

Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie (Koordination)
K-UTEC Salt Technologies AG, Sondershausen
Dr. A. Schwandt, Erfurt

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Dresden

Abschlussbericht

Universelles integriertes geophysikalisches Mess- und Auswerteinstrumentarium zur Charakterisierung von Problemzonen im Salinar

Forschungsverbundprojekte:

02 C 1305 Geologie, Geoelektrik, Seismik und Szenarienmodellierung
(Projektleiter: Prof. Dr. W. Ehrmann, Universität Leipzig)

02 C 1315 Elektromagnetik, Georadar und Quantitative Charakterisierung von
Problemzonen
(Projektleiter: Dr. R. Ziekur, LIAG Hannover)

02 C 1325 Sonarverfahren
(Projektleiter: Dr. H. Kühnicke, IZFP Dresden)

Laufzeit: 01.06.2005 – 31.10.2008

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den oben genannten Förderkennzeichen gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Bearbeiter:

C. Schütze, A. Just, C. Rücker, U. Serfling, H. Zöllner, K. Matthes, F. Jacobs, W. Ehrmann
(Uni Leipzig)

Th. Schicht (K-UTEC AG Sondershausen)

A. Schwandt (Erfurt)

S. Uchtmann, B. Ehret, Th. Wonik, R. Ziekur (LIAG Hannover)

E. Schulze, H. Kühnicke (IZFP Dresden)

Leipzig, April 2009

Inhaltsverzeichnis

	Einleitung	5
1	Geologie und Charakterisierung der Untersuchungsstandorte	9
1.1	Geologisch-bergbauliche Situation an den Untersuchungsstandorten Sollstedt (A), Teutschenthal (B) und Sigmundshall (C)	9
1.1.1	Erkundungs- und Erkenntnisstand	11
1.1.2	Allgemeine geologische Situation	12
1.1.3	Geologische und hydrogeologische Verhältnisse	15
1.2	Auswahl und Charakterisierung der Referenzstandorte	18
1.3	Literatur	19
2	Geoelektrik und Seismik	21
2.1	Geoelektrische Untertagemessungen	21
2.1.1	Messprinzipien und Messtechnologie	21
2.1.2	Messkampagnen an den Untersuchungsstandorten	22
2.1.3	Datengewinnung, Datenbearbeitung und Inversion	23
2.1.4	Ergebnisse der geoelektrischen Messungen	26
2.1.5	Methodische Untersuchungen am Referenzstandort Teutschenthal	34
2.1.5.1	Wiederholungsmessungen zur Feststellung der Reproduzierbarkeit geoelektrischer Messungen	34
2.1.5.2	Machbarkeitsstudie: Geoelektrische Deckgebirgserkundung mittels Übertage-Untertage-Gleichstromgeoelektrik	41
2.1.6	Zusammenfassung Geoelektrik	43
2.2	Labormessungen an Probenmaterial der Referenzstandorte	44
2.2.1	Wassergehaltsbestimmung mit dem Karl-Fischer-Verfahren	44
2.2.2	Simultane Karl-Fischer-Wassergehalts- und Widerstandsmessungen	45
2.2.3	Wassergehalt und Dichte von Proben vom Referenzstandort Sollstedt	46
2.2.4	Wassergehalt und Dichte von Proben aus dem Stoß der Verbindungsstrecke Teutschenthal - Angersdorf	47
2.3	FEM-Modellierungen zu den Referenzmessorten	52
2.3.1	Erstellung synthetischer Grubenmodelle mit DCFEMLib	53
2.3.2	Systematische Untersuchungen zu untertägigen Erkundungssituationen (Szenarienmodellierung)	54
2.4	Seismische Untertagemessungen	62
2.4.1	Messprinzipien und Messtechnologie	62
2.4.2	Technische Ausstattung und Messkonfigurationen	62
2.4.3	Messkampagnen an den Referenzstandorten	64
2.4.4	Datenprozessing	65
2.4.5	Messdaten	67
2.4.6	Ergebnisse der seismischen Untersuchungen	71
2.4.7	Seismischer Quellentest	78
2.4.8	Zusammenfassung zu den seismischen Untersuchungen	81
2.5	Literatur	82

3	Elektromagnetik und Georadar	84
3.1	Elektromagnetik – Untertagemessungen	84
3.1.1	Messprinzipien und Messtechnologie	84
3.1.2	Messkampagnen an den Untersuchungsstandorten	85
3.1.3	Datenbearbeitung und Auswertung	86
3.1.4	Ergebnisse der elektromagnetischen Messungen	86
3.1.5	Zusammenfassung Elektromagnetik	89
3.2	Georadar – Untertagemessungen	90
3.2.1	Messprinzipien und Messtechnologie	90
3.2.2	Messkampagnen an den Untersuchungsstandorten	93
3.2.2.1	Vorerkundungen zur Festlegung der Referenzstandorte	94
3.2.2.2	Messungen auf den Referenzprofilen	95
3.2.3	Datenbearbeitung und Auswertung	96
3.2.3.1	Datenbearbeitung	97
3.2.3.2	Auswertung der Constant-Offset Daten	97
3.2.3.3	Auswertung der CMP-Daten	101
3.2.3.4	Auswertung der Multi-Offset-Messungen	102
3.2.4	Ergebnisse der Georadarmessungen	104
3.2.5	Zusammenfassung Georadar	105
3.3	Literatur	106
4	Sonarverfahren	108
4.1	Geosonar: Messprinzipien und Messtechnologie	108
4.2	Entwicklung hochempfindlicher niederfrequenter Ultraschallaufnehmer	109
4.3	Entwicklung bergbautauglicher Sonar-Messtechnik	111
4.4	Messkampagnen, Parametergewinnung	112
4.5	Datenbearbeitung, Modellrechnungen und Weiterentwicklung der Rekonstruktionsverfahren	117
4.6	Ergebnisse der Geosonarmessungen	124
	Standort A - Sollstedt	
	Standort B - Teutschenthal	
	Standort C Sigmundshall (Ergänzungsmessungen)	
	Standort D - Bischofferode (Neubearbeitung der Sonardaten)	
4.7	Zusammenfassung Geosonar	139
4.8	Literatur	140
5	Komplexe Auswertung und Interpretation	142
5.1	Geophysikalische Modelle	142
5.1.1	Datenbestand zu Messanordnungen und Profilanlagen an den Referenzstandorten	142
5.1.2	Geologisch-Geophysikalische Modelle aus der integrierten Analyse und Charakterisierung von Problemzonen	146
5.2	Mathematisch-statistische Verfahren zur Problemanalyse	156
5.2.1	Anomaliekriterien/-koeffizienten (AK) und Problemindices (PI)	157
5.2.1.1	Verfahrenspezifische geophysikalische Anomaliekriterien/-koeffizienten (Georadar, Seismik, Geosonar, Geoelektrik)	157
5.2.1.1.1	Anomaliekriterien Sollstedt	158
5.2.1.1.2	Anomaliekriterien Teutschenthal	166

5.2.1.2	Integrierte statistische Problemindices	169
5.2.2	Anwendung der Lerntheorie zur Ermittlung von Problemzonen	171
5.2.2.1	Mustererkennung	171
5.2.2.2	Support-Vektor-Maschinen (SVM)	173
5.2.2.3	Künstliche Neuronale Netze (ANN)	175
5.2.2.4	Modellrechnungen (SVM und ANN)	176
5.2.3	Quantitative Charakterisierung von Problemzonen an Referenzstandorten mittels multivariater Lernmethoden	180
5.2.3.1	Ergebnisse Sollstedt	180
5.2.3.2	Ergebnisse Teutschenthal	184
5.2.3.3	Ergebnisvergleich Teutschenthal	188
5.2.4	Standorte der Projektphasen Salinargeophysik I und II (Bischofferode, Sigmundshall) – Anwendung SVM	189
5.2.4.1	Standort Bischofferode (Messungen Firste)	189
5.2.4.2	Standort Sigmundshall	190
5.2.5	Zusammenfassung der statistischen Charakterisierung von Problemzonen	191
5.3	Literatur	192
6	Zusammenfassung und Ausblick	194
A	Anhang	201

Einleitung

Das Sicherheitskonzept für die geordnete Beseitigung sowohl von chemisch-toxischen als auch weitgehend von radioaktiven Abfällen sieht die **Entsorgung** bzw. Endlagerung dieser Schadstoffe in tiefen geologischen Formationen innerhalb Deutschlands vor. Als mögliches Wirtsgestein der dafür nötigen Untertagedeponien (UTD), Untertageversatzbergwerke (UTV) und/oder Endlagerbauwerke stehen Steinsalzformationen (Salinargesteine) im Mittelpunkt der Forschung und Erkundung.

Salinargesteine mit dem bis zu 800 m mächtigen Staßfurtsteinsalz des Zechsteins sind in ehemaligen oder noch in Betrieb befindlichen Grubenbauten des Salz- und Kalibergbaues mit umfangreichen untertägigen Auffahrungen aufgeschlossen. Die Bergwerke sind geeignet, gezielte Untersuchungen der Wirksamkeit von **Multibarrieresystemen** aus technischen, geotechnischen und geologischen Komponenten zur Vermeidung von Kontaminationen der Umgebung durchzuführen.

Das Multibarrieresystem muss die Sicherheit von Untertagedeponien und Endlagern sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit) gewährleisten. **Problemzonen** in der geologischen Barriere, wie z. B. tektonische Störungszonen, lithologisch vorgeprägte Schwächezonen und Strukturelemente, Kluftzonen, Laugentaschen, Feuchtezonen und Schichtgrenzen sowie bergbaulich bedingte Auflockerungszonen können die Barrierewirksamkeit beeinträchtigen. Insbesondere ist sie durch Salzlösungsvorkommen und Bereiche erhöhter Fluidwegsamkeit gefährdet.

Die Detektion solcher Problemzonen sowie ihre möglichst genaue Vermessung und Bewertung sind wichtige Voraussetzungen für detaillierte Planungen und qualifizierte Langzeitsicherheitsnachweise für Untertagedeponien und Endlager, insbesondere zur nachsorge- bzw. wartungsfreien Erfüllung der Isolationsfunktion von untertägigen Entsorgungseinrichtungen. Da eine Beschädigung des barrierewirksamen Gebirgsbereiches ausgeschlossen werden muss, ist zur Bewertung der Sicherheit der geologischen Barriere ihre räumliche Erkundung ins Unverritzte mit zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden zwingend erforderlich. Dazu sind Verfahren der **Geophysik** grundsätzlich geeignet. Es ist weiterhin zu beachten, dass auch bei der Auffahrung von Strecken und Einlagerungshohlräumen erstmals Bereiche bergmännisch

erschlossen werden, deren genauer geologischer Aufbau nur über eine begrenzte Anzahl von Bohrungen sowie mittels geophysikalischer Verfahren vorerkundet werden kann.

Im Vergleich zum obertägigen Einsatz stellt die untertägige Anwendung geophysikalischer Verfahren im Salinargestein spezielle Anforderungen, da wesentlich ungünstigere Faktoren zu berücksichtigen sind:

- durch den Verlauf der Strecken sind nur bestimmte geometrische Messanordnungen realisierbar,
- die Messanordnungen befinden sich in einem durch das Grubengebäude modifizierten Vollraum. Dadurch ergibt sich eine größere Mehrdeutigkeit der Messsignale als an der Erdoberfläche (Halbraum), und die Interpretation ist erschwert (Einflüsse aus allen drei Raumrichtungen),
- untertage herrschen oft schwierige Umgebungsbedingungen, die hohe Anforderungen an die bestehende Mess- und Erkundungstechnik stellen.

Bei der Überwindung dieser Schwierigkeiten und um die Aussagekraft der geophysikalischen und geologischen Verfahren zu erhöhen, hat sich neben der Verbesserung und Optimierung von Einzelverfahren der kombinierte Einsatz sowie die integrierte Auswertung und Interpretation verschiedener geophysikalischer Verfahren mit unterschiedlichen physikalischen Wechselwirkungsmechanismen als erfolgreicher Weg erwiesen.

Im Rahmen eines seit 1998 in drei Phasen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten **Forschungsverbundprojekts Salinargeophysik (SALGY)** wurde zunächst in der ersten Phase „Verbundprojekt Salinargeophysik I“ (Förderkennzeichen 02C0558, 02C0568, 02C0578, Laufzeit 1998 bis 2001) sowie in der zweiten Phase „Verbundprojekt Salinargeophysik II“ (Förderkennzeichen 02C0851, 02C0861, 02C0871, Laufzeit 2001 bis 2003) ein komplexes geophysikalisches Mess- und Auswerteinstrumentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen im Salinar entwickelt. Dieses wurde an zwei sehr verschiedenen Standorten erfolgreich erprobt, ohne dass bereits alle Fragestellungen ausreichend geklärt werden konnten.

Beide Verbundprojekte bestanden aus drei miteinander gekoppelten Einzelvorhaben mit den Beteiligten:

- Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig (Geoelektrik, Seismik, Geologie) mit den Unterauftragnehmern Firmen Geophysik GGD Leipzig und K-UTEC Sondershausen (seismische Verfahren) sowie mit dem Büro Dr. Arnold Schwandt, Erfurt (Geologie),
- Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Hannover (seit 11.12.2008 Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover) (Georadar und elektromagnetische Verfahren),
- Fraunhofer - Einrichtung für Akustische Diagnostik und Qualitätssicherung (EADQ), (jetzt: Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Dresden) (GeoSonar).

Im ersten Verbundprojekt **Salinargeophysik I** (1998 – 2001) / *Fachliche Koordinierung Prof. Dr. F. Jacobs, Dr. Johannes Kulenkampff* / wurden die Einzelverfahren Geoelektrik, Radar, Elektromagnetik, Seismik und Geosonar für den untertägigen Einsatz angepasst und optimiert. Gleichzeitig gelang die Entwicklung einer neuen Methode der gemeinsamen Interpretation der Ergebnisse der einzelnen Verfahren in Form der Berechnung eines integrierten Problemindex. Mit Hilfe dieser Kombination leistungsstarker geophysikalischer und mathematischer Verfahren konnte an einem Referenzstandort, einer Strecke im ehemaligen Kali-Bergwerk Bischofferode (Südharz), eine bis dahin unbekannte lokale salzlösungsführende Störungszone im Hangenden einer Abbaustrecke in weitgehend söhlig gelagerten Schichten detektiert und charakterisiert werden.

Im daran anschließenden zweiten Verbundprojekt **Salinargeophysik II** (2001 – 2003) / *Fachliche Koordinierung Prof. Dr. F. Jacobs, Dr. Anita Just* / wurde das entwickelte komplexe geophysikalische Mess- und Auswertearmamentarium mit dem Ziel der Validierung, Verallgemeinerung und Übertragbarkeit auf einen zweiten Standort mit weitgehend anderen geologischen Verhältnissen angewendet. Die Messungen erfolgten im Kaliwerk Sigmundshall westlich von Hannover im Bereich des Salzstocks Bokeloh, einer halokinetisch geprägten Salzsattelstruktur mit komplizierten geologischen Verhältnissen (Auffaltungen, Zerschörungen, Verschuppungen). In mehreren Horizontalbohrungen waren Salzlösungsvorkommen im Anhydrit angetroffen worden. Mit Hilfe der geophysikalischen Messungen gelang es, die komplizierten geologischen Strukturen, an die die Salzlösungsvorkommen gebunden sind, zu erfassen. In Ergänzung zu den vom Bergwerksbetreiber bereitgestellten geologischen Dokumentationen wurde eine deutliche Präzisierung der Lage der Schichtenfolge erreicht. Durchfeuchtete und bruchtektonisch beanspruchte Bereiche, die direkt oder indirekt mit den isolierten Salzlösungsvorkommen in Zusammenhang stehen, konnten durch mehrere Messverfahren in guter Übereinstimmung ausgewiesen werden.

Aus den Einzelergebnissen wurde ein gemeinsames geophysikalisches Modell des untersuchten Gebirgsbereiches entwickelt, aus dem unter Einbeziehung von Stoßkartierungen und fotografischen Aufnahmen ein geologisches Modell des Grubenbereiches mit detektierten Problemzonen abgeleitet wurde.

Bei den Untersuchungen unter äußerst schwierigen Bedingungen konnten wichtige Erfahrungen hinsichtlich Messtechnik sowie Auswerte- und Interpretationstechniken gesammelt werden, die zu einer weiteren Verbesserung des Instrumentariums geführt haben. Die Einzelverfahren Geoelektrik, Seismik, Georadar und Geosonar wurden weiter entwickelt.

Das dritte Verbundprojekt **Salinargeophysik III** (2005 – 2008) / *Fachliche Koordinierung Institut für Geophysik und Geologie, Dr. Claudia Schütze* / ist Gegenstand dieses Berichtes.

Das bearbeitete Verbundprojekt zum Thema „Universelles integriertes geophysikalisches Mess- und Auswertearmamentarium zur Charakterisierung von Problemzonen im Salinar“ besteht aus den Teilvorhaben Geologie, Geoelektrik, Seismik, und Szenarienmodellierung (Förderkennzeichen 02C1305) sowie Elektromagnetik, Georadar und Quantitative Charakterisierung von Problemzonen (Förderkennzeichen 02C1315) und Geosonar (Förderkennzeichen 02C1325). Die Vorhabenspartner waren wie in den vorherigen Verbundprojekten die Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie mit den

Unterauftragnehmern Fa. K-UTEC, Sondershausen und Büro Dr. Schwandt, Erfurt sowie die GGA Hannover (seit 11.12.2008 Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover) und das Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Dresden. Der vorliegende Bericht ist der gemeinsame Abschlußbericht der drei Verbundprojektpartner.

Allgemeines Ziel der dritten Phase des Verbundprojekts war die Entregionalisierung und die anwendungsbereite Verallgemeinerung der bisherigen speziellen Ergebnisse und die Transformation der Verfahren für andere konkrete Problembereiche und deren Umfeld. Die angestrebte universelle Übertragung des erreichten und weitergehenden wissenschaftlichen und technischen Erkenntnisfortschritts auf andere geologische, geohydrologische, geotechnische und bergbauliche Situationen und deren sicherheitsrelevante Erfassung, Beschreibung und Bewertung erforderte neben einer ergänzenden Bearbeitung der Standorte Bischofferode und Sigmundshall die Verifizierung an weiteren Modell-Standorten. Als neue Modell-Standorte, die für potentielle Gefährdungsbereiche in der geologischen Barriere von Endlagern und Untertagedeponien typische Problemzonen und typische geologische Bedingungen aufweisen, wurden Strecken in den bruchtektonisch gestörten Bergwerken Teutschenthal (GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG, Teutschenthal) und Sollstedt (bis 31.12.2007 Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben mbH (GVV), Sondershausen, seit 1.1.2008: NDH Entsorgungsbetreiber-gesellschaft mbH Bleicherode) ausgewählt.

Die weitere Verifizierung des in den zwei vorangegangenen Phasen des Verbundprojektes entwickelten und verbesserten komplexen geophysikalischen Mess- und Auswertinstrumentariums war somit wesentlicher Bestandteil des jetzt abgeschlossenen Vorhabens. Damit wurde die angestrebte **allgemeingültige Übertragbarkeit** auf andere Lokationen und die Universalität des Instrumentariums gesichert. Dies führte letztlich zu einer problemangepassten Optimierung geophysikalischer Verfahren an die Belange des Salz- und Kalibergbaus im allgemeinen und zur Bereitstellung des erforderlichen geophysikalischen Instrumentariums für die Erkundung und Bewertung von geologischen Barrieren bei UTD/UTV- und Endlager-Vorhaben im speziellen.

Insbesondere wurde die Detektion von Kluftzonen, Laugentaschen, Feuchtezonen und Schichtgrenzen unter ungünstigen geologischen Randbedingungen verbessert und ein Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Grubenbauen geleistet. Der allgemeine wissenschaftliche Nutzen besteht sowohl in der Erkennung von grundsätzlichen Zusammenhängen zwischen montangeologischen, strukturell-stofflichen und physikalischen Parametern als auch in der Weiterentwicklung, Anpassung und Bereitstellung eines anwendungsfähigen Verfahrensinventars zur Charakterisierung potentieller Wirtsgesteinsformationen. Erhöhtes Auflösungsvermögen, verbesserte Aussagesicherheit und quantitative Bewertung von Gefahren- und Problemzonen bilden die Grundlagen der zielgerichteten Sicherheitsanalyse.

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 02C1305, 02C1315 und 02C1325 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1 Geologie und Charakterisierung der Untersuchungsstandorte

A. Schwandt (Erfurt), A. Just (Universität Leipzig)

Auf dem Territorium der BRD sind die Salinargesteine weiträumig, aber ungleichmäßig verteilt. Große, zusammenhängende, an den Zechstein gebundene Salinarverbreitungsgebiete liegen in Norddeutschland. Dagegen fehlt in Süddeutschland eine derartige Ausbildung. Hier konzentrieren sich die Salinarvorkommen schwerpunktmäßig auf kleine Bereiche.

Die Erkundung der Salzvorkommen erfolgte überwiegend mit dem Aufschluss und Abbau der Kalisalze. Ausgehend von Staßfurt wurden in über 150 Jahren auf einer Fläche von mehr als 30.000 Quadratkilometern Kalisalze nachgewiesen und z.T. abgebaut. Dabei wurden im Salzgebirge Hohlräume von mehr als 1 Milliarde Kubikmetern geschaffen (SCHWANDT 2000). Durch den Abbau in Tiefen überwiegend zwischen 300 und 1000 m konnte eine Produktion von ca. 260 Mill. Tonnen K_2O realisiert werden (BEER 1996).

Zur Salzgewinnung wurden über 100 Bergwerke mit ca. 240 Schächten in teilweise weit auseinanderliegenden Gebieten errichtet (Abb. 1-1). Heute ist der Hauptteil der Bergwerke stillgelegt oder verwahrt und die Schächte sind abgesoffen. In den offenen Bergwerken ist der geschaffene Hohlraum teilweise versetzt oder durch Konvergenz reduziert. Von den genutzten offenen Bergwerken dient etwa die Hälfte der Kali- und Steinsalzgewinnung (teilweise mit Mehrfachnutzung). Der Rest wird gegenwärtig als Untertagedeponie (UTD), zum Einbringen von überwachungspflichtigem Fremdversatz (Untertageverwertung - UTV), für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen und nicht zuletzt als Gas- oder auch Erdölspeicher genutzt (Abb. 1-2).

Der Aufbau und Betrieb dieser Bergwerke erforderte in der Regel auch die Erfassung und Bewertung von Problemzonen im Salinar. Dabei stützten sich bisher die Ergebnisse auf spezielle, oft sehr kosten- und zeitaufwendige Bohrarbeiten. Mit dem hier zu entwickelnden neuen geophysikalischen Mess- und Auswerteeinstrumentarium sollen künftig diese Arbeiten verbessert und effektiver durchgeführt werden.

1.1 Geologisch-bergbauliche Situation an den Untersuchungsstandorten Sollstedt (A), Teutschenthal (B) und Sigmundshall (C)

Die weiträumig verbreiteten Salzvorkommen sind unterschiedlich entwickelt und weisen teilweise beachtliche Mächtigkeitsveränderungen auf. Für die Auswahl der Referenzstandorte der geophysikalischen Untersuchungen wurden die weiträumig gleichmäßig ausgebildeten Lagerstätten erfasst und Bereiche mit lokalen Störungen ausgewählt.

Die im Bergwerk Sollstedt nachgewiesene geologische Schichtenfolge ist auch im mittleren und östlichen Südharz entwickelt. Hierzu gehören ebenfalls spezielle Lagerstättenbereiche im Werra-, Saale-Unstrut- und Nordharzkaligebiet. Die in der Grube Teutschenthal erfasste weiträumige Sattelstruktur ist auch im Raum Staßfurt, Aschersleben und Schierstedt

entwickelt sowie an der NE-Flanke des Flechtinger Höhenzuges. Die bei geophysikalischen Messungen in der Grube Sigmundshall angetroffenen geologischen Verhältnisse sind für die in Norddeutschland ausgebildeten Salzstöcke typisch. Die festgelegten Messlokationen liegen 100 - 200 km voneinander entfernt (Abb. 1-1). Damit wurden die unterschiedlichen Formen der Salzvorkommen in flacher, halbsteiler und steiler Lagerung in weiten Teilen der Salzverbreitungsgebiete erfasst.

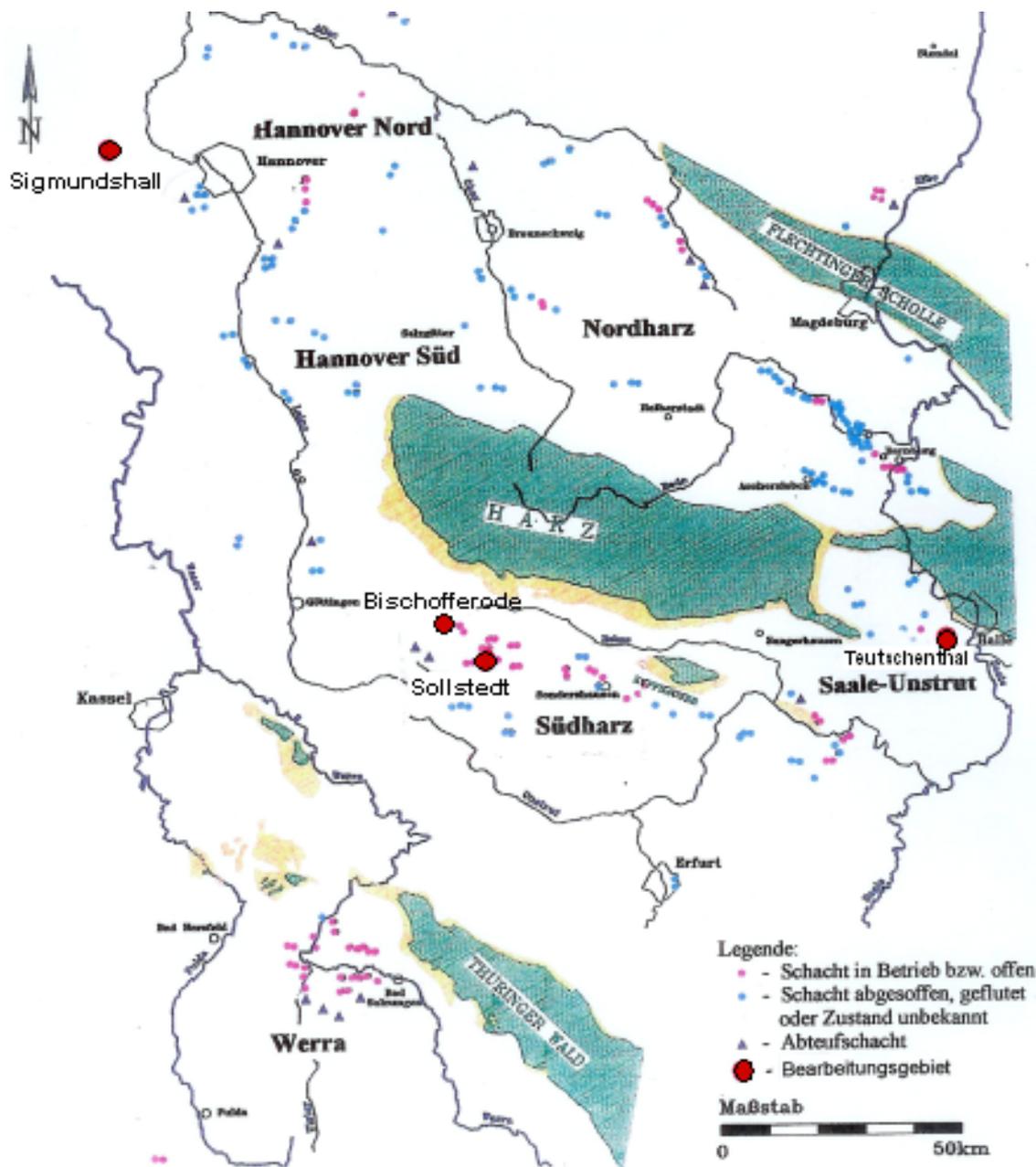


Abb. 1-1: Lage der Bearbeitungsgebiete.

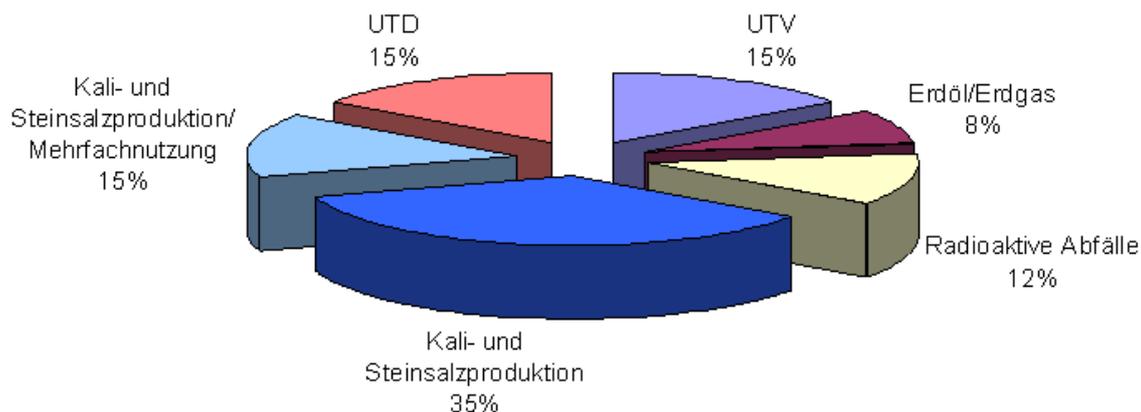


Abb. 1-2: Verwendung der genutzten offenen Salzbergwerke.

1.1.1 Erkundungs- und Erkenntnisstand

Die Kali- und Steinsalzvorkommen weisen einen differenzierten Erkundungs- und Erkenntnisstand auf. Die günstigsten Aufschlussverhältnisse sind bei den in den letzten drei Jahrzehnten aufgebauten oder auch modernisierten Bergwerken erkennbar. Sie besitzen eine umfangreiche geologische Kartierung des Deckgebirges, zahlreiche geophysikalische Untersuchungsergebnisse und eine übersichtliche Bohrerkundung. Mit diesen Erkundungsergebnissen – insbesondere zum bruchtektonischen Inventar – sind auch Hinweise zur Identifizierung von Problemzonen vorhanden. Fehlen diese Untersuchungsergebnisse, ist eine Erfassung und Bewertung der Problemzonen kompliziert oder nicht vorstellbar.

Die beim Aufschluss und Abbau der Kalisalze in den Messgebieten gewonnenen Erkundungsergebnisse lassen Aussagen zur allgemeinen geologischen Situation und zu den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen zu:

Referenzstandort A – Sollstedt:

- Der Messbereich in der Hauptförderstrecke Haynrode, Westfeld Bergwerk Sollstedt, ist durch Bohrungen und Strecken aufgeschlossen. Von den von über Tage gestoßenen Bohrungen liegen in den Bergwerken und in den geologischen Landesämtern ausführliche Schichtenverzeichnisse vor. Die Streckenauffahrungen im Grubengebiet sind jedoch nicht geologisch kartiert, da die Stöße stark verstaubt sind. Diese Aufschlussituation gestattet Aussagen zur Ausbildung der Schichtenfolge und bei Vorlage der geologischen Kartierung der Streckenauffahrungen zu geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen sowie begrenzt zu den Problemzonen.

Referenzstandort B – Teutschenthal:

- Die Auffahrung der Verbindungsstrecke Grubenfeld Teutschenthal – Grubenfeld Angersdorf wurde im Leinsteinsalz kurz oberhalb der Hauptanhydritoberkante vorgenommen. Die Bestimmung des Auffahrungsniveaus erfolgte aus der Berechnung

der Mächtigkeit des Zwischenmittels Oberkante des abgebauten Kalisalzflözes und der Unterkante der geplanten Verbindungsstrecke. Mit Hilfe der geophysikalischen Messergebnisse (Radarerkundung während der Auffahrung, PIPPIG et al. 2005) wurden diese Aussagen präzisiert. Zusätzlich wurden Vorbohrungen zur Erkundung der Hauptanhydritoberkante genutzt. Der Vortrieb sollte so erfolgen, dass der unterhalb des Steinsalzes entwickelte Hauptanhydrit nicht angefahren wird.

Referenzstandort C - Sigmundshall:

- Während der Projektlaufzeit wurden im Bergwerk Sigmundshall keine neuen geologischen Untersuchungen zum Erkundungs- und Erkenntnisstand vorgenommen. Die aktuelle geologische Situation ist aus dem Abschlussbericht des Vorgängerprojektes Salinargeophysik II (JUST et al. 2004) zu ersehen.

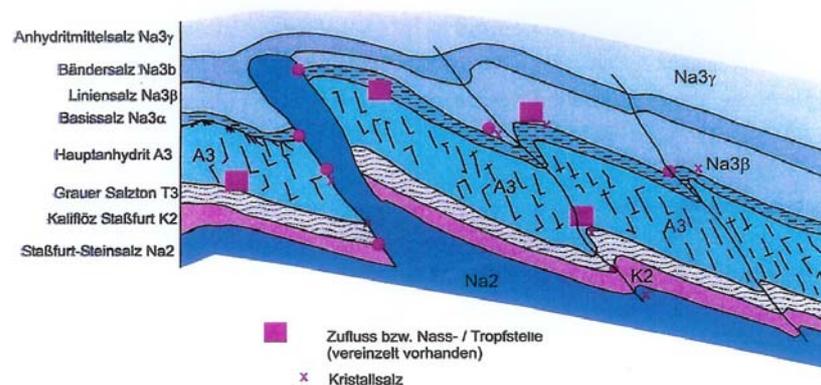


Abb. 1-3: Lage möglicher Salzlösungsvorkommen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung in schuppenartig übereinander geschobenen Hauptanhydritschollen (Schematischer Querschnitt bei mit ca. 30° einfallenden Schichten).

Generell muss beim Freilegen des Hauptanhydrits - oder einer Scholle - mit Salzlösungsführung gerechnet werden. In Abb. 1-3 ist die mögliche Lage von Salzlösungsvorkommen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung bei schuppenartig übereinander geschobenen Hauptanhydritschollen schematisch dargestellt.

1.1.2 Allgemeine geologische Situation

Die an den Referenzstandorten entwickelte allgemeine geologische Situation ist wie folgt charakterisiert:

Die hangende Schichtenfolge besteht aus Buntsandstein, der insgesamt in 9 Folgen entwickelt ist (siehe Anhang, Abb. A1). Dabei bestehen zwischen den einzelnen Folgen in den Messgebieten Mächtigkeitsschwankungen und Ausbildungsunterschiede. Eine ähnliche Situation ist auch bei der Ausbildung des Zechsteins erkennbar. Hier ist die Schichtenfolge des Zechsteins in den oberen Folgen vergrößert (Anhang, Abb. A2). Die in den Messgebieten entwickelten Lagerungsverhältnisse lassen insgesamt drei Lagerstättentypen erkennen:

- Der erste Lagerstättentyp wird durch die Messstelle Hauptförderstrecke Haynrode, Westfeld Bergwerk **Sollstedt** charakterisiert. Es handelt sich um eine großflächige, schichtartige, horizontale bis wellige Lagerausbildung, die im Streichen und Einfallen absetzig ist. Dieser Sachverhalt ist in den lokalen Abbaubereichen erkennbar (Abb. 1-4).
- Zum zweiten Lagerstättentyp gehört die Messstelle Verbindungsstrecke Grube **Teutschenthal** mit Grube Angersdorf. Es handelt sich dabei um ausgedehnte geologische Strukturen, die an sattelartigen Lagerstätten gebunden sind (Abb. 1-5) und steiles bis sehr steiles Einfallen (am Staßfurter Sattel) der Salzschichten auf größere Entfernungen aufweisen.
- Die Messstrecke in der Grube **Sigmundshall** ist einem dritten Lagerstättentyp zuzuordnen (Abb. 1-6). Es handelt sich um diapirartige Salzaufpressungen mit komplizierter innerer Tektonik, die aus kulissenartigen Faltungssträngen bestehen.

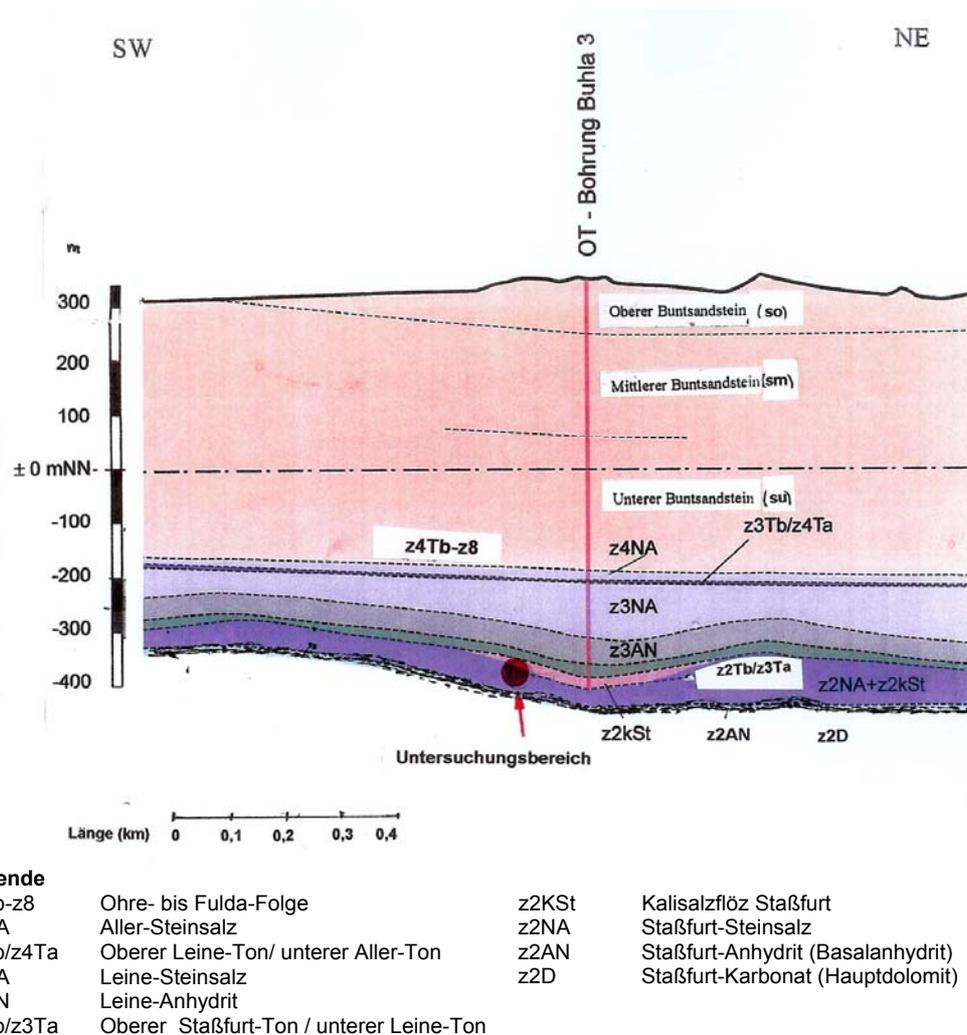


Abb. 1-4: Geologische Situation des Untersuchungsbereiches im Bergwerk Sollstedt (Referenzstandort A).

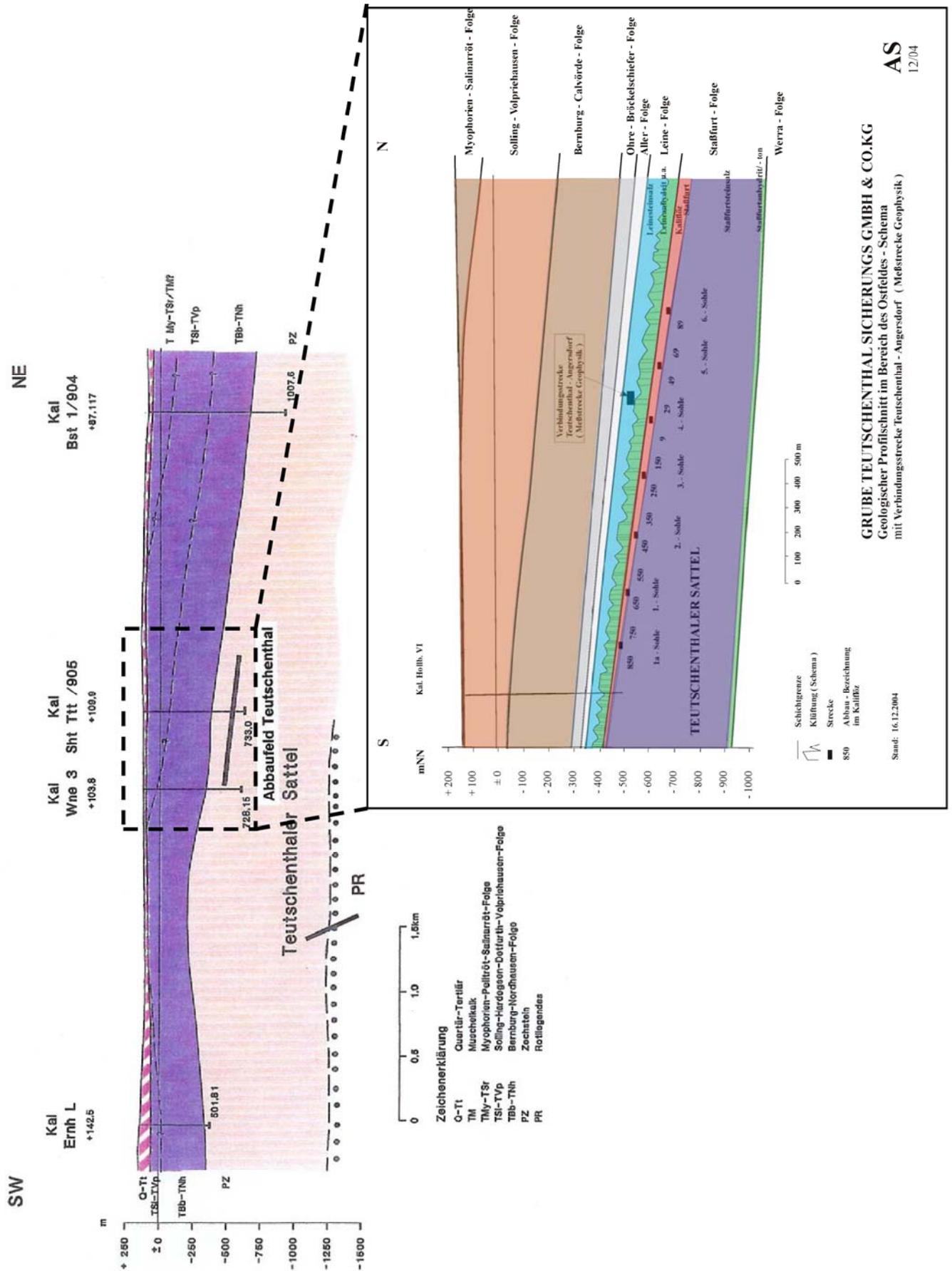
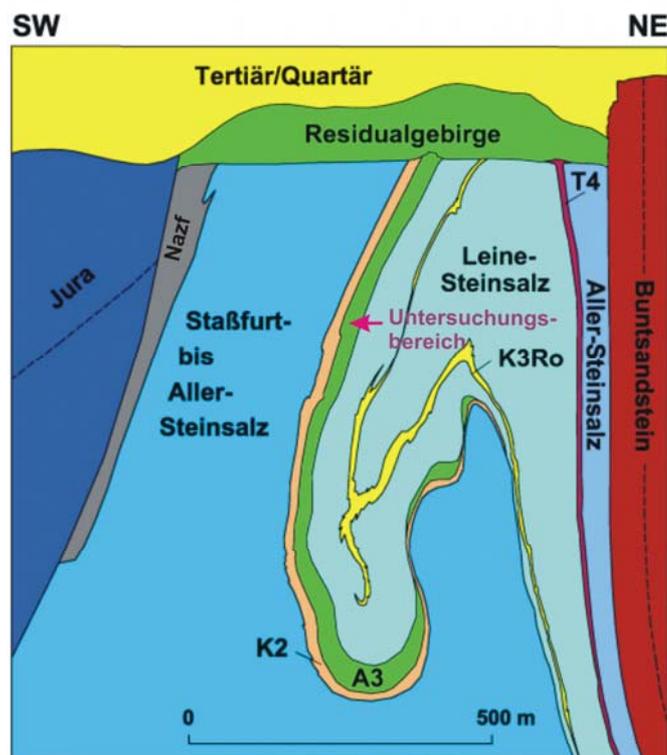


Abb. 1-5: Geologischer Profilschnitt durch den Teutschenthaler Sattel im Bereich des Ostfeldes der Grube Teutschenthal (Referenzstandort B).



Legende

Nazf	Zechsteinfremdes Salz
T4	Roter Salzton / Pegmatitanhydrit
K3Ro	Kaliflöz Ronnenberg
A3	Hauptanhydrit / Grauer Salzton
K2	Kaliflöz Staßfurt (Hartsalz)

Nach SESSLER, HOLLÄNDER (2002)

Abb. 1-6: Schematischer Schnitt durch den Salzstock Bokeloh (Referenzstandort C – Sigmundshall)

1.1.3 Geologische und hydrogeologische Verhältnisse

Die Auswertung der bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigt, dass jede der drei Referenzstrecken einen veränderten geologischen Aufbau und somit auch abweichende hydrogeologische Verhältnisse aufweist. Die für die einzelnen Messstrecken typischen Ausbildungsformen sind weiträumig verbreitet. Die Messbereiche sind durch folgende geologische und hydrogeologische Verhältnisse charakterisiert:

Referenzstandort A – Sollstedt:

Die Messstrecke in der Hauptförderstrecke Haynrode, Bergwerk Sollstedt-Westfeld ist in einem durch mehrere Strecken erkundeten Gebiet aufgefahren (Abb. 1-7 und 1-8). Sie liegt an der Südflanke der Bleicheröder Mulde. In der Strecke ist entsprechend der Gliederung von HEYNKE & ZÄNKER (1970) der Bereich der γ_1 - und γ_2 -Lagen des Staßfurt-Steinsalzes aufgeschlossen (Abb. 1-7). Dabei ist ein Einfallen der Schichten nach Norden mit über 90 gon in die Bleicheröder Mulde feststellbar. Mit den Streckenauffahrungen außerhalb des Messbereiches wurde in vier Fällen der Basalanhydrit angefahren, ohne dass dort

Salzlösungen festgestellt werden konnten. Der Verlauf der Oberkante des Basalanhydrits zeigt in unmittelbarer Nähe der Hauptförderstrecke Haynrode ein steiles Einfallen, das mit Annäherung an die Mulde stark verflacht. Die Oberkante des Basalanhydrits streicht NW-SE. Lokale Abweichungen dieser generellen Streichrichtung sind im Messbereich nur vereinzelt nachweisbar.

Die geologischen Aussagen im Messbereich stützen sich auf Untersuchungsergebnisse aus Bohrungen und Strecken. Weiterhin wurden dafür die aus geologischen Kartierungsergebnissen konstruierten Schichtgrenzen genutzt. Letztere sind zwischenzeitlich durch die geophysikalischen Messungen bestätigt (siehe Kap. 5.1).

Im Gegensatz zu den geologischen Aussagen fehlen im Messgebiet Angaben zu spezifischen hydrogeologischen Verhältnissen. Aus allgemeinen Erkenntnissen ist zu erwarten, dass eine Salzlösungsführung nur an den Hauptdolomit gebunden ist. Anzeichen für Salzlösungsvorkommen aus dem Hangenden der Streckenauffahrung sind nicht bekannt.

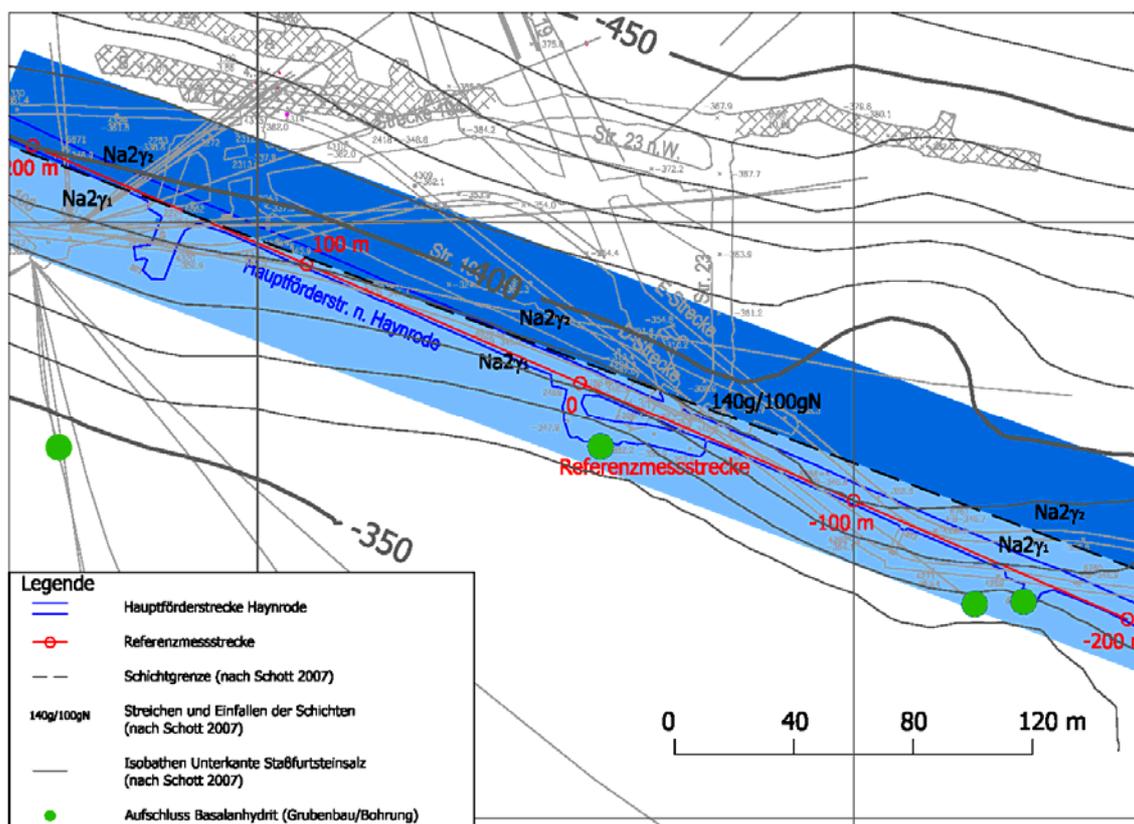


Abb. 1-7: Anstehende Schichtenfolge mit Isolinien-darstellung der Basis Staßfurt-Steinsalz im Messbereich der Hauptförderstrecke Haynrode, Bergwerk Sollstedt (nach SCHOTT 2007)

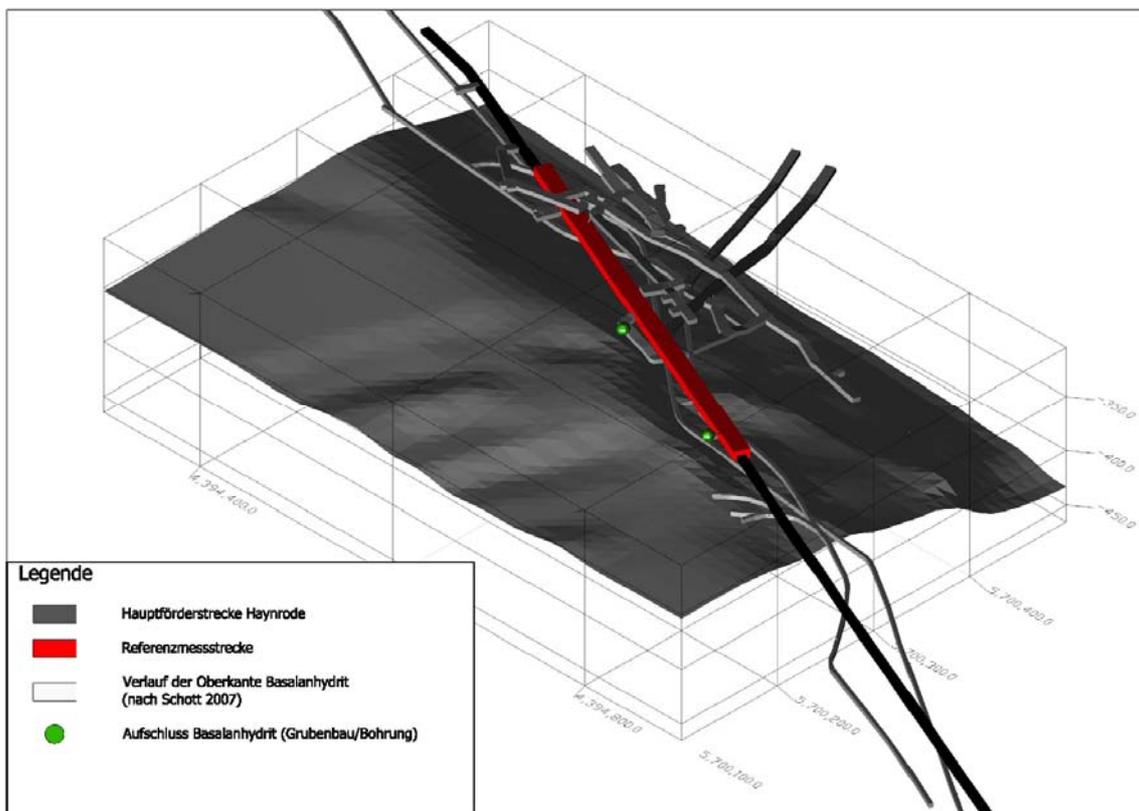


Abb. 1-8: 3D-Übersicht der Lage des geophysikalischen Messbereiches in der Hauptförderstrecke Haynrode, Bergwerk Sollstedt (kompiliert JOCKEL 2008)

Referenzstandort B – Teutschenthal:

In der **Verbindungsstrecke Teutschenthal - Angersdorf** ist eine wesentlich andere Ausbildung der Schichten und der Lagerungsverhältnisse als in der Hauptförderstrecke im Bergwerk Sollstedt nachgewiesen. Die Verbindungsstrecke (Abb. 1-9) wurde im untersten Teil des Leine-Steinsalzes aufgefahren. Der Vortrieb sollte so erfolgen, dass der unterhalb des Steinsalzes entwickelte Hauptanhydrit nicht angefahren wird. Beim Freilegen des Hauptanhydrits - oder einer Scholle - muss mit einer Salzlösungsführung gerechnet werden. Diese wurde beim Vortrieb in einer Anhydritscholle nachgewiesen. Abweichend von dieser Ausbildung hat die Verbindungsstrecke im Durchschlagsbereich zur Grube Teutschenthal Hauptanhydrit, Grauen Salztou und den obersten Teil des Kaliflözes Staßfurt aufgeschlossen.

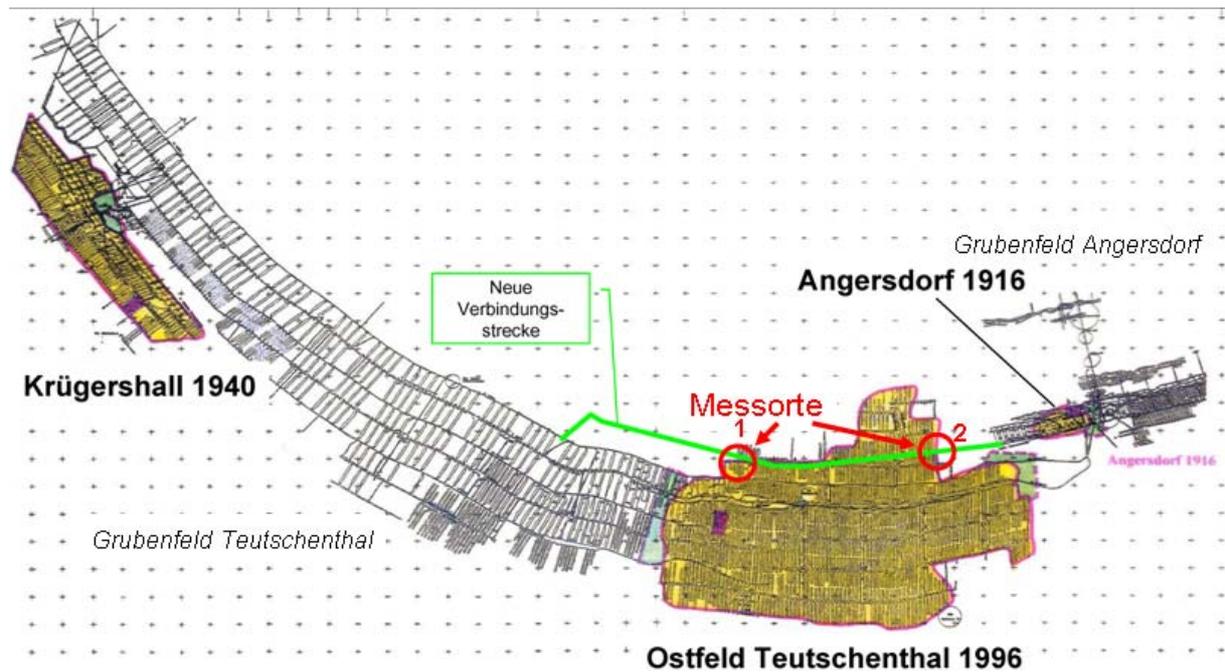


Abb. 1-9: Lage der Referenzmessstrecken im Bergwerk Teutschenthal, Messort 1- westliche Bruchfeldkante, Messort 2 – östliche Bruchfeldkante.

1.2 Auswahl und Charakterisierung der Referenzstandorte

Bei der bisherigen Auswahl und Charakterisierung der Referenzstandorte mussten – wie teilweise in den vorangestellten Abschnitten beschrieben – folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Nachweis eines Messraumes, der den bergbausicherheitlichen, technischen und forschungsseitigen Anforderungen für die Durchführung der Arbeiten entspricht,
- Lage des Messstandortes in einem weiträumig verbreiteten nahezu gleichmäßigen Lagerstättenbereich,
- Berücksichtigung der unterschiedlich entwickelten Lagerstättentypen.

Von den Projektpartnern wurden gemeinschaftlich die Bergwerksstandorte **Sollstedt** und **Teutschenthal-Angersdorf** als Referenzstandorte ausgewählt.

Referenzstandort A – Sollstedt:

Im Bergwerk **Sollstedt** (Betreiber bis 2007: Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben mbH (GVV), seit 1.1.2008: NDH Entsorgungsbetreiber-gesellschaft mbH Bleicherode) wurden zwei Bereiche als Referenzlokation in Betracht gezogen. Nach einer Georadar-Vorerkundung an beiden Lokationen durch das GGA-Institut Hannover wurde das gemeinsame Referenzprofil an einer Anhydrit-Aufsattelung in der ehemaligen Hauptförderstrecke festgelegt. Die Hauptförderstrecke verläuft im

Staßfurtsteinsalz. Im liegenden Basalanhydrit und Hauptdolomit werden Salzlösungsvorkommen vermutet, die in Verbindung mit einer im Deckgebirge nachgewiesenen Störung (Krajaer Störung) stehen könnten.

Referenzstandort B – Teutschenthal:

Im Bergwerk **Teutschenthal** (Betreiber: GTS Teutschenthal GmbH) war als Referenzstandort die Umgebung des Laugenzuflusses in der neu aufgefahrenen Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf, die an der Unterkante des Leinsteinsalzes verläuft, ausgewählt worden. Insbesondere der Bereich über den beiden Bruchfeldkanten des Gebirgsschlagfeldes von 1996 ist von Interesse. Vorangegangene Radarmessungen, die vor und während der Streckenauffahrung von K-UTEC GmbH und Bo-Ra-tec GmbH durchgeführt wurden, zeigten über dem Bruchfeld ein anderes Verhalten von Radarreflektoren im Anhydrit als außerhalb des Bruchfeldes (PIPPIG et al. 2005). Im Bereich der östlichen Bruchfeldkante waren jedoch wegen der Installation eines Lüfters und von Schleusentoren nicht mehr Messungen mit allen Verfahren möglich, sodass das gemeinsame Referenzprofil über der westlichen Bruchfeldkante angelegt wurde. Im Bereich über der östlichen Bruchfeldkante wurden aber weitere Geoelektrik- und Radarmessungen durchgeführt.

1.3 Literatur

- [1] BEER, W.W. (1996): Kalisalzlagerstätten in Deutschland.- Kali- und Steinsalz, 12, 18-30, Essen.
- [2] HERBERT, H.-J., SCHWANDT, A. (2007): Salzlösungszuflüsse im Salzbergbau Mitteldeutschlands. Erfassung und Bewertung der chemischen und physikalischen Analysenergebnisse.- GRS Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit mbH.
- [3] HEYNKE, A. & ZÄNKER, G. (1970): Zur Ausbildung und Leitbankgliederung des Staßfurtstein-salzes im Südharz-Kalirevier.- Z. angew. Geol. 16, H 7/8, 344 – 355, Berlin.
- [4] JUST, A., JACOBS, F., TUCH, A., KNIEB, R., SCHUCK, A., SCHMIDT, V., ROST, F., LINDNER, U., SCHICHT, TH., SCHWANDT, A., KURZ, G., IGEL, J., SCHULZ, R., SCHULZE, E., KÜHNICKE, H. (2004): Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02C0851, 02C0861, 02C0871, Leipzig 2004.
- [5] PIPPIG, U., RICHTER, T., SCHICHT, T. (2005): Ergebnisbericht zur geophysikalischen Erkundung der Ursachen des Laugenzutritts in der Verbindungsstrecke zwischen den Grubenfeldern Angersdorf und Teutschenthal. Interner Bericht Bo-Ra-tec und K-UTEC im Auftrag der GTS, unveröffentlicht.

[6] SCHOTT, E. (2007): Geologische Aufnahme der Messstrecke Geophysik in der Hauptförderstrecke Haynrode mit 8 Anlagen.- Büro Dr. Schwandt, Akte Sollstedt, 07.11.2007, Mühlhausen.

[7] SCHWANDT, A. (1991a): Zur Hydrogeologie der Zechstein-Sedimente in den Kali- und Steinsalzabbaugebieten Mitteldeutschlands.- Zbl. Geol. Paläont. Teil I, 4, 1263-1273, Stuttgart.

[8] SCHWANDT, A. (1991c): Zum Hauptanhydritszenario am Beispiel der NE-Flanke des Staßfurter Sattels.- GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg.

[9] SCHWANDT, A. (2000): Stand und Entwicklungstendenzen geowissenschaftlicher Untersuchungen zur Beurteilung des Salzbergbaus.- Geowiss. Mitt. von Thüringen, Beiheft 9, 189-204, 8 Abb., Weimar.

[10] SESSLER, W. & HOLLÄNDER, R. (2002): Kaliwerk Sigmundshall der Kali und Salz GmbH, Befahrung am 11. Juni 2002 im Rahmen der Projektwoche 2002, Natur und Landschaft zwischen Küste und Harz.- Veröffentlichungen der Akademie der Geowissenschaften zu Hannover.

2 Geoelektrik und Seismik

C. Schütze, A. Just, C. Rücker, U. Serfling, K. Matthes, H. Zöllner (Universität Leipzig),
T. Schicht (K-UTEC AG, Sondershausen)

2.1 Geoelektrische Untertagemessungen

2.1.1 Messverfahren

Bei den gleichstromgeoelektrischen Messverfahren (KNÖDEL et al. 1997) wird über zwei Stromelektroden (A und B) ein elektrischer Strom in den Untergrund eingespeist. Dadurch bildet sich in Abhängigkeit von der Widerstandsverteilung im Untergrund ein elektrisches Feld aus, das über die Messung von Potentialdifferenzen mit zwei weiteren Elektroden (M und N) an verschiedenen Punkten gemessen wird. Die zu bestimmende Materialeigenschaft ist der spezifische elektrische Widerstand bzw. sein Kehrwert, die elektrische Leitfähigkeit. Dieser Gesteinsparameter ist abhängig von den Porenraumeigenschaften wie der Porosität, dem elektrischen Widerstand des Porenfluids und dem Sättigungsgrad sowie den Eigenschaften der Gesteinsmatrix.

Das als Potentialdifferenz zwischen den Elektroden M und N gemessene elektrische Feld hängt außer von dem Geometriefaktor K für eine Konfiguration der Elektrodenanordnung A-B-M-N von der Größe und Verteilung des spezifischen Widerstandes ρ im Untergrund ab. Der räumliche Bereich, der den Messwert beeinflusst, wird maßgeblich von der Konfiguration der Elektroden und - hinsichtlich der wirksamen Eindringtiefe - vom Abstand der Strom- und Spannungselektroden beeinflusst. Aus den gemessenen Werten der Potentialdifferenz und des Stromes kann unter Berücksichtigung des Geometriefaktors (oft auch als Konfigurationsfaktor bezeichnet) für jede Elektrodenanordnung ABMN der sogenannte scheinbare spezifische Widerstand ρ_{s_ABMN} nach

$$\rho_{s_ABMN} = k_{ABMN} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} \quad [1]$$

mit k - Konfigurationsfaktor, ΔU - Potentialdifferenz zwischen M und N und
I - Strom zwischen A und B

bestimmt werden.

Bei Untertagemessungen ist nur für kleine Elektrodenabstände (im Größenbereich des Streckenquerschnitts) von der Gültigkeit der Übertage geltenden Halbraumbedingungen auszugehen, die im allgemeinen in der Geoelektrik vorausgesetzt wird. Bei zunehmender Auslagenweite werden asymptotisch die Vollraumbedingungen angenähert. Der Geometriefaktor ist im Vollraum doppelt so groß wie im Halbraum. Der Einfluss des umgebenden Grubengebäudes und der Messstreckengeometrie auf die Messdaten lässt sich mit Hilfe von Modellrechnungen ermitteln und kann dann im Geometriefaktor berücksichtigt werden (RÜCKER et al., 2006).

Die Ermittlung der Verteilung der spezifischen Widerstände aus den gemessenen scheinbaren spezifischen Widerständen ist die Aufgabe der Inversion. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Messungen und ihrer endlichen Genauigkeit lässt sich die Widerstandsverteilung nicht

eindeutig direkt aus den Messdaten berechnen. So existieren stets mehrere berechnete Widerstandsmodelle, die die Messdaten erklären. Die typischen Inversionsstrategien nutzen die iterative Verbesserung eines Widerstandsmodells des Untergrundes, um eine möglichst gute Anpassung der aus dem Modell berechneten synthetischen Potentialverteilungen an die Messdaten zu erreichen.

Die Messbedingungen bei Untertagemessungen im Salzgestein stellen gegenüber übertägigen geoelektrischen Feldmessungen besondere Anforderungen an die Mess-Systeme. Die Messgeräte müssen in der Lage sein, auch bei geringen Messströmen zuverlässig zu arbeiten und besonders große Eingangswiderstände sowie eine gute Potentialtrennung besitzen, weil das Messobjekt gewöhnlich hochresistiv ist.

2.1.2 Messkampagnen an den Untersuchungsstandorten

An beiden Referenzstandorten wurde ein je 400 m langes DC-Profil mit Elektrodenabstand 2 m installiert. Um eine möglichst hohe Datendichte zu erreichen, wurden die Profile an allen Messstandorten mit mehreren Elektrodenkonfigurationen (Wenner-alpha, Wenner-beta, Dipol-Dipol, Schlumberger) übermessen. Zusätzlich erfolgten entlang der Profile Probenahmen für spätere Labormessungen. Aufgrund der besseren Zugänglichkeit der Grube Teutschenthal konnten an diesem Standort weitreichende methodische Tests sowie zusätzliche Messungen zur Strukturerkundung des Standorts durchgeführt werden.

Tabelle 2-1: Übersicht zu den durchgeführten Messkampagnen.

Standort A: Sollstedt			
Zeitraum	Lokation	Messaufgabe	Ausrüstung
16.05.06 – 19.05.06	Hauptförderstrecke nach Haynrode (-200 m bis +200 m)	Sohleprofil auf Förderabsatz	RESECS, RefTek
07.06.06 – 14.06.06	Hauptförderstrecke nach Haynrode (-200 m bis +200 m)	Sohleprofil auf Förderabsatz	RESECS, RefTek, Probenahme für Labormessung
Standort B: Teutschenthal – Angersdorf			
14.01.05 – 24.01.05	Wetterstrecke-Umfahrung (östliche Bruchfeldkante, Laugenaustritt)	Stoß- und Sohleprofil in der Wetterstrecke	RESECS
25.10.05 – 27.10.05	Wetterstrecke-Umfahrung	Stoß- und Sohleprofil in der Wetterstrecke	RESECS
03.11.05 – 11.11.05	Wetterstrecke-Umfahrung	Stoß- und Sohleprofil in der Wetterstrecke	RESECS
03.01.06 - 13.01.06	Wetterstrecke-Umfahrung	Stoßprofile an Haupt- und Wetterstrecke, Ringprofile, Sohle- und Firstprofil	RESECS, RefTek

17.07.06 – 20.07.06	Wetterstrecke-Umfahrung	Verlängerung Stoßprofil Wetterstrecke	RESECS
13.11.06 – 29.11.06	Verbindungsstrecke +1550 m bis +1950 m, (westliche Bruchfeldkante)	Sohleprofil, Übertage- Untertage-Messung	RESECS, RefTek, Probenahme Labormessung
07.05.07 – 09.05.07	Verbindungsstrecke +1550 m bis +1950 m	Wiederholungsmessung Sohleprofil, Testmessung Stoßprofil, Übertage-Untertage- Messung	RESECS, RefTek
17.09.07 – 20.09.07	Verbindungsstrecke +1550 m bis +1950 m	Stoßprofil Südstoß, Wiederholungsmessung Sohleprofil	RESECS, RefTek, Probenahme für Labor- messung
06.02.08 – 08.02.08	Verbindungsstrecke +1550 m bis +1950 m	Stoßprofil Südstoß Erweiterung und Nach- messung, Messung U- Profil	RESECS

2.1.3 Datengewinnung, Datenbearbeitung und Inversion

Für die untertägigen Messungen an den Referenzstandorten Sollstedt und Teutschenthal wurden drei verschiedene Mess-Systeme verwendet. An den Referenzstandorten wurde jeweils ein Hauptprofil mit einer maximalen Auslagenweite von 400 m bestehend aus 3 bis 5 überlappenden Teilprofilen gemessen. Dafür kam eine Multielektrodenapparatur RESECS (GeoServe Kiel) zum Einsatz. Synchron mit der RESECS-Einspeisung wurden bis zu 20 autarke Spannungs-Messeinheiten RefTek-125 „TEXAN“ (Transientenrekorder, Refraction Technology Inc. USA) verwendet. Für gekoppelte Deckgebirgsuntersuchungen wurden Messungen mit einer separaten Hochspannungs-Stromquelle (Scintrex TSQ-4) und der Eigenentwicklung MPS-2 in Kombination mit RefTek-Registrierungen durchgeführt.

Das *RESECS-Mess-System* (GeoServe Kiel) ist ein 6-kanaliges Messsystem mit „intelligenten Elektroden“, d.h. an jede Elektrode wird eine Elektronikbox angeschlossen. Jeweils 16 Elektronikboxen (für 16 Elektroden) sind durch ein Kabel verbunden und können durch die Apparatur angesteuert werden. Insgesamt sind an die Apparatur 96 Elektroden gleichzeitig anschließbar, indem maximal 6 Kabelketten mit jeweils 16 Boxen miteinander verbunden werden. Anstelle der Kabelketten können auch Decoderboxen verwendet werden, an die jede Elektrode über ein einzelnes Kabel angeschlossen wird. Die Auswahl der Elektrodenkonfigurationen erfolgt nach einem gegebenem Messschema (sog. Multichannelfile, *.MCF).

Mittels einer Konstantspannungsquelle (geräteinterne Speisespannung max. 120 V, extern bis 400 V) wird ein Wechselstrom niedriger Frequenz (kleiner 1 Hz) und rechteckförmiger Impulsform in das Gestein eingespeist und der eingespeiste Strom gemessen. Mit einer

wählbaren Abtastrate von $dt = 1$ ms bis 4 ms werden der eingespeiste Strom I und die Spannungen U (Maximalamplitude 4950 mV) ermittelt und der scheinbare spezifische Widerstand sampleweise über den Mittelwert des Quotienten aus Mess-Spannung und $-$ Strom (U_i/I_i) im gewählten Zeitfenster der Einspeisung berechnet. Um den Einfluss hochfrequenter Störanteile auf das RESECS-Signal möglichst gering zu halten, wurden die Messungen mit einem Tiefpass-Filter von 5 Hz durchgeführt.

Bereits während der Messung werden die Ergebnisse der abgeschlossenen Einzelmessungen in einer binären *.PRO-Datei abgespeichert. Diese enthält neben den Werten zur jeweiligen Konfiguration, Speisestromstärke, Spannungsdifferenz und daraus berechnetem scheinbarem spezifischen Widerstand auch Informationen über die Standardabweichung des Widerstandswertes, das Eigenpotential am Spannungsdipol und die Phasenverschiebung zwischen Spannungs- und Stromsignal. Diese Dateien können in ein lesbares ASCII-Format konvertiert werden. Neben den *.PRO-Dateien liegen für alle Einzelmessungen *.SPL-Dateien vor, die die Aufzeichnungen des Einspeisesignals $I_{AB}(t)$ und des gemessenen Spannungssignal $U_{ABMN}(t)$ als Funktionen der Zeit beinhalten.

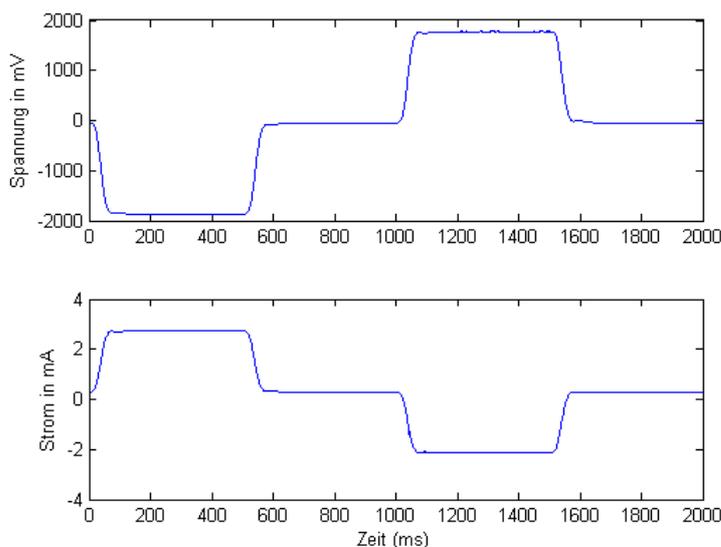


Abb. 2.1-1: Informationen zum Spannungs- und Stromsignal einer Einzelmessung abgelegt in einer binären *.SPL-Datei. Die Spuren der Länge 2 s zeigen das optimale, nahezu unverrauschte Spannungssignal mit einer Amplitude $U_{\max} = 1.8$ V bei der Einspeisung des alternierenden Gleichstroms mit Amplitude $I_{\max} = 2.8$ mA.

Im Rahmen des Projektes wurde ein neuartiges Konzept zur Datenanalyse umgesetzt. Die in den *.SPL-Files enthaltene Information diente hierbei zur Beurteilung der Datenqualität der Messwerte sowie zur Berechnung der scheinbaren spezifischen Widerstände. Mittels eines Matlab®-Programms, welches die Anwendung datenadaptiver Filter zur Beseitigung hochfrequenter Störungen und Spannungsspitzen, zum Ausschluss von extrem durch kapazitive und induktive Kopplungseffekte beeinflussten Spuren sowie für die Auswahl optimaler Zeitabschnitte in den On-Zeiten für die Ermittlung von Spannung U und Stromstärke I realisiert, konnte sowohl die Anzahl als auch die Qualität der Rohdaten deutlich erhöht werden.

Die in der Seismologie üblichen Signalrekorder, die einkanaligen *Transientenrekorder RefTek 125* „TEXAN“ (Refraction Technology), bieten die Möglichkeit, aufgrund ausreichend hoher

Eingangswiderstände auch die Aufzeichnung kompletter Zeitreihen gleichstrom-geoelektrischer Signale zu realisieren. Diese Methode kam bisher hauptsächlich bei tiefengeoelektrischen Experimenten (Kontinentale Tiefbohrung (STORZ et al., 2000), Long Valley Caldera (SCHÜTZE & FLECHSIG, 2002)), sowie zum zeitlichen Monitoring von DC-Signalen zum Einsatz.

Der RefTek Transientenrekorder, ein batterieversorgtes, von der Stromspeisung unabhängig und passiv messendes Gerät, kann ein Spannungssignal mit einer Messgenauigkeit von 60 nV und einer maximalen Amplitude von 300 mV als Zeitreihe registrieren. Die RefTeks werden vor der Messung mit einer Steuertabelle (sog. Eventtable) programmiert. Dabei werden die Zeitfenster vorgegeben, in denen der Rekorder vom Standby-Modus in den Mess-Modus wechselt, um mit definierter Abtastfrequenz (wählbar von 25 bis 1000 Hz) die Spannungswerte zu registrieren. Hierzu wird mit Hilfe eines GPS-Signals die interne Uhr des Rekorders, nach der die Steuerbefehle ausgeführt werden, kalibriert.

Um auch Signale über größere Distanzen mit ausreichend hoher Genauigkeit abzutasten, wurden an den Profilrandbereichen RefTek Rekorder installiert, da besonders aus den weiten Elektrodenaufstellungen Informationen aus größeren Erkundungstiefen erwartet werden. Die Auswertung der Signale ist umfangreich, für jeden Empfangsdipol MN wurde eine Zeitreihe $U_{MN}(t)$ mit Samplingfrequenzen von üblicherweise 40 Hz (adaptiv auch 100 Hz) über mehrere Stunden aufgezeichnet, aus der dann für den Einspeisestrom $I_{AB}(t)$ eines RESECS-Speisedipols AB die Spurabschnitte $U_{ABMN}(t)$ (max. 4 Sekunden Länge) ausgewählt wurden. Nach der Bestimmung des Konfigurationsfaktors für die Anordnung ABMN erfolgte die Ermittlung des scheinbaren spezifischen Widerstandes (nach [1]), der dann als Messwert dem Inversionsprozess zur Verfügung stand. Für die erste Sichtung der Datenqualität und des Frequenzinhalts der RefTek-Daten konnte die vorhandene Software DCTrap (FRIEDEL, 2000) genutzt werden, zur Bestimmung aller zusätzlichen Widerstandswerte wurde im Rahmen des Projektes eine automatisierte Matlab® - Routine entwickelt, die die RESECS-Dateien hinsichtlich Speiseströme und Einspeisezeit mit den entsprechenden RefTek-Zeitspuren vergleicht und den gewünschten Parameter scheinbarer spezifischer Widerstand ausgibt.

Die gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstände müssen im Inversionsprozess zu einer räumlichen Verteilung des wahren spezifischen elektrischen Widerstandes rekonstruiert werden. Bei der Lösung des inversen Problems existieren aufgrund der endlichen Messgenauigkeit und –geometrie gleichberechtigte Lösungen. Zur Berechnung der Widerstandsmodelle wurde das im Rahmen des Salinargeophysik-Forschungsprojektes weiterentwickelte Programm BERT (**B**oundless **E**lectrical **R**esistivity **T**omography, www.resistivity.net) verwendet. Dieses Inversionsprogramm bietet die Möglichkeit zur Bestimmung von dreidimensionalen Widerstandsverteilungen unter Berücksichtigung der für die Untertagemessungen typischen Vollraumsituation (siehe auch Kapitel 2.3). Der Algorithmus arbeitet auf der Basis unstrukturierter tetrahedraler Gitter und einer Finite Elemente Methode (FEM) zur Lösung der Vorwärtsaufgabe. Für die iterative Anpassung des Modells an die Messdaten wird eine Gauss-Newton Methode verwendet, unter Einhaltung spezieller Glattheitsanforderungen an das Widerstandsmodell (GÜNTHER et al., 2006).

2.1.4 Ergebnisse der geoelektrischen Messungen

Standort A – Sollstedt

Im Bergwerk Sollstedt erfolgten Geoelektrikmessungen auf einem 400 m langen Profil am Referenzmessort in der ehemaligen Hauptförderstrecke.

Für die Messungen wurden Elektroden (Stahlbolzen) im Abstand von 2 m auf der Sohle der Strecke angebracht. Es wurden Messungen auf 3 überlappenden Teilprofilen (je 96 Elektroden = 190 m) mit der mehrkanaligen geoelektrischen Multielektroden-Apparatur RESECS (GeoServe Kiel) durchgeführt. Weiterhin erfolgten gleichzeitig Spannungsregistrierungen mit Transientenrekordern RefTek 125 „TEXAN“ (Refraction Technology, USA) an den an das jeweilige Teilprofil angrenzenden Elektroden.

Auf den Teilprofilen wurden Pseudosektionen mit Dipol-Dipol-Anordnung mit wachsender Dipolweite sowie in Wenner-alpha- und Wenner-beta-Anordnung aufgenommen. Die Elektrodenankopplung war für Salinarverhältnisse relativ gut, die eingespeisten Ströme lagen größtenteils über 10 μA und teilweise sogar im mA-Bereich.

