 	keine Analysen
L9	<ul style="list-style-type: none"> ein NNW-SSE und ein NNE-SSW streichendes Vulkanitvorkommen 	2.280	<ul style="list-style-type: none"> keine Angaben 	Hartsalz Vertaubung	<ul style="list-style-type: none"> Bereich lokaler Häufung von Gasereignissen in SSW-Verlängerung des westlichen Vulkanitvorkommens in der Verlängerung einer NW-SE streichenden Störung im Subsalinar am Kreuzungspunkt mit Vulkanit korreliert lokale Häufung von Gasereignissen 	130903_B1 – übertägig <ul style="list-style-type: none"> Foidit hohe Gehalte / Anteile: Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, TiO₂, V, Lanthanoide, Plagioklas, Ilmenit, Jadeit geringe Gehalte /Anteile: MgO, Cr, Ni, Rb, Enstatit, Nephelin 130903_A1 – untertägig <ul style="list-style-type: none"> ca. 2,1 km nördlich von L9 siehe L10
L10	<ul style="list-style-type: none"> ein NNW-SSE streichender Vulkanit 	0	<ul style="list-style-type: none"> keine Angaben 	Vertaubung Hartsalz	<ul style="list-style-type: none"> keine Gasereignisse bekannt 	130903_A1 – untertägig <ul style="list-style-type: none"> Foidit 24,7±2,5 Mio. Jahre hohe Gehalte / Anteile: SiO₂, Ba, Augit, Sodalith, Antigorit geringe Gehalte / Anteile: MgO, K₂O, Kaersutit, Plagioklas
L11	<ul style="list-style-type: none"> keine Strukturelemente bekannt 	134	<ul style="list-style-type: none"> keine Angaben 	Hartsalz	<ul style="list-style-type: none"> diffuse Verteilung der Gasereignisse ohne besonderen Bezug zu Strukturelementen 	keine Analysen
L12	<ul style="list-style-type: none"> ein NNW-SSE streichender Vulkanit 	695	<ul style="list-style-type: none"> keine Angaben 	Hartsalz Vertaubung	<ul style="list-style-type: none"> Häufung von Gasereignissen besonders im direkten westlichen Umfeld des Vulkanits 	130903_A1 übertägig <ul style="list-style-type: none"> ca. 1,2 km südlich vom Zentrum von L12 siehe L10

Lokation	Strukturelemente	Anzahl Gasereignisse	Anzahl und Tonnage [t] von Gas-Salz-Ausbrüchen	Fazies	Bemerkung	Besonderheiten Zusammensetzung Vulkanit
L13	<ul style="list-style-type: none"> ein N-S streichender Vulkanit 	383	<ul style="list-style-type: none"> keine Angaben 	Hartsalz Vertaubung	<ul style="list-style-type: none"> Häufung von Gasereignissen in südlicher Verlängerung des Vulkanits 	keine Analysen
L14	<ul style="list-style-type: none"> drei N-S streichende Vulkanitvorkommen NW-SE streichende Störung im Suprasalinar 	346	<ul style="list-style-type: none"> 15 Gas-Salz-Ausbrüche 50 t bis 5.000 t 	Hartsalz Vertaubung Carnallit Keine Informationen zu überwiegendem Anteil der Fläche L14	<ul style="list-style-type: none"> Keine Korrelation von Bereichen lokaler Häufung von Gasereignissen mit Vorkommen von Gas-Salz-Ausbrüchen 	keine Analysen
L15	<ul style="list-style-type: none"> ein N-S streichender Vulkanit 	124	<ul style="list-style-type: none"> 14 Gas-Salz-Ausbrüche 50 t bis 800 t 	Hartsalz Vertaubung	<ul style="list-style-type: none"> Keine homogene Verteilung von Gasereignissen entlang des Vulkanits 	140219_A6 – untertägig <ul style="list-style-type: none"> siehe L9
L16	<ul style="list-style-type: none"> Gas-Salz-Ausbrüche ca. 350 m nördlich von zwei NNE-SSW streichenden Vulkanitvorkommen eine NW-SE streichende Störung im Suprasalinar 	7	<ul style="list-style-type: none"> 7 Gas-Salz-Ausbrüche 20 t bis 1.000 t 	Hartsalz	<ul style="list-style-type: none"> Gas-Salz-Ausbrüche am Kreuzungspunkt der Verlängerung von Vulkaniten und der Störung im Suprasalinar 	keine Analysen
L17	<ul style="list-style-type: none"> Drei NNE-SSW streichende Vulkanitvorkommen Eine NW-SE streichende Störung im Subsalinar 	270	<ul style="list-style-type: none"> keine Angabe 	Hartsalz Vertaubung Umwandlungshalit	<ul style="list-style-type: none"> Stärkere Häufung von Gasereignissen im Süden von L17 	keine Analysen
L18	<ul style="list-style-type: none"> Gasereignisse ca. 50 m nordwestlich einer NW-SE streichenden Störung im Suprasalinar und der Verlängerung eines ± N-S streichenden Vulkanits 	41	<ul style="list-style-type: none"> keine Angaben 	keine Angabe		140219_A5 – untertägig <ul style="list-style-type: none"> ca. 200 m südwestlich der Häufung der Gasereignisse siehe L3
L 3	<ul style="list-style-type: none"> ein N-S streichender Vulkanit zwei NW-SE streichende Störungen im Suprasalinar eine NW-SE streichende Störung im Subsalinar 	22	<ul style="list-style-type: none"> keine Angaben 	Hartsalz Keine Informationen zu überwiegendem Anteil der Fläche L3	<ul style="list-style-type: none"> Gasereignisse im Bereich der Kreuzung vom Vulkanit und je einer NW-SE streichenden Störung im Sub- und Suprasalinar 	140219_A5 – untertägig <ul style="list-style-type: none"> ca. 1,2 km nördlich der Häufung der Gasereignisse siehe L3 140219_A4 – untertägig <ul style="list-style-type: none"> ca. 1,1 km südlich der Häufung der Gasereignisse siehe L3

Lokation	Strukturelemente	Anzahl Gasereignisse	Anzahl und Tonnage [t] von Gas-Salz-Ausbrüchen	Fazies	Bemerkung	Besonderheiten Zusammensetzung Vulkanit
L19	<ul style="list-style-type: none"> 8 Vulkanitvorkommen mit Streichrichtungen zwischen NNW-SSE und NNE-SSW 	554	<ul style="list-style-type: none"> 1 Gas-Salz-Ausbruch 4.000 t keine weiteren Angaben 	Sylvinit Sylvinit über Carnallit Carnallit Vertaubung Hartsalz	<ul style="list-style-type: none"> Gasereignisse weit verbreitet und nicht zwingend im direkten Umfeld der Vulkanitvorkommen 	140204_A6 – untertägig <ul style="list-style-type: none"> ca. 200 m nördlich von L19 Foidit hohe Gehalte / Anteile: CaO, Lanthanoide geringe Gehalte / Anteile: Co, Ni keine MLA-Analysen
L20	<ul style="list-style-type: none"> ein N-S und ein NNW-SSE streichendes Vulkanitvorkommen drei WNW-ESE streichende Störungen im Subsalinar eine NW-SE streichende Störung im Suprasalinar 	166	<ul style="list-style-type: none"> 4 Gas-Salz-Ausbrüche 50 t bis 3.000 t 	Hartsalz Sylvinit	<ul style="list-style-type: none"> Häufung von Gasereignissen entlang der Vulkanitvorkommen Gas-Salz-Ausbruch mit 3.000 t ca. 200 m nördlich des Kreuzungspunktes der Verlängerung einer Störung im Subsalinar und einem Vulkanit 	keine Analysen
L21	<ul style="list-style-type: none"> ein N-S streichender Vulkanit eine NW-SE streichende Störung im Subsalinar eine NW-SE streichende Störung im Suprasalinar 	78	<ul style="list-style-type: none"> 5 Gas-Salz-Ausbrüche 100 t bis 5.500 t 	Hartsalz Vertaubung	<ul style="list-style-type: none"> Gas-Salz-Ausbruch mit 5.500 t ca. 150 m nordwestlich des Kreuzungspunktes des Vulkanits und der Störung im Suprasalinar höhere Anzahl an Gasereignissen im Kaliflöz Thüringen als im Kaliflöz Hessen 	130905_A5 – untertägig <ul style="list-style-type: none"> Basanit Sandsteinschollen in Matrix aus Vulkanit hohe Gehalte / Anteile: Cr, Ni, Nephelin, Quarz geringe Gehalte / Anteile: Ferrosilit
L22	<ul style="list-style-type: none"> zwei N-S streichende Vulkanitvorkommen 	146	<ul style="list-style-type: none"> 30 Gas-Salz-Ausbrüche 50 t bis 5.500 t 	Hartsalz Vertaubung Untergeordnet Carnallit	<ul style="list-style-type: none"> Gas-Salzausbrüche der Kategorie 2 und 3 im Bereich gehäuft auftretender Gasereignisse Mehrzahl der Gas-Salz-Ausbrüche in max. 50 m Distanz zu Vulkaniten höhere Anzahl an Gasereignissen im Kaliflöz Hessen als im Kaliflöz Thüringen 	130905_A1 – untertägig <ul style="list-style-type: none"> Foidit im Niveau des Kaliflöz Thüringen Reinheit ausgebildet hohe Gehalte / Anteile: CaO, Na₂O, LOI, Cr geringe Gehalte / Anteile: Al₂O₃, K₂O, TiO₂ keine MLA-Analysen

INHALTSVERZEICHNIS

1	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Geländeoberkante GOK_HILF	2
2	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis Unterer Muschelkalk (mu)	3
3	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Oberen Buntsandstein (so)	5
4	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Mittleren Buntsandstein (smV)	7
5	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Unteren Buntsandstein (su)	9
6	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Oberen Leine-Ton	10
7	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Leine-Karbonat (z3CA)	12
8	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Unteren Leine-Ton (z3Ta)	14
9	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis der Oberbank des Oberen Werra-Anhydrit (z1ANcb)	16
10	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Obersten Werra-Steinsalz (z1NAd)	18
11	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis der Unterbank des Oberen Werra-Anhydrit	20
12	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Oberen Werra-Ton (z1Tb)	22
13	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Oberen Werra-Steinsalz (z1NAc)	25
14	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Kaliflöz Hessen (z1KHe)	28
15	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Mittleren Werra-Steinsalz (z1NAb)	31
16	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Kaliflöz Thüringen (z1KTh)	35
17	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Unteren Werra-Steinsalz (z1NAa)	38
18	Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Unteren Werra-Anhydrit (z1ANa)	41

1 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Geländeoberkante GOK_HILF

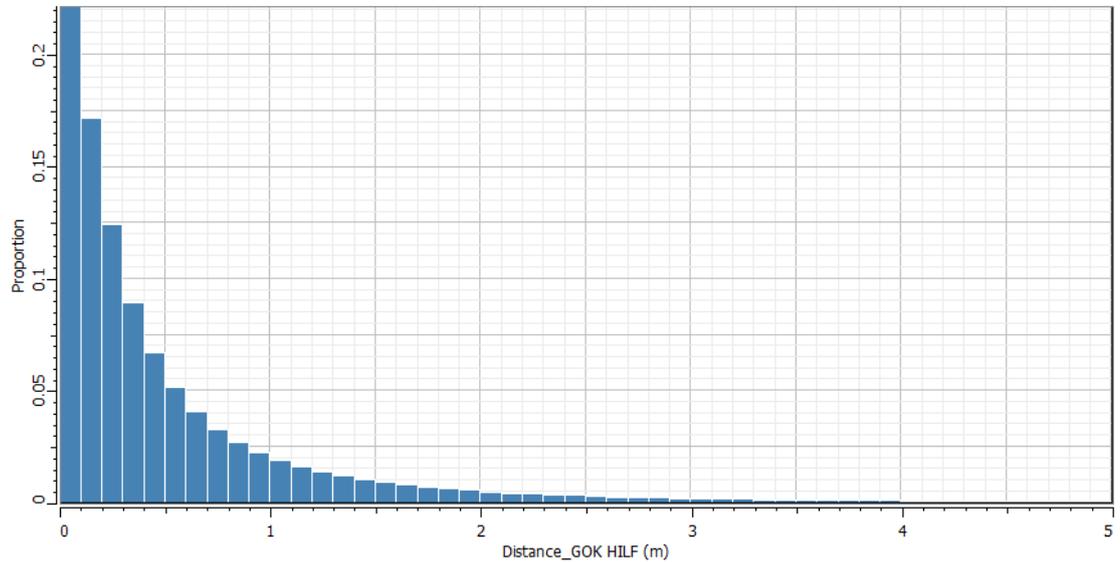


Abbildung 1 Verhältnis der absoluten Abweichung der Eingangsdaten von der modellierten Fläche – GOK_HILF [m]

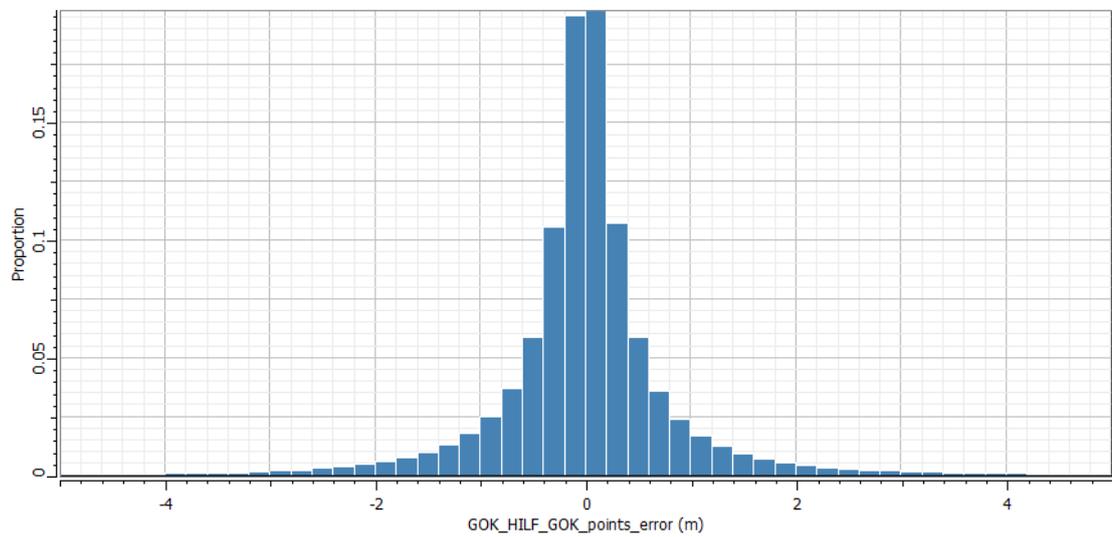


Abbildung 2 Verhältnis der relativen Abweichung der Eingangsdaten zur Fläche GOK_HILF [m]

2 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis Unterer Muschelkalk (mu)

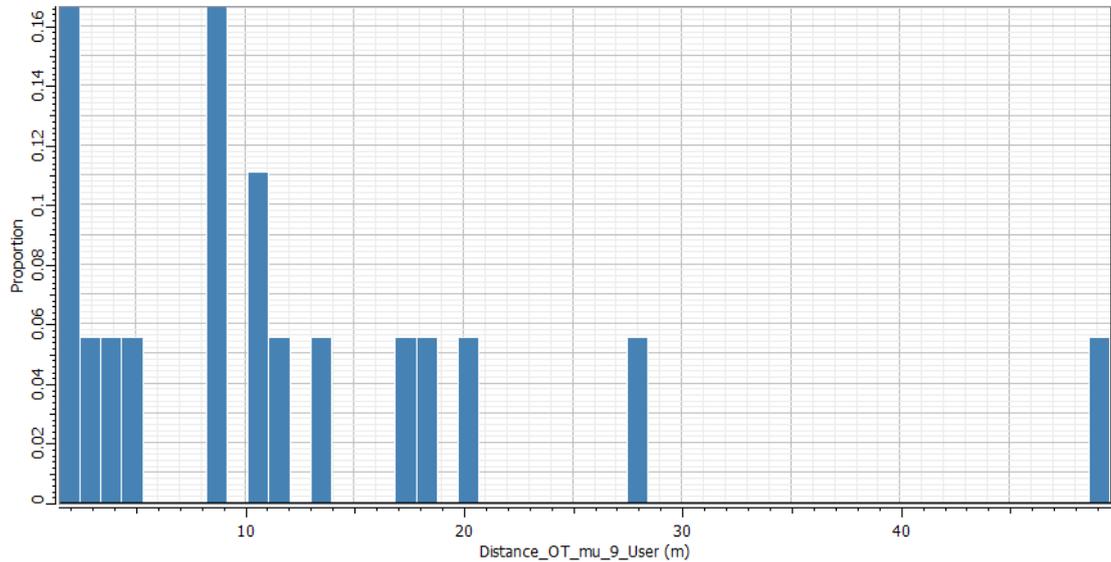


Abbildung 3 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis Muschelkalk [m]

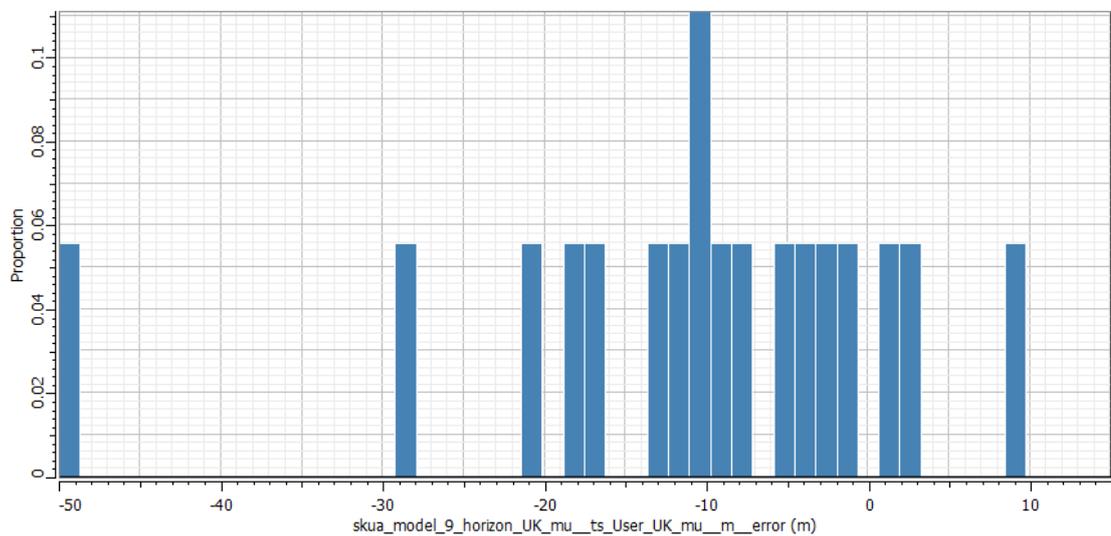


Abbildung 4 Relative Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis Muschelkalk [m]

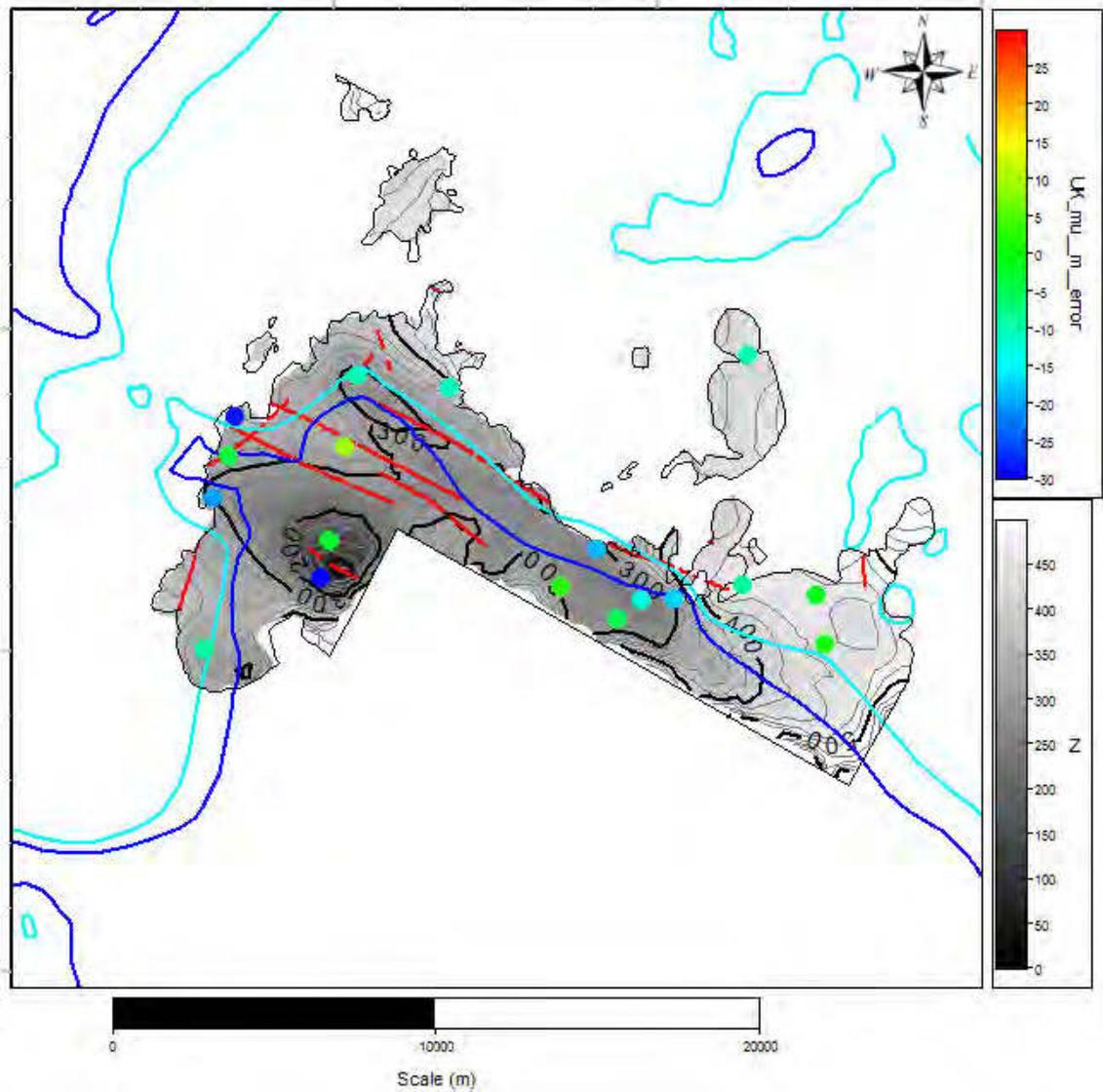


Abbildung 5 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_mu_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Muschelkalk (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