Die RefTek-Aufzeichnungen liegen als Zeitreihen über 8 Stunden vor. Die Aufzeichnungen können zur Analyse der in der Strecke auftretenden elektrischen Störsignale herangezogen werden. Alle Spuren der Registrierungen (Abtastrate: 100 Hz) zeigen starke Störungen der Frequenz 16,67 Hz (Bahnstrom). Die Amplitude des Störsignals liegt zwischen 2 – 5 mV. Das Nutzsignal der Einspeisung durch die RESECS ist ein Rechtecksignal mit einer Periodenlänge von 0.8 s (entspricht 1.25 Hz) und zeichnet sich durch die typischen On-Off-Wechsel aus ($t_{\text{on}} = 0.2$ s; $t_{\text{off}} = 0.2$ s). In den RefTek-Registrierungen variiert die Nutzsignalamplitude zwischen < 1 mV und > 100 mV. Neben den durch den Bahnstrom verursachten Störungen gibt es weitere ungeklärte Störquellen, welche die Registrierungen deutlich beeinflussen. Dazu zählen u.a. ein im Spektrum beobachteter niederfrequenter Anteil kleiner 1 Hz, sowie extreme Drifterscheinungen. Letztere sind eventuell durch Elektrodenpolarisation bedingt. Die Signalbearbeitung umfasste eine Spektralanalyse, Driftkorrektur und Tiefpassfilterung bis 10 Hz. In der Abbildung 2.1-2 ist beispielhaft das Frequenzspektrum einer Aufzeichnung dargestellt. Abb. 2.1-3 zeigt ein Beispiel einer Registrierung über 8 Stunden.

Die Geometriefaktoren für die einzelnen Messwerte wurden mit FE-Modellierungen (DCFEMLIB, C. RÜCKER ET AL., 2006) unter Berücksichtigung der Grubengeometrie berechnet. Auf diese Weise wurde der Einfluss der Streckentopographie sowie derjenige benachbarter Strecken auf die gemessenen Daten als Topographieeffekt berücksichtigt. Er ist als Verhältnis von Halbraum-Geometriefaktor zum „wahren“ Geometriefaktor aus der FE-Modellierung definiert. Anschließend wurden die Daten als Pseudosektion dargestellt.

Die Abb. 2.1-4 zeigt die zusammengefassten Pseudosektionen der scheinbaren spezifischen Widerstände. Die Werte variieren zwischen $< 10^3 \Omega\text{m}$ und $> 10^6 \Omega\text{m}$, wobei im östlichen Profilabschnitt generell höhere Werte vorherrschen als im westlichen Bereich. Im mittleren

Profilbereich um die Wendel bei Profilmeter 0 treten niedrigere Werte zwischen $< 10^3 \Omega\text{m}$ und $10^4 \Omega\text{m}$ auf.

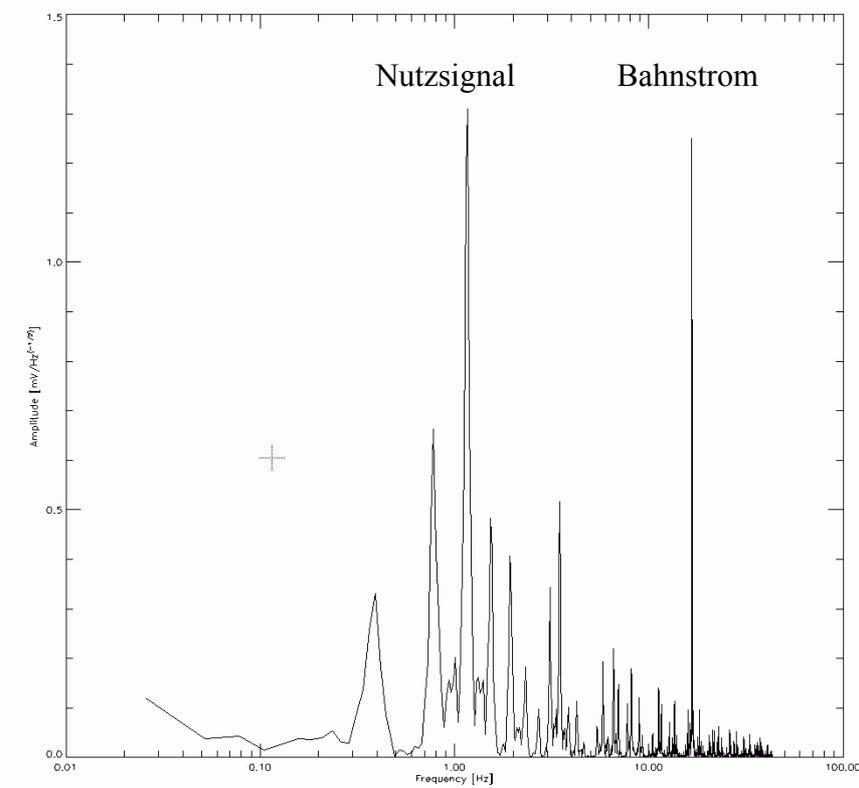


Abb. 2.1-2: Spektrum einer RefTek-Registrierung, Frequenzbereich 0 – 50 Hz, mit Nutzsignal (1.25 Hz) und Bahnstrom (16.67 Hz) als energiereichste Spektralanteile.

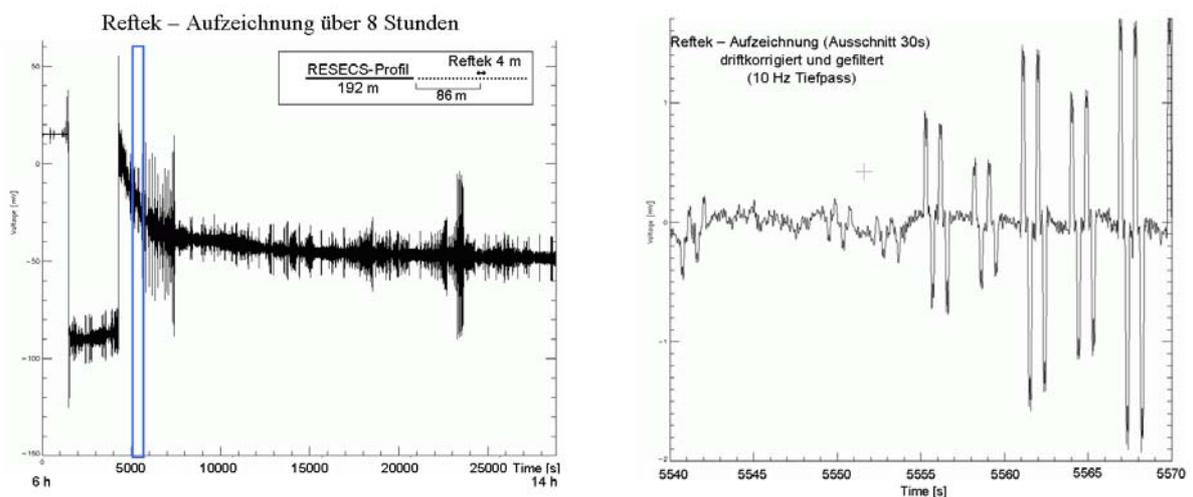


Abb. 2.1-3: RefTek-Registrierung über 8 Stunden (links) und bearbeiteter Ausschnitt.

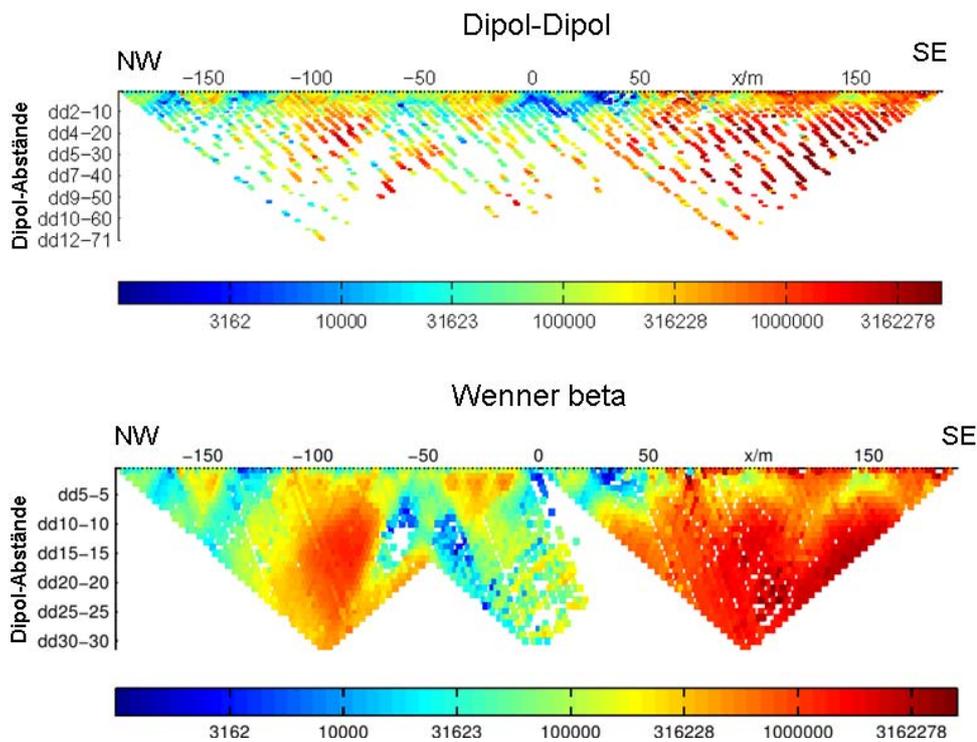


Abb. 2.1-4: Pseudosektionen der scheinbaren spezifischen Widerstände in Ωm , berechnet mit FE-Geometriefaktoren (Berücksichtigung der Grubengeometrie)

Zur Inversion der Daten wurde das Programm dc2dinvres von T. Günther verwendet. Das Inversionsergebnis (Abb. 2.1-5) zeigt im östlichen Profilbereich ($> 30\text{ m}$) ab etwa 5 m Tiefe generell sehr hohe spezifische Widerstände ($> 10^6\ \Omega\text{m}$), so dass dort das Vorhandensein laugenführender Bereiche ausgeschlossen werden kann. Die oberflächennahen etwas niedrigeren Widerstände dürften auf die (feuchtere) Sohlenaufschüttung zurückzuführen sein. Die drei Bereiche mit maximaler Amplitude decken sich mit der Lage einer von der Strecke abzweigenden Wendel und zwei weiteren (unterhalb der Messstrecke) kreuzenden Strecken.

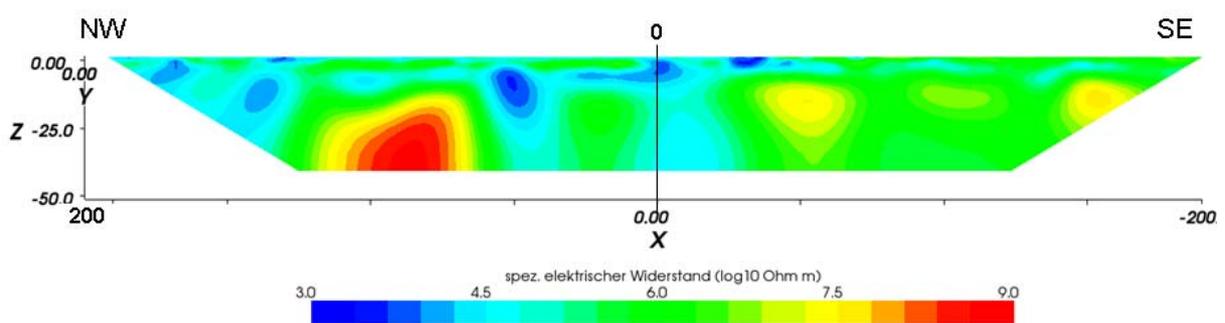


Abb. 2.1-5: Ergebnis der Geoelektrikmessungen in Sollstedt als Widerstands-Tiefenmodell unter der Hauptförderstrecke (Inversion der Dipol-Dipol- und Wenner-beta-Daten mit DC2DinvRes, GÜNTHER ET AL., 2006).

Im westlichen Profilbereich bei etwa -50 m zeigt sich eine deutliche niederohmige Anomalie (ca. $10^4\ \Omega\text{m}$), die (ebenso wie eine weitere niederohmige Anomalie bei 0 m) auf einen laugenführenden Bereich hindeuten könnte. Noch weiter westlich (zwischen -60 und -120 m)

folgt ein sehr hochohmiger Bereich, der mit einer aufgelockerten Bruchzone erklärt werden könnte. Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass dieses Maximum mit einem bekannten angestauten Hartsalzvorkommen im Hangenden der Strecke korrespondiert (3D-Effekt).

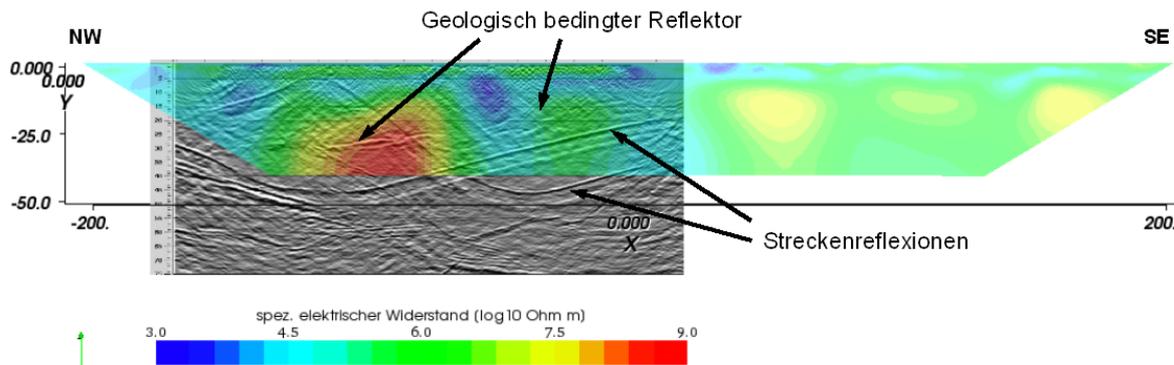


Abb. 2.1-6: Ergebnis von Geoelektrik- und Seismikmessungen in Sollstedt: Widerstandstiefenmodell (farbig) und migrierte Stapelsektion der S-Welle ($v_s = 2600$ m/s).

Die aufgefundenen Anomalien korrelieren deutlich mit den Ergebnissen der anderen eingesetzten geophysikalischen Verfahren (Radar LIAG Hannover, Sonar: Fraunhofer-IZFP Dresden, Seismik: K-UTECH Sondershausen GmbH und Universität Leipzig). So treten im Bereich der hochohmigen Anomalie deutliche Reflektoren von Sonar und Seismik auf. In den niederohmigen Bereichen zeigen sich deutlich erhöhte Sonar-Reflektivitäten. Eine mögliche Erklärung ist das Vorhandensein einer trockenen, gasführenden Beanspruchungszone im Anhydrit, die von einer benachbarten aufgelockerten und laugenführenden Zone begleitet wird und durch hohen Druck des eingeschlossenen Gases gegen diese abgedichtet ist.

Standort B – Teutschenthal

An der gemeinsamen Referenzlokation in der neu aufgefahrene Verbindungsstrecke zwischen den Grubenfeldern Teutschenthal und Angersdorf über der westlichen Kante des Gebirgsschlagsfeldes von 1996 wurden im November 2006 auf einem 400 m langen Profil auf der Sohle geoelektrische Messungen durchgeführt. Die Geoelektrik-Messungen erfolgten wie im Bergwerk Sollstedt mit 200 Elektroden im Abstand von 2 m auf der Sohle. Auf 3 überlappenden Profilen (Länge jeweils 200 m) wurden vollständige Pseudosektionen mit verschiedenen Elektrodenkonfigurationen gemessen. Zusätzlich erfolgten Spannungsregistrierungen mit den Transientenrekordern RefTek 125 „TEXAN“.

Aufgrund sehr guter Ankopplungsbedingungen für die Stromeinspeisung und die für derartige Messbedingungen unüblich hohen Speiseströme (bis zu 100 mA) wurde bereits während der Messungen eine oberflächliche leitfähige Schicht vermutet. Die Auswertung der geoelektrischen Rohdaten zeigt tatsächlich eine leitfähige, dünne Schicht an der Oberfläche der Sohle ($100 \Omega\text{m}$), gefolgt von einem kontinuierlichen Übergang zu hohen scheinbaren spezifischen Widerständen bis $10^5 \Omega\text{m}$. Nach Filterung der Daten lagen für die Inversion insgesamt 12.800 Einzelmesswerte vor.

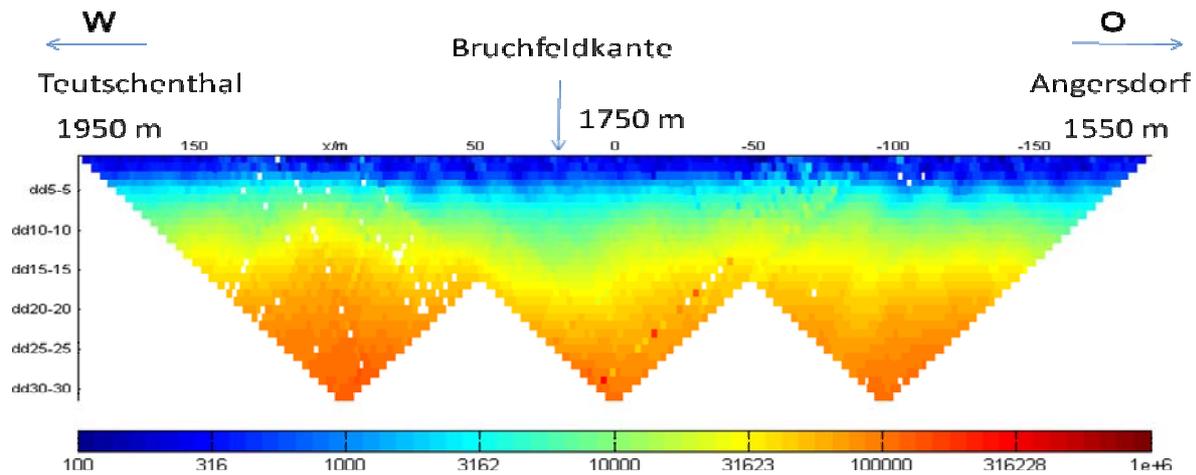


Abb. 2.1-7: Pseudosektion der scheinbaren spezifischen Widerstände in Ωm . (Messung Sohle-Profil, Wenner- β Konfiguration)

Die zusätzlich ausgewerteten Eigenpotentiale an den Elektroden zeigen auf dem Profil wenig Dynamik. Nur an einigen Lokationen sind starke Amplituden bis zu 25 mV zu beobachten. Besonders auffällig ist der Bereich um Profilmeter +100, der durch die Verwendung der Sonarschrauben als Speise-/Empfangselektroden erklärt werden kann. Diese befanden sich direkt auf der Fahrspur im feuchten Milieu, die beobachteten Anomalien sind durch Redoxprozesse an den Elektroden zu erklären. Dieser Effekt, bei der sich freibewegliche Ladungsträger durch chemische Reaktionen an den Grenzflächen metallisch leitender Materialien ansammeln, ist auch für die weiteren Anomalien auf dem Profil verantwortlich. Dort wurden allerdings die üblichen Stahlbolzen-Elektroden, die 30 cm oberhalb der Sohle angebracht waren, verwendet. Die Anomalie bei Profilmeter -30 stimmt mit der Lokation einer kartierten Laugenstelle (VILWOCK & REICHENBACH, 2005) überein.

Ursache für die hohen Leitfähigkeiten der sohlennahen Bereiche sind die untertägigen Bewetterungsverhältnisse sowie Betonarbeiten zur Fahrspurbefestigung auf der Verbindungsstrecke der Grubenfelder Teutschenthal und Angersdorf. Gleichzeitig zeichnet sich dieser oberflächennahe Bereich der Sohle durch geringe seismische Wellengeschwindigkeiten aus (siehe Kap. 2.4 Abb. 2.4-24). Die leitfähige Sohle wirkt als Abschirmung und verringert die Eindringtiefe der Stromsignale ins Gestein, gleichzeitig verursacht die Existenz der oberflächlichen Schicht mit geringen spezifischen elektrischen Widerständen Probleme bei der Anpassung der berechneten Modellwerte an die realen Daten im Inversionsprozess.

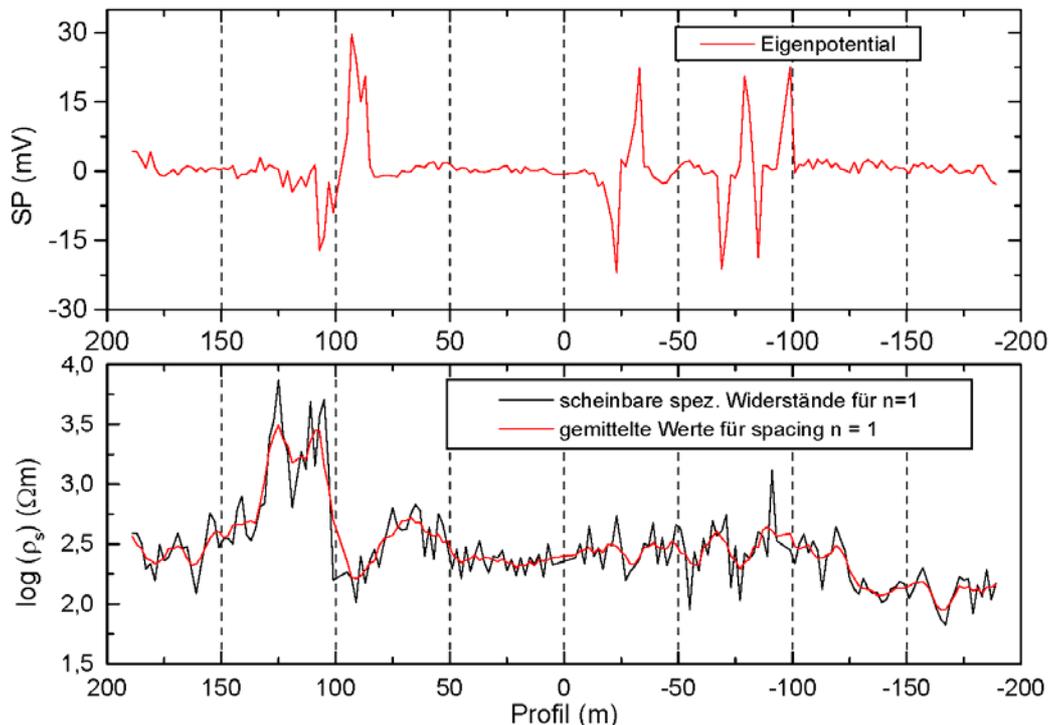


Abb. 2.1-8: Rohdatenprofil für die 4-Punktanordnungen mit kleinstem Abstand zwischen Strom- und Spannungsdipol (kleinste Dipolseparation 2 m). Oben: Eigenpotentialanomalien auf der Sohle. Unten: scheinbare spezifische elektrische Widerstände (Rohdaten, geglättet mit MA-Filter).

Das Inversionsergebnis (Abb. 2.1-9, berechnet mit BERT nach GÜNTHER, RÜCKER ET AL., 2006) zeigt ein Zweischiicht-Modell der wahren Widerstandsverteilung bis in eine Tiefe von 20 m unterhalb der Sohle.

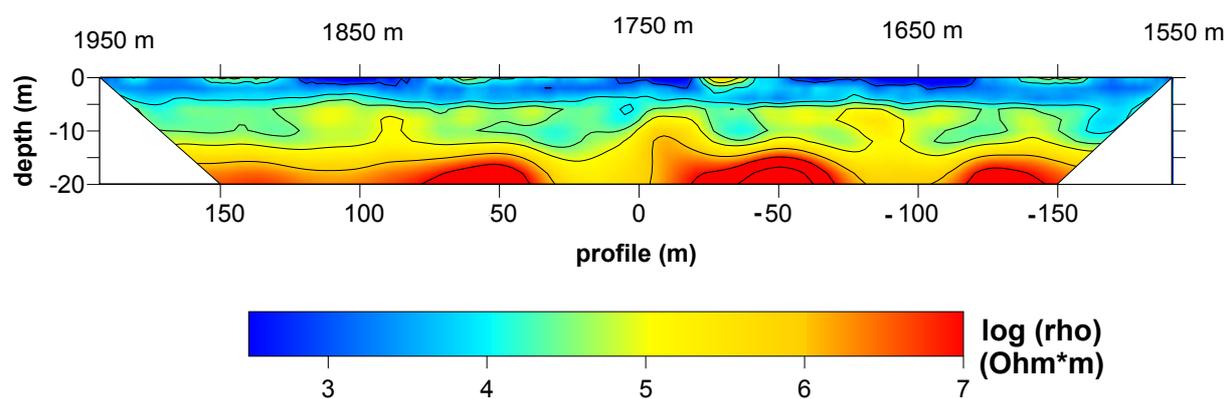


Abb. 2.1-9: Widerstands-Tiefensektion berechnet aus den Wenner-Messungen auf der Sohle vom Mai 2007 (Inversion mit BERT- Algorithmus)

Der oberflächlich leitfähige Bereich bis in eine Tiefe von ca. 3 m hat charakteristische Widerstände von $1000 \Omega\text{m}$, während ab einer Tiefe von 5 m die Widerstände bis auf $10^7 \Omega\text{m}$ ansteigen. Strukturelle Variationen innerhalb der zweiten Schicht sind kaum zu erkennen. Auffällig ist jedoch eine ausgedehnte leitfähige Anomalie mit Widerständen um $10^4 \Omega\text{m}$ im

Zentrum des Profils. Aufgrund des großen Widerstandscontrasts zur niederohmigen Deckschicht ist während des Inversionsprozesses keine optimale Datenanpassung erreichbar. Frühere Untersuchungen am Referenzstandort Bischofferode (KULENKAMPPF ET AL., 2002; Salinargeophysik I) und Testmessungen am Standort Teutschenthal (Messung eines Querschnittsprofils, s. Kap. 2.1.5) zeigten, dass derartige Zweischichtfall-Situationen (d.h. große Widerstandscontraste bedingt durch hohe Leitfähigkeiten im Bereich der Sohle) typisch sind für Elektrodenanordnungen auf der Sohle. Vergleichbare Messungen am Stoß weisen diese Charakteristik nicht auf und erlauben dadurch deutlich differenziertere Einblicke in das Streckenumfeld.

Im Mai 2007 wurden daher neben Wiederholungsmessungen auf der Sohle zusätzliche Testmessungen auf einem Kurzprofil am Stoß durchgeführt. Diese belegten, dass Messungen am Stoß nicht unmittelbar durch derartig hohe Oberflächenleitfähigkeiten beeinträchtigt werden. Deshalb wurden im September 2007 weitere geoelektrische Messungen auf einem knapp 400 m langen Profil am südlichen Stoß (Profilmeter 1550 bis 1950) durchgeführt.

Um die Mehrdeutigkeit der Interpretation zu reduzieren, wurden die Messungen am Südstoß im Februar 2008 ergänzt und damit die Datendichte erhöht. Die Sichtung der Rohdaten als Pseudosektionen der Messungen am südlichen Stoß lässt vergleichbare Größenordnungen der scheinbaren spezifischen Widerstände von $10^4 \Omega\text{m}$ bis $10^6 \Omega\text{m}$ wie bei den Sohle-messungen erkennen, wobei hier die oberflächennahen leitfähigen Schichten weitestgehend fehlen. Lateral deuten sich drei Strukturbereiche an. Der mittlere Profilteil zwischen -50 m und +50 m (Auffahrung +1700 m bis +1800 m) zeichnet sich durch deutlich geringere scheinbare spezifische Widerstände ($< 10^4 \Omega\text{m}$) als die beiden Randbereiche ($> 10^6 \Omega\text{m}$) aus. Die Datenqualität der Messdaten ist aufgrund der schlechten Elektroden-Ankopplungsbedingungen am Stoß und des damit verbundenem geringeren Signal-zu-Noise-Verhältnisses deutlich schlechter, im Vergleich zu den Sohle-Messungen. Besonders im Ostteil des Profils sind mehrere Datenausfälle aufgetreten, die sich bei der Inversion ungünstig auswirken können. Für die Inversion konnten 11.090 Datenwerte verwendet werden.

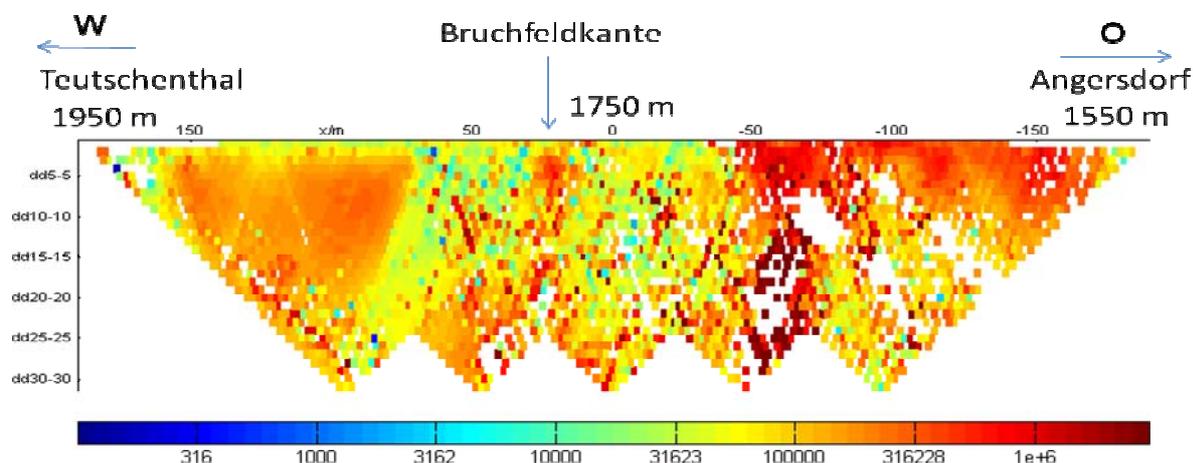


Abb.2.1-10: Pseudosektion der scheinbaren spezifischen Widerstände in Ωm . (Messung Stoß-Profil, Wenner- β -Konfiguration)

Das nach der Inversion vorliegende Widerstandsmodell entspricht im Wesentlichen der Dreiteilung der Pseudosektionen. Besonders der Ostteil des Profils (Auffahrung +1550 m bis +1700 m, Richtung Angersdorf) wird durch hohe Widerstände größer $10^6 \Omega\text{m}$ bestimmt. Im Zentralteil des Profils wird diese Zone durch zwei Anomalien mit geringeren spezifischen Widerständen kleiner $10^4 \Omega\text{m}$ unterbrochen, während nach Westen hin (Auffahrung +1830 bis +1900 m, Richtung Teutschenthal) die Widerstände stoßnah wieder deutlich zunehmen.

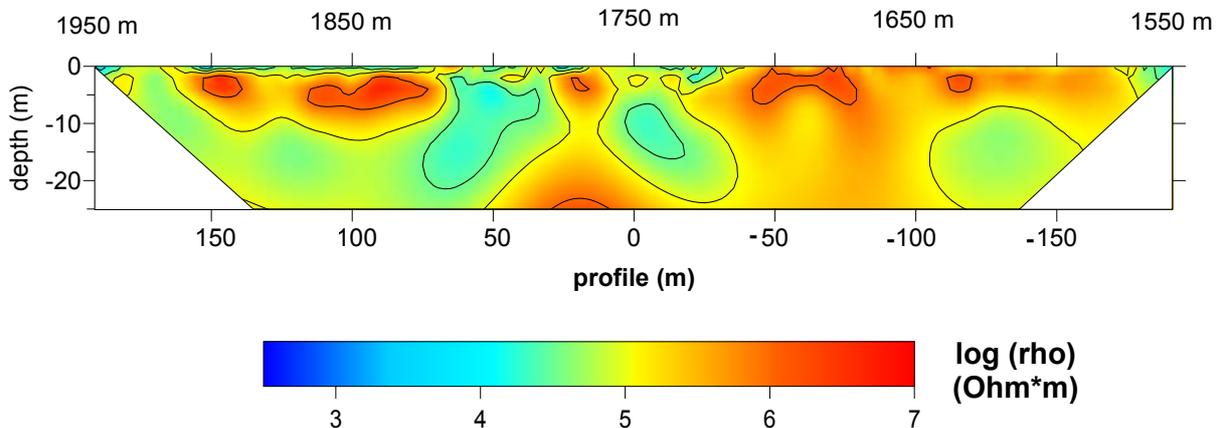


Abb.2.1-11: Widerstands-Tiefensektion berechnet aus den Wenner-Messungen am Südstoß im November 2007 und Januar 2008 (Inversion mit BERT-Algorithmus).

Die ermittelte Widerstandsverteilung beider Profile in der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf lässt folgende Interpretation zu:

- Die niedrigen Widerstände im mittleren Profilbereich können auf eine höhere Klüftigkeit und Permeabilität in Verbindung mit Feuchtevorkommen infolge der mechanischen Beanspruchung während des Bruchereignisses hinweisen. Der Hauptanhydrit besitzt eine charakteristische Klüftung in Form von Lagerklüften, die besonders über dem Bruchfeld ausgeprägt ist. Diese Lagerklüfte sind z.T. feucht, sie wurden latent von der vorhandenen Feuchtigkeit im umgebenden Gestein gespeist, insbesondere in dem durch Gebirgsschlag und Absenkung aufgelockertem Gebiet. Im Bereich zwischen Auffahrung + 1750 m und + 1800 m detektierten sowohl die Georadar-Messungen als auch die seismischen Untersuchungen eine Zerrüttungszone ca. 10 m unterhalb der Sohle. In diesem Bereich liegt die westliche Bruchfeldkante des Gebirgsschlags von 1996 (vgl. auch MINKLEY, 2008).
- Die geringeren Widerstände im Zentralteil beider Profile können evtl. auch durch erhöhte Anhydritanteile im Steinsalz erklärt werden. Auch die stärkere Widerstandsabnahme mit der Tiefe im Westen kann mit einem stärkeren Anstieg des Anhydrits zusammenhängen. Im Bereich der Referenzlokation werden mächtige Anhydritklippen vermutet, die ein welliges Relief des Hauptanhydrits bewirken. Ebenso können im Leine-Steinsalz angetroffene Tonlöser und eingelagerte Tonflocken die geringen Widerstände verursachen. Häufig sind vor dem Hauptanhydrit im Steinsalz höhere Anhydrit-Konzentrationen anzutreffen (SCHWANDT, pers. Mitt., 2007). Diese Annahme wird zum Teil auch durch die Dichtemessungen an in der

Strecke oberflächlich gewonnenen Gesteinsproben bestärkt (Kap. 2.2). In diesem Abschnitt der Verbindungsstrecke wurde Anhydrit bzw. Anhydritmittel direkt im Streckenbereich angefahren. Gleichzeitig sind im unmittelbaren Umfeld dieser Anhydritmittel sowohl Störungen mit Feuchtestellen und Lösungsaustritten (z.B. bei Auffahrungsstation +1717 m), gehäuft ehemalige Feuchtestellen im dm bis m-Bereich im Kristallsalz (Auffahrung +1640 m bis +1770 m), als auch Kristallnester mit großkristallinem Steinsalz kartiert worden, in deren Umfeld häufig Lösung auftritt (VILWOCK & REICHENBACH, 2005).

2.1.5 Methodische Untersuchungen am Referenzstandort Teutschenthal

2.1.5.1 Wiederholungsmessungen zur Feststellung der Reproduzierbarkeit geoelektrischer Messungen

Das Ziel der Untersuchungen bestand im Nachweis der Reproduzierbarkeit untertägig gewonnener geoelektrischer Messdaten an ausgewählten Referenzlokationen in Teutschenthal. Das Interesse der Analysen lag neben der Bewertung der Datenqualität vor allem in der Beobachtung zeitlich ablaufender, bergbaulich bedingter Veränderungen in der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes (z.B. der Einfluss der Feuchtesituation in streckennahen Gesteinsschichten durch veränderliche Bewetterungsverhältnisse sowie die Überwachung der Prozesse im Umfeld einer Laugenaustrittsstelle).

A) Bewetterungseinflüsse

An der verfahrensübergreifend bearbeiteten Referenzlokation in der Verbindungsstrecke zwischen den Grubenfeldern Teutschenthal und Angersdorf über der westlichen Bruchfeldkante des Gebirgsschlages von 1996 erfolgten im November 2006 auf einem 400 m langen Profil (Teutschenthal Verbindungsstrecke Station 1550 m bis 1950 m) gleichstromgeoelektrische Messungen, die im Mai und im September 2007 auf einem 190 m langen Teilprofil wiederholt wurden. Als Ergebnis der ersten Messungen im November wurde ein elektrischer Zweischichtfall detektiert (Kap. 2.1.4).

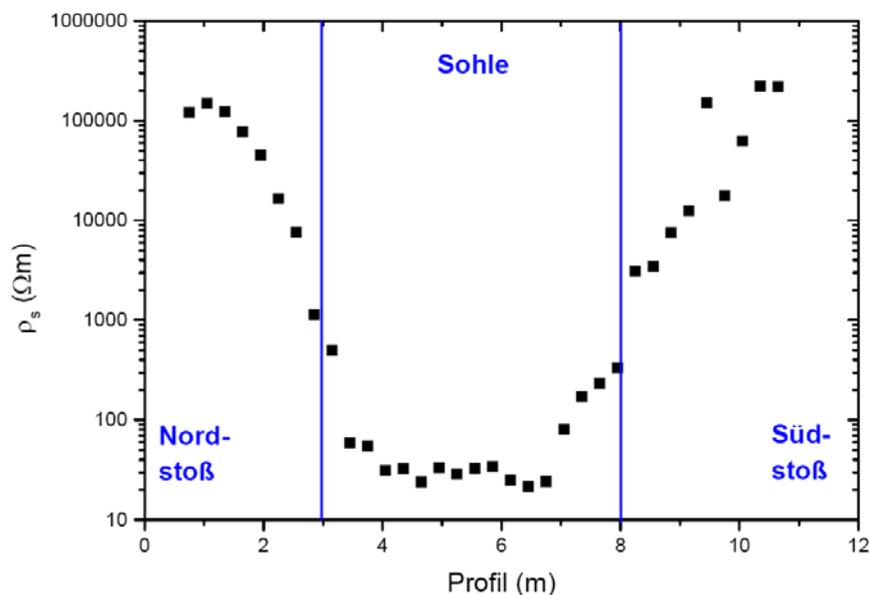


Abb. 2.1-12: Verteilung der scheinbaren spezifischen Widerstände an der Streckenkontur (gemessen auf einem U-Profil mit Dipol-Dipol-Konfiguration, Elektrodenabstand 30 cm).

Zur Verifizierung der jahreszeitlichen Variationen des Bewetterungseinflusses wurden die Messungen auf dem mittleren Teilabschnitt des Profils (1700 m bis 1800 m) zu drei verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt (November 2006, Mai 2007 und September 2007). Die Situation der leitfähigen Sohleschicht bestand zu allen Messzeitpunkten. Während der Messkampagne im September 2007 wurde ein Streckenquerschnittsprofil gemessen, um die Widerstandsverteilung in Abhängigkeit vom Durchfeuchtungsgrad zu bestimmen. Dieses Querschnittsprofil verdeutlicht die Widerstandsvariation, insbesondere die sehr geringen elektrischen Widerstände auf der Sohle.

Die Sohle und sohlennahen Bereiche der Stöße zeigen aufgrund der Durchfeuchtung Widerstandswerte kleiner $100 \Omega\text{m}$, während der trockene Stoß scheinbare spezifische elektrische Widerstände größer $10^5 \Omega\text{m}$ aufweist.

Aufgrund dieser Beobachtungen wurde die Wiederholungsmessung des Geoelektrikprofils am trockenen Südstoß der Verbindungsstrecke vorgeschlagen und während der Messkampagne im September 2007 umgesetzt.

Aus den Wiederholungsmessungen auf der Sohle wird die zeitliche Stabilität der Widerstandsverhältnisse deutlich. Die Darstellung der relativen Änderungen der Widerstandsmesswerte zeigt eine deutliche Zunahme der Widerstände um bis zu 50 % im Mai 2007 im Vergleich zur Messung im November 2006. Im Vergleich dazu sind die Widerstandswerte im September 2007 nur geringfügig um 10 % zur November-Messung 2006 erniedrigt.

Die Ursache für die integrale Änderung zwischen den Einzelmessungen liegt im Einfluss der Oberflächenschicht. Deren Wassergehalt verändert sich in Abhängigkeit von der saisonalen untertägigen Bewetterungssituation (im Winterhalbjahr trockener als im Sommerhalbjahr). Mit steigendem Wassergehalt sinkt der elektrische Widerstand dieser dünnen Auflockerungszone, diese Variation des Widerstandes in unmittelbarer Elektrodenumgebung beeinflusst alle Messwerte in gleichem Maße im Sinne eines Offsets. Dieser Effekt konnte durch analytische Berechnungen an Zweischichtfall-Modellen bestätigt werden.

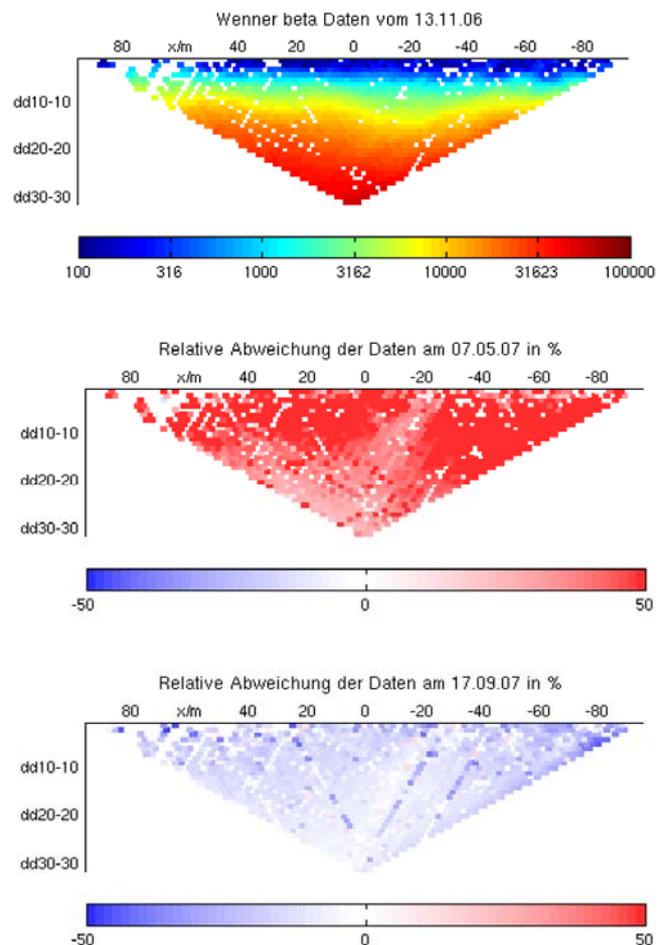


Abb. 2.1-13: Relative Änderung der Widerstandsmesswerte zur Nullmessung (Wenner- β) im November 2006. (Zunahme der Widerstände um ca. 50 % im Mai 2007, Abnahme um ca. 10 % im September 2007.)

B) Überwachung einer Laugenaustrittsstelle

Klüfte, Schichtgrenzen und bergbaulich verursachte Auflockerungszonen können die Barrierewirkung des Salzgesteins extrem beeinträchtigen, da diese Zonen hydraulische Wegsamkeiten darstellen. Feuchtestellen in diesen Problembereichen können in Zusammenhang mit vorhandenen Fließwegen eine unkontrollierte Migration von abgelagerten Schadstoffen zur Folge haben. Die DC-Geoelektrik ist ein Verfahren, welches sich besonders zur Erkundung und langfristigen Beobachtung der Entwicklung von Laugenzone anbietet (YARAMANCI, 2000). Bereits kleine Änderungen im Wassergehalt können den spezifischen elektrischen Widerstand des Salzgesteins (Steinsalz, Anhydrit, Carnallit) um Größenordnungen verändern.

Für das zeitliche Monitoring der Prozesse im Umfeld einer Feuchtestelle wurde ein Laugenzutritt aus dem Liegenden (Hauptanhydrit) an der Wetterumfahrung der Verbindungsstrecke Teutschenthal – Angersdorf ausgewählt. Das Messprogramm umfasste 4 Erkundungseinsätze über einen Zeitraum von 18 Monaten.

- *Januar 2005:* Messungen Stoß- und Sohlenprofil, Länge je 32 m mit 64 Elektroden, Ziel: Charakterisierung der Laugenzone
- *November 2005:* Messungen Stoß- und Sohlenprofil, Länge je 32 m mit 64 Elektroden, Ziel: Veränderungen an der Laugenaustrittsstelle?
- *Januar 2006:* Messungen Firste-, Sohlenprofil, Süd- und Nordstoßprofil in der Wetterumfahrung, Südstoßprofil Verbindungsstrecke, Länge je 32 m mit 64 Elektroden, 2 Ringprofile, Ziel: Widerstandscharakteristik der Wetterstrecke unter Beachtung des dreidimensionalen Problems, Veränderungen an der Laugenaustrittsstelle?
- *Juli 2006:* Verlängerung des Südstoßprofils in der Wetterumfahrung auf 80 m mit 160 Elektroden, Ziel: Erfassung von Änderungen der Laugenzone, Ausbreitung laugenführender Bereiche nach Westen? Einfluss von Ausbau der Wetterumfahrung und der Lüfterinstallation in Wetterstrecke?

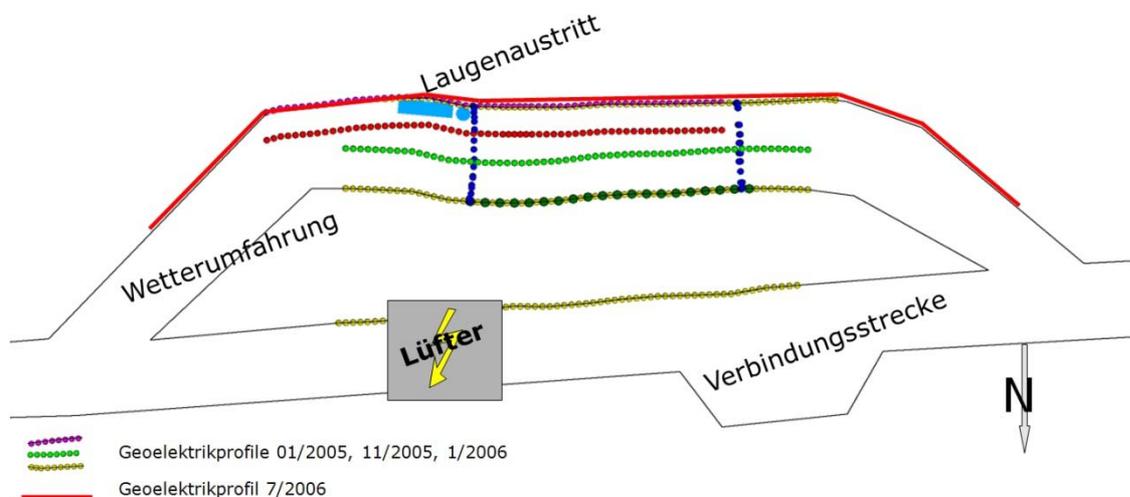


Abb.2.1-14: Messgebiet Verbindungsstrecke Teutschenthal – Angersdorf mit Wetterumfahrung, inklusive Lage der Geoelektrikprofile.

Der Laugenzufluss in der Umfahrung der Wettererschleuse (Südstoß 423 m, Teufe -550 mNN, ca. 60 m über den Kaliabbauen der Grubenfelder Teutschenthal / Angersdorf) wird seit dem 11.08.04 beobachtet. Der Zutritt erfolgt aus dem klüftigen, feinkristallinen Hauptanhydrit (A3), anfängliche Zutrittsmengen von max. 13 m³/d sind im Verlauf der Messkampagnen auf ca. 1-2 m³/d abgesunken.

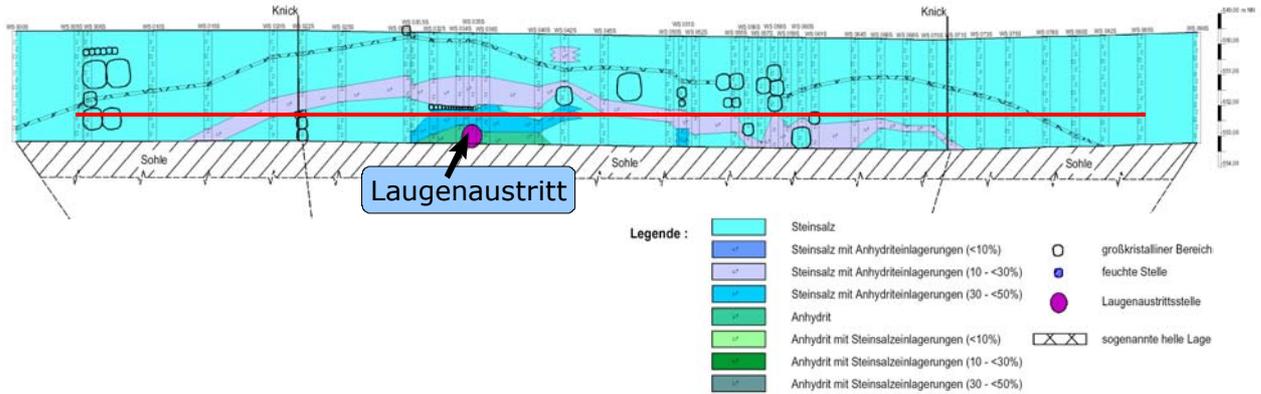


Abb. 2.1-15: Geologische Strukturen am Südstoß der Wetterumfahrung (aus VILWOCK & REICHENBACH 2005) mit Laugenzufluss aus dem Liegenden (Hauptanhydrit A3) und die Lage des Geoelektrikprofils am Stoß (- -).

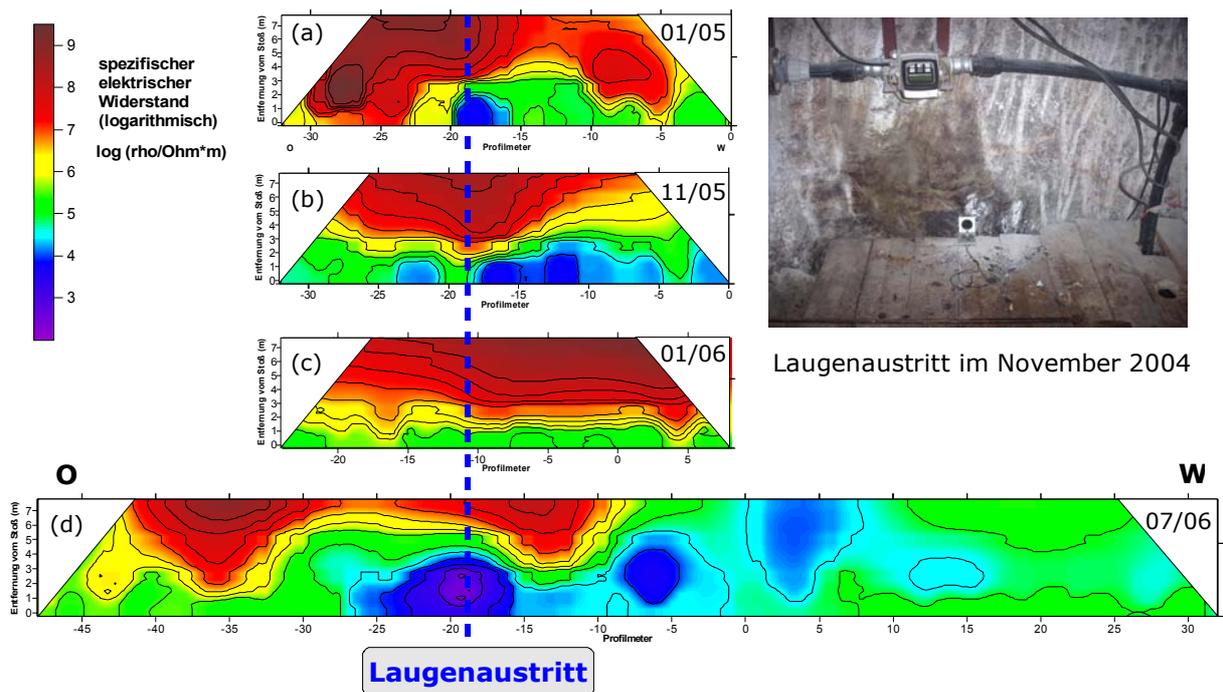


Abb.2.1-16: Entwicklung der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Umfeld der Laugenaustrittsstelle. Dargestellt sind die Inversionsergebnisse der Dipol-Dipol-Messungen auf dem Profil am Südstoß der Wetterstrecke zur Erfassung der zeitlichen Variation der Durchfeuchtungsverhältnisse von (a) Januar 2005 bis (d) Juli 2006.

Zu Beginn der geoelektrischen Untersuchungen im Januar 2005 wurden Zuflussmengen von bis zu 7000 l/d beobachtet (pers. Mitt. M. FINDER, GTS). Das Widerstandsbild zeigt ein begrenztes, lokales Minimum im Bereich der Austrittsstelle mit Widerstandswerten kleiner $10^3 \Omega\text{m}$, umgeben von hochohmigen Bereichen bis zu $10^9 \Omega\text{m}$, welche trockenes Salzgestein charakterisieren (Abb. 16(a)). Während der Messkampagne im November des gleichen Jahres

sind die Zuflussraten auf bis zu 1800 l/d abgesunken. Trotzdem sind deutlich größere Profilbereiche von der Salzlösung beeinflusst und erhöhte Widerstandswerte werden erst ab 3 m Stoßentfernung festgestellt. Die starke Durchfeuchtung des Gebirges (mit Pfützen auf der Sohle) und mögliche neue Migrationswege entlang von Auflockerungsbereichen im Anhydrit können als Gründe für die Ausbreitung der Widerstandsanomalien nach Westen in Betracht gezogen werden.

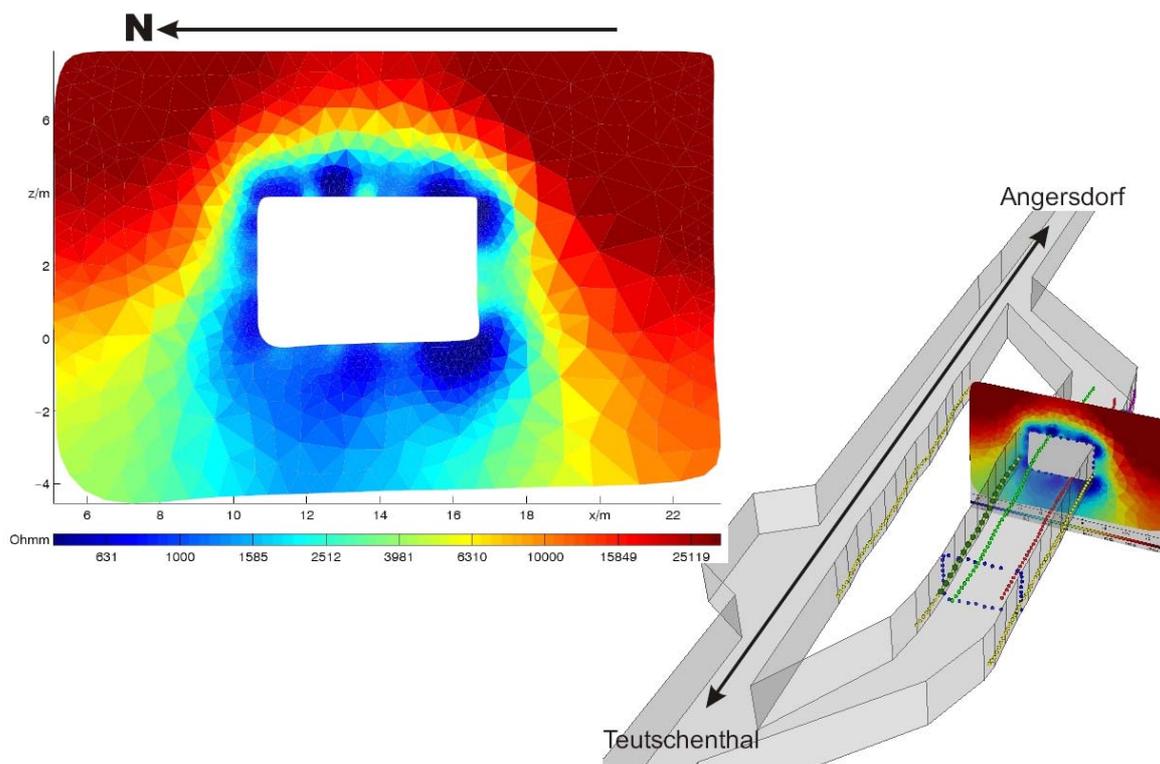


Abb. 2.1-17: Ergebnisse eines Ringprofils im Umfeld der Laugenaustrittsstelle sowie Darstellung des Widerstandsquerschnitts im Grubengebäude der Wetterumfahrung.

Die Auswertung eines Ringprofils zeigt die Verteilung leitfähiger Zonen in den streckennahen Bereichen. Aufgrund der mechanischen Beanspruchung durch die Auffahrung der Strecke kommt es zur Ausbildung lokaler Auflockerungszonen. Oberflächliche Feuchtigkeit (z.B. durch Bewitterung oder benachbarte Laugenaustrittsstellen) kann durch die erhöhte Permeabilität dieser Zonen ins Gebirge eindringen. Dies wird im Querschnitt des Widerstandsmodells deutlich. Besonders die sohlennahen Regionen sind durch die eindringenden Lösungen beeinflusst.

Eine Wiederholung der Messungen im Januar 2006 bestärkt die Annahme, dass hauptsächlich die Durchfeuchtung der sohle- und streckennahen Bereiche für die Widerstandsanomalien verantwortlich ist. Die Austrittsmengen sind relativ konstant auf einem Niveau um 1500 l/d verblieben. Aufgrund der winterlichen Bewitterungssituation (geringe Luftfeuchtigkeit) sind nur stoßnah (bis ca. 2 m Stoßentfernung) geringere Widerstandswerte gemessen worden. Das Profil wurde im Juli 2006 für die Untersuchung möglicher Migrationspfade in Richtung Westen erweitert (Abb. 2.1-16d). Auf dem östlichen Profilabschnitt ist das lokale Widerstandsminimum am Laugenaustritt sowie die höheren Widerstände für entsprechend

trockenes Gebirge ab 3 m Stoßentfernung charakteristisch. Die Widerstandswerte im Bereich der Profilverlängerung nach Westen sind deutlich niedriger als die im ursprünglich übermessenem Profilabschnitt. Dies kann mit einer höheren Durchfeuchtung in diesem Bereich erklärt werden kann. Die Lösungszutrittmengen lagen zu diesem Zeitraum stabil bei 1500 l/d, allerdings erfolgten die Messungen kurz nach Betonagearbeiten infolge des Ausbaus der Wetterumfahrung, bei der der Einbau eines Lüfter sowie mehrerer Schleusentore erfolgte. Außerdem war vor der Messung die Laugenpumpe ausgefallen. In diesem Bereich konnten noch Laugenpfützen auf der Sohle beobachtet werden.



Abb. 2.1-18: Situation im Juli 2007 am westlichen Profilende. Die Elektroden befinden sich in ca. 1,2 m Höhe am Stoß, auf der Sohle sind großflächige Laugenpfützen.

Der Vergleich der Dipol-Dipol-Messdaten mit kleinster Dipolseparation $n=1$ (0.5 m) der einzelnen Messkampagnen gibt einen Eindruck von der Reproduzierbarkeit der Widerstandsmessungen (Abb. 2.1-19). Bei diesen minimalen Aufstellungsweiten werden insbesondere die elektrodennahen Bereiche untersucht, da der sensitive Erkundungsbereich ca. dem Elektrodenabstand = 0.5 m entspricht. Damit kann von einer geringen Beeinflussung dieser Messdaten durch die feuchte Sohle ausgegangen werden, während geringe elektrische Widerstandsmesswerte hauptsächlich auf die Durchfeuchtung im nächsten Elektrodenumfeld zurückzuführen sind. Die Daten der Messungen Januar 2005, November 2005 und Juli 2006 zeigen alle ein deutliches Widerstandsminimum um $10^3 \Omega m$ im Bereich der Laugenaustrittsstelle. Besonders charakteristisch ist die offensichtliche Reproduzierbarkeit der Messungen 11/05 und 07/06. Die größten Änderungen zur ersten Messung 01/05 sind Widerstandsabnahmen im Umfeld der Laugenaustrittsstelle. Sie lassen sich durch lokale Feuchteakkumulation im umgebenden Gestein erklären.

Anhand der Analyse der scheinbaren spezifischen Widerstände kann eine deutliche Korrelation zwischen der oberflächlichen Widerstandsverteilung und zeitlicher Schwankungen in der Gesteinsfeuchte gezeigt werden. Eine Inversion der Daten zu wahren Widerstandswerten ist für eine Prozessbeobachtung nicht zwingend notwendig, zur qualitativen Bewertung der Laugensituation ist bereits die Betrachtung der scheinbaren spezifischen Widerstände geeignet und kann damit zeitnah vor Ort untertage durchgeführt werden. Anhand von Laboruntersuchungen an Gesteinsproben kann dann aus dem

Widerstandswert ein integraler Feuchtegehalt im elektrodennahen Gesteinsvolumen abgeschätzt werden.

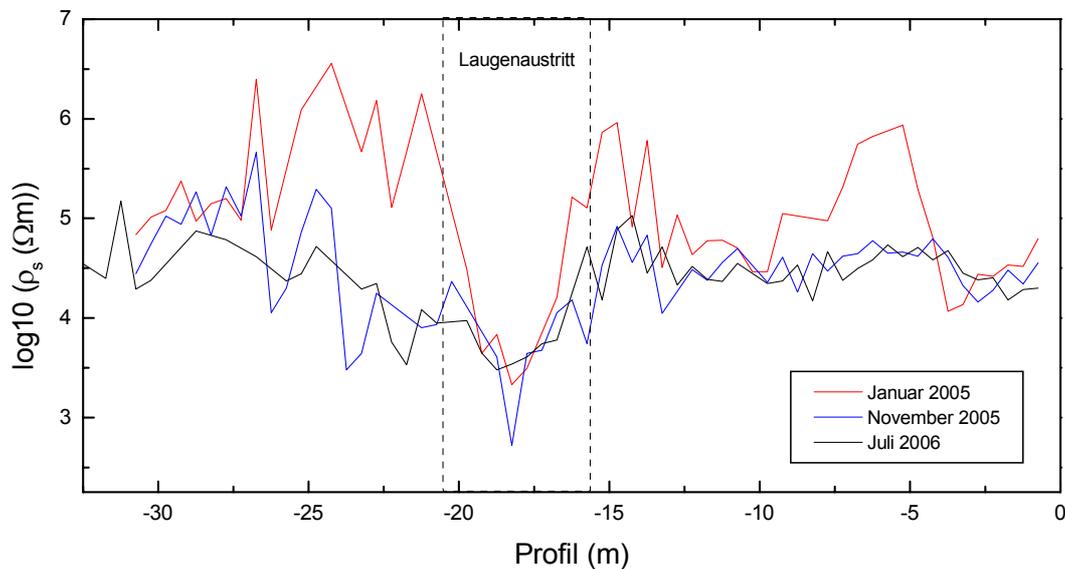


Abb. 2.1-19: Vergleich der Dipol-Dipol-Messdaten der ersten Dipolseparation. Deutlich ist eine Verbreiterung der Widerstandsabnahme mit der Zeit zu erkennen, welches sich im Bereich der Laugenaustrittsstelle mit einer Amplitude von zwei Zehnerpotenzen abzeichnet.

Die Untersuchungen am Referenzstandort Teutschenthal haben gezeigt, dass die gleichstromgeoelektrische Messmethode sehr sensibel auf zeitliche Änderungen im spezifischen elektrischen Widerstand des Salzgesteins reagiert. Sie ist damit ein geeignetes Verfahren, welches zur zeitlichen Überwachung der Qualität der Barriereigenschaften eingesetzt werden kann. Es konnten sowohl Änderungen an der Streckenoberfläche aufgrund unterschiedlicher Bewetterungssituationen als auch zeitliche Widerstandsvariationen im Umfeld eines Laugenaustritts in Korrelation zur Austrittsmenge nachgewiesen werden.

Allgemein sollte für die Überwachung zeitlich ablaufender Prozesse folgendes beachtet werden:

- *Zeitlich dichte und möglichst äquidistante Messintervalle an dauerhaft installierten Messelektroden*, damit bietet sich zusätzlich die Möglichkeit der statistischen Datenanalyse (Mittelwerte und Standardabweichungen, Ablauf deterministischer Prozesse)
- *Auswahl spezifischer Messkonfigurationen*, welche einen hohen Informationsgehalt über betroffene Problembereiche besitzen, Darstellung der Änderungen zum Erstzustand gibt sofort Auskunft über die Art der Veränderung bzw. Stabilität der Zustände
- *Einfluss zeitlich ablaufender chemischer Prozesse an den Elektroden* (Korrosion und damit verbundene Erzeugung elektrochemischer Potentiale) auf Langzeitbeobachtungen noch nicht hinreichend geklärt.

2.1.5.2 **Machbarkeitsstudie: Geoelektrische Deckgebirgserkundung mittels Übertage-Untertage-Gleichstromgeoelektrik**

Im Rahmen des Projektes werden innovative Instrumentarien zur Bewertung der geologisch-bergbaulichen Situation von Salzbergwerken hinsichtlich Integrität und Stabilität gesucht. Dazu gehört auch die Untersuchung des Deckgebirges beispielsweise hinsichtlich möglicher Leckagen in Aquiferen, Veränderungen infolge von Subrosion und bergbaubedingten Destabilisierungen (Bruchgefahr, Gebirgsschläge). Das ausgewählte Gebiet im Bereich des Teutschenthaler Gebirgsschlages vom 11.9.1996 mit Geländesenkungsraten bis zu 13 m stellt eine solche interessante Lokation dar.

Die Gleichstromgeoelektrik kann anhand der räumlichen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes sowie seiner Beziehung zu petrophysikalischen Parametern (z.B. Wassergehalt, Klüftigkeit) ein Abbild des Deckgebirgzustandes erstellen. Hochauflösende tomographische Methoden setzen eine hohe Messdichte und möglichst gleichmäßige Überdeckung des Messgebietes voraus. Die „Durchstromung“ des Deckgebirges, das heißt die übertägige Stromeinspeisung bei gleichzeitiger untertägiger Spannungsregistrierung, bietet die Möglichkeit, einen hohen Überdeckungsgrad für die tomographische Rekonstruktion zu erreichen und daraus hochauflösende Widerstandsmodelle zu entwerfen.

In einem Geländeexperiment im Jahre 2006 im Bereich des Referenzgebietes an der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf (650 m unter GOK) wurden erste Stromeinspeiserversuche mit Maximalströmen um 1 A durchgeführt und mittels untertägig angebrachter Empfangsdipole überwacht. Die Spannungsregistrierungen zeigen nur nach aufwendiger Datenbearbeitung das stark verrauschte Eingangssignal. Grund für diese extremen Beeinträchtigungen sind die elektrischen Störquellen im Umfeld des Messgebietes – Bahnlinie, Kiesgrube, Windpark, chemische Industrieanlagen bei Halle, Autobahn. Hinzu kommt die geologische Situation mit Aquiferen im Buntsandstein, die als gute elektrische Leiter abschirmend wirken.

Das Experiment wurde im Mai 2007 mit einer leistungsstarken Stromquelle wiederholt. Der Transmitter TSQ-4 der Firma Scintrex mit einer Leistung von 30 kW bietet die Möglichkeit bei guten Ankopplungsbedingungen der Stromelektroden bis zu 10 A in den Boden einzuspeisen. Für das Experiment wurden 4 Einspeisedipole an der Erdoberfläche installiert, sie bestanden aus zwei Strominjektionselektroden zu je 30 Edelstahlerdern auf einer Fläche von 1 m². Die Dipole hatten eine Länge von 900 m, 700 m, 420 m und 220 m, die maximalen Speiseströme erreichten 9,1 A. Die Einspeisesignale sind auf einer Stromregistrierung (mittels Transientrekorder RefTek) für die spätere Datenbearbeitung festgehalten. Auf der untertägigen Verbindungsstrecke Teutschenthal – Angersdorf wurden 12 Empfangsdipole eingerichtet. Die Registrierung der Spannungssignale an den Receiverlektroden (Stahlbolzen im Steinsalz) erfolgte mit Transientrekordern RefTek 125a, digitalen Datenrekordern, die in diesem Falle die Signale mit einer Auflösungsgenauigkeit von 60 nV und mit einer Samplingrate von 200 Hz abtasteten. Die Länge der Receiverdipole variierte zwischen 8 m, 10 m, 25 m, 50 m und 100 m. Die Datenbearbeitung der Spannungssignale umfasste die Selektion der relevanten Einspeisezeiten, Driftkorrektur, Filterung (Abschneiden aller Frequenzgehalte oberhalb 7 Hz) und der Stapelung der Einzelperioden zur Unterdrückung des gleichverteilten Rauschanteils.

Das Ergebnis der Datenbearbeitung zeigt für 10 der 12 Empfangsdipole eindeutig das eingespeiste Rechtecksignal der TSQ-4. In Abhängigkeit von der Receiverdipollänge variieren die gemessenen Potentialdifferenzen zwischen 5 bis 10 μV (für Dipole von 8 m bis 10 m Elektrodenabstand) und über 100 μV für die 100 m-Dipole. Dieser Zusammenhang zwischen Dipollänge und gemessener Spannung entspricht den Grundlagen der Maxwell'schen Theorie. Je größer der Elektrodenabstand desto größer ist die messbare Spannung, aber desto integraler ist auch der Informationsgehalt der jeweiligen Messung. Häufig müssen größere Elektrodenabstände gewählt werden, um die gesuchten Einspeisesignale aus dem Rauschpegel der Messung extrahieren zu können. Bei dem hier vorgestellten Experiment ist es gelungen, trotz komplexer Geologie und extremer Aufstellungsgeometrie Spannungssignale in ausreichender bis hervorragender Qualität an allen Dipollängen festzustellen.

Die erfolgreiche Studie zeigt die Machbarkeit, für zukünftige Deckgebirgserkundungen die hochauflösende Widerstandstomographie mit der hier getesteten Messtechnologie zum Einsatz zu bringen. Unter Verwendung bereits vorhandener Ausrüstung (leistungsstarke Stromquelle, Transientenrekorder, Software zur Datenbearbeitung) und der Adaption der mehrfach erfolgreich in der Tiefengeoelektrik angewendeten Messstrategie zur Zwischenfelderkundung sind Untersuchungen der geologischen Strukturen bis in 700 m Tiefe realisierbar.

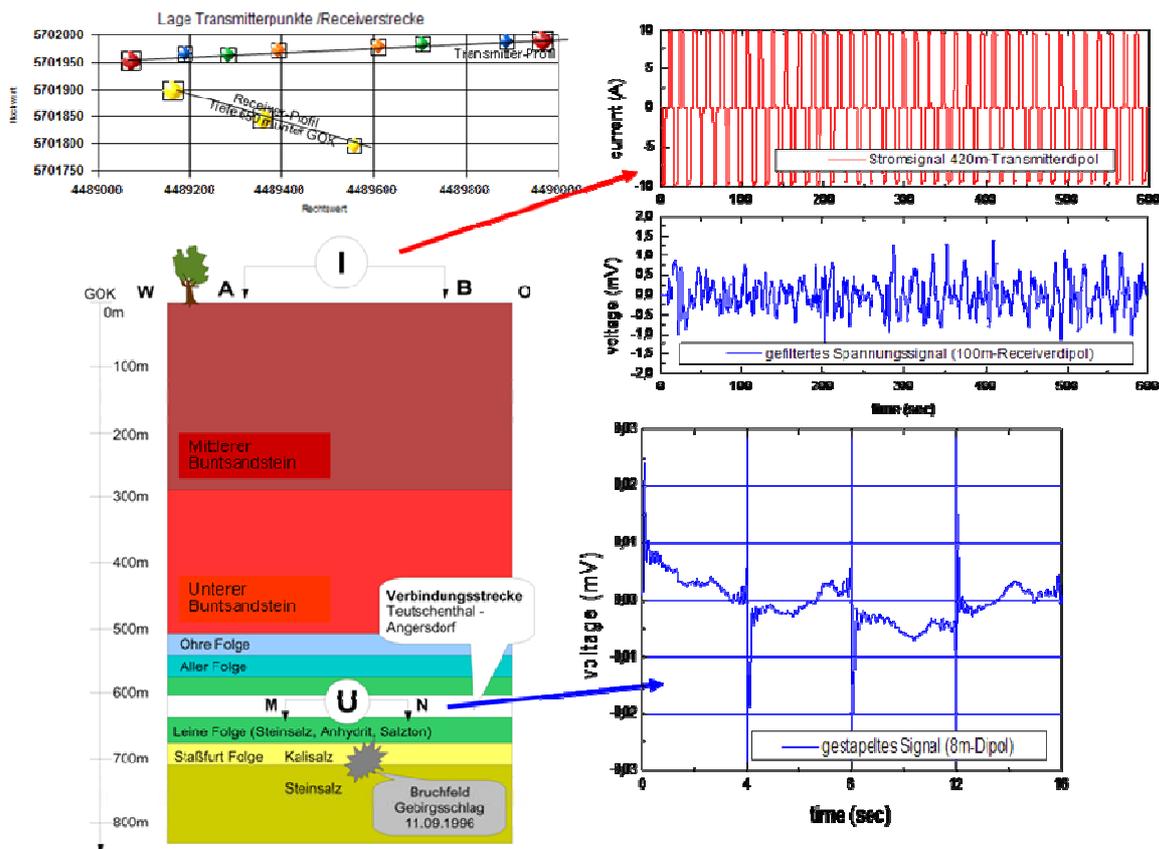


Abb. 2.1-20: Machbarkeitsstudie. Messgeometrie mit Transmitter- und Receiverdipolen sowie die Sendestromsignal und die gefilterten Spannungssignale. Das gestapelte Spannungssignal zeigt deutlich die Form des eingespeisten Transmittersignals.

2.1.6 Zusammenfassung Geoelektrik

Die Geoelektrik eignet sich im untertägigen Einsatz in Salzbergwerken besonders um Salzlösungsvorkommen oder Bereiche erhöhter Feuchtigkeit zu detektieren, da der Parameter spezifischer elektrischer Widerstand in Abhängigkeit vom Wassergehalt mehrere Größenordnungen überstreicht (Werte $< 100 \Omega\text{m}$ bei salzlösungsgesättigten Salzgesteinen bis zu Werten $> 10^8 \Omega\text{m}$ bei trockenem Salzgestein).

Geoelektrische Untertagemessungen wurden an den Referenzstandorten A (Sollstedt) und B (Teutschenthal) durchgeführt. In der ehemaligen Hauptförderstrecke im Bergwerk Sollstedt stand die Frage nach Salzlösungsvorkommen im Liegenden Basalanhydrit bzw. im darunterliegenden Hauptdolomit im Vordergrund. Während im östlichen Profilbereich generell sehr hohe elektrische Widerstände zu beobachten waren und Salzlösungsvorkommen in Streckennähe damit ausgeschlossen werden können, wurde im westlichen Profilbereich eine deutliche niederohmige Anomalie bei etwa -50 m gefunden, die auf einen salzlösungsführenden Bereich hindeuten könnte. Es ist jedoch auch möglich, dass dieser Bereich wie der Bereich um die Wendel bei Profilmeter 0 infolge von Auflockerungen und Feuchtigkeitseintrag durch Arbeiten in der Strecke erhöhte Feuchtwerte aufweist.

In der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf wurde über der Bruchfeldkante des Gebirgsschlagsfeldes von 1996 ebenfalls eine anomale Zone oberflächennaher niedriger Widerstände und auffällig hoher Widerstände in größerer Tiefe detektiert. Die oberflächennah niedrigen Widerstände können auf eine höhere Klüftigkeit und Permeabilität in Verbindung mit Feuchtevorkommen infolge der mechanischen Beanspruchung während des Bruchereignisses hinweisen.

Wie Untersuchungen an numerischen Datensätzen (Kapitel 2.3) zeigen, besteht die Aussicht, künftig durch Messungen auf mehreren geeignet ausgewählten Profilen (Linienprofile an beiden Stößen, auf der Sohle und an der Firste, Kreis- oder U-Profile über den Streckenquerschnitt) und Anwendung neuartiger 3D-Inversionssoftware, die im Laufe der Projektarbeiten wesentlich verbessert werden konnte, eine optimale Richtungszuordnung von Anomalien zu erzielen. Dies erfordert jedoch die Zugänglichkeit aller Streckenoberflächen, was an den Referenzstandorten nicht immer gegeben war (zu starke Abschaltungen, Unzugänglichkeit der Firste) und auch nicht immer gegeben sein wird. Trotzdem kann auch schon durch die Erweiterung der Datensätze um ein oder zwei weitere, räumlich geeigneter Messauslagen eine Verbesserung der Aussagesicherheit erreicht werden (vgl. auch Abb. 2.3-10 in Kapitel 2.3)

Neben der Detektion von salzlösungsführenden Bereichen oder bergbaulich bedingter Feuchtezonen ist die Geoelektrik insbesondere auch als Monitoringverfahren geeignet, wie mit der Überwachung der Laugenzutrittsstelle im Bereich der Wetterschleuse der neuen Verbindungsstrecke Teutschenthal Angersdorf gezeigt werden konnte.

Die Möglichkeit, zusätzliche Informationen über das Deckgebirge zu erhalten, wurde durch einen erneuten Machbarkeitstest für Übertage-Untertage-Messungen am Standort Teutschenthal grundsätzlich bestätigt.

2.2 Labormessungen an Probenmaterial der Referenzstandorte

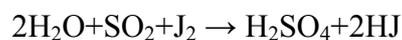
Der spezifische elektrische Widerstand von Salzgestein weist in Abhängigkeit vom Wassergehalt sehr große Variationen auf. Er variiert zwischen $<100 \Omega\text{m}$ für laugengefüllte Bereiche bis $>10^8 \Omega\text{m}$ für trockenes Salzgestein. Geoelektrische Untertagemessungen in Salzbergwerken sind daher gut geeignet, um streckennahe Feuchtezonen zu detektieren. Die genaue Zuordnung der in-situ gemessenen spezifischen elektrischen Widerstände zu Gesteinsparametern (etwa eine Umrechnung in Feuchtegehalte) ist jedoch problematisch.

Im Vergleich zu früheren Abschätzungen (z. B. KULENKAMPPF & YARAMANCI 1993, YARAMANCI 1994) konnten in den beiden Vorgängerprojekten (KULENKAMPPF et al. 2002, JUST et al., 2004) exakte Messungen des Wassergehalts (± 10 ppm) mit dem Karl-Fischer-Verfahren, simultan mit Messungen des elektrischen Widerstandes vorgenommen werden. Im Gegensatz zu den früheren Untersuchungen konnte mit verbesserten Labormethoden im Variationsbereich der Parameter kein signifikanter Unterschied zu den in-situ Ergebnissen gefunden werden. Allerdings war die Datenbasis für allgemeine Aussagen über Salinargesteine und für die Kalibration von Modellen noch zu klein.

Im Rahmen des aktuellen Projektes wurden die Untersuchungen fortgesetzt, indem an einer Vielzahl von Proben von den Referenzstandorten Bestimmungen des Wassergehaltes, des spezifischen elektrischen Widerstandes und simultane Messungen beider Größen durchgeführt wurden. Mittels Gaspyknometermessungen wurde als zusätzlicher Gesteinsparameter die Dichte bestimmt.

2.2.1 Wassergehaltbestimmung mit dem Karl-Fischer-Verfahren

Für die Bestimmung des Wassergehalts der Salzproben wurde das Karl-Fischer-Verfahren verwendet das z.B. bei SCHOLZ (1983) beschrieben wird. Das Verfahren wurde 1935 von Karl Fischer entwickelt und beruht auf einer Redox-Titration. Unter der Voraussetzung des Vorhandenseins von Wasser oxidiert Jod Schwefeldioxid zu Schwefeltrioxid und wird dabei selbst zu Jodid reduziert. Es entstehen Schwefelsäure und Jodwasserstoff:



In einem Titriergefäß wird der aus der Probe ausgetriebene Wasserdampf in ein Lösungsmittel (Methanol oder das Speziallösungsmittel ComposolverE) eingeleitet und mit dem KF-Reagenz (Composite5) austitriert. Solange sich Wasser in der Lösung befindet, wird Jod zu Jodid reduziert und die Elektroden bleiben polarisiert. Tritt jedoch freies Jod auf, so bricht auf Grund des Depolarisationseffekts die Spannung zwischen den Elektroden zusammen. Die Steuerung des Titrationsprozesses erfolgt mittels eines potentiometrischen Detektors. Ein konstanter Strom wird eingespeist und die sich an den Enden der Elektroden, welche sich in der Lösung befinden, einstellende Spannung gemessen. Die Zufuhr des Titriermittels wird so gesteuert, dass ein vorgegebener Spannungsendwert erreicht wird.

Die zugegebene Titermenge ist demzufolge ein Maß für den Wassergehalt. Geringe Wassermengen (bis 10 mg) können so mit hoher Messgenauigkeit (μg -Bereich) bestimmt werden. Kalibriert wird der Titer durch Titration bekannter Wassermengen (Wasserstandard). Die verwendete Karl-Fischer Apparatur (KFS Titrino; Metrohm) besteht aus einem Titrierstand, einem Titriergerät, einem Trocknungsofen und einer Pumpe, die trockene Luft durch den Ofen in das Titriergefäß pumpt. Ein LabView®-Programm berechnet und speichert unter Eingabe der Kalibrierergebnisse die abgegebene Wassermenge.