3 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Oberen Buntsandstein (so)

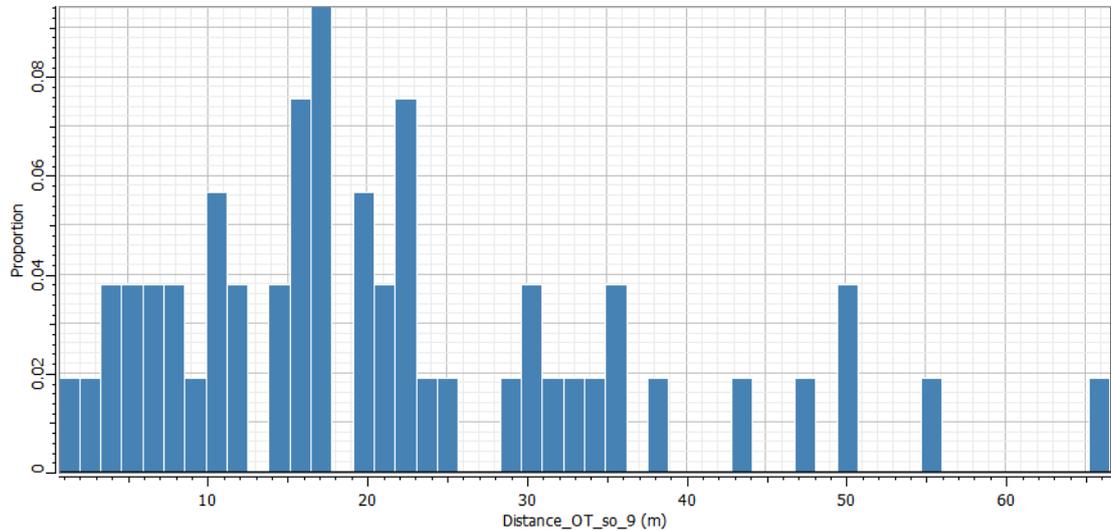


Abbildung 6 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Oberen Buntsandstein [m]

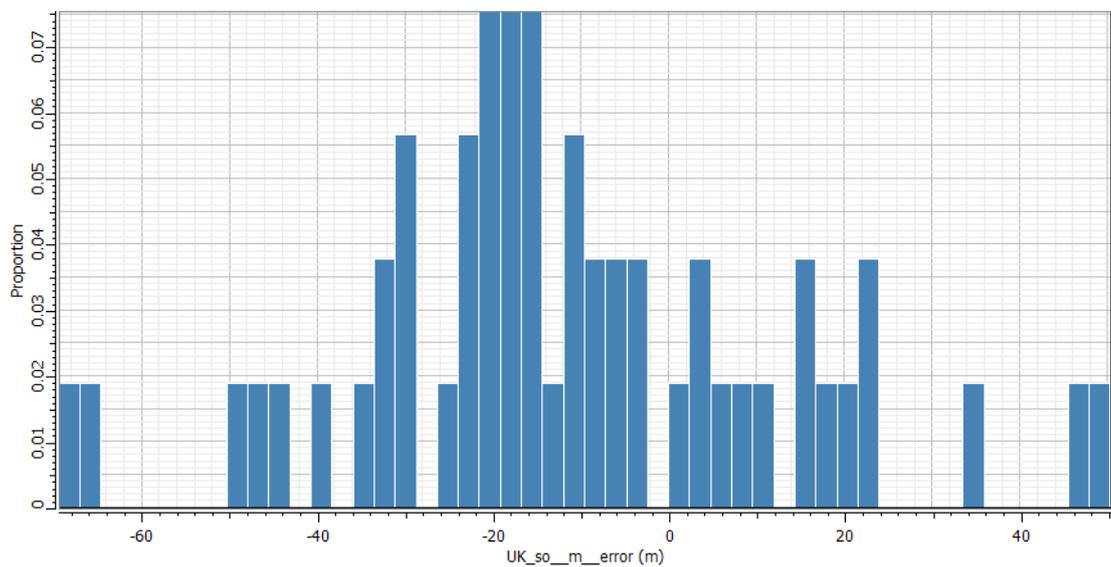


Abbildung 7 Relative Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Oberen Buntsandstein [m]

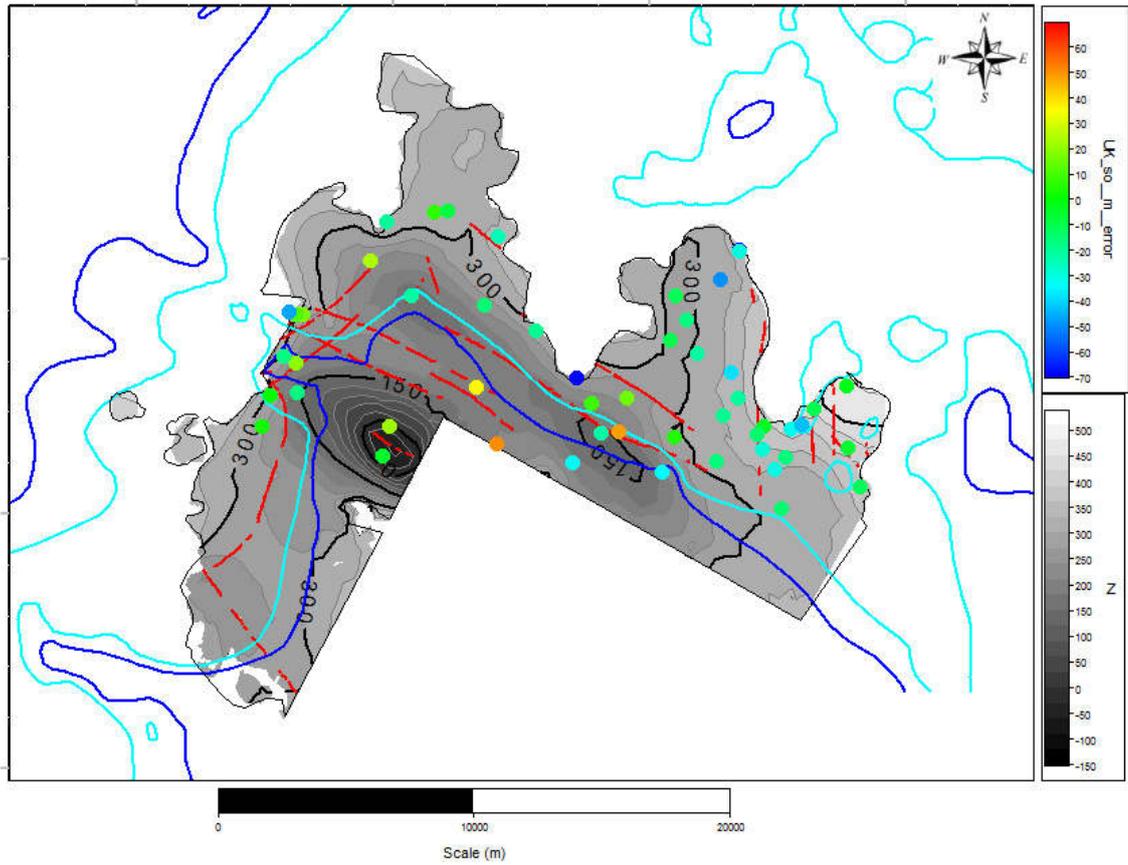


Abbildung 8 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_so_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Buntsandstein (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

4 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Mittleren Buntsandstein (smV)

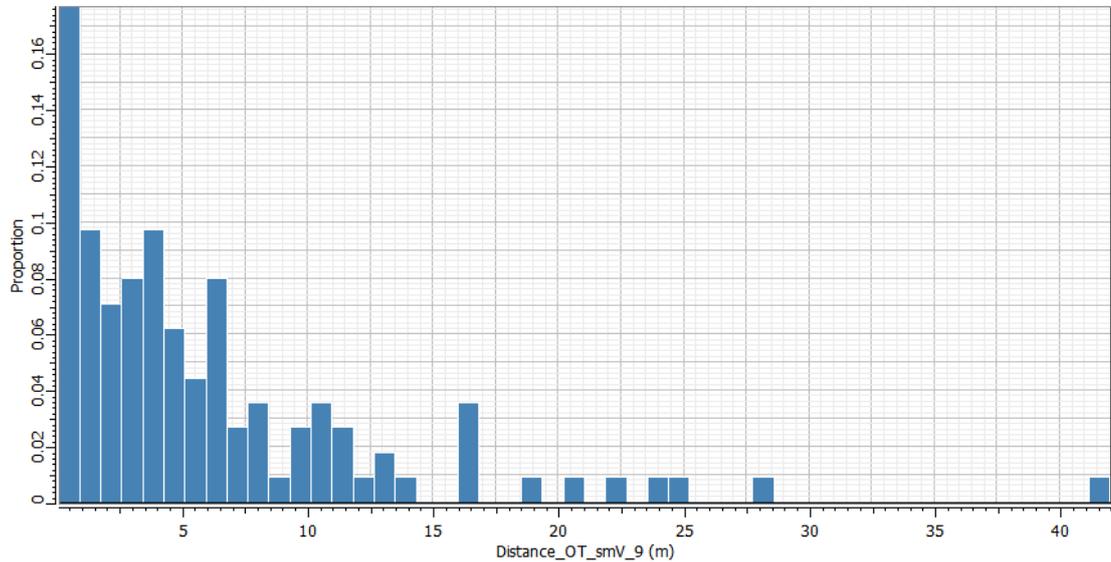


Abbildung 9 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Mittleren Buntsandstein [m]

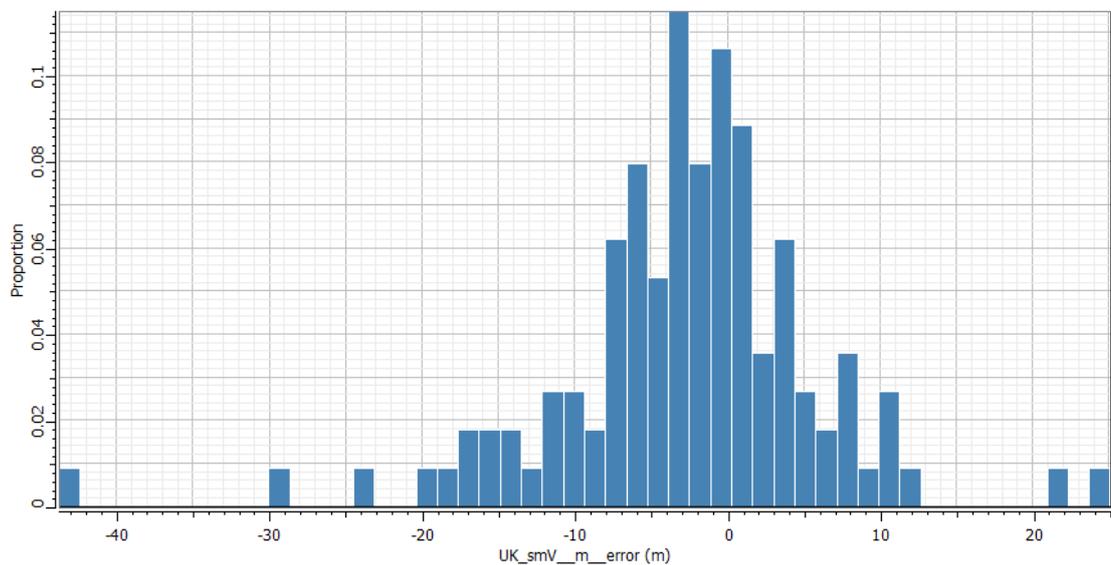


Abbildung 10 Relative Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Mittleren Buntsandstein [m]

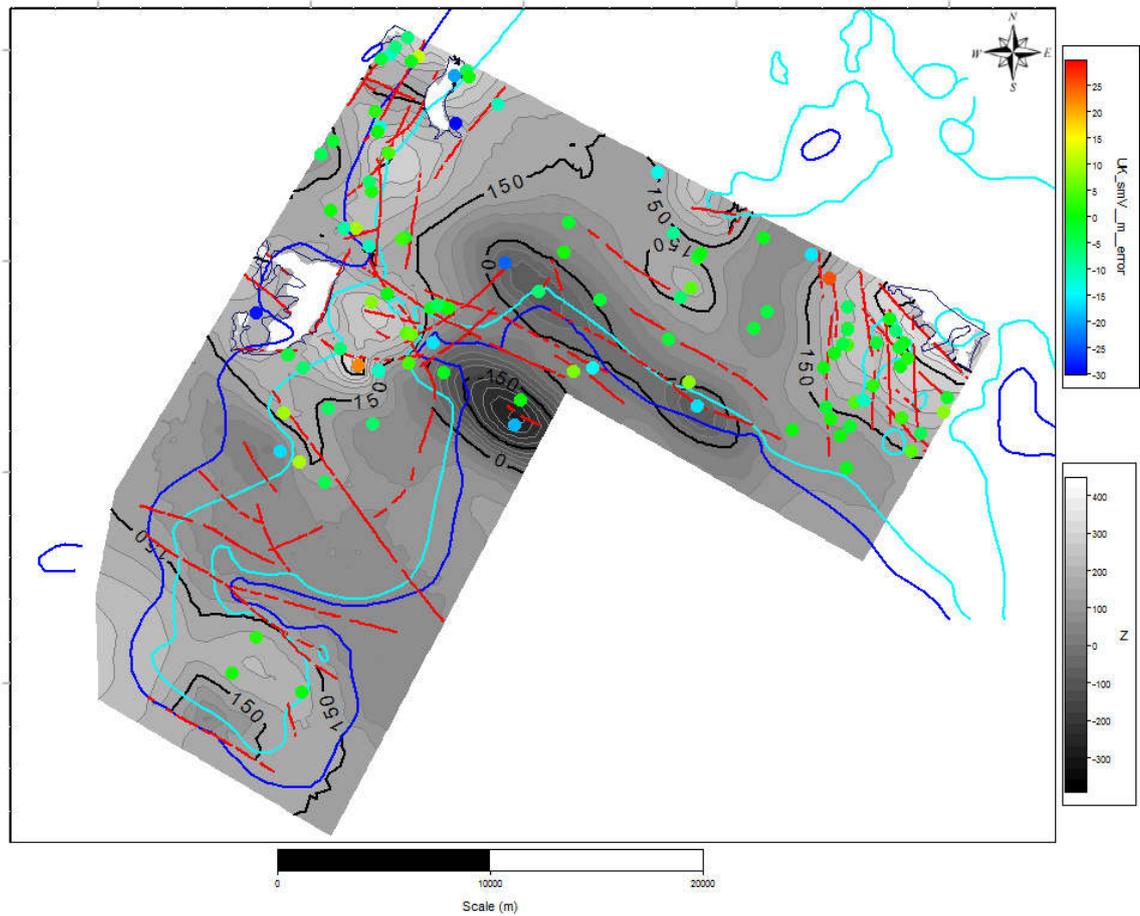


Abbildung 11 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_smV_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Mittleren Buntsandstein (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

5 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Unteren Buntsandstein (su)

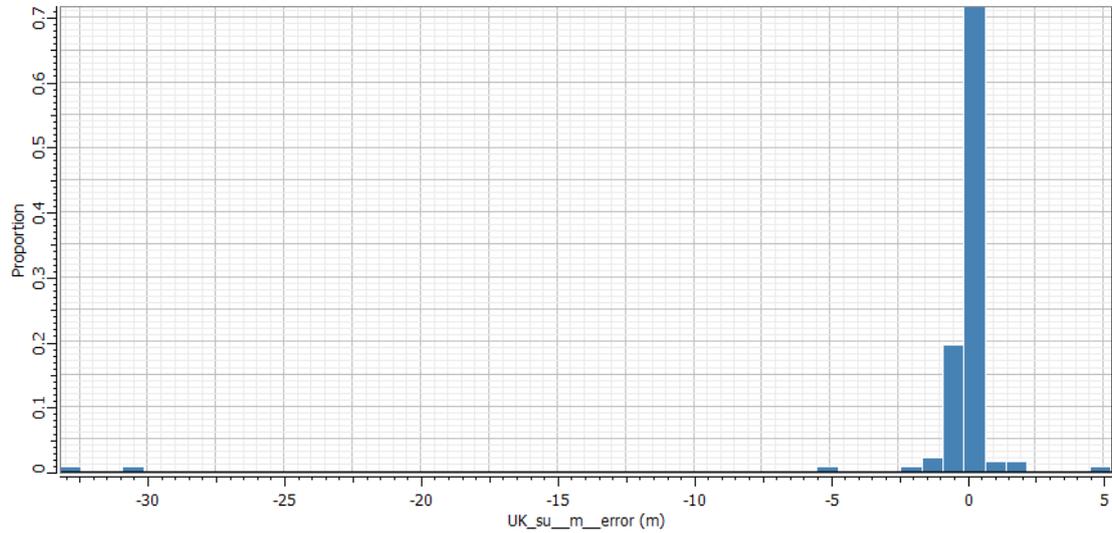


Abbildung 12 Relative Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Unteren Buntsandstein [m]

6 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Oberen Leine-Ton

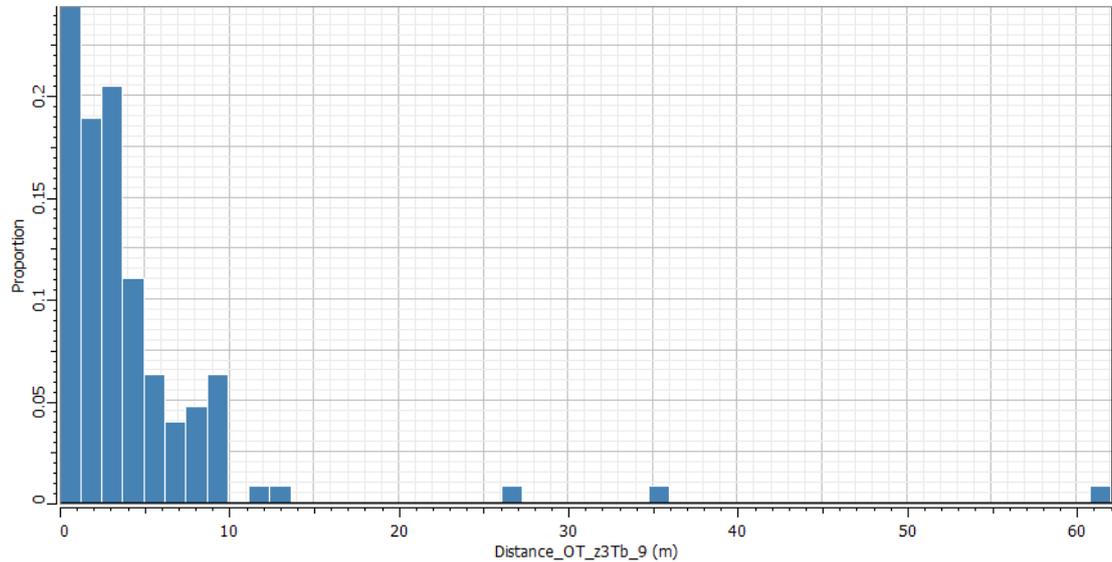


Abbildung 13 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Oberen Leine-Ton [m]

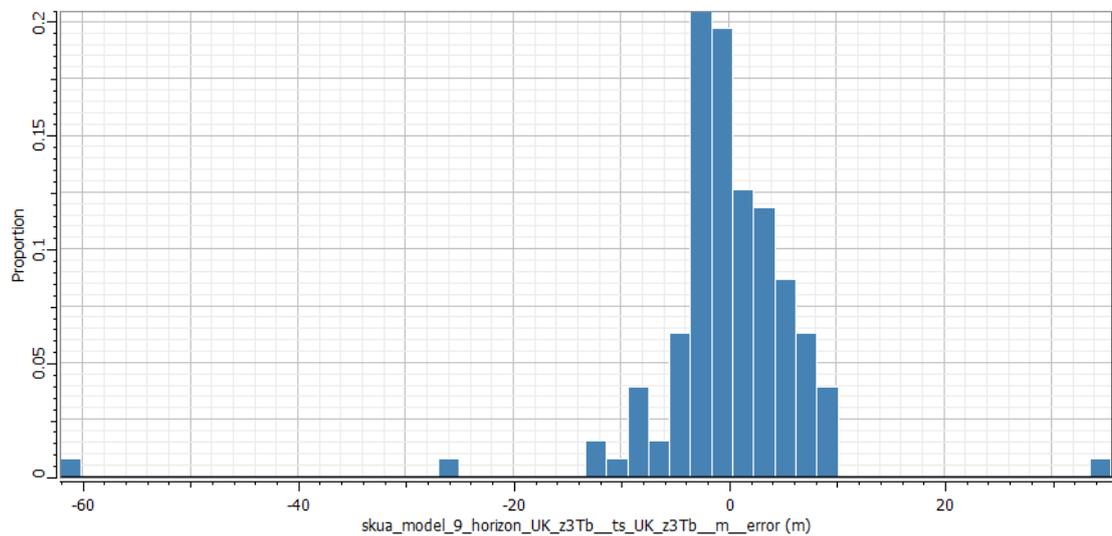


Abbildung 14 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Oberen Leine-Ton [m]

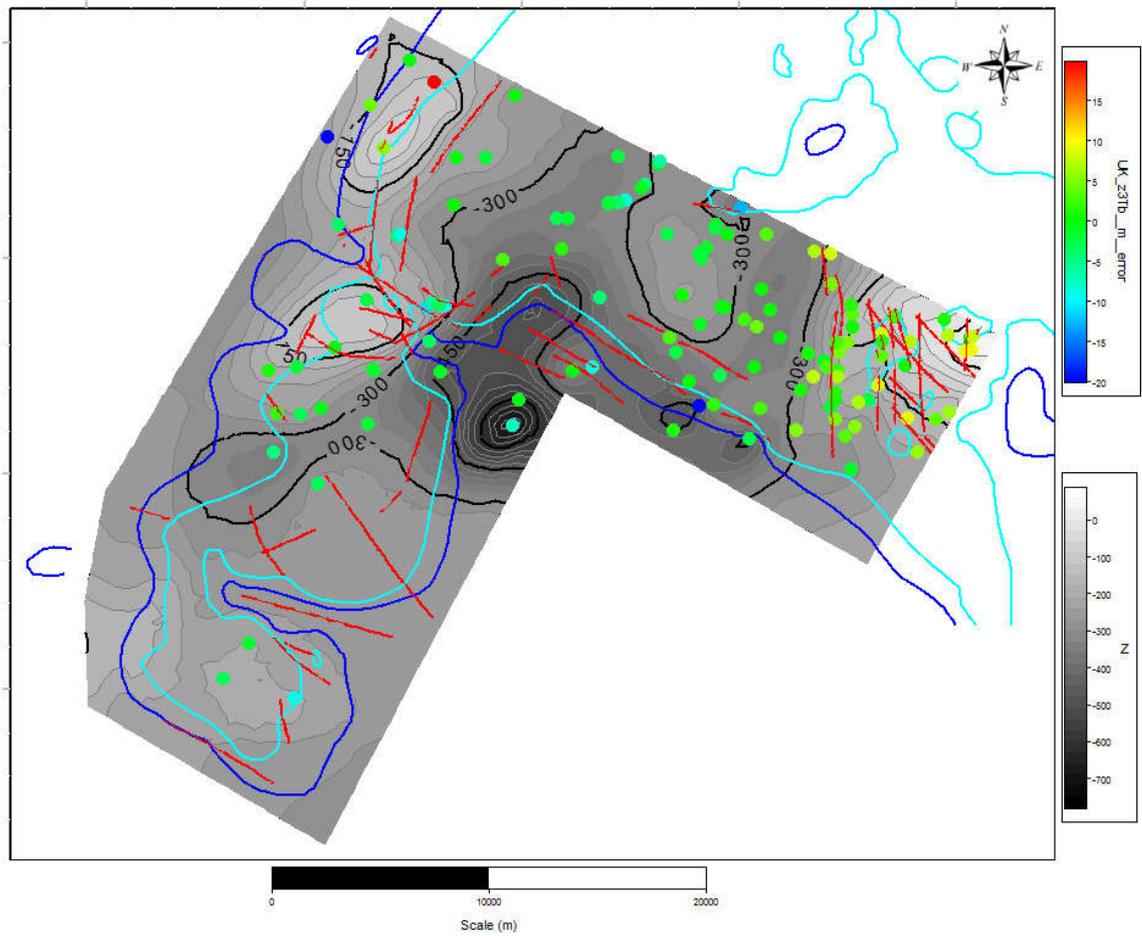


Abbildung 15 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z3Tb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Leine-Ton (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

7 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Leine-Karbonat (z3CA)

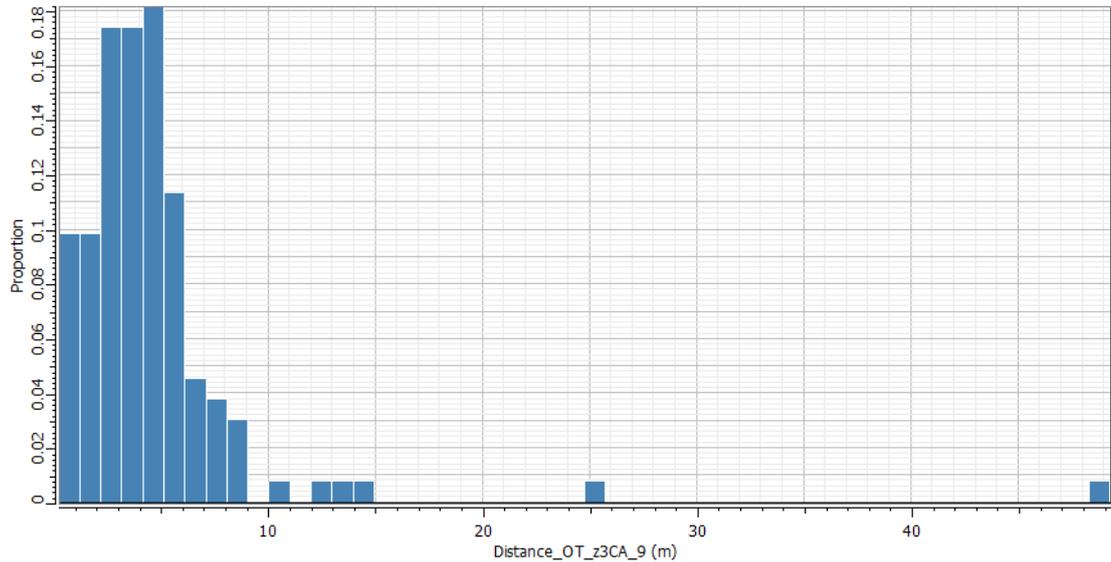


Abbildung 16 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Leine-Karbonat

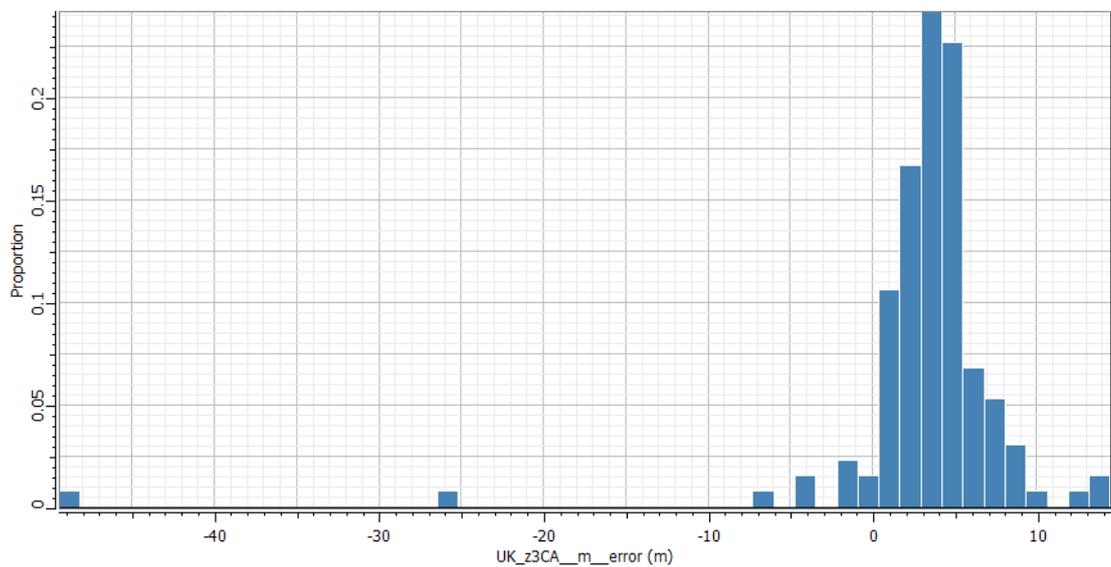


Abbildung 17 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Leine-Karbonat [m]

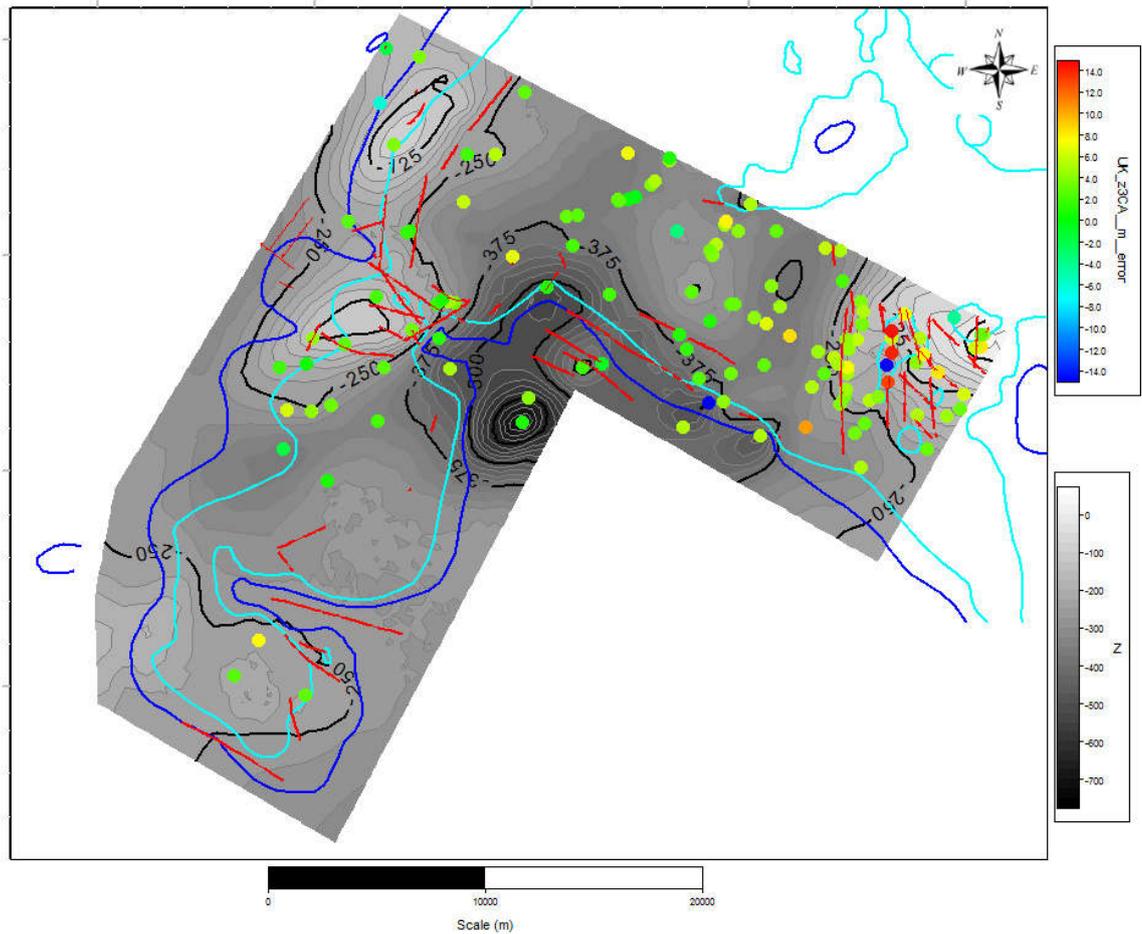


Abbildung 18 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z3CA_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Leine-Karbonat (untere Legende); Rot-Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

8 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Unteren Leine-Ton (z3Ta)

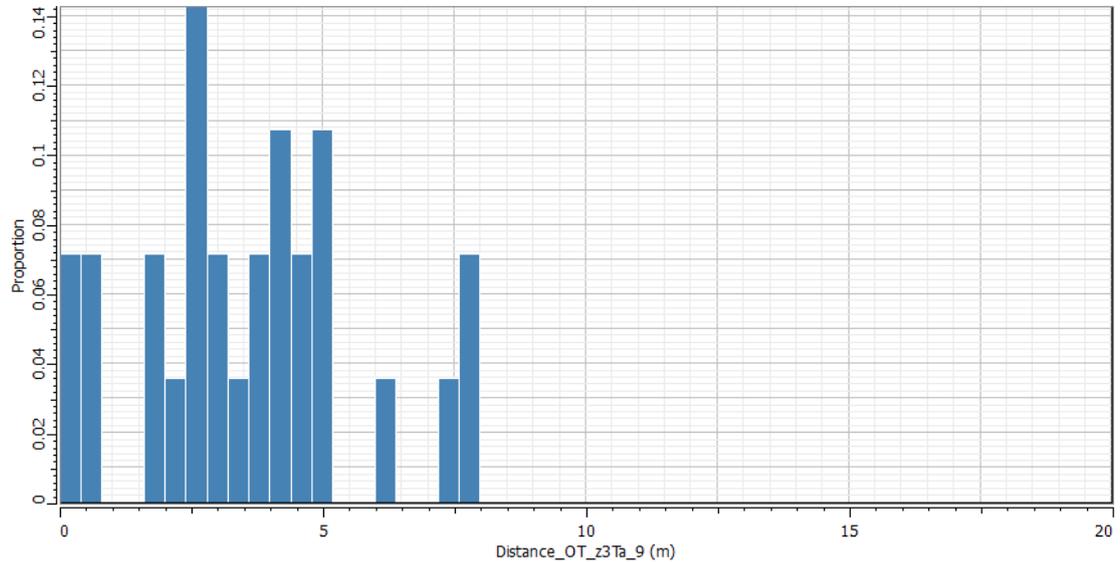


Abbildung 19 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Unteren Leine-Ton [m]

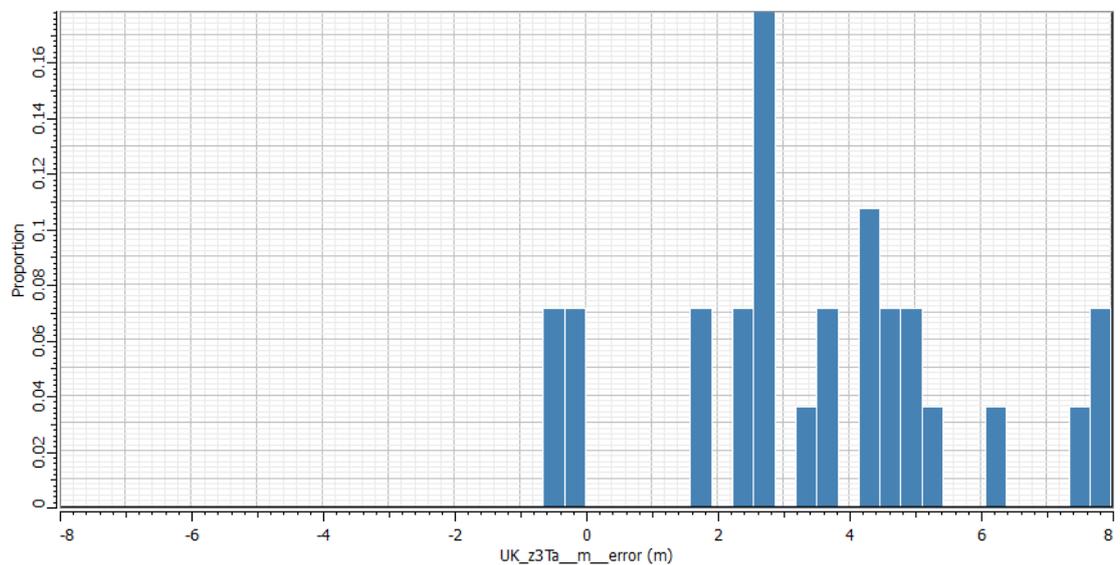


Abbildung 20 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Unteren Leine-Ton [m]

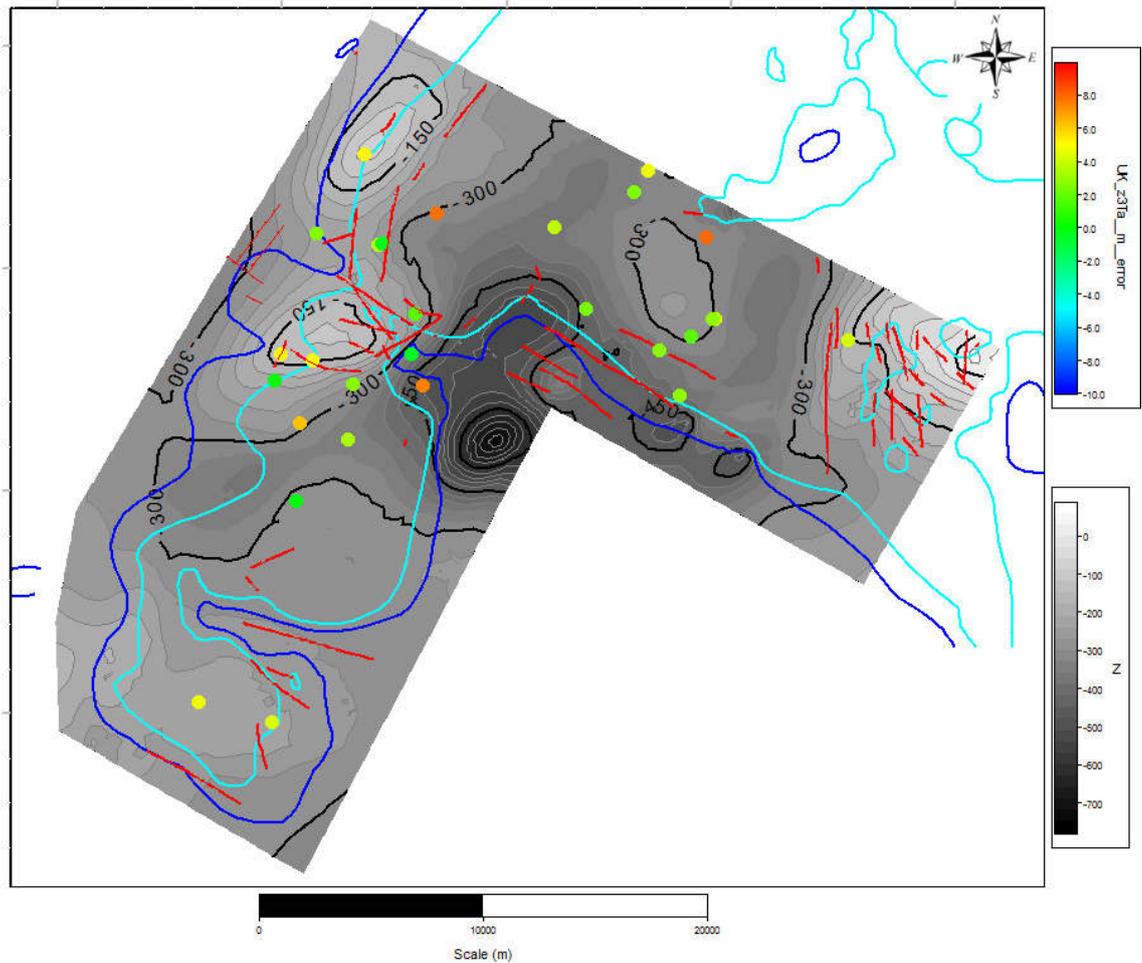


Abbildung 21 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z3Ta_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Leine-Ton (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

9 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis der Oberbank des Oberen Werra-Anhydrit (z1ANcb)

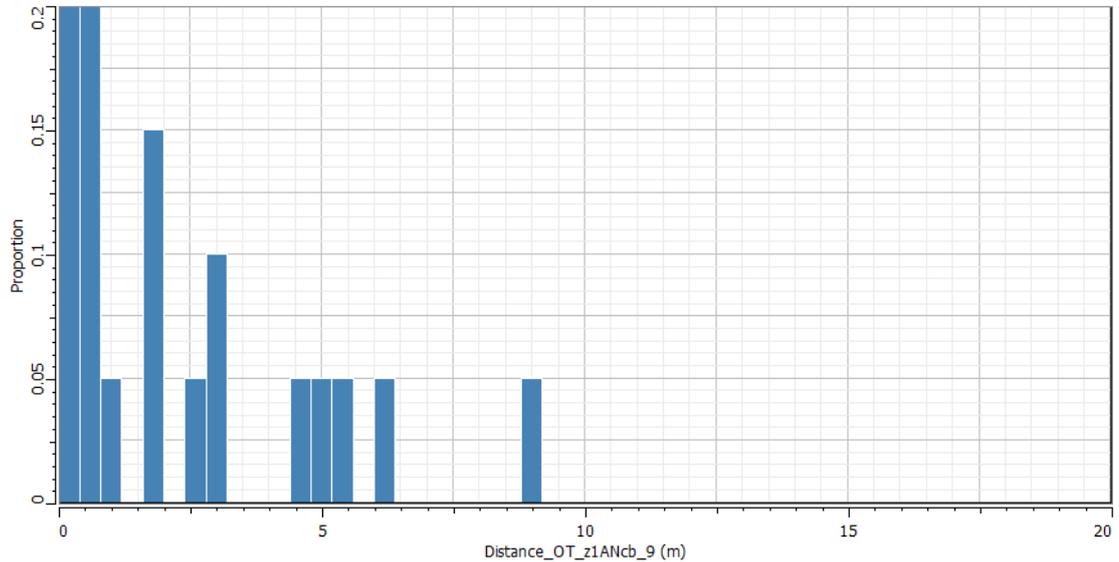


Abbildung 22 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis der Oberbank des Oberen Werra-Anhydrit [m]