2.2.2 Simultane Karl-Fischer-Wassergehalts- und Widerstandsmessungen

Der spezifische elektrische Widerstand von Salzgestein ist sehr hoch, da nur der geringe Anteil freien Wassers effektiv zur Leitfähigkeit beitragen kann. Da sich die elektrolytische Lösung außerdem in einem hauptsächlich von den Korngrenzen der Kristalle begrenzten, engen Porensystem befindet, treten an der Kontaktfläche Probe - Stromelektrode hohe Ankopplungswiderstände auf. Bei Messungen mit einer 2-Elektrodenanordnung können diese jedoch nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des ersten Vorgängerprojektes (KULENKAMPFF et al. 2002) ein neuer Messplatz mit einer 4-Elektroden-Anordnung aufgebaut. Der Messplatz besteht aus

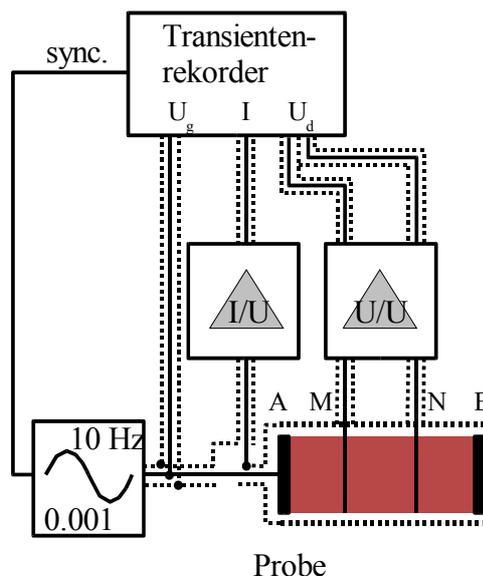
- einem Transientenrekorder (Gould-Nicolet Integra 10),
- einem Stromvorverstärker (SI SR-570),
- einem Spannungsvorverstärker (Sensortechnik Meinsberg),
- einem Signalgenerator und
- einer abgeschirmten Messzelle (Eigenbau).

Der Signalgenerator erzeugt bei frei wählbarer Ausgangsspannung (ca. 2 V) ein Sinussignal bestimmter Frequenz, das als Messsignal zur Stromelektrode der Probe und als Referenzsignal dem Transientenrekorder zugeführt wird. Während die Stromelektrode A direkt mit dem Signalgenerator verbunden ist, wird der Strom über das Gehäuse der Messzelle zur Stromelektrode B geführt. Der Messstrom I , die Generatorspannung U_g und die Spannung zwischen den Potentialelektroden U_m werden durch den Transientenrekorder aufgezeichnet.

Zur Auswertung der Daten wurde eine im Vorgängerprojekt eigens entwickelte LabView®-Software verwendet. Das Programm passt ein sinusförmiges Signal durch einen Levenberg-Marquardt-Algorithmus an die Messdaten an.



Messplatz der Simultanmessungen mit Aufbau Elektrik, Trocknungsofen und Karl-Fischer-Titration



Prinzipskizze zum experimentellen Aufbau der elektrischen Labormessungen

Abb. 2.2-1: Messanordnung zur Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes

Aus den im Bergwerk entnommenen und in Folie eingeschweißten Handstücken wurden später Mini-Bohrkerne von 1,9-2,5 cm Länge und einem Durchmesser von 2 cm ausgebohrt. Da die Handstücke direkt vom Stoß stammten, war das Herstellen dieser Proben teilweise problematisch. Die Handstücke stammen aus der Auflockerungszone, waren damit gestört, mechanisch beansprucht und spröde.

Die Einspeiseelektroden wurden mit Leitplaste an den Stirnflächen der Probe angekoppelt. Für die Aufnahme der ringförmigen Potentialelektroden wurde in etwa 2 mm Abstand zu den Stirnflächen eine dünne Nut in die Probe gefräst. Für die Bestimmung des Wassergehalts wurde der im Vergleich zum Original- vergrößerte Ofeneinsatz, der in der Werkstatt des Instituts speziell angefertigt wurde, genutzt.

2.2.3 Wassergehalt und Dichte von Proben vom Referenzstandort Sollstedt

Am Referenzstandort Sollstedt wurde entlang des 400 m langen Geoelektrikprofils (Profilnullpunkt an Streckenwendel) Handstücke im 10 m Intervall aus dem Stoß entnommen und sofort in Folie eingeschweißt. Von diesen Handstücken wurden kleine Probenstücke (2 bis 3 g) bei 45 bis 90 °C im KF-Ofen getrocknet. Anschließend wurde mit Hilfe eines Gaspknometers Volumen und Dichte der Proben bestimmt.

Die Messungen ergaben insgesamt geringe Wassergehalte um 0.2 bis 1 mg/g. Lediglich im Westteil des Profils wurden einige deutlich höhere Wassergehalte bis zu 4 mg/g ermittelt. Die Dichte zeigt keine großen Änderungen entlang des Profils, nahezu alle Werte liegen im Wertebereich zwischen 1.8 – 2.2 g/cm³. Diese Dichtewerte sind charakteristisch für Sylvit (1.8 – 2 g/cm³) und Steinsalz (2 – 2.2 g/cm³).

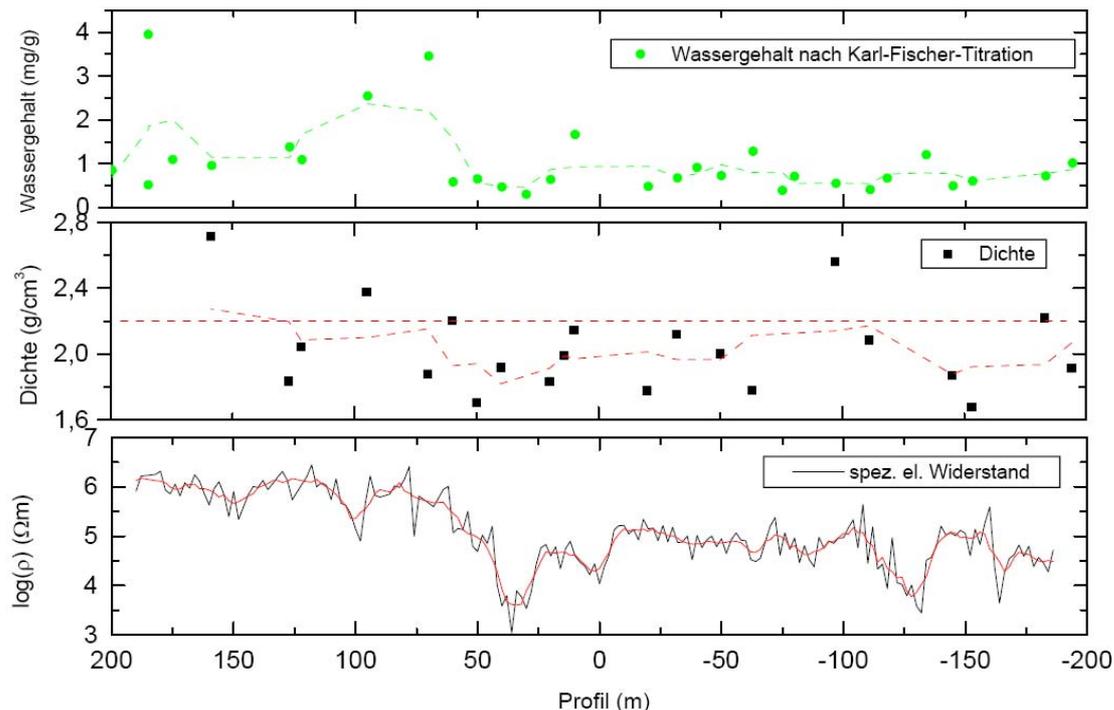


Abb. 2.2-2: Laboruntersuchungen an Probenmaterial vom Referenzstandort Sollstedt im Vergleich mit In-situ-Geoelektrik-Messungen

Eine Korrelation zwischen den in situ gemessenen spezifischen elektrischen Widerständen und den Wassergehalten kann nicht festgestellt werden. Trotz der hohen Oberflächenwiderstände im Westteil des Profils (Profilmeter 50 bis 200) wurden dort auch höhere Wassergehalte in den Proben ermittelt. Es ist jedoch anzumerken, dass die Probennahme durch Staubbeläge und Abschaltungen extrem erschwert wurde. Die Signifikanz der Probenstücke ist daher als gering einzustufen. Aus dem gewonnenen Probenmaterial war es nicht möglich, geeignete Kerne für die simultane Wassergehalts-Widerstandsmessung zu gewinnen.

2.2.4 Wassergehalt und Dichte von Proben aus dem Stoß der Verbindungsstrecke Teutschenthal - Angersdorf

Am Referenzstandort Teutschenthal wurde entlang des Profils (Profilmeter -200 bis +200 bei Auffahrungsstation +1550 m bis +1950 m, Profilmittelpunkt bei Station +1750 m) Handstücke im 10 m Samplingraster aus dem Stoß geschlagen und sofort in Folie eingeschweißt. Von diesen Handstücken wurden kleine Proben (2 bis 3 g) entnommen und bei 45 bis 90 °C im KF-Ofen getrocknet. Anschließend wurde mit Hilfe eines Gaspiknometers Volumen und Dichte der Proben bestimmt.

Die Messungen ergaben insgesamt geringe Wassergehalte um 0.2 bis 1 mg/g. Im Zentralteil des Profils zwischen -50 m bis +50 m werden durchschnittlich Werte um 0.7 mg/g erreicht, während an den Profilenenden die Durchschnittswerte bei 0.4 mg/g liegen.

Eine Trennung von Poren- und Kristallwasser war in den meisten Fällen aufgrund der zu geringen Wassermengen nicht möglich. Bei den meisten Proben handelte es sich allerdings um Steinsalz, welches kaum Kristallwasser beinhaltet. Den größten Anteil dürfte das oberflächlich anhaftende Wasser ausmachen. Die Hauptfehlerquelle bei den KF-Messungen stellt die Gerätedrift dar. Sie liegt normalerweise bei Beginn der Messung zwischen 1 und 2 $\mu\text{l}/\text{min}$, verhält sich aber während der Messung nicht ganz konstant.

Die Dichte variiert in Abhängigkeit von der Salzgesteinsart der untersuchten Proben (hauptsächlich Steinsalz und Anhydrit) zwischen 1.9 und 2.9 g/cm^3 (siehe Abb. 2.2-2). Zwischen Profilmeter -38 m und -68 m werden deutlich höhere Dichten um 2.7 g/cm^3 gemessen, dieses deutet einen erhöhten Anhydritanteil im Steinsalz hin. Diese Beobachtung korreliert sowohl mit der optischen Ansprache der Proben (dicht, grau) als auch mit dem geologischen Profil der GFE consult GmbH (VILWOCK & REICHENBACH 2005). In der Kartierung des Streckenbandes vom Nordstoß der Verbindungsstrecke wird ab Auffahrungsmeter +1700 m bis +1735 m (entspricht DC-Profil -50 m bis -15 m) ein durchgehendes Anhydritband bzw. Steinsalz mit erhöhten Anhydriteinlagerungen dokumentiert.

Gleichzeitig erwähnt der Bericht Feuchtestellen im Bereich des massiven Anhydrits zwischen Auffahrungsmeter +1711 m und 1717 m (Profilmeter -33 m bis -39 m). In diesem Bereich weisen auch unsere Proben erhöhte Wassergehalte auf. Die Feuchtestellen konnten auch 2008 nach Entfernung der Staubbeläge an den Stößen nachgewiesen werden.

Der Vergleich zwischen den Labordaten (Wassergehalt, Dichte) und den in-situ gemessenen spezifischen elektrischen Widerständen zeigt einige interpretierbare Ähnlichkeiten im Kurvenverlauf. Aus der Gegenüberstellung der gemittelten Kurven (Abb. 2.2-3) ist ein Zusammenhang zwischen erhöhter Dichte und niedrigen Widerständen ersichtlich. Dies ist auch aus Literaturwerten aus großskaligen In-situ-Messungen zu erwarten (ungestörte Salzgesteine: Dichte: Anhydrit = 2,9 g/cm^3 , Steinsalz = 2,2 g/cm^3 ; Widerstand: Anhydrit = $5 \times 10^4 \Omega\text{m}$, Steinsalz = $5 \times 10^5 \Omega\text{m}$); YARAMANCI (2000)). Ein derartiger Zusammenhang ist durchaus nachweisbar. Trockene Steinsalzbereiche ab Profilmeter -75 bis -175 weisen sehr hohe elektrische Widerstände ($> 10^5 \Omega\text{m}$) auf bei Dichtewerten kleiner 2.2 g/cm^3 . Zwischen Profilabschnitt -40 m bis -70 m und -10 m bis +50 m beobachtet man trotz hoher Dichtewerte ebenfalls erhöhte Widerstände, bei Profilmeter -20 fällt ein Dichteminimum mit einem Widerstandsminimum zusammen.

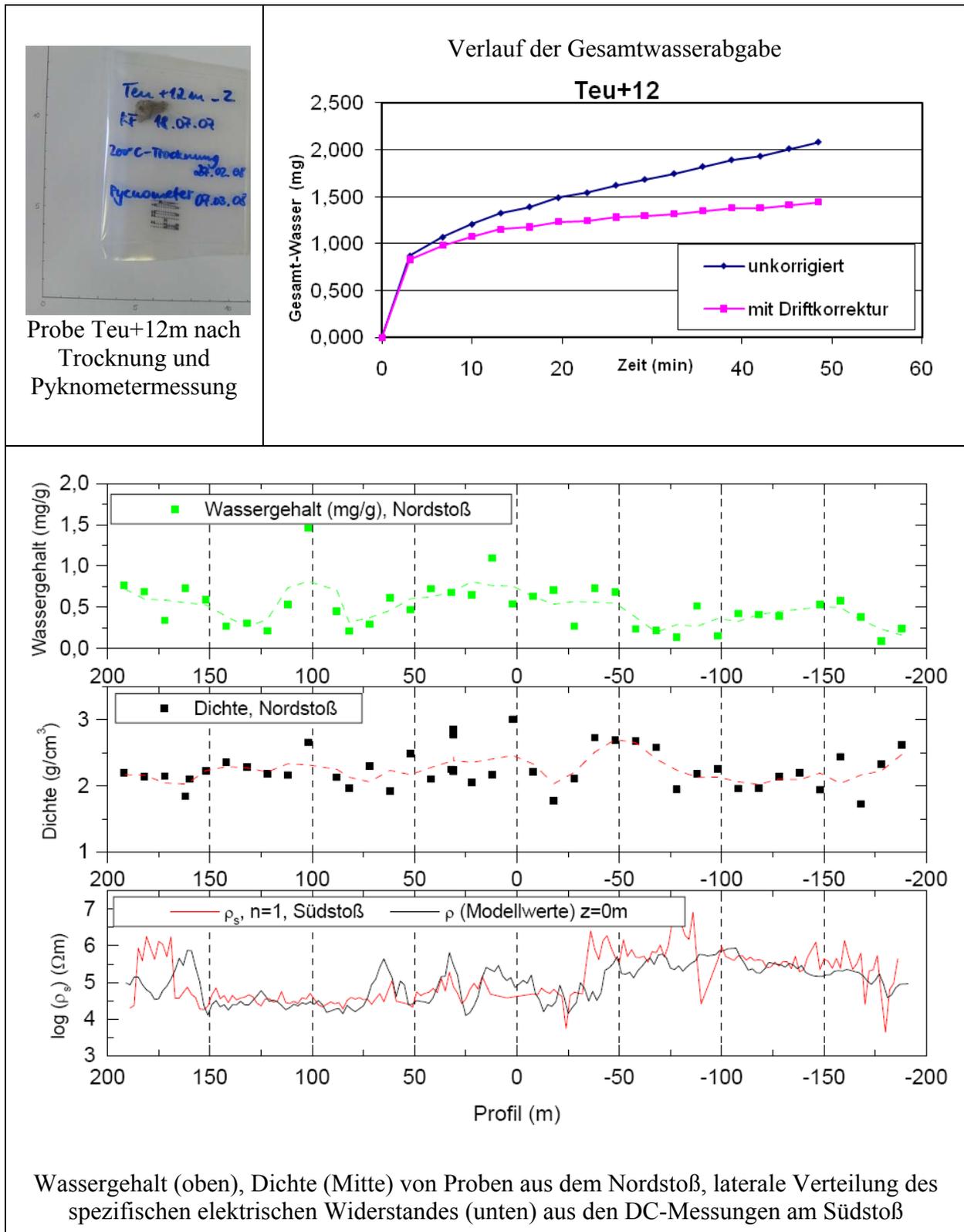


Abb. 2.2-3: Laboruntersuchungen an Probenmaterial vom Referenzstandort Teutschenthal im Vergleich mit in-situ Geoelektrik-Messungen

In die Interpretation der Messungen müssen ebenso die geologischen A-priori-Informationen einfließen. Niedrige Widerstände verbunden mit geringer Dichte weisen verstärkt auf das Vorhandensein von Feuchtezonen, wie sie im Bereich von Profilmeter -30 auch tatsächlich

detektiert wurden. Geklüfteter und trockener, wie auch tektonisch beanspruchter und verdichteter Anhydrit weisen ebenso wie trockenes Steinsalz mit erhöhtem Anhydritanteil hohe elektrische Widerstände auf, unterscheiden sich allerdings deutlich in ihren Dichtewerten vom reinen Steinsalz (Interpretation für Dichteanomalien bei Profilmeter -50 und +25).

Abweichungen von dem erwähnten Zusammenhang zwischen Dichtewerten und elektrischen Widerständen lassen sich aber auch durch die unterschiedlichen Erfassungsbereiche der Methoden erklären. Während die Dichte und Wassergehalt nur an kleinen Probenstücken (Probenahme im 10m-Intervall) punktuell untersucht wurden, arbeiten die geoelektrischen Messverfahren integrierend über ein Volumen im m^3 -Bereich. Weiterhin wird die starke lokale Differenzierung der Laborwerte am Beispiel der Proben vom Profilmeter +31 m deutlich, dort wurden vier Proben aus zwei unterschiedlichen Stoßhöhen untersucht. Die Probenstücke wiesen bereits optisch deutliche Unterschiede auf und zeigen auch im Parameter Dichte charakteristische Variationen (klare Proben: 2.2 g/cm^3 , massig graue Proben: 2.8 g/cm^3 = erhöhter Anhydritgehalt). Aufgrund der massiven Staubbilgungen an den Stößen war die eindeutige optische Ansprache der Proben meist erst übertage möglich.

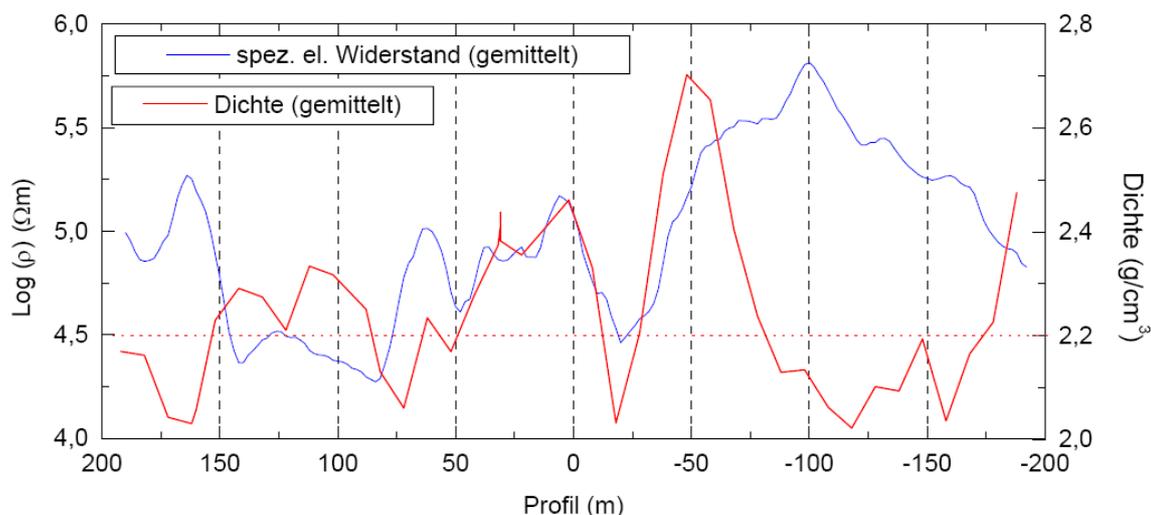


Abb. 2.2-4: Vergleich Dichte- und Widerstandsprofil Teutschenthal-Verbindungsstrecke (Dichte Steinsalz = $2 - 2,2 \text{ g/cm}^3$, Dichte Anhydrit = $2,9 \text{ g/cm}^3$)

Die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes vom Wassergehalt konnte teilweise anhand von simultaner Messungen mittels Karl-Fischer-Titration und 4-Punkt-Geoelektrik im Labor untersucht werden. Aufgrund der Beschaffenheit der Gesteinsproben aus der Verbindungsstrecke ließen sich allerdings nur sehr wenige Probenkörper mit den notwendigen Abmessungen für die elektrischen Messungen herstellen. Bei der Bearbeitung der Handstücke (Kernbohrung Durchmesser 2 cm) zerbrachen viele der Probenstücke. Die aus den Auflockerungszonen der Stöße gewonnenen Handstücke zeigen sowohl charakteristische Merkmale einer mechanischen Beanspruchung (entstanden durch Streckenauffahrung, Gebirgsentlastung, Abschaltung) als auch Anzeichen von oberflächlicher chemischer Belastung durch die Luftfeuchtigkeit der Bewetterung.

Beispielhaft sind die Ergebnisse der simultanen Untersuchungen anhand der Probe Teu/+160m in Abb. 2.2-5 dargestellt. Über die Dauer der Messungen wurde während der Trocknung der Proben mittels 4 angebrachter Elektroden die zeitliche Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit vom Wassergehalt beobachtet. Charakteristische Werte für die Steinsalzproben im bergfeuchten Zustand, also am Beginn der simultanen Messungen, sind spezifische elektrische Widerstände um die $10^4 \Omega\text{m}$. Mit zunehmender Wasserabgabe der Proben zeigt sich ein charakteristischer Anstieg des Widerstandes um drei Größenordnungen auf Endwerte um $10^7 \Omega\text{m}$.



Das nebenstehende Foto der Probe Teu/+160m dokumentiert die spröde Brüchigkeit der Steinsalzproben. Diese Zylinderprobe wurde aus einem Handstück gebohrt und mit Anschlüssen für die elektrische Widerstandsmessung versehen (Stromelektroden an den Zylinderflächen, Spannungsmessung an beiden Ringelektroden um die Mantelfläche).

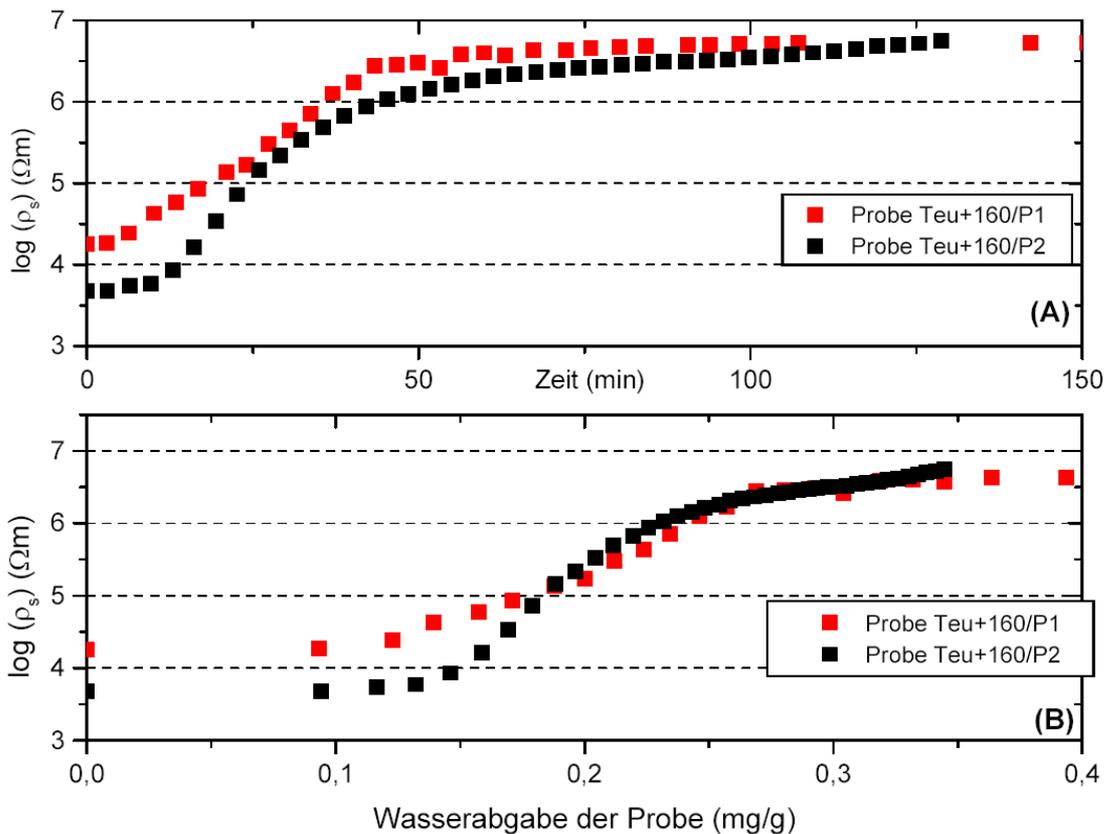


Abb. 2.2-5: Ergebnisse der Wassergehaltsmessung nach Karl-Fischer mit simultaner Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Probe Teu/+160. (A) Verlauf des Widerstandes ρ_s (Ωm) über der Trocknungszeit t (min) bei Trocknungstemperatur $T = 60^\circ\text{C}$, (B) Verlauf des Widerstandes ρ_s (Ωm) über der Wasserabgabe der Probe in mg/g bezogen auf die Anfangsmasse.

Während der Karl-Fischer-Trocknung bei $T = 60^{\circ}\text{C}$ erfolgt eine Wasserabgabe mit bis zu 2.5 mg/g relativ zur Anfangsmasse der Zylinderprobe. Bei beiden Proben sind bereits geringe Mengen von 0.25mg/g Wasserabgabe ausreichend, um den charakteristischen Widerstandsanstieg hervorzurufen. Das deutet daraufhin, dass hier hauptsächlich an den Probenoberflächen anhaftende Luftfeuchtigkeit zur elektrolytischen Leitung beiträgt. Unterschiede sind im Gesamtwassergehalt der Proben zu finden, wobei trotz stärkerer Wasserabgabe der ersten Probe kein weiterer nennenswerter Widerstandsanstieg beobachtet werden kann. Das Ergebnis dieser Messung bestätigt das von KULENKAMPFF et al. (2002) vorgeschlagene Perkolations-Modell: Ungestörtes, trockenes Salz ist quasi nichtleitend. Fluid-Einschlüsse sind gewöhnlich isolierte Leitfähigkeits-Inseln, Korngrenzen und kleine Klüfte enthalten nur lokal Lauge. Es gibt keine elektrisch leitende Verbindung. Ab einer bestimmten Perkolations-Schwelle der Konnektivität / Klüftigkeit kann Lösung durch das Gesteinsmaterial migrieren, gleichzeitig nimmt die Leitfähigkeit des Materials zu.

Die Labormessungen zur Bestimmung der elektrischen Widerstände und der Wassergehalte bestätigen die geringen Wassergehalte der Proben bis zu 1 mg/cm^3 sowie die großen Widerstandsvariationen von 10^3 bis $10^7 \Omega\text{m}$ und entsprechen damit den in situ gemessenen Werten. Es ist jedoch zu bemerken, dass die Ergebnisse der Messungen an den Mini-Proben nicht repräsentativ sind in Bezug auf die Resultate der gleichstromgeoelektrischen Profilmessungen. Erstens sind die Probenabmessungen zu gering im Vergleich zur Korngröße und Klüftigkeit des Gesteinsverbandes, zweitens kann die Probenahme aufgrund der mechanischen Weiterbearbeitung der Proben nur in relativ intakten Zonen erfolgen.

2.3 FEM-Modellierungen zu den Referenzmessorten

Geoelektrische Untertagemessungen finden in Strecken oder Schächten statt, die sich in einem mehr oder weniger heterogenen Vollraum (des Gebirges) befinden. Sie werden daher neben den Gebirgseigenschaften auch durch das umgebende Grubengebäude wie z.B. benachbarte Strecken beeinflusst.

Für eine konkrete Messlokation ist es mit Hilfe moderner 3D-Finite-Elemente-Modellierungen möglich, den Einfluss der vorhandenen Hohlraumgeometrien auf die Messungen zu bestimmen und bei der Inversion zu berücksichtigen. Zudem können unter Einbeziehung von Informationen z. B. aus weiteren geophysikalischen Messungen, Bohrungen und geologischen Untersuchungen plausible numerische Modelle von 3D-Widerstandsverteilungen erzeugt werden, die die gemessenen Daten erklären und eine sinnvolle Interpretation erlauben.

Weiterhin können systematische Untersuchungen zu typischen untertägigen Erkundungssituationen durchgeführt werden. So lässt sich z.B. der Einfluss von in verschiedenen Richtungen gelegenen Störkörpern auf geoelektrische Messungen und deren Inversion analysieren.

2.3.1 Erstellung synthetischer Grubenmodelle mit DCFEMLib

Die Inversion der geoelektrischen Messdaten wird durch die Geometrie des umgebenden Grubengebäudes beeinflusst. Um diese Einflüsse zu analysieren und bei der Inversion zu berücksichtigen, können 3D-Finite-Elemente-Modellierungen herangezogen werden. Um die Änderungen der für den jeweiligen Streckenquerschnitt gültigen Geometriefaktoren im Vergleich zu den übertage geltenden Halbraumgeometriefaktoren zu bestimmen, wurden zunächst die im Vorgängerprojekt begonnenen Modellierungen mit dem kommerziellen FE-Programm COMSOL Multiphysics (COMSOL AB, Stockholm) fortgesetzt. Es wurden die Geometriefaktoren für typische Streckenquerschnitte und Profillagen berechnet. Dabei zeigt es sich, dass die Lage der Profile im Bezug auf den Streckenquerschnitt einen erheblichen Einfluss auf die Geometriefaktoren bei den Anordnungen mit kleinen Elektrodenabständen (im Verhältnis zu den Streckendimensionen) hat. Die Abb. 2.3-1 zeigt das Verhältnis der berechneten Geometriefaktoren zu den jeweiligen Halbraumfaktoren für verschiedene Streckenquerschnitte und Profillagen.

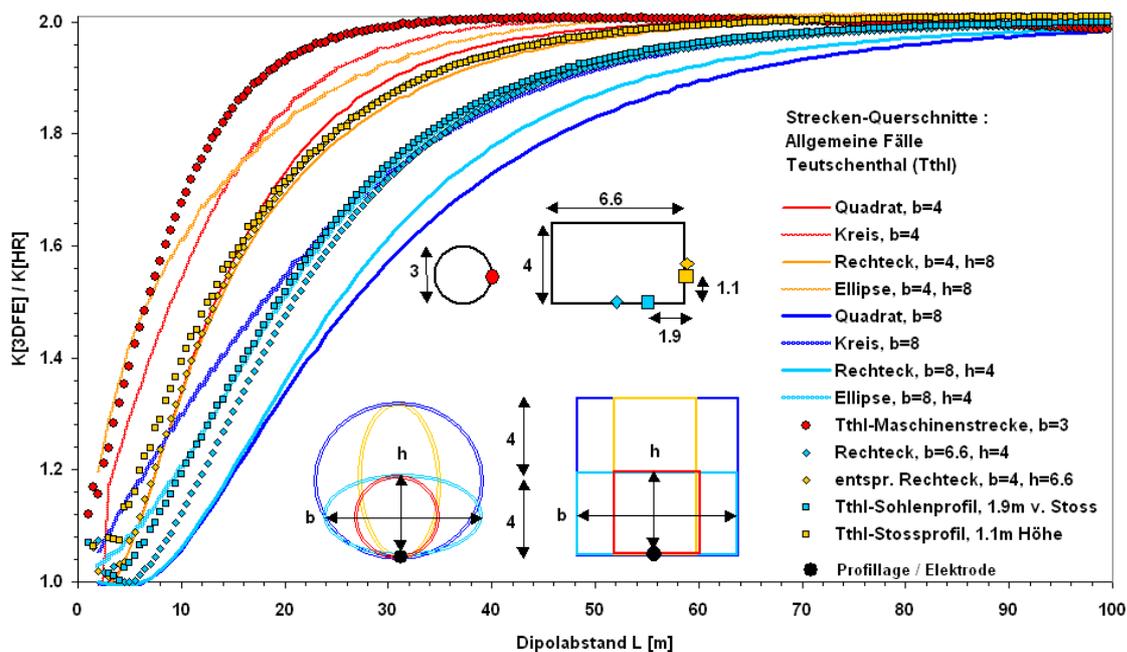


Abb. 2.3-1: Verhältnis der berechneten Geometriefaktoren zu den jeweiligen Halbraumfaktoren für Dipol-Dipol-Anordnungen.

Die Hauptförderstrecke im Bergwerk Sollstedt ist von mehreren benachbarten Strecken umgeben, die ebenfalls die geoelektrischen Messungen beeinflussen können. Für die geoelektrische Modellierung solcher sehr komplizierten Geometrien erwies sich das am Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig speziell für DC-Geoelektrik entwickelte 3D-FE Programm DCFEMLib (basierend auf RÜCKER et al. 2006) als flexibler. Mit Hilfe dieses Programmes wurden detaillierte Modelle der Grubengeometrien in der Umgebung der Hauptförderstrecke im Bergwerk Sollstedt (Abb. 2.3.-2) und sowie der

Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf (Verbindungsstrecke und Wetterstrecke/Umfahrung) erstellt.

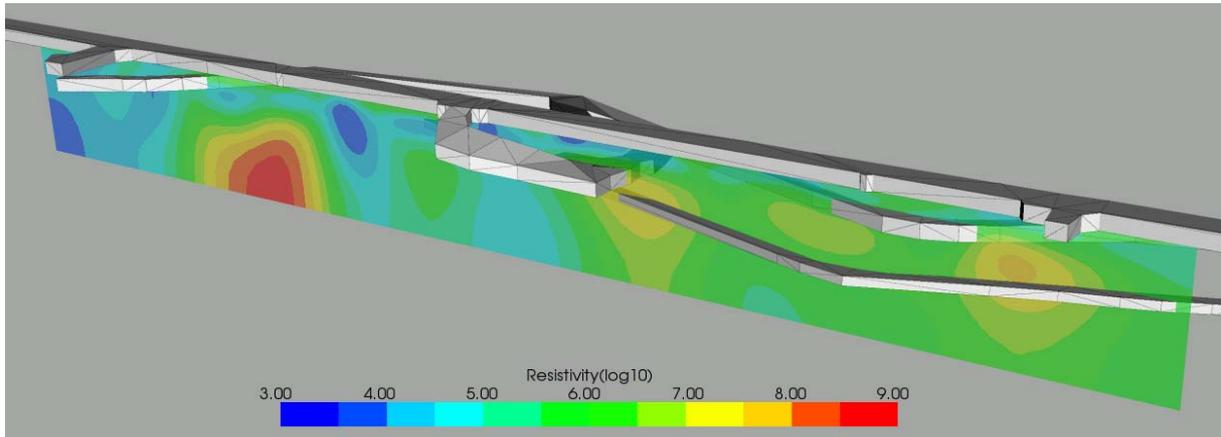


Abb. 2.3-2: FE-Modell Grubengebäude Sollstedt (mit Geoelektrik-Inversionsergebnis)

Mit Hilfe dieser Grubenmodelle wurden für alle bei den Untertagemessungen verwendeten Elektrodenkonfigurationen die Geometriefaktoren berechnet und entsprechend Formel [1] vor der Inversion der Daten berücksichtigt. Die Abb. 2.3-3 zeigt die Abweichungen der Geometriefaktoren zu den entsprechenden Halbraumfaktoren, die auch als Topographieeffekt bezeichnet werden, für eine Messung in Wenner- β Konfiguration in der Hauptförderstrecke im Bergwerk Sollstedt in Form einer Pseudosektion.

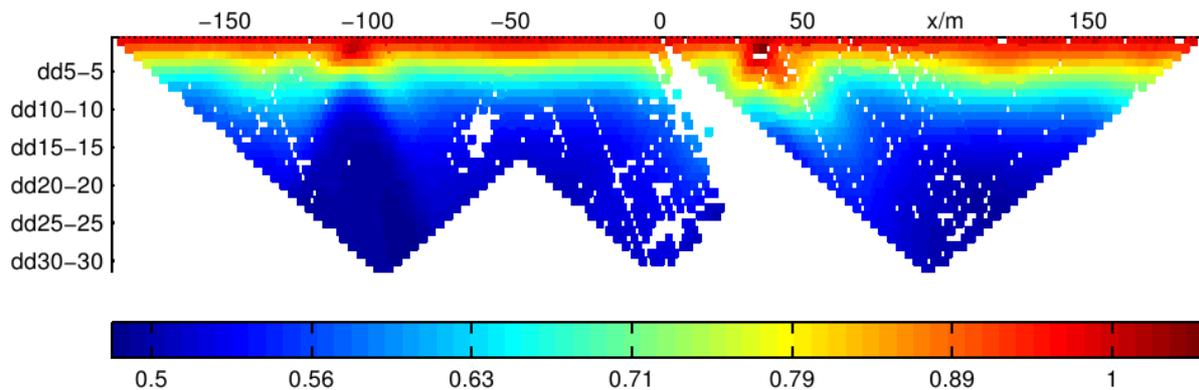


Abb. 2.3-3: Pseudosektion des Topographieeffektes (Verhältnis von Halbraum-Geometriefaktoren zu den „wahren“ (unter Berücksichtigung der Grubengeometrie berechneten) Geometriefaktoren für die Referenzmessstrecke im Bergwerk Sollstedt.

2.3.2 Systematische Untersuchungen zu untertägigen Erkundungssituationen (Szenarienmodellierung)

Die Interpretation der Messergebnisse geoelektrischer Untertagemessungen ist oftmals problematisch, da die Messprofile auf die vorhandenen Strecken beschränkt sind und sich gleichzeitig quasi im Vollraum befinden. Im allgemeinen ist man auf 1D-Profilauslagen am Stoß, auf der Sohle oder an der Firste der Strecke angewiesen. Die Inversion der Daten erfolgt

dann meist mit einem 2D-Inversionsprogramm. Das damit erhaltene 2D-Schnittbild wird als Sektion der Widerstandsverteilung im Gebirge unter bzw. vor dem Messprofil angesehen. In Wirklichkeit spiegeln sich darin jedoch aufgrund der Sensitivitätsverteilung der 4-Punktmessungen nicht nur Bereiche direkt unter der Anordnung, sondern Einflüsse aus allen Raumrichtungen wider. Es werden also auch Anomalien, die sich oberhalb/unterhalb der Strecke oder sogar auf der der Messung gegenüber liegenden Seite der Strecke befinden, erfasst. Dies kann zu vollständigen Fehlinterpretationen der Widerstandsmodelle führen.

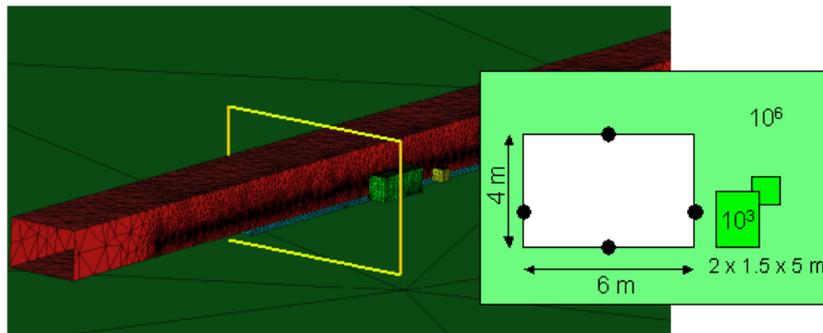
Um solche Effekte zu untersuchen und um das Potential neuer 3D-Inversionsverfahren zu testen, wurden mit Hilfe von 3D-Finite-Elemente-Modellierungen synthetische Datensätze für typische untertägige Erkundungssituationen erzeugt. Die berechneten Datensätze wurden anschließend mit 2D- und 3D-Inversionsprogrammen invertiert.

Numerische Simulationen wurden mit den Programmen COMSOL Multiphysics (COMSOL AB) sowie DCFEMLIB (RÜCKER et al. 2006) durchgeführt. Dabei wurde insbesondere die geologische und geometrische Situation der Referenzmessstrecke der Lokation im Bergwerk Teutschenthal zugrundegelegt.

Im ersten Schritt wurde ein Modell einer Strecke im homogene Gebirge mit einem Hintergrundwiderstand von $10^6 \Omega\text{m}$ (Modell 1) erstellt. Die Strecke hat entsprechend der Verbindungsstrecke Teutschenthal - Angersdorf eine Breite von 6 m und eine Höhe von 4 m. In das Hintergrundmodell wurden verschiedene Störkörper integriert. Für die Geoelektrikmessungen wurden Dipol-Dipol-Profile mit je 64 Elektroden im Abstand von 1 m angenommen, die sich jeweils an den Stößen, auf der Sohle und an der Firste befinden (Abb. 2.3-4). Bei der in Abb. 2.3-4 dargestellten Situation mit einem niederohmigen Störkörper als Modell für eine laugengefüllte Kluftzone zeigen alle 2-D-Inversionen der Einzelprofile eine niederohmige Anomalie. Im Stoßprofil auf der Seite des Störkörpers wird dieser lagerichtig als niederohmige Anomalie abgebildet. Aber auch in den Profilen auf der Sohle und am Gegenstoß spiegelt sich dieser Störkörper als Widerstands anomalie wider. In das Modell in Abb. 2.3-5 (Modell 1b) wurde zusätzlich zum Störkörper im Stoß eine gut leitfähige Sohle ($100 \Omega\text{m}$), wie sie auch in der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf auftrat, eingefügt. Die 2D-Inversion des Stoßprofils wird durch die Anwesenheit der leitfähigen Sohleschicht deutlich beeinflusst.

Das Modell 2 ist an die konkrete geologische Situation der Referenz-Messstrecke im ehemaligen Kalibergwerk Teutschenthal angelehnt. Die Messstrecke befindet sich im hochohmigen Steinsalz ($10^7 \Omega\text{m}$), etwa 10 m unter der Strecke liegt Anhydrit mit welliger Oberkante und niedrigerem Widerstand ($10^6 \Omega\text{m}$) (Abb. 2.3-6). In dieses Grundmodell wurden später verschiedene Störkörper eingebaut. Modelliert wurden Messungen auf 4 jeweils 400 m langen, parallelen Profilen, die sich an den Stößen, der Sohle und der Firste befinden. Der Elektrodenabstand betrug jeweils wie bei den in-situ Messungen 2 m.

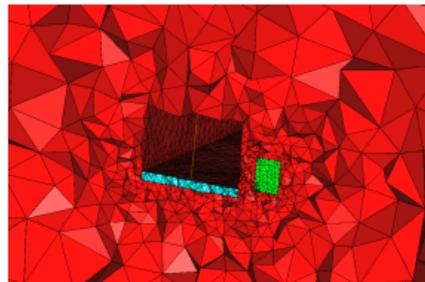
Synthetisches Grubenmodell – Modell 1



DCFEMLIB (C. Rücker)

- 3D Finite Elemente
- adaptive Netzgenerierung
→ Verfeinerung an Quellpositionen

Modell: 10 km x 10 km
Strecke: 500 m lang, 600 m unter GO
Dipol-Dipol Profile mit 64 Elektroden,
Abstand 1m
50.000 Knoten, 412.000 Freiheitsgrade



2D-Inversion der Einzelprofile

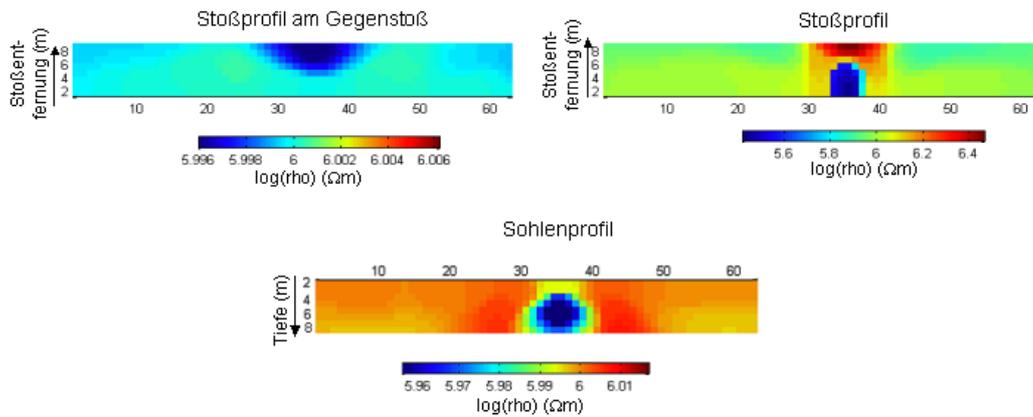
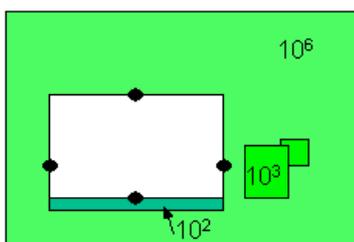


Abb. 2.3-4: FE-Modell 1 einer Bergwerksstrecke mit 4 Linienprofilen an den Stößen, der Sohle und an der Firste (oben) sowie die Ergebnisse der 2D-Inversionen (DC2dSIRT, KAMPKE 1996), unten.

Modell mit leitfähiger Sohle



2D-Inversion des Stoßprofils

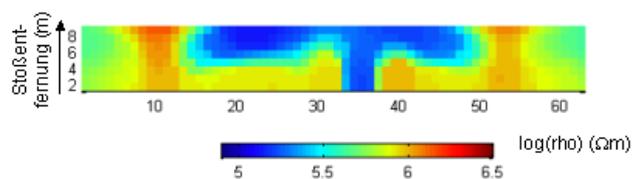
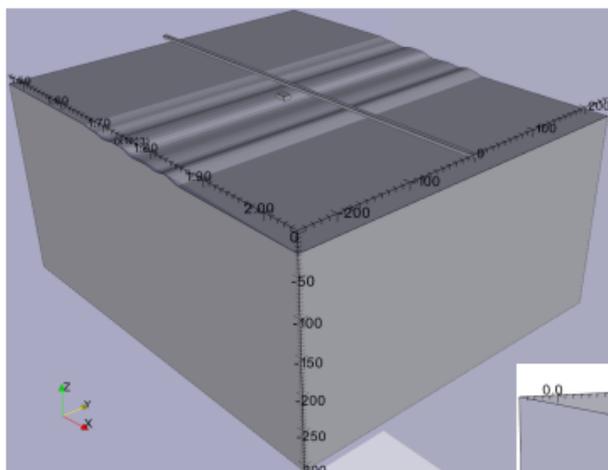


Abb. 2.3-5: FE-Modell 1 aus Abb. 2.3-4 mit zusätzlicher leitfähiger Sohle und Ergebnis der 2D-Inversion (DC2dSIRT, KAMPKE 1996).

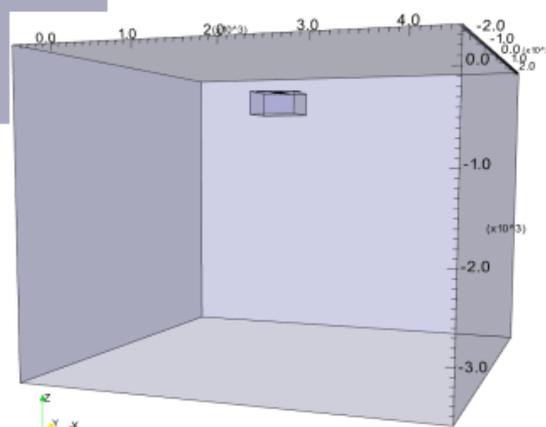
Modell 2 (Teutschenthal) – 3D-Ansicht



Ausschnitt

Modell: 5 km x 5 km x 4 km
 Strecke: 600 m lang, 600 m unter GOK
 4 Profile mit 192 Elektroden, Wenner β
 Abstand 2m
 ca. 1.5 Mio. Knoten, 8 Mio. Zellen

Gesamtmodell (5x5x4 km)



Längsschnitt unter der Strecke

Strecke



Abb. 2.3-6: Ausgangsmodell für die numerischen Modellierungen von geoelektrischen Messungen im Messbereich in der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf. Oben: 3D-Ansicht, unten: Längsschnitt unter der Strecke.

Die Ergebnisse der 2D-Inversion der Einzelprofile sind in Abb. 2.3.-7 dargestellt. Im Sohlenprofil wird die Oberkante des Anhydrits etwa lagerichtig wiedergegeben. Auch in den Profilschnitten an den Stößen und an der Firste zeichnet sie sich ab.

Infolge der komplexeren Geologie (wellige Anhydrit-Oberkante) treten jedoch in allen Schnitten wesentlich stärkere Artefakte auf als beim relativ einfachen Modell 1 (Abbildungen 2.3-4 und 2.3-5).

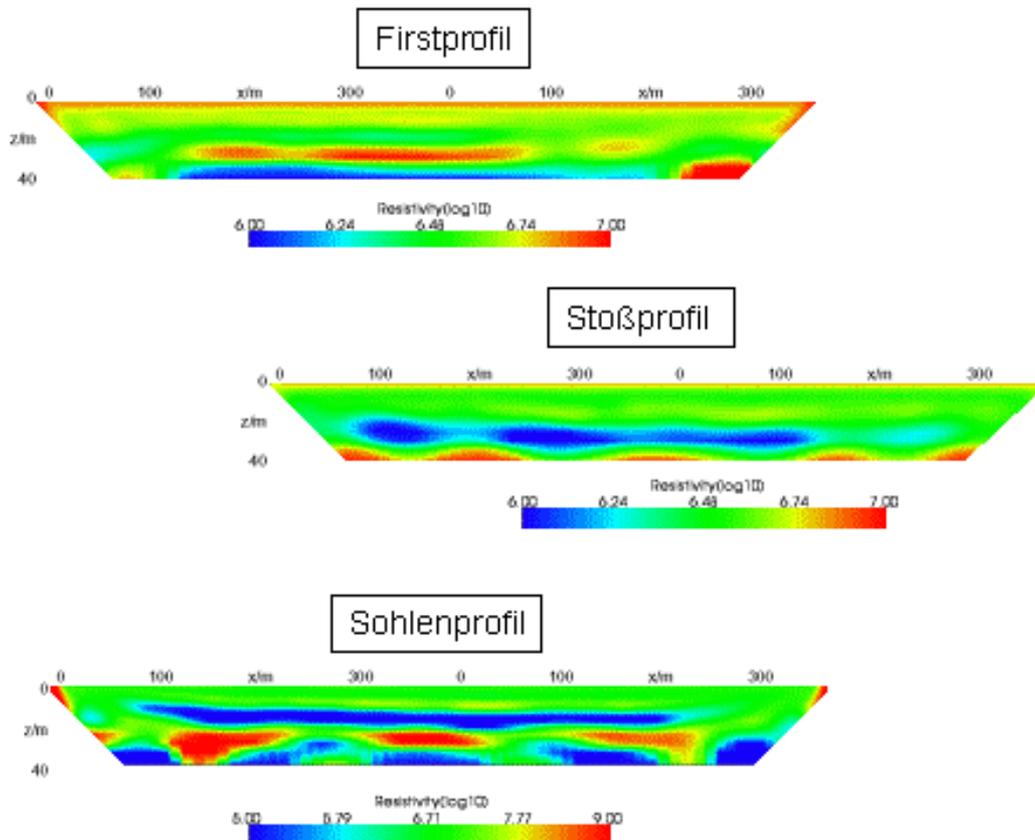


Abb. 2.3-7: 2D-Inversion der Einzelprofile (invertiert mit dc2dInvRes, T. Günther)

In Abb. 2.3-8 sind Ergebnisse von 3D-Inversionen der 4 Profile dargestellt. Im 3D-Inversionsergebnis einer Messung am Stoß wird die Oberkante des niederohmigeren Anhydrits annähernd richtig und artefaktfrei wiedergegeben. Eine Richtungszuordnung im dreidimensionalen Raum ist jedoch nicht möglich. Das Widerstandstiefenmodell ist rotationssymmetrisch um die z-Achse verteilt.

Die 3D-Inversion aller 4 Profile ergibt dagegen eine klare Differenzierung in z-Richtung. Der niederohmige Anhydrit erscheint lagerichtig unter der Sohle.

Die Abb. 2.3-9 zeigt 3D-Inversionsergebnisse für das Modell 2 mit zusätzlichem steilstehendem Störkörper ($10^3 \Omega\text{m}$, „laugengefüllter Kluftbereich“).

Die Auswertung und Interpretation der geoelektrischen Messungen konnte durch neuartige 3D-Inversionstechniken wesentlich verbessert werden. So ist es mit Hilfe von 3D-FE-Modellierungen gelungen nachzuweisen, dass bei Vorliegen ausreichender Datensätze (Messungen auf mehreren Profilen an allen zugänglichen Streckenoberflächen) eine Richtungszuordnung von Anomalien möglich wird.

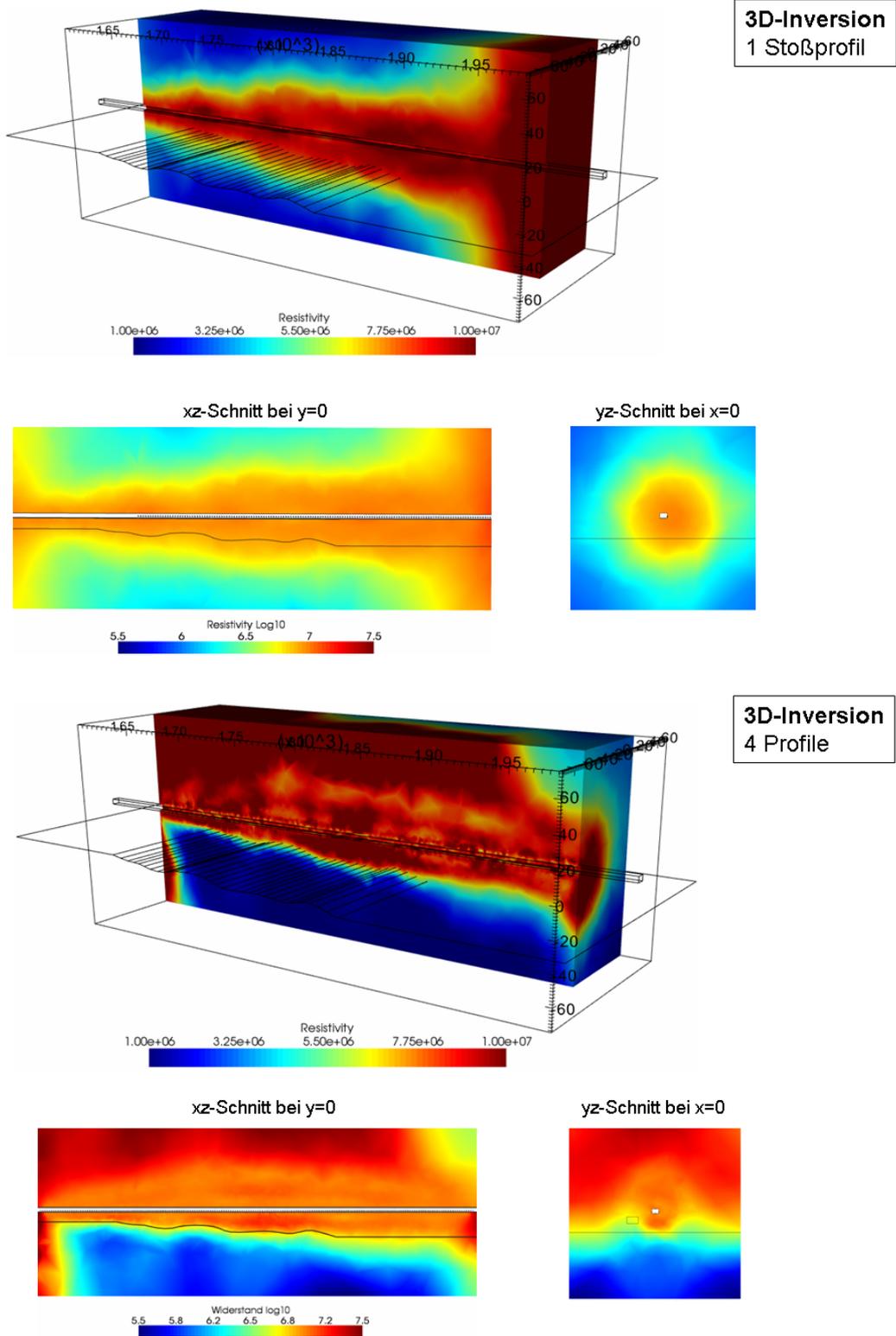


Abb. 2.3-8: 3D-Inversion eines Einzelprofils am Stoß (oben) und aller 4 Profile an den beiden Stößen, auf der Sohle und an der Firste. Die Richtungszuordnung der Herkunft der gemessenen Anomalien kann durch die Messung an allen Streckenoberflächen deutlich verbessert werden.

3D-Inversion aller Daten (4 Linienprofile und 5 Ringprofile)

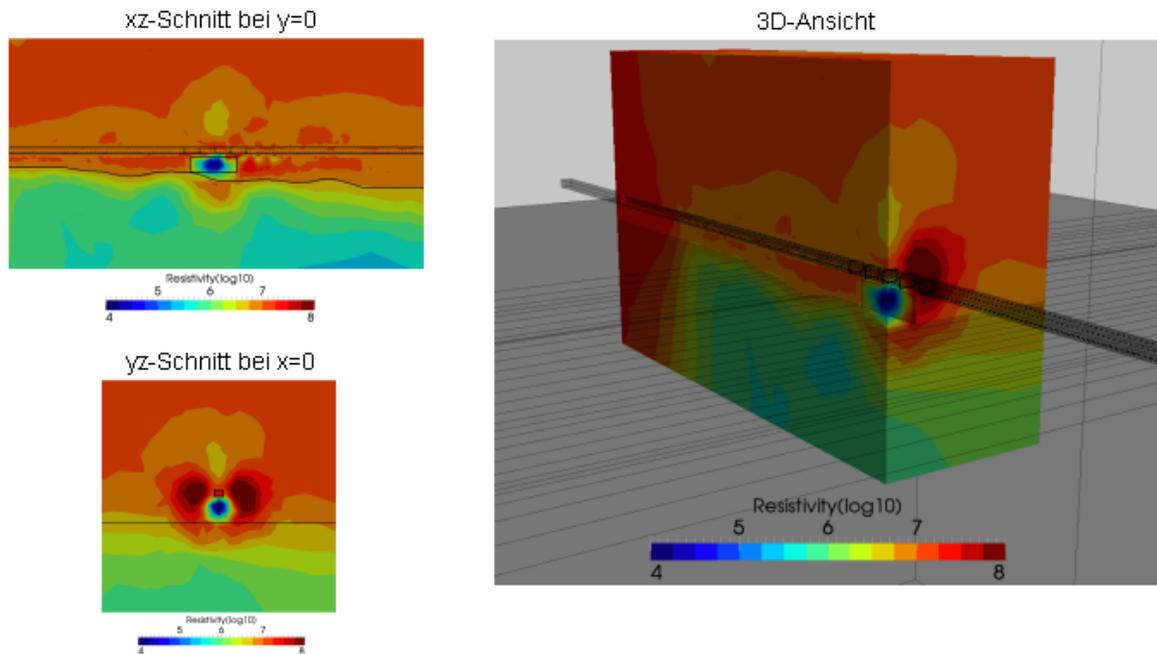


Abb. 2.3-9: 3D-Inversion der modellierten Daten für das Modell in Abb. 2.3-8 mit zusätzlichem steilstehendem niederohmigen Störkörper („laugengefüllter Klufbereich“)

Wie die Untersuchungen an den numerischen Datensätzen zeigen, besteht die Aussicht, künftig durch Messungen auf mehreren, geeignet ausgewählten Profilen (Linienprofile an beiden Stößen, auf der Sohle und an der Firste, Kreis- oder U-Profile über den Streckenquerschnitt) in Kombination mit der Anwendung der neuartigen 3D-Inversionssoftware BERT, die im Laufe der Projektarbeiten wesentlich verbessert wurde, eine bessere Richtungszuordnung von Anomalien zu erzielen.

Die Zugänglichkeit aller Streckenoberflächen war jedoch an den Referenzstandorten nicht immer gegeben (zu starke Abschaltungen, Unzugänglichkeit der Firste). In der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf liegen aber Messungen auf einem Sohle-Profil und auf einem Stoßprofil vor. Durch die jetzt mögliche 3D-Inversion mit BERT konnten die Daten nunmehr gemeinsam invertiert werden. Obwohl es sich nur um 2 Profile handelte, konnte so gegenüber der 2D-Inversion der Einzelprofile eine verbesserte Abbildung der Umgebung der Bruchfeldkante über dem Gebirgsschlagfeld von 1996 erreicht werden (Abb. 2.3-10). Die **3D-Inversion** ergibt eine **wesentlich schärfere Abbildung des gestörten Bereiches** um die Bruchfeldgrenze im Vergleich zu den benachbarten Teilen, die konstantere Werte um $10^6 \Omega\text{m}$ aufweisen. Das Maximum der 2D-Stoß-Inversion zwischen Auffahrungsmeter +1750 m und +1800 m wird im Vergleich zu den Hintergrundwiderständen abgeschwächt und die flankierenden Minima werden deutlicher. Die anomale Zone um die Bruchfeldkante kann auf eine höhere Klüftigkeit und Permeabilität, in Verbindung mit Feuchtevorkommen, infolge der mechanischen Beanspruchung während des Bruchereignisses und danach hinweisen.

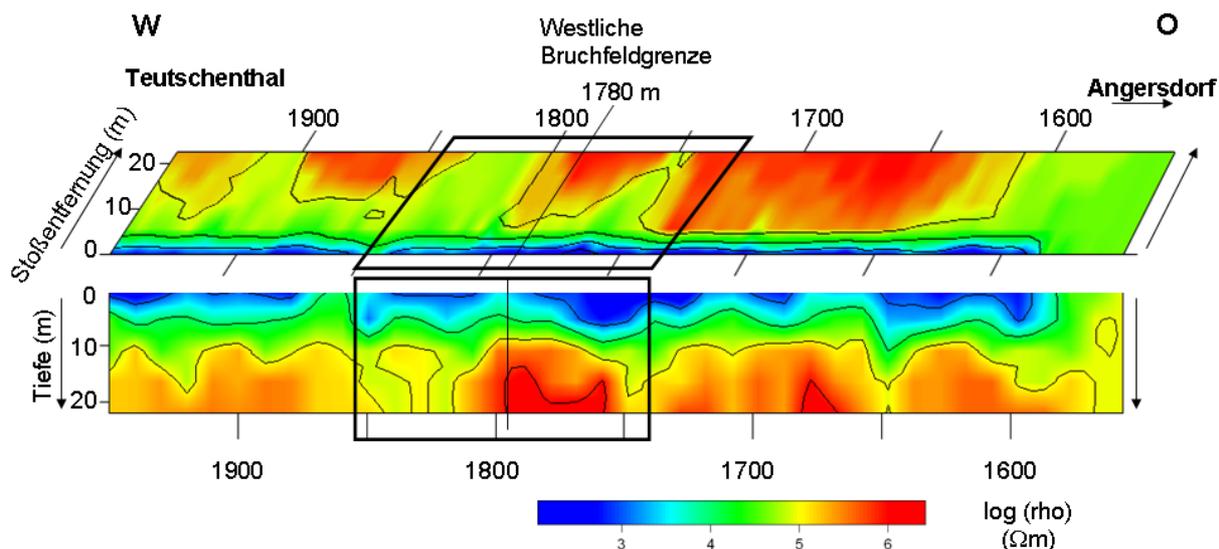


Abb. 2.3-10: Gemeinsame 3D-Inversion des Stoß- und des Sohleprofils in der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf.

Die numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass eine 2D-Inversion selbst bei einfachen Verhältnissen (eine Strecke und ein Störkörper im sonst homogenen Gebirge) zu Scheinanomalien in der falschen Richtung führen kann. Bei komplizierteren Bedingungen treten darüber hinaus starke Artefakte auf.

Mit Hilfe neuer 3D-Inversionssoftware (BERT) ist es dagegen möglich, eine eindeutige Richtungszuordnung der Anomalien zu erreichen. Dies setzt jedoch voraus, dass mehrere Profile (Linien- und eventuell Kreisprofile) vermessen wurden. Wenn es unter den gegebenen realen Bedingungen nicht möglich ist, geoelektrische Messungen auf allen Streckenoberflächen durchzuführen (z.B. wegen zu starker Abschaltungen, Ankerungen der Firste aus Sicherheitsgründen), ist durch 3D-Inversion eines Linienprofils zumindest eine artefaktfreie Rekonstruktion möglich. Durch Einbeziehung der Ergebnisse anderer, richtungssensitiverer geophysikalischer Verfahren und bekannter geologischer und grubenbaulicher Strukturen in den Inversionsprozess kann auch hier eine Verbesserung der Richtungszuordnung erwartet werden.

Die Untersuchungen sind Bestandteil der geophysikalischen Modellierung von Barriersituationen unter Berücksichtigung der speziellen untertägigen Bedingungen und der Verteilung geophysikalischer Parameter, hier des spezifischen elektrischen Widerstandes. Die Entwicklung geeigneter geophysikalischer FE-Modelle beschränkte sich hier auf die Beschreibung und Untersuchung relevanter struktureller geologischer bzw. bergbaulicher Situationen. Ausgehend von in-situ angetroffenen und beispielhaft angenommenen gestörten Salinarformationen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Modellsituationen nachgebildet. Die Auswertung der geophysikalischen Modellantwort umfasste die Bewertung des Auflösungsvermögens des Verfahrens hinsichtlich der strukturellen Information und der Sensitivität auf kleine Änderungen im Modell. Zukünftig lassen sich aus solchen geophysikalischen Modellierungen Empfehlungen für ein standortspezifisches Vorgehen ableiten. Ebenso ist es möglich, zeitliche Entwicklungen in die strukturellen Szenarios einzubeziehen.

2.4 Seismische Untertagemessungen

2.4.1 Messprinzipien und Messtechnologien

Grundlage aller seismischen Messungen ist die Anregung und Registrierung elastischer Wellen. Diese werden im Untergrund an sprunghaften Änderungen der materialspezifischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und/oder Dichte (akustischer Impedanzkontrast) reflektiert. Die Aufzeichnung und Auswertung der sich ausbreitenden Wellen lässt Rückschlüsse über den Aufbau des Untergrundes zu. Es lassen sich geologische Strukturen wie Schichtgrenzen, Störungen oder auch Kluftzonen erkennen. Mit Kenntnis der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit z.B. aus der Datenbearbeitung oder aus gezielten Geschwindigkeitsmessungen in Bohrungen lassen sich Tiefen von Schichtgrenzen und daraus abgeleitet Schichtmächtigkeiten bestimmen, sowie erkannte Problemzonen räumlich lokalisieren.

Im Vergleich zu Messungen an der Erdoberfläche (auf dem Halbraum) treten durch die Messsituation unter Tage (im Vollraum) einige Besonderheiten und Schwierigkeiten auf:

- Es liegt keine Verwitterungsschicht vor. Die Ankopplung von Quelle und Geophonen kann aber durch Abschalungen dennoch beeinträchtigt sein.
- Durch anstehendes Festgestein treten anregungsnah hohe Geschwindigkeiten im Bereich größer als 3 km/s auf.
- Es werden hohe Frequenzen im Bereich zwischen 100 Hz und 2500 Hz angeregt und auch aufgezeichnet.
- Die Absorption der seismischen Energie entlang des Laufweges ist meist gering.
- Es ist mit verstärktem Auftreten von Scherwellen zu rechnen.
- Die Profilanlage ist durch die Streckenführung im Bergwerk stark eingeschränkt. 3D Messanordnungen sind nicht möglich. Die räumliche Lokalisation von Reflexionsinsätzen wird dadurch erschwert.

Die eingesetzten Messgeräte, die Messanordnung und auch die Vorgehensweise bei der Datenbearbeitung wurden in den beiden Vorgängerprojekten „Komplexes Mess- und Auswertearmamentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und Untertagedeponien (UTD) im Salinar – 02 C 0558“ (Salinargeophysik I, KULENKAMPPF et al. 2002) sowie „Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien – 02 C 0861“ (Salinargeophysik II, JUST ET AL., 2004) erfolgreich entwickelt und erprobt.

2.4.2 Technische Ausstattung und Messkonfigurationen

Um den Besonderheiten bei seismischen Untertagemessungen soweit wie möglich Rechnung zu tragen, wurden die spezifischen Messmethoden den Referenzstandorttypen angepasst.

Beim **Seismik-Messverfahren I** (K-UTEC) wurden wie in den Vorgängerprojekten die Dreikomponentenaufnehmer vom Typ KB 103 der Firma Metra Mess- und Frequenztechnik Raabeul genutzt. Es handelt sich um piezoelektrische Drei-Komponentenaufnehmer (Beschleunigungsaufnehmer) mit einem weitgehend linearen Frequenzgang; die Resonanzfrequenz liegt oberhalb 10 kHz (siehe Abb. 2.4-1). Die Aufnehmer mit einem Durchmesser von 40 mm wurden dabei mit Hilfe von Dübeln auf der Fahrstrecke montiert, um eine optimale Ankopplung zu gewährleisten. In Verbindung mit der Registrierapparatur, der 48-kanaligen Bison, wurden mittels Hammerschlag auf eine Metallplatte die seismischen Wellen angeregt.

Beim **Messverfahren II** (Uni Leipzig) kamen vertikale Einkomponentenaufnehmer (100 Hz) zum Einsatz. Da sich teilweise die zu untersuchenden Problemzonen im Salinar III-Projekt auf Bereiche im Liegenden der Messtrecke konzentrierten, konnten Geophone (ohne aufwendige Befestigungsmaßnahmen) zur Energieaufnahme verwendet werden. Sie wurden in kleinen Bohrlöchern fest montiert, die Ankopplung an das Festgestein war damit optimal gewährleistet. Zur Erzeugung der seismischen Wellen wurde ebenfalls ein Vorschlaghammer benutzt, wobei direkt auf der gut verfestigten Fahrspur ohne die Nutzung einer Schlagplatte geschlagen wurde. Auf Grund des geringen seismischen Rauschens in den Grubengebäuden und der hohen Energieeffizienz pro Schlag konnte auf eine Vertikalstapelung (mehrfache Anregung an einem Messpunkt) verzichtet werden. Zur Registrierung der seismischen Wellen wurde die 72-kanalige Summit Kompakt verwendet.

Beim **Messverfahren III** (K-UTEC) kamen vertikale Einkomponenten-Geophone (60 Hz) der Firma Mark Products Inc. zum Einsatz. Zur Registrierung wurde die 48-kanalige Bison-Apparatur genutzt. Die Anregung erfolgte mittels 5 kg-Hammer auf eine Schlagplatte.



Abb. 2.4-1: Dreikomponenten Piezoschwinger und vertikale Einkomponentengeophone

2.4.3 Messkampagnen an den Referenzstandorten

Standort A - Sollstedt

Für die Untersuchungen am Standort A in Sollstedt kamen die Messverfahren I und erstmals auch das Messverfahren II zum Einsatz. Für das Messverfahren I wurden die seismischen Wellen durch direkte Schläge auf eine Schlagplatte und durch Schläge senkrecht zum Profil gegen eine Fräsbank angeregt.

Beim eingesetzten Messverfahren II wurden durch Anregungen mit einem 5 kg Metallhammer direkt auf die Sohle seismischen Wellen erzeugt.

Standort B: Teutschenthal

In der Messstrecke in Teutschenthal kamen die Messverfahren I, II und III zum Einsatz. Weiterhin wurden am Standort B Quellentests durchgeführt, da seit Januar 2008 ein neuer P-Wellenvibrator auf dem Markt befindlich ist. Es sollte getestet werden in wie weit sich die Anregungsmethode durch ein reproduzierbares Signal von den konventionellen Hammeranregungen unterscheidet. Als Registrierapparatur standen zwei Geoden der Firma Geometrics zur Verfügung, welche mit 47 60 Hz Geophonen die Einzelschüsse aufzeichneten. Für den Test wurde nur eine Auslage aufgebaut. Als Quellen kamen der P-Wellenvibrator der Firma Geosym mit 3 verschiedenen Frequenzanregungsbändern, sowie ein 5 kg Metallhammer mit und ohne Schlagplatte und ein 4 kg Kunststoffhammer zum Einsatz.



Abb. 2.4-2: P-Wellen Vibrator für Quellentest



Abb. 2.4-3: Quellentest mit Kunststoffhammer

Standort C: Sigmundshall

Um die Ergebnisse der geophysikalischen Messungen, welche im Rahmen des Salinargeophysik II-Projektes durchgeführt wurden, einer abschließenden und umfassenden Interpretation zuführen zu können, wurden im Projekt Salinargeophysik III seismische Messungen in Sigmundshall (Salzstocksituation, Problemzonen horizontal zur Strecke) ergänzt. Im vorangegangenen Projekt wurde mit den Stapelsektionen der Seismik der Bereich von 32.5 bis 191.5 m überdeckt (Messbereich Profilmeter 0 bis 224). Analog zu den vorangegangenen Messungen an dieser Lokation wurden 3 sich überlappende Messaufstellungen mit einer jeweils zentral angeordneten, festen Auslage von 32 Geophonen abgeschossen. Der Geophonpunktstand wurde mit 1 m angesetzt und der Anregungspunktstand mit 4 m. Durch die Wahl dieser analogen Konfiguration zu 2002 wurden Daten für eine durchgängige Messung von 6 sich überlappenden Messaufstellungen geschaffen. Zum Einsatz kam hier das Messverfahren I, da die Geophone am Stoß befestigt werden mussten. Insgesamt wurde damit ein durchgängiges Profil mit einer Profillänge von 256 m abgeschossen und erkundet.

(Detaillierte Informationen zu den einzelnen Messkampagnen an den Referenzstandorten befinden sich im Anhang A2!)

2.4.4 Datenprozessing

Aufgrund der für seismische Messungen ungewöhnlich hohen Nutzfrequenzen im Salinar ergeben sich besondere Anforderungen für die Messapparaturen und das seismische Prozessing. Die Bearbeitung der reflexionsseismischen Daten erfolgt mit dem Programmpaket ProMAX und orientiert sich am folgenden Ablauf:

- Dateneingabe und Geometrieaufbau
 - Zuordnung
 - CMP Binning
 - Vervollständigung der Datenbasis und der Spurköpfe
 - Geometrie QC
- Editing
 - Löschen toter oder schlechter Spuren
 - Editieren falsch gepolter Spuren
 - Despiking
 - Trace Muting
 - Noise Unterdrückung
- 2D Statik
 - Korrektur auf Final Datum
- Korrektur der sphärischen Divergenz
- Dekonvolution
- Geschwindigkeitsanalyse
- 2D oberflächenkonsistente Reststatik

- 2D Steep-Dip Zeitmigration
- Filter- und Skalierungs-Teste
- Zeit-Tiefen-Wandlung

Die Aufzeichnungen der reflexionsseismischen Profilauslagen werden in der Datenbearbeitung zu CMP-Gather sortiert. Diese enthalten alle Anregungs- und Geophonpunkte, deren angenommene Strahlwege einen gemeinsamen Mittelpunkt haben und bei ebener Schichtung auch einen gemeinsamen Punkt im Untergrund überdecken.

Die Anwendung und die Ergebnisse einzelner Bearbeitungsschritte werden im Folgenden beschrieben:

Energiestapelung: Bei Anregung seismischer Wellen per Hammerschlag werden an einem Anregungspunkt mehrere Seismogramme aufgezeichnet. Eine Addition dieser Seismogramme hat das Ziel, das Verhältnis von Nutz- zu Störenergie zu erhöhen und im weiteren Verlauf der Bearbeitung ein besseres Stapelergebnis zu erreichen.

Beim Messverfahren I traten geringe zeitliche Verschiebungen von bis zu 1 ms auf. Diese festgestellten Triggerfehler - die für gewöhnliche Messungen an der Erdoberfläche keine negativen Auswirkungen hätten - bewirkten in den hochfrequenten Daten im Salinar eine deutlich destruktive Stapelung der einzelnen Anregungen. Die Probleme, welche schon beim Editieren und Prozessieren der ersten seismischen Sektion des Projektes Salinar II vorlagen, traten auch hier wieder auf. Getestet wurde daraufhin die vier Schussgather eines Anregungspunktes auf eine gemeinsame Startzeit zu korrigieren. Als Zeitmarker wurden dazu die jeweils registrierten Ersteinsätze genutzt. Deren Detektion erwies sich jedoch in der Praxis als zu unsicher, so dass auf eine Stapelung der Einzelschüsse verzichtet werden musste. Die Nutzung einer einzelnen Anregung erwies sich als bestmöglicher Weg. Nach einem Vergleich der einzelnen Anregungen wurde der jeweils erste Schuss eines Anregungspunktes für das weitere Processing verwendet.

Nun ergab sich die Schwierigkeit, dass entsprechend der Triggerfehler die T_0 -Zeit der einzelnen Schusspunkte nicht zuverlässig war. Dies bewirkt wiederum eine destruktive Stapelung nach der CMP-Sortierung der einzelnen Spuren. Als Lösung wurde eine Linear-Moveout-Korrektur-(LMO) Korrektur mit der Geschwindigkeit der P-Ersteinsätze für alle Einzelschüsse vorgenommen ($v_{LMO} = 4500$ m/s). Da alle Spuren des Gathers nun gleiche Ersteinsatzzeiten aufweisen, kann eine (quasi-) statistische Bestimmung vorgenommen werden. Die Abweichung von Mittelwert aller so bestimmten Ersteinsatzzeiten wird als statische Korrektur dem jeweiligen Schussgather zugefügt bzw. abgezogen.

Interaktive Spureditierung: Durch Abschalungen des Gesteins am Stoß kam es an einigen Geophonpositionen zu Resonanzerscheinungen mit amplitudenstarken, monofrequenten Störwellen in der Aufzeichnung. Sämtliche an diesen Positionen gemessenen Spuren wurden von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen.

Interaktives Muting: Das interaktive Muting umfasste den Laufzeitbereich von 0 ms bis zum Ersteinsatz der P-Welle. Die S-Welle wurde nicht durch Muting entfernt, um in diesem Laufzeitbereich erwartete Reflexionen der P-Welle zu erhalten.

F-k-Filterung der LMO-korrigierten Daten: Zur Entfernung der amplitudenstarken Oberflächenwelle wurde sie erst mittels Linear-Moveout-Korrektur ausgerichtet (rms-Geschwindigkeit 2700 m/s) und anschließend im Frequenz-Wellenzahl-Bereich gefiltert. Damit konnte die S-Welle nahezu vollständig unterdrückt werden.

Tiefenstreckung: Nach einer FD-Zeitmigration erfolgte die Tiefenwandlung des Zeitschnittes, mit einer konstanten Geschwindigkeit entsprechend dem Standort.

Die Bearbeitung der Daten wurde in gleicher Weise für alle Komponenten durchgeführt. Außer dem Stapelergebnis wurden auch seismische Attribute wie Reflektionsstärke, Heterogenität und Spektralgehalt berechnet. Somit kann sich die geologische Interpretation auf eine breitere Grundlage stützen.

2.4.5 Messdaten

Standort A - Sollstedt

Bei dem Messverfahren I bestand das Problem der Triggerfehler, diese konnten aber mit der oben beschriebenen Korrektur minimiert werden. Die seismische Anregung erfolgte neben der Fahrstrecke im Bereich der ehemaligen Förderanlage. Dieser Bereich wies häufig Abschaltungen auf, was sich bei der Anregung durch ein dumpfes Schlaggeräusch äußerte. Verursacht durch diese oberflächennahen Auflockerungen ergab sich hier ein ungünstiges Signal-Rausch-Verhältnis.

Frequenzspektrum:

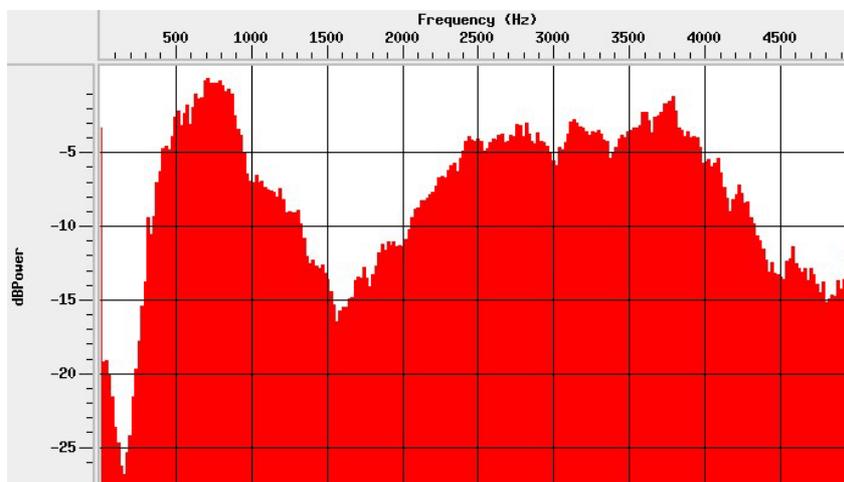


Abb. 2.4-4: Frequenzspektrum eines ausgewählten Ensembles der Piezo-Messungen in Sollstedt

Beim Messverfahren II erfolgte die Anregung direkt auf der gut verfestigten Fahrspur ohne die Nutzung einer Schlagplatte. Aufgrund der sehr hohen Energieeffizienz wurde auf eine Vertikalstapelung (mehrfache Anregung an einem Messpunkt) verzichtet. Das Signal- Rausch Verhältnis ist dennoch deutlich höher als bei den Messungen mit Piezoaufnehmern. Ein weiterer Schritt war die Verdichtung des Schusspunktabstandes auf einen Meter, was durch den Wegfall der Mehrfachstapelung ohne erweiterten Zeitaufwand möglich wurde. Der CMP-Stapelgrad erhöht sich damit auf 36 (gegenüber 8 für die Messungen mit 4 m Schusspunktabstand). Die Daten zeigen deutlich, dass besonders vor dem Eintreffen der Oberflächenwellen sehr gute Reflexionseinsätze erkennbar sind.