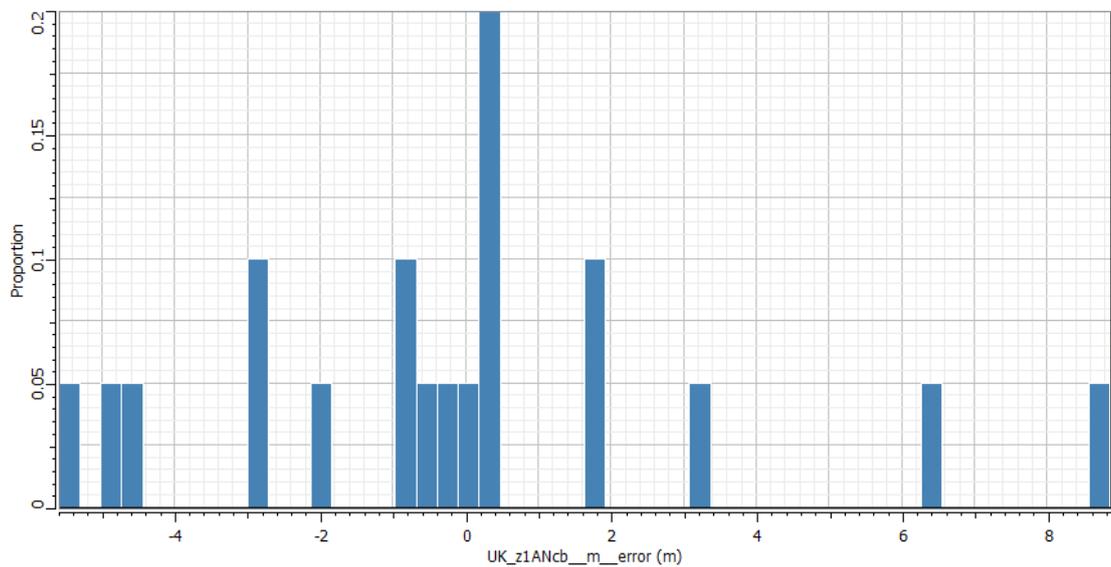


Abbildung 23 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis Oberbank des Oberen Werra-Anhydrit [m]

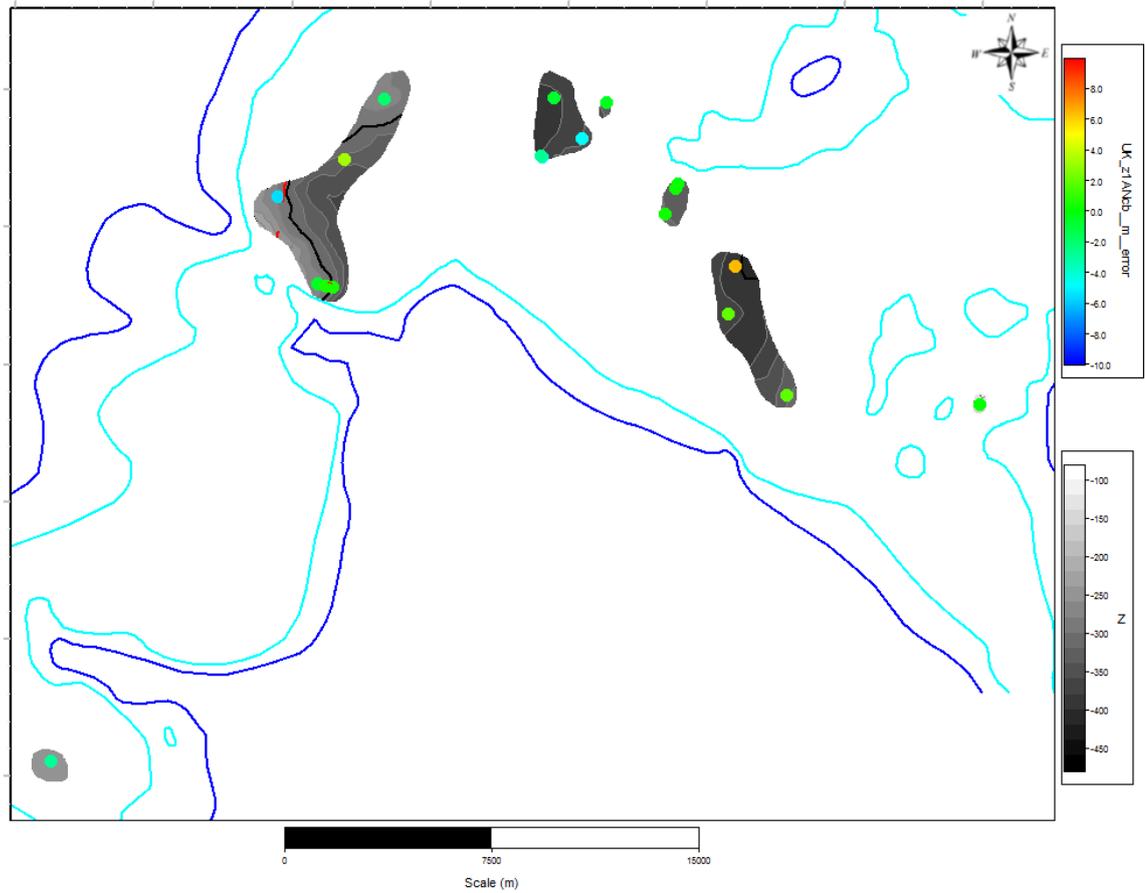


Abbildung 24 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1ANcb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis der Oberbank des Oberen Werra-Anhydrit (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

10 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Obersten Werra-Steinsalz (z1NAd)

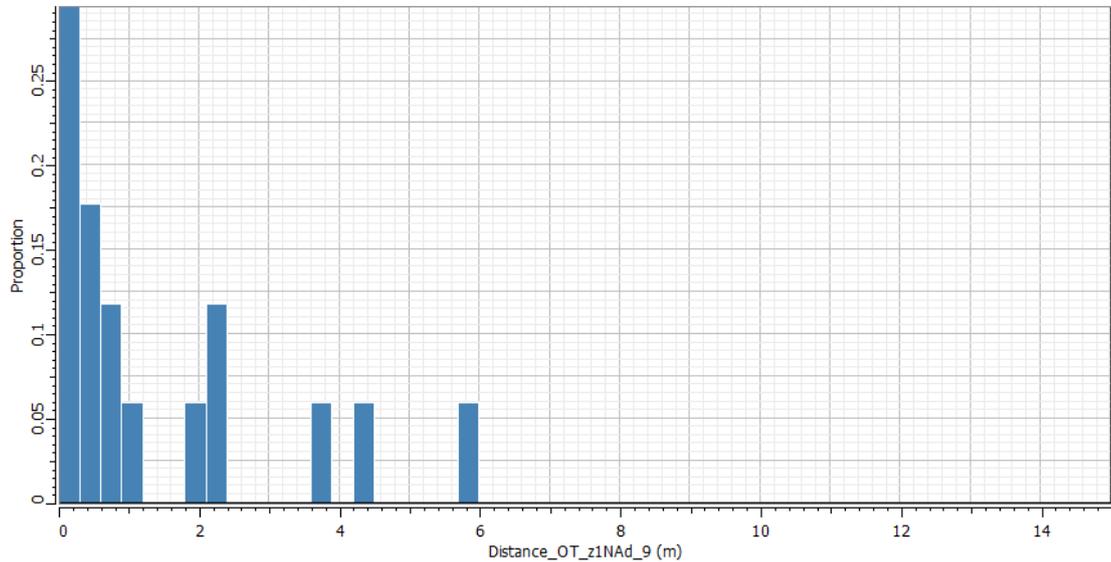


Abbildung 25 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis Oberstes Werra-Steinsalz [m]

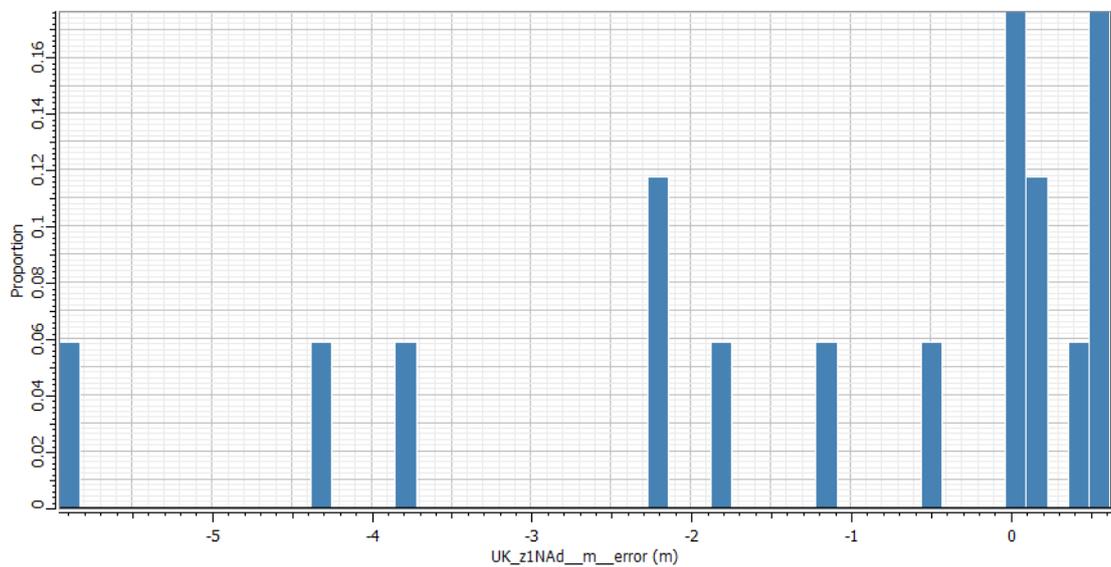


Abbildung 26 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Obersten Werra-Steinsalz [m]

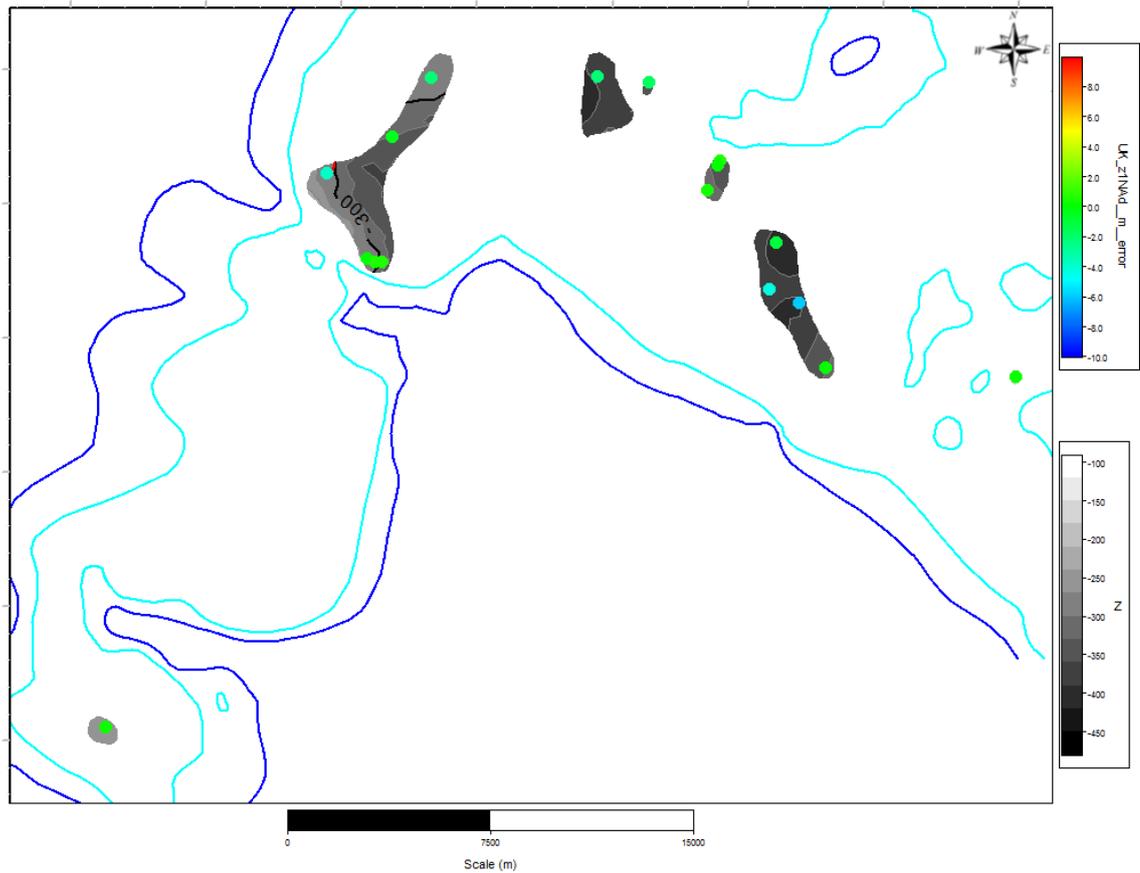


Abbildung 27 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1NAd_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Obersten Werra-Steinsalz (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

11 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis der Unterbank des Oberen Werra-Anhydrit

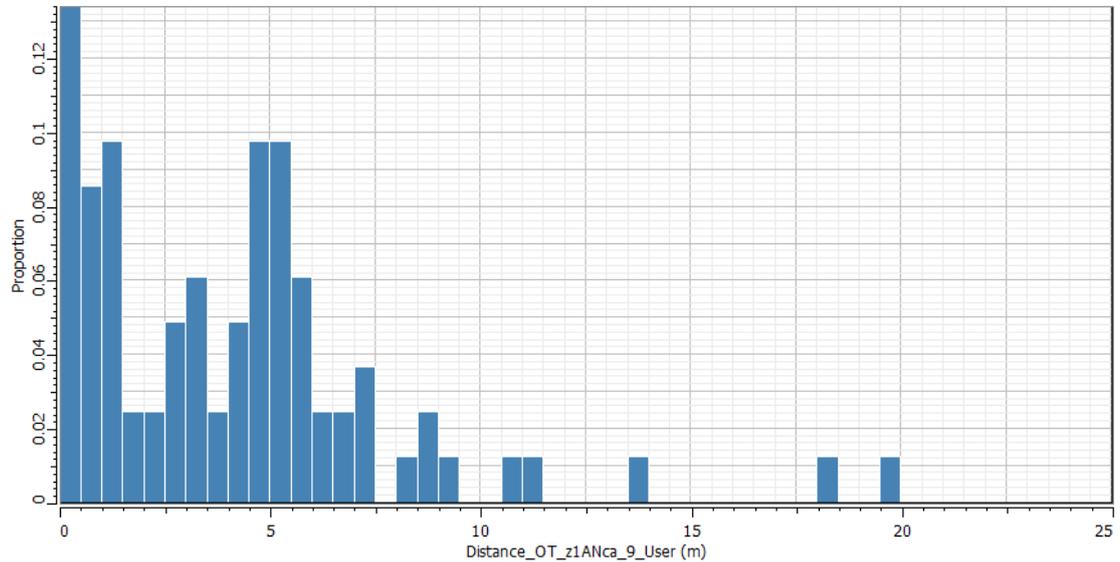


Abbildung 28 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis der Unterbank des Oberen Werra-Anhydrit

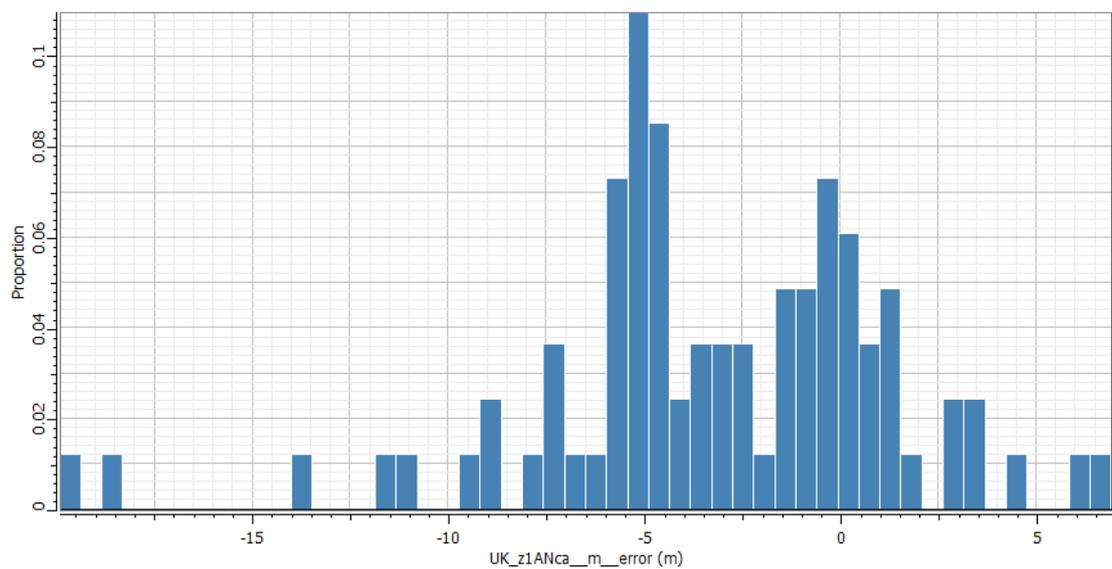


Abbildung 29 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis der Unterbank des Oberen Werra-Anhydrit [m]

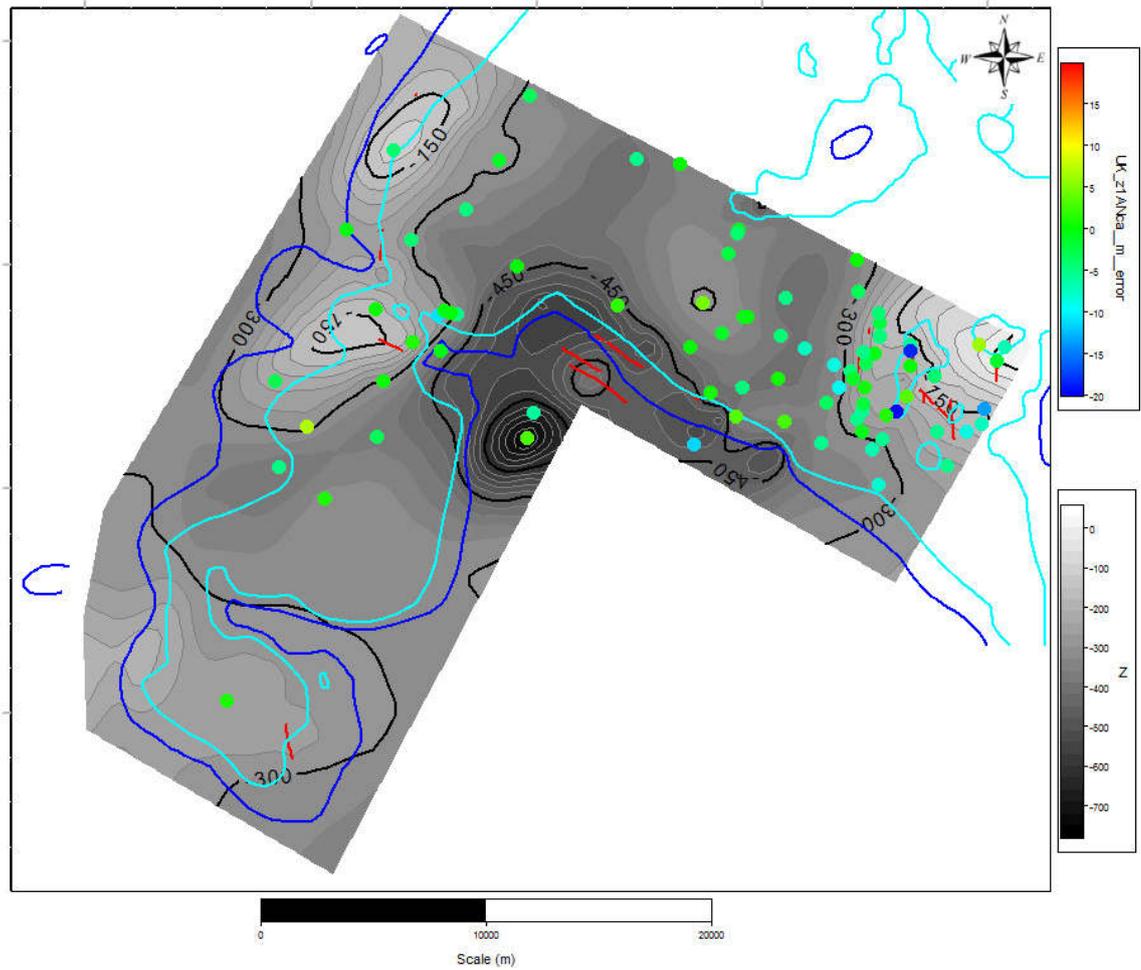


Abbildung 30 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1ANca_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis der Unterbank des Oberen Werra-Anhydrit (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

12 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Oberen Werra-Ton (z1Tb)

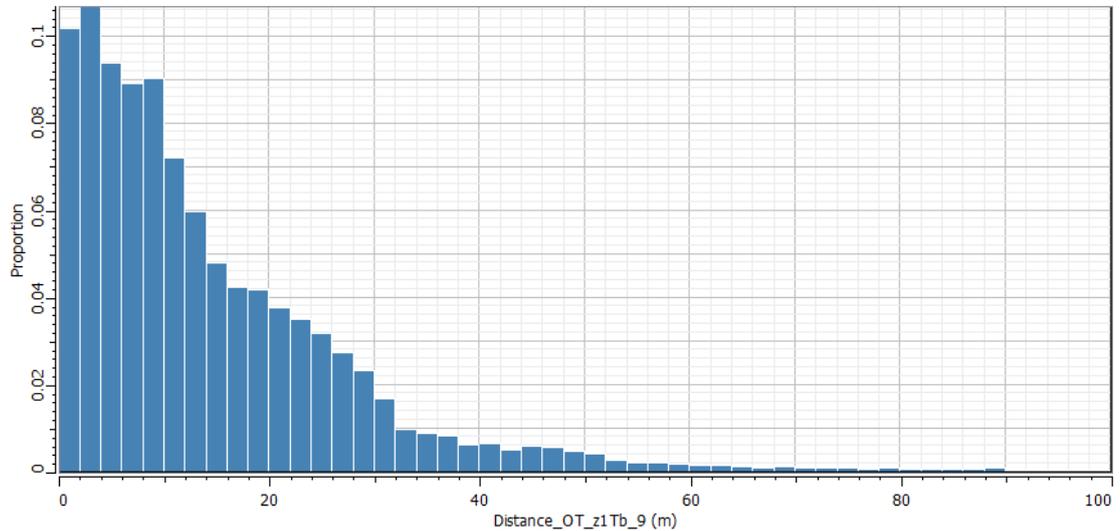


Abbildung 31 Verhältnis der Abweichung aller zur Modellierung herangezogenen Eingangsdaten von der Ergebnisfläche für die Basis des Oberen Werra-Ton [m]

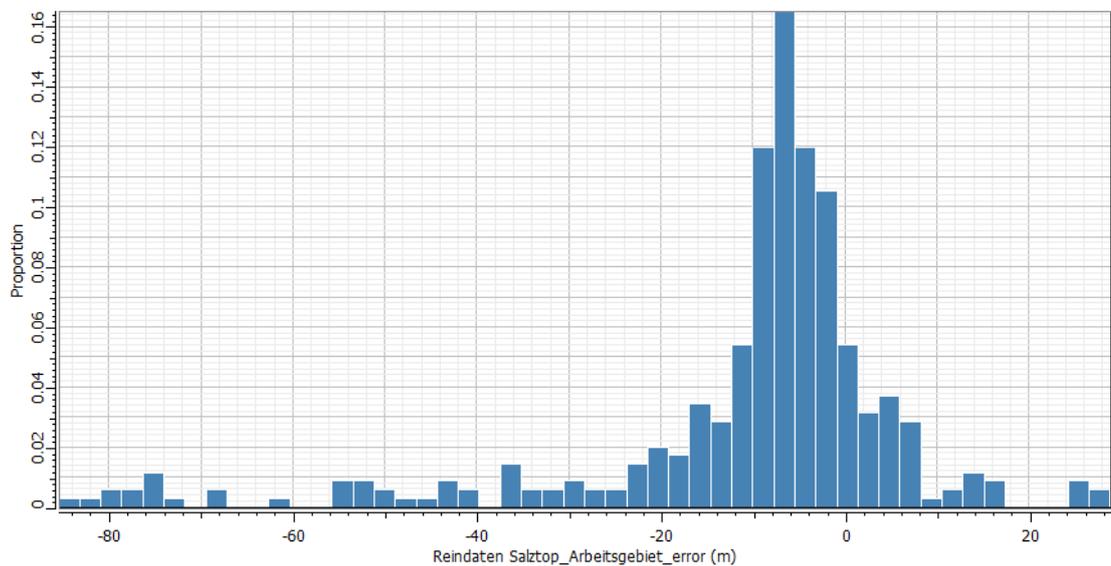


Abbildung 32 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Oberen Werra-Ton [m]

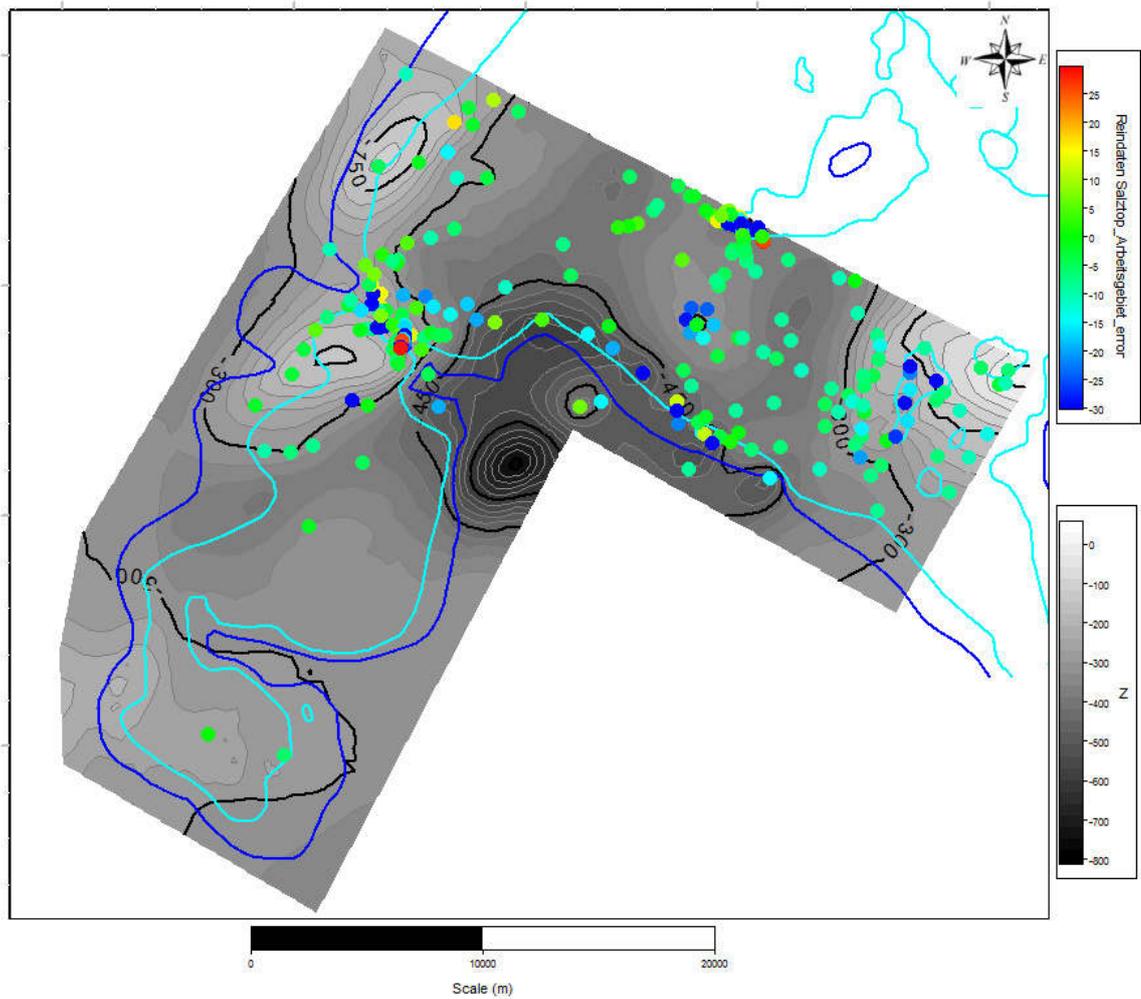


Abbildung 33 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsuntersuchungen (Reindaten Salztop_Arbeitsgebiet_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Werra-Ton (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

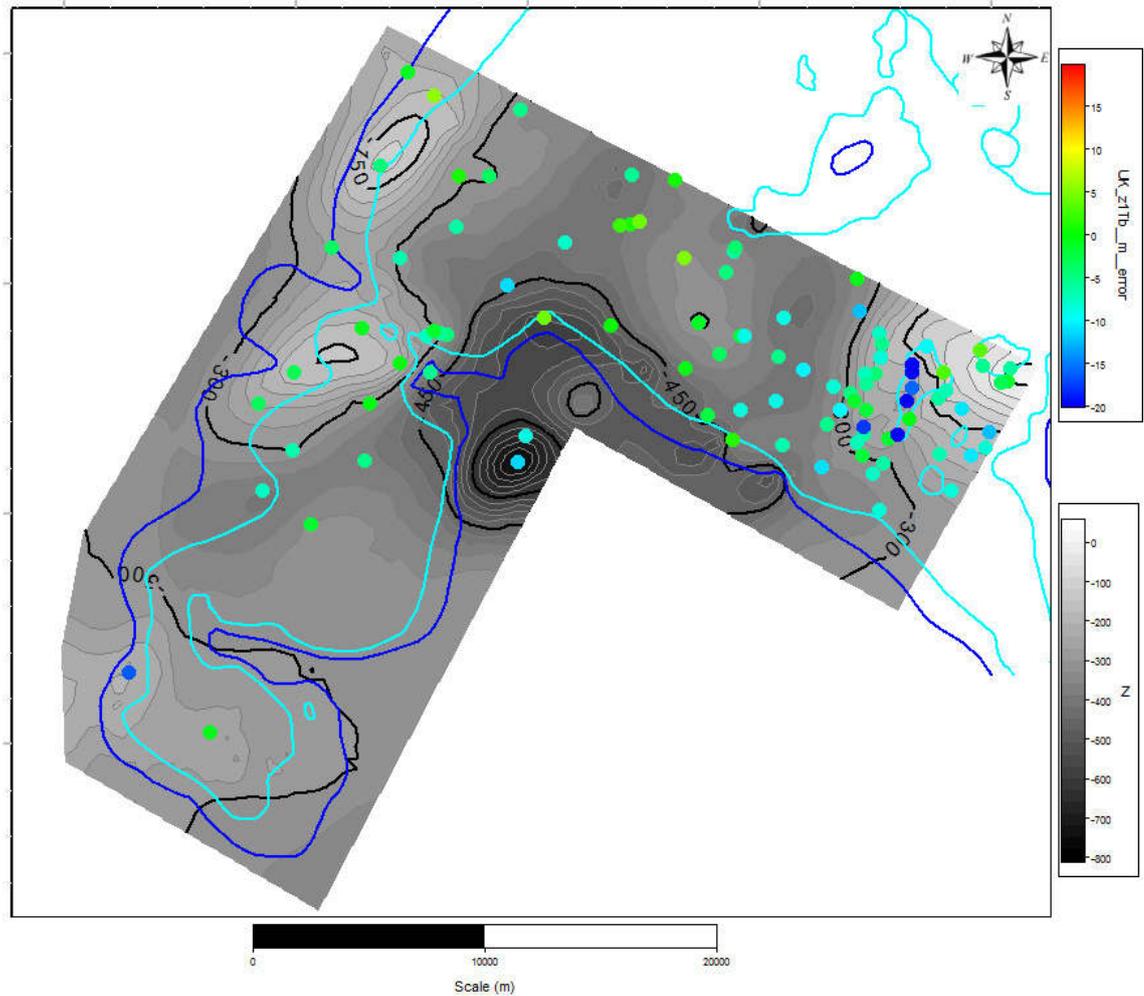


Abbildung 34 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1Tb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Werra-Ton (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

13 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Oberen Werra-Steinsalz (z1Nac)

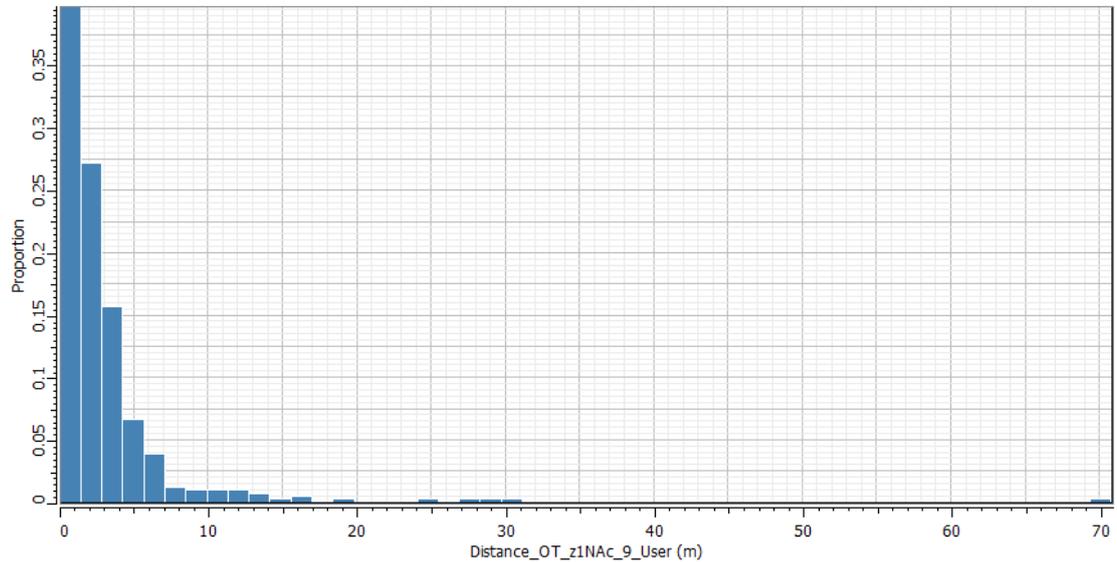


Abbildung 35 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Oberen Werra-Steinsalz

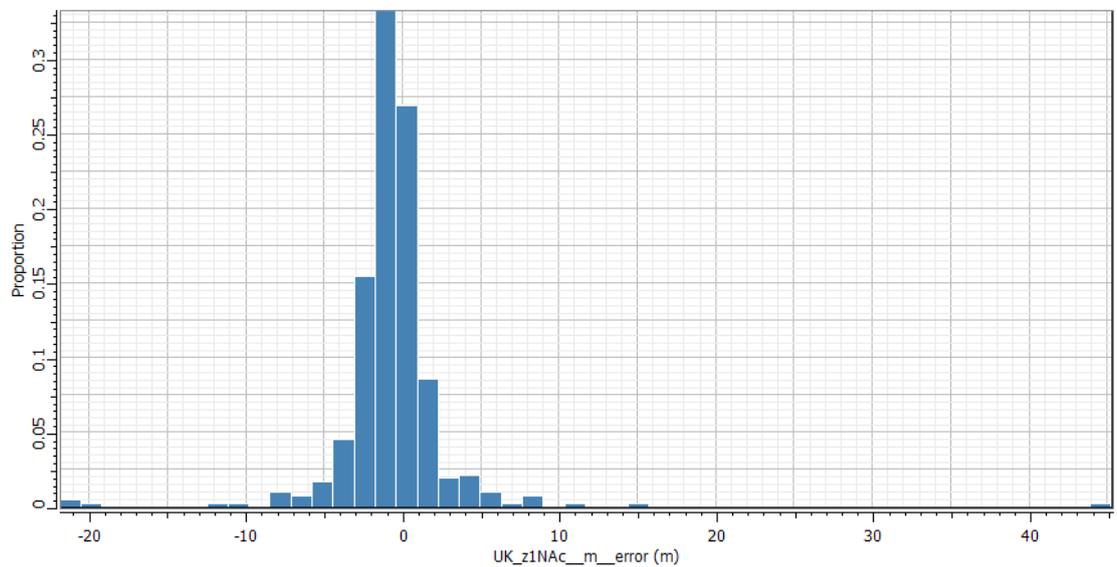


Abbildung 36 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Oberen Werra-Steinsalz [m]

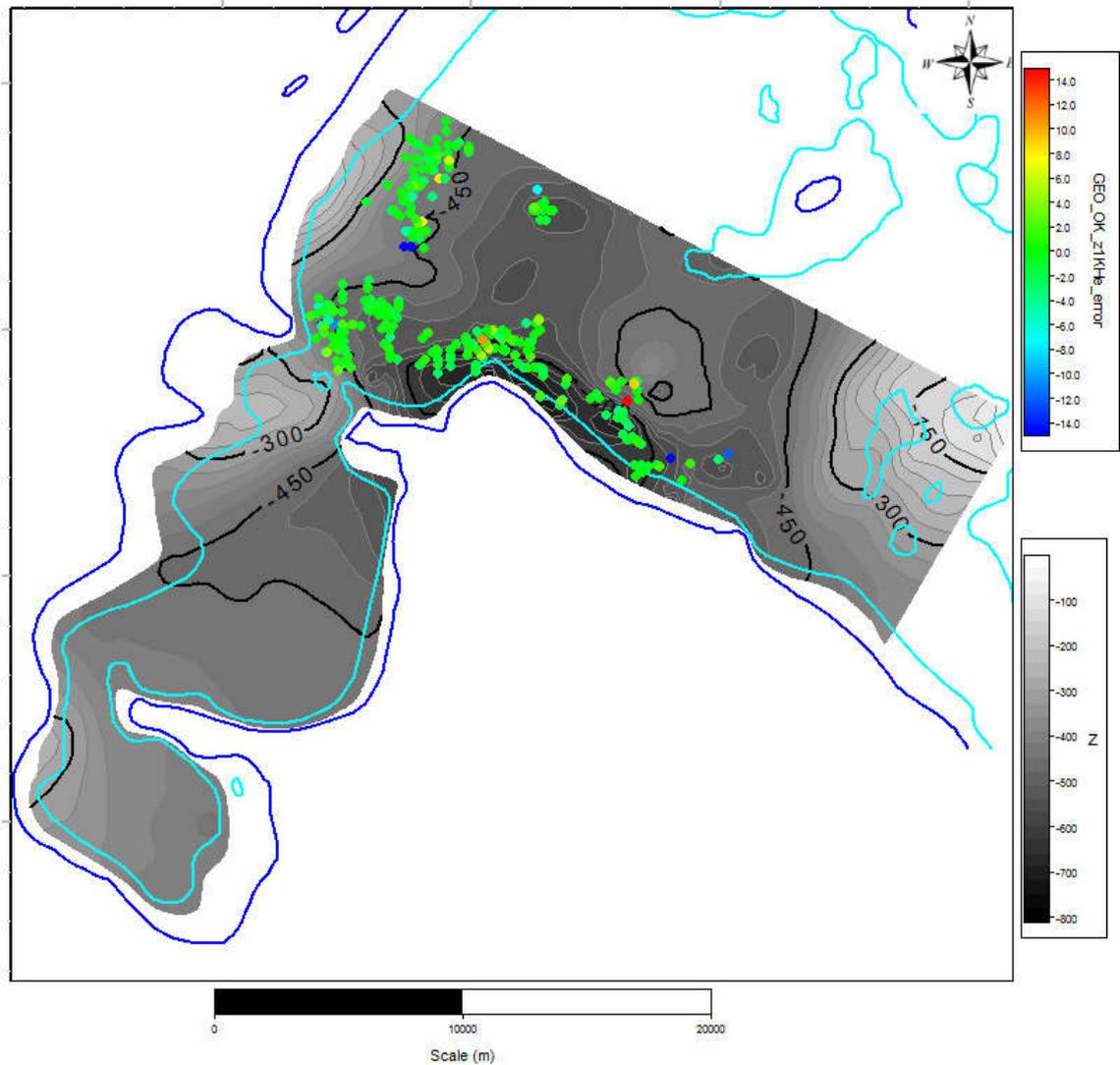


Abbildung 37 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (GEO_OK_z1KHe_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

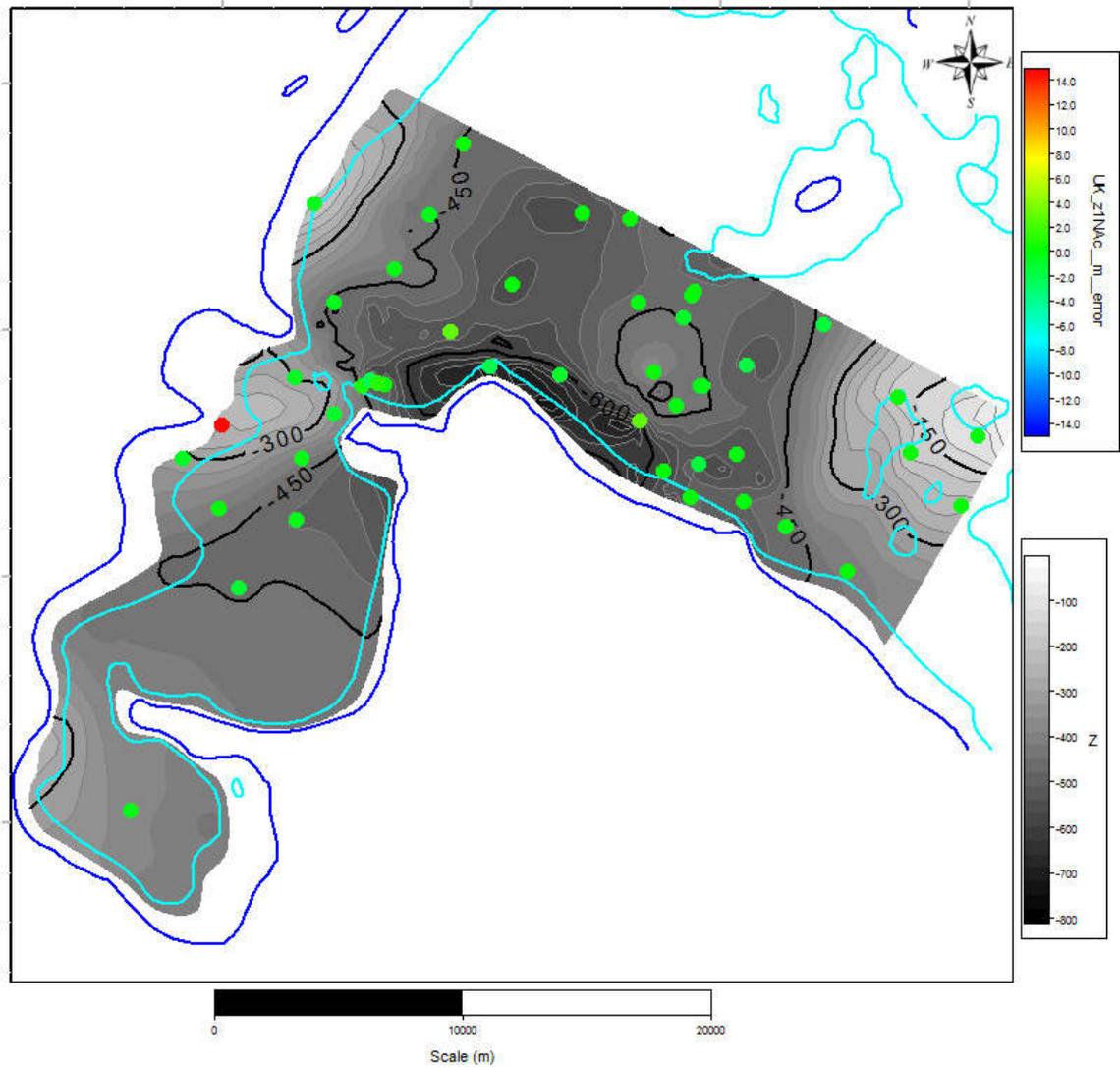


Abbildung 38 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1Nac_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