Einzelschüsse:

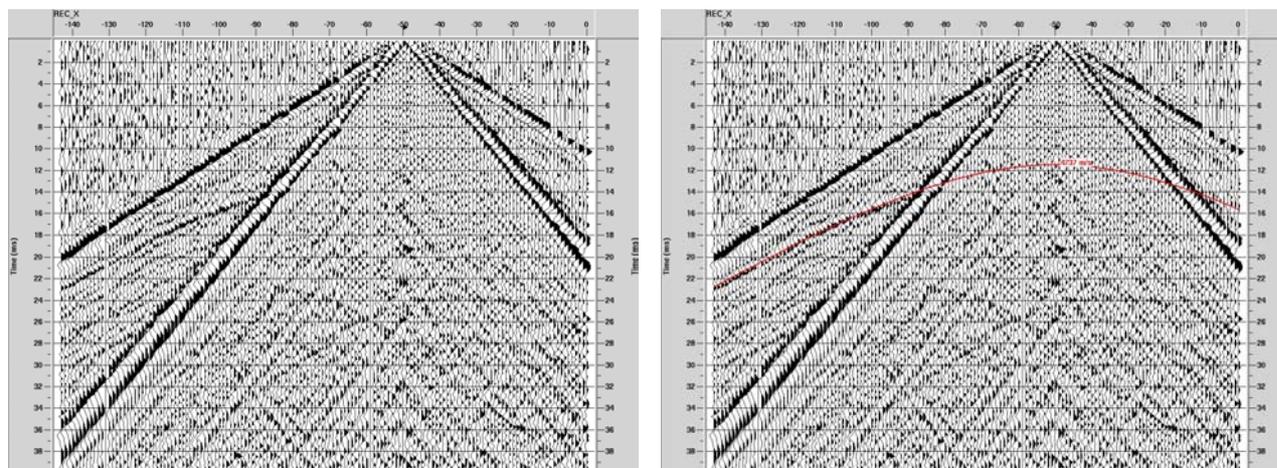


Abb. 2.4-5: Kombinierte Einzelschussabspielung (Schussposition –50m) (Darstellung mit starker Amplitudennormierung) das gute S/N Verhältnis ermöglicht eine klare Sichtbarkeit einzelner Reflexionen. Dabei wird deutlich, dass besonders vor dem Eintreffen der Oberflächenwellen sehr gute Reflexionseinsätze ausgehalten werden können. Entsprechend sind die Spuren mit großen Schuss-Empfänger-Offsets von hohem Wert.

Die Frequenzanalyse zeigt ein außerordentlich breites Nutzfrequenzspektrum zwischen ca. 200 Hz und 1600 Hz. Damit ist trotz sehr hoher Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen im Salzgestein eine Auflösung im Meter-Bereich möglich.

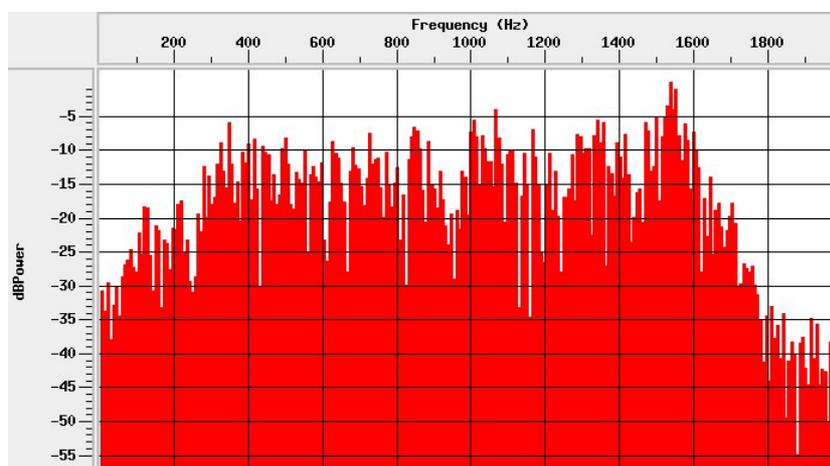


Abb. 2.4-6: Frequenzspektrum einer seismischen Spur (Schuss-Empfänger-Offset 6 m, Schusspunktlokation 105 m)

Standort B: Teutschenthal

Die Daten des Messverfahrens I weisen im Vergleich zu den Daten des Messverfahrens II hier ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis auf. So sind vor allem hochfrequente Störungen im Common Shotpoint Gather zu beobachten. Die einzelnen Spuren der Seismogramme haben sehr unterschiedliche Störpegel. Ursache dafür ist wahrscheinlich die unterschiedliche Beschaffenheit des anstehenden Gesteins, die die Ankopplungsbedingungen der Piezoschwinger stark beeinflussen.

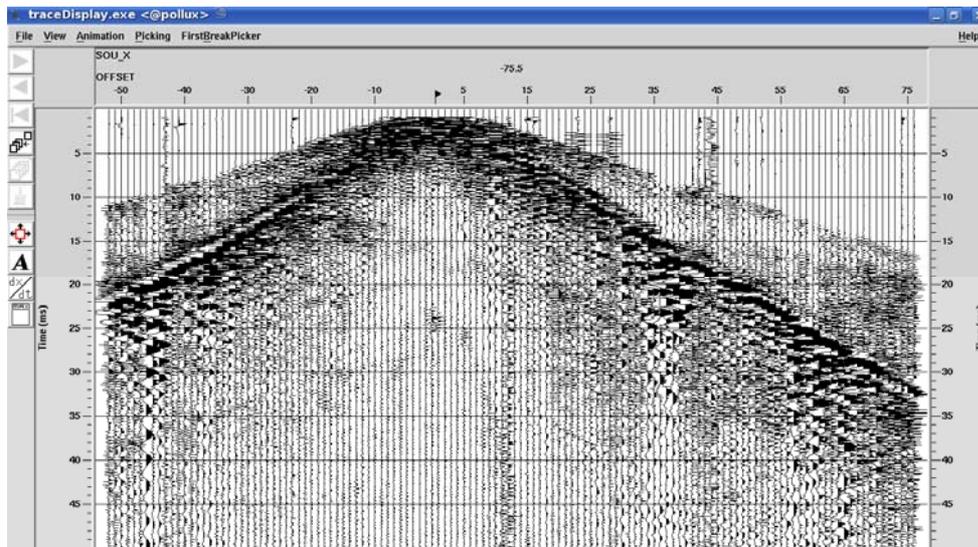


Abb. 2.4-7: Common Shotpoint Gather Messverfahren I mit hochfrequentem Noise.

Die Daten des Messverfahrens II zeigen deutliche Amplituden in den Ersteinsätzen der P-Welle und deren Reflexionen. Die aus der direkt gelaufenen Welle bestimmte P-Wellengeschwindigkeit liegt bei 4800 m/s.

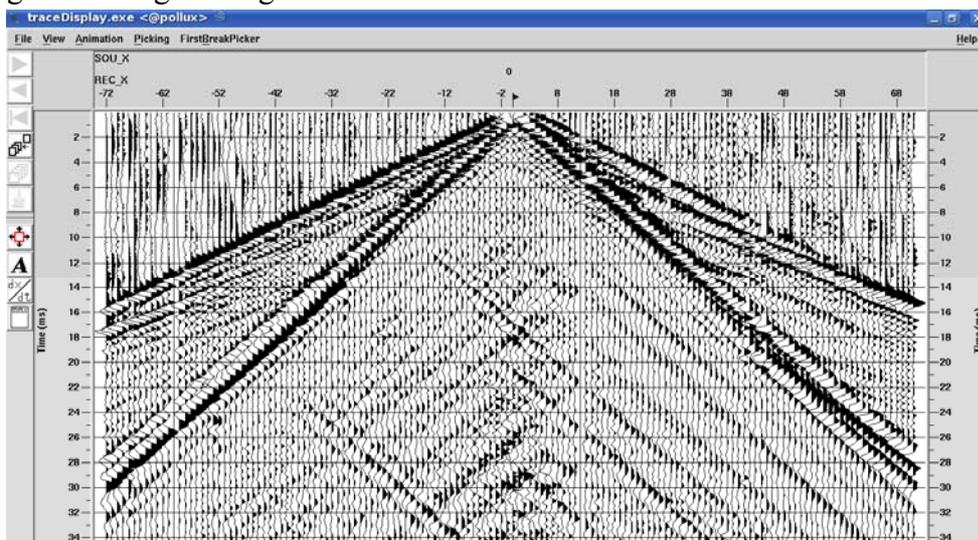


Abb. 2.4-8: Common Shotpoint Gather Messverfahren II, mit deutlichen Amplituden sind die Reflexionen vor dem Eintreffen der Oberflächenwellen zu sehen.

Die Resultate der Datenbearbeitung sind in den Abbildungen 2.4-9 und 2.4-10 dargestellt. Die P-Wellen-Stapelsektion der Methode II zeigt starke und aushaltende Reflektoren in einer Tiefe zwischen 15 und 30 m. Weiterhin sind Reflexionshorizonte bis in eine Tiefe von 90 m zu erkennen. Die Stapelgeschwindigkeit lag zwischen 4800 und 5200 m/s. Im Vergleich dazu ist die P-Wellen-Sektion aus Messverfahren I zu sehen (Abb. 2.4-10), die ein unscharfes Abbild des Untergrundes zeigt. Strukturen sind im Wellenbild kaum zu erkennen, was auf den geringeren Überdeckungsgrad und die Anregungsmethode (Hammer auf Schlagplatte im Salzgrus) zurückgeführt werden kann.

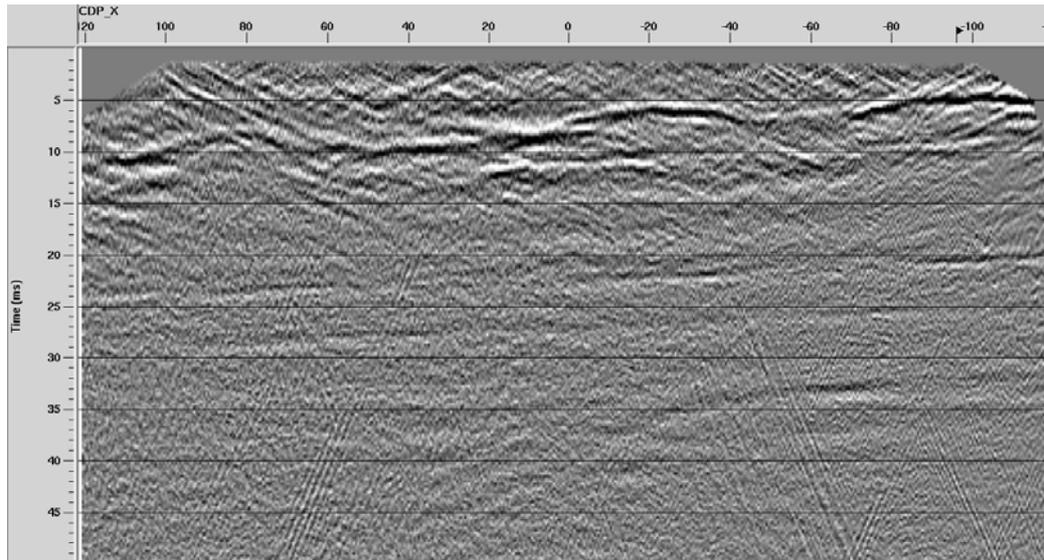


Abb. 2.4-9: P-Wellen-Stapelsektion des Messverfahrens II, Stapelgeschwindigkeit zwischen 4800 und 5200 m/s, deutlich treten die Reflektoren hervor.

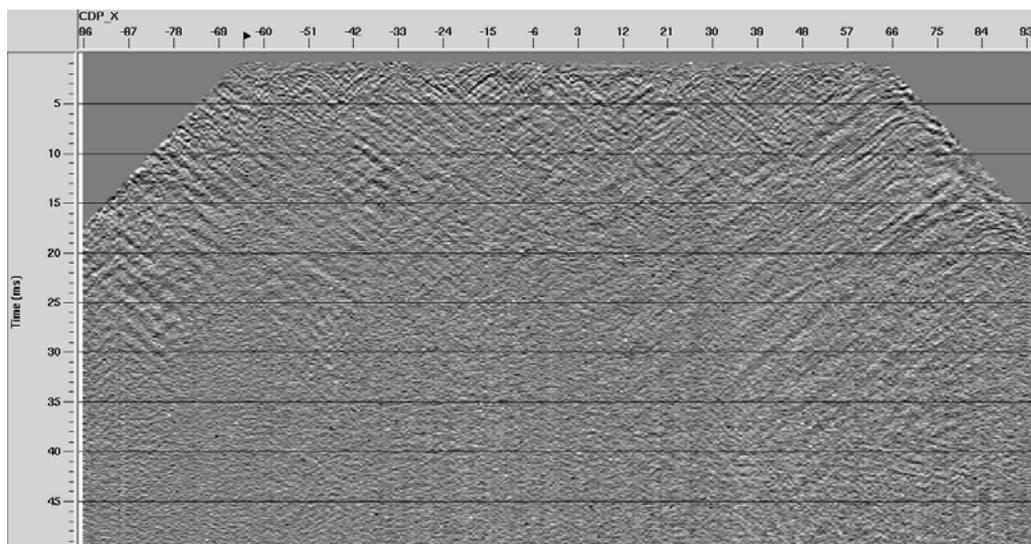


Abb. 2.4-10: P-Wellen-Stapelsektion des Messverfahrens I, Stapelgeschwindigkeit zwischen 4800 und 5200 m/s, hochfrequente Signalanteile sorgen für wenig Nutzinformation.

Standort C: Sigmundshall

Die Abb. 2.4-9 gibt anhand der migrierten Tiefensektionen einen Überblick über die erzielten Ergebnisse der Datenbearbeitung für die P- Welle. Aufgrund des nachteiligen Signal-Rausch Verhältnisses, das vermutlich wesentlich durch starke Abschalungen im Bereich des Streckenstoßes verursacht wurde, zeigt das Stapelergebnis nur unsicher interpretierbare Reflexionen. Die Tiefensektion zeigt nur einige kurze Reflexionselemente.

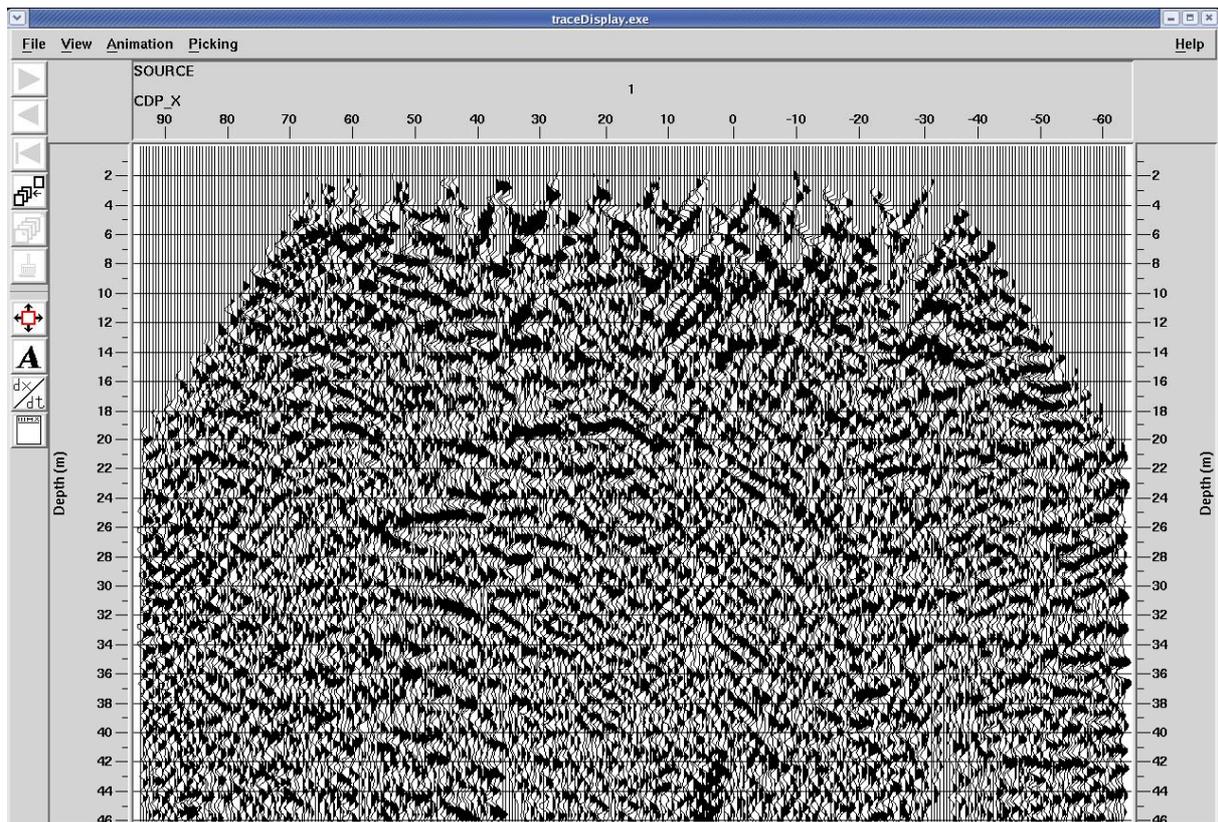


Abb. 2.4-9: P-Wellen-Stapelung (Stapelgeschwindigkeit konstant 4700m/s), nur der Anteil des Wellenfeldes vor dem Eintreffen der Oberflächenwellen ging in die Stapelung ein.

2.4.6 Ergebnisse der seismischen Untersuchungen

Standort A – Sollstedt

Die mit den 100 Hz Geophonen durchgeführten Messungen zeigen ein deutlich besseres Signal-Rausch-Verhältnis als die Messungen mit Piezoschwingern. Das Frequenzspektrum der Geophonmessungen reicht auch noch bei großen Schuss-Empfänger Offsets bis etwa 1600 Hz. Noch breitbandiger sind die Messungen mit den Piezoaufnehmern, in denen der Nutzfrequenzanteil bis zu 4 kHz beträgt.

Schräg unterhalb der Messstrecke liegende Hohlräume (Parallelstrecken und ehemalige Abbaukammern) können anhand der Auswertung des Scherwellenbildes mit sehr guter Auflö-

sung abgebildet werden. Die im Liegenden geologisch interessanten Reflexionen werden dagegen besser in den P-Wellenergebnissen dargestellt.

Wichtig für ein akzeptables Stapelergebnis sind besonders Spuren mit großem Schuss-Empfänger-Offset, da auf diesen die Einsätze reflektierter P- / S-Wellen vor dem Eintreffen der Oberflächenwelle registriert werden können. Aber auch aus der Untersuchung reflektierter Oberflächenwellen können Hinweis für oberflächennahe, steil stehende Störungszonen abgeleitet werden.

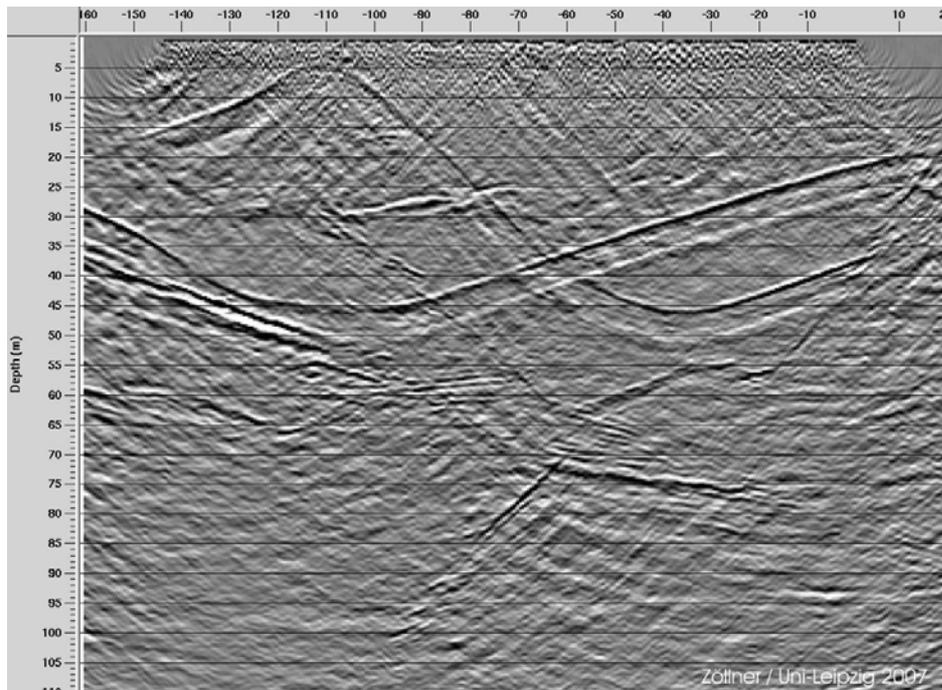


Abb. 2.4-10: CMP - Stapelung der S-Welle (2600m/s) mit Migration; deutlich werden Reflexionen durch benachbarte Strecken sichtbar

Der Vergleich mit dem Grubenplan zeigt, dass es sich bei den meisten der in der Seismik deutlich sichtbaren Strukturen um Reflexionen der umliegenden Strecken handelt, die sehr detailgetreu abgebildet werden (siehe Abb. 2.4-14).

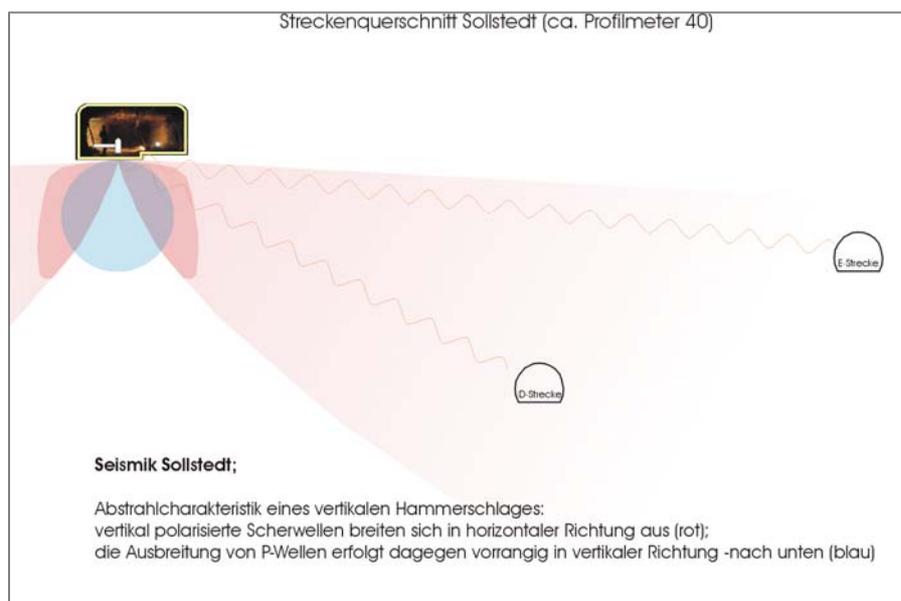


Abb. 2.4-13:
Abstrahlcharakteristik des vertikalen Hammerschlages: Erfassung der seitlich der Messstrecke liegenden Hohlräume durch S-Wellen.

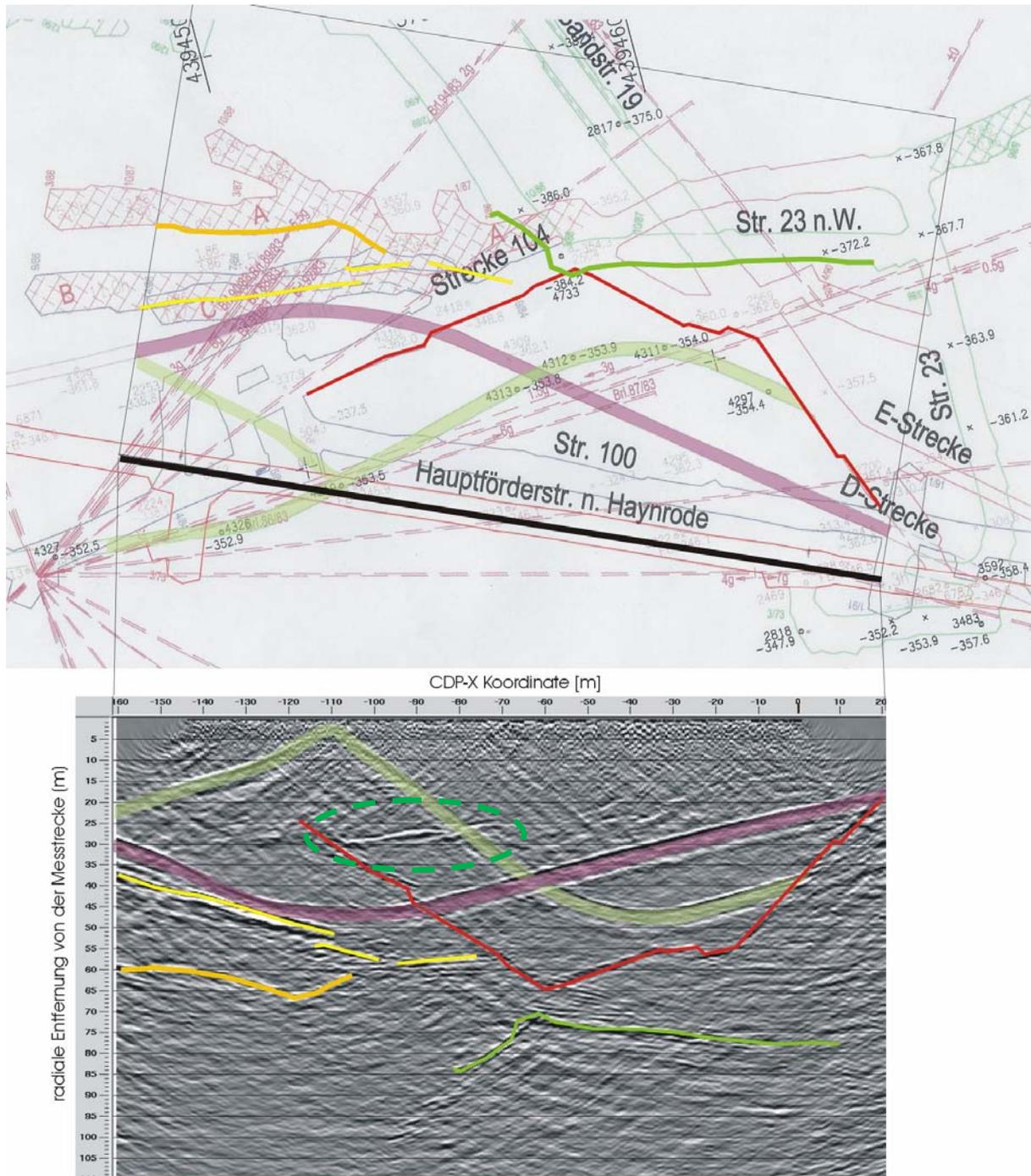


Abb. 2.4-14: Vergleich von Grubenplan und seismischem Profil der S-Wellen-Stapelung. Die einzelnen Strecken (farbig hervorgehoben) werden lagegetreu abgebildet. Die nicht vom Grubengebäude verursachte Reflexion (markiert durch die grüne Ellipse) ist durch die geologische Situation im Streckenumfeld bedingt.

Im Vergleich der P-Wellen Ergebnisse der Verfahren I und II zeigt sich die deutlich höhere Frequenz des Signalinhalts in den Seismogrammen des Verfahren I. Beim Processing der Daten der P-Wellen-Anregung ist es deutlich gelungen, die seitlichen Reflektionen zu entfernen und nur die Geologie darzustellen. Die Auswertung der S-Wellen hingegen verdeutlicht die

hochauflösende Abbildung des umliegenden Grubengebäudes. Die geologisch verursachten Reflexionen werden zum Teil durch die Reflexionen der benachbarten Strecken überlagert. Diese Reflexionen fallen deutlich stärker aus, was auf den hohen Reflexionskoeffizienten der seismischen Wellen beim Übergang von Salz zu Luft zurückgeführt werden kann.

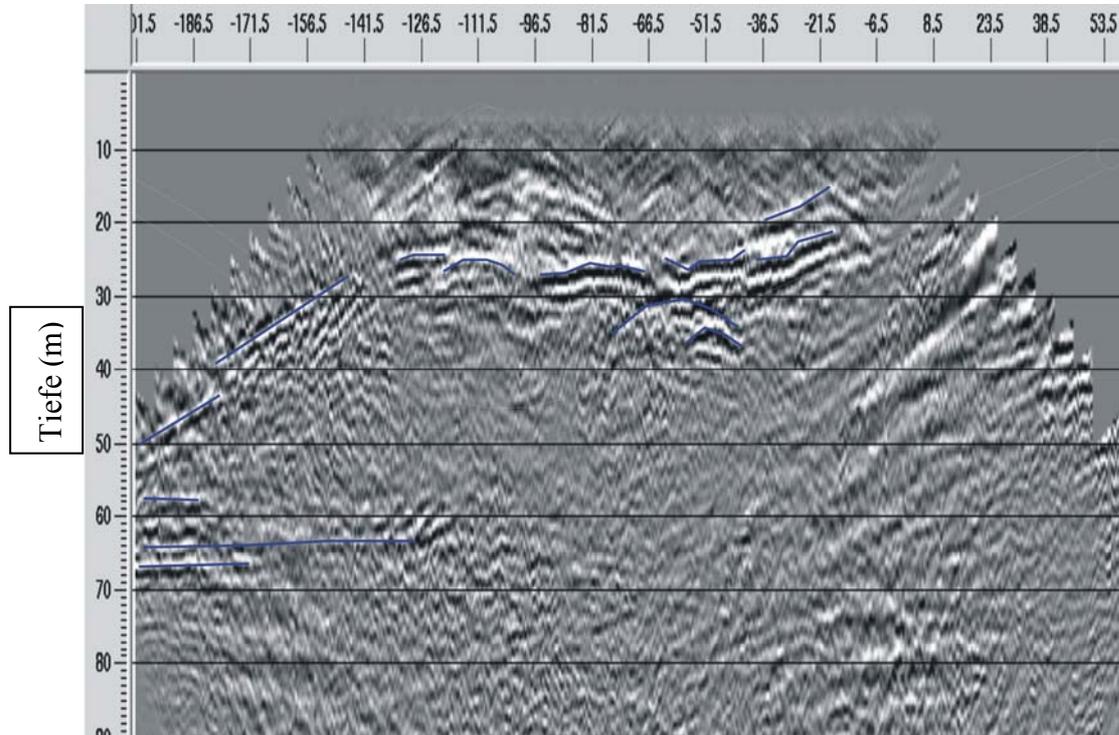


Abb. 2.4-15: Ergebnis der P-Wellenauswertung. Hier sind vor allem die geologischen Reflektoren sichtbar, wohingegen die meist seitlich liegenden Strecken nicht erfasst wurden.

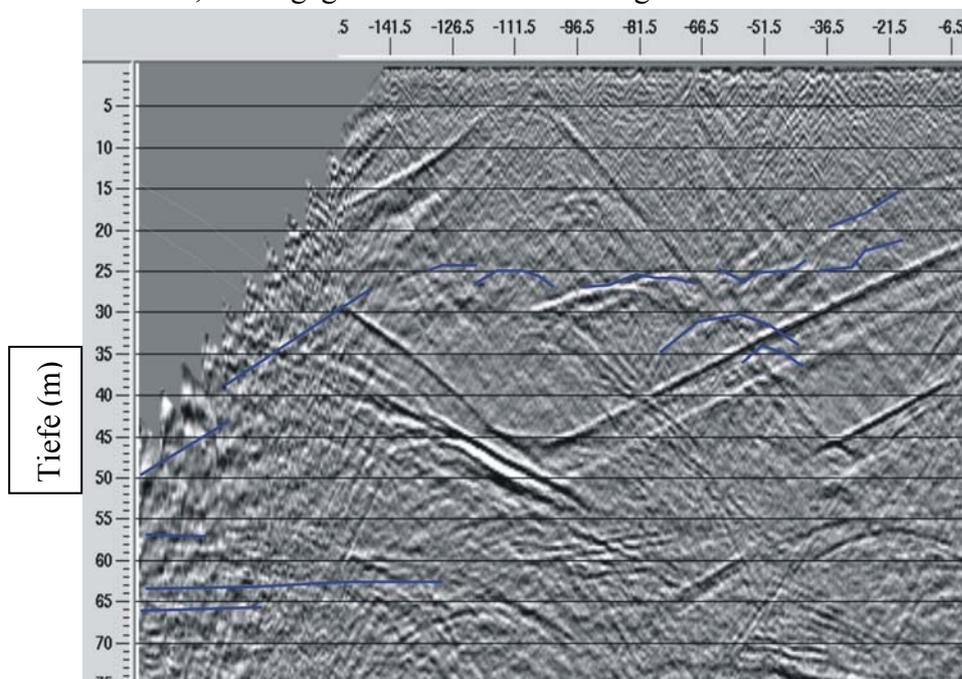


Abb.2.4-16: Stapelsektion der S-Wellenauswertung. Die geologischen Reflektoren treten in den Hintergrund, wohingegen die Reflexionen von den Strecken sehr deutlich das Ergebnisbild beherrschen.

Standort B Teutschenthal

Das Messprofil lag in der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf übereinstimmend mit den Profilen der anderen geophysikalischen Methoden. Die Strecke befindet sich über der westlichen Bruchfeldkante des Gebirgsschlages von 1996 im angefahrenen Leinsteinsalz (Na3). Da im Liegenden der Strecke bereits zwischen 5 m und 10 m der Hauptanhydrit (A3) ansteht, liegen die P-Wellen-Stapelgeschwindigkeiten der seismischen Verfahren höher als bei einer Erkundung im reinen Salz (hier: 5200 m/s gegenüber 4700 m/s im Vergleich zu den Erkundungen in Sollstedt). Die Reflexionen der geschuppten Oberfläche des A3 sind in der Stapelsektion des Messverfahrens II (Abb. 2.4-17, dunkelblau) deutlich sichtbar. Die folgenden Reflexionen werden lithologischen Schichtgrenzen innerhalb des A3 zugeordnet, so wird die unterste mit dem Übergang vom A3 zum Grauen Salzton T3 interpretiert.

In einer Teufe von ca. 90 m unter der Messstrecke sind Reflexionen erkennbar, welche der Unterkante des Grauen Salztones (T3) / Oberkante des Kaliflöz (K2) zugeordnet werden können. Interessanterweise sind diese Reflexionen der vermuteten Grenze T3/K2 nur bis ca. Profilmeter 0 sichtbar. Da hier die Grenze zwischen Bruchbereich und Unverritztem angenommen wird, kann die Abschwächung der Amplituden der seismischen Wellen damit im Zusammenhang stehen.

Das Messverfahren I brachte für diese Erkundung keine weiteren sichtbaren Ergebnisse, während aus den Ergebnisstapelsektionen des Messverfahrens III äquivalente geologische Informationen wie aus den Daten des Messverfahrens II abgeleitet werden konnten.

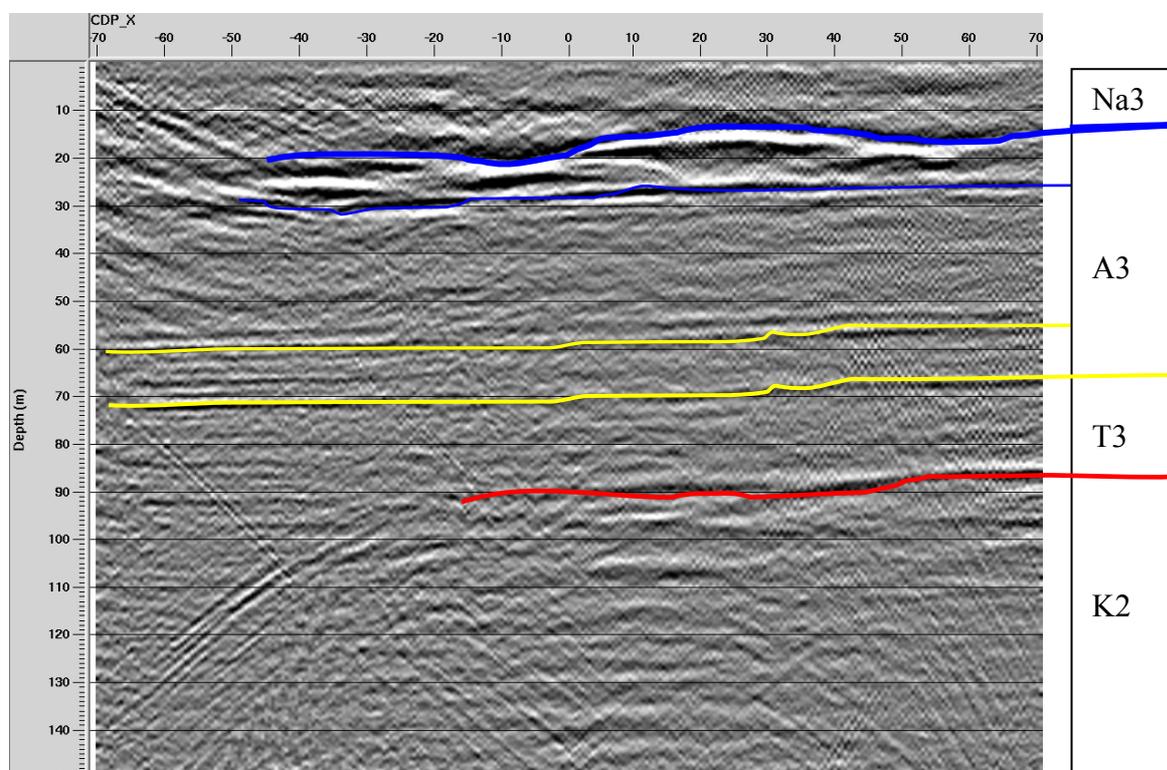


Abb. 2.4-17: P-Wellen-Stapelung mit Zuordnung der Reflexionen zu den Grenzen der lithologischen Einheiten (Stapelgeschwindigkeit zwischen 4800 und 5200m/s).

Die Stapelergebnisse der Einkomponenten-Geophonmessungen zeigen deutliche Reflexionen aus Tiefen von über 100 m. Dabei werden in den Stapelsektionen vermutlich Reste der Abbaustrecken der 4. Sohle im Bruchfeldbereich detektiert. Beim Vergleich zeigt sich eine gute Korrelation mit Radarergebnissen bei deutlich größerer Tiefenreichweite. Damit bietet die Seismik eine sehr gute Ergänzung zu den hochauflösenden und effizienten Radarmessungen.

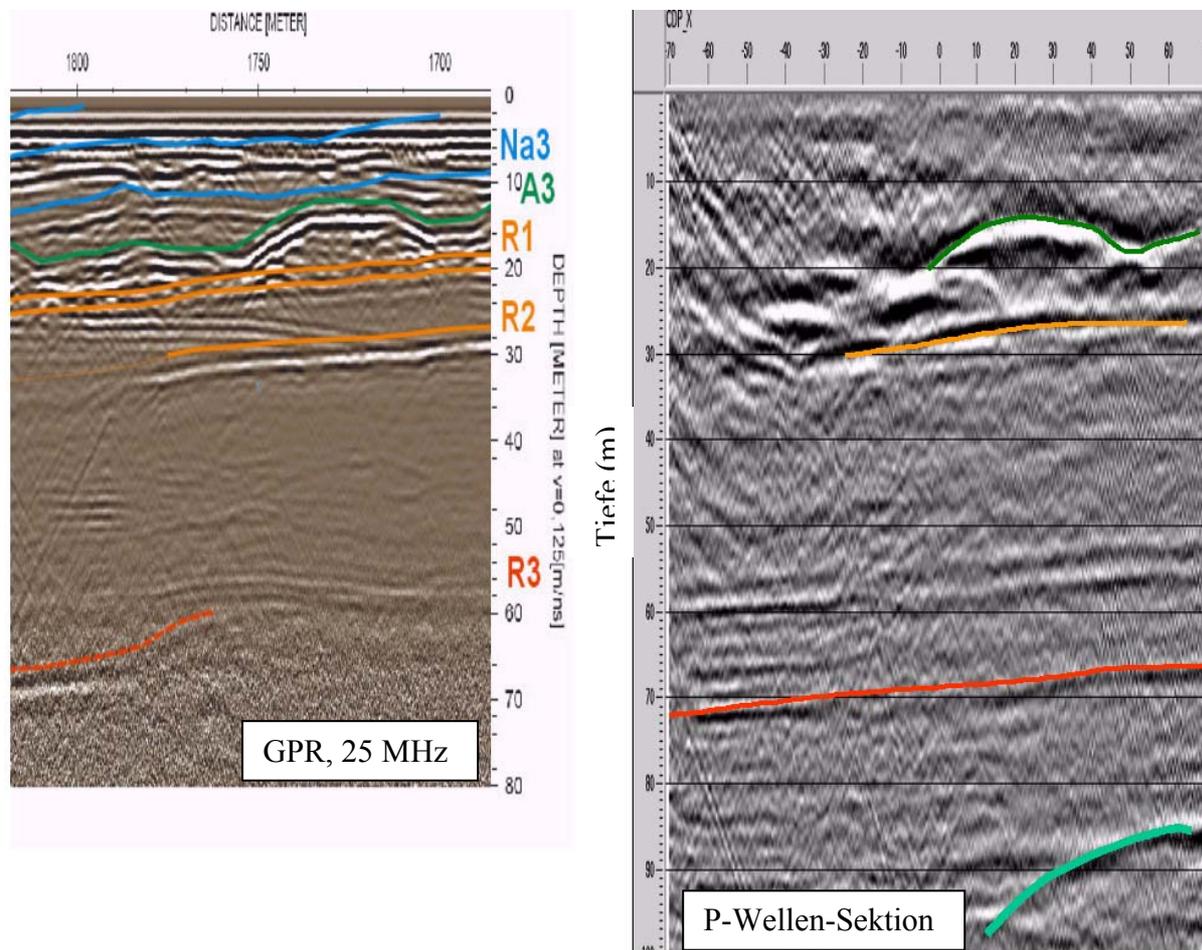


Abb.2.4-18: Gegenüberstellung des Radarergebnisses (25 MHz-Antenne) mit der P-Wellen-Stapelsektion, oberflächennahe Detailstrukturen können in der Reflexionsseismik nicht aufgelöst werden (Wellenlänge im m-Bereich), dagegen ist die Erkundungstiefe erheblich größer, in etwa 90 m-Tiefe sind noch Reflexionen von geologischen Grenzen erkennbar.

Standort C Sigmundshall

Auf Grund des ungünstigen Signal-Rausch - Verhältnisses, das im Wesentlichen durch starke Abschaltungen im Bereich des Streckenstoßes verursacht wurde, zeigt das Stapelergebnis nur unsicher interpretierbare Reflexionen. Bedingt durch die Standzeit zwischen der Messung Sigmundshall in Salinargeophysik II (2002) und Sigmundshall in Salinargeophysik III (2005) wurde die Zunahme von Abschaltungen sowie durch Bewetterungseinflüsse verursachte Auflockerungszonen verstärkt beobachtet. Diese aufgelockerten Zonen bedeuten eine erheblich

verschlechterte Gebirgsankopplung der Geophone an das Salzgestein. Die auftretenden Triggerfehler bei den Piezomessungen erschwerten die Datenbearbeitung zusätzlich. Es konnte eine Methode zur T-Null-Zeit – Korrektur mit Hilfe einer LMO Korrekturen entwickelt und angewendet werden. Im Rahmen der Messungen von Salinargeophysik III wurden eine P-Wellen Sektion und eine S-Wellensektion aus den erweiterten Datensatz erzeugt.

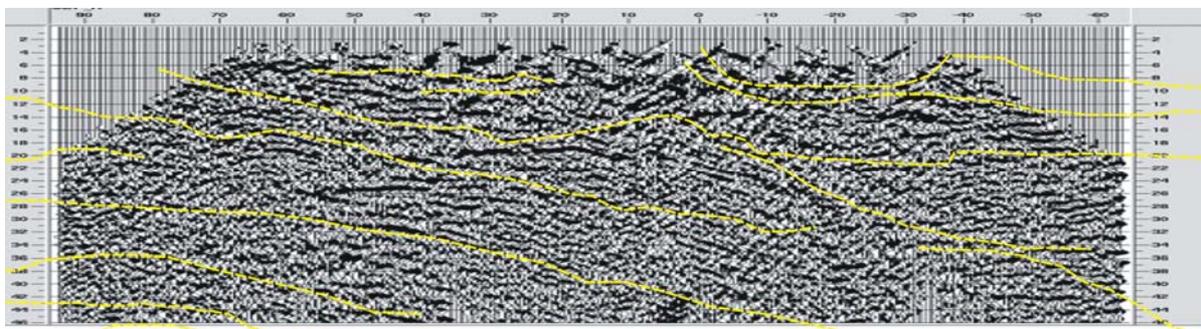


Abb. 2.4-19: P-Wellen Sektion der Neumessung in Sigmundshall (2005) überlagert mit den Informationen der Radaruntersuchungen (Projekt Salinargeophysik II)

In der Abb. 2.4-19 sind die Reflektoren der Radarmessung eingezeichnet. Bei den hochfrequenten seismischen Daten sind dabei sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede erkennbar. So sind die in Richtung Profilanfang sich vom Stoß entfernenden Reflektoren im Seismogramm erkennbar und nachvollziehbar. Im Nahbereich des Stoßes kann das seismische Verfahren keine weiteren Reflektoren auflösen. Es treten aber auch noch Reflektoren auf, welche die einfallenden Reflexionen anschneiden. Diese Reflexionen wurden im Radargramm nicht erkannt und stellen somit einen Informationsgewinn dar. Diese Reflexionen deuten auf eventuelle Brüche in den abgebildeten Anhydritbereichen hin.

Das in Abb. 2.4-20 dargestellte Ergebnis der S-Welle deutet ebenfalls einige der Radarreflektoren an. Allerdings ist eine größere Anzahl von gestörten Bereichen erkennbar als in der P-Wellen Sektion. Dies ist wahrscheinlich auf die schlechten Ankopplungsbedingungen zurückzuführen und mit den nur energiearm angeregten S-Wellen zu erklären. Erst nach Anwendung eines Tiefpassfilters der Grenzfrequenz 400 Hz werden Teile der Radarreflektoren auch in der seismischen S-Wellen-Stapelsektion erkennbar. Unter den für die seismischen Messungen nicht idealen Bedingungen lassen sich die geneigten Reflektoren nachvollziehen. In größerer Entfernung zum Stoß sind weitere Reflexionselemente sichtbar, welche aber nicht durch Bohrungen oder andere Verfahren bestätigt werden können.

Im Anhang A2 sind die Messergebnisse von 2002 und 2005 von Sigmundshall gemeinsam dargestellt. Auf Grund der unterschiedlichen Messbedingungen ergibt sich kein einheitliches Bild in den Seismogrammen, die Gemeinsamkeit der geneigten Reflektoren wird aber in beiden Messungen offensichtlich.

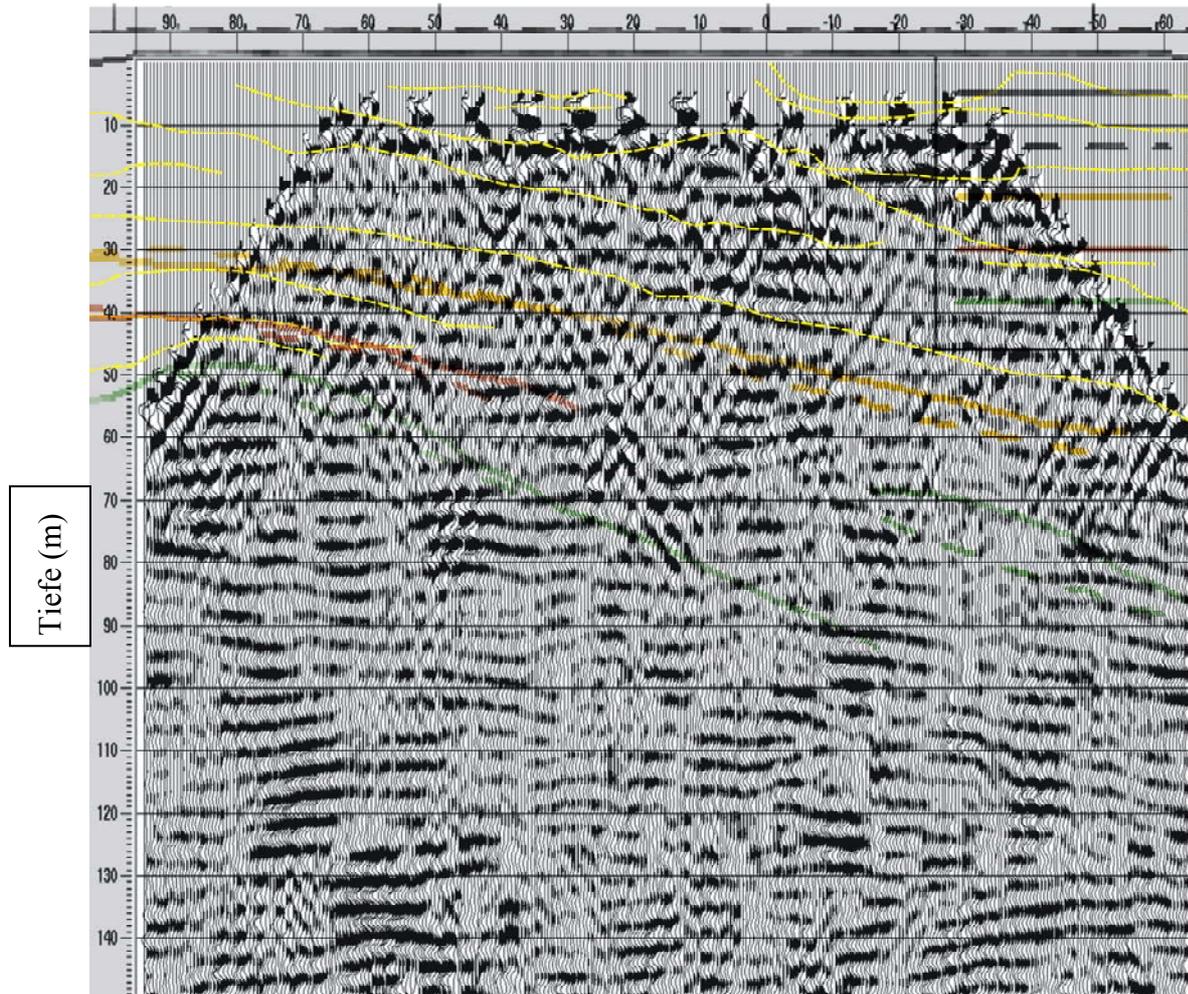


Abb.2.4-20: Tiefpassgefilterte S-Wellen-Sektion der Neumessung in Sigmundshall (2005) überlagert mit den Informationen der Radaruntersuchungen (Projekt Salinargeophysik II)

2.4.7 Seismischer Quellentest

Um den Einfluss der seismischen Anregungsmethode auf das Ergebnis hinsichtlich des Signal-Rausch-Verhältnisses zu verifizieren, wurde ein seismischer Quellentest am Referenzstandort B auf der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf durchgeführt. Zur Anregung wurden ein 5 kg-Vorschlaghammer mit und ohne Schlagplatte, ein 4 kg-Plastikhammer ohne Schlagplatte sowie ein P-Wellen-Vibrator der Firma Geosym mit 3 verschiedenen Frequenzanregungsbändern zum Einsatz gebracht. Als Registrierapparatur standen zwei Geoden der Firma Geometrics zur Verfügung, welche mit 47 Vertikal-Geophonen (60 Hz) das seismische Wellenfeld aufzeichneten. Für den Test wurde eine Auslage mit Geophonpunktabstand 1 m aufgebaut.

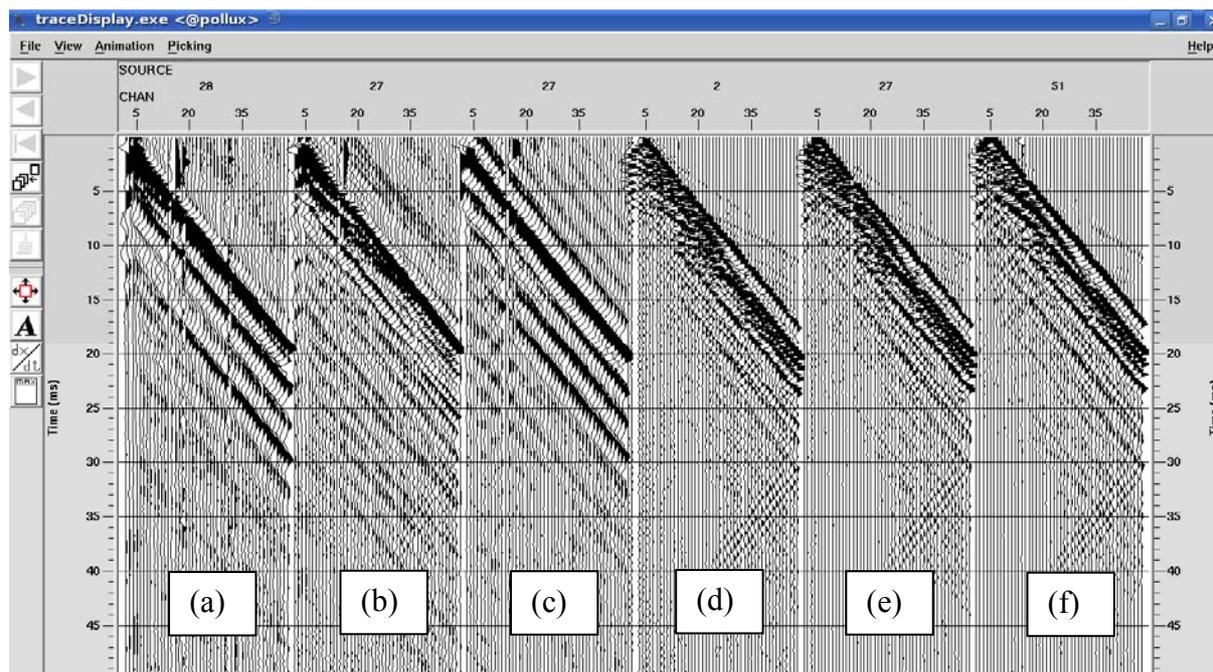


Abb. 2.4-21: Einzelschüsse einzelspurnormiert, a: Sweep 15 Hz-120 Hz, b: Sweep 20 Hz-160 Hz, c: Sweep 60 Hz-360 Hz, d: Hammer mit Schlagplatte, e: Hammer ohne Schlagplatte, f: Kunststoffhammer

Zur Verifizierung der Unterschiede der einzelnen Anregungsverfahren bietet sich die Untersuchung der spektralen Information der Einzelschüsse an (Abb. 2.4-22). Sie zeigt den Energiegehalt pro Schuss als Funktion der Frequenz. Der P-Wellenvibrator zeigt ein entsprechend dem gewählten Anregungsband adäquates Frequenzband, dessen Energiegehalt signifikant unter den Hammerschlagmethoden liegt. In den Quellentests wurden mit dem Vibrator Signale angeregt, die zu tiefe Frequenzen beinhalten, um sinnvoll im Salinar eingesetzt werden zu können.

Die energiestärksten Anregungen erfolgten mit dem Metallhammer. Sowohl der Plastik- als auch der Metallhammer zeigen eine breitbandige Frequenzcharakteristik, wobei mit dem Metallhammer bei den Versuchen die höchsten Frequenzen angeregt wurden. Der angenommene Unterschied zwischen Hammeranregung mit und ohne Schlagplatte wurde bei den Testmessungen nicht deutlich sichtbar. Allerdings zeigt sich im Frequenzspektrum ein Unterschied in der Amplitude für verschiedene Frequenzbereiche. Gerade die tieferen Frequenzen sind in den Anregungen mit Platte stärker. In den Ergebnissen der Anregung ohne Platte sind dagegen die mittleren Frequenzen mit einer stärkeren Amplitude sichtbar. Das Spektrum der Kunststoffhammerquelle weist erst ab ca. 20 Hz ein nennenswertes Amplitudenniveau auf. Das scharfe Abfallen des Spektrums bei 2 kHz ist durch die apparative Abtastfrequenz (4 kHz, Nyquistfrequenz = 2 kHz) begründet.

Aufgrund der hohen akustischen Impedanz des Salzgesteins sind Hammerschlaganregungen für Untertagemessungen geeignet. In Streckenabschnitten mit wenig industriellen Störungen (durch aktiven Abbau / sonstige Vibrationen) sind Erkundungsteufen bis zu 100 m Streckenentfernung erreichbar bei Auflösungsgenauigkeiten im Meterbereich.

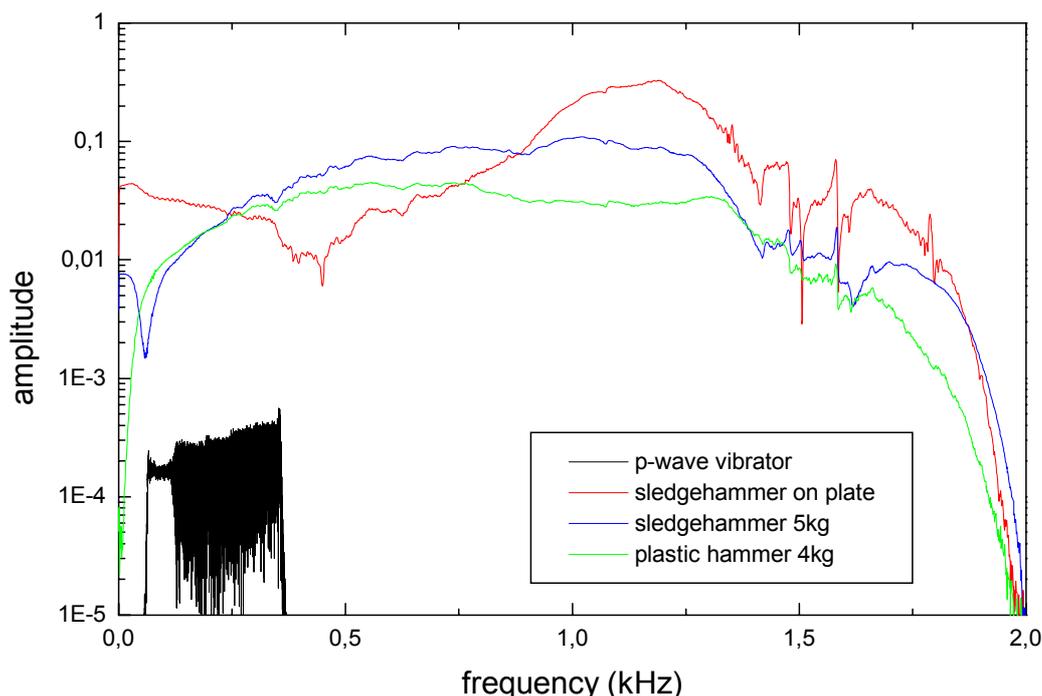


Abb. 2.4-22: Frequenzspektrum eines exemplarischen Einzelschusses. Dargestellt sind die verschiedenen Anregungsmethoden (P-Wellenvibrator, Metallhammer 5kg mit und ohne Schlagplatte, Plastikhammer).

Die Quellentestdaten wurden zum Test refraktionstomographisch ausgewertet. Ausgehend von den a-priori Informationen über den Streckenaufbau (Strecke durch Salzgrus aufgefüllt, liegender Hauptanhydrit mit deutlich höherer Geschwindigkeit als Leinesteinsalz) sollten die obersten Strukturen des Salzgruses und das Steinsalz bis zum Refraktor Hauptanhydrit abgebildet werden. Genutzt wurde das Programm Rayfract (Intelligent Resources Inc., Vancouver).

Im Ergebnisbild der Refraktionstomographie bis in eine Tiefe von 10 m ist eine oberflächennahe Niedriggeschwindigkeitszone charakteristisch, welche sowohl durch die Entlastung des Gebirges im Bereich der Sohle als auch durch wiederholte Betonarbeiten entlang der Fahrspuren und der damit verbundene Beanspruchung der obersten Sohleschichten durch eindringendes Wasser entstanden ist. Dabei gibt die leichte Kuppenstruktur im Tomogramm die Einflüsse der darunter liegenden Geologie wieder. Die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes aus den gleichstromgeoelektrischen Untersuchungen weist vergleichbare Strukturen im Untergrund des Profils auf. Die Zonen niedriger P-Wellengeschwindigkeiten lassen sich durch Zonen sehr hoher elektrischer Leitfähigkeiten charakterisieren, welche einen eindeutigen Hinweis für erhöhte Wassergehalte im sohlennahen Salzgestein darstellen. Weiterhin wird eine Korrelation zwischen ansteigenden Geschwindigkeiten und steigenden Widerständen ab einer Teufe von 5 m unterhalb der Sohle beobachtet. In dieser Teufe wurden in den Radaruntersuchungen interne Na₃-Reflektoren beobachtet.

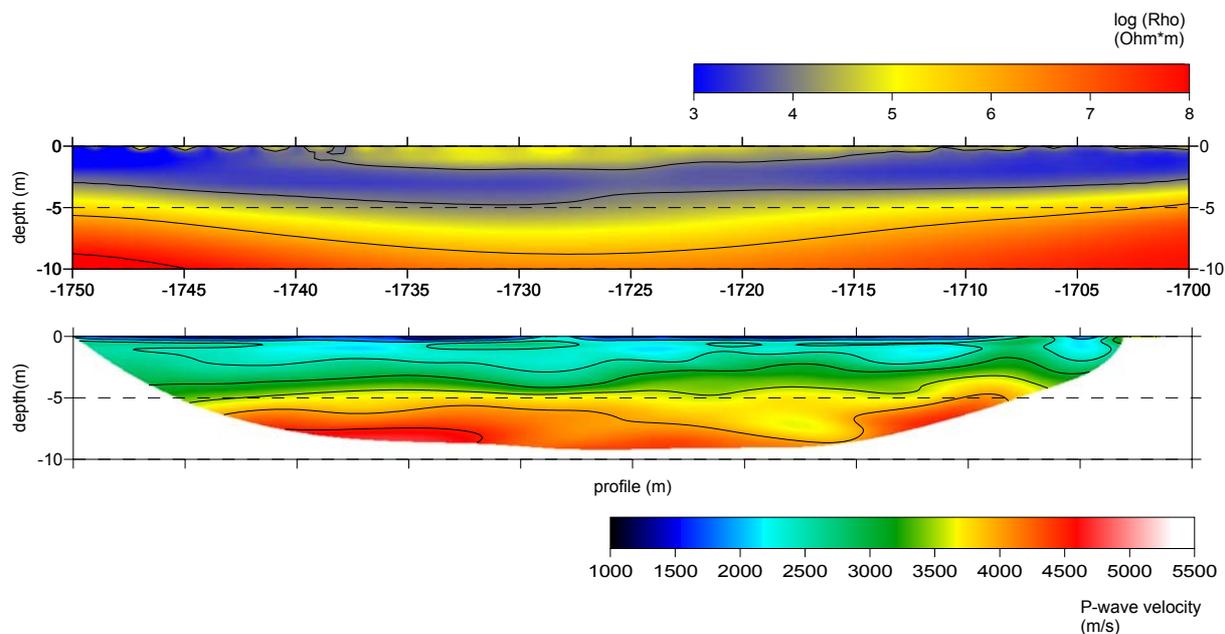


Abb. 2.4-23: Vergleich elektrischer Widerstand und seismische P-Wellen-Geschwindigkeit auf dem Testprofil in der Verbindungsstrecke Teutschenthal - Angersdorf

2.4.8 Zusammenfassung Seismik

Im Quellentest in der Grube Teutschenthal konnte nachgewiesen werden, dass durch die Hammerschlagseismik in den Salzbergwerken sehr breitbandige seismische Signale angeregt werden. Die Untersuchung verschiedener Messverfahren zeigte, dass die besten Ergebnisse in diesem Projekt mit 100 Hz Geophonen und Hammerschlaganregung erzielt wurden. Obwohl die Piezoaufnehmer (bewährt in den Vorgängerprojekten) ein noch breitbandigeres Signal bis 4 kHz aufzeichnen, brachten diese Aufzeichnungen erst nach einer umfangreichen Datenbearbeitung (Beseitigung von Triggerfehlern, Tiefpassfilterung) verwertbare Signale.

Die Auswertung der Messungen ergab, dass in den Ergebnissen der seismischen Erkundungen die Strukturen im Untergrund bis in große Entfernungen von den Profilstrecken nachgewiesen werden können. Anhand der Auswertung der unterschiedlichen Wellentypen im seismischen Datensatz ließen sich die Strukturen hinsichtlich ihrer Lage zum Erkundungsprofil (unterhalb oder seitlich davon) trennen, so dass eine Richtungszuordnung möglich war (Erkundungen in Sollstedt). Durch das seismische Verfahren konnten die Ergebnisse der anderen geophysikalischen Methoden (Georadar, Geoelektrik, Geosonar) bestätigt bzw. ergänzt werden. Ein beeindruckendes Beispiel dafür sind die übereinstimmenden Ergebnisse von Georadar und Seismik am Standort Teutschenthal (Abb. 2.4-18). Hier konnten die Radarreflektoren bestätigt bzw. weitere Reflektoren in größerer Tiefe zusätzlich in die Interpretation integriert werden, welche auf Grund der geringeren Eindringtiefe des Radars nicht erkundet wurde.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass mittels einer Joint-Interpretation von geoelektrischen und refraktionsseismischen Daten (Ansprache zweier petrophysikalischer Parameter) in Teutschenthal die Informationen für den Nahbereich verbessert werden konnten.

Als Störeinfluß auf die Qualität der seismischen Daten werden die streckenahen Auflockerungszonen (z.B. Abschaltungen) erkannt. Die dadurch ungünstigen Ankopplungsbedingungen

verursachen einen hohen Rauschpegel in den seismischen Daten, die sich besonders bei den Untersuchungen mit breitbandigen Piezoaufnehmern nachteilig auf das Stapelergebnis auswirkte (Sigmundshall).

2.5 Literatur

- [1] GÜNTHER, TH., RÜCKER, C. & SPITZER, K.(2006): Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - II. Inversion. – *Geophys. J. Int.*, **166**: 506–517. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03011.x.
- [2] JUST, A., JACOBS, F., TUCH, A., KNIEB, R., SCHUCK, A., SCHMIDT, V., ROST, F., LINDNER, U., SCHICHT, TH., SCHWANDT, A., KURZ, G., IGEL, J., SCHULZ, R., SCHULZE, E., KÜHNICKE, H. (2004): Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02C0851, 02C0861, 02C0871, Leipzig 2004.
- [3] JUST, A., RÜCKER, C., SERFLING, U., SCHÜTZE, C. (2008): Interpretation geoelektrischer Messungen in einem Salzbergwerk mit Hilfe von 3D Finite-Elemente-Modellierungen. Vortrag 68. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft in Freiberg, Sa.
- [4] KAMPKE, A. (1996): Modellierung und Inversion von Daten der induzierten Polarisation für zweidimensionale Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit. Diplomarbeit am Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig.
- [5] KNÖDEL, K., KRUMMEL, H., LANGE, G. (1997): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bd. 3: Geophysik.- Berlin (Springer).
- [6] KULENKAMPPF, J., ASCHMANN, L., JUST, A., BERGMANN, K., MOISE, E., JACOBS, F., SCHUCK, A., LINDNER, U., SCHWANDT, A., KURZ, G., FLUCHE, B., SCHULZ, R., KÜHNICKE, H., REUTTER, O., SCHUBERT, F. (2002): Komplexes Mess- und Auswerteeinstrumentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und Untertagedeponien (UTD) im Salinar. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02C0558, 02C0568, 02C0578, Leipzig 2002.
- [7] KULENKAMPPF, J., JUST, A., ASCHMANN, L., JACOBS, F. (2005): Laboratory investigations for the evaluation of in situ geophysical measurements in a salt mine. In: Harvey, P.K., Brewer, T.S., Pezard, P.A., Petrov, V.A.: *Petrophysical Properties of Crystalline Rocks*. Geological Society, London, Special Publications, 240, 301-306.
- [8] KURZ, G., ASCHMANN, L., JACOBS, F., KULENKAMPPF, J., MOISE, E., SCHUCK, A., SCHULZ, R. (2002): Auswertekonzept zur geophysikalischen Erkundung von Problemzonen im Salinar. *Zeitschrift für Angewandte Geologie* 48 (2), 56–62.
- [9] MINKLEY, W. (2008): Integritätsverhalten von Salinarbarrieren. 8. Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen, 6./7. Mai 2008. Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 10, S. 183-220.

- [10] RÜCKER, C., GÜNTHER, TH., SPITZER, K. (2006): Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - I. Modelling. – *Geophysical Journal International* 166, 495–505. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03010.x
- [11] SCHÜTZE, C., FLECHSIG, CH. (2002): Structural Investigations of an Active Hydrothermal System Beneath the Long Valley Caldera, California, Using DC-Resistivity Imaging Methods. *Z. geol. Wiss.* 30, 1-2.
- [12] SCHÜTZE, C., RÜCKER, C., SERFLING, U., MATTHES, K., JUST, A. (2008): Strukturelle Erkundung und Prozessbeobachtung im Salinar – Möglichkeiten und Grenzen untertägiger DC-geoelektrischer Messungen. Poster 68. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft in Freiberg, Sa.
- [13] SCHÖNFELDER, W. (2003): Der spezifische elektrische Widerstand von Salzgestein.- Seminararbeit an der Universität Leipzig (unveröff.).
- [14] SCHOLZ (1983): *Karl Fischer Titration*. Springer-Verlag, Berlin.
- [15] STORZ, H., STORZ, W., JACOBS, F. (2000): Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. *Geophys. Prosp.* 48, 455-471.
- [16] VILWOCK, G. & REICHENBACH, W. (2005). Abschlussdokumentation Geologische Betreuung Streckenauffahrung Angersdorf-Teutschenthal und Bewertung des Laugenzuflusses. GFE CONSULT GmbH Stendal. (unveröff.)
- [17] YARAMANCI, U. (2000): Geoelectric exploration and monitoring in rock salt for the safety assessment of underground waste disposal sites. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 181–196

3 Elektromagnetik und Georadar

B. Ehret, S. Uchtmann, R. Ziekur (LIAG Hannover)

3.1 Elektromagnetik – Untertagemessungen

3.1.1 Messprinzipien und Messtechnologie

Das Messprinzip des elektromagnetischen Induktionsverfahrens (EM) beruht darauf, dass in einer stromdurchflossenen Senderspule ein primäres Magnetfeld aufgebaut wird. Dieses magnetische Wechselfeld induziert in leitfähigen Bereichen elektrische Wirbelströme, die wiederum ein magnetisches Feld aufbauen. An einer Empfangsspule wird das primäre und sekundäre Feld als komplexe Größe gemessen (siehe z. B. GRANT & WEST 1965). Der Realteil wird im Folgenden als In-Phase-Komponente (IP-Komponente) und der Imaginärteil als Out-of-Phase-Komponente (OP-Komponente) bezeichnet.

Zur Berechnung der Eindringtiefe wird die aus der Magnetotellurik bekannte Formel für die Skintiefe verwendet. Sie beschreibt den Amplitudenabfall auf den 1/e-ten Teil und gilt streng genommen nur für eine ebene Welle. Ihr Ansatz ist auch für Dipolfelder üblich und zeigt die reziproke Abhängigkeit von der Frequenz ω und der Leitfähigkeit σ , d.h. je größer die Frequenz (Leitfähigkeit) desto geringer ist die Eindringtiefe:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu_0}}$$

mit σ [S/m] Leitfähigkeit; $\omega = 2\pi f$ [Hz] Kreisfrequenz; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m magnetischer Permeabilität im Vakuum.

Elektromagnetik-Messungen können mit verschiedenen Anordnungen durchgeführt werden. Ein Überblick über mögliche Konfigurationen der Mess-Spulen ist in Abbildung 3-1 zusammengestellt. Standardmäßig wird das Verfahren in horizontal koplanarer Anordnung eingesetzt.

Konfiguration	MaxMin	Spulenlage	Bezeichnung
horizontal koplanar	Max I		H_{zz}
vertikal koplanar	Max II		H_{yy}
vertikal coaxial	Max III		H_{xx}
minimal	Min I		H_{zx}
minimal	Min II		H_{xz}

Abb. 3-1: Die verschiedenen EM-Konfigurationen und ihre unterschiedlichen Bezeichnungen. In der Spalte „Bezeichnung“ kennzeichnet der erste Index die Lage des Sender-Dipols, der zweite Index die Lage des Empfänger-Dipols (KURZ, 2005).

3.1.2 Messkampagnen an den Untersuchungsstandorten

Die Elektromagnetik wurde an beiden Bergwerksstandorten eingesetzt. Zur Anwendung kam jeweils eine horizontal koplanare Spulenanordnung (H_{zz} -Komponente) mit dem kommerziellen Messsystem Apex MaxMin. Gemessen wurde mit Antennenabständen von 20 m und 40 m mit 10 Frequenzen im Bereich zwischen 110 Hz und 56 kHz. Der Messpunkt Abstand betrug bei 20 m Antennenabstand 5 m und bei 40 m Antennenabstand 10 m. Die Messungen erfolgten an den beiden Standorten parallel zu den Georadaruntersuchungen in jeweils einer Messkampagne (Tabelle 3-1).

Tab. 3-1: Übersicht über die Messkampagnen.

	Messkampagne	Messbereich	Datum	Messaufstellung
Standort A Sollstedt	SOLLD	Hauptförder- strecke	20.06.06 - 23.06.06	H_{zz} 20 m und 40 m Abstand
Standort B Teutschenthal	TEUTC	westliche Bruchfeld- grenze	23.10.06 - 27.10.06	H_{zz} 20 m und 40 m Abstand

Eine Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung von Elektromagnetikmessungen untertage ist, dass sich keine störenden elektrischen Leitungen oder Metallteile in der Nähe der Messstrecken befinden (JUST et al., 2004). Dies ist an den beiden untersuchten Standorten jedoch nicht der Fall.

Standort A – Sollstedt

Die EM wurde am Standort Sollstedt auf dem Profilbereich von –120 m bis 120 m eingesetzt. Die Messungen wurden sowohl im Standardbetrieb mit stromdurchflossenen Leitern, als auch mit abgeschaltetem Strom durchgeführt. Bei der Abschaltung waren die Kabel, die die Kommunikation im Bergwerk sicherstellen (Telefon- und Modemkabel) noch stromführend. Zudem befanden sich auf dem gesamten Profil metallische Reste der ehemaligen Förderanlage, z. B. in Form von Stahlseilen und Ketten und einer großen Verladestation bei Profilkordinate $x = 60$ m. Aus diesem Grund waren die Erfolgsaussichten für die EM-Messungen in Sollstedt sehr gering.

Standort B – Teutschenthal

Das EM-Profil in Teutschenthal umfasst den Bereich von 1650 m bis 1850 m. Hier konnten die zahlreichen stromführenden Kabel nicht stromfrei geschaltet werden, da über sie dauerhaft der Lüfter betrieben wurde. Auch hier befanden sich Metallteile in Form von Lüftungsrohren in der Strecke. Besonders im Profilbereich 1800 m bis 1850 m ist ein starker Einfluss auf die EM-Messungen zu erwarten.

3.1.3 Datenbearbeitung und Auswertung

Eine Inversion der EM-Messdaten ergab keine sinnvollen Ergebnisse. Die Ergebnisse der Elektromagnetik konnten deshalb nur qualitativ und nicht quantitativ interpretiert werden. Sie dienen somit als ergänzende Übersichtsmessung. Die EM-Daten wurden aufbereitet und die einzelnen Komponenten für die verschiedenen Frequenzen in Prozent dargestellt.

3.1.4 Ergebnisse der elektromagnetischen Messungen

Standort A – Sollstedt

In den nachfolgenden Abbildungen 3-2 und 3-3 sind die erhaltenen Messkurven für den Untersuchungsbereich Sollstedt für einen Antennenabstand von 20 m dargestellt. Die Ergebnisse weisen eine Anomalie im Zentrum des Messprofils auf, die jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht geologischen Ursprungs ist. Die Anomalie wird vermutlich durch eine große metallische Verladestation der Förderanlage verursacht. Weiterhin ist zu berücksichtigen ist, dass zusätzlich zu der Förderanlage auch die in den Strecken vorhandenen zahlreichen elektrischen Leitungen starke Störungen in den Messsignalen verursachen.

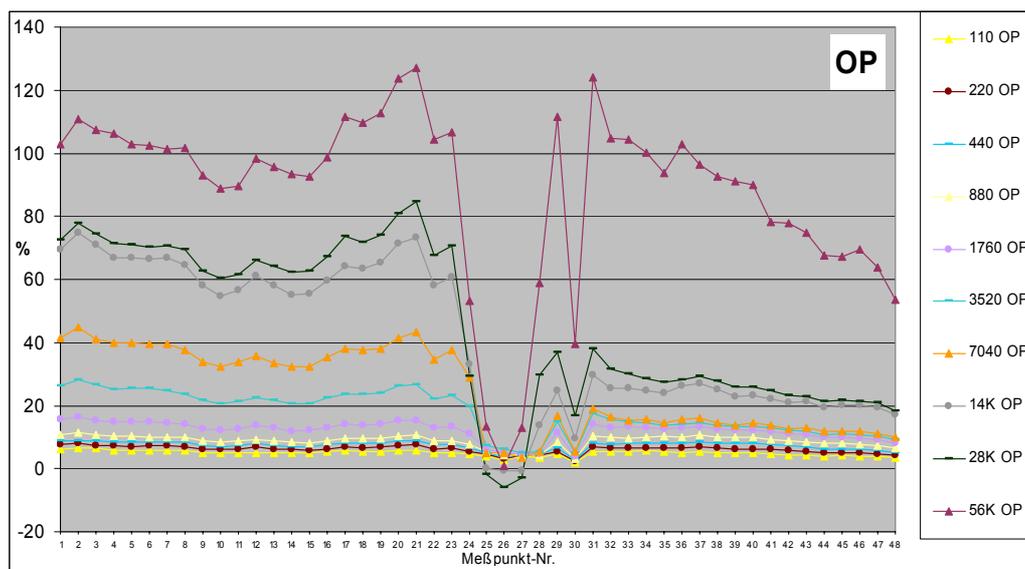


Abb. 3-2: EM-Messung im Bergwerk Sollstedt für 20 m Antennenabstand, OP-Komponente.

Abbildung 3-4 zeigt den chaotischen Verlauf der Messkurven bei einem Antennenabstand von 40 m. KURZ (2005) hat gezeigt, dass das Messrauschen bei Untertagemessungen in der Regel bei etwa 3 % liegt. Am Standort Sollstedt lag der Rauschpegel deutlich höher, was nur durch äußere Einflüsse auf das Messergebnis zu erklären ist. Auch bei abgeschaltetem Hauptstrom störten vermutlich weiterhin stromführende Telefon- und Modemleitungen die EM-Apparatur.

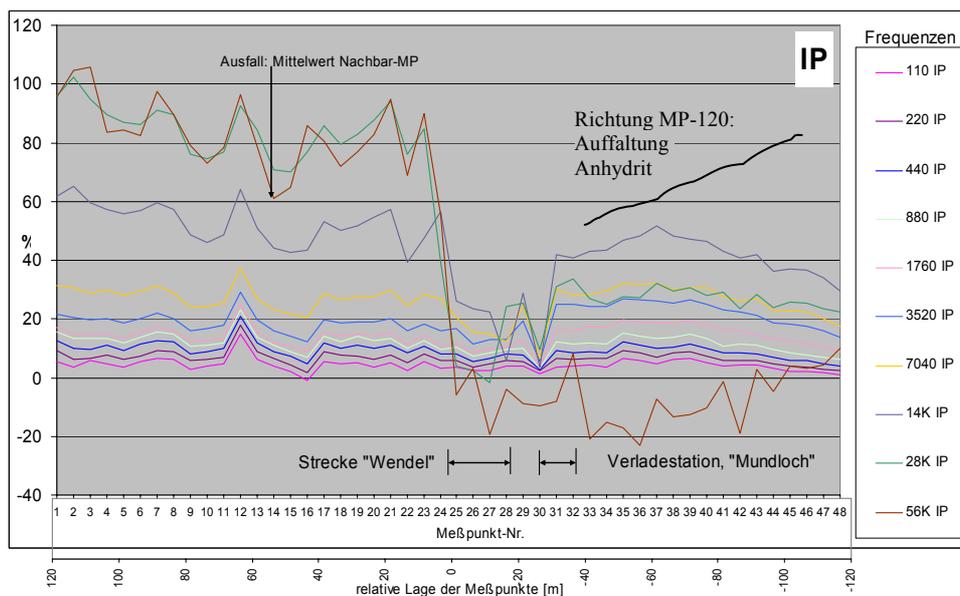


Abb. 3-3: EM-Messung im Bergwerk Sollstedt für 20 m Antennenabstand, IP-Komponente.

Davon abgesehen ist in den Daten dennoch ein allgemeiner Verlauf zu erkennen, der Übereinstimmungen mit den Georadarergebnissen in Abb. 3-11 zeigt. Im Profilbereich Messpunkt (MP) 1 bis 20 bzw. $x = 120$ m bis 20 m ist der Verlauf der einzelnen Frequenzen in der OP-Komponente (Abb. 3-2) relativ ungestört und in etwa horizontal. Auf der anderen Profilstseite bei MP 30 bis 48 bzw. $x = -40$ m bis -120 m wurden niedrigere Werte gemessen, die Richtung Osten noch weiter abfallen. Dies kann im Zusammenhang mit den darunterliegenden Schichten stehen, die entsprechend der Radarergebnisse im westlichen Profilbereich horizontal verlaufen und Richtung Profilende zur Strecke hin ansteigen.