14 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Kaliflöz Hessen (z1KHe)

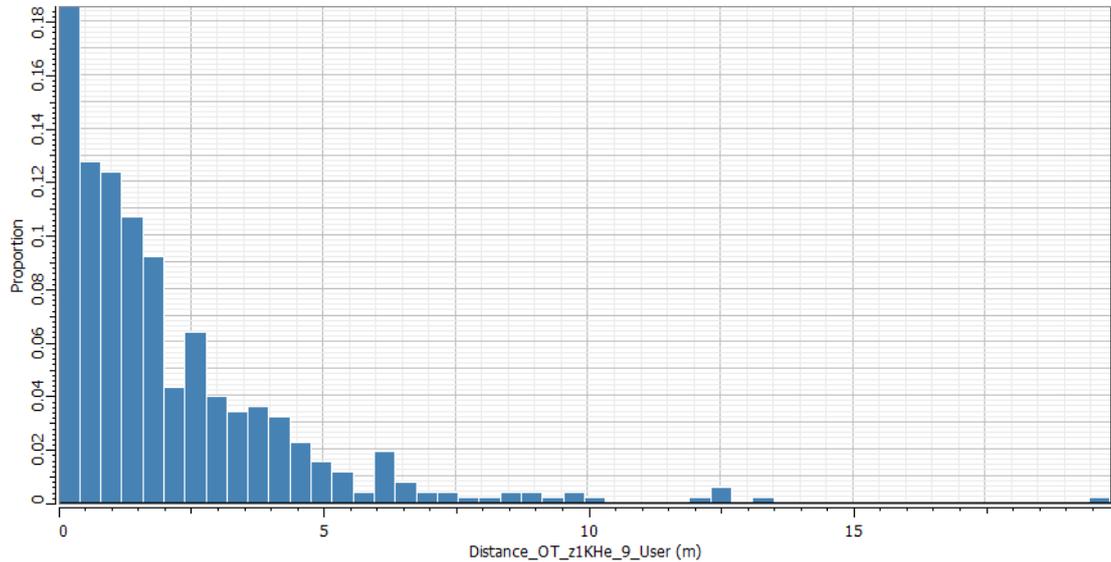


Abbildung 39 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Kaliflöz Hessen [m]

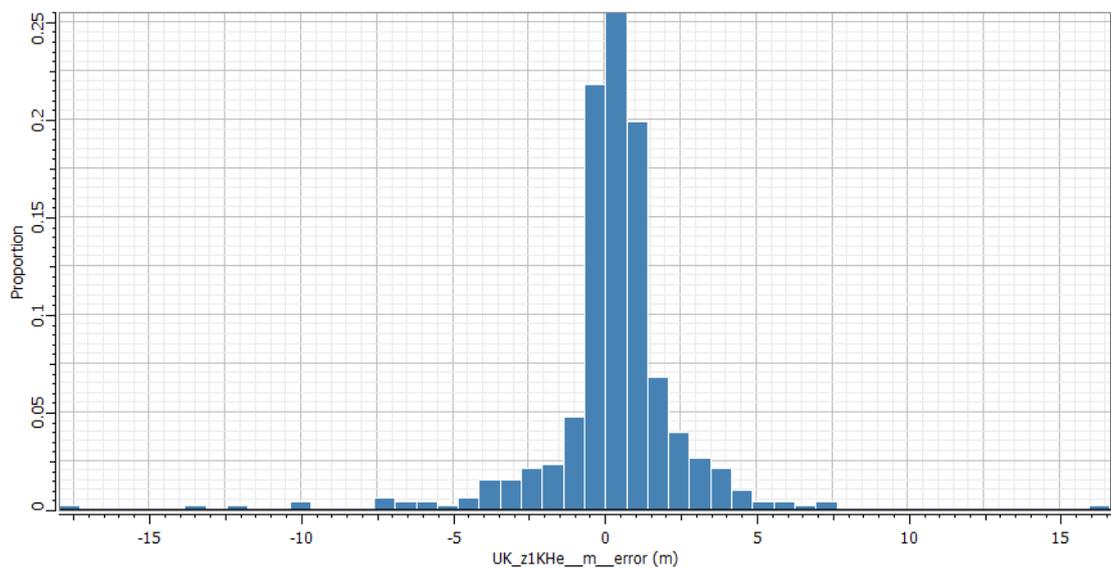


Abbildung 40 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Bohrungsdaten der Basis des Kaliflöz Hessen [m]

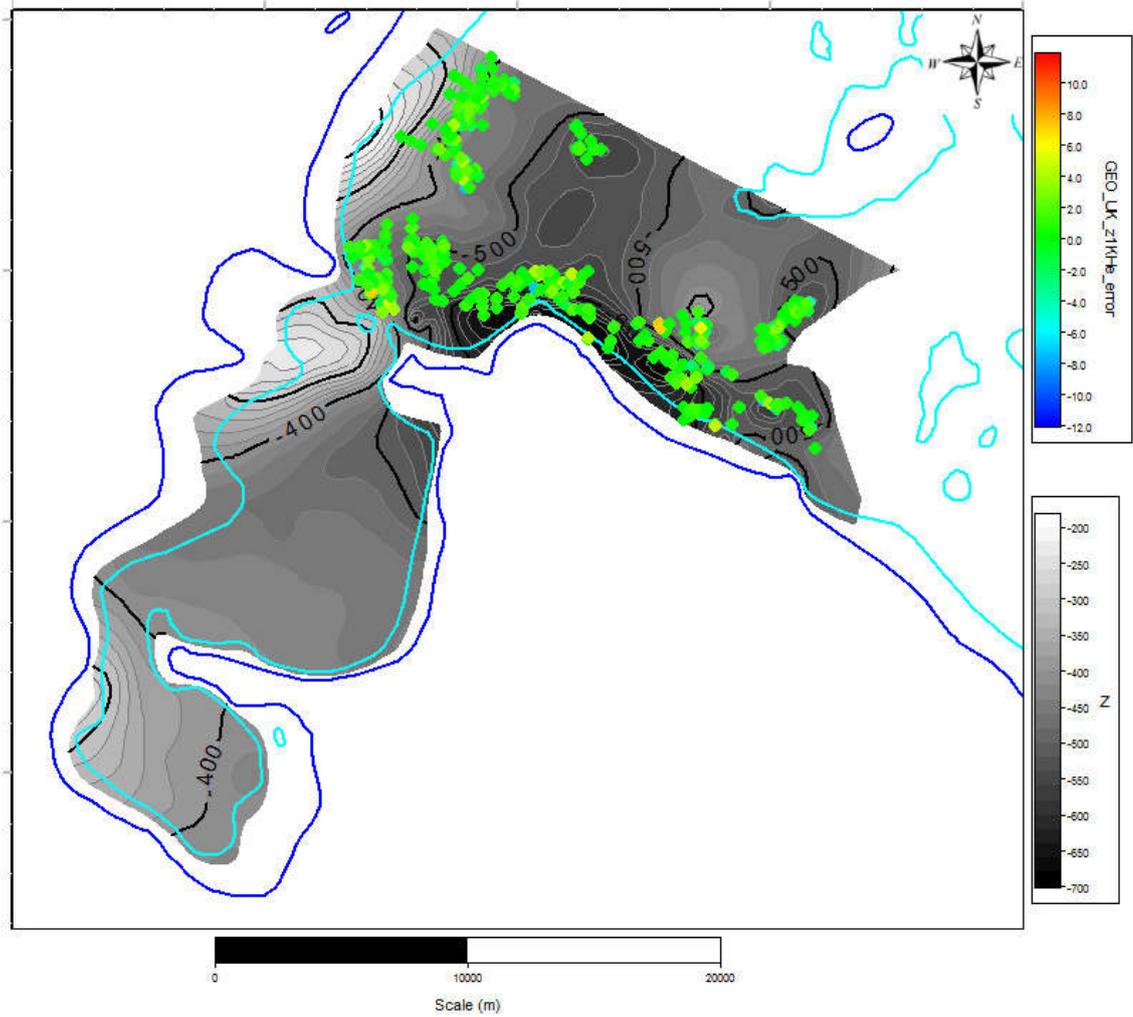


Abbildung 41 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsbohrungen (GEO_UK_z1KHe_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Kaliflözes Hessen

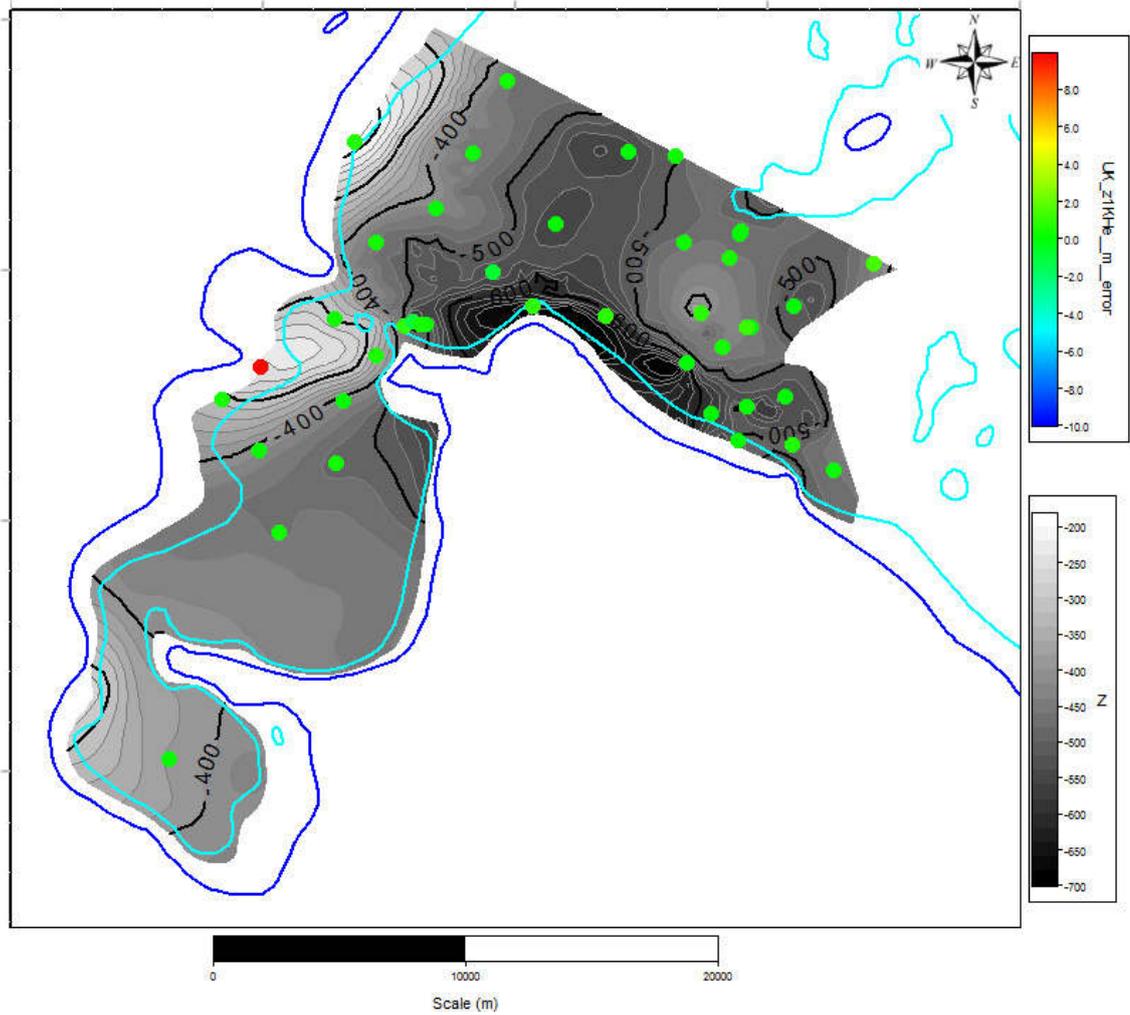


Abbildung 42 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_OK_z1KHe_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Kaliflozes Hessen (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang (untere Legende)

15 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Mittleren Werra-Steinsalz (z1NAb)

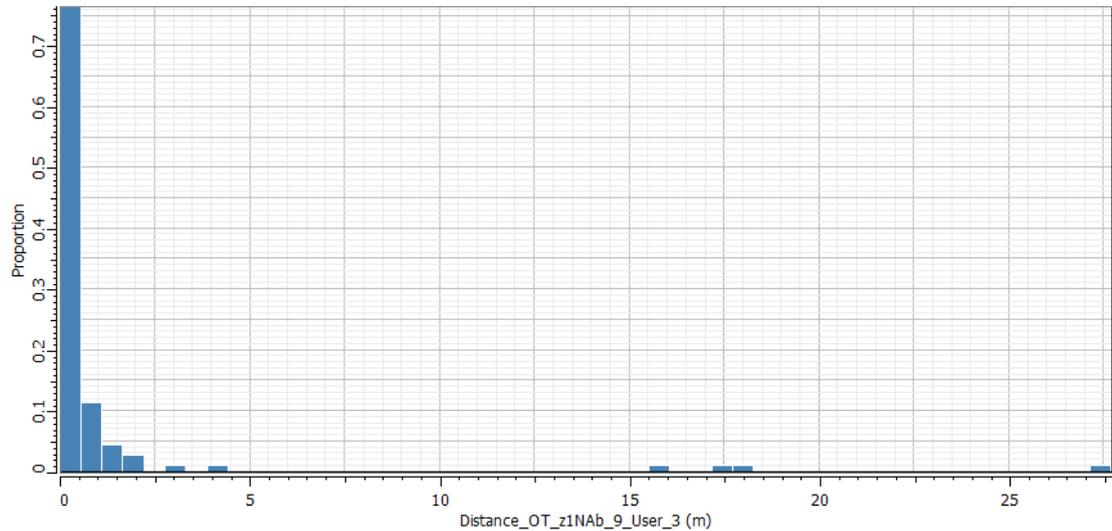


Abbildung 43 Verhältnis der Abweichung der über- und untertägigen Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Mittleren Werra-Steinsalz

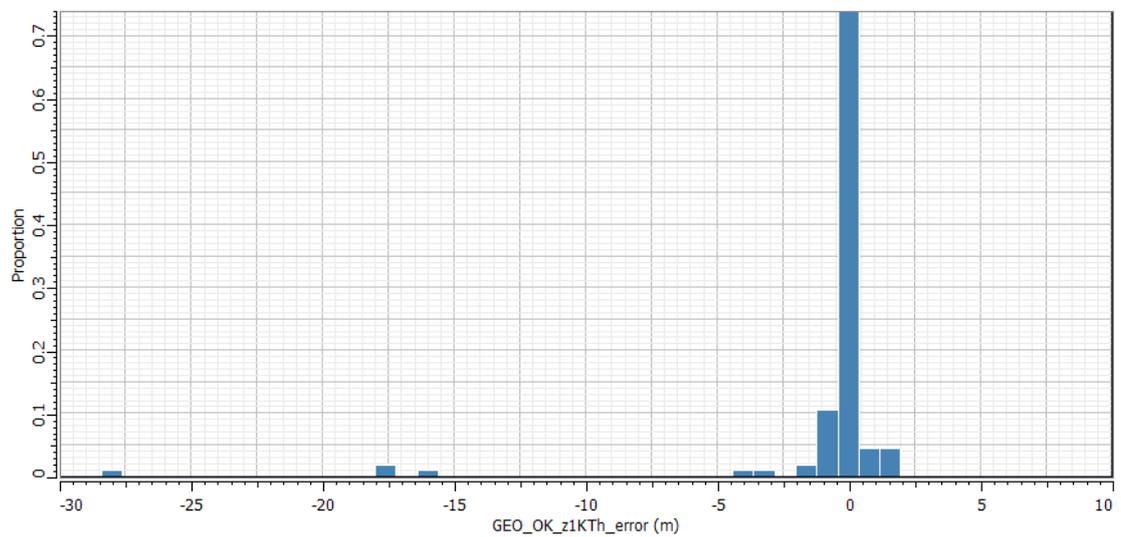


Abbildung 44 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den über- und untertägigen Bohrungsdaten der Basis des Mittleren Werra-Steinsalz [m]

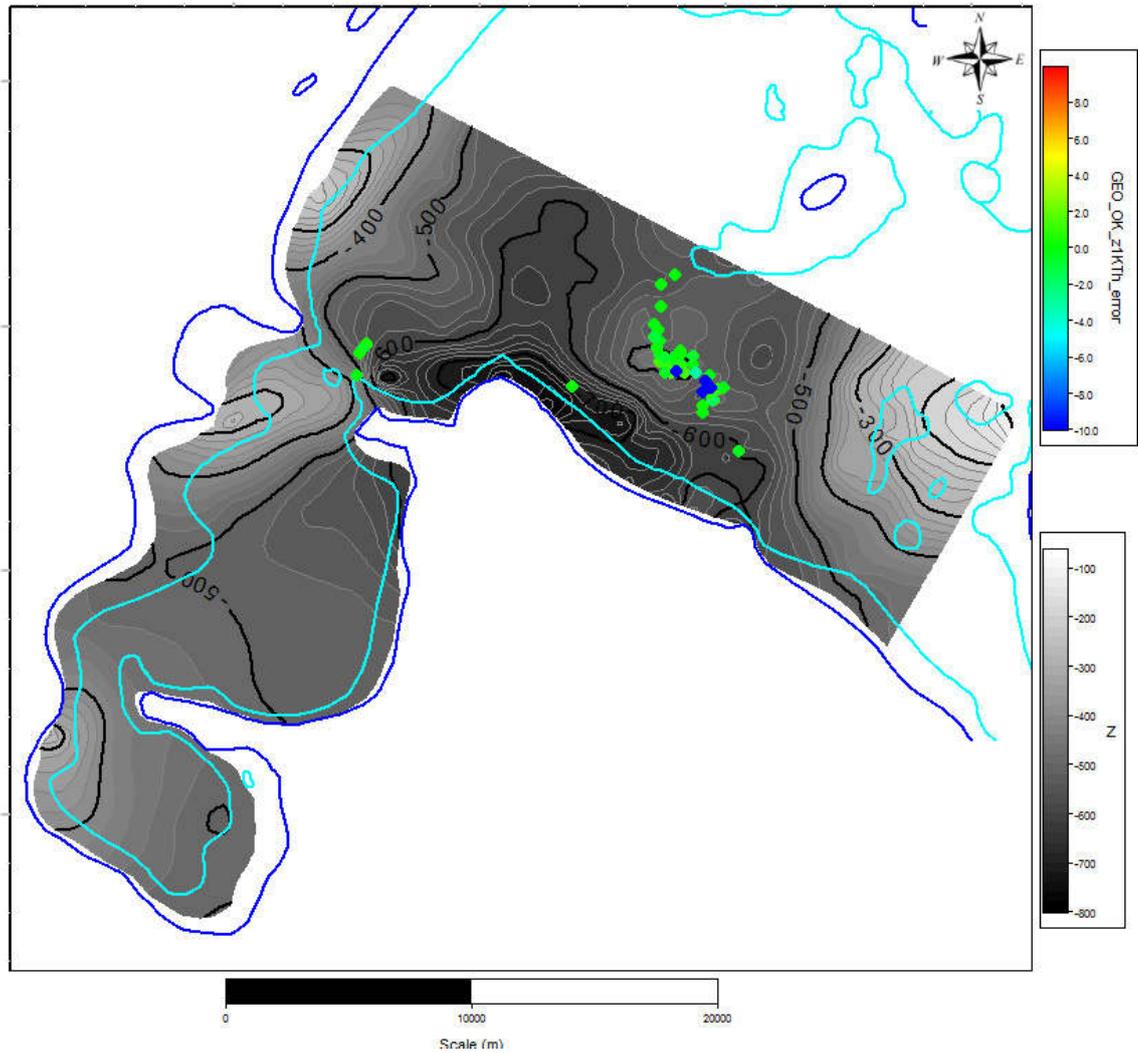


Abbildung 45 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsuntersuchungen (GEO_OK_zlKTh_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Mittleren Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

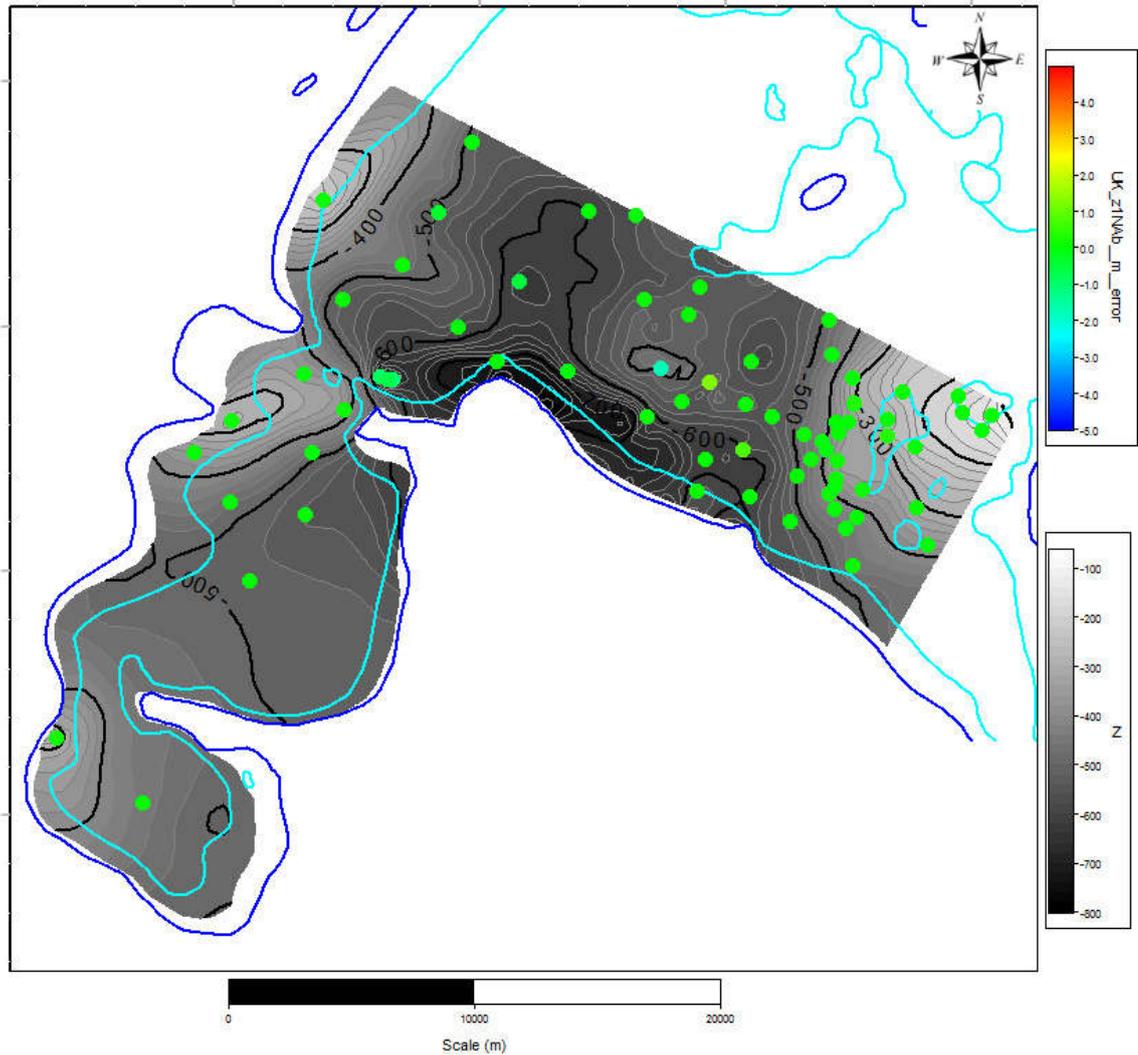


Abbildung 46 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1NAb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Mittleren Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

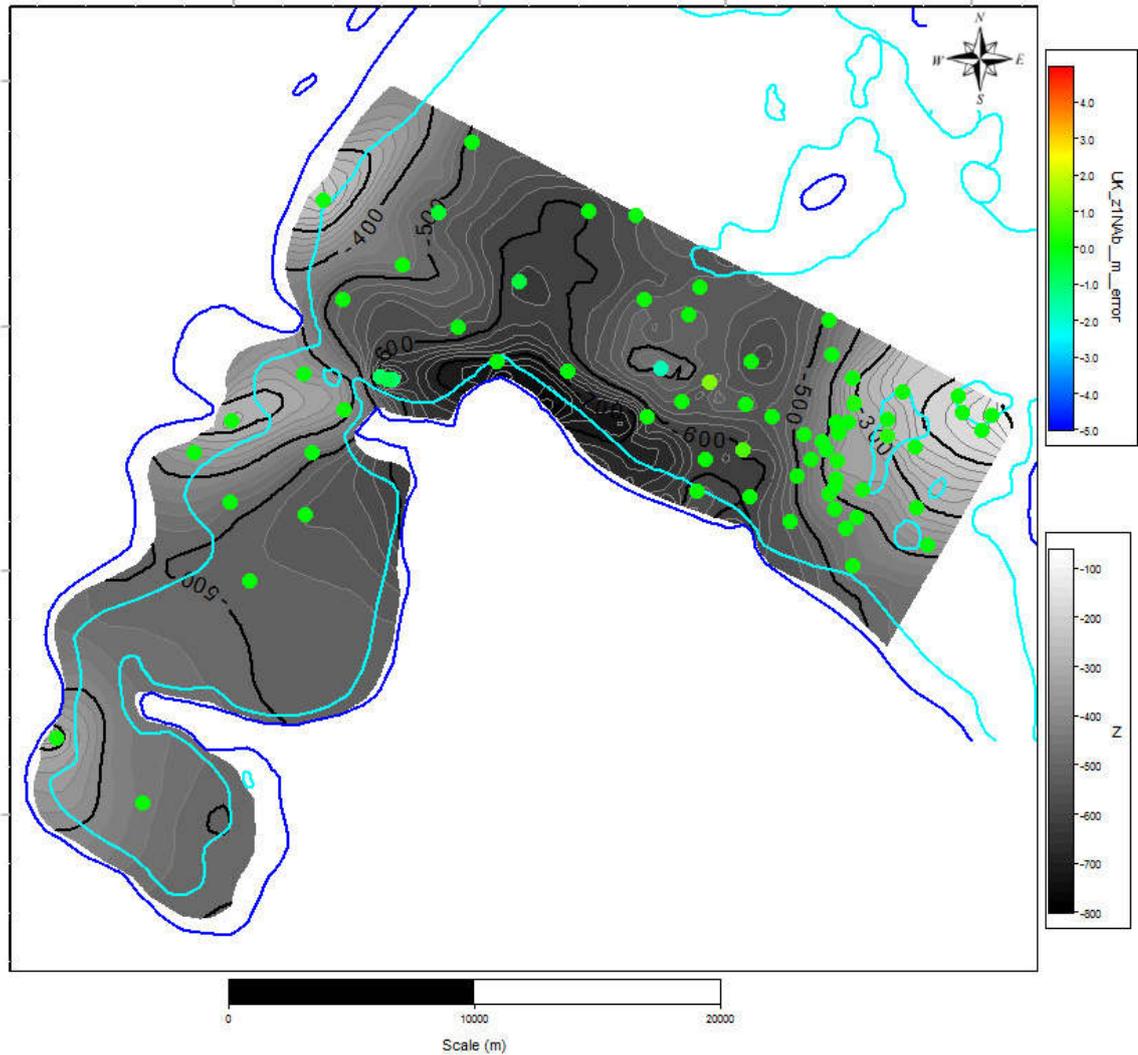


Abbildung 47 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1NAb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Mittleren Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

16 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Kaliflöz Thüringen (z1KTh)

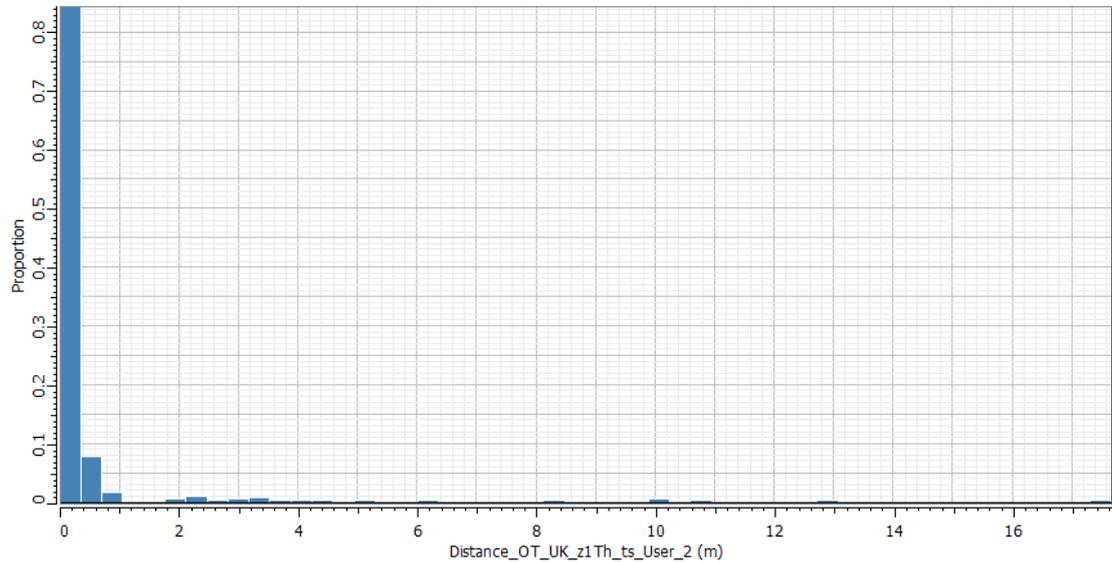


Abbildung 48 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Kaliflöz Thüringen [m]

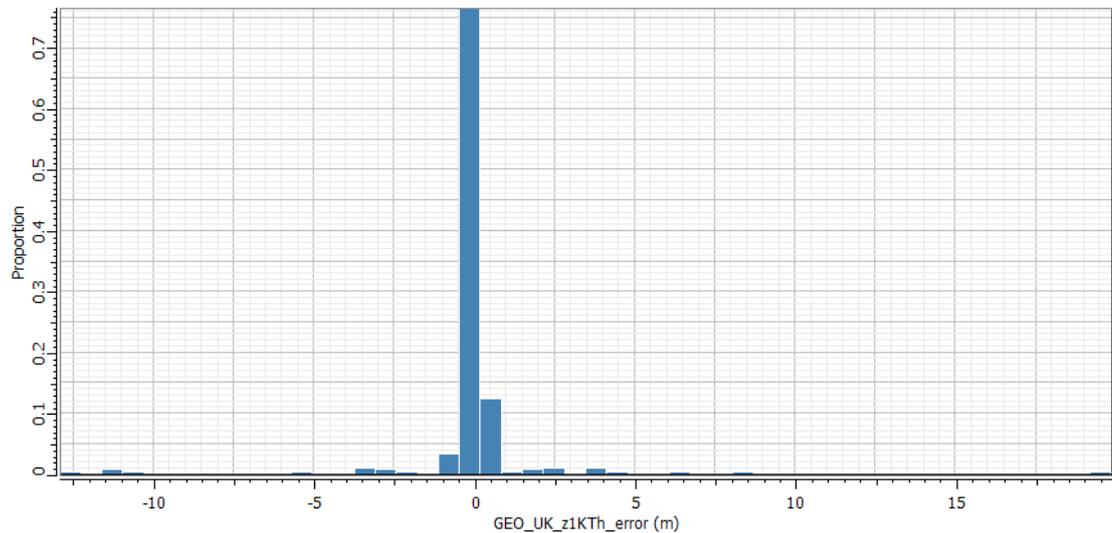


Abbildung 49 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Bohrungsdaten der Basis des Kaliflöz Thüringen [m]

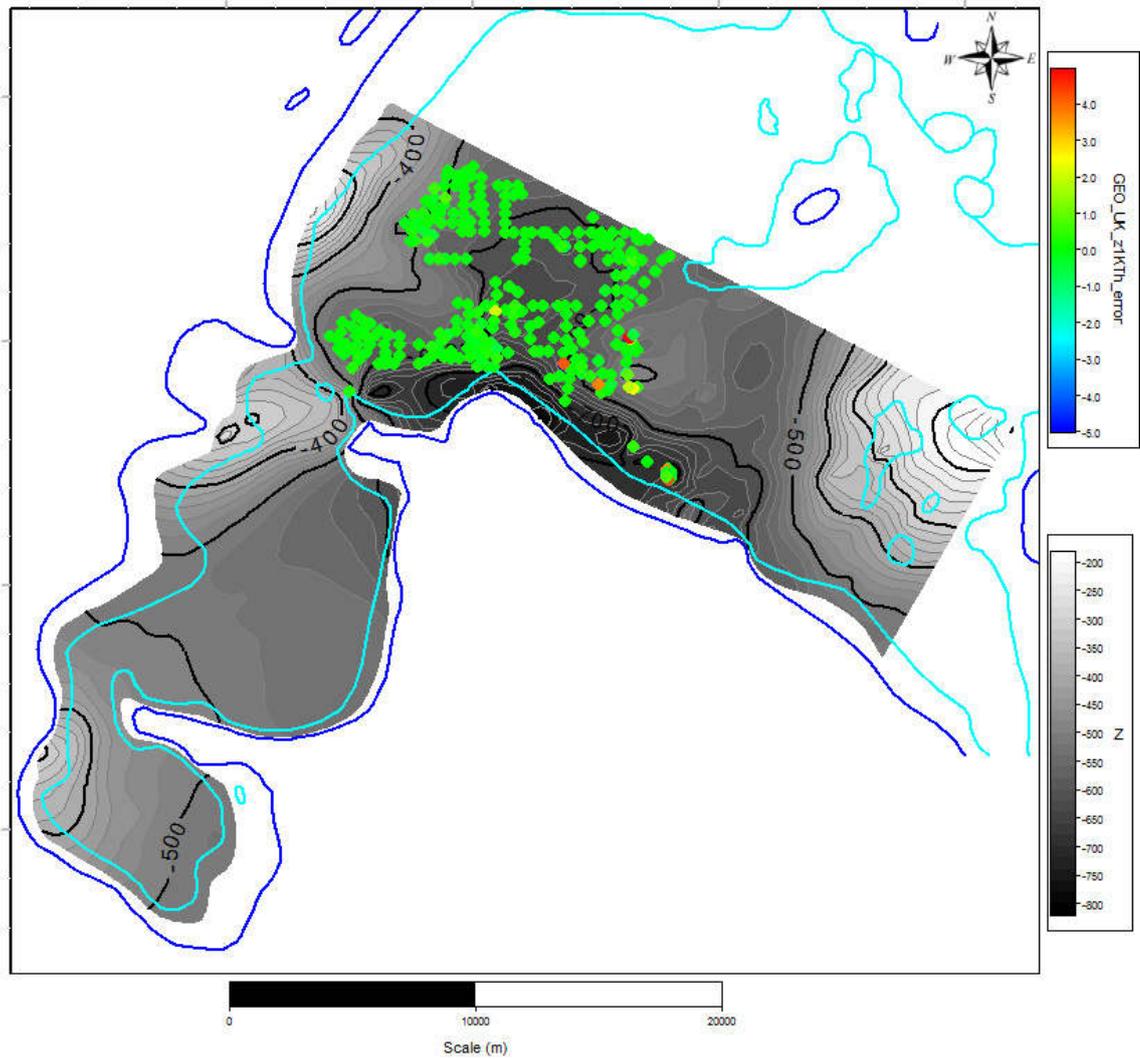


Abbildung 50 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsbohrungen (GEO_UK_z1KTh_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Kaliflöz Thüringen (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

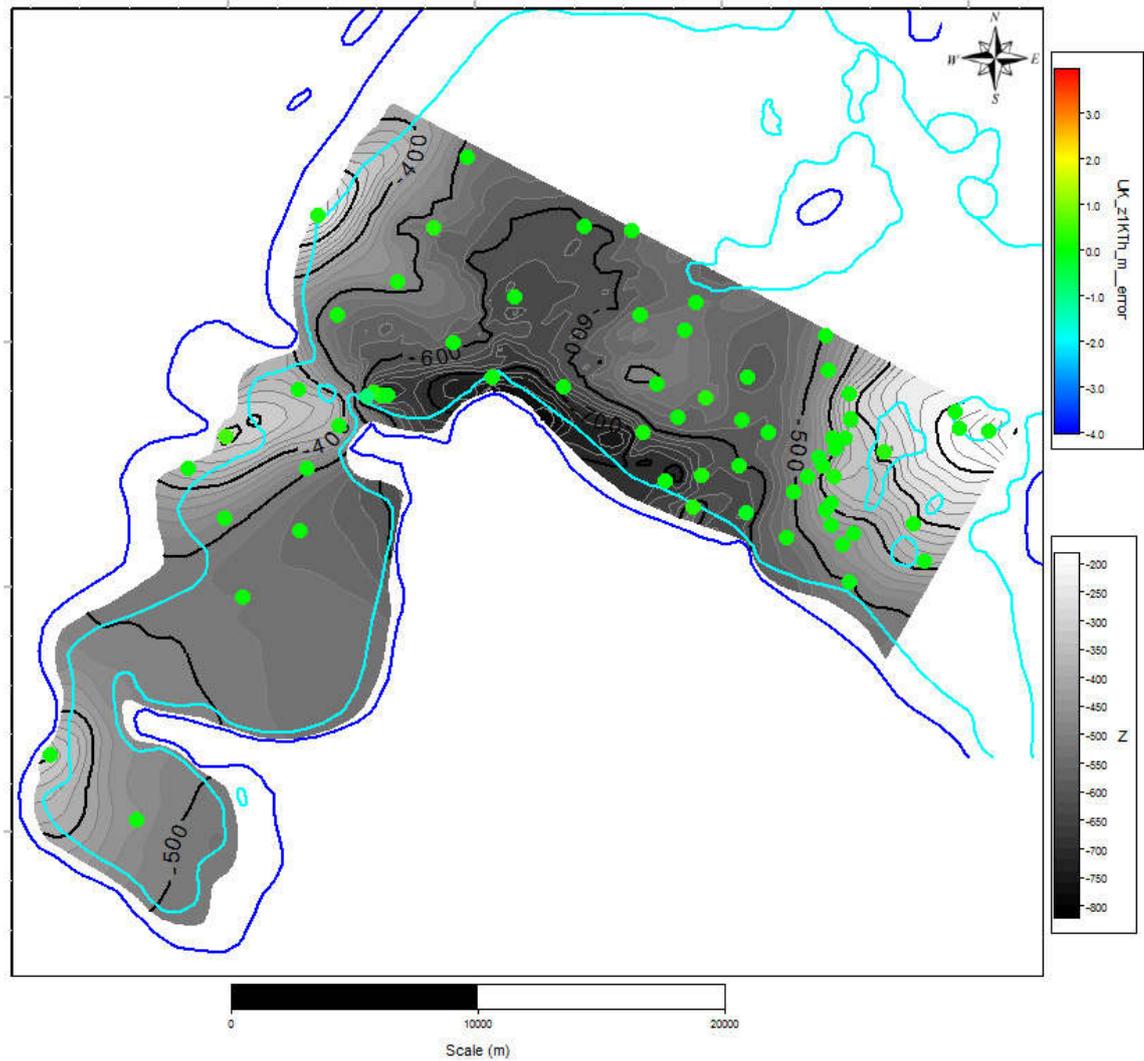


Abbildung 51 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1KTh_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Kaliflöz Thüringen (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

17 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Unteren Werra-Steinsalz (z1NAa)

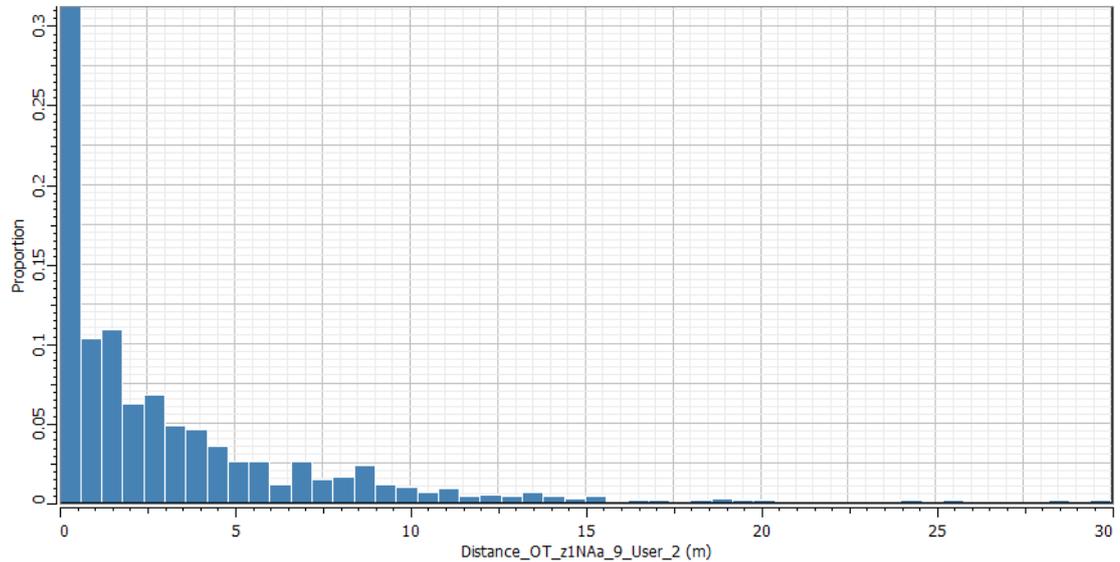


Abbildung 52 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Unteren Werra-Steinsalz

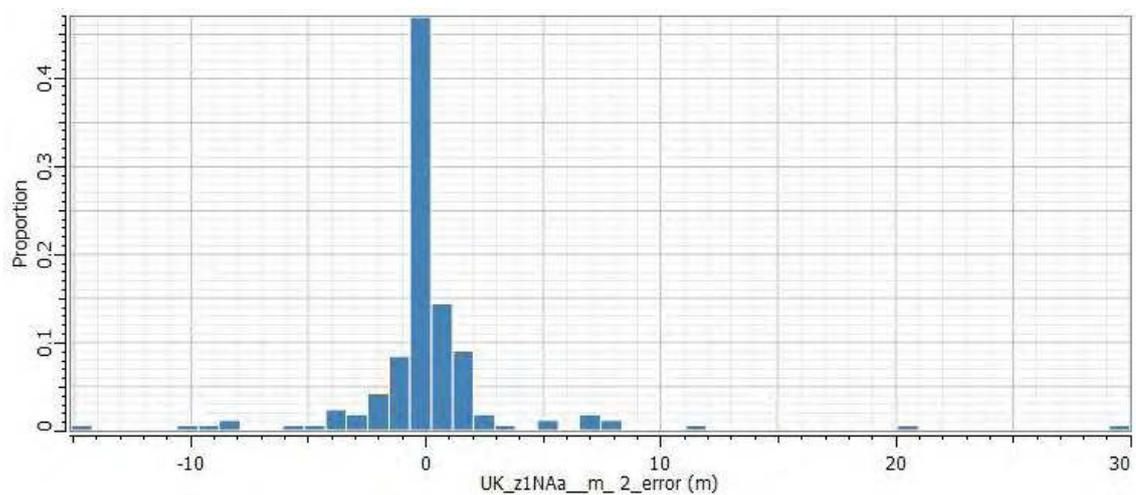


Abbildung 53 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den untertägigen Bohrungsdaten der Basis des Unteren Werra-Steinsalz [m]