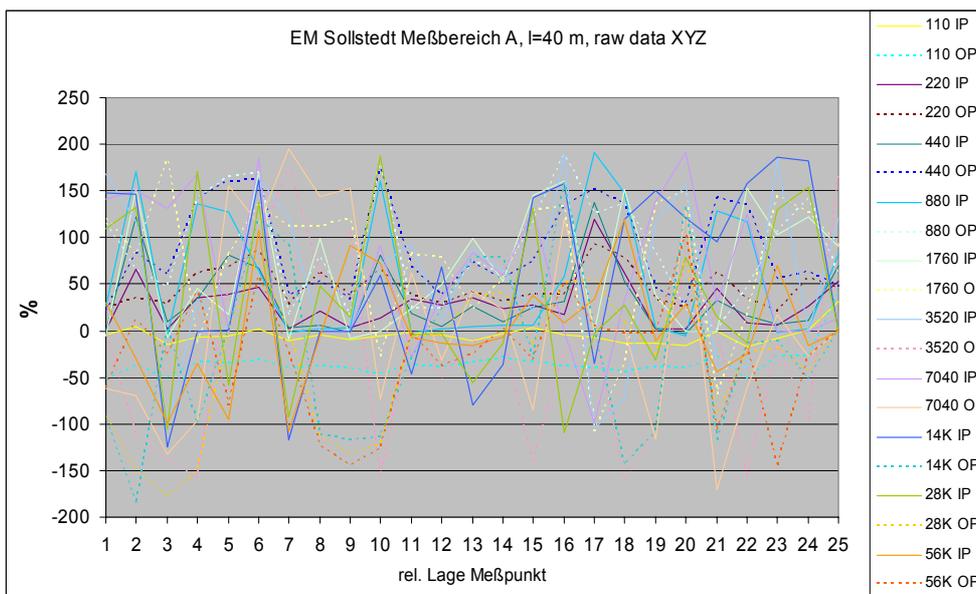


Abb. 3-4: EM-Messung im Bergwerk Sollstedt für 40 m Antennenabstand.

Standort B – Teutschenthal

Am Standort Teutschenthal zeigen die Messergebnisse nur am Profilende eine Anomalie (Abb. 3-5 und 3-6). Da in diesem Bereich metallische Lüftungsrohrteile lagerten, muss davon ausgegangen werden, dass diese die Anhebung der Messsignale verursachten. Die auch hier in der Messstrecke vorhandenen Elektrokabel verursachten ebenfalls energiereiche Störungen. Dadurch bedingt muss die Aussagekraft der erhaltenen Messkurven relativiert werden. Eine geophysikalisch-geologische Interpretation auf Grundlage der erhaltenen Messergebnisse ist hier nicht möglich.

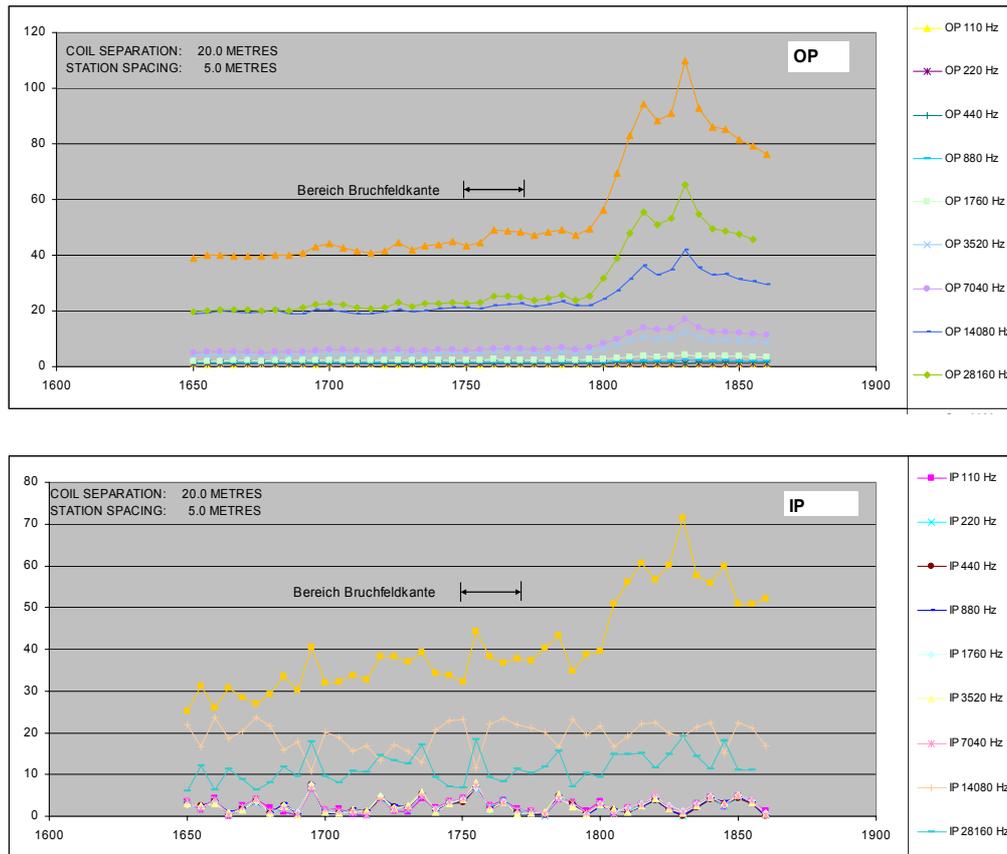


Abb. 3-5: EM-Messung im Bergwerk Teutschenthal für 20 m Antennenabstand. Oben: OP-Komponente, unten: IP-Komponente.

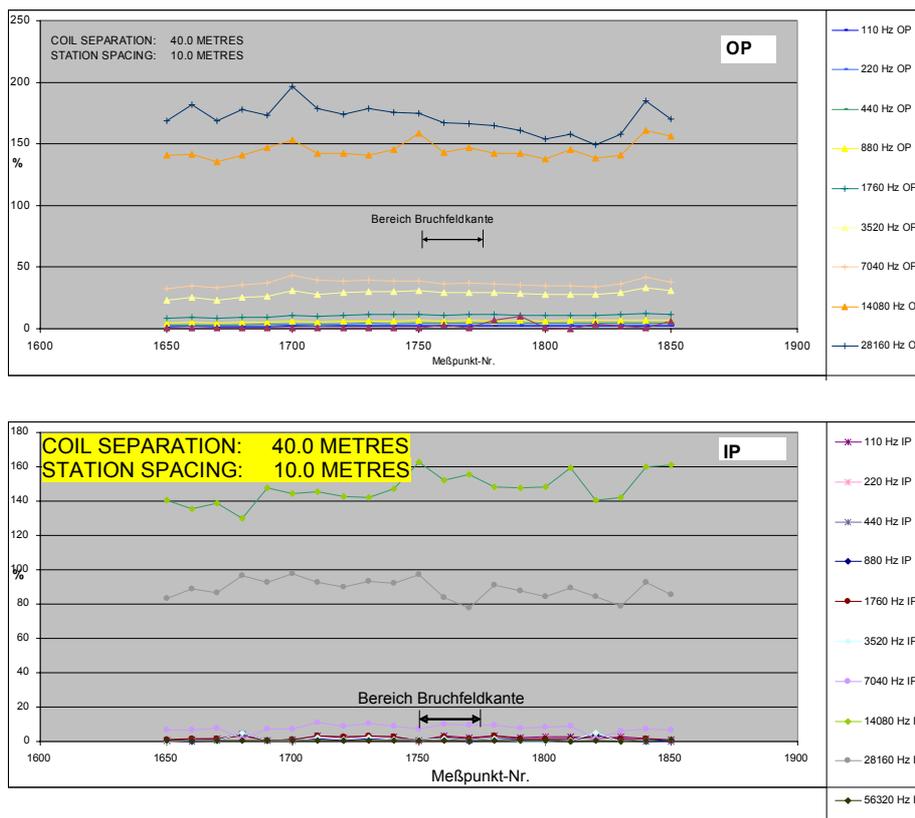


Abb. 3-6: EM-Messung im Bergwerk Teutschenthal für 40 m Antennenabstand. Oben: OP-Komponente, unten: IP-Komponente.

3.1.5 Zusammenfassung Elektromagnetik

Zur Ableitung relativ sicherer Aussagen aus EM-Messungen müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Dazu gehören, dass keine elektrischen Leitungen, Kabel sowie metallische Einbauten entlang der Messprofile vorhanden sein sollten. Die beiden untersuchten Standorte waren jedoch durch das Vorhandensein zahlreicher metallischer Körper und stromführender Leitungen gekennzeichnet.

Insgesamt ist einzuschätzen, dass aus den hier durchgeführten EM-Messungen keine geologisch relevanten Schlussfolgerungen abgeleitet werden können. Auf Grund der stark gestörten Messungen und daraus folgender Nichtinvertierbarkeit der Messergebnisse konnten die EM-Daten bei der weiteren kombinierten Auswertung der geophysikalischen Messergebnisse nicht berücksichtigt werden.

3.2 Georadar – Untertagemessungen

3.2.1 Messprinzipien und Messtechnologie

Das **Georadar** (GPR, Ground-Penetrating Radar) ist ein geophysikalisches Verfahren, bei dem elektromagnetische Wellen ausgesendet und die Antwort des Untergrundes empfangen wird. Über eine Sendeantenne wird ein Signal, meist in Form eines kurzen Wellenzugs, in den Untergrund gestrahlt. Die Wellen werden an Schichtgrenzen mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften gebrochen oder reflektiert bzw. an kleineren Störkörpern gestreut. Bei der Propagation durch den Untergrund werden die Wellen außerdem mehr oder weniger stark gedämpft. Ein Teil der Energie gelangt wieder zur Erdoberfläche und wird mit einer Empfangsantenne aufgezeichnet. Aus dem registrierten Wellenfeld lassen sich Rückschlüsse auf den Aufbau des Untergrundes ziehen. Aufgrund der geringen Dämpfung in trockenem Steinsalz werden sehr große Reichweiten von mehreren hundert Metern oder gar Kilometern erzielt. Deshalb ist das GPR im Salzbergbau das Standardverfahren zur Vorauserkundung und zur Detektion kritischer Bereiche wie z. B. von Klüften und Salzlösungsvorkommen (THIERBACH, 1974, IGEL et al., 2006).

Standardmäßig wird das Georadar mit einem festen Sender-Empfänger-Abstand, dem **Constant-Offset** (CO) angewandt. Bei Untertagemessungen müssen die 3D-Bedingungen berücksichtigt werden. Da sich die Messlokation in einem Bergwerk im Vollraum befindet, kann die Richtung der Reflexionen, insbesondere bei der Verwendung von ungeschirmten Antennen, unklar sein. Es sind spezielle **Rundum- und Peilmessungen** notwendig, die aber sehr zeitaufwändig sind und daher standardmäßig nicht eingesetzt werden.

Gelegentlich werden **CMP-Sektionen** eingesetzt, um Zusatzinformationen zu erhalten oder die Datenqualität zu verbessern. Sende- und Empfangsantenne werden an einem festen Punkt, dem Common-Midpoint, gleichmäßig voneinander wegbewegt. Vom Verlauf einzelner Reflexionseinsätze in Abhängigkeit vom Antennenabstand (Offset) kann auf die Geschwindigkeit im Untergrund geschlossen werden (BECHT et al., 2006). Des Weiteren können diese Daten zur Identifizierung von Reflexionseinsätzen genutzt werden (SUN & YOUNG, 1995). CMP-Messungen sind jedoch sehr zeitaufwändig und werden deshalb in der Regel nur an einzelnen Punkten durchgeführt. Eine Alternative stellt die Gewinnung von **Multi-Offset** (MO) Daten entlang längerer Profile dar. Das damit erzeugte Abbild des Untergrundes zeigt eine Vielzahl von Verbesserungen gegenüber herkömmlichen CO-Messungen (FISHER et al., 1992).

Untertagemessungen werden zunächst anhand von Finite-Differenzen Modellierungen (FD) vorgestellt (UCHTMANN, 2008a,b). Angenommen werden ungeschirmte Antennen mit einer Mittenfrequenz von 40 MHz, die sich innerhalb einer Messstrecke befinden (Abb. 3-7). Es wird eine flache Lagerung der geologischen Strukturen betrachtet. Dies ermöglicht eine Reduktion des Modells auf den zweidimensionalen Fall. Die Modellstrecke hat eine typische Höhe von 4 m. Sie befindet sich im Steinsalz mit einem Dielektrizitätskoeffizienten (DK) von $\epsilon_r = 5,75$ (NICKEL, 1991). Im Liegenden gibt es in ca. 16 m Tiefe einen Übergang von Steinsalz zu Anhydrit mit einem DK von $\epsilon_r = 6,7$, der Gegenstand der Untersuchungen ist. Im

Hangenden (oberhalb der Strecke) befindet sich Kalisalz mit entsprechendem DK. Abb. 3-7 zeigt die Wellenwege die im Modell auftreten können.

Im ersten Schritt wurde eine herkömmliche CO-Messung simuliert (Abb. 3-8 a). Zum einen treten die von Übertagemessungen her bekannten Wellenwege mit entsprechenden Reflexionen auf (direkte Luft- und Bodenwelle, gesuchte Liegendreflexion bei ca. 250 ns, sowie deren Multiple bei ca. 500 ns). Zum anderen kommt es zu zahlreichen störenden Signalen: Im oberen Teil des Radargramms werden die beiden direkten Wellen durch einfache und multiple Reflexionen an der Firste überlagert (ca. 27 und 54 ns). Bei ca. 160 ns zeigt sich ein amplitudenstarker Einsatz dessen Ursache im Hangenden liegt (Hangendreflexion). Des Weiteren treten noch verschiedene Multiple auf, z. B. eine Multiple der Liegendreflexion an der Firste (bzw. umgekehrt) bei ca. 280 ns. Diese störenden Reflexionen können die Auswertung von Radardaten deutlich erschweren, da sie einerseits fehlinterpretiert werden können und andererseits die zu untersuchenden Reflexionen überlagern können.

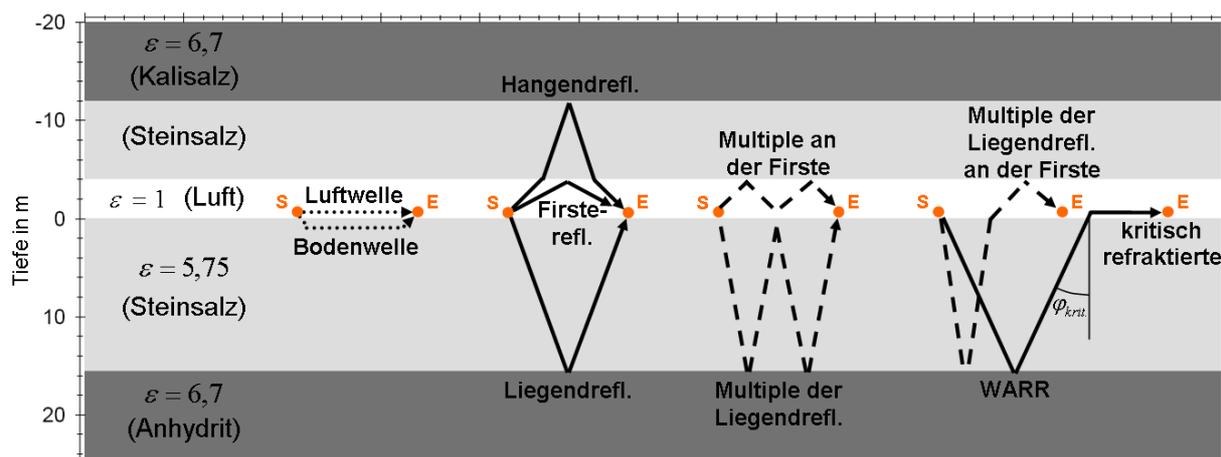


Abb. 3-7: Modell und auftretende Wellenwege untertage:
Gepunktet: Direkte Wellen.
Durchgezogen: Einfache Reflexionen.
Gestrichelt: Multiple (Mehrfachreflexionen).
 Im Weitwinkelbereich (WARR = Wide Angle Reflection and Refraction) tritt ab dem kritischen Winkel $\varphi_{krit.}$ eine kritisch refraktierte Welle auf.

In einer CMP-Sektion (Abb. 3-8 b, c) wird ein Unterscheidungskriterium der Reflexionen klar. In den CMP-Daten zeigen Bodenwelle, Liegenreflexion und deren Multiple einen Verlauf entsprechend der Steinsalz-Geschwindigkeit von ca. 0,125 m/ns. Somit können die Wellenwege dieser Signale eindeutig dem Salz zugeordnet werden. Die Kurvenformen der restlichen, störenden Reflexionen entsprechen, zumindest für größere Offsets der Lichtgeschwindigkeit von ca. 0,2998 m/ns. Die Wellenwege dieser Signale verlaufen ganz oder teilweise durch die luftgefüllte Messstrecke. Der Einfallswinkel kann beim Übergang Salz-Luft maximal den Wert des kritischen Winkels annehmen, für den der Ausfallswinkel in der Strecke 90° beträgt.

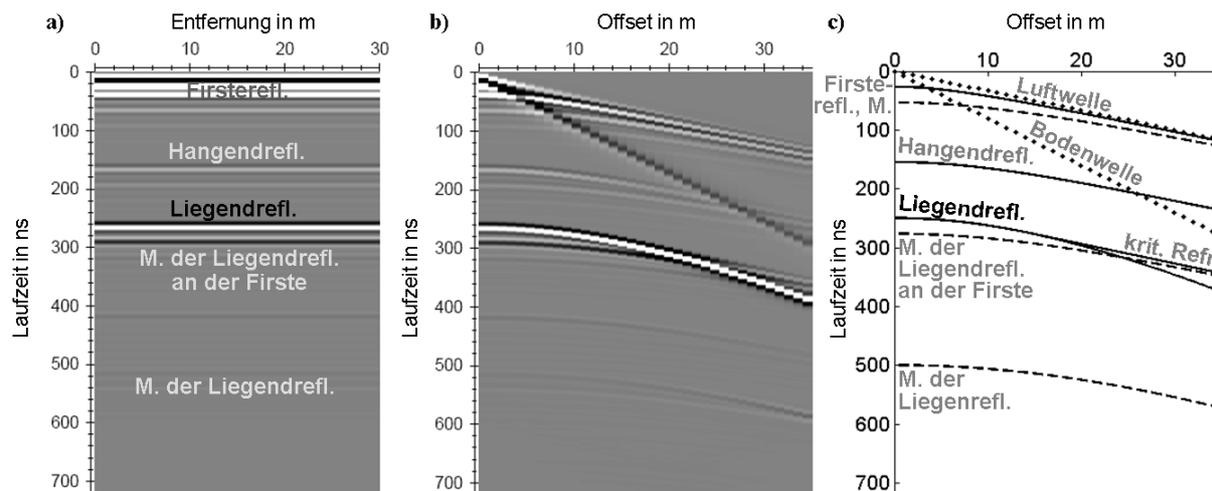


Abb. 3-8: Modellierte Daten 40 MHz:
 a) Standard CO-Messung (0 m Offset)
 b) CMP-Sektion
 c) CMP-Laufzeiten der in Abb. 3-7 dargestellten Wellenwege.
Grau: störende Reflexionen; *schwarz*: gesuchter Einsatz.

Für große Offsets ist der Laufweg innerhalb des Salzes annähernd konstant und die Welle läuft größtenteils durch Luft, wodurch die Gesamtlaufzeit bestimmt wird. Noch deutlicher wird diese Unterscheidung nach der Korrektur der CMP-Sektion auf die Lotzeiten (Normal-Moveout-, NMO-Korrektur) unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit (Abb. 3-9 a, b). Die Ersteinsätze von Bodenwelle (0 ns), Liegendreflexion und deren Multiple werden auf konstante Werte korrigiert. Die Einsätze der restlichen störenden Reflexionen werden aufgrund ihres Wellenweges durch Luft bei größeren Offsets zu niedrigeren Laufzeiten hin verschoben und weisen eine Krümmung auf.

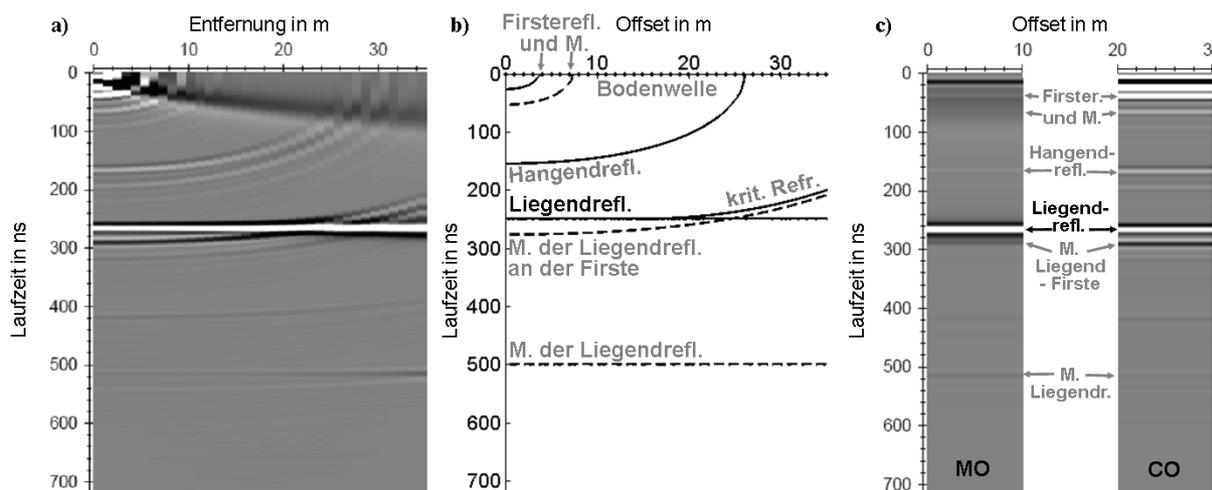


Abb. 3-9: Modellierte Daten 40 MHz:
 a) NMO-korrigierte CMP-Sektion aus Abb. 3-8 b)
 b) Laufzeiten nach NMO-Korrektur
 c) gestapelte Daten (Multi-Fold) im Vergleich zum herkömmlichen CO-Radargramm. *Grau*: störende Reflexionen; *schwarz*: gesuchter Einsatz.

Durch eine Stapelung der NMO-korrigierten Daten über den gesamten Offsetbereich (Poststack-Migration) werden die störenden Reflexionen unkorreliert addiert und erfahren eine Abschwächung, während die Einsätze der gesuchten Reflexion und deren Multiple erhalten bleiben. Im Vergleich dieser Multi-Fold Daten zum CO-Radargramm (Abb. 3-9 c) wird der große Unterschied deutlich. Die beschriebene Bearbeitung ermöglicht also eine Hervorhebung der gesuchten Reflexionen gegenüber den Störsignalen. Allerdings wird die Auflösung etwas verschlechtert, da durch die NMO-Korrektur die Wavelets insbesondere im Bereich der kurzen Laufzeiten und großen Offsets verbreitert werden.

Bei den Messungen wurden hauptsächlich kommerzielle GSSI-Antennen verwendet. Daneben wurden speziell angefertigte widerstandsbedämpfte Dipole (WU & KING, 1965) auf ihre Einsatzmöglichkeit untersucht. Mit diesen Wu-King-Antennen lassen sich kürzere Wavelets (Einzelsignale) erzielen, wodurch die Auflösung erhöht wird. Zudem haben sie aufgrund ihrer leichten Bauweise den Vorteil, dass sie – auf einer Teichfolie befestigt – direkt auf den Untergrund aufgelegt werden können. Durch diesen kürzeren Abstand ist eine verbesserte Richtcharakteristik in das Salzgestein zu erwarten, wodurch der Einfluss von Störreflexionen zusätzlich verringert werden kann.

3.2.2 Messkampagnen an den Untersuchungsstandorten

Bei der Planung der Messkampagnen an den Untersuchungsstandorten wurden die Erfahrungen aus den beiden Vorgängerprojekten berücksichtigt.

Tab. 3-2: Übersicht über die Messkampagnen.

	Messkampagne	Messbereich	Datum	Messungen
Standort A Sollstedt	SOLLA	2./3. Gasse, Hauptförderstr.	25.01.06 - 26.01.06	Vorerkundung
	SOLLB	2./3. Gasse, Hauptförderstr.	10.04.06 - 12.04.06	Vorerkundung
	SOLLC	Hauptförder- strecke	07.06.06 - 09.06.06	CO-, CMP-, Rund- ummessungen
	SOLLD	Hauptförder- strecke	20.06.06 - 23.06.06	MO-, Peilmessungen
Standort B Teutschenthal	TEUTA	östliche Bruchfeldgrenze	11.01.06 - 12.01.06	Vorerkundung
	TEUTB	westliche Bruch- feldgrenze	04.10.06 - 05.10.06	Vorerkundung, CO- Messungen
	TEUTC	westliche Bruch- feldgrenze	23.10.06 - 27.10.06	CO-, CMP-, Rund- ummessungen
	TEUTD	westliche Bruch- feldgrenze	18.06.07 - 22.06.07	MO-Messungen

Zum Einsatz kamen im Wesentlichen niederfrequente Antennen, die einen Kompromiss zwischen Eindringtiefe und Auflösung darstellen. Da am GGA-Institut aber auch höherfrequente Antennen zur Verfügung stehen, wurden auch diese für schnelle, hochaufgelöste Übersichtsmessungen genutzt. Neben den herkömmlichen CO-Messungen

wurden CMP-, Rundum-, Peil- und MO-Messungen durchgeführt (Tab. 3-2). Eingesetzt wurden eine kommerzielle Apparatur (GSSI SIR-3000), und für gerichtete Messungen das GGA-Eigenbausystem.

3.2.2.1 Vorerkundungen zur Festlegung der Referenzstandorte

An beiden Standorten wurden Vorerkundungen mit dem Georadar durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden verwendet, um die Bereiche der Referenzstandorte für alle Verfahren festzulegen.

Standort A – Sollstedt

In Sollstedt standen zunächst zwei alternative Standorte zur Auswahl. Messbereich A liegt in der **Hauptförderstrecke** entlang einer angefahrenen Basalanhydritaufsattelung. Neben der Detektion der Anhydritoberkante sollte mit den Vormessungen untersucht werden, ob sich die Krajaer Störung innerhalb der Messstrecke nachweisen lässt. Da diese Störung im untersuchten Profilbereich nicht detektiert werden konnte, wurde die Aufsattelung des Anhydrits zur weiteren geophysikalischen Erkundung ausgewählt. Messbereich B umfasst zwei (als **2. und 3. Gasse** bezeichnete) parallele Strecken sowie Querstrecken. Hier wurde der Übergang zwischen Staßfurt-Steinsalz und Basalanhydrit bzw. Hauptdolomit durch umfangreiche Messungen untersucht. In den Radarergebnissen zeichnet sich kein Problembereich ab, daher wurden die Messungen auf den Messbereich in der Hauptförderstrecke beschränkt.

Standort B – Teutschenthal

Als zweiter Standort wurde zunächst der Bereich des Laugenzutritts in der Wetterschleuse der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf untersucht. Die Wetterschleuse befindet sich im Bereich der **östlichen Bruchfeldgrenze**. Auffallend hinsichtlich der Problemzonenordnung sind zwei innerhalb des Anhydrits aushaltende Reflektoren (PIPPIG et al., 2005). Während sie außerhalb des Bruchfeldes nur sehr schwach nachzuweisen sind, treten sie im gestörten Bereich deutlich hervor. Hierbei handelt es sich vermutlich um sehr dünne karbonatische Lagen, die außerhalb des Bruchfeldes geschlossen sind und mit großer Wahrscheinlichkeit keine Lauge führen. Innerhalb des Bruchbereiches ist zu vermuten dass sie durch den Gebirgsschlag aufgeweitet und möglicherweise durchfeuchtet sind. Eine Georadar-Voruntersuchung erfolgte im Januar 2006 parallel zu Geoelektrikmessungen. Die Ergebnisse von PIPPIG et al. (2005) wurden bestätigt: Auch im unmittelbaren Bereich der Laugenstelle ist eine Änderung von Reflexionseigenschaften zu beobachten. (Abb. 3-10). Der Einbau einer Wetterschleuse im Bereich der östlichen Bruchfeldgrenze verhinderte die Fortführung der geophysikalischen Messungen. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde die **westliche Begrenzung des Bruchfeldes** als alternativer Referenzstandort ausgewählt. Auch hier wurde entsprechend PIPPIG et al. (2005) eine Änderung von Reflexionseigenschaften nachgewiesen.

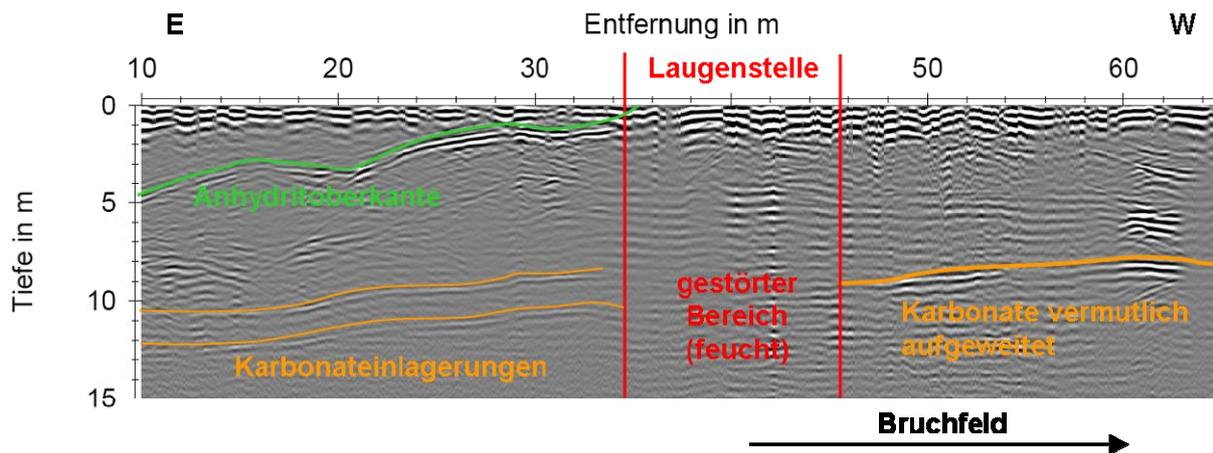


Abb. 3-10: 200 MHz-Untersuchung im Bereich der Laugenstelle in der Wetterumfahrung der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf.

3.2.2.2 Messungen auf den Referenzprofilen

Auf den gemeinsamen Referenzprofilen erfolgten umfangreiche Georadarmessungen. Zur Strukturerkundung wurden sowohl geschirmte, als auch ungeschirmte GSSI-Antennen mit Frequenzen von 25 MHz bis 1,5 GHz eingesetzt. Eine Übersicht über die verwendeten Antennen mit durchschnittlicher Eindringtiefe, Auflösung und Einsatzmöglichkeit anhand des Beispiels Teutschenthal findet sich in Tab. 3-3. Für den Referenzstandort Sollstedt gelten ähnliche Werte. Um auch die Randbereiche z. B. auf mögliches Ausstreichen von Reflexionen zu untersuchen, wurden die Radarprofile über den Referenzbereich hinaus erweitert. Für eine Richtungszuordnung wurden zusätzlich zu den Sohlemessungen gerichtete CO-Messungen in Firste und in beide Stöße sowie Rundum- und Peilmessungen durchgeführt. Punktuelle CMP-Messungen dienten einer Geschwindigkeitsbestimmung.

Neben herkömmlichen CO-Messungen ist an beiden Standorten die MO-Anordnung zum Einsatz gekommen. Da kommerziell erhältliche Radarsysteme zumeist Einkanalapparaturen sind, ist die MO-Datenaufzeichnung derzeit noch sehr zeitintensiv. Jede Sende-Empfangsantennenkonfiguration muss einzeln gemessen werden. Wir verwendeten bei der Umsetzung dieses Verfahrens das so genannte Common Offset Gather. Jedes Profil wird einzeln mit einem festen Antennenabstand gemessen. Dann wird der Abstand schrittweise vergrößert und jedes Profil erneut aufgezeichnet. Die Daten können anschließend in einzelne CMP-Sektionen kombiniert werden. Die ersten MO-Messungen erfolgten am Standort Sollstedt mit ungeschirmten 80 MHz Rohrdipolen. Verwendet wurden insgesamt 28 Offsets von 3 m bis 30 m in 1 m Schritten. Die Abstände wurden über Seile zwischen den einzelnen Schlitten von Sende- und Empfangsantenne realisiert. Da die Antennen auf dem Schlitten einen großen Abstand (10 cm) zum Boden haben, werden auch amplitudenstarke Signale aus dem Hangenden aufgezeichnet. Für den Standort Teutschenthal wurde die Messapparatur weiterentwickelt. Durch die Verwendung von Wu-King Antennen konnte eine leichtere Antennenbauweise mit geringerem Abstand zum Untergrund realisiert werden. Hier wurden

Messungen mit 50 MHz-Antennen (15 Offsets von 4 bis 18 m, in 1 m Abständen) durchgeführt.

Tab. 3-3: Eindringtiefe und vertikale Auflösung (Wellenlänge) der verwendeten Antennen am Standort Teutschenthal (MLF = Multiple Low Frequency).

Frequenz	Antenne	Eindringtiefe	vertikale Auflösung	Einsatzmöglichkeit
25 MHz	MLF; nicht geschirmt	70 m	5,0 m	tiefe Bereiche
40 MHz		50 m	3,1 m	tiefe Bereiche
80 MHz		32 m	1,6 m	mittlere Bereiche
200 MHz	geschirmt	22 m	60 cm	gute Auflösung in ersten Zehnermetern
500 MHz	geschirmt	10 m	25 cm	
1,0 GHz	Hornantenne	Untertage vermutl. ungeeignet (Störreflexionen in Messstrecke)		
1,5 GHz	geschirmt	3 m	8 cm	stoßnaher Bereich

3.2.3 Datenbearbeitung und Auswertung

3.2.3.1 Datenbearbeitung

Der erste Schritt der **Standardbearbeitung** von Georadardaten behandelt in der Regel eine Zeitkorrektur der aufgezeichneten Laufzeiten auf den Zeitpunkt des Aussendens des Sendesignals. Um Amplituden wahrheitsgetreu abzubilden, wird zunächst die Verstärkungsfunktion der Messung rausgerechnet. Danach folgt ein Amplitudenausgleich, mit dem sphärische Divergenz und Dämpfung berücksichtigt werden. Gleichstromanteile können durch eine Hochpassfilterung (Dewow) entfernt werden. Mit einer Migration (fk-Migration, Stolt) werden Reflexionseinsätze auf ihrem korrekten Ausgangsort abgebildet. Eine Tiefenmigration wird angewandt, um die Laufzeiten in Tiefen umzurechnen. Eine Korrektur der Topographie ist an beiden Standorten nicht notwendig. Starke Ersteinsätze der direkten Wellen können z. B. durch eine Mittelwertabziehung abgeschwächt werden. Bei gerichteten CO-Messungen traten zum Teil Reflexionen in der Strecke auf. Diese wurden über einen Geschwindigkeitsfilter im Frequenz-Wellenzahl-Bereich entfernt.

CMP-Messungen und umsorierte MO-Daten können für eine **Geschwindigkeitsanalyse** genutzt werden. Zur Anpassung von Hyperbeln an Einsätze eignet sich als Korrelationsverfahren z. B. die Semblance-Analyse. Für ebene, sählig gelagerte Reflektoren wird der bestimmte Parameter als Normal-Moveout Geschwindigkeit bezeichnet und kann in die Intervallgeschwindigkeiten der einzelnen Schichten umgerechnet werden. Auf die MO-Datensätze wurde die bereits durch FD-Modellierungen untersuchte **Poststack Migration** angewandt.

3.2.3.2 Auswertung der Constant-Offset Daten

Die Interpretation der Radardaten erfolgte durch eine kombinierte Auswertung der Constant-Offset Sohlemessungen mit gerichteten Messungen mit ungeschirmten Antennen und Rundum- und Peilmessungen. Die im Folgenden vorgestellten Radarergebnisse in den Abbildungen 3-11 und 3-12 sind z. T. überhöht dargestellt, um eine Unterscheidbarkeit einzelner Reflexionseinsätze zu gewährleisten.

Standort A – Sollstedt

Der komplizierte geologische Aufbau am Standort Sollstedt erschwert die Interpretation und die Richtungszuordnung der Reflektoren. Im Profildbereich von -100 m bis 0 m (Abb. 3-11 c, d) sind mehrere Reflexionseinsätze zu erkennen, die vermutlich durch dreidimensionale Effekte zu erklären sind. Für die folgende Interpretation wurden die amplitudenstärksten Reflexionseinsätze ausgewählt. Dabei ist zu beachten, dass diese Einsätze dem jeweils kürzesten Abstand zu einem Reflektor entsprechen. Die in einem Radargramm abgebildeten Reflexionen stammen also nicht zwingend aus einer festen Raumrichtung. Zudem sind zahlreiche unterhalb der Strecke verlaufende Grubenbaue zu erkennen (Abb. 3-11 b). Insbesondere im östlichen Profildbereich ist hierdurch die Korrelation einzelner Reflexionseinsätze erschwert.

Im Hangenden des Untersuchungsbereiches konnten mit der 200 MHz-Antenne zwei in etwa streckenparallele Reflexionen registriert werden (Abb. 3-11 a). Hierbei handelt es sich vermutlich um interne Reflexionen im Staßfurtsteinsalz (Na2), die für das Georadar einen elektromagnetischen Kontrast darstellen. Zwei Liegendreflexionen zeigen im westlichen Profildbereich eine wellige Struktur, die Richtung Osten ansteigt. Des Weiteren konnten im östlichen Bereich zwei zusätzliche streckennahe Einsätze detektiert werden. Auffallend ist die Signatur der tieferen Reflexion an der Profilkordinate -50 in etwa 5 m Tiefe. Zahlreiche Diffraktionshyperbeln lassen auf eine Auflockerungszone schließen.

Die beiden tieferen Reflektoren wurden als Schichtgrenze zwischen Steinsalz und Basalanhydrit (A3) bzw. als Übergang zu Hauptdolomit (Ca2d) interpretiert (Abb. 3-11 c). Diese in etwa parallel verlaufenden Einsätze haben am westlichen Profilanfang einen Abstand von bis zu 24 m bzw. 30 m zur Messstrecke und steigen bis zum Profilende auf einen Abstand von 6 m bzw. 13 m an. Eine Erweiterung der Radarmessungen Richtung Osten zeigt, dass der als Anhydritoberkante interpretierte Reflektor bei Profilmeter 320 in der Strecke ausstreicht. Eine Aufsattelung des Anhydrits im mittleren Profildbereich kann vermutlich aufgrund des komplizierten geologischen Aufbaus nicht nachgewiesen werden. Zusatzmessungen in der Wendel entlang der Anhydritaufsattelung waren aufgrund einer feuchten Sohle und damit großer Dämpfung des Georadars nicht erfolgreich. Am Profilende kann in ca. 60 m Tiefe eine weitere Richtung Osten ansteigende Reflexion beobachtet werden (Abb. 3-11 d).

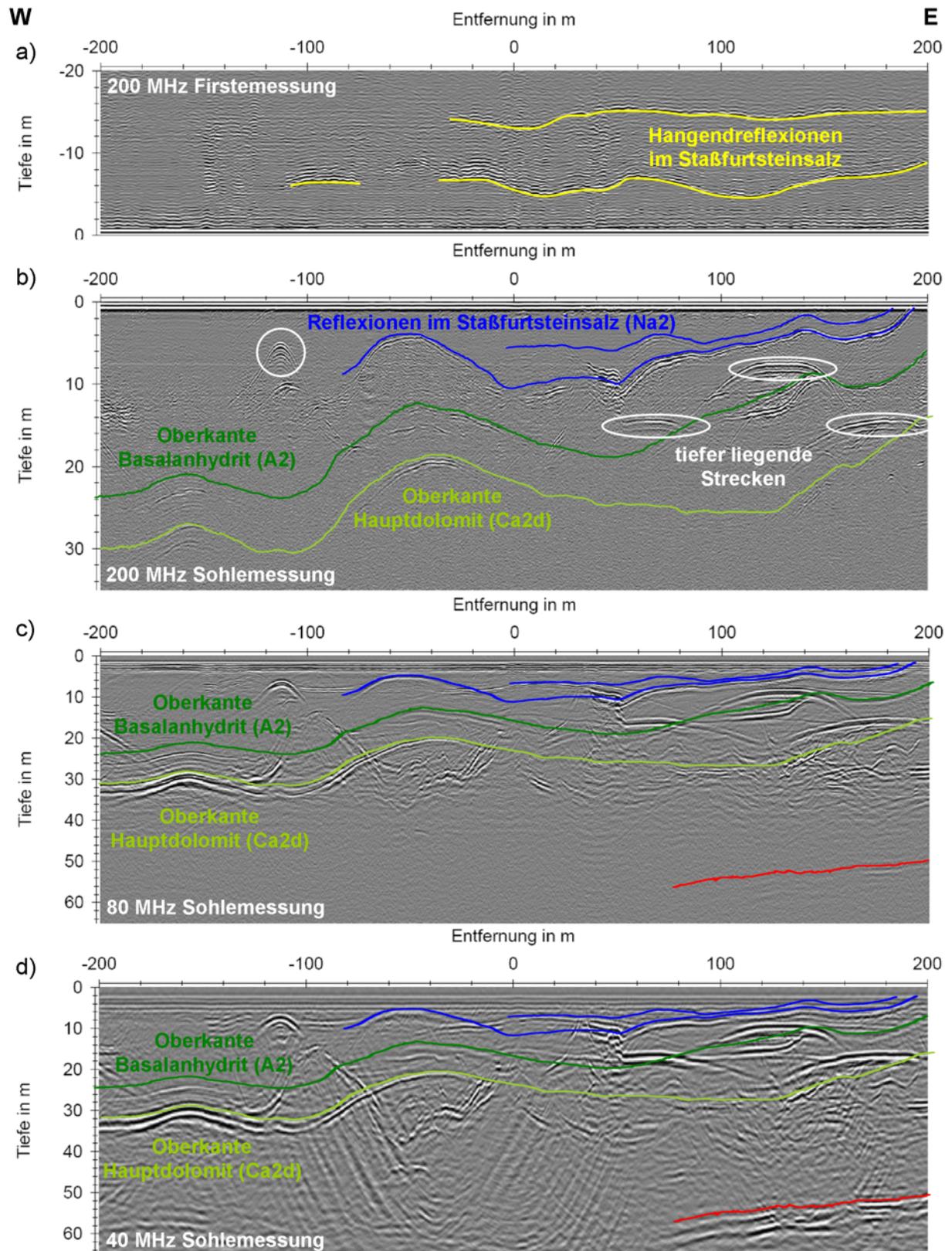


Abb. 3-11: Auswertung der Constant-Offset Radargramme des Standortes Sollstedt (entlang der Anhydritaufsattelung):

a) 200 MHz Messung in das hangende Gestein, vierfach überhöht.

Sohlemessungen:

b) 200 MHz, vierfach überhöht

c) 80 MHz, zweifach überhöht

d) 40 MHz, zweifach überhöht.

Standort B – Teutschenthal

Eine flache Geologie ermöglicht eine einfache Interpretation der Radarergebnisse des Standortes Teutschenthal. Die Schichtzuordnung erfolgte nach Berichten von PIPPIG et al. (2005), VILVOCK (2005) und THOMA et al. (2007). Die Messtrecke ist im Steinsalz der Leine-Serie (Na3) aufgeföhren. Die Mehrzahl der in den Radargrammen beobachteten Reflektoren zeigt einen relativ flachen, ungestörten Verlauf und steigt Richtung Osten um ca. 8 m an (Abb. 3-12). Die Oberkante des Hauptanhydrits (A3), die in einer Tiefe von ca. 8 bis 20 m unterhalb der Strecke verläuft, ist hingegen durch eine stark wellige Struktur gekennzeichnet.

Im hangenden Leinsteinsalz konnten drei amplitudenstarke Reflexionen registriert werden (Abb. 3-12 a). Bei dem obersten Einsatz handelt es sich um eine ca. 10 bis 15 m im Liegenden des Roten Salztons (T4) vorgelagerte gut leitfähige Tonschicht, die den Blick auf den darüber liegenden Salzton verhindert. Auch im liegenden Steinsalz sind drei deutliche Reflexionen zu erkennen (Abb. 3-12 b). Der direkt oberhalb der welligen Struktur auftretende Einsatz kann den Berichten zufolge als Klippenanhydrit (gering mächtige Anhydritschicht) identifiziert werden. Bei den restlichen steinsalzinternen Schichten handelt es sich um Anhydritmittelsalze bzw. um Tonschichten. Auch innerhalb des Anhydrits treten in verschiedenen Tiefen weitere Reflexionen auf (Abb. 3-12 c, d). Diese werden als sehr geringmächtige Karbonateinlagerungen beschrieben. Bei dem tiefsten Reflektor (bis 68 m Tiefe) handelt es sich vermutlich um die Unterkante des Hauptanhydrits oder um die Unterkante des Grauen Salztons (T3).

In den Radargrammen gibt es erste Hinweise auf durch den Gebirgsschlag beeinflusste Bereiche. Auffallend ist in der 200 MHz-Sohlemessung (Abb. 3-12 b) die direkt oberhalb der dünnen Anhydritschicht verlaufende Steinsalzreflexion. Während der Einsatz dieses Signals in den Randbereichen relativ ungestört erscheint (z. T. ist eine interne Schichtung zu erkennen), ist der Verlauf im Profilbereich von 1730 bis 1790 m in einer Tiefe von ca. 5 bis 10 m gestört. Da diese Zerüttungszone direkt an der vermuteten Bruchfeldgrenze auftritt, ist anzunehmen, dass sie im Zusammenhang mit dem Gebirgsschlag steht. Ein weiterer Problembereich kann anhand der tieferen der anhydritinternen Karbonateinlagerungen ausgewiesen werden (Tiefe von ca. 34 m im Westen bis ca. 26 m im Osten in Abb. 3-12 d). An der Profilkordinate 1790 ändern sich die Reflexionseigenschaften dieses Reflektors. Während der Signaleinsatz im östlichen Profilbereich eine starke Amplitude aufweist, ist die Signalstärke außerhalb des Bruchfeldes sehr gering. Eine mögliche Interpretation dieses Effektes wird durch PIPPIG et al. (2005) beschrieben: Die Karbonatschichten sind im Bruchfeld durch den Gebirgsschlag aufgeweitet, wodurch Migrationswege für Lauge entstanden sind. Die Durchfeuchtung der Schicht führt zu einem starken elektromagnetischen Kontrast und damit zu einer starken Amplitudenantwort für das Georadar. Außerhalb des Bruchfeldes erscheint der Reflektor hingegen ungestört und führt vermutlich keine Lauge.

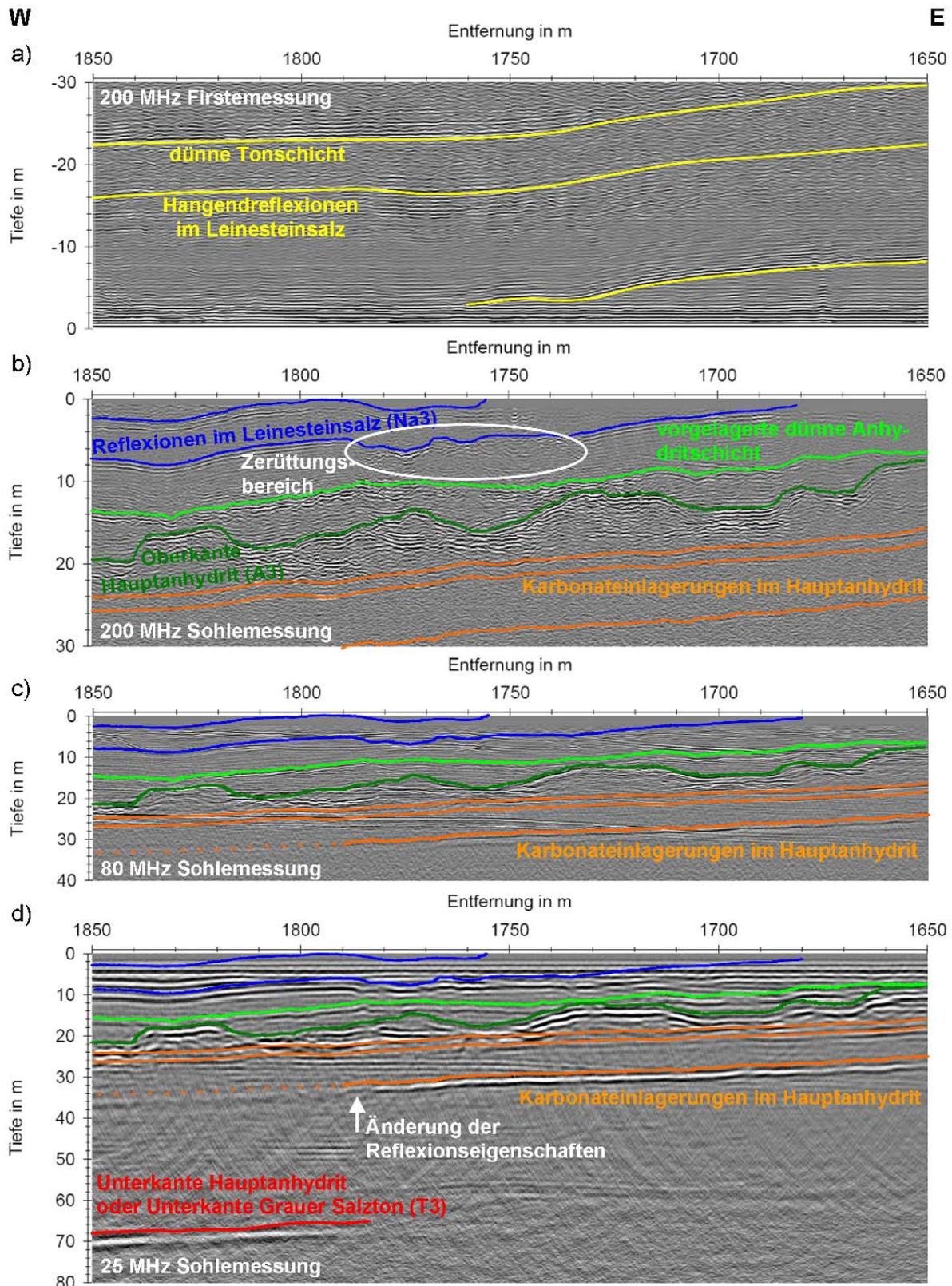


Abb. 3-12: Auswertung der Constant-Offset Radargramme des Standortes Teutschenthal (westliche Bruchfeldgrenze):
 a) 200 MHz Messung in das hangende Gestein, zweifach überhöht.
 Sohlemessungen:
 b) 200 MHz, zweifach überhöht
 c) 80 MHz
 d) 25 MHz.

Diese Beobachtungen von Problemzonen finden gute Übereinstimmungen mit geomechanischen Untersuchungen, die am selben Standort durch MINKLEY (2008) im Rahmen des BMBF geförderten Vorhabens „Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss“ (Förderkennzeichen 02C1264) durchgeführt wurden. Frac-Messungen zufolge ist die minimale Hauptspannung über dem Bruchfeld deutlich herabgesenkt. Der mit dem Georadar beobachtete Zerüttungsbereich deckt sich mit einer berechneten Volumenausdehnung (Dilatanz) infolge des Bruchvorgangs. Modellrechnungen von MINKLEY haben gezeigt, dass besonders im Hauptanhydrit durch einen Gebirgsschlag starke Schädigungen auftreten, die in Form einer Scherzone schichtparallel über dem Bruchfeld verlaufen. Am Standort Teutschenthal wirken die Karbonateinlagerungen vermutlich als mechanische Schwächeflächen innerhalb des Anhydrits und zeigen solch ein Aufreißen.

3.2.3.3 Auswertung der CMP-Daten

Die gewonnenen CMP-Daten sind einer Geschwindigkeitsanalyse unterzogen worden. An beiden Standorten ergab sich eine Intervallgeschwindigkeit von 0,120 bis 0,125 m/ns (Abb. 3-13). Mögliche Fehler bei der Anpassung von Hyperbeln an Reflexionseinsätze in CMP-Sektionen sind allerdings größer als diese Schwankungsbreite. Nach NICKEL (1991) ist die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Frequenzbereich des Georadars in Steinsalz nahezu konstant bei 0,125 m/ns ($\pm 0,001$ m/ns). Aus diesem Grund wurde diese Literaturangabe für die weitere Datenbearbeitung (Migration und NMO-Korrektur) verwendet.

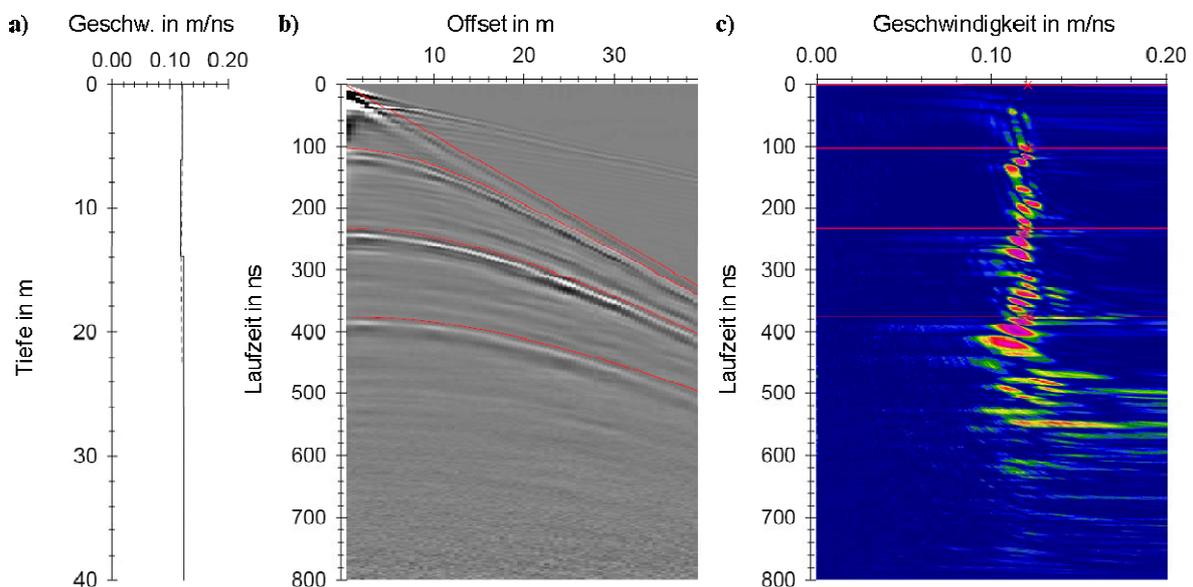


Abb. 3-13: Geschwindigkeitsanalyse über CMP-Daten:
 a) Bestimmte Geschwindigkeits-Tiefen-Funktion (Intervallgeschwindigkeiten)
 b) CMP-Sektion mit angepassten Hyperbeln
 c) Semblance-Analyse.

3.2.3.4 Auswertung der Multi-Offset-Messungen

Standort A – Sollstedt

Im Vergleich zwischen einer CO-Messung mit festem 3 m Sender-Empfänger-Abstand und einer MO-Messung mit 28-facher Stapelung (Abb. 3-14 a, b) fällt als erstes der deutliche Unterschied im Rauschpegel auf. Durch die hohe Stapelrate der MO-Daten vergrößert sich die Eindringtiefe bis zu 700 ns (ca. 44 m). Im oberen Laufzeitbereich konnten Bodenwelle und Firstereflexion durch die MO-Bearbeitung abgeschwächt werden. Die meisten geologisch bedingten Reflexionen aus dem Liegenden zeigen auch nach dem Processing noch eine starke Amplitude, während die Störreflexionen abgeschwächt werden. Bei ca. 120 ns ist bei der Standard-Messung ein amplitudenstarkes Signal zu sehen. Aus dem Verlauf des Einsatzes in einer CMP-Sektion kann direkt auf einen Reflektor im Hangenden geschlossen werden (Abb. 3-14 d). Im Profilbereich von ca. 30 bis 70 m befindet sich unterhalb der geologisch bedingten Reflexion bei ca. 320 ns ein weiterer Einsatz. Aus der Laufzeitdifferenz von ca. 30 ns und dem Verlauf im CMP-Radargramm lässt sich schließen, dass es sich bei diesem Signal um eine Multiple handelt.

In Abb. 3-14 a schirmt eine quer verlaufende Strecke bei $x = 110$ m in ca. 5 m Tiefe (Diffraktionshyperbel) darunter liegende Reflexionen ab. Größere Offsets ermöglichen eine „Sicht“ unter solche abschirmende Objekte, so dass die Stapelung größerer Offsetbereiche eine Korrelation der darunter liegenden Reflektoren ermöglicht.

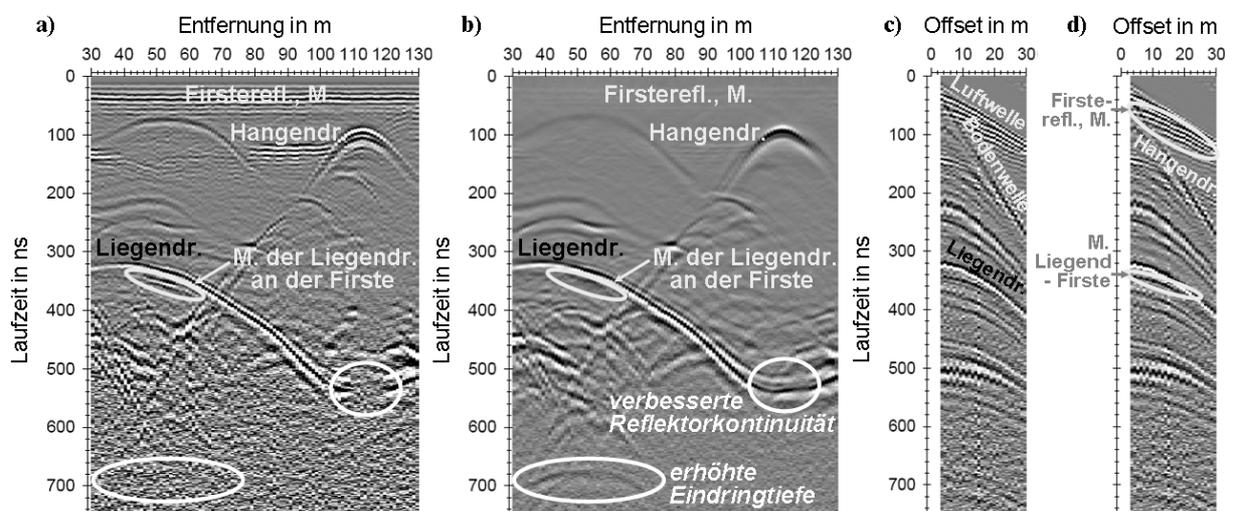


Abb. 3-14: 80 MHz Messung im Bergwerk Sollstedt, Eindringtiefe ca. 50 m:

a) CO-Messung (3 m Offset)

b) MO-Daten nach NMO-Korrektur und Stapelung (28 Offsets von 3 m bis 30 m)

c) und d) CMP-Sektion bei 42 m (AGC Verstärkung).

Standort B – Teutschenthal

In Teutschenthal wurde durch die Verwendung von Wu-King-Antennen der Abstand zum Untergrund verringert. Hierdurch konnten störende Signale aus dem Hangenden abgeschwächt werden. Dies wird beim Vergleich der Messungen mit kommerziellen

Antennen in Abb. 3-12 d mit den Daten der Wu-King-Antennen in Abb. 3-15 a deutlich. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Messung ist die Untersuchung des Verfahrens hinsichtlich der Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. In der Literatur finden sich nur Vergleiche zwischen ungestapelten CO-Messungen und gestapelten MO-Datensätzen (z. B. FISHER et al., 1992). Allein durch die Stapelung erfolgt eine Verringerung des Rauschniveaus. Eine exakte Untersuchung im Hinblick auf eine Verbesserung durch die Methode ist nur mit derselben Stapelrate zulässig, d.h. auch die CO-Daten müssen für einen Vergleich mit MO-Daten in gleicher Weise gestapelt werden. Der Vergleich beider Methoden mit der gleichen Stapelanzahl (Abb. 3-15) zeigt einen ähnlichen Rauschpegel. Die Amplituden der MO-Daten sind im Allgemeinen schwächer ausgebildet. Die Eindringtiefe ist herabgesetzt, der Tiefe Reflektor bei ca. 480 ns (30 m) ist deutlich schwächer zu erkennen. Allerdings kann er im mittleren Profilbereich besser korreliert werden als in den gestapelten CO-Daten.

Im oberen Laufzeitbereich konnten die Einflüsse von Bodenwelle und Firstreflexion deutlich verringert werden. Ein oberflächennaher Reflektor am Profilende wird im CO-Radargramm stark überlagert. Nach der Stapelung der Offsetdaten kann die Lage in diesem Bereich jedoch nachvollzogen werden. Im linken Profilbereich ist bei ca. 420 ns eine aus dem Hangenden stammende Reflexion zu erkennen. Auch diese erfährt durch die MO-Bearbeitung eine Amplitudenabschwächung. Insgesamt zeigen die MO-Daten ein klareres Abbild des Untergrundes, da durch die Stapelung eine Mittelung über die Offsets erfolgt, wodurch der Einfluss von Heterogenitäten verringert wird. Nach der Anwendung der Methode treten im Bereich um 1750 m und 100 ns Laufzeit Diffraktionshyperbeln deutlicher hervor.

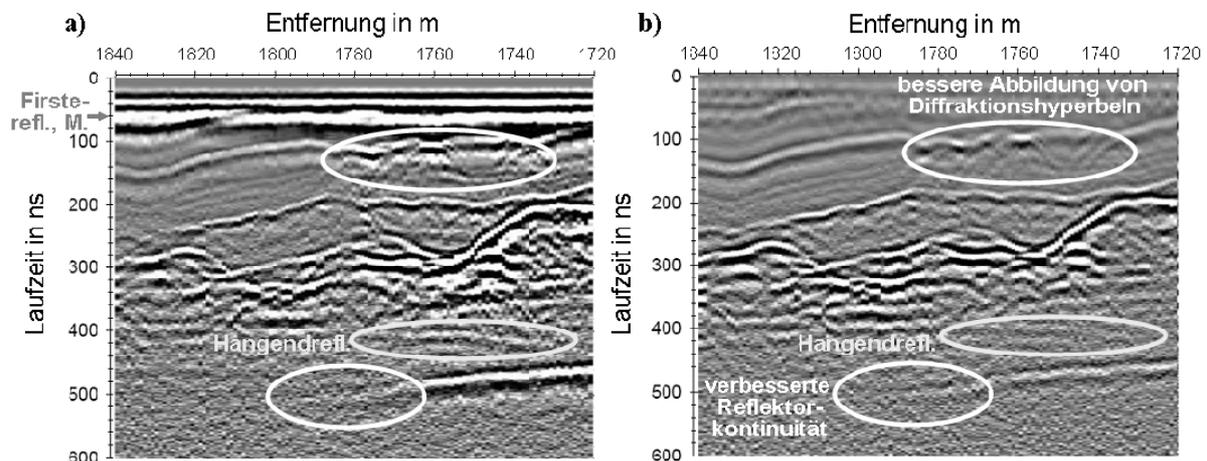


Abb. 3-15: 50 MHz Messung im Bergwerk Teutschenthal, Eindringtiefe ca. 37,5 m:
 a) Gestapelte CO-Messung (3 m Offset, 16-fache Stapelung)
 b) MO-Daten nach NMO-Korrektur und Stapelung (16 Offsets von 3 m bis 18 m).

3.2.4 Ergebnisse der Georadarmessungen

Standort A – Sollstedt

Die Messstrecke des Standortes Sollstedt befindet sich im Staßfurtsteinsalz (Na₂). Im Steinsalz konnten vier Schichtgrenzen nachgewiesen werden (Abb. 3-16). Während die steinsalzinternen Schichtgrenzen im Hangenden in etwa streckenparallel verlaufen, streichen die Schichten im Liegenden im Osten in der Strecke aus. Der Übergang zum Kaliflöz Staßfurt (K2) im Hangenden konnte aufgrund einer beschränkten Eindringtiefe des Georadars nicht detektiert werden. Die Oberkante des Basalanhydrit (A2) zeigt eine wellige Struktur, die von ca. 20 bis 24 m am westlichen Profilanfang bis auf ca. 6 m am östlichen Profilende ansteigt. Der Übergang zum Hauptdolomit (Ca₂d) verläuft hierzu parallel ca. 6 m tiefer. Eine weitere Schichtgrenze tritt im östlichen Profilbereich in einer Tiefe von etwa 50 bis 60 m auf.

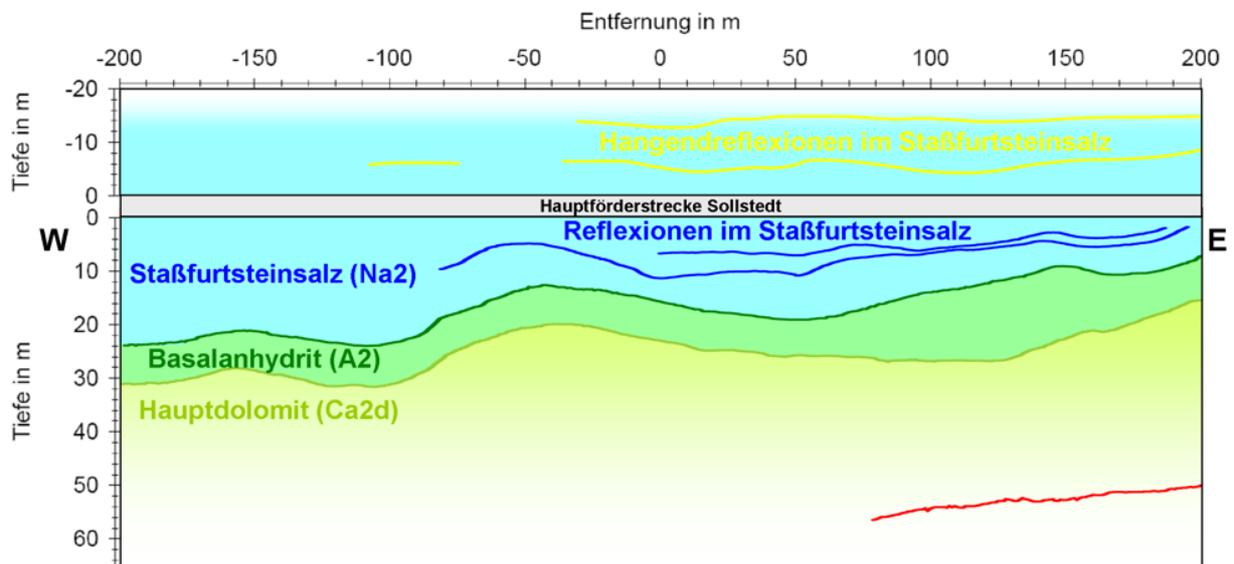


Abb. 3-16: Geologische Interpretation der Radarergebnisse am Standort Sollstedt. Zweifach überhöht.

Standort B – Teutschenthal

Der Bereich der Radaruntersuchung am Standort Teutschenthal umfasst das Leinsteinsalz (Na₃) und den Hauptanhydrit (A₃), die durch eine stark wellige Grenze voneinander getrennt sind (Abb. 3-17). Die restlichen Schichten verlaufen relativ ungestört und steigen Richtung Osten um ca. 8 m an. Die oberste detektierte dünne Tonschicht ist dem Roten Salzton (T₄) ca. 10 bis 15 m im Liegenden vorgelagert. Das Steinsalz ist durch weitere dünne Ton- und Anhydritschichten unterbrochen.

Die Anhydritoberkante steigt von ca. 20 m im Westen auf ca. 8 m im Osten an. Dieser Schichtgrenze ist eine gering mächtige Klippanhydritschicht vorgelagert. Innerhalb des Anhydrits konnten drei Karbonateinlagerungen nachgewiesen werden, die von 24 bis 33 m Tiefe im Westen auf 16 bis 24 m Tiefe im Osten ansteigen. In ca. 68 m Tiefe befindet sich vermutlich die Unterkante des Hauptanhydrits bzw. die Unterkante des Grauen Salztons (T₃).

Zwei Problemzonen lassen sich direkt aus den Radarergebnissen ausweisen. Zum einen befindet sich im Profilbereich von 1730 bis 1790 m in einer Tiefe von 5 bis 10 m eine Zerüttungszone im Anhydrit, zum anderen weist die untere Karbonatschicht innerhalb des Bruchfeldes vermutlich eine Salzlösungsführung auf.

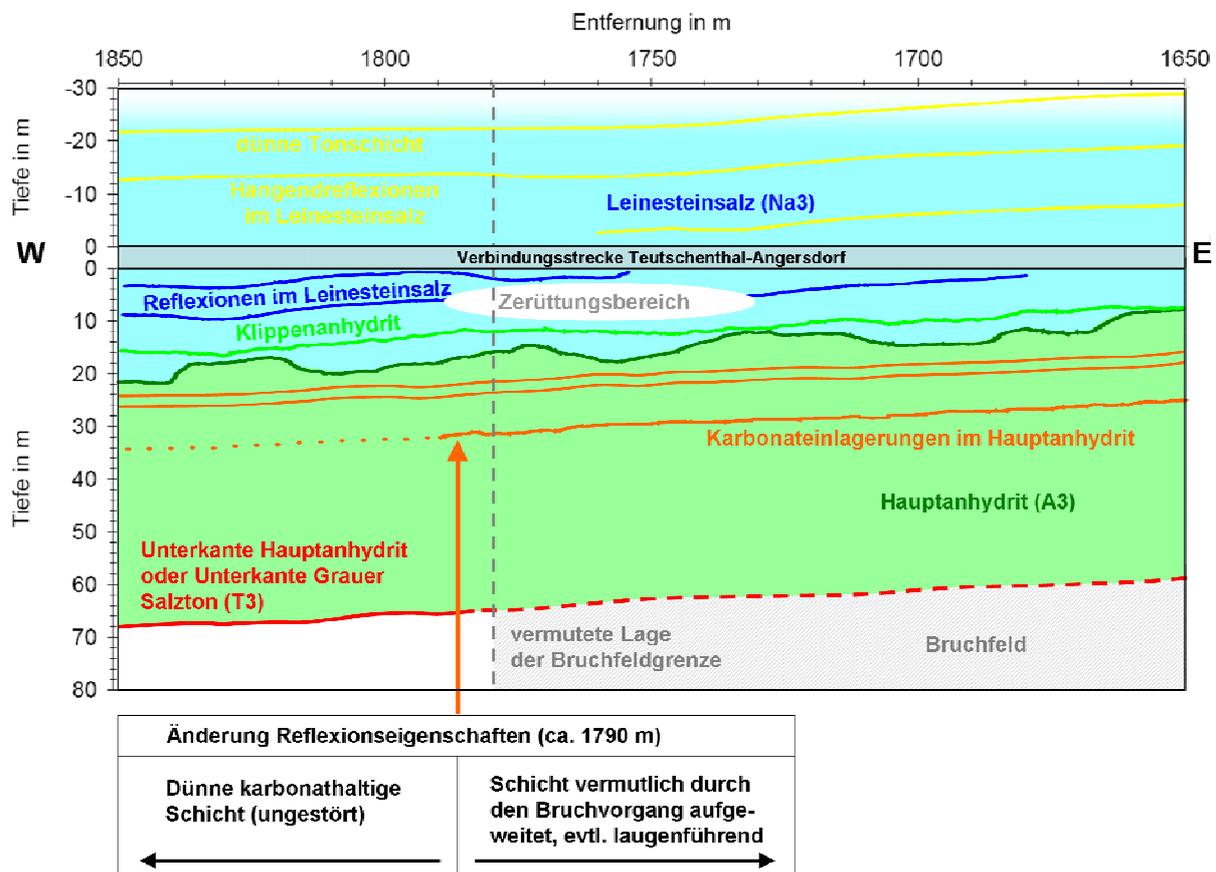


Abb. 3-17: Geologische Interpretation der Radarergebnisse am Standort Teutschenthal.

3.2.5 Zusammenfassung Georadar

Die Georadar-Strukturerkundung mit verschiedenen Messfrequenzen ermöglicht zum einen eine detailreiche Abbildung streckennaher Schichtgrenzen, zum anderen können mit niederfrequenten Antennen große Eindringtiefen (70 m) erzielt werden. Aus der Kombination von Sohlemessungen mit gerichteten Messungen mit geschirmten Antennen, sowie Messungen mit gerichteten Antennen, kann eine Richtungsangabe der beobachteten Reflexionen getroffen werden. Das MO-Verfahren zeigt beim Untertageeinsatz zahlreiche Vorteile gegenüber herkömmlichen CO-Messungen, allerdings bestehen auch Nachteile der Methode (hoher Zeitaufwand, Verschlechterung der Auflösung), die im Vorfeld eines Einsatzes des Verfahrens berücksichtigt werden müssen.

Anhand der Georadarergebnisse konnten für beide Standorte geologische Modelle aufgestellt werden, in denen auch schon erste Hinweise auf mögliche Problembereiche einfließen. Auf der Referenzmessstrecke im Bergwerk Sollstedt konnten die Übergänge von Steinsalz zu

Basalanhydrit und Hauptdolomit über das gesamte Profil registriert werden. Hinweise auf mögliche Problembereiche, z. B. in Form von Feuchtevorkommen, wurden an diesen beiden Schichtgrenzen nicht beobachtet. Bei Profilmeter -50 jedoch finden sich im Steinsalz Hinweise auf eine mögliche Auflockerungszone in etwa 5 m Tiefe. Auch an der westlichen Bruchfeldgrenze in der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf konnten anhand der Georadardaten Problembereiche ausgewiesen werden. Über dem mittleren Profilbereich ist in den Daten eine Zerüttungszone zu erkennen, die vermutlich in Zusammenhang mit dem Gebirgsschlag steht. Daneben zeigt die Reflexion einer anhydritinternen Karbonateinlagerung über dem Bruchfeld ein verändertes Reflexionsmuster. Es wird vermutet, dass sie durch den Bruchvorgang aufgeweitet ist und jetzt möglicherweise Lauge führt.

3.3 Literatur

- [1] BECHT, A., APPEL, E. & DIETRICH, P. (2006). Analysis of multi-offset GPR data: A case study in a coarse grained gravel aquifer. – *Near Surface Geophysics* 4: S. 227 – 240.
- [2] FISHER, E., MCMECHAN, G. A. & ANNAN, A. P. (1992). Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data. – *Geophysics* 57 (3): S. 495 – 504.
- [3] GRANT, F. S. & WEST, G. F. (1965). *Interpretation theory in Applied Geophysics*. – New York (McGraw-Hill).
- [4] IGEL, J., KURZ, G. & SCHULZ, R. (2006). Detecting brine zones in salt deposits with the ground penetrating radar (GPR) for safety assessments of underground waste disposals. – *Near Surface Geophysics* 4: S. 265 – 274.
- [5] JUST, A., JACOBS, F., KRAUSE, Y., TUCH, A., KNISS, R., SCHUCK, A., SCHULZ, R., KURZ, G., IGEL, J., LINDNER, U., SCHICHT, T., SCHWANDT, A., KÜHNICKE, H., SCHULZE, E. (2004): Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02C0851, 02C0861, 02C0871, Leipzig.
- [6] KURZ, G. (2005). Der optimierte Einsatz des elektromagnetischen Induktionsverfahrens unter Tage. – Unveröffentlichte Dissertation, TU Berlin.
- [7] MINKLEY, W. (2008). Integritätsverhalten von Salinarbarrieren. – Vortrag im Rahmen des 8. Projektstatusgesprächs der Forschungsförderung zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen im Forschungszentrum Karlsruhe.
- [8] NICKEL, H. (1991). Ermittlung der elektrischen Gesteinskonstanten im Megahertz-Bereich. – *Geologisches Jahrbuch, Reihe E, Heft 49*.
- [9] PIPPIG, U., RICHTER, T. & SCHICHT, T. (2005). Ergebnisbericht zur geophysikalischen Erkundung der Ursachen des Laugenzutritts in der Verbindungsstrecke zwischen den Grubenfeldern Angersdorf und Teutschenthal. Bo-Ra-tec GmbH Weimar, K-UTEC GmbH Sondershausen. Unveröffentlicht.

- [10] SUN, J. & YOUNG, R. A. (1995). Recognizing surface scattering in ground-penetrating radar data. – *Geophysics* 60 (5): S. 1378 – 1385.
- [11] THIERBACH, R. (1974). Electromagnetic Reflections in Salt Deposits. – *Journal of Geophysics* 40: S. 633 – 637.
- [12] SCHICHT, T., LINDNER, U. & THOMA, H. (2005). Abschlussbericht zu den Radarmessungen im Rahmen der Vorerkundung zur Neuauffahrung einer Flucht- und Wetterstrecke zwischen den Grubenfeldern Angersdorf und Teutschenthal. K-UTECH GmbH Sondershausen. Unveröffentlicht.
- [13] UCHTMANN, S. (2008a). Multi-Offset-Messungen im Salinar. – *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft e.V., Sonderband I*: S. 48 – 53.
- [14] UCHTMANN, S. (2008b). Improved exploration in salt deposits by multi-offset measurements. – *Proceedings of the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Birmingham, UK.
- [15] VILWOCK, G. & REICHENBACH, W. (2005). Abschlussdokumentation Geologische Betreuung Streckenauffahrung Angersdorf-Teutschenthal und Bewertung des Laugenzuflusses. GFE CONSULT GmbH Stendal. Unveröffentlicht.
- [16] WU, T. T. & KING, R. W. P. (1965). The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP 13: S. 369 – 373.

4 Sonarverfahren

E. Schulze, H. Kühnicke (IZFP Dresden)

4.1. Geosonar: Messprinzipien und Messtechnologie

Der physikalische Wechselwirkungsmechanismus des Geosonarverfahrens ist prinzipiell der Gleiche, wie bei den ebenfalls eingesetzten seismischen Erkundungsmethoden und beruht auf dem Einfluss von Gesteinsgrenzen und Gebirgsinhomogenitäten auf das akustische Wellenfeld. Der bestimmende petrophysikalische Parameter ist die akustische Impedanz, das Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte eines Mediums. Sie beeinflusst an der Grenzfläche zwischen zwei Medien das Transmissions- und Reflexionsverhalten der akustischen Wellen.

Der Unterschied zu seismischen Messungen besteht zum Einen in der Wahl erheblich höherer Frequenzen von ca. 20 kHz. Damit ist die Auflösung der Gebirgsstrukturen, die in der Größenordnung einer Wellenlänge liegt, höher. Gleichzeitig wird die für die Auswertalgorithmen notwendige Apertur, d.h. das maximale Geber-Empfänger-Offset geringer. Dieser Vorteil ist aber mit dem Nachteil geringerer Reichweite verbunden, da die Amplitudenschwächung der Signale aufgrund der Struktur der natürlich vorkommenden Salzgesteine mit steigender Frequenz zunimmt. Zum Anderen wird, anders als bei der Seismik, mit schmalbandigen konditionierten Sendesignalen gearbeitet. Dies erlaubt eine Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes durch Korrelationstechniken bei der Signalverarbeitung, unter den Annahmen, dass der Frequenzinhalt nicht durch dispersive Wellenmoden oder nichtlineare Effekte verändert wird. Dies ist bei der vorliegenden Messgeometrie und der geringen Sendesignalintensität gegeben.

Im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen werden die Ultraschallsignale in Durchfeuchtungszonen nicht gedämpft. An gasgefüllten Klüften hingegen werden die elastodynamischen Wellen fast vollständig reflektiert. Schwächezonen dieser Art können deshalb einerseits besonders gut nachgewiesen werden. Andererseits bilden in alten Grubengebäuden die in Stoßnähe vorhandenen Abschaltungen ein fast unüberwindliches Hindernis für die akustischen Wellen.

Hauptziel der Verbesserung des Einzelverfahrens Geosonar war, durch Optimierung der Sende- und Empfangsprüfköpfe, Signalkonditionierung und Weiterentwicklung der Auswertemethodik sichere Aussagen über den geomechanischen Aufbau des Gebirges im Bereich bis zu 100 m Entfernung vom Messsystem zu erreichen.

4.2. Entwicklung hochempfindlicher niederfrequenter Ultraschallaufnehmer

Zur Erhöhung der Sensitivität des Ultraschall-Messsystems und der damit verbundenen Verbesserung der Signalqualität und Reichweite des Verfahrens wurden am IZFP Dresden hochempfindliche niederfrequente Ultraschallaufnehmer entwickelt. Dies erfolgte in der Hauptsache durch eine Anpassung der Frequenzsensibilität der Sensoren an die Frequenzeigenschaften der im Rahmen eines Vorgängerprojektes entwickelten Aktuatoren mit hoher Leistung im niederfrequenten Bereich (1...20 kHz). Abbildung 4-1 zeigt neben zwei Stapelaktuatoren einen Sensor mit gewölbter Koppelfläche für Messungen in Bohrungen und ganz rechts einen Ultraschallsensor mit ebener Koppelfläche für Untersuchungen am Stoss. Beide Aufnahmervarianten besitzen einen integrierten 36 dB-Vorverstärker und analoge Bandfilter.