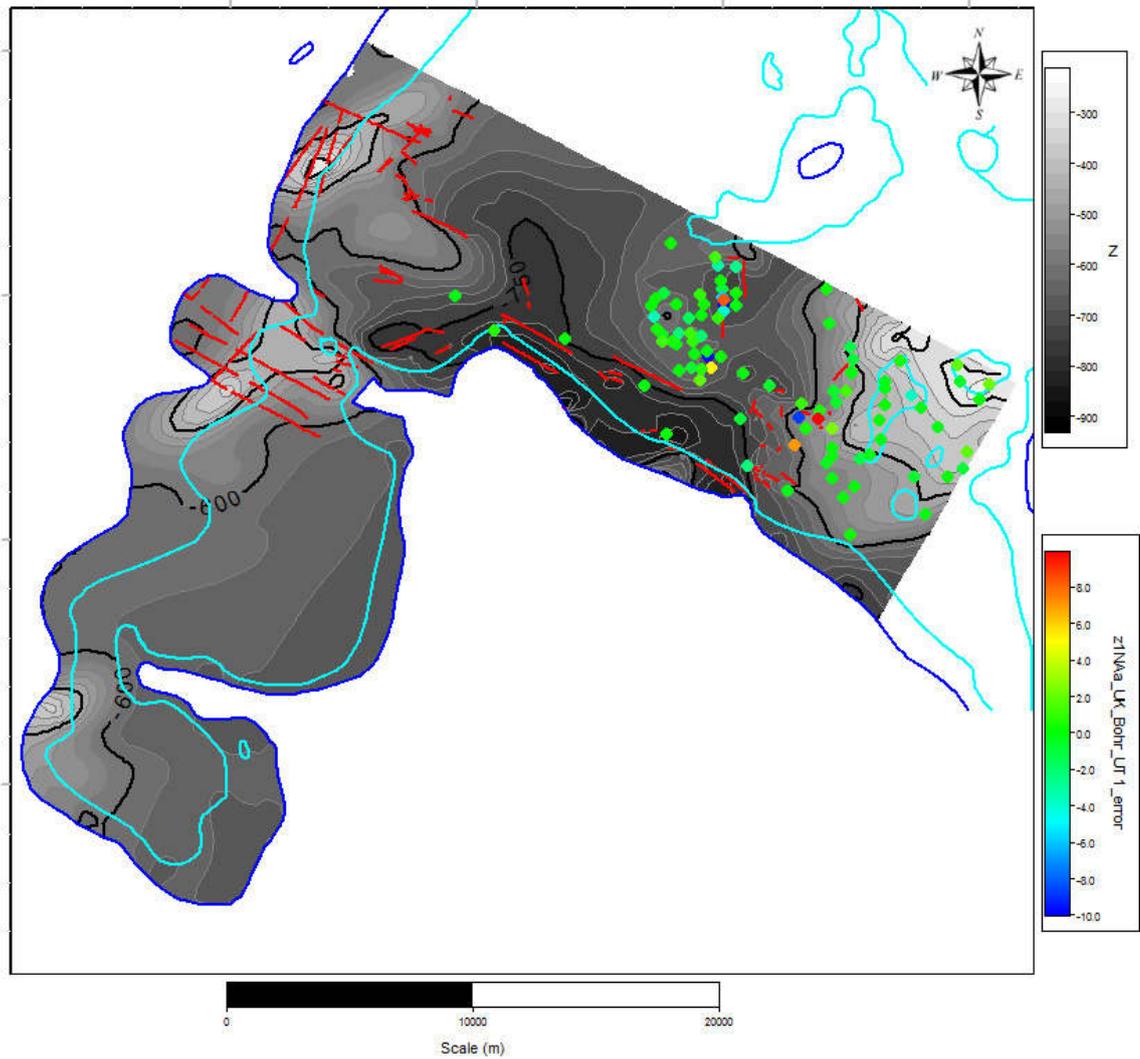


Abbildung 54 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsuntersuchungen (z1NAa_UK_Bohr_UT_error, untere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Werra-Steinsalz (obere Legende); Rot – Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

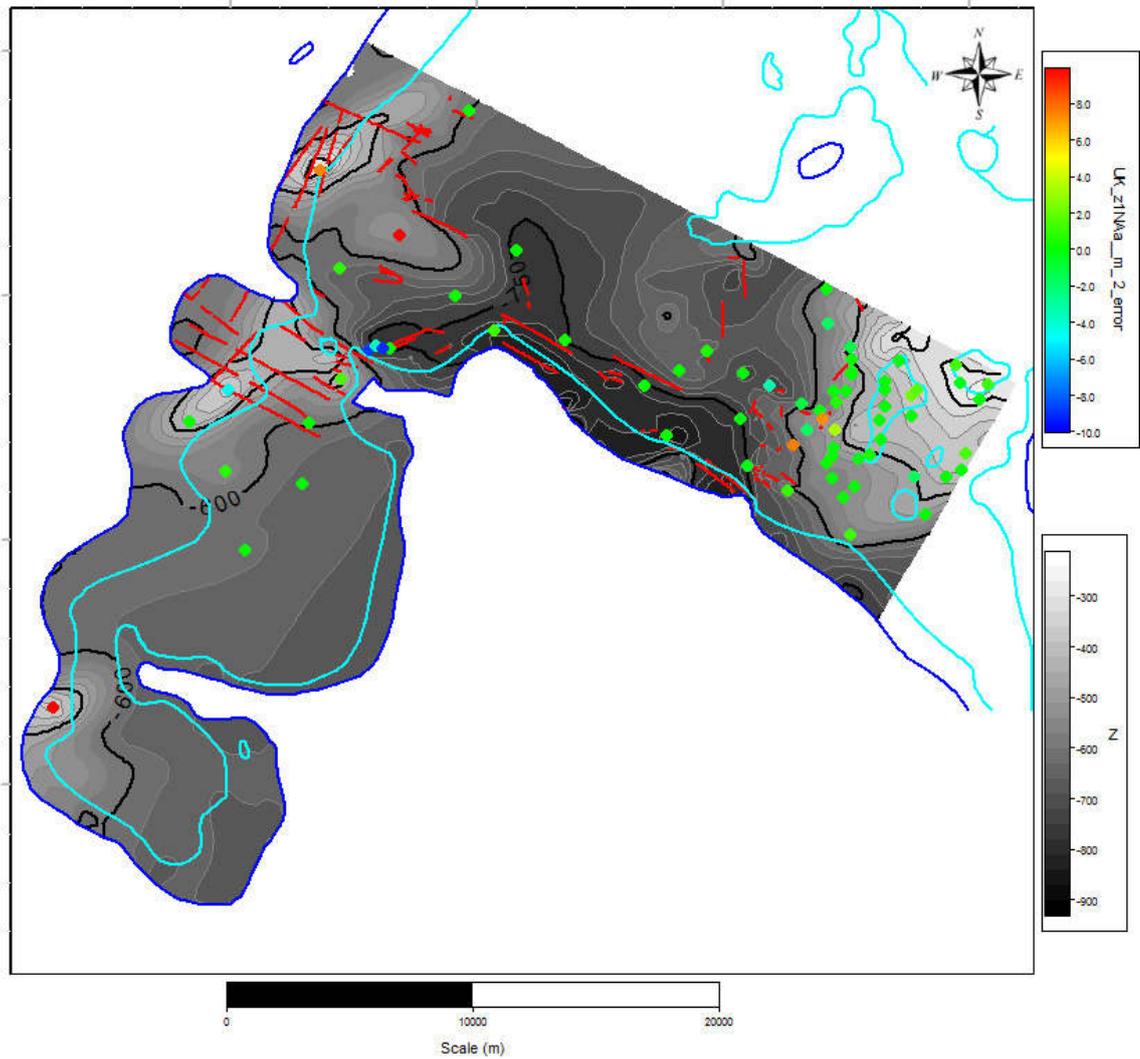


Abbildung 55 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1NAa_m_2_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Werra-Steinsalz (untere Legende); Rot – Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

18 Geostatistische Darstellung der Qualität der modellierten Fläche im Vergleich zu den Eingangsdaten – Basis des Unteren Werra-Anhydrit (z1ANa)

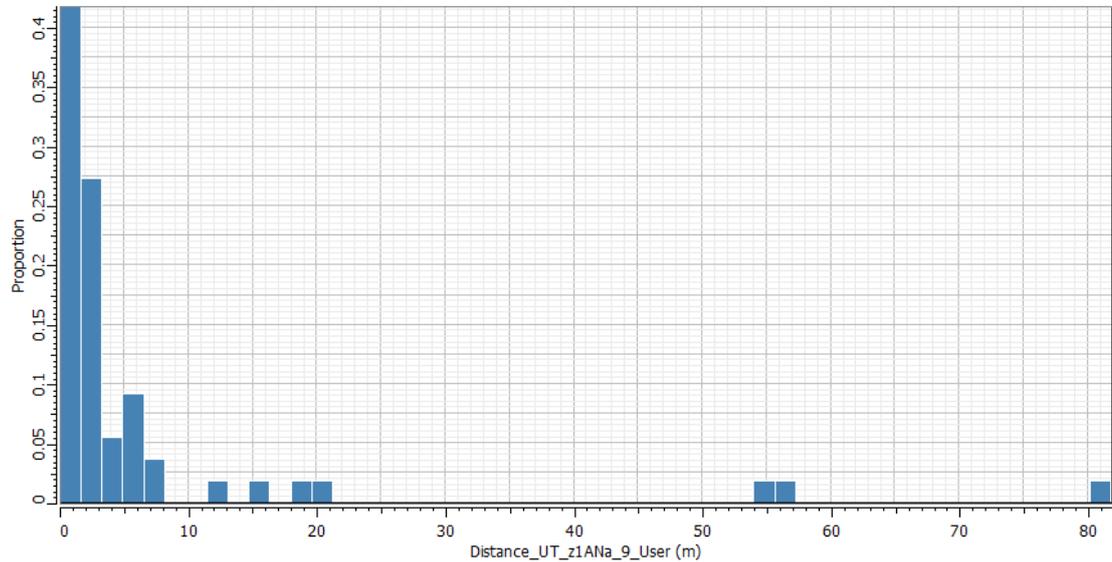


Abbildung 56 Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Unteren Werra-Anhydrit [m]

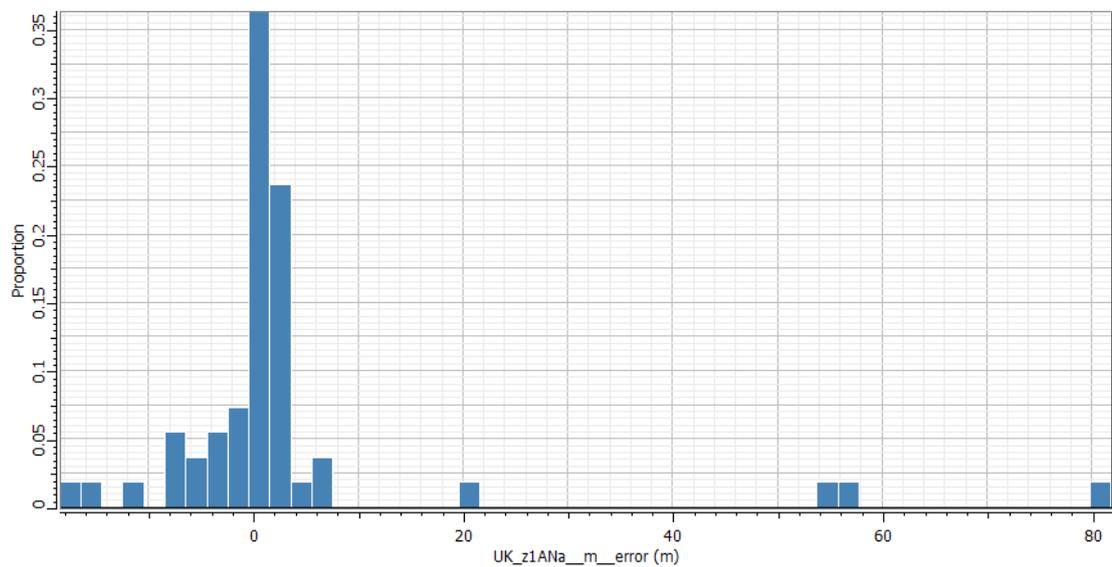


Abbildung 57 Statistische Verteilung der relativen Abweichung der modellierten Fläche von den Bohrungsdaten zur Basis des Unteren Werra-Anhydrit [m]

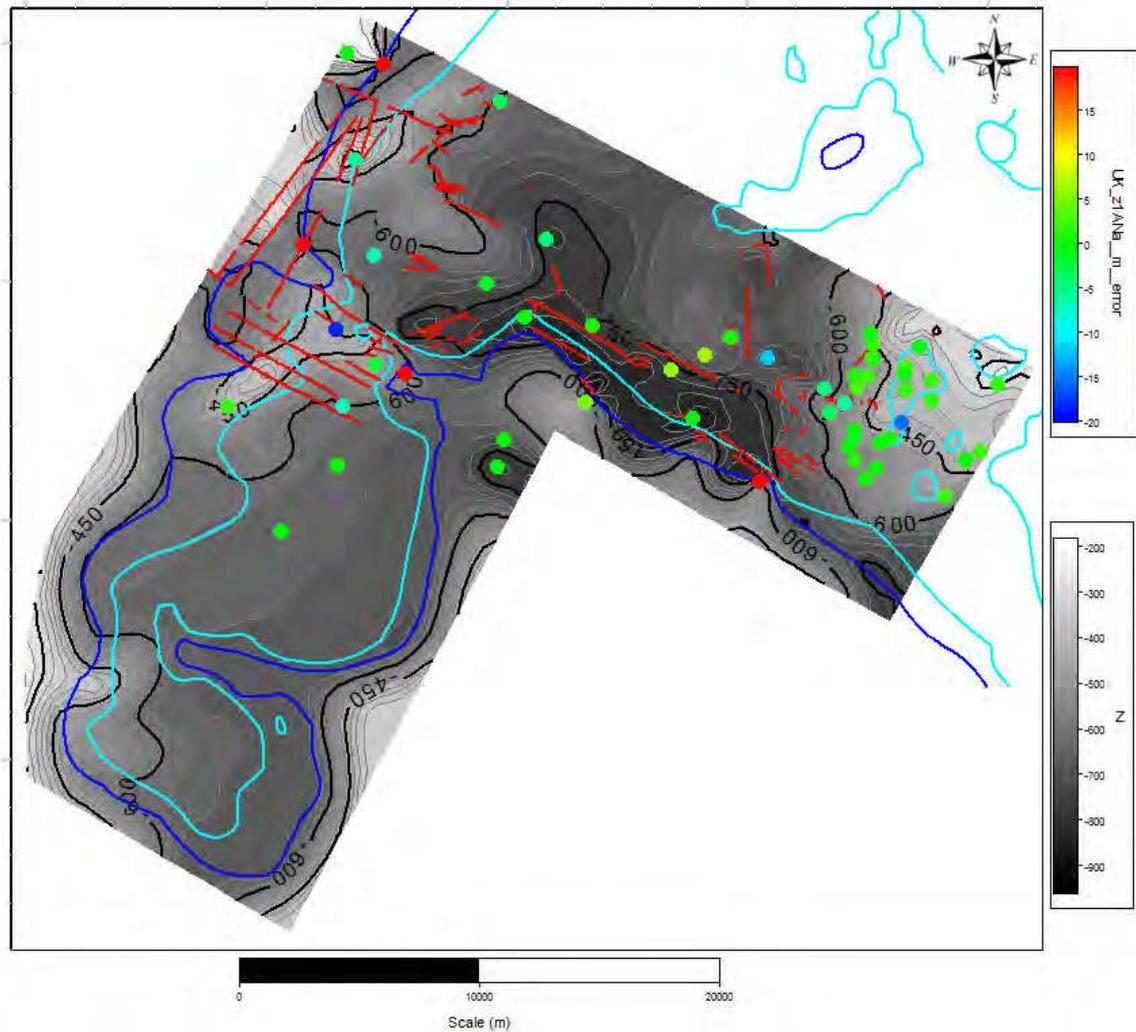


Abbildung 58 Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1ANa_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Werra-Anhydrit (untere Legende); Rot – Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Verhältnis der absoluten Abweichung der Eingangsdaten von der modellierten Fläche – GOK_HILF [m]	2
Abbildung 2	Verhältnis der relativen Abweichung der Eingangsdaten zur Fläche GOK_HILF [m]	2
Abbildung 3	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis Muschelkalk [m]	3
Abbildung 4	Relative Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis Muschelkalk [m]	3
Abbildung 5	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_mu_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Muschelkalk (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	4
Abbildung 6	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Oberen Buntsandstein [m]	5
Abbildung 7	Relative Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Oberen Buntsandstein [m]	5
Abbildung 8	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_so_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Buntsandstein (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	6
Abbildung 9	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Mittleren Buntsandstein [m]	7
Abbildung 10	Relative Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Mittleren Buntsandstein [m]	7
Abbildung 11	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_smV_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Mittleren Buntsandstein (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	8
Abbildung 12	Relative Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Unteren Buntsandstein [m]	9
Abbildung 13	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Oberen Leine-Ton [m]	10
Abbildung 14	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Oberen Leine-Ton [m]	10
Abbildung 15	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z3Tb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Leine-Ton (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	11

Abbildung 16	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Leine-Karbonat	12
Abbildung 17	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Leine-Karbonat [m]	12
Abbildung 18	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z3CA_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Leine-Karbonat (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	13
Abbildung 19	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Unteren Leine-Ton [m]	14
Abbildung 20	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Unteren Leine-Ton [m]	14
Abbildung 21	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z3Ta_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Leine-Ton (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	15
Abbildung 22	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis der Oberbank des Oberen Werra-Anhydrit [m]	16
Abbildung 23	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis Oberbank des Oberen Werra-Anhydrit [m]	16
Abbildung 24	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1ANcb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis der Oberbank des Oberen Werra-Anhydrit (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	17
Abbildung 25	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis Oberstes Werra-Steinsalz [m]	18
Abbildung 26	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Obersten Werra-Steinsalz [m]	18
Abbildung 27	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1NAd_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Obersten Werra-Steinsalz (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	19
Abbildung 28	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis der Unterbank des Oberen Werra-Anhydrit	20
Abbildung 29	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis der Unterbank des Oberen Werra-Anhydrit [m]	20
Abbildung 30	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1ANca_m_error, obere Legende) mit Bezug zur	

	Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis der Unterbank des Oberen Werra-Anhydrit (untere Legende); Rot- Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	21
Abbildung 31	Verhältnis der Abweichung aller zur Modellierung herangezogenen Eingangsdaten von der Ergebnisfläche für die Basis des Oberen Werra-Ton [m]	22
Abbildung 32	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Oberen Werra-Ton [m]	22
Abbildung 33	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsuntersuchungen (Reindaten Salztop_Arbeitsgebiet_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Werra-Ton (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	23
Abbildung 34	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1Tb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Werra-Ton (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	24
Abbildung 35	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Oberen Werra-Steinsalz	25
Abbildung 36	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Eingangsdaten der Basis des Oberen Werra-Steinsalz [m]	25
Abbildung 37	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (GEO_OK_z1KHe_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	26
Abbildung 38	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1Nac_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Oberen Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	27
Abbildung 39	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Kaliflöz Hessen [m]	28
Abbildung 40	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Bohrungsdaten der Basis des Kaliflözes Hessen [m]	28
Abbildung 41	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsbohrungen (GEO_UK_z1KHe_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Kaliflözes Hessen	29
Abbildung 42	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_OK_z1KHe_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Kaliflözes Hessen (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang (untere Legende)	30

Abbildung 43	Verhältnis der Abweichung der über- und untertägigen Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Mittleren Werra-Steinsalz	31
Abbildung 44	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den über- und untertägigen Bohrungsdaten der Basis des Mittleren Werra-Steinsalz [m]	31
Abbildung 45	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsuntersuchungen (GEO_OK_z1KTh_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Mittleren Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	32
Abbildung 46	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1NAb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Mittleren Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	33
Abbildung 47	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1NAb_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Mittleren Werra-Steinsalz (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	34
Abbildung 48	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Kaliflöz Thüringen [m]	35
Abbildung 49	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den Bohrungsdaten der Basis des Kaliflöz Thüringen [m]	35
Abbildung 50	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsbohrungen (GEO_UK_z1KTh_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Kaliflöz Thüringen (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	36
Abbildung 51	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1KTh_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Kaliflöz Thüringen (untere Legende); Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	37
Abbildung 52	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Unteren Werra-Steinsalz	38
Abbildung 53	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der Fläche von den untertägigen Bohrungsdaten der Basis des Unteren Werra-Steinsalz [m]	38
Abbildung 54	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den untertägigen Erkundungsuntersuchungen (z1NAa_UK_Bohr_UT_error, untere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Werra-Steinsalz (obere Legende); Rot – Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	39

Abbildung 55	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1NAa_m_2_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Werra-Steinsalz (untere Legende); Rot – Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	40
Abbildung 56	Verhältnis der Abweichung der Bohrungsdaten von der modellierten Fläche für die Basis des Unteren Werra-Anhydrit [m]	41
Abbildung 57	Statistische Verteilung der relativen Abweichung der modellierten Fläche von den Bohrungsdaten zur Basis des Unteren Werra-Anhydrit [m]	41
Abbildung 58	Relative Abweichung [m] der modellierten Fläche von den Eingangsdaten aus den übertägigen Erkundungsbohrungen (UK_z1ANa_m_error, obere Legende) mit Bezug zur Isobathenkarte (Tiefe in m NN) der Basis des Unteren Werra-Anhydrit (untere Legende); Rot – Störungen, Blau – äußerer Salzhang, Cyan – innerer Salzhang	42