Abb. 4-1: Am Fraunhofer IZFP Dresden entwickelte Aktuator-Sensor-Kombinationen für Sonar-Messungen am Stoss und in Bohrungen

Für Untersuchungen mit aktivem niederfrequentem Ultraschall im Salinar hat sich im vorangegangenen Vorhaben 02 C 0568 [9] eine Technologie als Ankopplungsvariante bewährt, bei der die Aktuatoren und Sensoren an die Wandung von kurzen, in den Stoß ausgeführten Bohrungen angepresst werden. Einerseits lässt sich so der abschirmende Einfluss von stoßnahen Abschaltungen verhindern, die für elastodynamische Wellen im Frequenzbereich von 10 bis 50 kHz einen absoluten Reflektor darstellen. Andererseits können durch einfaches Drehen der Bohrlochsonden sowohl First- als auch Sohle-messungen aus den gleichen Bohrlöchern heraus durchgeführt werden.

Abbildung 4-2 zeigt den realisierten konstruktiven Aufbau einer Bohrlochsonde, die für gerichtete Messungen in Trockenbohrungen geeignet ist. Bei der Sondenentwicklung wurden verschiedene Ankopplungskonzepte (pneumatisches, elektromechanisches Anpressen) getestet. Um die Bohrlochsonden auch für Langzeitmessungen der Akustischen Emission tauglich zu machen, wurde eine Ankopplungsvariante realisiert, bei der der Sensor / Aktuator (rot) durch ein Feder/Winkel-System statisch an die Bohrlochwand angepresst werden. Der Andruckkraft wird beim Einfahren der Sonde mit Hilfe eines Pneumatikzylinders (links) entgegengewirkt. Das Sondenkonzept schließt ein mechanisches Not-Entspannen der Andruckfedern ein.

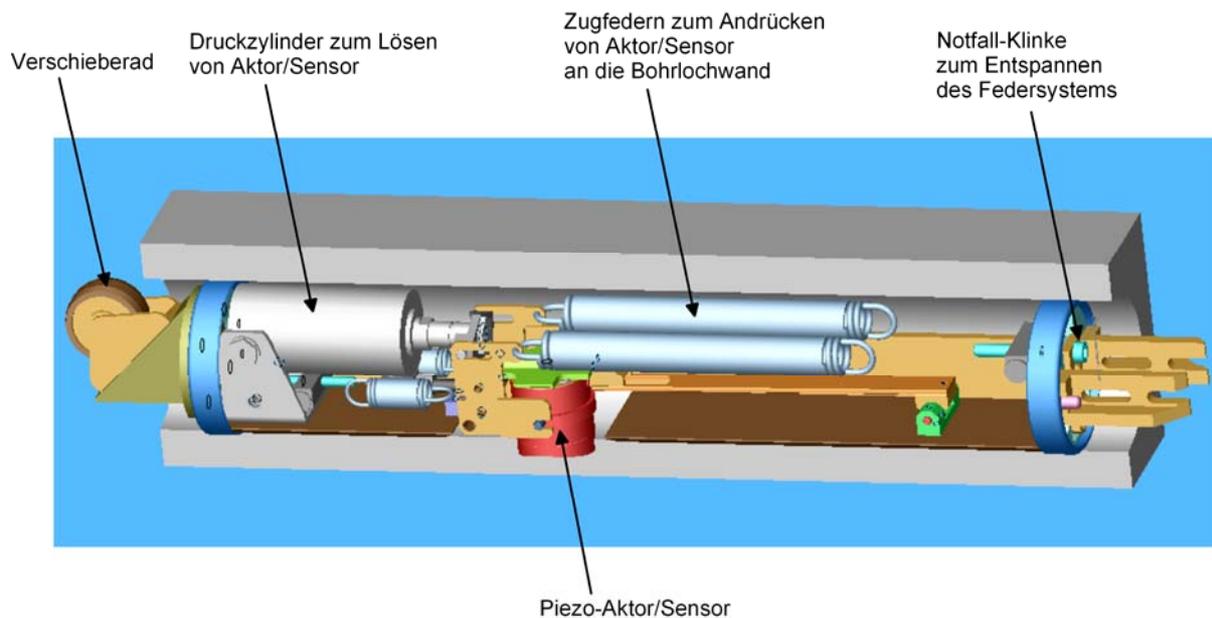


Abb. 4-2: Prinzip-Skizze der neu entwickelten Bohrloch-Sonde für Messungen mit aktivem niederfrequentem Ultraschall und von Akustischer Emission



Abb. 4-3: Bohrloch-Sonde mit hochempfindlichem Ultraschallaufnehmer und mit Piezo-Aktuator für Messungen mit aktivem niederfrequentem Ultraschall in Trockenbohrungen

Das modulare Sondenkonzept erlaubt es zum Einen, Ultraschall-Sensoren oder Aktuatoren getrennt in Einzelsonden in das Gebirge einzubringen, um beispielsweise Durchschallungen zwischen Bohrungen oder Messungen der Akustischen Emission zu realisieren. Mit einem

Distanzstück aus stark dämpfenden Material wurde zum Anderen die in Abbildung 4-3 dargestellte kombinierte Sonde aufgebaut, mit der Transmissions- und Reflexionsmessungen mit aktivem niederfrequentem Ultraschall aus einem Einzelbohrloch heraus durchgeführt werden können.

4.3 Entwicklung bergbautauglicher Sonar-Messtechnik

Im Rahmen des Forschungsthemas wurde ein bergbautaugliches 16-kanaliges Ultraschall-Messsystem entwickelt, um die Datenqualität und Zuverlässigkeit der Sonar-Messtechnik zu erhöhen. Das dezentral aufgebaute Sonar-Messsystem AE.net soll das bei den In-situ-Untersuchungen im Rahmen des aktuellen Vorhabens eingesetzte mehrkanalige Datenakquisitionssystem AE.engine in Zukunft ersetzen.



Abb. 4-4: Größenvergleich eines Prototyps des neu entwickelten bergbautauglichen 16-kanaligen Ultraschall-Messsystems (rot) mit dem bisher eingesetzten System AE.engine (rechts).

Die Hardwarekonfektionierung und Softwareentwicklung für dieses neue System ist bis zum Aufbau eines Testmusters fortgeschritten. Die A/D-Wandlung erfolgt sensornah durch lüfterlose Embedded-PC-Module. Damit soll ein Schutzgrad IP-67 erreicht werden, der ein Arbeiten unter rauen Bergbaubedingungen ermöglicht. Außerdem gewährleistet die dezentrale A/D-Wandlung der Messsignale eine hohe Störfestigkeit gegen elektromagnetische Einstrahlungen. Das System ist sowohl für aktive Ultraschall-Messungen im Frequenzbereich von 5 kHz bis 200 kHz als auch für Langzeitbeobachtungen der natürlichen Mikroseismizität zur Erfassung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung von Auflockerungszonen geeignet. Die Konfektionierung der kommerziellen Hardware zur A/D-Wandlung und Datenübertragung sowie die Programmierung von Firmware und Messsoftware erfolgt am IZFP. Abbildung 4-4 verdeutlicht das modulare Konzept des Prüfsystems AE.net und zeigt

beispielhaft eine Konfiguration mit vier Sensoren. Das Modul AE.engine ist die dezentrale Verarbeitungseinheit für vier AE-Kanäle und enthält je Kanal einen 16 Bit Analog-Digital-Wandler mit einer Abtastrate von 2 MHz. Das Modul AE.switch übernimmt die Steuerung von maximal vier Modulen AE.engine, d.h. von 16 AE-Kanälen. Standard-Ethernet-Kabel verbinden die einzelnen Module. Mit Hilfe eines speziellen Verfahrens „Synchronisation and Power over Ethernet“ (S&PoE) werden Stromversorgung, Synchronisation und Datenkommunikation realisiert. Die Synchronisationsgenauigkeit beträgt 500 ns. An das Echtzeitverhalten des Datenakquisitionssystems werden hohe Anforderungen gestellt. Deshalb wird das Echtzeitbetriebssystem ETS von IntervalZero eingesetzt.

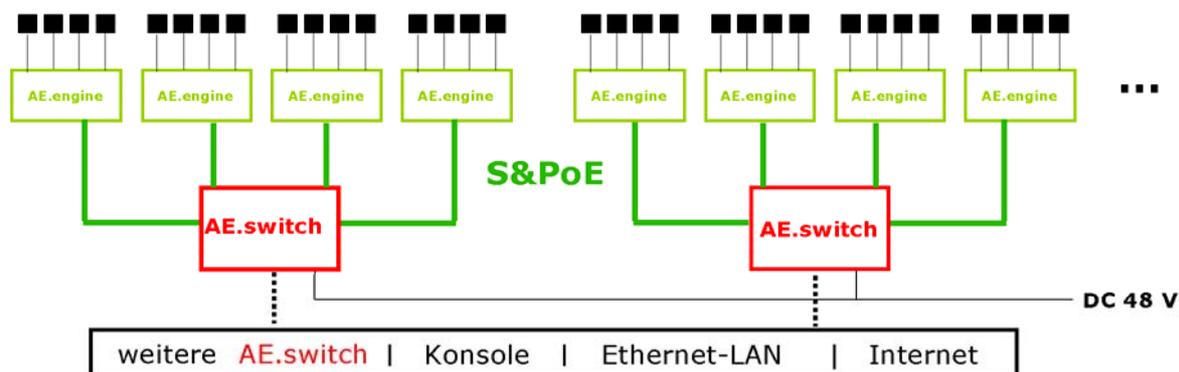


Abb. 4-5: oben: modulares Konzept des Prüfsystems AE.net
 unten: Testmuster des dezentral aufgebauten Messsystems mit einem Toughbook als Bedienkonsole, von links: AE.switch (Steuereinheit), AE.engine (Parameter, Wellenformspeicher), 4 Sensoren mit integriertem Vorverstärker, Laptop (Bedieneinheit)

4.4 Messkampagnen, Parametergewinnung

In Kooperation mit den Projektpartnern wurden die Bergwerksstandorte Teutschenthal-Angersdorf und Sollstedt als Referenzstandorte ausgewählt. Im Rahmen von Befahrungen dieser Gruben erfolgte die Festlegung von Messlokationen für die geophysikalische Erkundung spezifischer Problemzonen in der geologischen Barriere um die

Grubenhohlräume. Bei der Planung der Messkampagnen an den Untersuchungsstandorten wurden die Erfahrungen aus den beiden vorangegangenen Vorhaben 02 C 0568 [9] und 02 C 0851 [13] berücksichtigt.

Die In-situ-Messungen erfolgten mit dem mehrkanaligen Datenakquisitionssystem AE.engine, das im Rahmen der vom BMBF-Projektträger PTWT+E geförderten Vorhaben 02 C 0537 [10] und 02 C 0568 [9] entwickelt wurde. Das modulare System kann multivalent für unterschiedliche Messverfahren, wie Schallemission, niederfrequente Ultraschallprüfung, Geosonar und hochfrequente Mikroseismik eingesetzt werden. Im Rahmen des vorangegangenen Vorhabens 02 C 0851 [13] erfolgte die Integration einer Sendeeinheit für beliebige Signalformen in das Messsystem AE.engine.

Tab. 4-1: Übersicht über die In-situ-Messkampagnen.

Referenzstandort	Messlokation	Station	Zeit
Standort C Sigmundshall (Ergänzungsmessungen)	Weser- Wetterstrecke 480m-Sohle	+38 m bis +184 m	03.11.2005 bis 06.11. 2005
Standort A Sollstedt	Hauptförderstrecke nach Haynrode	-31,5 m bis +120,5 m	30.05.2006 bis 02.06.2006
Standort B Teutschenthal	Verbindungsstrecke Teutschenthal- Angersdorf	1644 m bis 1858 m	06.11.2006 bis 09.11.2006

Die Tabelle 4-1 gibt eine Übersicht über die im Rahmen des aktuellen Vorhabens durchgeführten In-situ-Messkampagnen.

Da die Auswertemethodik und Rekonstruktionsverfahren der Sonar-Erkundung für die in-situ gewonnenen Messwerte im Rahmen des Vorhabens stetig weiterentwickelt wurden, erfolgte im Anschluss an das Processing der an den Referenzstandorten Sigmundshall, Sollstedt und Teutschenthal gewonnen Daten eine Neubearbeitung der im Ausgangsvorhaben 02 C 0568 [9] in den Jahren 1999 und 2000 in Bischofferode gewonnenen Sonardaten. Im Weiteren wird deshalb auch das Messregime der Geosonarmessungen in Bischofferode wiederholt dargestellt.

Im Folgenden werden die Messparameter der Sonar-Untersuchungen an den Referenzstandorten im Detail aufgeführt.

Messregime: Referenzstandort C, Sigmundshall (Ergänzungsmessungen)

Die Untertagemessungen im Rahmen des aktuellen Projektes begannen im Herbst 2005 mit weiteren Sonaruntersuchungen am bisherigen Referenzstandort Sigmundshall, die ebenso wie seismische Messungen zur Vervollständigung des geophysikalischen Referenzdatensatzes ausgeführt wurden. Aufgrund der schwierigen Messbedingungen im Bereich des Großwetterlüfters war es im Vorgängerprojekt 02 C 0851 [13] nicht möglich gewesen, die Verfahren Seismik und Sonar im vorgegebenen Zeit- und Kostenrahmen auf dem gesamten

gemeinsamen Profilbereich der Verfahren Georadar, Elektromagnetik, Geoelektrik mit 350 m Länge einzusetzen.

Die ergänzenden Sonar-Messungen wurden mit den im Vorgängerprojekt für die spezifischen Messbedingungen in Sigmundshall entwickelten Technologien durchgeführt. Sowohl die Aktuatoren als auch die Sensoren wurden mit Express-Ankern und Joch am Stoß befestigt, nachdem mit einem Fräser ebene Koppelflächen geschaffen worden waren. Als Koppelmittel für die Sensoren hatte sich die Ultraschall-Vorlaufstrecke „GEOPAD“ der Firma SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH bewährt.

Das Messregime der Untersuchungen in der Grube Sigmundshall entspricht dem der zu ergänzenden Messungen vom 13. 02. bis 16. 02. 2003 (Station -66 m... +64 m) [13].

Messparameter:

- Grube Sigmundshall, Betreiber: K+S KALI GmbH
- 480m-Sohle SW-Stoß der Weser-Wetterstrecke
- 2. Messeinsatz 13.02.03 bis 16.02.03
- 3. Messeinsatz 03.11.05 bis 06.11.05
- Kanäle: 16
- Anregungspunktabstand: 4 m, Station -59 m, -55 m, ..., +177 m (60)
- Empfangspunktabstand: 2 m, Station -66 m, -64 m, ..., +184 m (126)
- Tiefenpunktabstand: 1 m
- Offset: regulär 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m, 11 m, 13 m, 15 m
- Überdeckungsgrad: regulär 4-fach
- Samplerate: 4 μ s (250 kHz)
- Samples: 65536 (262 ms)
- Energiestapelgrad: 10-fach
- Anregungssignal: zehn mit einem Hanning-Fenster multiplizierte Sinus-Halbwellen, Mittenfrequenz: 14,881 kHz, 1,9 V (Verstärkung 32 dB = 76 V)

Messregime: Referenzstandort A, Sollstedt

Die Messbedingungen für die Sonar-Untersuchungen im Bergwerk Sollstedt waren durch Auffüllungen auf der Sohle der Strecke erschwert. Sowohl die Aktuatoren als auch die Sensoren wurden mit Express-Ankern und Joch am festen Salzgestein befestigt, nachdem die Sohle beräumt und mit einem Fräser ebene Koppelflächen geschaffen worden waren. Für Untersuchungen in tiefen Fräslöchern wurden zwei neue Stapelaktuatoren mit dem Durchmesser des Fräskopfes und der Ultraschall-Sensoren gefertigt. Als Koppelmittel wurde die Ultraschall-Vorlaufstrecke „GEOPAD“ eingesetzt.

Im Unterschied zu den Untersuchungen in Sigmundshall wurde bei den Messungen in Sollstedt und Teutschenthal mit zweimal 10-facher Energiestapelung gearbeitet. Die in Abbildung 4-6 dargestellte Differenz der SAFT-migrierten Tiefenschnitte der Reflektivität aus von zwei Messzyklen mit je 10 Energiestapelungen dokumentiert die gute Reproduzierbarkeit der Geosonarmessungen. Nur im aktuatornahem Bereich sind deutliche

Reflektivitätsdifferenzen zu erkennen, welche durch die komplizierten Ankopplungsbedingungen der Stapelaktuatoren auf der Sohle der Hauptförderstrecke nach Haynrode verursacht werden. Abgesehen von den wechselnden Anregungsbedingungen, reicht eine 10-fach Energiestapelung für einen hohen Signal-Rausch-Abstand aus. Treten jedoch, wie am Referenzstandort Teutschenthal, vermehrt elektromagnetische Störungen in den Empfangssignalen auf, so müssen diese Einzelmessungen vor der Energiestapelung eliminiert werden. Dies wurde dadurch realisiert, dass das Messsystem AE.engine jede Einzelmessung speichert, so dass vor der Energiestapelung im Rahmen des Datenprocessings eine Begutachtung der Einzelmessungen erfolgen kann. Durch den 20-fachen Energiestapelgrad wird sichergestellt, dass auch nach dem nachträglichen Entfernen von einzelnen, elektromagnetisch gestörten Messungen ein genügend hoher Stapelgrad erhalten bleibt.

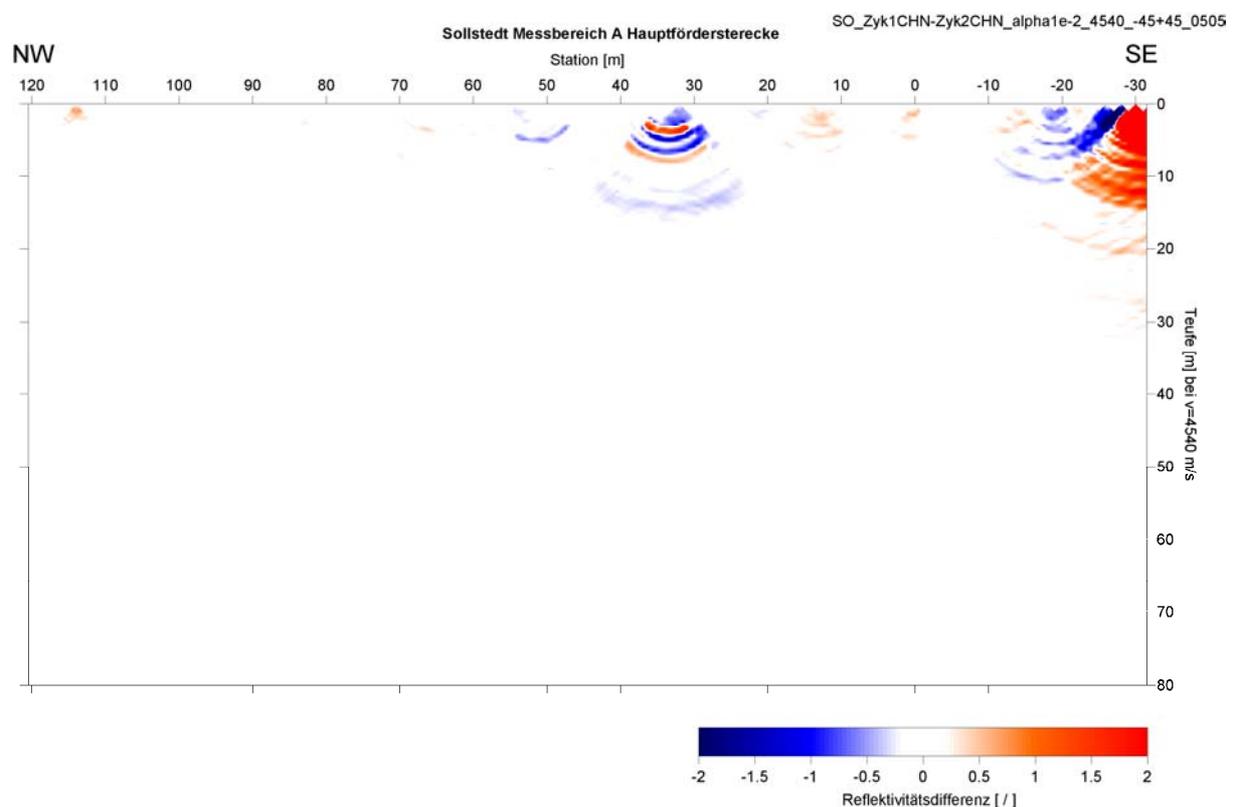


Abb. 4-6: Differenz der Sonar-Reflektivität zweier migrierter Tiefenschnitte am Referenzstandort Sollstedt im Ergebnis von zwei Messzyklen mit je 10 Energiestapelungen

Messparameter:

- Grube Sollstedt, Betreiber: Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben mbH (GVV)
- Sohle der Hauptförderstrecke nach Haynrode (-350 mNN)
- Messvorbereitung 16.05.06 bis 19.05.06
- Messeinsatz 30.05.06 bis 02.06.06
- Kanäle: 16

- Anregungspunktabstand: 4 m, Station -31 m, -27 m, ..., +117 m (38)
- Empfangspunktabstand: 2 m, Station -32 m, -30 m, ..., +124 m (79)
- Tiefenpunktabstand: 1 m
- Offset: regulär 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m, 11 m, 13 m, 15 m
- Überdeckungsgrad: regulär 4-fach
- Samplerate: 4 μ s (250 kHz)
- Samples: 65536 (262 ms)
- Energiestapelgrad: 2 x 10-fach
- Anregungssignal: zehn mit einem Hanning-Fenster multiplizierte Sinus-Halbwellen, Mittenfrequenz: 14,88 kHz, 1,9 V (Verstärkung 32 dB = 76 V)

Messregime: Referenzstandort B, Teutschenthal

Die Sonar-Messungen im Bergwerk Teutschenthal wurden mit den am Referenzmessort Sollstedt für die spezifischen Messbedingungen auf der Sohle entwickelten Technologien durchgeführt.

Messparameter:

- Grube Teutschenthal, Betreiber: GTS GmbH & Co. KG
- Sohle der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf, Streckenabschnitt über dem westlichen Bruchfeldrand
- Messvorbereitung 01.11.06 bis 03.11.06
- Messeinsatz 06.11.06 bis 09.11.06
- Kanäle: 16
- Anregungspunktabstand: 4 m, Station 1651 m, 1655 m, ..., 1851 m (51)
- Empfangspunktabstand: 2 m, Station 1644 m, 1646 m, ..., 1858 m (108)
- Tiefenpunktabstand: 1 m
- Offset: regulär 1 m, 3 m, ..., 15 m
- Überdeckungsgrad: regulär 4-fach
- Samplerate: 4 μ s (250 kHz)
- Samples: 65536 (262 ms)
- Stack: 2 x 10-fach
- Anregungssignal: zehn mit einem Hanning-Fenster multiplizierte Sinus-Halbwellen, Mittenfrequenz: 14,88 kHz, 1,9 V (Verstärkung 32 dB = 76 V)

Messregime: Referenzstandort D, Bischofferode (Neubearbeitung der Sonardaten)

Messparameter:

- Kaligrube Bischofferode, Betreiber: Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben mbH (GVV)
- Referenzmessstrecke im Nordbereich der 1. westlichen Teilstrecke
- zwei Messkampagnen: 11/99 und 01/00
- Kanäle: 8

- Sender/Empfänger in 50 Bohrungen in den Stoß, Ø 100 mm, Bohrtiefe 1,45 m, Sensoren in 0,7...1,0 m Tiefe
- 39 Bohrungen in der Nord-Süd-Strecke (Weststoß)
- 11 Bohrungen in der Ost-West-Strecke westlich der Streckenkreuzung bei Station 0 m
- Anregungspunktastand: ca. 1,1 m, Station 5,20 m .. 43,82 m (36)
- Empfangspunktastand: ca. 1,1 m, Station 5,20 m .. 47,14 m (39)
- Anregungen jeweils in Richtung Firste und in Richtung Sohle
- Tiefenpunktastand: 0,55 m
- Offset: -4,4 m; -3,3 m ... +3,3 m
- Samplerate: 1,8 μ s (556 kHz)
- Samples: 22858 (41,14 ms)
- Energiestapelgrad: 10-fach
- Anregungssignal: 3 Sinus-Zyklen in $f_c=15$ kHz

4.5 Datenbearbeitung, Modellrechnungen und Weiterentwicklung der Rekonstruktionsverfahren

Bei der Verarbeitung der Daten wurde versucht, mit „wahren“ Signalamplituden zu arbeiten. Dies beinhaltet sowohl die Berücksichtigung des Einflusses von sphärischer Divergenz und Streuung als auch des Einflusses von Koppelleffekten und stoßnahen Inhomogenitäten. Letztere werden durch die Amplitudennormierung auf das akustische Rauschen ausgeglichen.

Im Verlauf des Vorhabens hat sich folgende Standard-Bearbeitungsfolge zur Erzeugung von Tiefenschnitten der Reflektivität entwickelt:

- Beseitigung des Gleichspannungsoffsets
- Faltung der Messdaten mit dem Sendesignal zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes
- Zeit-Shift auf Maximalamplitude des Sendesignals um Reflektoren lagerichtig mit dem Amplitudenmaximum abzubilden
- Bildung der Hilbert-Envelope um den Einfluss der Phase bei der Migration der Einzelspuren auszuschließen und die Signalanteile nur konstruktiv zu überlagern
- Amplitudenkorrektur des Einflusses von sphärischer Divergenz und Streuung für spezifische Messgeometrien, Sensorik und petrophysikalische Parameter
- Amplitudennormierung auf akustisches Rauschen
- Muting der an der freien Oberfläche geführten P- und Rayleigh-Wellen
- Rekonstruktion mittels Einzelspurmigration (SAFT-Algorithmus)

Zur Einzelspurmigration der an den Referenzstandorten gewonnenen Sonar-Daten wurde die sog. SAFT-Methode verwendet. SAFT steht dabei für „Synthetic Aperture Focusing Technique“ und wurde als ein bildgebendes Verfahren der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung entwickelt (s. z.B. [2], [4]). Eine ausführliche Darstellung der Grundlagen dieses Verfahrens wurde bereits im BMBF PTWT+E Abschlussbericht zum Vorhaben 02 C 05 8 [9] vorgelegt. Mit der SAFT-Rekonstruktionstechnik ist es möglich, aus einem

Ultraschalldatensatz die Lage von Reflektoren im Inneren eines Körpers zu berechnen. Es existieren verschiedene Algorithmen für Messanordnungen entlang einer flächigen oder linearen Apertur. Aus den gespeicherten Empfangssignalen wird ein Schnittbild bzw. volumetrisches Bild unterhalb der Apertur berechnet, indem die Signale für jeden Bildpunkt laufzeitrichtig überlagert werden. Als Nachteil ist das mögliche Auftreten von Artefakten zu nennen, die vor allem durch die endliche Ausdehnung der Apertur entstehen können.

Der gesamte Bearbeitungsablauf der Sonardaten wurde in das Auswerteprogramm CSVnorm integriert. Abbildung 4-7 enthält das Beispiel eines Bearbeitungsablaufs für Messdaten, die am Referenzstandort Sollstedt akquiriert wurden.

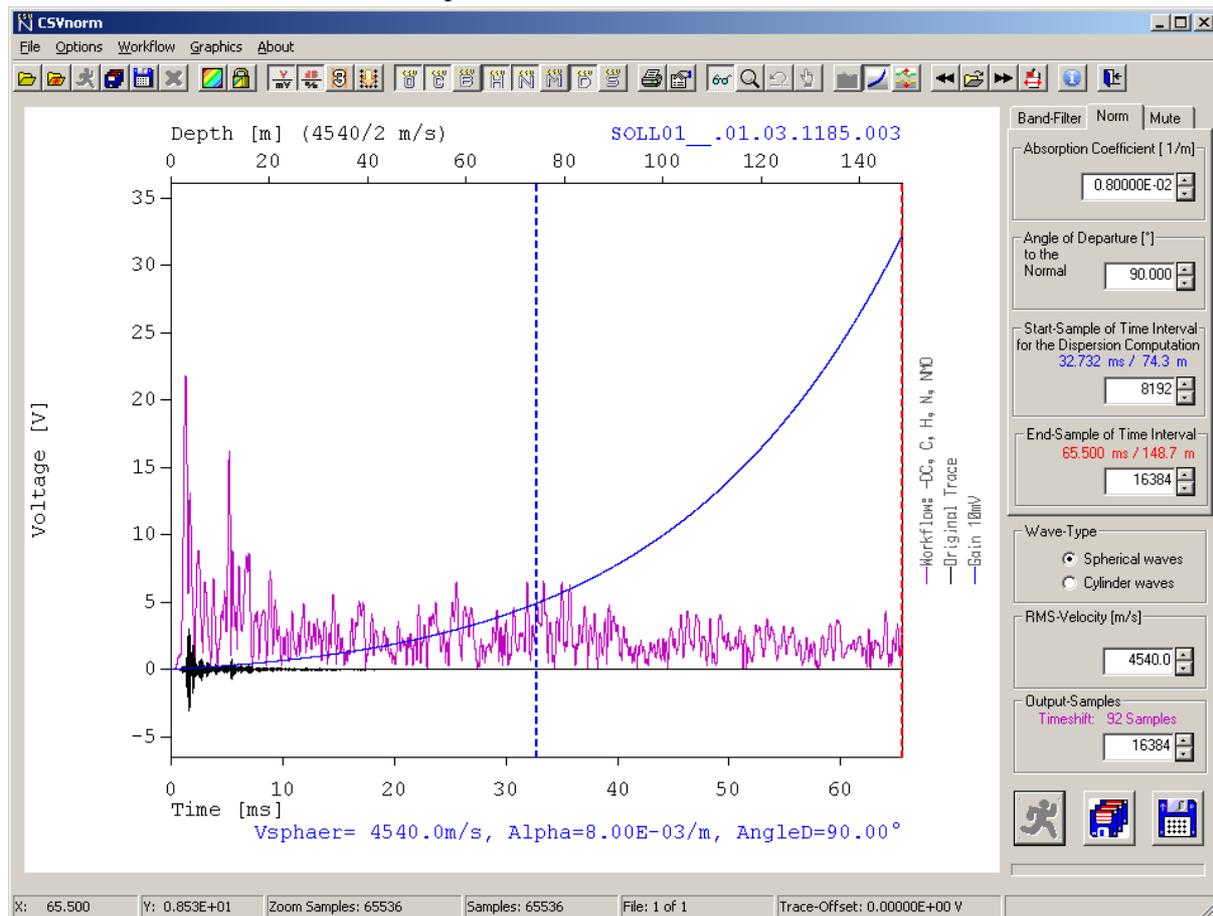


Abb. 4-7: Shell des Programms CSVnorm zur Datenbearbeitung der Sonar-Messdaten, Beispiel eines Bearbeitungsablaufs für Daten am Referenzstandort Sollstedt.
schwarz: Messsignal,
violett: Einzelspur nach Beseitigung des Gleichspannungsoffsets, Faltung mit dem Sendesignal, Bildung der Hilbert-Envelope, NMO-Korrektur,
blau: Verstärkungskurve für eine Longitudinalwellengeschwindigkeit v_p von 4540 m/s, einen Absorptionskoeffizienten α von $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ und einen Abstrahlwinkel des Aktuators von 90° zur Sendenormalen, die Dispersionsberechnung für die Amplitudennormierung auf akustisches Rauschen erfolgte im Intervall 32,732 ms bis 65,500 ms (74,3 m bis 148,7 m).

Im Rahmen von Modellrechnungen an gemeinsamen Modellen von Problemzonen erfolgte eine Modellierung der Sonar-Untersuchungen mit der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT). Abbildung 4-8 zeigt die beiden bearbeiteten Modellansätze.

Die Modelle von 70m x 35 m wurden jeweils mit 5613 x 2807 Zellen realisiert. Als größte auftretende Frequenz wurde $f_{\max}=20,83$ kHz festgelegt. Für die kleinste auftretende Geschwindigkeit $v=2600$ m/s ergibt sich eine Wellenlänge von 0,125 m, die mit 10 Gitterzellen diskretisiert wurde.

Da Achsensymmetrie vorliegt, mussten mit der EFIT-Modellierung nur die Aktuatorpositionen bei $x = 0$ m, 4 m, 8 m, 12 m und Sensorpositionen bei $x = 1$ m, 3 m, ... 15 m, jeweils in der Kontaktfläche Salz-Luft realisiert werden. Detektiert wird v_z , die out-of-plane particle velocity. Unten, rechts und links konnten aus Rechenzeitgründen nur offene Randbedingungen realisiert werden. Als Anregungsimpuls dienten in Analogie zu den In-situ-Untersuchungen zehn mit einem Hanning-Fenster multiplizierte Sinus-Halbwellen mit einer Mittenfrequenz von 14.88 kHz. Im Ergebnis der Modellierung erhält man für gewählte Zeiten nach der Anregung Wellenfrontbilder, die den Betrag des Teilchengeschwindigkeitsvektors wiedergeben. Aus den v_z -Werten an den Sensorpositionen lassen sich Amplituden-Zeitschnitte, so genannte B-Scans erzeugen.

Abbildung 4-9 zeigt die B-Scans für beide Modelle, jeweils für die Aktuatorposition 0 m.

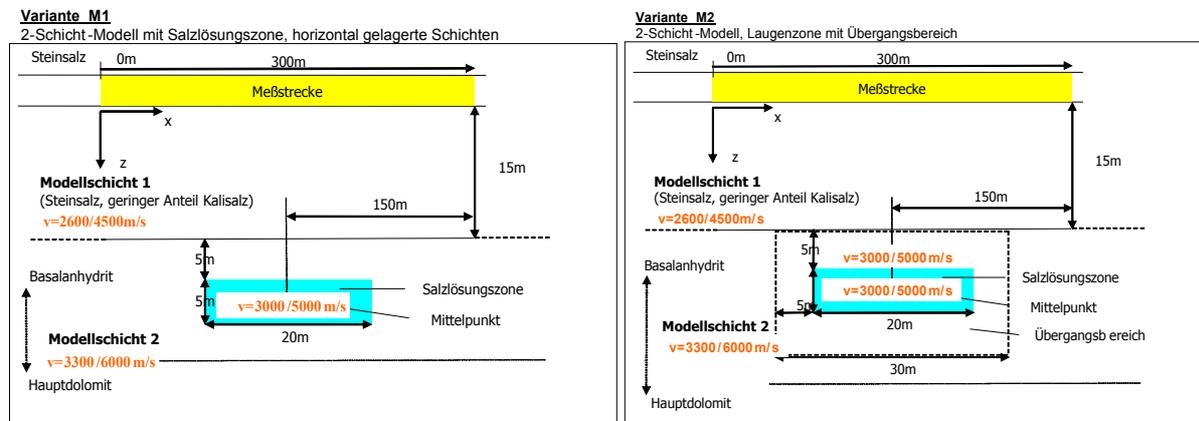


Abb. 4-8: Modelle zur EFIT-Modellierung einer Salzlösungszone
links: Variante M1, 2-Schicht-Modell mit Salzlösungszone, horizontal gelagerte Schichten,
rechts: Variante M2, 2-Schicht-Modell, Laugenzone mit Übergangsbereich

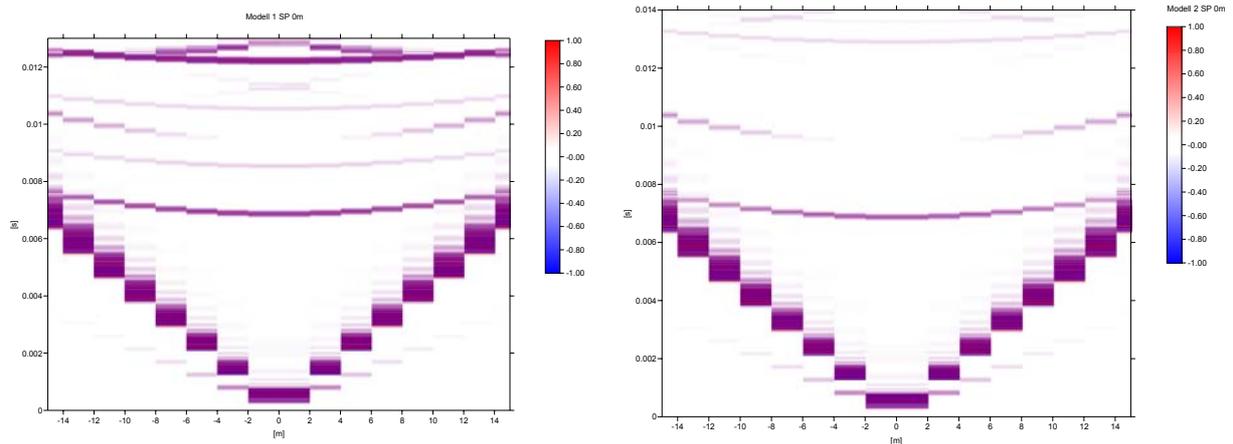


Abb. 4-9: EFIT-Modellierung einer Salzlösungszone, B-Scans (farbodierte Amplituden-Zeitschnitte). *links:* Modell M1, Anregungspunkt 0 m, *rechts:* Modell M2, Anregungspunkt 0 m.

Das die beim Processing der In-situ-Messdaten verwendeten Bearbeitungsschritte wurden auf die Modelldaten angewandt. Abbildung 4-10 belegt, dass die Faltung der Messdaten mit dem Sendesignal weitgehend das „numerische Überschwingen“ beseitigt, das aufgrund der begrenzten Anzahl und damit Größe der Berechnungszellen auftritt.

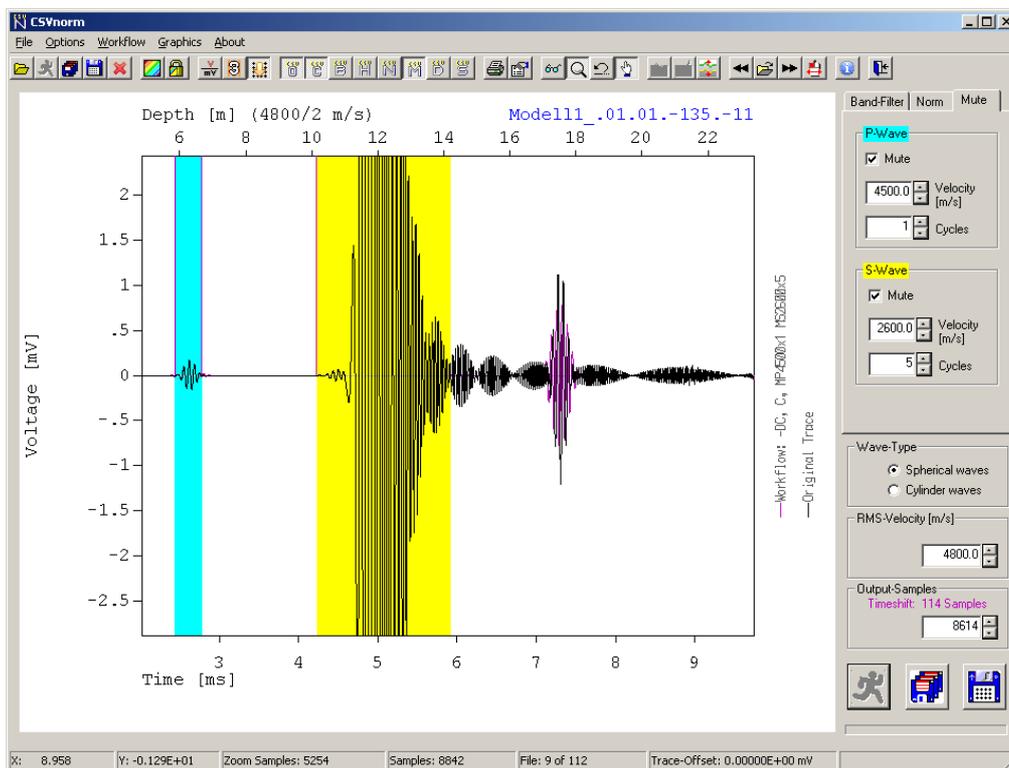


Abb. 4-10: Modell M1 zur EFIT-Modellierung einer Salzlösungszone. *schwarz:* Modellsignal (Amplituden-Zeitverlauf) *violett:* Signal nach Faltung mit dem Sendesignal und Muten der an der freien Oberfläche geführten P-Welle (1 Signalzyklus) und Rayleigh-Welle (5 Signalzyklen)

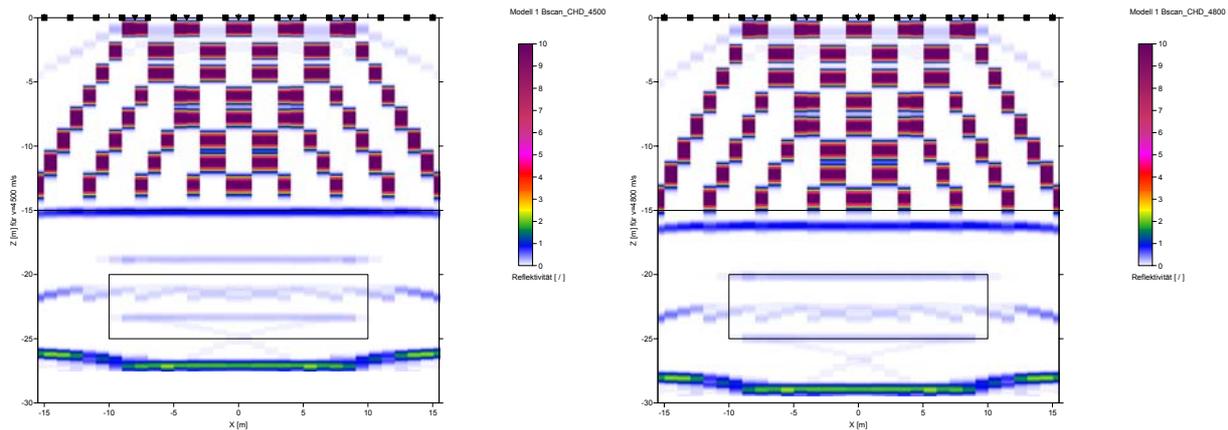


Abb. 4-11: Modell M1 zur EFIT-Modellierung einer Salzlösungszone Tiefenschnitt der Reflektivität. Bearbeitungsschritte: Faltung der Modellierungsdaten mit dem Sendesignal, Zeit-Shift auf Maximalamplitude des Sendesignals, Bildung der Hilbert-Envelope, NMO-Korrektur, Stack,
links: Effektivgeschwindigkeit $v_{RMS}=4500$ m/s, *rechts*: $v_{RMS}=4800$ m/s

Wie in den in Abbildung 4-11 dargestellten Tiefenschnitten zu erkennen ist, treten an der freien Oberfläche geführte P- und Rayleigh-Wellen auf. Letztere besitzen mit Abstand die größte Amplitude (Betrag des Teilchengeschwindigkeitsvektors) aller auftretenden Wellenmoden. Obwohl die Oberflächenwellen bei In-situ-Messungen aufgrund der oberflächennahen Auflockerung in der Regel weniger dominant sind als im Modell, wurde die Möglichkeit des Mutings der geführten P- und Rayleigh-Wellen in das Bearbeitungssystem integriert.

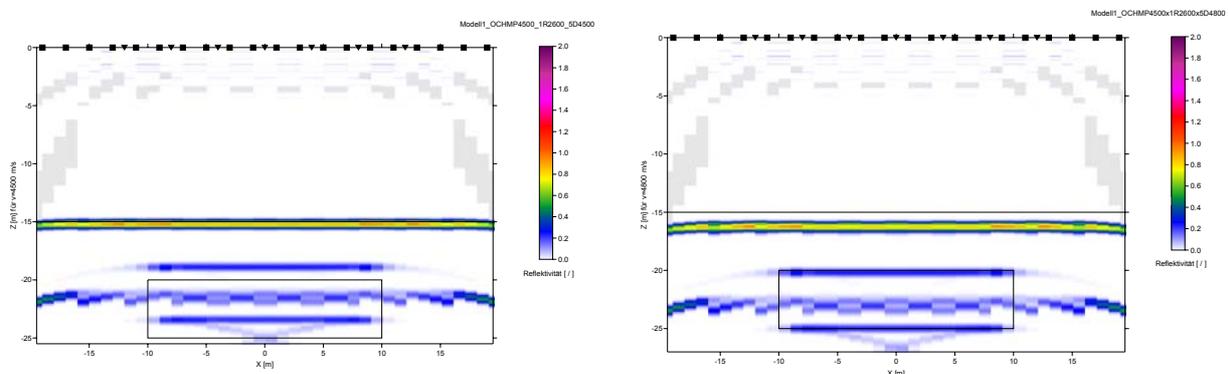


Abb. 4-12: Modell M1 zur EFIT-Modellierung einer Salzlösungszone Tiefenschnitt der Reflektivität. Bearbeitungsschritte: Faltung der Modellierungsdaten mit dem Sendesignal, Zeit-Shift auf Maximalamplitude des Sendesignals, Bildung der Hilbert-Envelope, Muten von direkter P-Welle (1 Signalzyklus) und Rayleigh-Welle (5 Signalzyklen), NMO-Korrektur, Stack.
links: Effektivgeschwindigkeit $v_{RMS}=4500$ m/s, *rechts*: $v_{RMS}=4800$ m/s

Abbildung 4-12 zeigt den Erfolg des Mutings der geführten Wellenmoden. Ein Restrauschen im Bereich der geführten Wellen resultiert aus der Signal-Verbreiterung im Ergebnis der Faltung mit dem Sendesignal. Die Zeit-Tiefenwandlung erfolgte mit unterschiedlichen Effektivgeschwindigkeiten v_{RMS} . Entspricht diese Effektivgeschwindigkeit mit $v_{RMS}=4500$ m/s (Abbildung 4-12, links) der Longitudinalwellengeschwindigkeit der

Modellschicht 1 (Steinsalz, geringer Anteil Kalisalz), so wird verfahrensbedingt die Lage der Schichtgrenze zur Modellschicht 2 (Basalanhydrit, $v_p=6000$ m/s) richtig abgebildet. Bei einer Effektivgeschwindigkeit $v_{RMS}=4800$ m/s (Abbildung 4-12, rechts) stimmt die Lage der Salzlösungszone ($v_p=5000$ m/s) im Tiefenschnitt der Sonar-Reflektivität mit den Modellmaßen überein. Reflexionsindikationen zwischen Vorder- und Hinterkante der Salzlösungszone sind an den Kanten des Salzlösungskörpers entstehenden P-S-Wechselwellen zuzuordnen. An der Basis des Modells ist ein starkes Rückwandecho zu erkennen, das durch die offenen Randbedingungen bei den Modellrechnungen erzeugt wird.

Um komplizierte Lagerungsverhältnisse mit starken lateralen Änderungen der physikalischen Einflussgrößen erfassen zu können wurden im SAFT-Rekonstruktionsverfahren Emergenzwinkel eingeführt, unter denen Signale am Beobachtungsort auftauchen. Durch das Eingrenzen des Winkelbereichs, in dem reflektierte Signale in den Migrationsprozess einbezogen werden, gelang es unter den spezifischen Randbedingungen starker lateraler Strukturänderungen, Störwellen besser zu unterdrücken. Wie das Ergebnis der mittleren Bearbeitungsvariante in Abbildung 4-13 zeigt, führt das Ausblenden der Oberflächenwellen im stoßnahen Bereich zu einer sehr geringen Belegungsdichte. Aus diesem Grund wurden in das SAFT-Rekonstruktionsverfahren Offset-Parameter eingeführt, mit denen sich die Maximalabstände zum Mittelpunkt zwischen Sender und Empfänger steuern lassen. Das Ergebnis der Modellrechnungen mit beschränkten Maximaldistanzen zum Midpoint zeigen die jeweils rechts dargestellten Tiefenschnitte in den Abbildungen 4-13 und 4-14 für das Modell M1 bzw. M2.

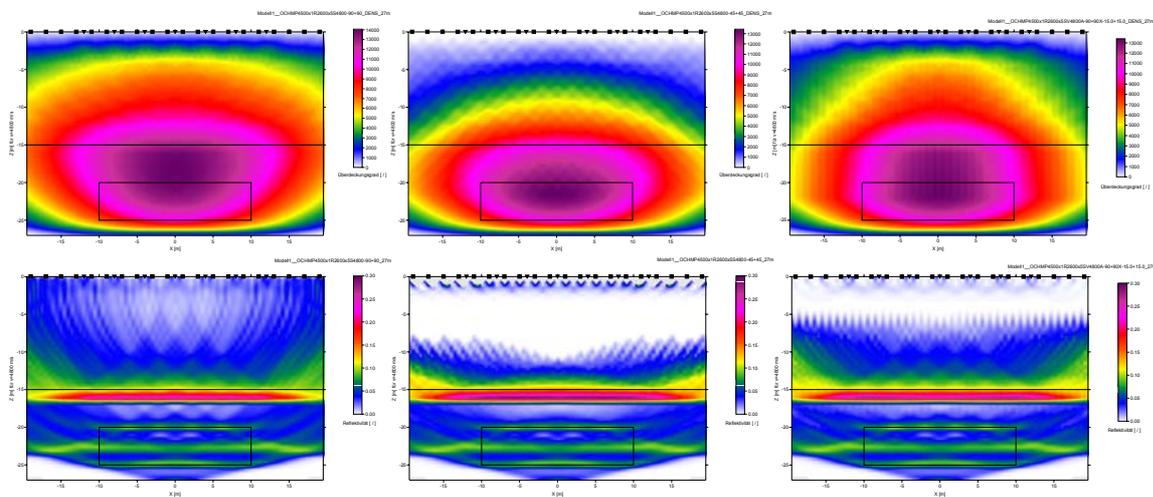


Abb. 4-13: Modell M1 zur EFIT-Modellierung einer Salzlösungszone.

oben: Belegungsdichte, unten: Reflektivität

Bearbeitungsschritte: Faltung der Messdaten mit dem Sendesignal, Zeit-Shift auf Maximalamplitude des Sendesignals, Bildung der Hilbert-Envelope, Muten von direkter P-Welle (1 Signalzyklus) und Rayleigh-Welle (5 Signalzyklen), SAFT-Rekonstruktion $v_{RMS}=4800$ m/s,

Emergenzwinkel (Maximaldistanz vom Midpoint):

links: $-90^\circ..90^\circ$ *mittig:* $-45^\circ..45^\circ$ *rechts:* $-90^\circ..90^\circ$, (-15m..15m)

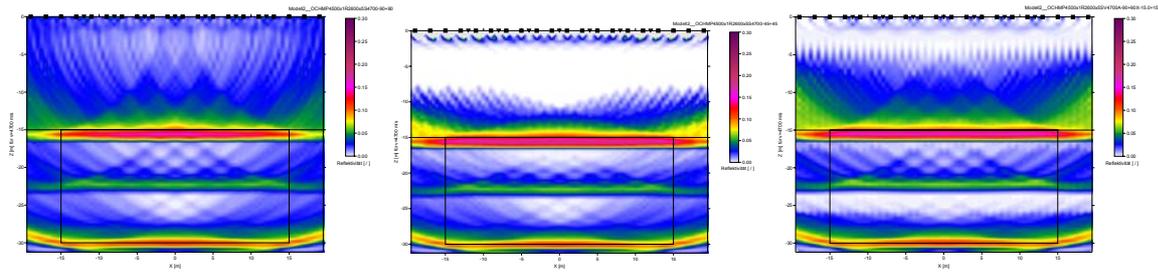


Abb. 4-14: Modell M2 zur EFIT-Modellierung einer Salzlösungszone, Sonar-Reflektivität. Bearbeitungsschritte: Faltung der Messdaten mit dem Sendesignal, Zeit-Shift auf Maximalamplitude des Sendesignals, Bildung der Hilbert-Envelope, Muten von direkter P-Welle (1 Signalzyklus) und Rayleigh-Welle (5 Signalzyklen), SAFT-Rekonstruktion $v_{RMS}=4700$ m/s, Emergenzwinkel (Maximaldistanz vom Midpoint):
links: -90°..90° mittig: -45°..45° rechts: -90°..90°, (-15m..15m)

Da sich die seismischen Parameter zwischen Übergangsbereich und eigentlicher Laugenzone im Modell M2 nicht unterscheiden, bildet sich in Abbildung 4-14 nur die gesamte laugenführende Zone ab.

4.6 Ergebnisse der Geosonarmessungen

Standort A – Sollstedt

Die folgenden Abbildungen 4-15 und 4-16 zeigen die Ergebnisse der Sonar-Messungen auf der Sohle in der Hauptförderstrecke des Bergwerks Sollstedt in Form von Tiefenschnitten der Reflektivität. Die Daten in Abbildung 4-15 wurden mit einer Effektivgeschwindigkeit v_{RMS} von 2460 m/s migriert. Die gut angepassten räumlichen Entfernungen zur D-Strecke und E-Strecke im Liegenden belegen, dass die flach seitlich unter der Hauptförderstrecke verlaufenden Strecken durch Scherwellenanteile im Reflexionsbild abgebildet werden.

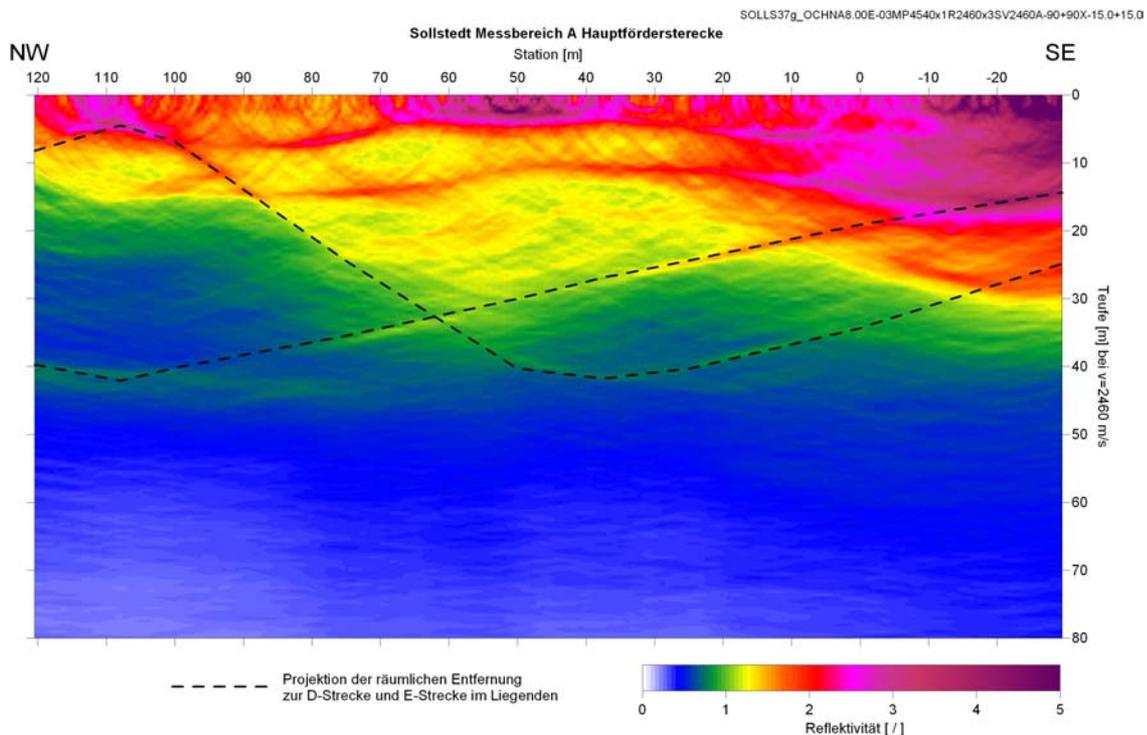


Abb.4-15: Sohle der Hauptförderstrecke im Bergwerk Sollstedt, SAFT-migrierter Tiefenschnitt der Reflektivität.

Bearbeitungsfolge: Faltung mit Sendesignal, Normierung, Hilbert-Envelope, Muten von direkter P-Welle (1 Signalzyklus) und Rayleigh-Welle (3 Signalzyklen), Dämpfung $\alpha=8,0E-03m^{-1}$, Emergenzwinkel -90° bis $+90^\circ$, $dX= -15m$ bis $+15m$, $v_{RMS}=2460$ m/s, Eintrag der räumlichen Entfernung zur D-Strecke und E-Strecke im Liegenden.

In dem mit einer effektiven P-Wellengeschwindigkeit v_{RMS} von 4540 m/s migrierten Tiefenschnitt (Abbildung 4-16) sind die als Artefakte in Erscheinung tretenden Scherwellen-Reflexionen von den Liegendstrecken durch gerissene Linien gekennzeichnet. Im Schnitt sind die migrierten Georadar-Reflektoren der 80 MHz Sohle messung eingetragen, die internen Reflektoren im Staßfurtsteinsalz (Na2) sowie den Grenzen zu Basalanhydrit (A2) und Hauptdolomit (Ca2d) im Liegenden zugeordnet wurden. Im Zentrum des Profils ist im

Ergebnis beider Messverfahren eine Sattelstruktur zu erkennen. An dieser Stelle soll auf das generelle Schichteinfallen nach Norden hingewiesen werden, die Hauptförderstrecke verläuft parallel zum Einfallen. Die mit den Wellenverfahren ermittelten Entfernungen sind die Schichtennormalen auf den Reflektoren. ¹

Der Vergleich mit den Georadar-Reflektoren lässt erkennen, dass sich die verschiedenen Schichtpakete durch eine unterschiedliche Sonar-Reflektivität, d.h. Trennflächendichte auszeichnen. Erhöhte Reflektivitäten sind an der Basis des Staßfurtsteinsalz (Na2) sowie den oberen Schichten des Hauptdolomits (Ca2d) zu erkennen. Daneben ist eine generelle laterale Zunahme der Reflektivität im Bereich der Wendel, südöstlich von Station 0 m erkennbar, die zumindest teilweise auf Auswirkungen der verschiedenen Grubenbaue in dieser Zone zurückgeführt werden kann.

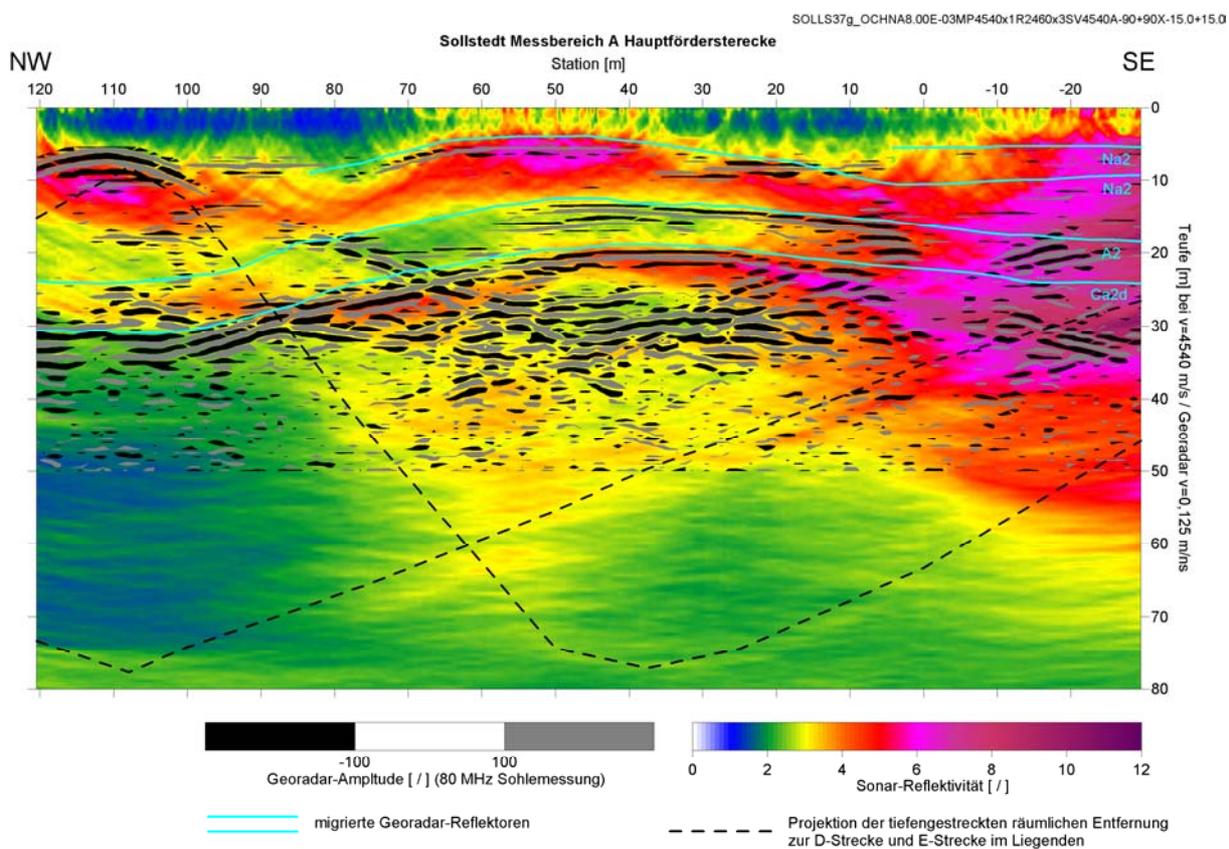


Abb.4-16: Sohle der Hauptförderstrecke im Bergwerk Sollstedt, SAFT-migrierter Tiefenschnitt der Reflektivität.

Bearbeitungsfolge: Faltung mit Sendesignal, Normierung, Hilbert-Envelope, Muten von direkter P-Welle (1 Signalzyklus) und Rayleigh-Welle (3 Signalzyklen), Dämpfung $\alpha=8,0E-03$ m⁻¹, Emergenzwinkel -90° bis $+90^\circ$, $dX= -15$ m bis $+15$ m, $v_{RMS}=4540$ m/s, Eintrag der migrierten Georadar-Reflektoren (80 MHz Sohle messung, ab 5 m).

¹ Bei einem mittleren Einfallen der Schichtgrenze von 70° zur Horizontalen ergibt sich die saigere Teufe Z aus der Schichtennormale mit $Z=N / \cos 70^\circ=N*2,9$.

In Abbildung 4-17 ist die wellenlängengefilterte Reflektivität der Sonar-Messungen gemeinsam mit der durch die Geoelektrik ermittelten Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt. Die Wellenlängenfilterung hebt Zonen starker lokaler Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Salinargesteine stärker hervor.

Im Top der im Zentrum des Profils mit den Wellenverfahren nachgewiesenen Aufsattelung von Basalanhydrit (A2) und Hauptdolomit (Ca2d) ist im geoelektrischen Messbild bei Station 50 m eine stark leitfähige Zone zu erkennen, die nach Nordwesten hin von einem markante Widerstandsmaximum begrenzt wird. An beiden Flanken dieser Durchfeuchtungszone weisen Wechsel im Reflexionsmuster auf eine mechanische Beanspruchung hin, vor allem im Basalanhydrit und Hauptdolomit. Im Staßfurtsteinsalz weisen hohe Reflektivitäten im Hangenden der Störung auf eine lokal stärkere Auflockerung in dieser Zone hin (s. Abb. 4-16).

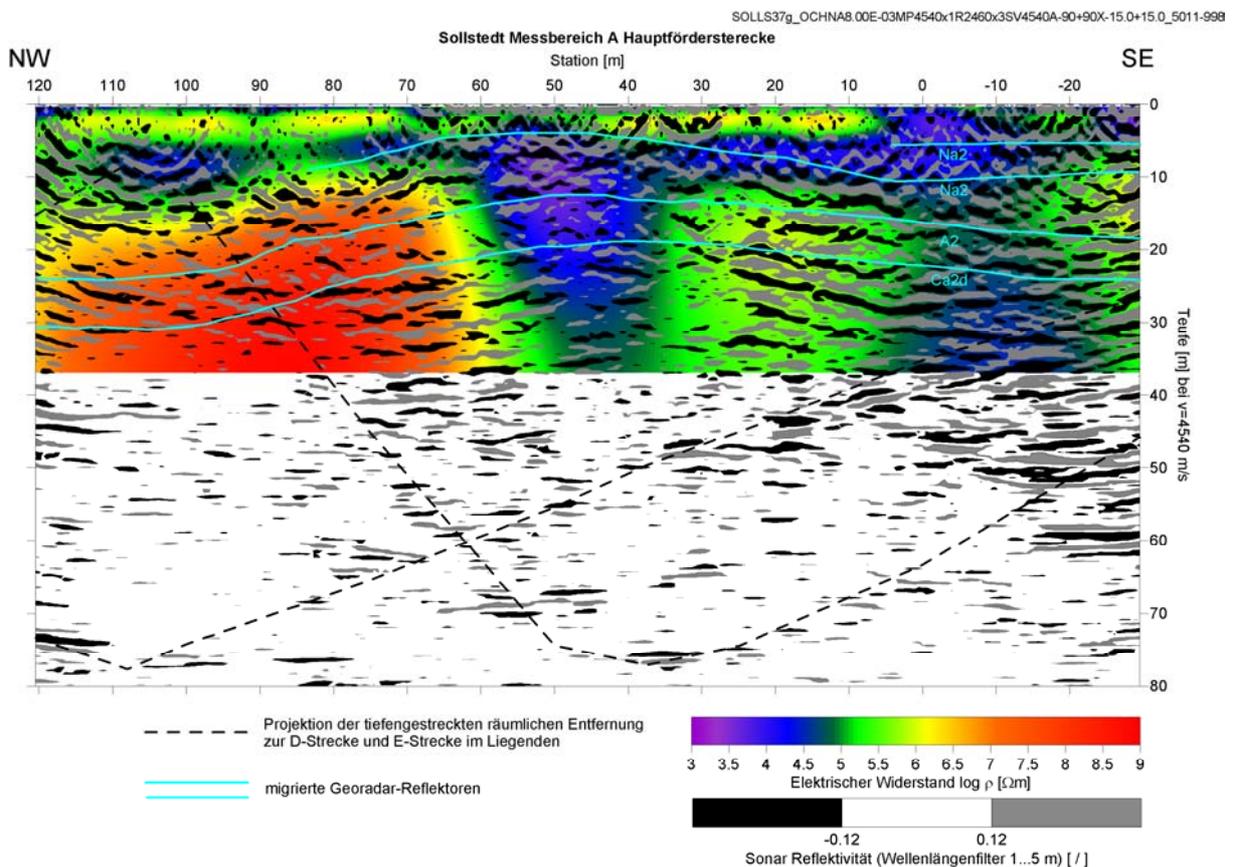


Abb.4-17: Sohle der Hauptförderstrecke im Bergwerk Sollstedt, Tiefenschnitt der wellenlängengefilterten Sonar-Reflektivität, $v_{\text{RMS}}=4540$ m/s, Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes

Standort B - Teutschenthal

Die folgenden Abbildungen 4-18 und 4-20 beinhalten die Ergebnisse der Sonar-Messungen auf der Sohle der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf über den westlichen Bruchfeldrand in Form von Tiefenschnitten der Reflektivität. In die Schnitte sind die migrierten Georadar-Reflektoren der 80 MHz Sohlemessung eingetragen, die geologischen Schichtgrenzen zuzuordnen sind. Die Messtrecke ist im Steinsalz der Leine-Serie (Na3) aufgefahren. Bei den oberen beiden steinsalzinternen Reflektoren Na3 handelt es sich um Anhydritmittelsalze. Der direkt oberhalb der welligen Oberkante des Hauptanhydrits (A3) zu erkennende steinsalzinterne Reflektor Na3 kann als Klippenanhydrit (gering mächtige Anhydritschicht) identifiziert werden. Die anhydritinternen Reflektoren R1 und R2 sind geringmächtige Karbonateinlagerungen zuzuordnen. Bei dem tiefsten Reflektor R3 handelt es sich vermutlich um die Unterkante des Hauptanhydrits oder um die Unterkante des Grauen Salztons (T3).

Die Tiefenschnitte zeigen nur eine geringe Differenzierung der Reflektivität. Wie an allen anderen Referenzmessorten im Bereich der flachen Lagerung musste der Absorptionskoeffizient bei der Normierung der Rohdaten mit $8,0E-03 \text{ m}^{-1}$ relativ hoch angesetzt werden, was auf einen generell hohen Durchtrennungsgrad des Gebirges hindeutet, der zu der beobachteten starken Amplitudendämpfung der Sonarsignale führt.

Die Oberfläche des Hauptanhydrits (A3) ist im Sonarergebnis nicht deutlich zu erkennen. In Abbildung 4-20 wurden zum Vergleich die migrierten Georadar-Amplituden der 200 MHz Sohlemessung über dem Tiefenschnitt der Sonar-Reflektivität dargestellt. Die Wellenlänge dieser hochfrequenten Georadar-Untersuchung ist in den Salzgesteinen mit ca. 0,6 m immer noch etwa doppelt so groß, wie die der Geosonar-Messungen, die bei einer Mittenfrequenz von 15 kHz und einer mittleren Longitudinalwellengeschwindigkeit von 4500 m/s 0,3 m beträgt. Aufgrund der Ausbildung des Hauptanhydrits als Klippenfazies treten bereits oberhalb des mit A3 gekennzeichneten Radar-Reflektors Radar-Reflektorelemente auf. Die dünnen Anhydritschichten zuzuordnen sind. Aufgrund der geringen Wellenlänge der Geosonar-Messungen wirken diese Einschaltungen als Reflektorelemente und Streuer, die von diesen Streuern ausgehenden interferierenden Wellen verschleiern die Abbildung der Oberkante des Hauptanhydrits im Sonar-Messbild.

Die Tiefenschnitte der Sonar-Reflektivität liefern jedoch Hinweise auf die, die geologischen Lagerungsgrenzen durchschlagenden, Effekte durch das Bruchgeschehen im Liegenden. So zeigen sich über der Bruchfeldkante deutliche Reflektivitätsmaxima, die auf eine Kluftbildung im Anhydrit infolge des Bruchgeschehens hinweisen. Die Sonar-Ergebnisse bestätigen die lateral veränderte Ausbildung anhydritinterner Radar-Reflektoren. Insbesondere im Tiefenschnitt der wellenlängengefilterten Reflektivität (Abb. 4-19) ist an der Bruchfeldkante, im Zentrum des Messprofils, unterhalb des anhydritinternen Reflektors R2 eine Vielzahl von Reflexionselementen zu erkennen, die ein direkter Hinweis auf Zerrungsklüfte, die als geomechanische Auswirkungen des Gebirgsschlages im Deckgebirge auftreten.

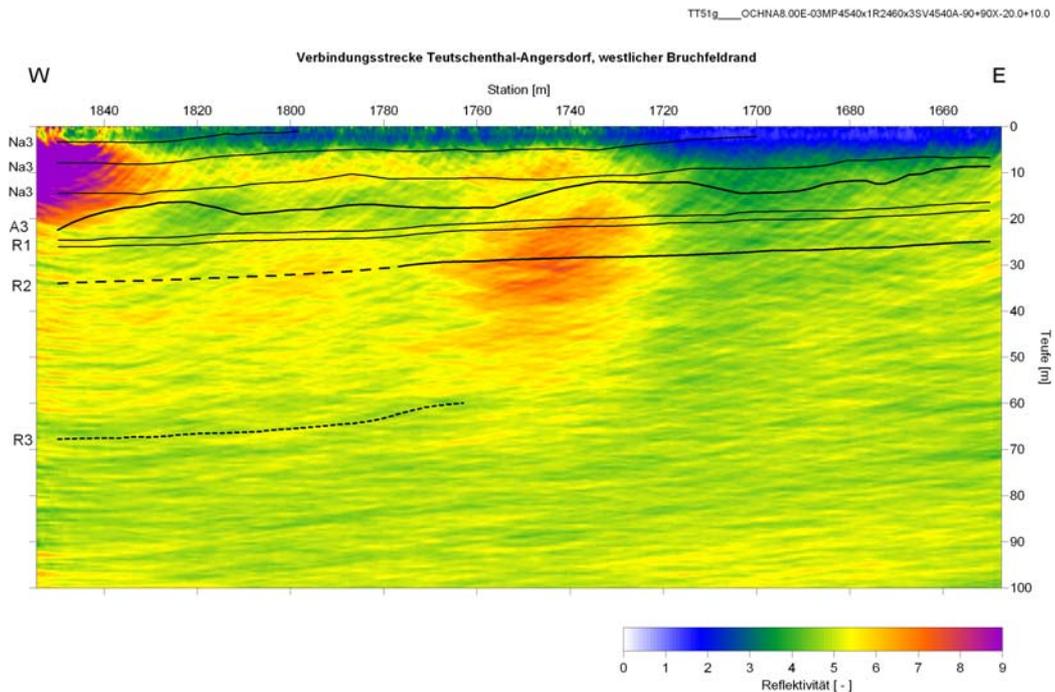


Abb.4-18: Sohle der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf, westlicher Bruchfeldrand, SAFT-migrierter Tiefenschnitt der Reflektivität (Faltung mit Sendesignal, Normierung, Hilbert-Envelope, Muten von direkter P-Welle (1 Signalzyklus) und Rayleigh-Welle (3 Signalzyklen), Dämpfung $\alpha=8,0E-03$ m⁻¹, Emergenzwinkel -90° bis $+90^\circ$, $dX= -20$ m bis $+10$ m, VRMS=4540 m/s, Eintrag der migrierten Georadar-Reflektoren (80 MHz Sohlemessung).

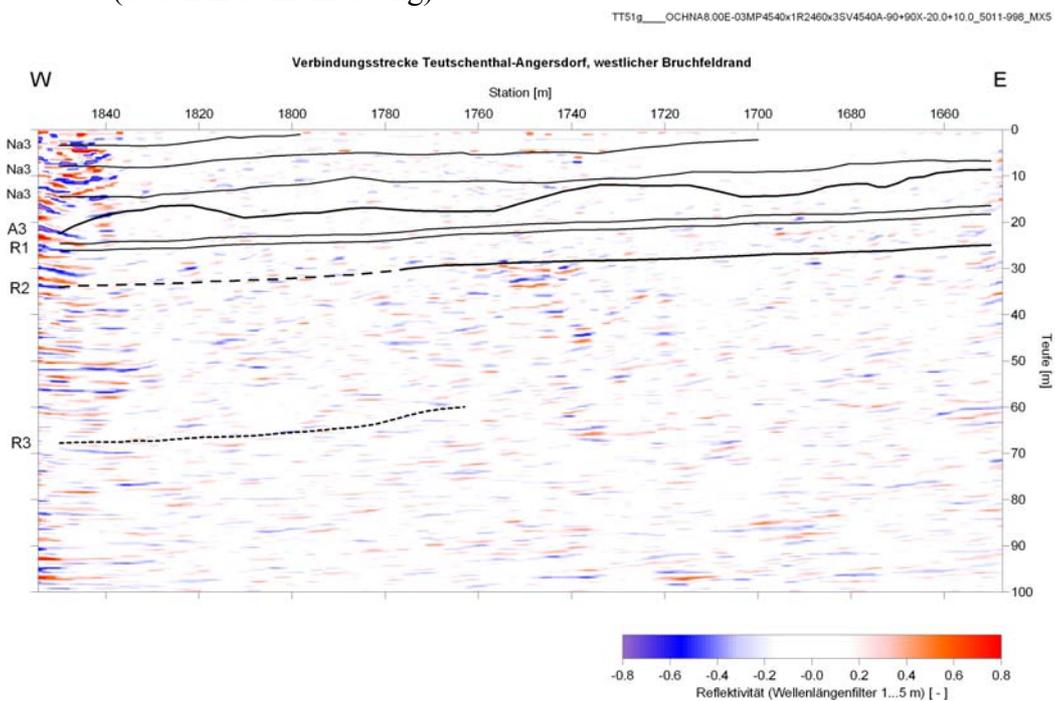


Abb.4-19: Sohle der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf, westlicher Bruchfeldrand, Tiefenschnitt der wellenlängengefilterten Reflektivität, vRMS=4540 m/s, Eintrag der migrierten Georadar-Reflektoren (80 MHz Sohlemessung).

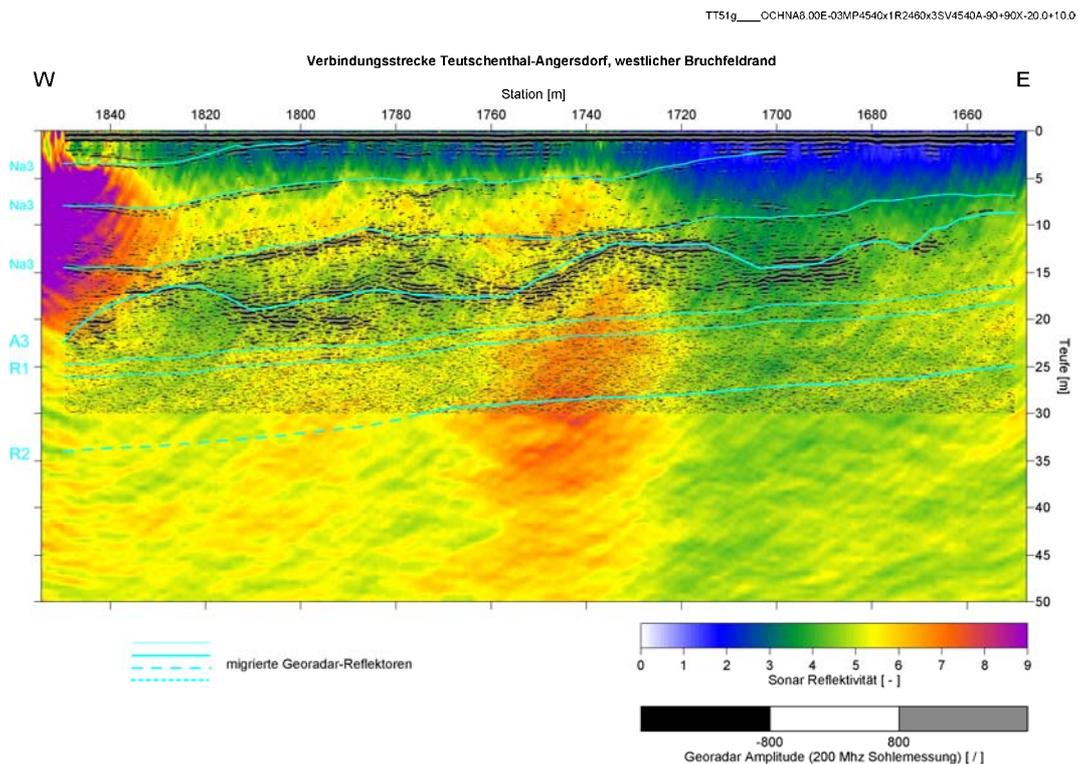


Abb.4-20: Sohle der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf, westlicher Bruchfeldrand, Tiefenschnitt der Reflektivität, $v_{RMS}=4540$ m/s, Eintrag der migrierten Georadar-Reflektoren (80 MHz Sohlemessung) sowie der Georadar-Amplituden (200 MHz Sohlemessung).

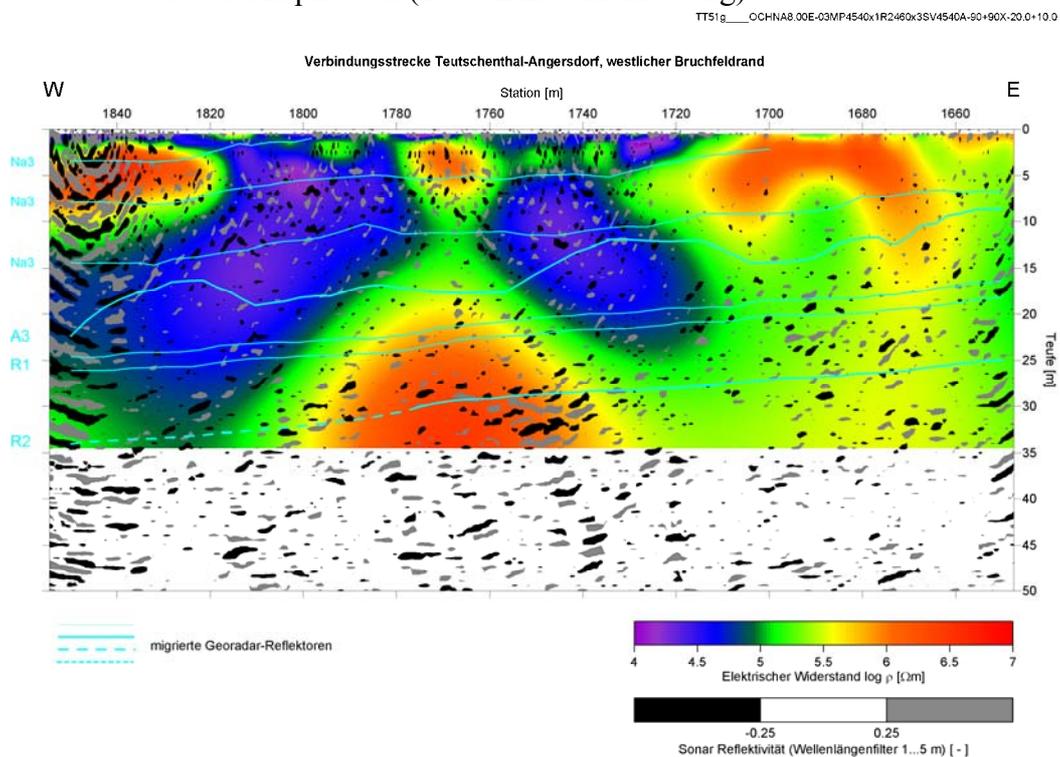


Abb.4-21: Sohle der Verbindungsstrecke Teutschenthal-Angersdorf, westlicher Bruchfeldrand, Tiefenschnitt der wellenlängengefilterten Reflektivität, $v_{RMS}=4540$ m/s, Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes.

Der in Abbildung 4-21 dargestellte Vergleich mit dem Messergebnis der Widerstandsgeoelektrik zeigt, dass sich die Bruchfeldkante im Zentrum des Profils, die sich im Geosonar-Messbild durch eine Vielzahl von Reflexionselementen unterhalb des anhydritinternen Reflektors R2 abzeichnet, einem deutlichen Widerstandsmaximum zuzuordnen ist. Dies ist ein weiterer Hinweis auf luftgefüllte Zerrungsklüfte Auswirkung des Gebirgsschlages im Hangenden des Bruchgeschehens.

Standort C - Sigmundshall (Ergänzungsmessungen)

Die ergänzenden Messungen am Messort Sigmundshall wurden unter Einbeziehung der im Ausgangsvorhaben gewonnenen Daten prozessiert. Mit der optimierten Messtechnik und neuen Auswerterroutinen konnten an diesem Referenzmessort bis zu einer Entfernung von ca. 100 m vom Stoß hochauflösende Informationen über geomechanische Parameter erhalten werden. Im Vergleich zu den Referenzmessorten im Bereich der flachen Lagerung konnte der Absorptionskoeffizient bei der Normierung der Rohdaten mit $3,0E-03$ m⁻¹ relativ niedrig angesetzt werden, was die hohe Eindringtiefe der Sonar-Messungen erklärt.

Der Gesamtdatensatz wurde der Bearbeitungsvariante FNH (Faltung mit dem Sendesignal, Normalisierung, Hilbert-Envelope) der zweiten Sonar-Messkampagne des Vorgängerprojekts 02 C 0851[13] unterzogen.

Die in der folgenden Abbildung 4-22 dargestellte Belegungsdichtematrix der Signalamplituden pro Flächenelement des SAFT-migrierten Tiefenschnittes der Reflektivität belegt die messkampagnen-übergreifend hohe Messwertdichte für die gewählte Migrationsvariante, bei der die Maximaldistanz dX vom Midpoint auf -5 m bis +25 m beschränkt wurde. In Bereichen geringer Belegungsdichte ist mit einem stärkeren Auftreten von Artefakten in den migrierten Tiefenschnitten zu rechnen.

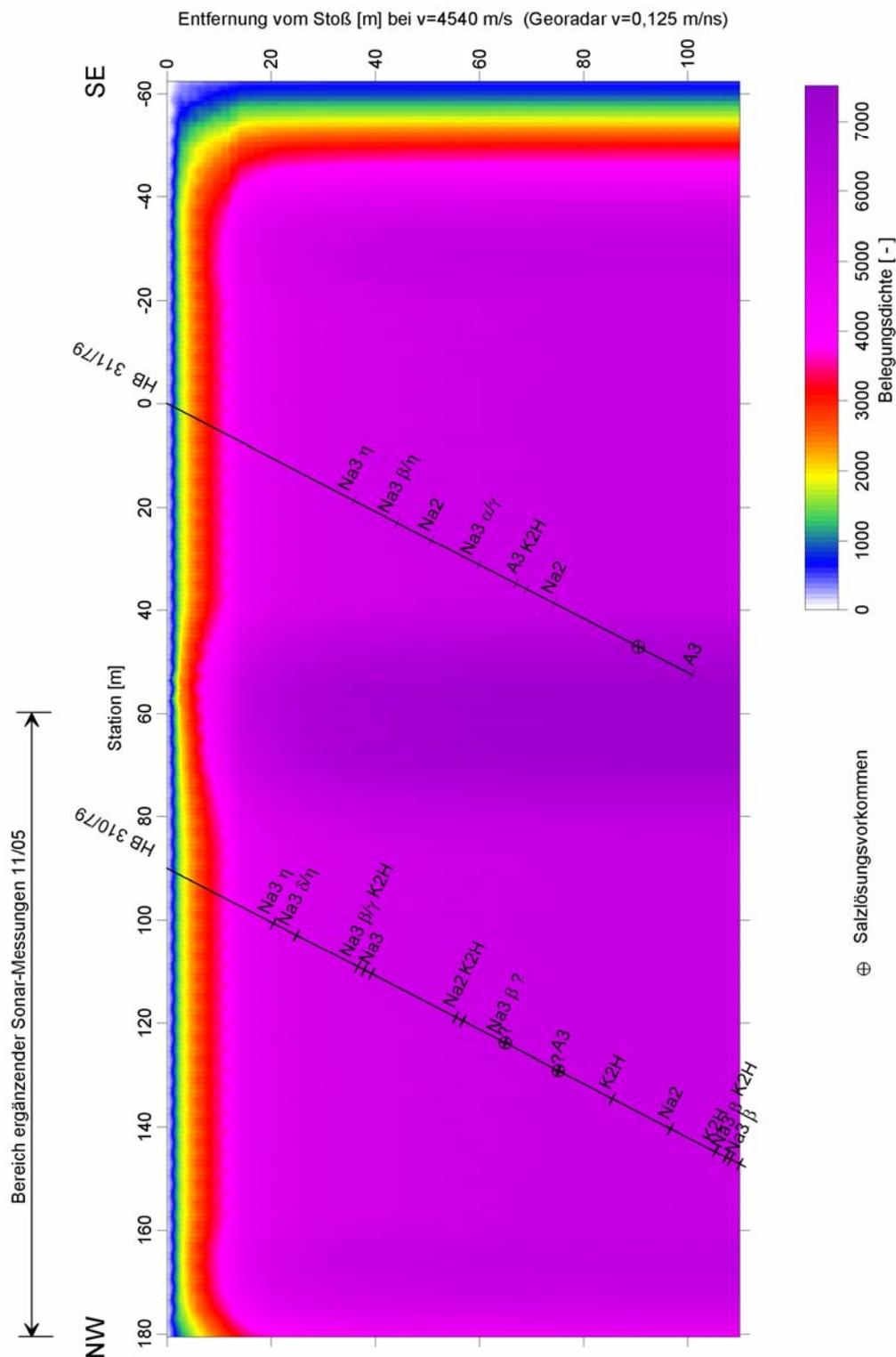


Abb. 4-22: Gesamtergebnisse der Sonar-Messungen am Südwest-Stoß der Weser Wetter strecke auf der 480 m-Sohle der Grube Sigmundshall, SAFT-migrierter Tiefenschnitt der Reflektivität, Emergenzwinkel -90° bis $+90^\circ$ zur Vertikalen, Maximaldistanz dX vom Midpoint -5 m bis $+25$ m, Belegungsdichtematrix der Signalamplituden pro Flächenelement von $0,5 \times 0,5\text{m}^2$.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Gesamtergebnisse der Sonar-Messungen am Südwest-Stoß der Weser Wetterstrecke auf der 480 m-Sohle der Grube Sigmundshall in Form eines Tiefenschnittes der Reflektivität (Abb. 4-23) und eines Tiefenschnittes des Reflektivitätsgradienten (Abb. 4-24).

In beide Darstellungen wurden Daten der Georadar-Untersuchungen sowie vereinfachte Schichtverzeichnis der Untertage-Horizontalbohrungen aufgenommen. Der Tiefenschnitt der Reflektivität zeigt stoßnah ein stark gegliedertes Bild von Bereichen hoher Reflektivität und reflexionsarme Zonen. Innerhalb der Abschnitte hoher Reflektivität kann auf eine Häufung akustischer Grenzflächen (petrographische Wechsel, Anhydritbänder, Kluftbereiche) geschlossen werden. In den Tiefenschnitten sind keine ebenen Strukturen zu erkennen. Aus dem Verlauf der Georadar-Reflektoren geht hervor, dass sich die Mehrzahl der Georadar-Reflektoren an den Grenzen von Homogenbereichen der akustischen Reflektivität befinden.

Es gibt im Georadar-Messbild sowohl Indikationen von sprunghaften Veränderungen des Dielektrizitätswertes in Grenzbereichen, in denen die akustische Reflektivität abnimmt als auch in Zonen in denen sie zunimmt. Die Änderungen der akustischen Impedanz scheinen weniger sprunghaft als die der Dielektrizitätszahl der Salzgesteine. Dies ist auf den Einfluss von Kluftkörpern zurückführbar, die nicht den petrographischen Grenzen folgen. So ist das Hartsalzband, welches im Radargramm als Leithorizont in 20 m (NW)...55 m (SE) Entfernung vom Stoß zu erkennen ist, kein ebener Reflektor für die Schallwellen. Mit der Bildung des Reflektivitätsgradienten wurden Parameter abgeleitet, die Zonen starker lokaler Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Salinargesteine abbilden.

Die starke Verfaltung der Salinargesteine stellt hohe Ansprüche an das geophysikalische Auswertearmamentarium, nur in der gemeinsamen Betrachtung der Ergebnisse der geophysikalischen Einzelverfahren kann ein schlüssiges Strukturbild erarbeitet werden. Die detailreichen Ergebnisse der ergänzenden Sonarmessungen ermöglichen im gesamten gemeinsamen Profilbereich der Einzelverfahren eine methodenübergreifende geostatistische Auswertung mit dem Ziel der Erfassung geomechanischer Problemzonen.

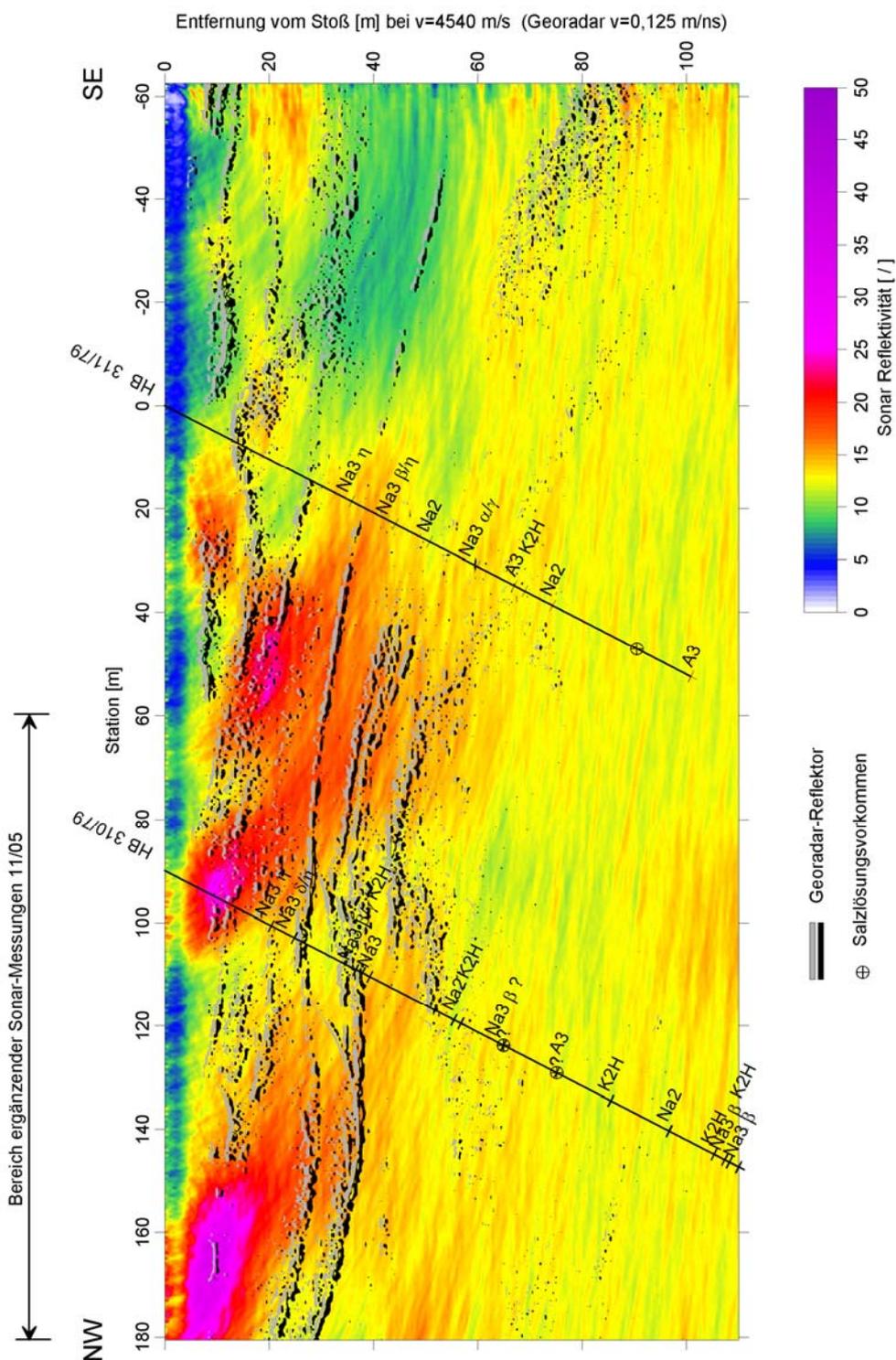


Abb. 4-23: Gesamtergebnisse der Sonar-Messungen am Südwest-Stoß der Weser Wetterstrecke auf der 480 m-Sohle der Grube Sigmundshall, SAFT-migrierter Tiefenschnitt der Reflektivität, Dämpfung $\alpha=3,0E-03$ m⁻¹, Emergenzwinkel -90° bis +90° zur Vertikalen, Maximaldistanz dX vom Midpoint -5 m bis +25 m, vRMS=4540 m/s, Eintrag der migrierten Georadar-Reflektorelemente (100 MHz).

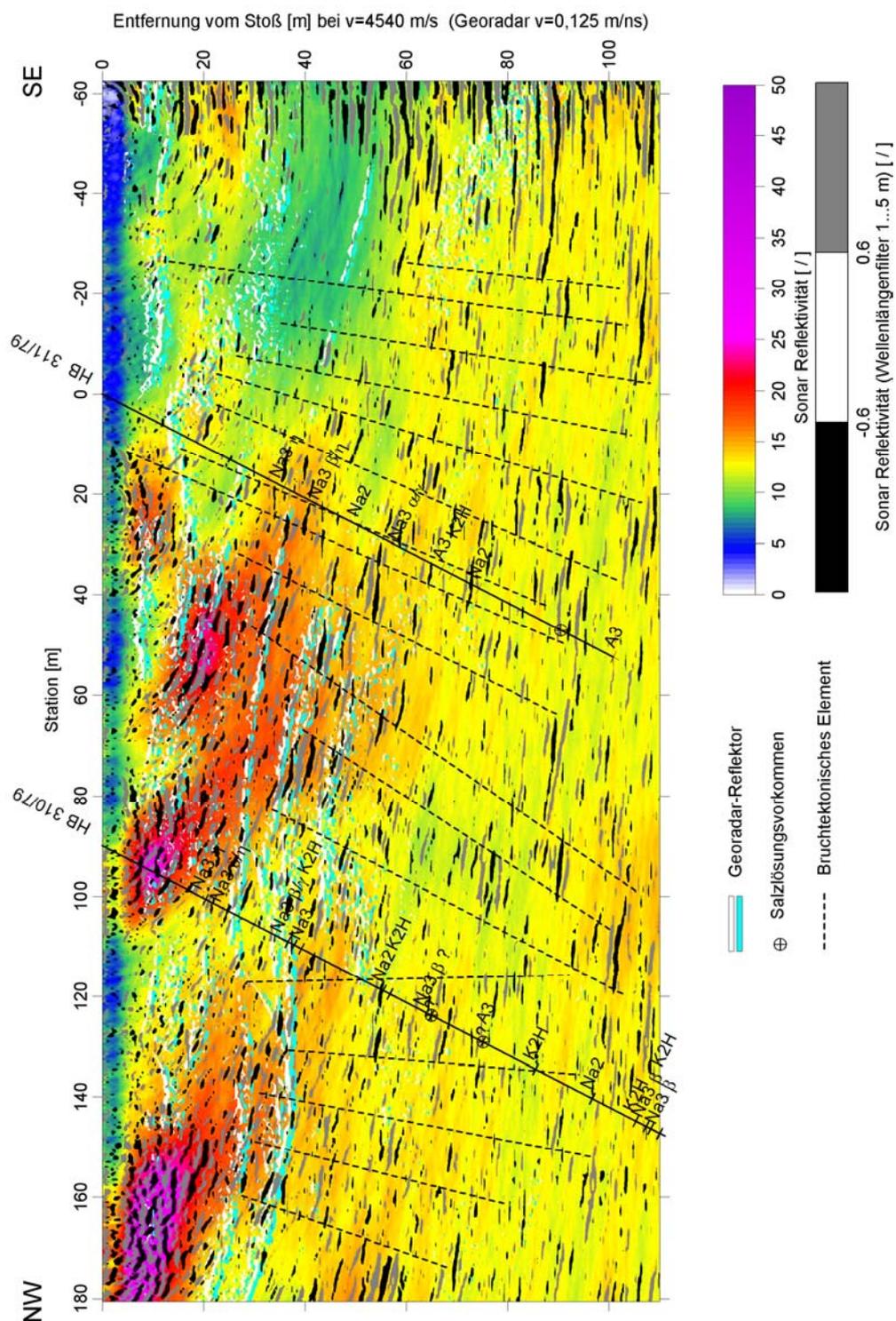


Abb. 4-24 Gesamtergebnisse der Sonar-Messungen am Südwest-Stoß der Weser Wetterstrecke auf der 480 m-Sohle der Grube Sigmundshall, Tiefenschnitt der Reflektivität und des Reflektivitätsgradienten, (Normierung, Hilbert-Envelope, SAFT-Migration, Vertikalgradient), Eintrag der migrierten Georadar-Reflektoren (100 MHz)

Standort D – Bischofferode (Neubearbeitung der Sonardaten)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte das SAFT-Inversionsverfahren für die in-situ gewonnenen Messwerte stetig weiterentwickelt werden. Im Anschluss an das Processing der an den Referenzstandorten Sigmundshall, Sollstedt und Teutschenthal gewonnenen Daten erfolgte deshalb eine Neubearbeitung der im Ausgangsvorhaben 1999/2000 in Bischofferode gewonnenen Sonardaten (KÜHNICKE, H., REUTTER, O., SCHUBERT, F. (2002): Komplexes Mess- und Auswerteinstrumentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und Untertagedeponien (UTD) im Salinar. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02 C 0558, Einbeziehung Sonarverfahren, Leipzig März 2002 [9]).

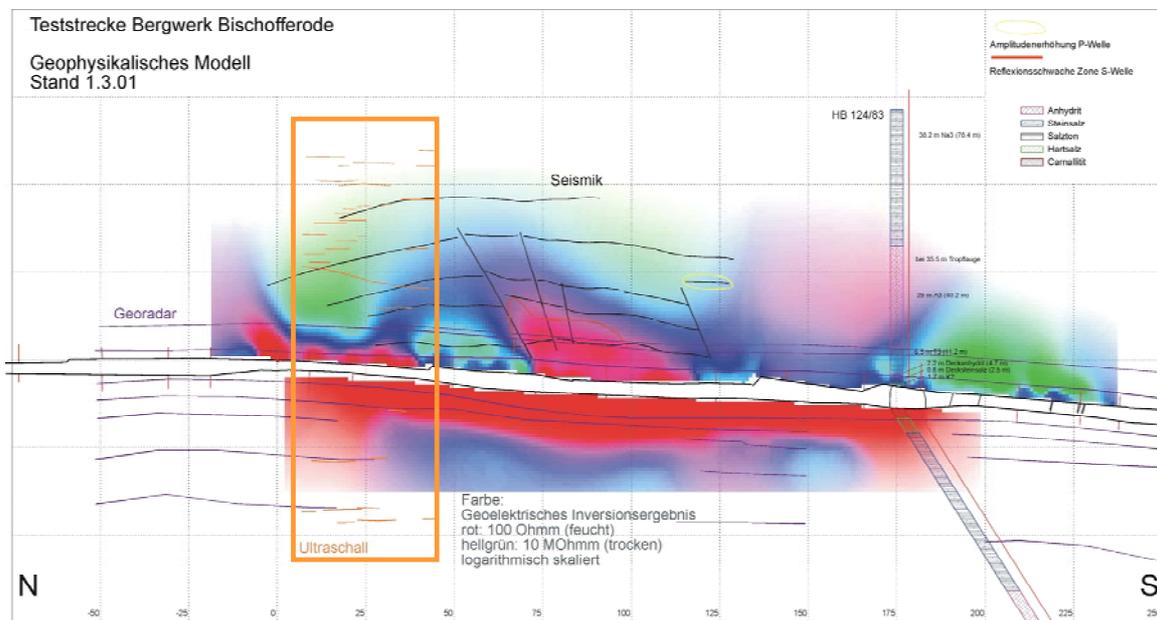


Abb.4-25: Geophysikalisches Modell im Ergebnis der im Forschungsvorhaben 02 C 0568 in der Kaligrube Bischofferode der GVV durchgeführten Messungen.
gelb: Lage des Messbereichs der Sonarmessungen, die in zwei Messkampagnen im November 1999 und Januar 2000 erfolgten.

Abbildung 4-25 enthält das in diesem Bericht vorgestellte geophysikalische Modell mit der Lage des Messbereichs der Sonar-Untersuchungen.

Im Ergebnis der Neubearbeitung der Sonardaten mit dem weiterentwickelten Auswerte- und Rekonstruktionsalgorithmus lässt sich der deutliche Einfluss der Grubenbaue auf die Messergebnisse erkennen. Die folgenden Abbildungen 4-26 bis 4-28 zeigen die Ergebnisse der Sonar-Messungen in Richtung Firste und Sohle der Hauptförderstrecke des Bergwerks Sollstedt in Form von Vertikalschnitten der Reflektivität. Die Daten in Abbildung 4-26 wurden mit einer scherwellentypischen Effektivgeschwindigkeit v_{RMS} von 2460 m/s migriert. Die in Richtung Firste und Sohle eingetragenen Projektionen der Entfernung zur Querstrecke belegen, dass sich diese Strecke bei Station 0 m durch deutliche Scherwellenanteile im Reflexionsbild abbildet.

ave38___OCHNA8.00E-03MP4540x1R2460x5SV2460A-90+90X-1.5+1.5

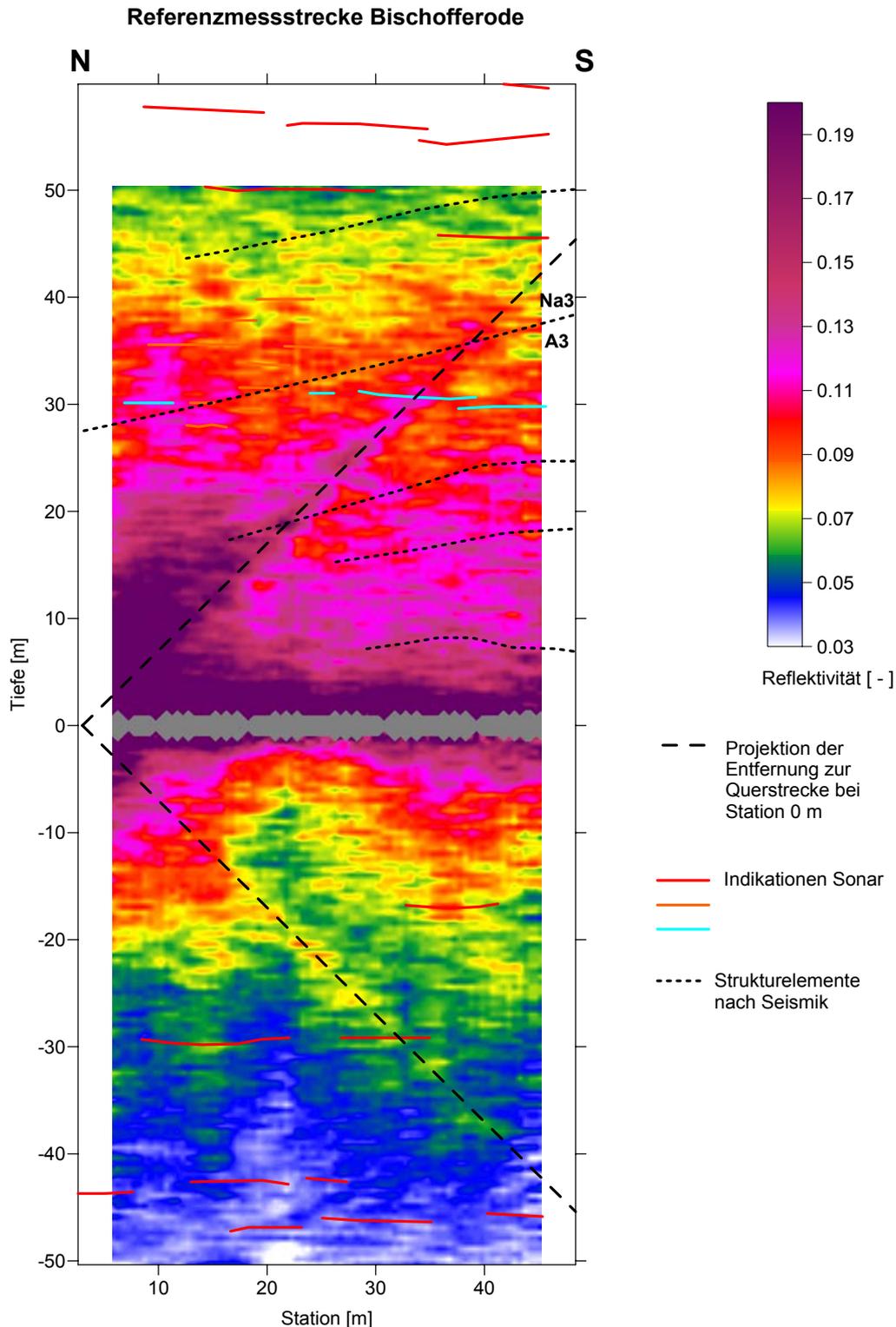


Abb.4-26: Referenzmessstrecke im Nordbereich der 1. westlichen Teilstrecke in der Kaligrube Bischofferode, Sonar-Messungen in Richtung Firste und Sohle, SAFT-migrierter Vertikalschnitt der Reflektivität (Faltung mit Sendesignal, Normierung, Hilbert-Envelope, Muten von direkter P-Welle (1 Signalzyklus) und S-/Rayleigh-Welle (5 Signalzyklen), Dämpfung $\alpha=8,0E-03$ m⁻¹, Emergenzwinkel -90° bis $+90^\circ$, Maximaldistanz vom Midpoint $dX= -1,5$ m bis $+1,5$ m, $v_{RMS}=2460$ m/s, Eintrag der Projektionen der Entfernung zur Querstrecke bei Station 0 m.

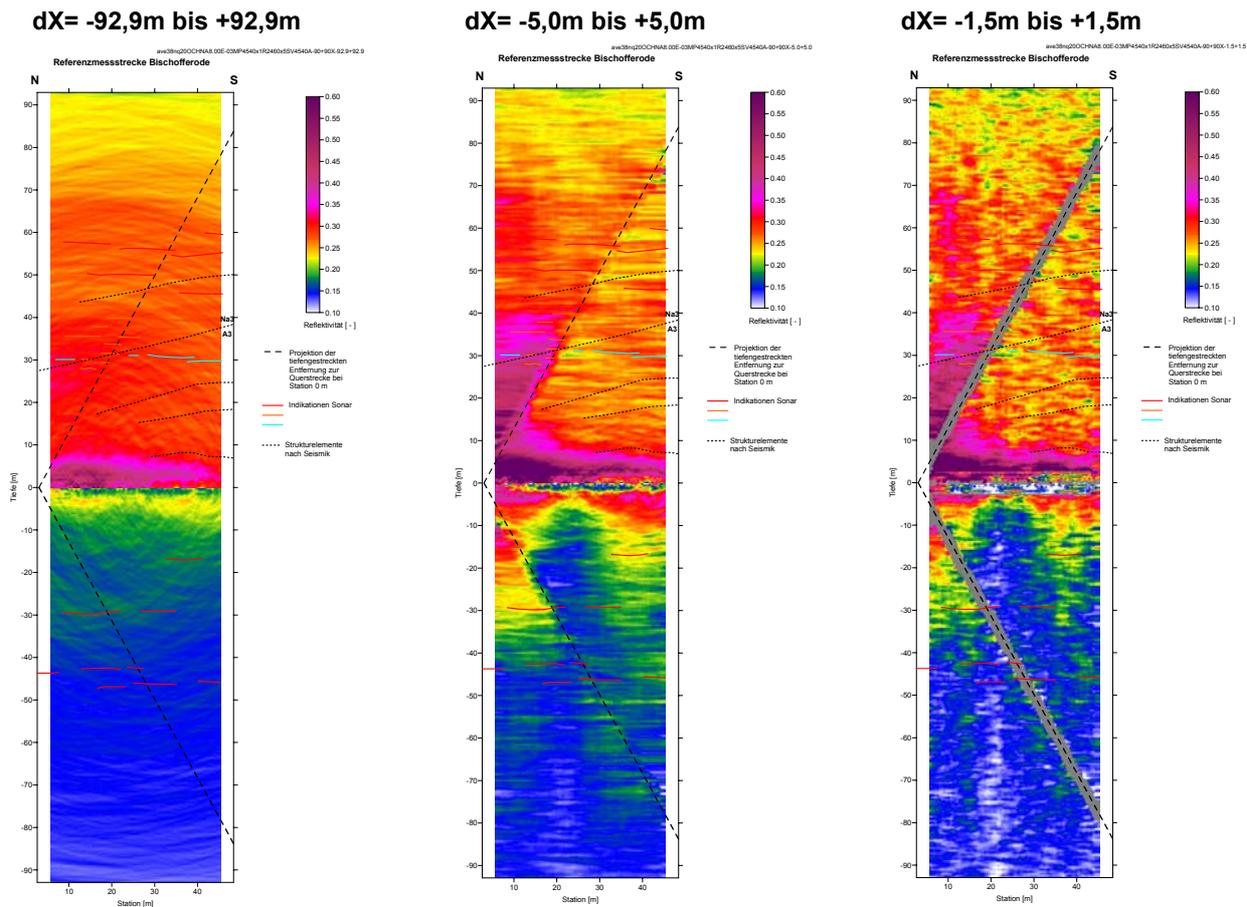


Abb. 4-27: Referenzmessstrecke im Nordbereich der 1. westlichen Teilstrecke in der Kaligrube Bischofferode, Sonar-Messungen in Richtung Firste und Sohle, SAFT-migrierter Vertikalschnitt der Reflektivität, Faltung mit Sendesignal, Normierung, Hilbert-Envelope, Muten von direkter P-Welle (1 Signalzyklus) und S-/Rayleigh-Welle (5 Signalzyklen), Muten der an der Querstrecke bei Station 0 m reflektierten S-/Rayleigh-Welle (20 Signalzyklen), Dämpfung $\alpha=8,0E-03 \text{ m}^{-1}$, Emergenzwinkel -90° bis $+90^\circ$, $v_{\text{RMS}}=4540 \text{ m/s}$, Migrationen mit unterschiedlicher Maximaldistanz dX vom Midpoint.

Im Bearbeitungsablauf der in Abbildung 4-27 dargestellten, mit einer effektiven P-Wellengeschwindigkeit v_{RMS} von 4540 m/s migrierten Vertikalschnitte wurden die von der Querstrecke ausgehenden Scherwellen gemutet. Trotz des Ausblendens der ersten 20 Signalzyklen der reflektierten Scherwellen bleiben die Einflüsse des Grubenbaus in Form eines Niveausprungs der Reflexionsamplituden in den Schnitten sichtbar, mit der Ausnahme, des Tiefenschnitts bei dem alle Daten in die Migration einbezogen wurden ($dX=-92,9$ bis $+92,9 \text{ m}$). In diesem Tiefenschnitt sind jedoch auch viele Strukturinformationen durch die Migration „verschmiert“. Dieses unbefriedigende Ergebnis beim Einbeziehen aller Daten in den Migrationsprozess verdeutlicht noch einmal die Wichtigkeit der eingeführten Steuerparameter Emergenzwinkel und Maximaldistanz vom Midpoint in den SAFT-Algorithmus. Dies wird durch den geringen Überdeckungsgrad der Sonaruntersuchungen notwendig, der in der Regel aufgrund des hohen Aufwandes bei der Messvorbereitung vorliegt. Das betrifft vor allem die Schaffung von Bohrungen oder Ankopplungsflächen für die Sensorik.

Da beim Re-Processing der Daten mit „wahren“ Signalamplituden gearbeitet wurde, bilden sich die Unterschiede in den petrophysikalischen Parametern deutlich im Sonarbild ab. Den Anhydrit im Firstbereich zeichnet eine hohe Reflektivität aus. Für das Kalisalz in der Sohle ist eine niedrige Rückstreuung charakteristisch. Das Ergebnis der Neubearbeitung der Sonar-Daten stimmt gut mit dem der geoelektrischen Untersuchungen auf dem Profilabschnitt überein, das in Abbildung 4-28 dargestellt ist. Streckennah weisen niedrige Widerstände auf eine erhöhte Durchfeuchtung hin, die im Sonarbild mit einer hohen Reflexivität korrespondieren, die auf eine große Trennflächendichte schließen lässt.

Eine Diskrepanz besteht zu den ermittelten geneigten Seismik-Reflektoren in diesem Profilabschnitt. Diese widersprechen sowohl den Ergebnissen der Sonarmessungen als auch denen der geologischen Aufnahme, die für horizontal geschichtete Strukturen sprechen. Es ist zu vermuten, dass der Einfluss von Scherwellen-Reflexionen an der Querstrecke bei Station 0 m auch in den Seismikdaten vorhanden ist.

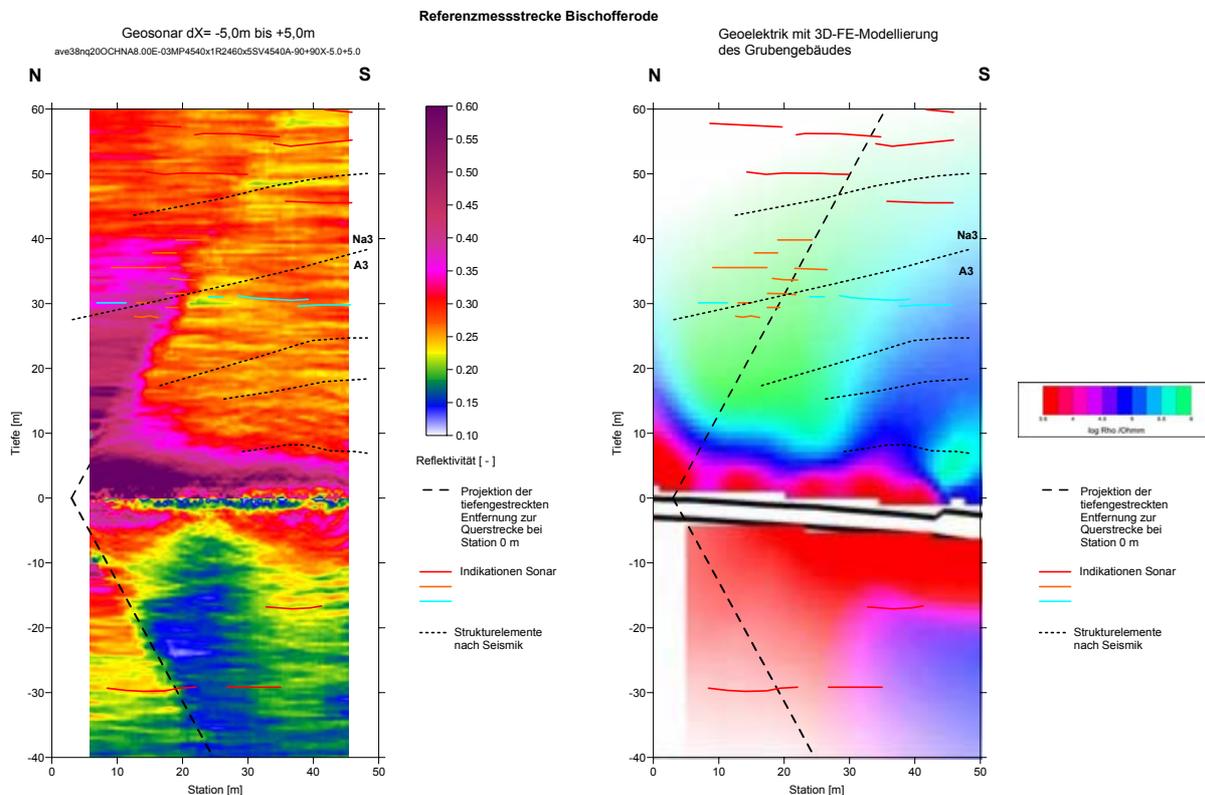


Abb.4-28: *links:* SAFT-migrierter Tiefenschnitt der Reflektivität (Bearbeitungsablauf analog Abb. 4-27, Maximaldistanz dX vom Midpoint 5 m)
rechts: geoelektrisches Inversionsergebnis

4.7 Zusammenfassung Geosonar

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Auswerte- und Inversionsverfahren für die in-situ gewonnenen Messwerte stetig weiterentwickelt. Im Anschluss an das Processing der an den Referenzstandorten Sigmundshall, Sollstedt und Teutschenthal gewonnenen Daten mit dem verbesserten Auswerte- und Rekonstruktionsalgorithmus erfolgte deshalb eine Neubearbeitung der im Ausgangsvorhaben 1999/2000 in Bischofferode gewonnenen Sonardaten.

Bei der Verarbeitung der Daten wurde versucht, mit „wahren“ Signalamplituden zu arbeiten. Es wurde sowohl der Einfluss von sphärischer Divergenz und Streuung berücksichtigt als auch der Einfluss von Kopleffekten und stoßnahen Inhomogenitäten durch die Amplitudennormierung auf das akustische Rauschen ausgeglichen. Dadurch bilden sich Unterschiede in den petrophysikalischen Parametern einzelner Schichtpakete deutlich im Reflektivitätsniveau ab.

In das SAFT-Rekonstruktionsverfahren wurden Steuerparameter eingeführt, mit denen sich sowohl der Winkelbereich, in dem reflektierte Signale in den Migrationsprozess einbezogen werden, als auch die Maximalabstände zum Mittelpunkt zwischen Sender und Empfänger beeinflussen lassen. Durch gelang es unter den spezifischen Randbedingungen starker lateraler Strukturänderungen Störwellen besser zu unterdrücken. Gleichzeitig wird auch in geringer Entfernung zum Beobachtungssystem ein ausreichender Überdeckungsgrad gewährleistet, ein Fakt der aufgrund des hohen Aufwandes bei den messvorbereitenden Arbeiten der Sonaruntersuchungen besonders wichtig ist.

In allen Fällen konnten so im Teufenbereich bis ca. 60 m hochauflösende Informationen über geomechanische Parameter erhalten werden. Am Standort Teutschenthal konnten geomechanische Auswirkungen des Gebirgsschlages im Deckgebirge sichtbar gemacht werden.

Durch die Modularität des geschaffenen Auswertesystems, war die Übergabe unterschiedlich prozessierter Sonardaten als Trainingsdaten für die bei der Komplexinterpretation eingesetzte Mustererkennung möglich.

4.8 Literatur

- [1] SCHÖN, J. (1983): Petrophysik, Akademie-Verlag, Berlin.
- [2] KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H. (1986): Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo
- [3] BUTTKUS, B. (1991): Spektralanalyse und Filtertheorie in der angewandten Geophysik, Springer-Verlag.
- [4] BURR E., GROSSE C. U., REINHARDT H.-W. (1997): Application of a modified SAFT-Algorithm on synthetic B- Scans of coarse grained Materials, Otto- Graf- Journal Vol. 8, 1997 30.
- [5] KÜHNICKE H. (1997): Geophysikalische Erkundung von Auflockerungs- und Kluftzonen - eine zerstörungsfreie Prüfung in anderen Dimensionen, DGZfP Jahrestagung, Dresden.
- [6] KÜHNICKE H., REUTTER O., SCHUBERT F. (1999): Sonarverfahren zur geophysikalischen Erkundung von Problemzonen im Salinar, 4. Statusgespräche zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen, 14.-15. September 1999, Clausthal-Zellerfeld.
- [7] KÜHNICKE H., REUTTER O., SCHUBERT F. (2000): Zerstörungsfreie Messmethoden zur Charakterisierung und Überwachung von Auflockerungszonen, 51. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 14.-16. Juni 2000, Freiberg.
- [8] ZIMMER U. (2001): Quantitative Untersuchung zur Mikrorissigkeit aus akustischen Gesteinseigenschaften am Beispiel von Steinsalz und Anhydrit, Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät VI – Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften.
- [9] KULENKAMPPF, J., ASCHMANN, L., JUST, A., BERGMANN, K., MOISE, E., JACOBS, F., SCHUCK, A., LINDNER, U., SCHWANDT, A., KURZ, G., FLUCHE, B., SCHULZ, R., KÜHNICKE, H., REUTTER, O., SCHUBERT, F. (2002): Komplexes Mess- und Auswerteeinstrumentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und Untertagedeponien (UTD) im Salinar. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02 C 0558, 02 C 0568, 02 C 0578, Leipzig.
- [10] KÜHNICKE H., SCHULZE E. (2002): BMBF-PTWT+E -Abschlussbericht Vorhaben 02 C 0537, Entwicklung und In-situ-Test akustischer Verfahren zur zerstörungsfreien Beurteilung von Auflockerungszonen im Salinar.
- [11] JACOBS, F. ET AL. (2003): Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien, Poster zur 63. Jahrestagung der DGZfP, 24.-28. Februar 2003, Jena.
- [12] JUST A. ET AL. (2003): Geophysical Investigation for the Evaluation of the long-time Safety of Repositories and Underground Disposals in deep geological Formations, Poster zur EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 06. - 11. April 2003, Nizza, Frankreich.
- [13] JUST, A., KRAUSE, Y., TUCH, A., KNIEß, R., JACOBS, F., SCHUCK, A., SCHMIDT, V., ROST, F., LINDNER, U., SCHICHT, TH., SCHWANDT, A., KURZ, G., IGEL, J., SCHULZ, R., SCHULZE, E., KÜHNICKE, H. (2004): Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung

der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02 C 0851, 02 C 0861, 02 C 0871, Leipzig.

[14] KÜHNICKE H., SCHUBERT F., SCHULZE E. (2004): In-situ investigation of excavation disturbed zones close to drives in salt mines, Poster zur 26th European Conference on Acoustic Emission Testing, DGZfP, 15.-17. September 2004, Berlin.

[15] KÜHNICKE H., SCHULZE E., VOIGT D. (2006): Schallemission - Gerätesysteme und Anwendungen, 32. MPA-Seminar, Werkstoff- & Bauteilverhalten in der Energie- & Anlagentechnik, 5. - 6. Oktober 2006, Stuttgart.

[16] KÜHNICKE H., SCHULZE E., VOIGT D. (2007): Entwicklung eines Messsystems zur hochauflösenden zerstörungsfreien Erkundung von Gesteinsnahbereichen mittels Sonar, 4. Fachgespräch "Geophysik und Barriersysteme", 8. März 2007, Leipzig.

[17] SCHULZE E., KÜHNICKE H., VOIGT D. (2007): Niederfrequenter Ultraschall zur Erkundung von Problemzonen im Salinar, 4. Fachgespräch "Geophysik und Barriersysteme", 8. März 2007, Leipzig.

[18] KÜHNICKE H., SCHULZE E., VOIGT D. (2007): Verbesserte Lokalisation mittels Signalformanalyse, 16. Kolloquium Schallemission der DGZfP, 12. - 13. September 2007, Puchberg.

[19] KÜHNICKE H., SCHULZE E., VOIGT D. (2008): Bohrlochfreie Messung der Permeabilität in Untertagedeponien, 68. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 3.-6. März 2008, Freiberg.

[20] KÜHNICKE H., SCHULZE E. (2008): Entwicklung eines Messsystems zur hochauflösenden zerstörungsfreien Erkundung von Gesteinsnahbereichen mittels Sonar, 5. Fachgespräch "Geophysik und Barriersysteme", 2. Oktober 2008, Leipzig.

[21] SCHULZE E., KÜHNICKE H. (2008): Niederfrequenter Ultraschall zur Erkundung von Problemzonen im Salinar, 5. Fachgespräch "Geophysik und Barriersysteme", 2. Oktober 2008, Leipzig.

5 Komplexe Auswertung und Interpretation

C. Schütze (Universität Leipzig), B. Ehret, R. Ziekur (LIAG Hannover)

5.1. Geophysikalische Modelle

5.1.1. Datenbestand zu Messanordnungen und Profilanlagen an den Referenzstandorten

Ziel des Projektes war es, mit Hilfe der Kombination leistungsstarker geophysikalischer Verfahren (Geoelektrik, Seismik, Radar, Sonar, Elektromagnetik und Laboruntersuchungen) den Informationsgehalt der einzelnen Messdaten besser auszunutzen und dadurch auch in ungünstigen geologischen Situationen die Aussagesicherheit gegenüber den Einzelverfahren wesentlich zu verbessern.

Die Erfahrungen und methodischen Entwicklungen aus den Vorgängerprojekten galt es auf weitere Referenzstandorte mit anderen geologischen Verhältnissen zu übertragen. Ausgewählt wurden die Referenzstandorte Sollstedt im Südharzrevier und Teutschenthal westlich von Halle. Im Gegensatz zu der Lagerung der geologisch relevanten Schichten im Hangenden am Standort Bischofferode, der Salzsattelstruktur mit engen Verfaltungen und Zerscherungen steil gelagerter Schichten am Standort Sigmundshall bestand die Herausforderung an den neuen Standorten in komplizierten geologischen Verhältnissen aufgrund der horizontalen Lagerung mit Problemzonen im Liegenden in Form von geologischen Störungszonen und bergbaulich verursachten Bruch- und Auflockerungszonen (siehe Kap. 1.1). Die Rahmenbedingungen an beiden Standorten stellen daher aus geotechnischer Sicht Extremsituationen dar, an denen die komplexe Auswertung und Interpretation des geophysikalischen Messsystems erfolgreich angewendet und die komplexe Interpretation weiterentwickelt werden konnte.

Zur Vervollständigung des geophysikalischen Modells und Verdichtung des Datensatzes für die Komplexinterpretation erfolgten am Referenzstandort Sigmundshall (Salinargeophysik II) noch zusätzliche ergänzende Messungen.

Im Folgenden sind die Daten zu den Messprofilen an den Referenzstandorten kurz aufgelistet:

Referenzstandort A – Sollstedt:

Geoelektrik	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Hauptförderstrecke nach Haynrode (-200 m bis +200 m) • Lage: Sohle • Elektrodenabstand: 2 m • Messanordnung: Dipol-Dipol, Wenner-α,-β • Messsysteme: Resecs, Reftek • Auflösung: \sim2m • Maximale Erkundungsteufe: \sim 50 m • Anzahl Messwerte: 13.500
--------------------	---

Seismik	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Hauptförderstrecke nach Haynrode (-96.5 m bis +191.5 m) • 2 Profile auf der Sohle • Anregung: Hammerschlag • Profillänge 1: 223.5 m, 159 m hochüberdeckt, Schusspunkt- abstand 4m, Geophonpunkt- abstand 1 m • Profillänge 2: 163 m, 144 m hochüberdeckt, Schuss- punkt- abstand 1m, Geophonpunkt- abstand 1 m • Aufnehmer: Piezo, 100 Hz-Vertikalgeophone • Registrierung: Bison 48 Kanäle, DMT Summit Kompakt 72 Kanäle • Samplerate 10kHz
Radar	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Hauptförderstrecke nach Haynrode (-200 m bis +200 m) • Firstemessung (200 MHz) • Sohleprofil (40 MHz, 80 MHz, 200 MHz) • Common-Offset Messungen • Multi-Offset Messungen • Apparatur: GSSI SIR-300, zusätzlich LIAG-Eigenbausystem
Sonar	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Hauptförderstrecke nach Haynrode (31,5 m bis +120,5 m) • Anregungspunkt- abstand: 4 m, 38 Punkte • Empfangspunkt- abstand: 2 m, 79 Punkte • Tiefenpunkt- abstand: 1 m • Überdeckungsgrad: regulär 4-fach • Samplerate: 4 μs (250 kHz) • Energiestapelgrad: 2 x 10-fach • Anregungssignal: Sweep, Mittenfrequenz: 14,88 kHz
Elektromagnetik	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Hauptförderstrecke nach Haynrode (-120 m bis +120 m) • Messpunkt- abstand: 5 m • Spulenabstand: 20 m, 40 m • Spulenanordnung: vertikal-koplanar • Frequenzen: 110 Hz ... 56 kHz
Labor	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Hauptförderstrecke nach Haynrode (-200 m bis +200 m) • Handstücke im 10 m – Intervall • Bestimmung Dichte (Gaspymeter), Wassergehalt nach Karl-Fischer-Titration

Referenzstandort B – Teutschenthal:

Geoelektrik	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Verbindungsstrecke Teutschenthal – Angersdorf (+1550 m bis +1950 m) • Lage: Sohle, Stoß • Elektrodenabstand: 2 m • Messanordnung: Dipol-Dipol, Wenner-α, -β • Messsysteme: Resecs, Reftek • Auflösung: ~ 2m • Maximale Erkundungstiefe: ~ 50 m • Anzahl Messwerte: 24.000
Seismik	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Verbindungsstrecke Teutschenthal – Angersdorf (+1622 m bis +1878 m) • 2 Profile auf der Sohle • Profillänge 1: 256 m, 193 m hochüberdeckt, Schusspunkt- abstand 1m, Geophonpunkt- abstand 1 m • Profillänge 2: 163 m, 144 m hochüberdeckt, Schuss- punkt- abstand 1m, Geophonpunkt- abstand 1 m • Anregung: Hammerschlag • Aufnehmer: Piezo, 100 Hz-Vertikalgeophone • Registrierung: Bison 48 Kanäle, DMT Summit Kompakt 72 Kanäle • Samplerate 10kHz
Radar	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Verbindungsstrecke Teutschenthal – Angersdorf (+1650 m bis +1850 m) • Firstemessung (200 MHz) • Sohleprofil (40 MHz, 80 MHz, 200 MHz) • Common-Offset Messungen • Multi-Offset Messungen • Apparatur: GSSI SIR-300, zusätzlich LIAG-Eigenbausystem
Sonar	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Verbindungsstrecke Teutschenthal – Angersdorf (+1646 m bis +1858 m) • Anregungspunkt- abstand: 4 m, 51 Punkte • Empfangspunkt- abstand: 2 m, 108 Punkte • Tiefenpunkt- abstand: 1 m • Überdeckungsgrad: regulär 4-fach • Samplerate: 4 μs (250 kHz) • Energiestapelgrad: 2 x 10-fach • Anregungssignal: Sweep, Mittenfrequenz: 14,88 kHz

Elektromagnetik	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Verbindungsstrecke Teutschenthal – Angersdorf (+1650 m bis +1860 m) • Messpunktabstand: 5 m • Spulenabstand: 20 m, 40 m • Spulenanordnung: vertikal-koplanar • Frequenzen: 110 Hz ... 56 kHz
Labor	<ul style="list-style-type: none"> • Profil Verbindungsstrecke Teutschenthal – Angersdorf (+1550 m bis +1950 m) • Handstücke im 10 m – Intervall • Bestimmung Dichte (Gaspyknometer), Wassergehalt nach Karl-Fischer-Titration • simultane Wassergehalts-Widerstandsmessung

Referenzstandort C – Sigmundshall (Salinargeophysik II, ergänzende Messungen):

Seismik	<ul style="list-style-type: none"> • Profil SW-Stoß der Weser-Wetterstrecke (-96 m bis + 128 m) • Profillänge: 157.5 m, 96 m hochüberdeckt, Schusspunktabstand 4m, Geophonpunktabstand 1 m • Anregung: Hammerschlag • Aufnehmer: 3D-Piezoschwinger • Registrierung: Bison 48 Kanäle • Samplerate 10kHz
Sonar	<ul style="list-style-type: none"> • Profil SW-Stoß der Weser-Wetterstrecke (-55 m bis + 184 m) • Anregungspunktabstand: 4 m, 60 Punkte • Empfangspunktabstand: 2 m, 126 Punkte • Tiefenpunktabstand: 1 m • Überdeckungsgrad: regulär 4-fach • Samplerate: 4 μs (250 kHz) • Energiestapelgrad: 10-fach • Anregungssignal: Sweep, Mittenfrequenz: 14,88 kHz

5.1.2. Geologisch-Geophysikalische Modelle aus der integrierten Analyse und Charakterisierung von Problemzonen

Standort A – Sollstedt

Aus den Ergebnissen aller Einzelmessungen wurde ein gemeinsames geophysikalisches Modell erstellt und auf dem Profilabschnitt von –200 m bis +200 m in einem Vertikalschnitt durch das Referenzmessprofil bis in eine Tiefe von 80 m ins Gebirge hinein dargestellt (Abb. 5.1-1). Für die Einzelergebnisse aus der Seismik und dem Georadar, die Informationen über Lage und z.T. Typ von Reflektoren elastischer bzw. elektromagnetischer Wellen enthalten, sind linienhaft die Reflektoren der Wellenverfahren eingezeichnet. Die Ergebnisse der horizontalen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands aus der Geoelektrik als diffuses Verfahren und die Ergebnisse der Verteilung der akustischen Reflektivitäten aus dem Sonar, einem Wellenverfahren, tragen farbige Flächensignatur. Die elektromagnetischen Messungen waren bedingt durch Störeinflüsse in der Strecke nur schwer quantitativ interpretierbar. Die Ergebnisse der Elektromagnetik wurden daher nicht in das geophysikalische Modell mit einbezogen. Die Darstellung ist hinterlegt mit dem 25 MHz-Radargramm.

Die Einzelergebnisse aus Seismik-, Radar-, Sonar- und Geoelektrik-Messungen ergänzen sich in der gemeinsamen Darstellung gegenseitig zu einem umfassenden Gesamtbild. Infolge der sehr unterschiedlichen Eindringtiefen greifen in einem Tiefenbereich jeweils immer nur die Ergebnisse einiger der Messverfahren ineinander. So ist die Erkundungstiefe der Geoelektrik von maximal bis 25 m eher gering, ebenso die der Seismik, die geologische verursachte Reflektoren bis in eine Tiefe von ca. 30 m nachweist.

Das umgebende Grubengebäude mit seiner Vielzahl benachbarter Strecken birgt für alle Methoden, insbesondere aber für die Wellenverfahren erhebliche Störeinflüsse dar. Zudem liegt die Messstrecke in unmittelbarer Nachbarschaft einer steilen Sattelstruktur, deren Ausmaß erst während der geologischen Arbeiten im Rahmen des Projektes (siehe Kapitel 1) bekannt wurde. Diese Situation stellte für alle Verfahren eine zusätzliche Schwierigkeit hinsichtlich der Interpretation dar. Trotzdem erreichen die Methoden Sonar und Radar mit 80 m eine große Eindringtiefe bei hinreichender Auflösung der relevanten Strukturen. Die Radarmessungen überdecken den Bereich aller anderen Messergebnisse über den gesamten Profil- und Tiefenbereich und wurden daher zur räumlichen Abgrenzung für das geophysikalische Modell herangezogen. Die Ergebnisse aus Seismik, Radar, Sonar und Geoelektrik ergeben eine ausgezeichnete Übereinstimmung in den Strukturelementen, die das geophysikalische Modell dominieren.

Die Messstrecke befindet sich im Staßfurtsteinsalz (Na2). Im Steinsalz konnten im Liegenden zwei nach Osten ausstreichende Schichtgrenzen mittels der Radaruntersuchungen nachgewiesen werden. Die Oberkante des Basalanhydrit (A2) zeigt eine wellige Struktur, die von ca. 20 bis 24 m am westlichen Profilanfang bis auf ca. 6 m am östlichen Profilenende ansteigt. Diese Schichtgrenze wird auch in den seismischen Untersuchungen sichtbar. Der

Übergang zum Hauptdolomit (Ca2d) verläuft hierzu parallel ca. 6 m tiefer. Ein weiterer Radarreflektor tritt im östlichen Profilbereich in einer Tiefe von etwa 50 bis 60 m auf.

Im Zentrum des Profils ist eine Aufsattelungsstruktur zu erkennen. Das generelle Schichteinfallen weist nach Norden. Die Hauptförderstrecke verläuft parallel zum Einfallen. Die verschiedenen Schichtpakete zeichnen sich ebenfalls durch unterschiedliche Sonar-Reflektivitäten aus. Erhöhte Reflektivitäten sind an internen Reflektoren des Staßfurtsteinsalzes (Na₂) sowie der Oberkante des Basalanhydrits (A2) zu erkennen. Daneben ist eine generelle laterale Zunahme der Reflektivität im Bereich der Wendel, südöstlich von Station 0 m erkennbar, die zumindest teilweise auf Auswirkungen der verschiedenen Grubenbaue in dieser Zone zurückgeführt werden kann (siehe auch Abb. 4-16). Gleichzeitig wird der Bereich durch geringe elektrische Widerstände charakterisiert, ebenfalls ein Indiz für die mechanische Beanspruchung und die damit verbundene Auflockerung sowie stärkere Durchfeuchtung dieser Wendelzone (Profilmeter 0 m).

In der Spitze der im Zentrum des Profils mit den Wellenverfahren nachgewiesenen Aufsattelung von Basalanhydrit (A2) und Hauptdolomit (Ca2d) ist im geoelektrischen Messbild bei Station 50 m eine stark leitfähige Zone zu erkennen, die nach Nordwesten hin von einem markanten Widerstandsmaximum begrenzt wird. An beiden Flanken dieser Durchfeuchtungszone weisen Wechsel im Sonar-Reflexionsmuster auf eine mechanische Beanspruchung hin, vor allem im Basalanhydrit und Hauptdolomit.

Insgesamt zeigt das geophysikalische Modell eine anomale Zone im Profilbereich zwischen 0 m und +120 m. Belegt wird dies anhand einer erhöhten akustischen Reflektivität, eines ausgeprägten Widerstandsmaximums ab einer Tiefe von etwa 20 m flankiert von Bereichen mit deutlich erniedrigten Widerständen im Bereich einer Sattelstruktur. Das geophysikalische Modell kann durch die Wellenverfahren Seismik und Radar die geologischen Strukturelemente im Liegenden der Hauptförderstrecke nach Haynrode gegenüber der a-priori-Information deutlich präzisieren. Seismische und Radar-Reflektoren kennzeichnen den Verlauf der Sattelstruktur sowie die Grobstrukturierung der potentiell salzlösungsführenden Anhydritklippen.

Die Messergebnisse aus dem Sonar, Georadar und der Geoelektrik können geotechnische Zusatzinformationen zu Bereichen erhöhter Gebirgs-Auflockerung und Gebirgs-Durchfeuchtung sowie zu Ausbreitungspfaden und potentiellen Wegsamkeiten entlang der geologischen Strukturelemente geben. Als Problemzone wird eine weitreichende stoßnahe Durchfeuchtungszone detektiert, welche aufgrund der bergbaulichen Beanspruchung im Bereich der Wendel (Profilmeter von -30 m bis +10 m) entstanden ist. Diese Zone erstreckt sich bis in eine Entfernung von ca. 20 m ins Gebirge hinein und konnte mithilfe der Geoelektrik nachgewiesen werden. Zusätzlich ist sie durch Hinweise auf Gebirgsauflockerung aus den Sonarmessungen gestützt.

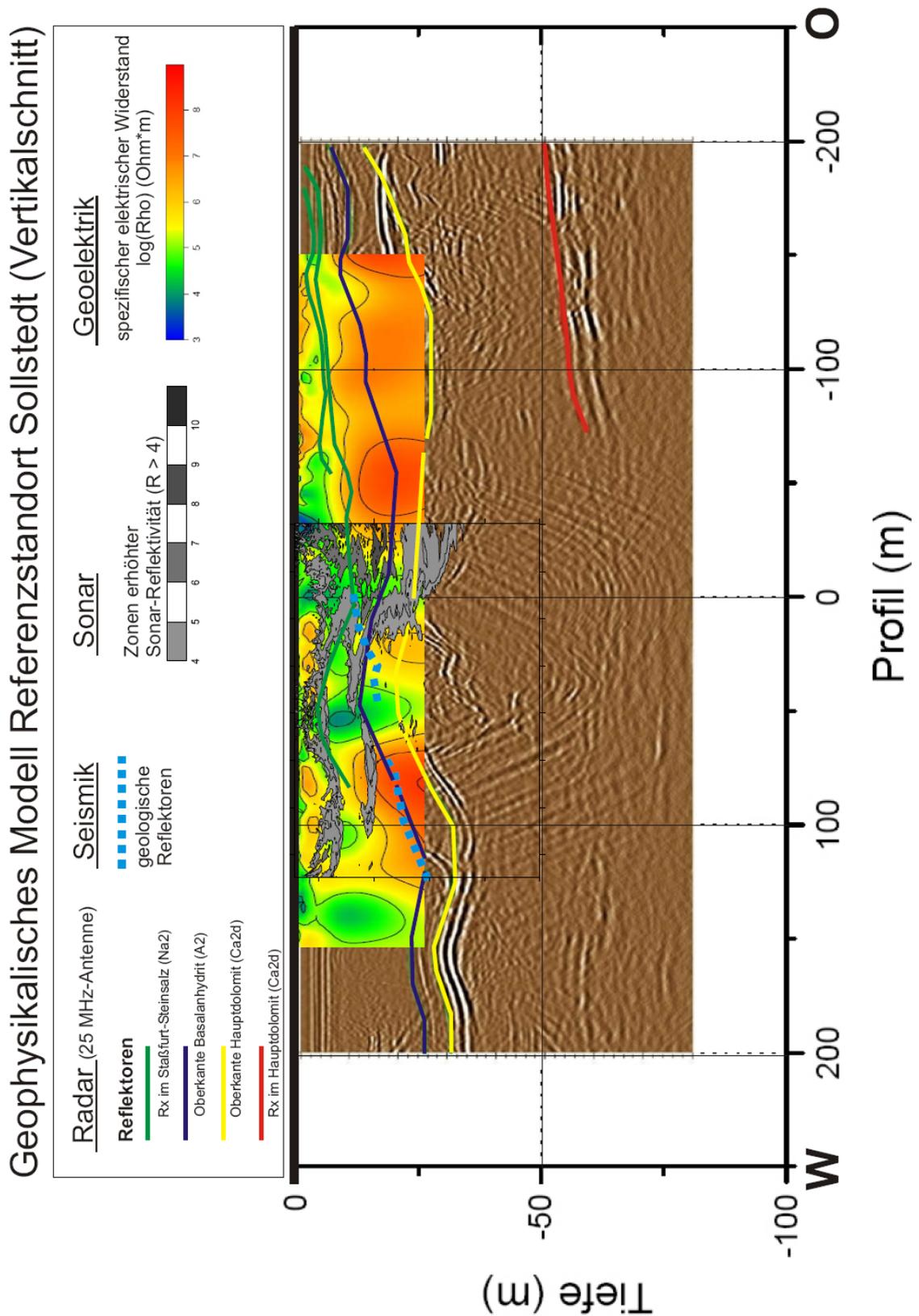


Abb. 5.1-1: Geophysikalisches Modell auf der Grundlage der geophysikalischen Messungen am Referenzstandort Sollstedt. Vertikalschnitt im Bereich der Hauptförderstrecke Haynrode.

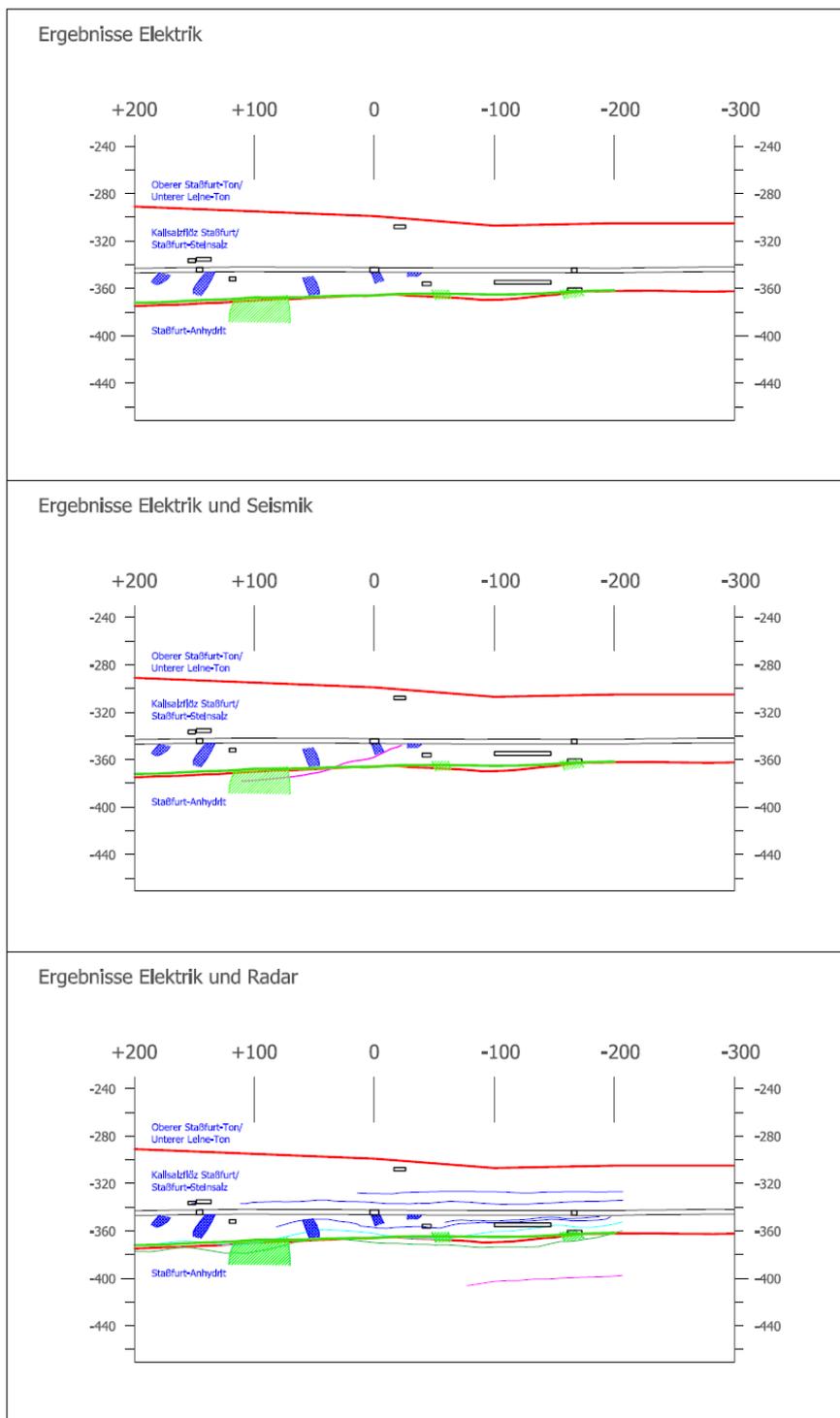


Abb. 5.1-2: Vergleich konstruierte geologische Schichtgrenzen mit Ergebnissen der geophysikalischen Messungen in der Hauptförderstrecke Haynrode (kompiliert JOCKEL, 2008).

Die Ergebnisse der geophysikalischen Messung sowie die geologischen a-priori Informationen wurden in einer gemeinsamen Darstellung kompiliert (Abb. 5.1-2). Die

Interpretation der Ergebnisse basiert auf den Untersuchungen der Methoden Elektrik, Seismik und Georadar und vergleicht deren Resultate mit einem konstruierten geologischen Schichtmodell, welches aus Streckenkartierungen sowie benachbarten Bohrprofilen abgeleitet wurde. Dieses vereinfachte geophysikalische Modell wurde von der Firma Ercosplan Erfurter Consulting- und Planungsbüro GmbH (JOCKEL, 2008) zusammengestellt und dem Bergwerksbetreiber übergeben.

Standort B – Teutschenthal

Die Messstrecke befindet sich über der westlichen Bruchfeldkante des Gebirgsschlages von 1996 im angefahrenen Leinsteinsalz (Na3). Aus den Ergebnissen der Einzelmessverfahren wurde auch hier ein gemeinsames geophysikalisches Modell erstellt und auf dem Profilabschnitt von Auffahrung +1550 m bis +1950 m in einem Vertikalschnitt durch das Referenzmessprofil bis in eine Tiefe von 100 m ins Liegende hinein dargestellt (Abb. 5.1-2). Analog zu der integrierten Interpretation der Ergebnisse der Einzelverfahren wurden die Modelle der Seismik-, Radar-, Sonar- und Geoelektrik-Messungen in einer gemeinsamen Darstellung zu einem umfassenden Gesamtbild zusammengestellt. Mit jeweils unterschiedlichen Eindringtiefen und Auflösungsvermögen überdecken die Einzelmethoden jeweils immer nur bestimmte Erkundungsbereiche, somit erlaubt erst die kumulative Interpretation der Einzelergebnisse die Erstellung eines allgemeinen geophysikalischen Modells.

Der Bereich der Radaruntersuchung (hier 25 MHz-Ergebnisse) am Standort Teutschenthal umfasst das Leinsteinsalz (Na3) und den Hauptanhydrit (A3), die durch eine stark wellige Grenze voneinander getrennt sind. Die restlichen Schichten verlaufen relativ ungestört und steigen Richtung Osten um ca. 8 m an. Das Steinsalz ist durch weitere dünne Ton- und Anhydritschichten unterbrochen.

Die Anhydritoberkante steigt von ca. 20 m Tiefe im Westen auf ca. 8 m Tiefe unterhalb der Strecke im Osten an. Dieser Schichtgrenze ist eine gering mächtige Klippanhydritschicht vorgelagert. Innerhalb des Anhydrits konnten drei Karbonateinlagerungen nachgewiesen werden, die sich im Teufenbereich 16 bis 33 m befinden. In ca. 70 m Tiefe befindet sich vermutlich die Unterkante des Hauptanhydrits bzw. die Oberkante des Grauen Salztons (T3). Zwei Problemzonen lassen sich direkt aus den Radarergebnissen ausweisen. Zum einen befindet sich im Profilbereich von 1730 bis 1790 m in einer Tiefe von 5 bis 10 m eine Zerüttungszone im Anhydrit, zum anderen besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, in der unteren anhydritinterne Karbonatschicht innerhalb des Bruchfeldes eine Salzlösungsführung anzutreffen.

Die Reflexionen an der geschuppten Oberfläche des A3 sind auch in der Stapelsektion der seismischen P-Welle deutlich sichtbar. Die Strukturen im Profilbereich zwischen 1750 bis 1790 m in einer Tiefe von ca. 20 m deuten auf einen gestörten Bereich oberhalb der Anhydritkante hin. Die folgenden Reflexionen werden lithologischen Schichtgrenzen innerhalb des A3 zugeordnet, so wird die unterste mit dem Übergang vom A3 zum Grauen Salzton T3 interpretiert. In einer Teufe von ca. 90 m unter der Messstrecke sind Reflexionen erkennbar, welche der Unterkante des Grauen Salztones (T3) / Oberkante des Kaliflözes (K2)

zugeordnet werden können. Diese Reflexion der vermuteten Grenze T3/K2 kann nur bis Profilmeter 1750 m verfolgt werden. Da sich hier die vermutete Grenze zwischen Bruchbereich und Unverritztem befindet, kann die Stärke der Amplituden der seismischen Wellen im Bruchfeld mit dem Bruchereignis direkt im Zusammenhang stehen. Die Reflexionen können aber auch direkt aus dem Grubengebäude im Bruchfeld stammen.

Die Oberfläche des Hauptanhydrits (A3) ist im Sonarergebnis nicht deutlich zu erkennen. Die Tiefenschnitte der Sonar-Reflektivität liefern jedoch Hinweise auf geologische Lagerungsgrenzen durchschlagende Auswirkungen des Bruchgeschehens im Liegenden. So zeigen sich über der Bruchfeldkante deutliche Reflektivitätsmaxima, die auf eine Klüftbildung im Anhydrit infolge des Bruchgeschehens hinweisen. Die Sonar-Ergebnisse bestätigen die lateral veränderte Ausbildung anhydritinterner Radar-Reflektoren. Insbesondere die Vielzahl von Reflexionselementen in dieser Zone ist ein direkter Hinweis auf Zerrungsklüfte, die als geomechanische Auswirkungen des Gebirgsschlages im Deckgebirge auftreten.

Der Vergleich mit dem Messergebnis der Widerstandsgeoelektrik zeigt, dass ein im Zentrum des Profils befindliches Widerstandsmaximum welches durch Bereiche geringerer Widerstände flankiert wird, der Bruchfeldkante zugeordnet werden kann. Dies ist ein weiterer Hinweis auf luftgefüllte Zerrungsklüfte als Auswirkung des Gebirgsschlages im Hangenden des Bruchgeschehens. Die oberflächlich niedrigen Widerstände im mittleren Profilbereich sprechen auch für eine höhere Klüftigkeit und Permeabilität infolge der mechanischen Beanspruchung während des Bruchereignisses in Verbindung mit von der Strecke her eindringender Feuchtigkeit.

Geophysikalisches Modell Referenzstandort Teutschenthal (Vertikalschnitt)

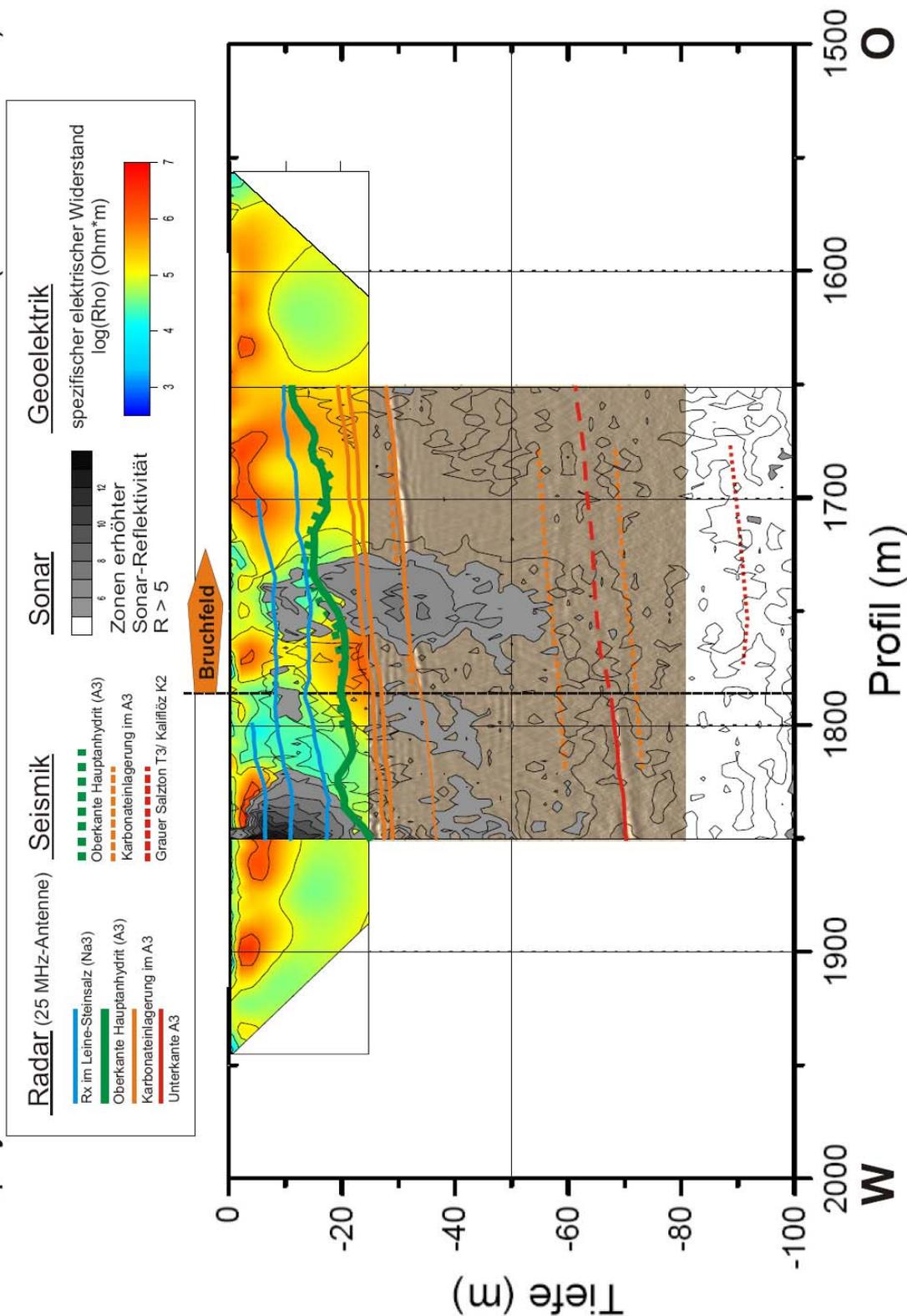


Abb. 5.1- 3: Geophysikalisches Modell für den Referenzstandort Teutschenthal. Vertikalschnitt an der westlichen Bruchfeldkante in der Verbindungsstrecke Teutschenthal - Angersdorf (Auffahrung 1550 m bis 1950 m).

Standort C – Sigmundshall

Aus den Ergebnissen aller Einzelmessungen aus den Arbeiten im Projekt Salinargeophysik II und III wurde ein gemeinsames geophysikalisches Modell erstellt und auf dem Profilabschnitt von –100 m (SE) bis +250 m (NW) in einem Horizontalschnitt durch das Referenzmessprofil am SW-Stoß bis in eine Tiefe von 150 m ins Gebirge hinein dargestellt (Abb. 5.1-4). Für die Einzelergebnisse aus dem Georadar, die Informationen über Lage und z.T. Typ von Reflektoren der elektromagnetischen Wellen enthalten, sind linienhaft die Reflektoren eingezeichnet. Weiterhin wurden alle Ergebnisse der seismischen Untersuchungen als linienhafte Reflektoren in das Modell integriert. Die horizontale Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands wurde farbig aufgetragen. Die akustischen Reflektivitäten aus dem erweiterten Sonardatensatz wurden grau codiert dargestellt. Zum Vergleich mit den erbohrten Schichten der Horizontalbohrungen wurden zusätzlich die Bohrprofile mit den angetroffenen Salzlösungsvorkommen in das geophysikalische Modell eingefügt. Die Ergebnisse sind hinterlegt mit dem 100 MHz-Radargramm.

Das Modell wurde bereits weitgehend im Bericht des Vorgängerprojektes Salinargeophysik II (JUST ET AL., 2004) diskutiert. Die Ergebnisse aus Seismik, Radar, Sonar und Geoelektrik ergeben eine sehr gute Übereinstimmung in den Strukturelementen, die das geophysikalische Modell dominieren. Zahlreiche Radar-Reflektoren prägen das Gesamtbild durch verhältnismäßig eng beieinander liegende Strukturelemente, die grob NNW-SSE streichen.

Auffällig sind die Radarreflektoren einer Sylvinit- und einer Hartsalzschicht, die sich bei der Bohrung HB2 etwa 30 m vom Stoß entfernt befinden und auf einer Länge von fast 300 m nahezu parallel zum Stoß verfolgt werden können. Bei Profilmeter +215 und +220 m treten beide Reflektoren an den Stoß, wobei das Hartsalzband bei +220 m in der Geoelektrik eine Anomalie mit lokal auf ca. $10^6 \Omega\text{m}$ erniedrigten spezifischen elektrischen Widerständen verursacht. Eine teilweise starke Deformierung der Schichten zeigt sich an einem nördlich von 250 m austreichenden zweiten Hartsalzband, das zwischen Profilmeter +100 und +150 m mit dem erstgenannten Hartsalzband verschmilzt und auch in der Horizontalbohrung HB2 erbohrt wird. Insgesamt ergibt das geophysikalische Modell anhand einer erhöhten akustischen Reflektivität, eines ausgeprägten Widerstandsminimums bis etwa 20 m Tiefe sowie einer verringerten Anzahl an Radar-Reflektorelementen in größeren Tiefen eine anomale Zone im Profilbereich zwischen –50 m und +50 m. Die Horizontalbohrung HB1 bei Profilmeter 0 m hatte in etwa 90 m Bohrungstiefe ein Salzlösungsvorkommen in der erbohrten Anhydritschicht ergeben, das durch eine südöstlich der Bohrung in 70 bis +100 m Tiefe gelegene Durchfeuchtungszone, die vom Radar als Gradientenzone erfasst wird, bestätigt werden kann.

Geophysikalisches Modell Referenzstandort Sigmundshall (Horizontalschnitt)

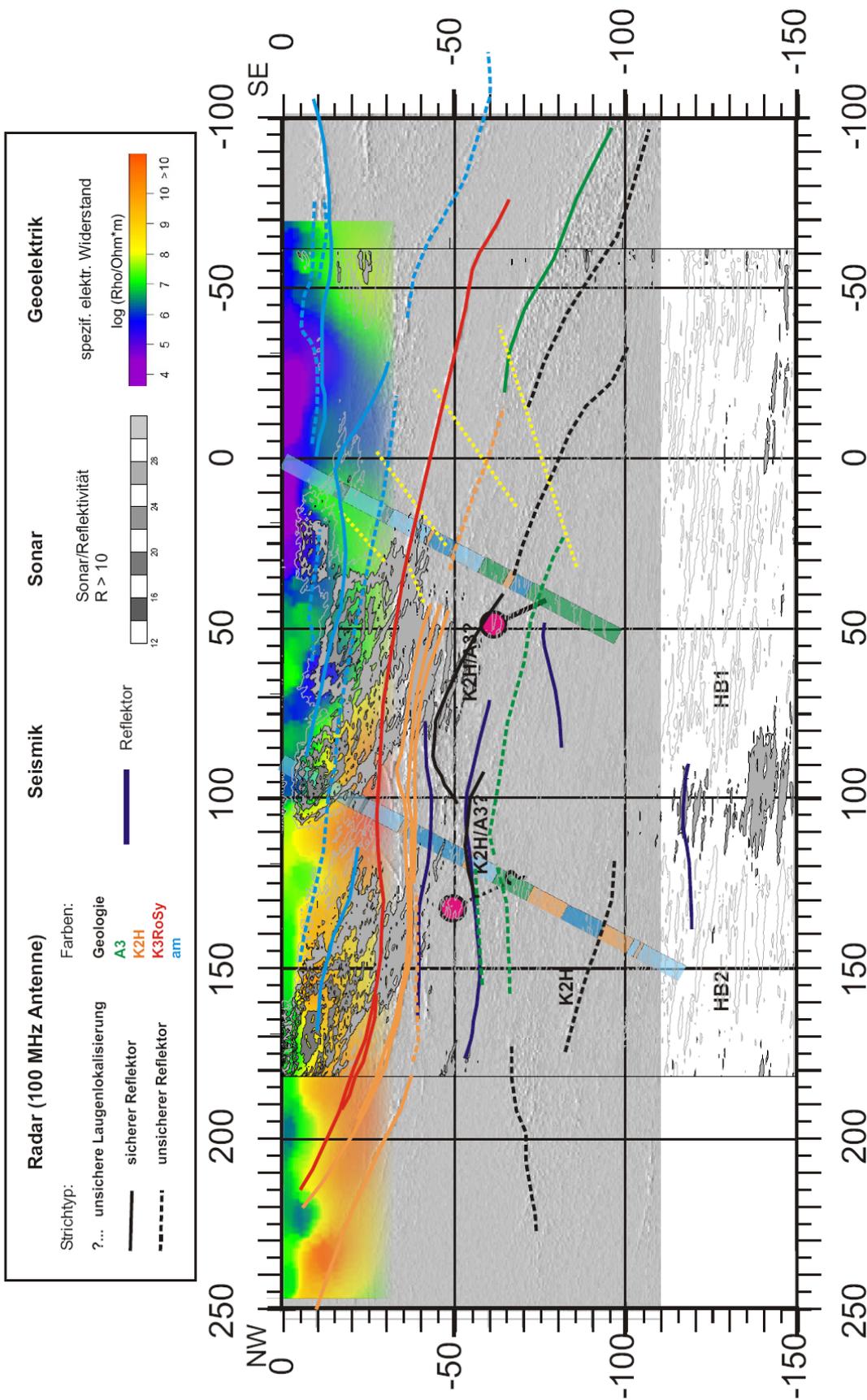


Abb. 5.1-4: Geophysikalisches Modell auf dem Referenzprofil Sigmundshall im Horizontalschnitt durch den SW-Stoß der Weser-Wetterstrecke.

Die ergänzenden Messungen der Sonarmethode am Messort Sigmundshall wurden unter Einbeziehung der im Ausgangsvorhaben gewonnenen Daten prozessiert. Die Erweiterung der Sonarmessungen auf den gesamten gemeinsamen Profilbereich liefert detailreiche Ergebnisse, die nun eine methodenübergreifende Auswertung mit dem Ziel der Erfassung geomechanischer Problemzonen ermöglicht. Der Tiefenschnitt der Reflektivität erlaubt Einblicke bis in 150 m Stoßentfernung und zeigt stoßnah ein stark gegliedertes Bild von Bereichen hoher Reflektivität und reflexionsarme Zonen. Innerhalb der Abschnitte hoher Reflektivität kann auf eine Häufung akustischer Grenzflächen (petrographische Wechsel, Anhydritbänder, Kluftbereiche) geschlossen werden. Es zeigen sich besonders im erweiterten nordwestlichen Profilabschnitt deutliche Übereinstimmungen in der Lage der Radarreflektoren und Zonen hoher Sonarreflektivitäten. In den Tiefenschnitten sind keine ebenen Strukturen zu erkennen. Aus dem Verlauf der Georadar-Reflektoren geht hervor, dass sich die Mehrzahl der Georadar-Reflektoren an den Grenzen von Homogenbereichen der akustischen Reflektivität befinden.

Die Erweiterung des hochfrequenten seismischen Datensatzes zeigt keine neuen Informationen zum strukturellen Aufbau am Referenzstandort Sigmundshall. So sind die sich in Richtung Südosten vom Stoß entfernenden Radar-Reflektoren auch im Seismogramm der P- und S-Welle weitestgehend erkennbar. Im Nahbereich des Stoßes kann das seismische Verfahren keine weiteren Reflektoren auflösen. Es treten aber auch zusätzliche Reflektoren auf, welche die einfallenden Reflexionen anschneiden. Diese Reflexionen deuten auf eventuelle Brüche in den abgebildeten Anhydritbereichen hin.

5.2. Mathematisch-statistische Verfahren zur Problemanalyse

Mit der integrierten Bearbeitung von Messdaten unterschiedlicher geophysikalischer Verfahren wird neben der bisherigen qualitativen, d. h. vor allem visuellen Identifizierung von Problemzonen im Salinar die quantitative Charakterisierung von Problemzonen erreicht. Ziel ist die Sichtbarmachung versteckter oder unscharfer Anomalien in den Ergebnissen der Einzelverfahren. Zusammenhänge und Beziehungen geophysikalischer Größen werden aus den Daten verschiedener Messmethoden in Form von Anomalienmustern herausgearbeitet.

Die Untersuchungen zur integrierten statistischen Auswertung erfolgten in drei Schritten:

- Theoretische Arbeiten mit Modellen,
- Analyse der Daten der Vorgängerprojekte (Untersuchungsstandorte Bischofferode und Sigmundshall),
- Auswertung der Daten von den neuen Messlokalationen Sollstedt und Teutschenthal.

Zur Erkennung von Problemzonen im Salinar wurde ein Modellansatz entworfen und mit den Projektpartnern abgestimmt. Ziel war die theoretische Validierung und Unterlegung des zu untersuchenden neuen methodischen Ansatzes. Dazu waren geeignete Trainingsdaten für den Lernalgorithmus zur Mustererkennung und zur verallgemeinerten Aussage aus den bisherigen Projekten für die Komplexauswertung des aktuellen Forschungsprojektes. Schließlich erfolgten die Anwendung und der Vergleich der Methoden der univariate Statistik, der Support-Vector-Maschinen, der künstlichen neuronalen Netze.

Das Hauptziel des Teilprojektes bestand in der integrierten Auswertung der Ergebnisse verschiedener geophysikalischer Messverfahren zur Erfassung von Problemzonen, insbesondere von Salzlösungsvorkommen im Salzgestein. Zonen mit Salzlösungen verursachen sowohl bei den Wellenverfahren als auch bei den Potentialverfahren "verschmierte", diffuse Daten, da sie keine scharf abgegrenzten Körper darstellen und in den meisten Fällen in normalen Amplitudendarstellungen nicht sichtbar sind (KULENKAMPPF et al. 2002).

In den Vorgängerprojekten wurde dazu eine *univariate statistische Methode* benutzt. Ausgehend von definierten Anomaliekriterien für jedes geophysikalische Verfahren wurden diese Daten zu einem Anomaliekoeffizienten und daraus zu einem Problemindex je Volumenelement zusammengefasst. Anomaliekoeffizienten sind Größen zur Charakterisierung des physikalischen Informationsinhaltes. Problemindices sind daraus abgeleitete abstrakte mathematisch-statistische Kenngrößen zur Darstellung abgeleiteter Sachverhalte mit Problembezug.

Mit der Anwendung *univariater Methoden* ist nur in der Endphase eine gemeinsame Betrachtung und Auswertung der Messergebnisse der Einzelverfahren möglich. Damit bleiben die gegenseitigen Abhängigkeiten physikalischer Gesteinsparameter und deren Einfluss auf verschiedene Messgrößen teilweise unberücksichtigt. Mit einem neuen multivariaten Ansatz aus der statistischen Lerntheorie zur Nutzung von Mustererkennungsmethoden kann dieser Nachteil beseitigt werden. Mit Hilfe der statistischen Methodik wird die gleichzeitige Verarbeitung der gemessenen geophysikalischen Daten unterschiedlicher Verfahren verbessert und trägt zur Verbesserung der quantitativen Charakterisierung von Problemzonen bei.

5.2.1 Anomaliekriterien/-koeffizienten (AK) und Problemindices (PI)

5.2.1.1 Verfahrensspezifische geophysikalische Anomaliekriterien/-koeffizienten (Georadar, Seismik, Geosonar, Geoelektrik)

Die Anwendung der univariaten statistischen Methodik erfolgte auf den Erfahrungen aus dem Projekt Salinargeophysik I (1998-2001). Das grundsätzliche Vorgehen ist in KURZ et al. (2002) und KULENKAMPPF et al. (2002) beschrieben. Das Verfahren wurde neu aufgearbeitet und modifiziert, wobei die Entwicklung der Algorithmen mithilfe von Matlab©-Routinen erfolgte. Die univariate Methode wurde auf die Daten aller vier geophysikalischen Verfahren aus beiden Referenzstandorten angewendet.

Problemzonen mit Salzlösungen oder Feuchtezonen, die nicht unter die Kategorie Strukturelemente (Klüfte, Spalte, Schichtgrenzen) fallen, sind nicht oder nur unter bestimmten günstigen Bedingungen (große Areale, genügend scharfe Abgrenzung gegenüber Umgebungsgestein) mit konventioneller Interpretationsmethodik erfassbar. Signale der Wellenverfahren werden in diesen Zonen gedämpft oder nur schwach reflektiert und unterscheiden sich somit nicht eindeutig vom Rauschen. Die Konturierung von Problembereichen wird zudem häufig von Übergangszonen erschwert, die physikalisch als Gradientenmedien wirken. Die gesuchten Messsignale liegen geringfügig über dem Rauschniveau und sind kleiner als die normalen Reflexionen von Grenzschichten. Unter dieser Voraussetzung ist es möglich, für jedes Wellenverfahren im Sinne eines Bandpasses ein Energiefenster zu definieren, das die vermuteten Reflexionsmuster und -stärken enthält. Die Zugehörigkeit eines Reflexionsbereiches zu diesem Energiefenster wird als anomale Eigenschaft interpretiert. Die zugehörige Bedingung wird als Anomaliekriterium bezeichnet und für jedes Messverfahren separat ermittelt. Auf diese Weise sollen störende starke Reflexionen und nichtsignifikante schwache Rauschsignale von der weiteren statistischen Analyse ausgeschlossen werden.

Entsprechendes gilt für das Potentialverfahren Geoelektrik. Hier tritt physikalisch an die Stelle eines *Reflexionsmusters* elektromagnetischer oder mechanischer Wellen der Betrag des gesteinsphysikalischen Parameters *spezifischer elektrischer Widerstand*, im weitesten Sinne eine Materialgröße. Anstelle des Bandpasskriteriums tritt ein Tiefpasskriterium (Targetparameter niedrige Widerstände).

Die Anwendung der verfahrensspezifischen Anomaliekriterien auf die Messdaten führt zur Selektion der gesuchten Daten und zur Ermittlung von Kennziffern – und wegen der angestrebten Vergleichbarkeit – gleichzeitig zu einer Normierung auf „1“ (Wellenverfahren) oder „0 bis 4“ (Potentialverfahren). Die hier gewählte Normierung unterscheidet sich von der bei KURZ et al. (2002) verwendeten Vorgehensweise. Diese dimensionslosen, aber noch physikalisch zu begründenden Kennziffern können im Sinne von **Anomaliekoeffizienten (AK)** verwendet werden

Die gewichtete Verknüpfung der jeweiligen verfahrensspezifischen Anomaliekoeffizienten leitet dann über zu einer abstrakt definierten, verfahrensintegrierenden numerischen Kenngröße.

Die Höhe des Wertes steht in Beziehung zur Stärke der Ausprägung der Problemzone und trägt die Bezeichnung **Problemindex (PI)**. In Verbindung mit den Interpretationsergebnissen der Einzelverfahren können somit Hinweise auf Problembereiche verdichtet oder abgeschwächt werden.

Prozessing Anomaliekriterien

Wellenverfahren (Radar, Seismik, Sonar)

Annahmen:

- schwache Reflexionen/Reflexionsmuster bei Feuchtevorkommen
- Größenbereich der reflektierten Energie E: $E(\text{Rauschen}) < E(\text{Feuchte}) < E(\text{Schichtgrenze})$, („Bandpass“)

Schritte:

- Datenaufbereitung
- Transformation Reflektivität (Amplituden) in sog. Energiedarstellung = Quadrierung der Mittelwerte der Amplituden im Fenster einer Wellenlänge
- Häufigkeitsverteilungen (Bereiche: Gesamtdatensatz, Rauschen, bekannte Anomalie, vermutete Anomalie, empirisch aus anderen analysierten Daten)
- Festlegung Grenzen der Energiefenster(höchster Rauschpegel → Untergrenze Anomalie, schwache Rx-Bereiche → Obergrenze)
- Mittelung der „Energiewerte“ auf 2D-Gitter (xz), z. B. im Raster 1 m x 1 m
- Normierung der „Energiewerte“ im Gitter auf 0 oder 1

Potentialverfahren (Geoelektrik):

Annahmen:

- niedrige spezifische elektrische Widerstände bei Feuchtevorkommen („Tiefpass“)

Schritte:

- Inversion der Daten in spezifische Widerstände, 2D-Modell mit räumlicher Verteilung von Widerstandswerten in einem 2D-Gitter
- Festlegung eines Schwellwertes (Obergrenze des Anomaliefensters)
- Normierung der Widerstandswerte

5.2.1.1.1 Anomaliekriterien Sollstedt

Zunächst wird das statistische Verfahren zur Ermittlung der Anomaliekriterien am Beispiel der Georadarmessungen im Bergwerk Sollstedt ausführlicher erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse in verkürzter Form für die anderen Messverfahren wiedergegeben.

Anomaliekriterium Georadar

Die Ausgangsdaten für die statistische Analyse sind in Abb. 5.2-1 dargestellt. Die Abbildung zeigt die migrierte Reflektivität der Common-Offset-Messung für eine Frequenz von 40 MHz bis zur Tiefe von ca. 43 m.

Zur Erfassung der Anomaliebereiche wurden die Reflektivitäten quadriert (momentane „Energie“) und mit der gleitenden Fenstertechnik (Moving-Average) gemittelt. Die Mittelung erfolgt über ein Fenster von einer Wellenlänge. Im hier vorliegenden Beispiel mit einer Mittenfrequenz von 40 MHz beträgt die Wellenperiode 25 ns. Bei einer Abtastrate von 1 ns ergeben sich demzufolge 25 Samples für die Fenstergröße.

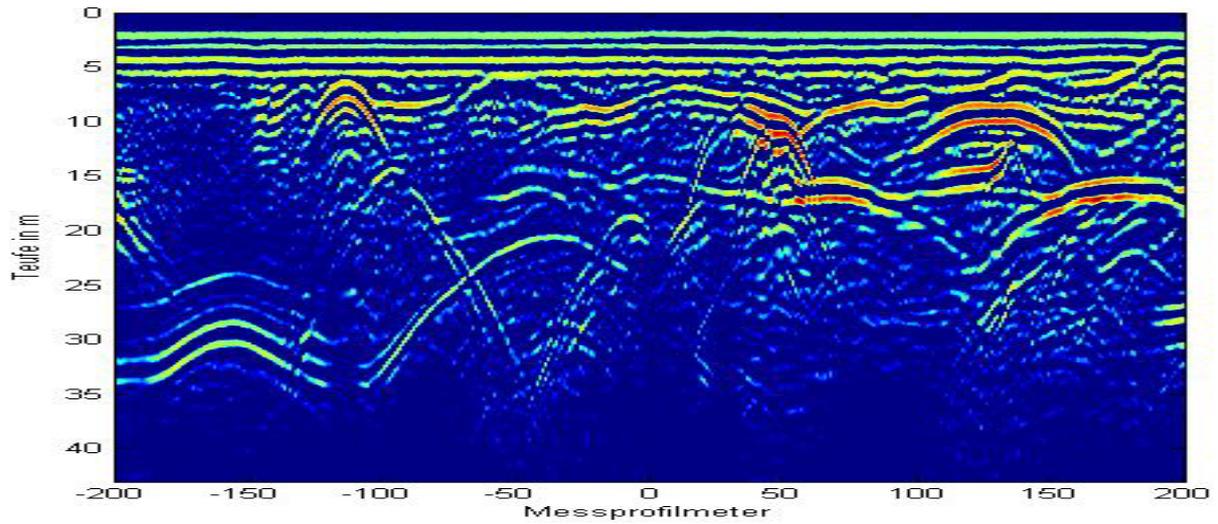


Abb. 5.2-1 Prozessiertes Georadargramm der 40 MHz-Messung

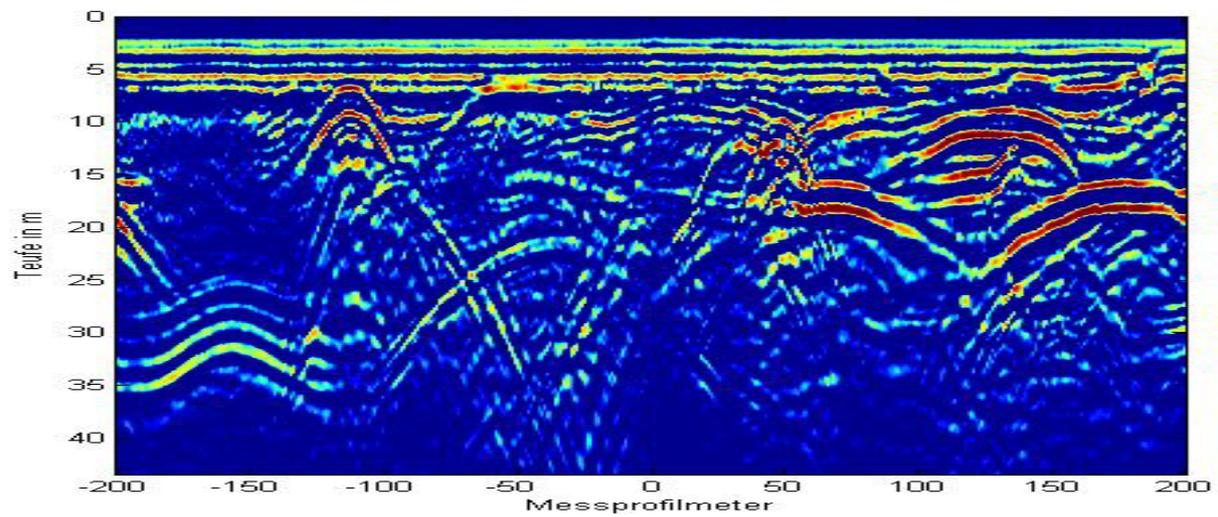


Abb. 5.2-2 Georadargramm (40 MHz) nach Moving-Average

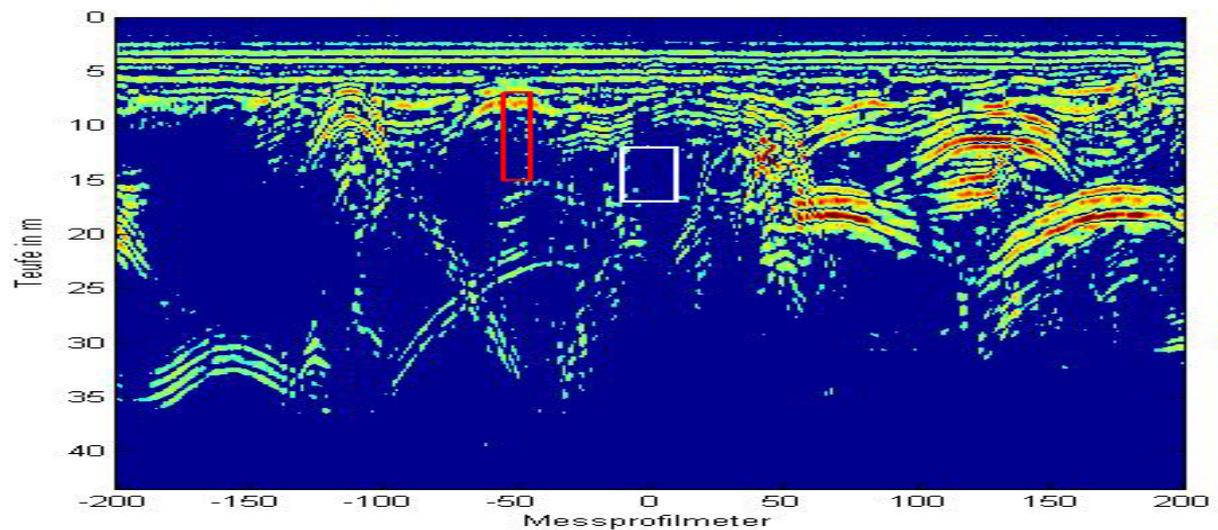


Abb. 5.2-3 Georadargramm (40 MHz) nach Moving-Average mit Amplitudenquadrierung
Rot: Definierter Anomaliebereich A
Weiß: Definierter Noisebereich B

Die Abbildungen 5.2-2 und 5.2-3 enthalten Bereiche hoher Reflektivitätsenergie im rechten Teil des Bildes in einer Tiefe von ca. 10 m bis 25 m und schwache Energiemuster im linken Teil des Bildes unterhalb der starken Reflektoren zwischen 5 m bis 10 m. In diesem Bereich lassen sich Anomalien vermuten, aber noch nicht nachweisen. Im abgebildeten Radargramm weist dieser Bereich, der oberhalb der Anhydritaufsattelung liegt (siehe Abb. 3-11, Punkt 3.2 Georadarergebnisse), zahlreiche kleine Reflektorelemente auf.

Die Ergebnisse der anderen Verfahren geben ebenfalls Hinweise auf anomale Eigenschaften. Aufgrund dieser Kenntnisse wurde dieser Bereich zur Bestimmung der Obergrenze des Fensters der reflektierten „Energie“ ausgewählt.

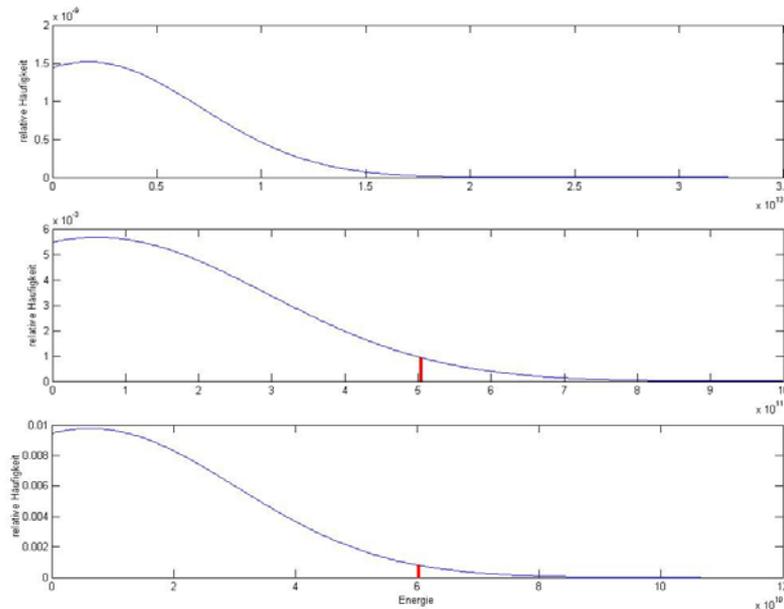


Abb. 5.2-4 Georadardaten (40 MHz) nach Moving-Average mit Amplitudenquadrierung:
Häufigkeitsverteilung der relativen Reflektivitätsenergie
Oben: Radargramm gesamt, *Mitte:* Anomaliebereich A mit Obergrenze,
Unten: Noisebereich B mit Untergrenze

Die Obergrenze des Anomaliefensters wurde aus dem Anomaliebereich A und der Verteilungskurve Abb. 5.2-4 (Mitte) bestimmt, die Untergrenze aus dem Noisebereich B und der Verteilungskurve Abb. 5.2-4 (Unten). Ausgehend von diesen statistischen Werteverteilungen lässt sich somit ein „Energiefenster“ ableiten, innerhalb dessen die für Feuchtezone charakteristischen Werte liegen. Mit diesem Energiefenster wurden die quadrierten Mittelwerte im Sinne eines Bandpasses gefiltert (Abb. 5.2-5).

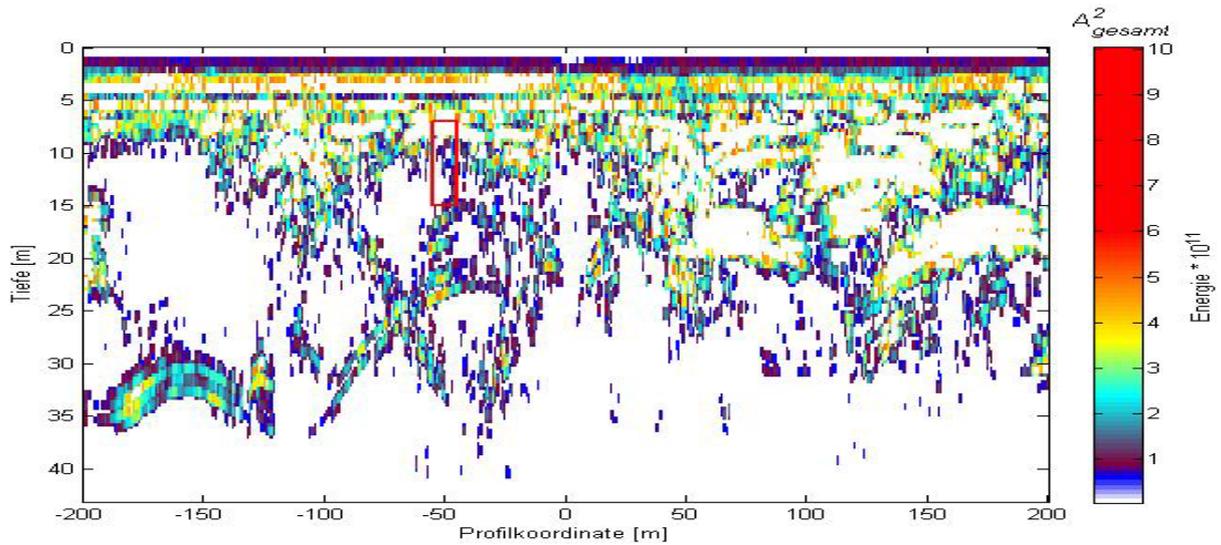


Abb. 5.2-5 Radargramm: Anwendung eines Moving-Average-Filters, Bandpass ΔE

Nach der Filterung wurde den gemäß Anomaliekriterium selektierten Samples der Wert 1 zugeordnet und eine Summation über ein Intervall von 1 m durchgeführt. Danach erhält man die 2D-Häufigkeitsverteilung in Abb. 5.2-6.

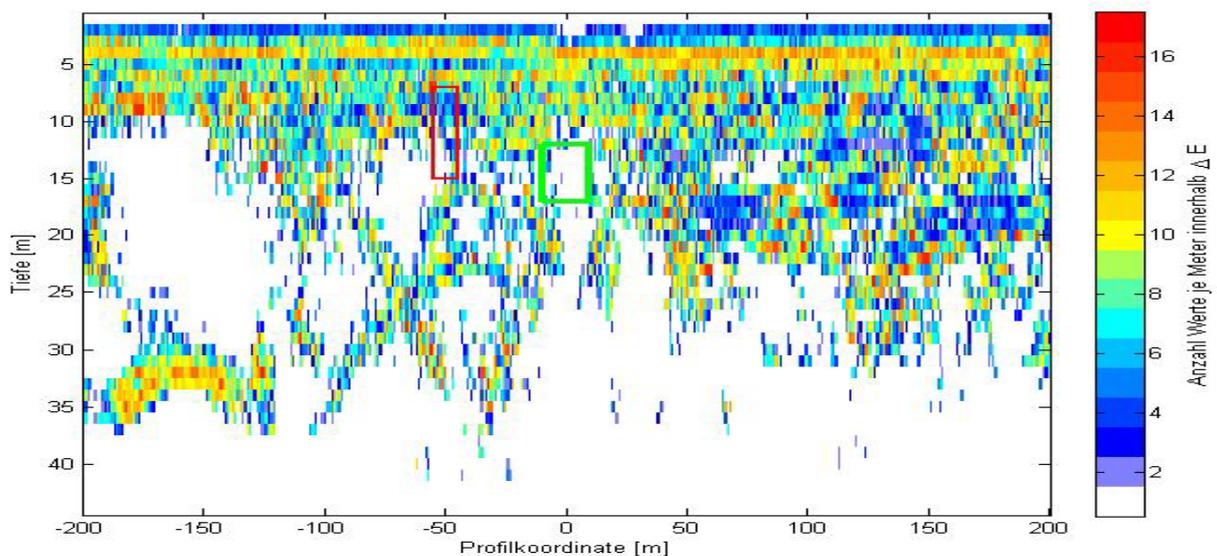


Abb. 5.2-6 Anzahl der Samples je m^2 , die im ausgewählten Energiefenster ΔE liegen

Anomaliekriterium Seismik

Die Anwendung des univariaten statistischen Verfahrens zur Berechnung der Anomaliekriterien für die Seismik entspricht dem Vorgehen beim Radar. Die Ausgangsdaten sind in Abb. 5.2-8 dargestellt.

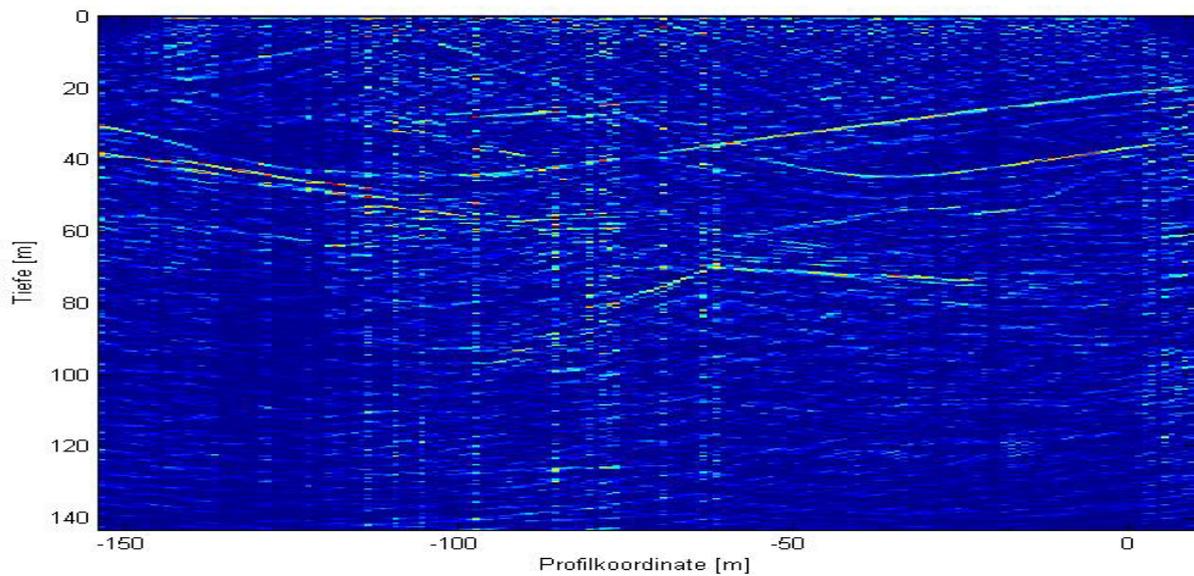


Abb. 5.2-8 Seismogramm. S-Wellen, migrierte Reflektivität

Die Abbildung zeigt die amplitudentreue migrierte Reflektivität der S-Wellen bis zur Tiefe von ca. 143 m. Zur Berechnung der reflektierten Energie wurden wie beim Georadar die Reflektivitäten mit einem Moving-Average-Filter gemittelt und quadriert. Die Mittelung erfolgte über ein Fenster mit einer Wellenlänge von 8 Samples. (Abb. 5.2-9)

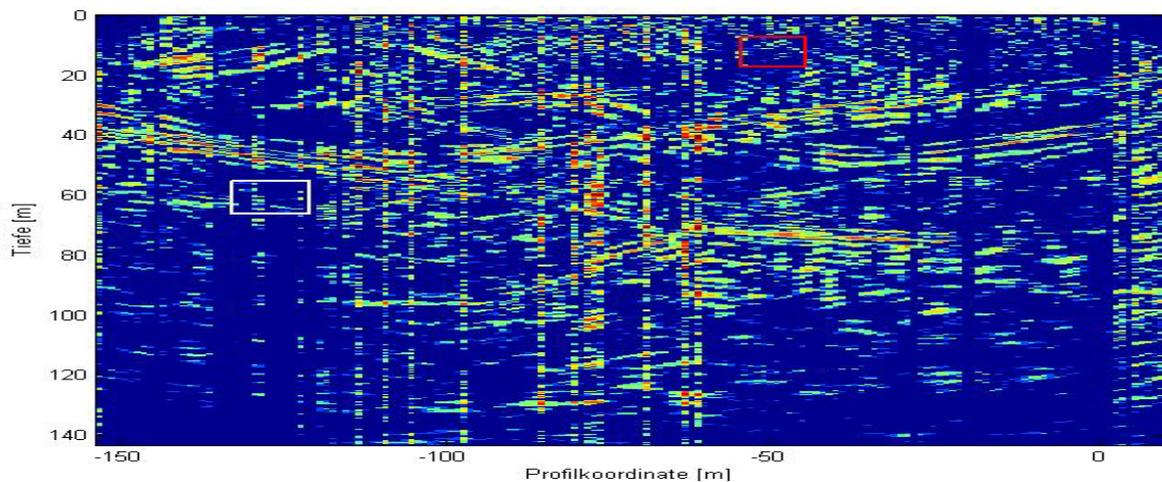


Abb. 5.2-9 Energieverteilung der Seismikdaten nach Moving-Average mit Amplitudenquadratur,
Rot: Definierter Anomaliebereich A
Weiß: Definierter Noisebereich B

Bereiche hoher „Energie“ sind im gesamten Seismogramm vorhanden, insbesondere im zentralen Teil in verschiedenen Tiefen. Schwache und sehr gestreute Energiemuster treten von Profilmeter $x = -80$ m bis -30 m im Tiefenbereich von 10 m bis 30 m auf. Die Häufigkeitsverteilungen wurden wiederum für diese ausgewiesenen Bereiche bestimmt. Daraus ergaben sich die Obergrenze und die Untergrenze des Energiefensters. Die anschließende Bandpass-Filterung führte zu Abb. 5.2-10. Mit der Zuordnung 1 oder 0 für die Erfüllung bzw. Nichterfüllung des Anomaliekriteriums und Aufsummierung dieser

Zuordnungswerte je Meter erhält man das Verteilungsbild der Sampleanzahl pro Gitterpunkt, die das Anomaliekriterium erfüllen.

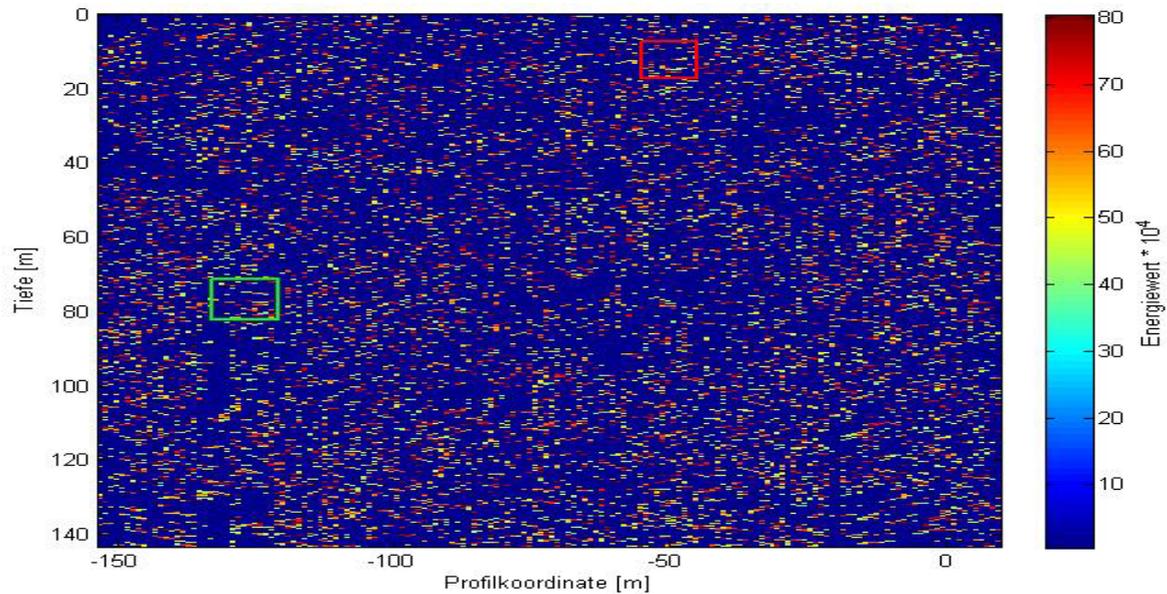


Abb. 5.2-10 Seismogramm. Quadriert, Moving-Average, gefiltert mit Bandpass ΔE

Anomaliekriterium Geosonar

Analog zu dem auf Radargramme und Seismogramme angewendeten Verfahren erfolgte die Bearbeitung der Sonardaten (Abb. 5.2-11).

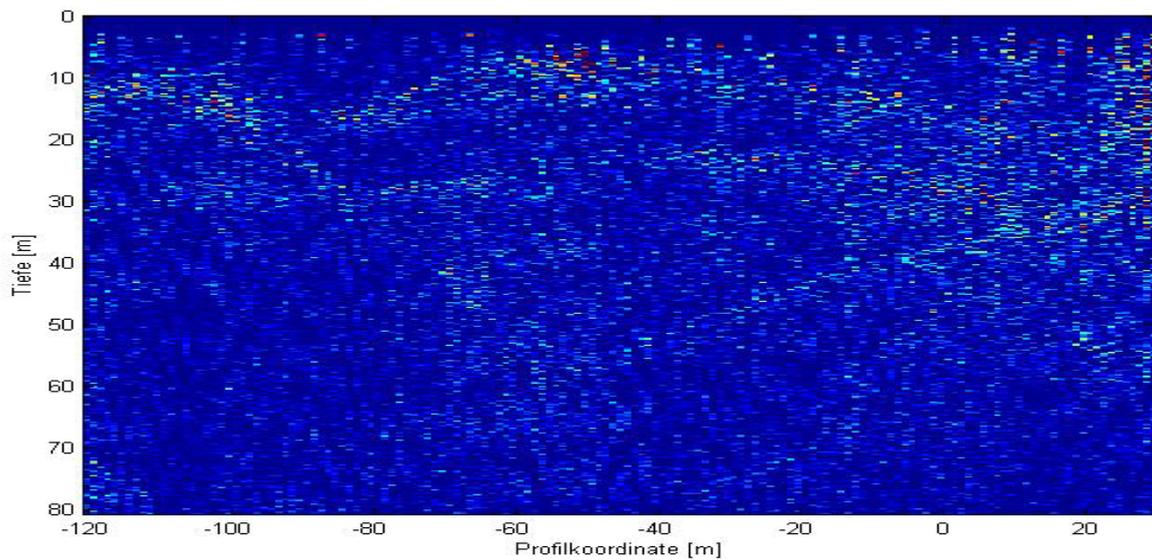


Abb. 5.2-11 Prozessiertes Sonargramm. Migrierte P-Wellen

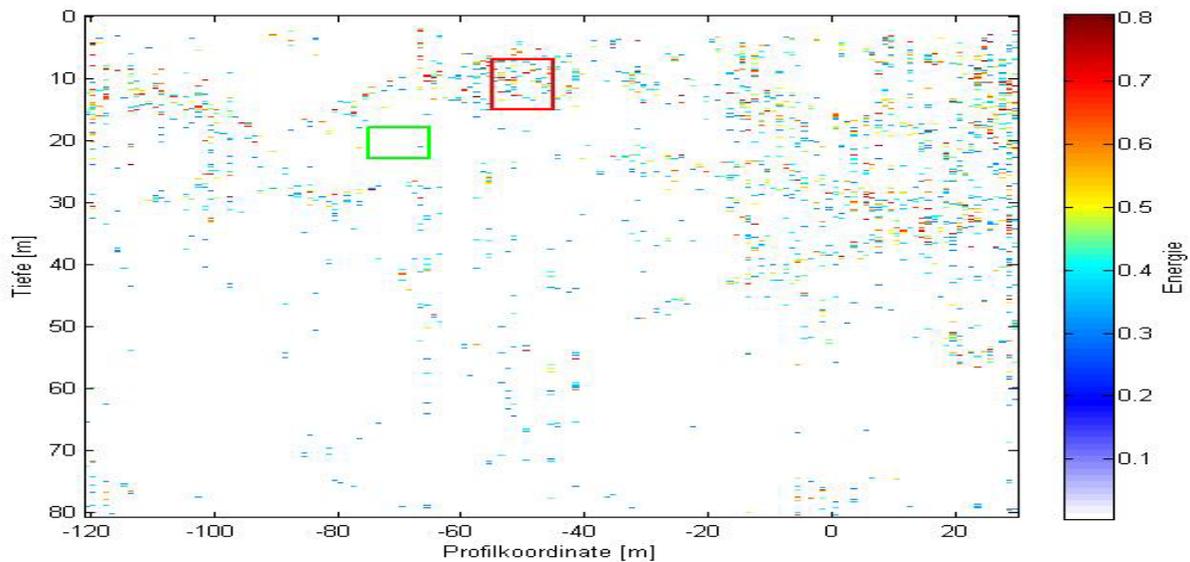


Abb. 5.2-12 Sonargramm. Quadriert, Moving-Average, gefiltert mit Bandpass
Rot: vermuteter Anomaliebereich A,
Grün: ausgewählter Noisebereich B

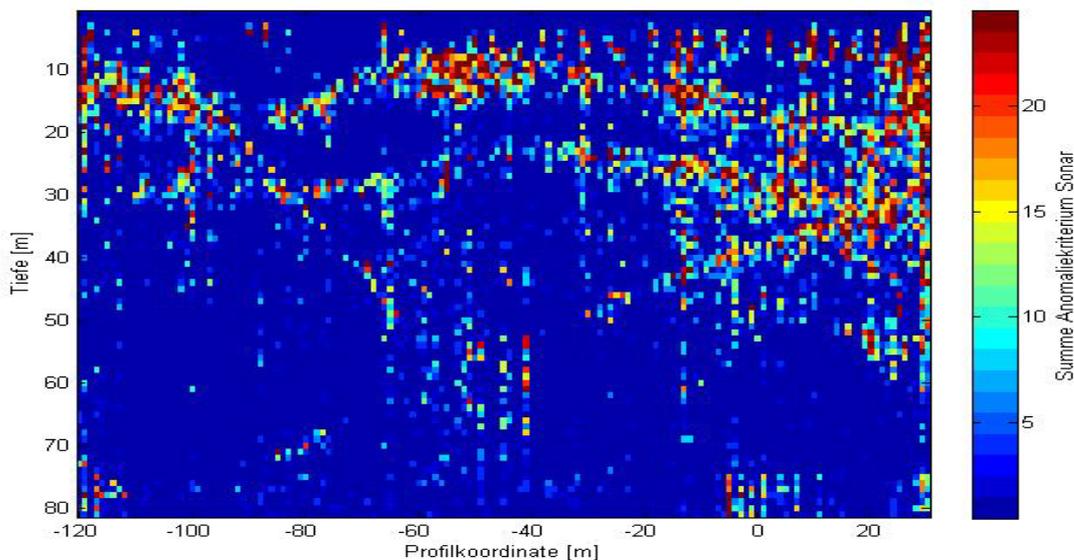


Abb. 5.2-13 Anzahl der Samples je m, die das Anomaliekriterium für Sonar erfüllen

Die Sonardaten zeigen einen anomalen Bereich bei Profilkordinate $x = -50$ m im Tiefenbereich um 10 m. Im weiteren Verlauf der Bearbeitung verstärkt sich der Anomaliecharakter in diesem Bereich und tritt besonders deutlich in der Darstellung der summierten Zuordnungszahlen (Abb. 5.2-13) hervor.

Anomaliekriterium Geoelektrik

Als Ausgangsdaten wurden die spezifischen elektrischen Widerstände der invertierten Widerstands-Sektion verwendet (Abb. 5.2-14). Es existieren drei Bereiche mit niedrigen elektrischen Widerstandswerten zwischen Profilkordinate $x = -50$ m und $x = +50$ m in Tiefen von etwa 5 m bis 25 m.

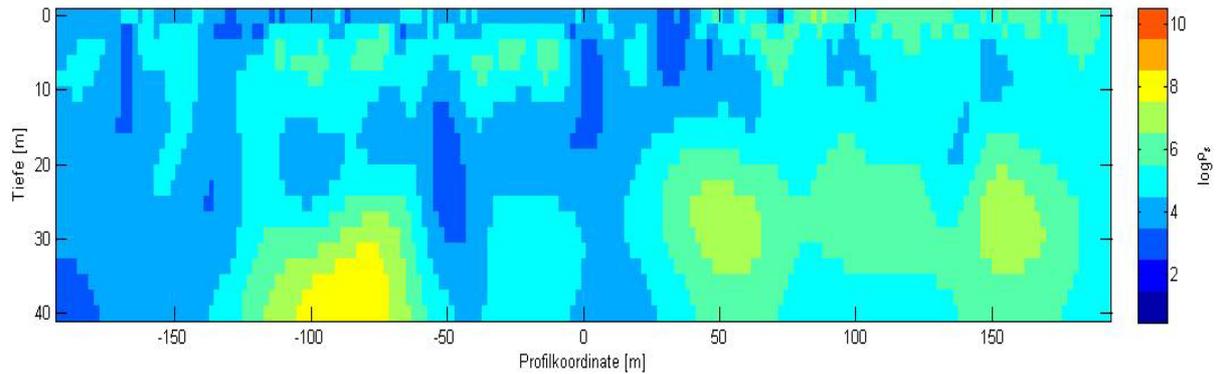


Abb. 5.2-14 Geoelektrik-Sektion: spezifischer elektrischer Widerstand ρ in Ωm (logarithmisch). Interpolation auf 1 m x 1 m – Gitter.

Im vermuteten Anomaliebereich (Profilkoordinate $x = -40$ m bis -60 m, $z = -10$ m bis -20 m) wurde die relative Häufigkeitsverteilung bestimmt (Abb. 5.2-15). Der häufigste Wert mit $\log(\rho) = 4.15$ (ca. $15000 \Omega\text{m}$) ist zunächst als Obergrenze angesetzt worden.

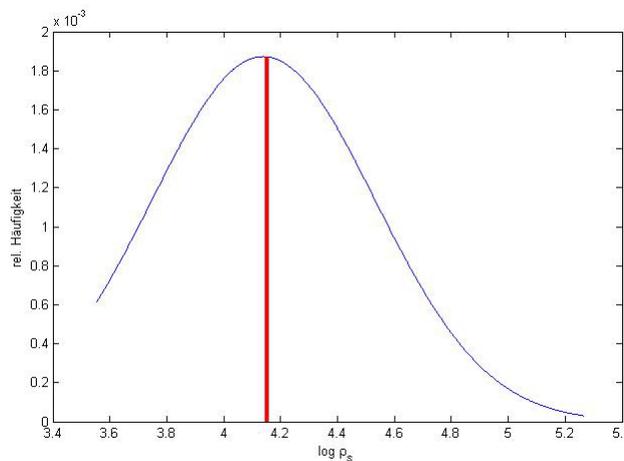


Abb. 5.2-15 Relative Häufigkeitsverteilung der spezifischen elektrischen Widerstände im Anomaliebereich

Um die Anzahl und Größe der interessierenden Bereiche mit geringen Widerständen genügend groß zu halten, ist nach einigen visuellen Tests ein Kompromiss mit einer Obergrenze von $20000 \Omega\text{m}$ gemacht worden ($\log \rho = 4.3$). Die entsprechenden Gitterzellen wurden mit „1“ belegt (Abb. 5.2-16).

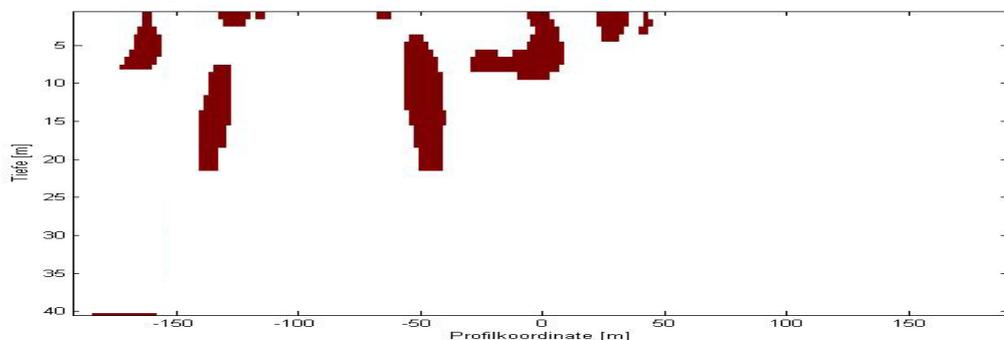


Abb. 5.2-16 Anwendung Anomaliekriterium Geoelektrik

Dunkel = Zellenbelegung mit 1, sonst 0

5.2.1.1.2 Teutschenthal

Die Anwendung des univariaten statistischen Verfahrens der Anomaliekriterien auf die Daten von Teutschenthal wird in verkürzter Form wiedergegeben, da das prinzipielle Vorgehen der Bearbeitung der Daten aus Sollstedt gleicht. Dargestellt werden die mit den berechneten Energiefenstern gefilterten Daten sowie die jeweiligen Anomaliekriterien.

Anomaliekriterium Georadar

Für die statistische Analyse ‚Georadar Teutschenthal‘ wurden als Ausgangsdaten die 40 MHz-Multi-Offset-Messungen verwendet. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Bearbeitungsergebnisse der Quadrierung nach Moving-Average-Filterung („Energieverteilung“) sowie die Anomaliekriterien nach der Filterung mit dem Energiefenster (Bandpass) dargestellt.

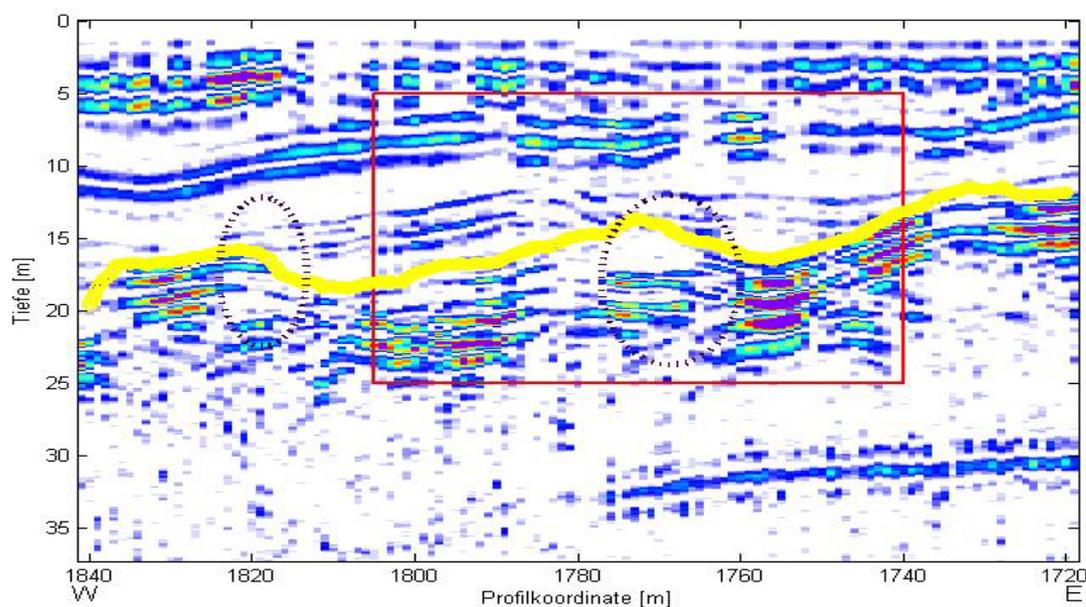


Abb. 5.2-17 Georadargramm. Quadriert, Moving-Average
Rot: Bereich Bruchfeld *Gelb:* Anhydritoberkante
Schwarz punktiert: Widerstandsminima

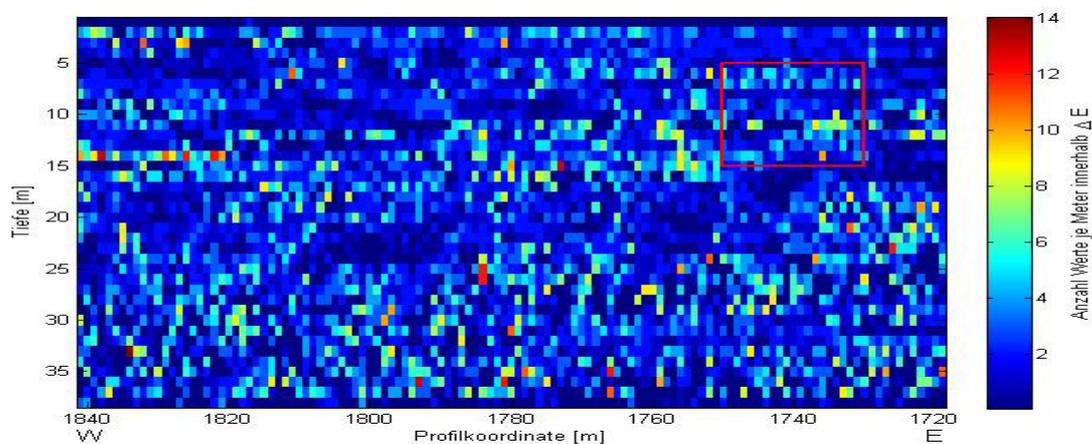


Abb. 5.2-18 Anzahl der Samples je m, die das Anomaliekriterium für Georadar erfüllen

In Abb. 5.2-17 deuten sich Problemzonen an. Der Bereich des Bruchfeldes (rotes Rechteck) zeigt stark gestörte Reflektoren mit vielen Einzelementen. Darin eingebettet befindet sich ein Widerstandsminimum und es wird die Reflexion der Oberkante des Anhydrits offensichtlich. Durch Summation der Samples, die das Anomaliekriterium erfüllen, ergibt sich eine 2D-Häufigkeitsverteilung (Abb. 5.2-18).

Anomaliekriterium Seismik

Analog der Georadardatenbearbeitung erfolgte die Aufbereitung der Seismikdaten. Ausgangspunkt war die migrierte P-Wellen-Stapelsektion (siehe Abschnitt 2.4).

In Abb. 5.2-19 ist ein Ausschnitt der „Energieverteilung“ aus dem Bereich der Bruchfeldzone dargestellt. Gut erkennbar sind die gestörten Bereiche um Profilkoordinate 1750 m und zwischen den Koordinaten 1760 m bis 1780 m. Diese stimmen weitestgehend mit den Radardaten überein.

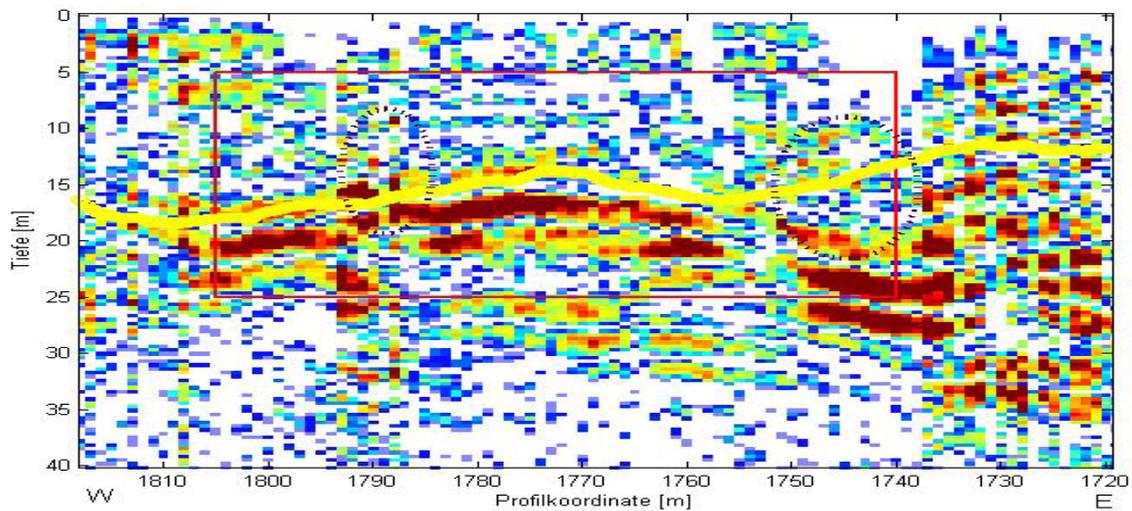


Abb. 5.2-19 Seismogramm. Amplitudenquadriert, Moving-Average-Filter
Rot: Bereich Bruchfeld *Gelb:* Anhydritoberkante
Schwarz punktiert: Widerstandsminima

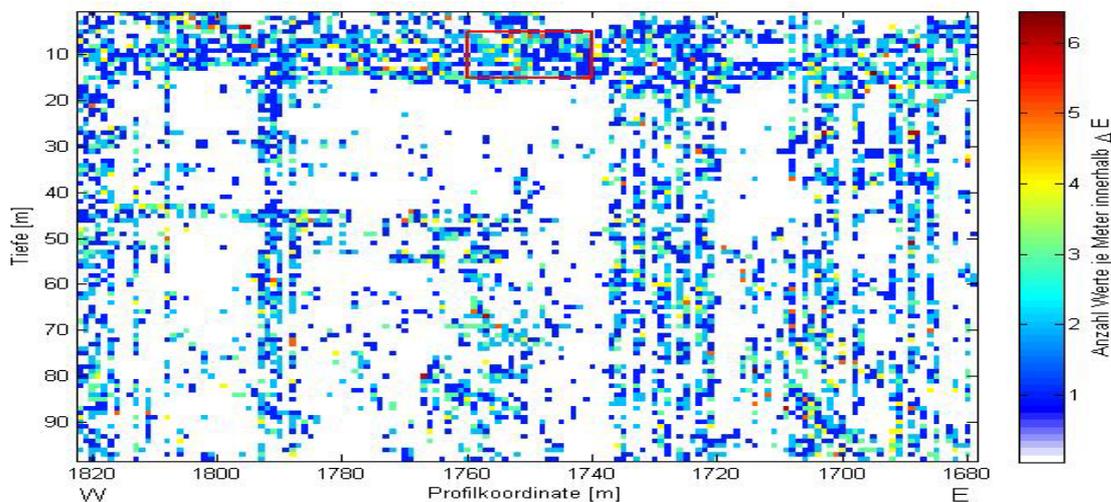


Abb. 5.2-20 Anzahl der Samples je m, die das Anomaliekriterium Seismik erfüllen

Anomaliekriterium Sonar

Ausgangsdaten der statistischen Analyse waren die SAFT-migrierten Sonargramme. Die Berechnungen der „Energieverteilung“ (Abb. 5.2-21) und zur Anomaliekriterien-Zuordnung erfolgte analog der Bearbeitung der Sonardaten aus Sollstedt. Daraus wurde die Anzahl der Samples je Meter, die das Anomaliekriterium Sonar erfüllen, ermittelt (Abb. 5.2-22).

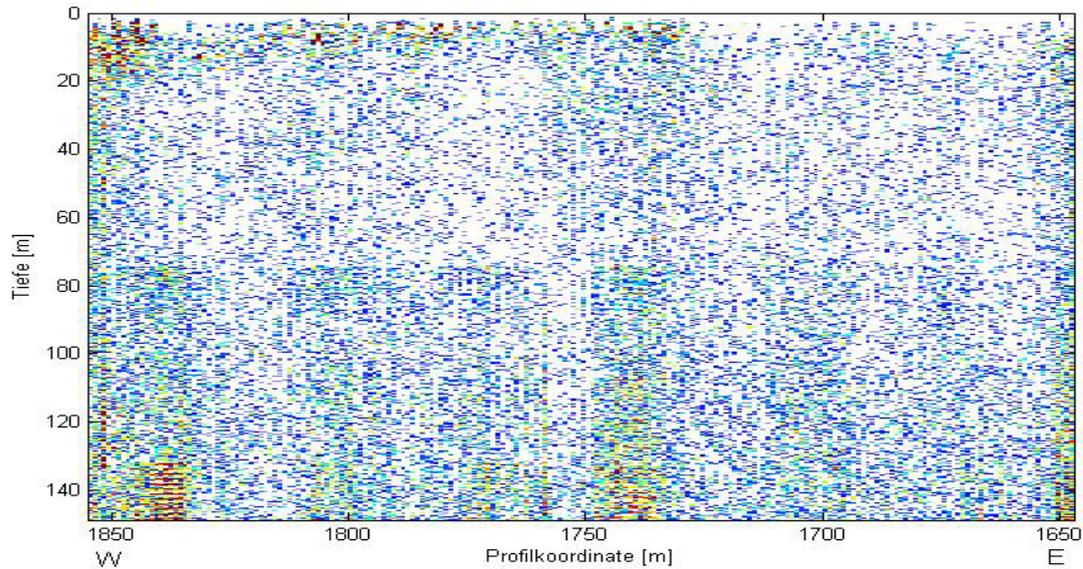


Abb. 5.2-21 Sonargramm. Amplitudenquadrat, Moving-Average-Filter

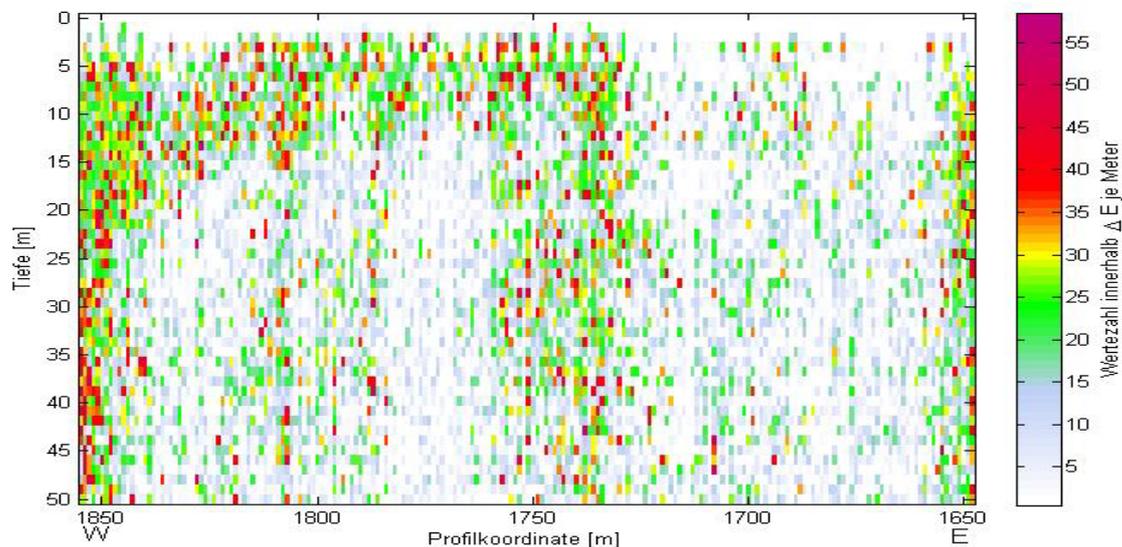


Abb. 5.2-22 Anzahl der Samples je m, die das Anomaliekriterium Sonar erfüllen

Anomaliekriterium Geoelektrik

Die invertierte Widerstands-Sektion wurde auf ein 1 m x 1 m Gitter interpoliert (Abb. 5.2-23). Im Tiefenschnitt sind zwei anomale Bereiche mit relativ geringen elektrischen Widerstandswerten um Profilkoordinate $x = 1745$ m und $x = +1800$ m in Tiefen von etwa 5 m bis 15 m vorhanden. Diese befinden sich in der Bruchfeldzone und decken sich mit den

Anomalien, die aus den Wellenverfahren resultieren. Ihre Lage oberhalb der Anhydritoberkante legt die Vermutung nahe, dass dort ein Feuchtevorkommen existiert.

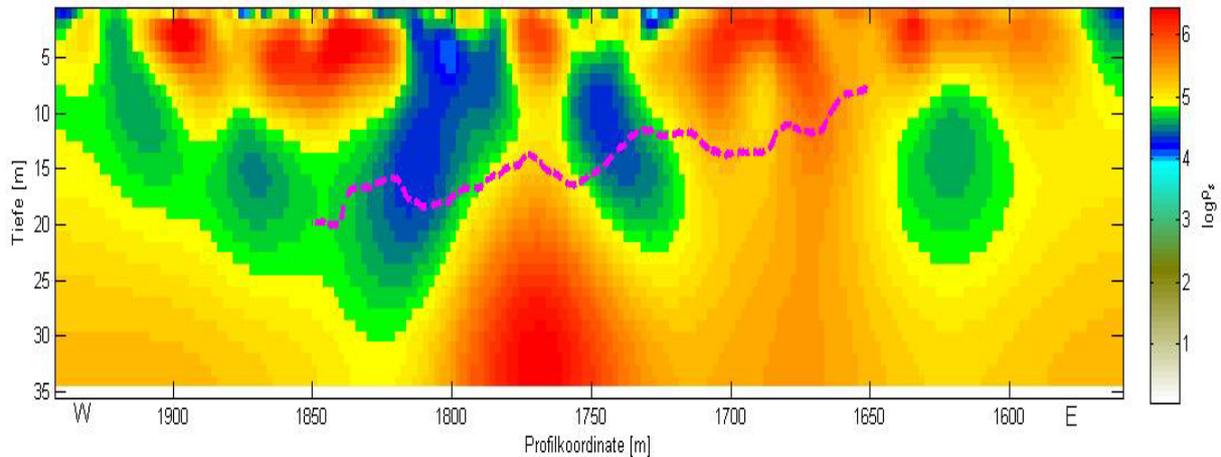


Abb. 5.2-23 Widerstandsmodell der DC-Geoelektrik (Verteilung des logarithmierten spezifischen elektrischen Widerstandes ρ) . 1 m x 1 m Gitter, *Linie gestrichelt*: Anhydritoberkante

Nach Tests mit verschiedenen Obergrenzen und visueller Beurteilung der gefilterten Widerstandsverteilungen, wurde schließlich die Obergrenze mit 50000 Ωm (entspricht dem Anomaliekriterium der Geoelektrik Teutschenthal) festgelegt. Im Bild Abb. 5.2-24 ist das gefilterte Ergebnis dargestellt. Die Gitterzellen, die das Anomaliekriterium Geoelektrik erfüllen, wurde eine „1“ zugewiesen (= Anomaliekoeffizient), den anderen Zellen eine „0“.

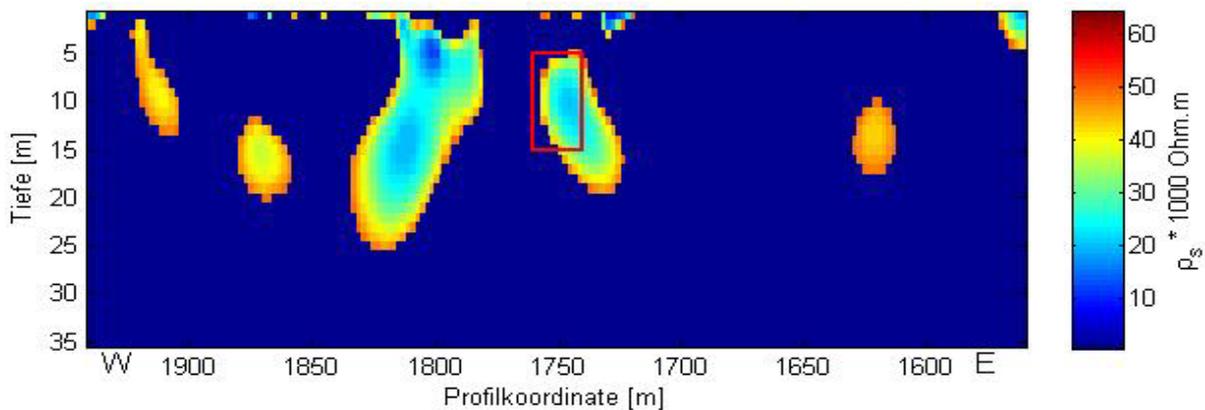


Abb. 5.2-24 Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes gefiltert mit der Obergrenze (Anomaliekriterium Geoelektrik Teutschenthal) von 50000 Ωm

5.2.1.2 Integrierte statistische Problemindizes

Aus den Anomaliekriterien kann durch Summation der verfahrensspezifischen Anomaliekoeffizienten ein gemeinsamer, verfahrensübergreifender Problemindex berechnet werden. Für die Wellenverfahren besitzen die Anomaliekoeffizienten Werte zwischen 0 und 1; bei der Geoelektrik sind nur Nullen oder Einsen vorhanden. Durch Summation der Werte

der Anomaliekoeffizienten jedes Verfahrens für jede Gitterzelle erhält man zunächst Zahlenwerte zwischen 0 und 4, die den Problemindex repräsentieren.

Wenn man das gleichzeitige Auftreten mehrerer Anomaliekoeffizienten oder deren Summen im Problemindex als Wahrscheinlichkeit definiert, kann den ausgewiesenen anomalen Bereichen eine „Interpretations-Wahrscheinlichkeit“ für das Vorhandensein von Feuchtezonen zugeordnet werden. In diesem Sinne wird das gleichzeitige Auftreten des jeweils maximalen Anomaliekoeffizienten, bezogen auf die 4 einbezogenen geophysikalischen Verfahren, gleich 100% gesetzt. Die Abstufungen nach unten ergeben sich dann für alle anderen Fälle.

Problemindex Sollstedt

Das Ergebnis der Summation der Anomaliekriterien ist in Abb. 5.2-25 dargestellt. Der Problemindex ist hier als Vertrauensindex wiedergegeben. Die rötlichen Gitterzellen markieren den Anomaliebereich. Die weiße Ellipse deutet die Lage des Minimums von ρ im Widerstandsmodell an. Bezogen auf die univariate Analyse Sollstedt liegt für den ausgewiesenen Anomaliebereich ein Vertrauenswert zwischen 50% bis 75% vor. Das entspricht der Aussage des Vorhandenseins einer Feuchteanomalie, mit bis zu 75% Wahrscheinlichkeit.

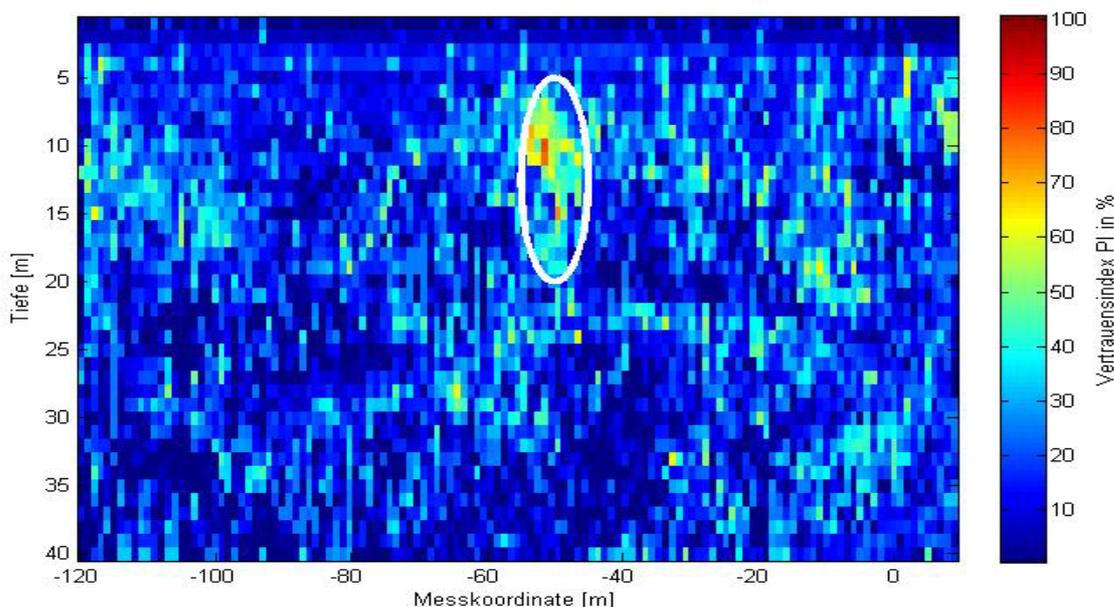


Abb. 5.2-25 Problemindex PI Sollstedt (Radar, Seismik, Sonar, Geoelektrik).
Weiße Ellipse: Lokation Widerstandsminimum

Problemindex Teutschenthal

Für die Daten aus Teutschenthal wurde der Problemindex in gleicher Weise berechnet. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Der Problemindex PI Teutschenthal wurde als Summe der Zuordnungszahlen (Summe Anomaliekoeffizienten) berechnet. Daraus wurde der Problemindex in Anteilen vom maximalen PI (Zuordnungswert 4) ermittelt (Abb. 5.2-26).

Das rote Rechteck kennzeichnet den gemeinsam überdeckten Bereich. Die Lage der zwei charakteristischen Anomaliezonen korrespondiert gut mit der Anhydritoberkante.

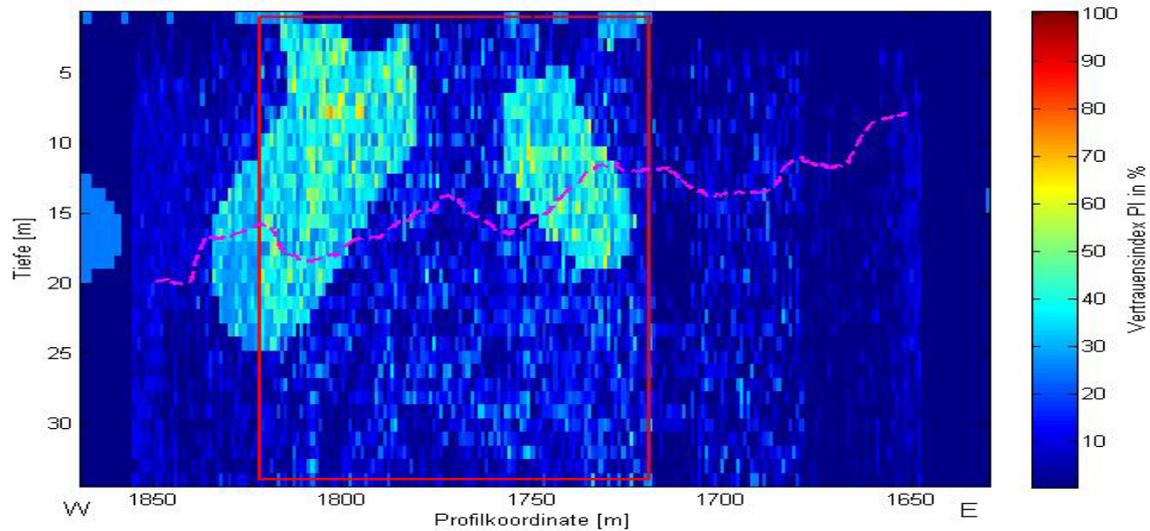


Abb. 5.2-26 Problemindex Teutschenthal (Radar, Seismik, Sonar, Geoelektrik).
Magenta gestrichelt: Anhydritoberkante

5.2.2 Anwendung der Lerntheorie zur Ermittlung von Problemzonen

Mit Hilfe der statistischen Lerntheorie wurden Zusammenhänge und Beziehungen geophysikalischer Größen aus den Daten verschiedener geophysikalischer Messmethoden in Form von Anomalienmustern erarbeitet. Die Arbeiten untergliederten sich in zwei Abschnitte.

Teil 1) Analyse und Test der prozessierten Messdaten:

- Aufbereitung der prozessierten Daten für die Bearbeitung mit statistischen Lernmethoden (Merkmalsextraktion, Überdeckungsbereiche)
- Parametertests für die Methoden Support Vector Machines und Artificial Neural Networks zur Anomalienmustererkennung

Teil 2) Theoretische Untersuchungen an Modellen:

- Validierung und Unterlegung des zu untersuchenden neuen methodischen Ansatzes (Test an zwei Modellen: Rechteckmodell und Quadermodell).
- Modellfindung durch mit Projektpartnern abgestimmte Gesteinsparameter

Durch Modellergebnisse und im Vergleich mit statischen Analysen der Messdaten wurden geeignete Referenzdaten für die Lernalgorithmen zur Mustererkennung und zur verallgemeinerten Aussage für die Komplexauswertung herausgearbeitet.

5.2.2.1 Mustererkennung

Als Mustererkennung bezeichnet man allgemein das maschinelle Erkennen und Auswerten von Mustern in Signalen. Sie wird als Verfahren der künstlichen Intelligenz oder als

statistische Lernmethode eingesetzt, um die Fähigkeiten der menschlichen Wahrnehmung nachzubilden. Beispielanwendungen finden sich auf Gebieten wie Spracherkennung, optische Zeichenerkennung, Robotik, Biometrie (Gesichtserkennung, Fingerabdrücke) oder Bilderkennung. Zur Mustererkennung werden verschiedene Ansätze wie neuronale Netze, k-nächste Nachbarn Klassifikatoren usw. (THEODORIDIS & KOUTROUMBAS 1999) benutzt.

Die Mustererkennung soll charakteristische Merkmale des zu erkennenden Objektes finden. Dazu dient ein Lernprozess. Mustererkennung mit Lernalgorithmen bedeutet Lernen an Beispielen. In der Geophysik sind stationäre Zeitreihen zu bearbeiten. Gesucht werden Muster, die Hinweise auf potentielle Anomalien geben. Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein bekannter Muster, an denen die Lernalgorithmen trainierbar sind. Das können z.B. bekannte Anomaliebereiche oder Anomaliecharakteristiken aus Modellrechnungen sein. Das Vorgehen bei der Mustererkennung lässt sich schematisch in vier Phasen einteilen: Datenaufbereitung, Merkmalsgewinnung, Lernen und Klassifikation.

Bei der quantitativen Auswertung der Messergebnisse mehrerer geophysikalischer Verfahren zur Mustererkennung anomaler Bereiche stehen nicht die herkömmlichen Reflexionsmuster von geologischen Strukturelementen im Vordergrund. Das Ziel ist vielmehr die Erkennung dessen, „was dazwischen“ liegt. Das bedeutet Muster zu erkennen, die visuell nur schwer fassbar sind. Die Muster dieser „verschmierten“, diffusen Informationen sind in konventionellen Amplitudendarstellungen nicht erkennbar. Mit Hilfe eines neuen Ansatzes unter Nutzung von Mustererkennungsmethoden ist es möglich, diese Informationen fassbar zu machen. Das Wesentliche dieser Methode ist die parallele Verarbeitung von Daten verschiedener geophysikalischer Messverfahren.

Im Rahmen des Projektes Salinargeophysik III wurden zwei Mustererkennungsmethoden verwendet: **Support-Vektor-Maschinen (SVM)** und **Künstliche Neuronale Netze (ANN)-Artificial Neuronal Networks**.

SVM als robustes, schnelles Klassifikationsverfahren, hat zunehmend in vielen Wissenschaftsbereichen Eingang gefunden. In der Geophysik wird diese Methode erst seit wenigen Jahren eingesetzt (z. B. CRISTIANINI & SHAW-TAYLOR 2000).

ANN wird seit etwa Mitte der 1980er Jahre in der Geophysik zur Datenbearbeitung eingesetzt (RUMELHART et al. 1986, LIPPMAN 1987). Bei den ANNs bedeutet das Lernen im Wesentlichen den Aufbau von Zahlenmatrizen mit Gewichtungen, in denen die charakteristischen Merkmale gespeichert sind. Im Prozess der iterativen Annäherung von Istwerten (Trainingsdaten) an Sollwerte (Klassenlabel) werden die Gewichtsverteilungen solange angepasst, bis die Abweichung hinreichend klein ist. Im Gegensatz dazu berechnen SVMs für mehrdimensionale Datensätze (Matrix mit allen Messdaten) Trennebenen, die Datenklassen voneinander abgrenzen.

Wesentliches Merkmal der verwendeten Mustererkennungsmethoden ist die simultane Verarbeitung mehrerer Datensätze unterschiedlicher geophysikalischer Verfahren.

In der folgenden Übersicht sind die Verarbeitungsschritte im Prozess der Mustererkennung schematisch zusammengefasst.

Verwendete multivariate statistische Lernmethoden

1. Berechnung der Enveloppen („momentane Energie“) / Radar, Seismik, Sonar
Berechnung der Widerstandswerte / Geoelektrik
2. Mittelung der Energie- bzw. Widerstandswerte auf 2D-Gitter, z. B. 1 m x 1 m
3. Normierung
4. Zusammenführung der normierten Einzeldatensätze in einen gemeinsamen Datenpool
5. Parametertests verschiedener neuronaler Netze und SVM an Lerndatensätzen
6. Training des neuronalen Netzes und SVM an ausgewählten Lerndatensätzen
7. Klassifikation: Anwendung des trainierten neuronalen Netzes und der SVM am gemeinsamen Datensatz

5.2.2.2 Support-Vektor-Maschinen (SVM)

In den letzten Jahren hat sich ein neuer Mustererkennungsansatz entwickelt: die Support-Vektor-Maschinen (SVM). Im Gegensatz zu neuronalen Netzen sind sie sehr leicht handhabbar, es existieren schnelle Lernalgorithmen und sie zeigen sehr gute experimentelle Ergebnisse (KLÖPPEL et al. 2008). Eine detaillierte Erläuterung zur Theorie der SVM ist bei VAPNIK (1995) und SCHÖLKOPF & SMOLA (2002) zu finden.

An dieser Stelle soll lediglich der prinzipielle Ansatz umrissen werden. Ausgangspunkt ist ein vorhandener Datensatz $w = (x_1, x_2, \dots, x_n)_k$ mit k Datenpunkten und je n Parametern x_i (z.B. elektrische Leitfähigkeit, Radar-Amplitude, Reflektivität, Geschwindigkeit, Dämpfungskoeffizient etc.). Jeder Datenpunkt wird klassifiziert in „Salzgestein“ oder „Salzlösung“, den sogenannten Klassen-Labels y_i

$$y_i = +1 \text{ für „Salzgestein“}$$

$$y_i = -1 \text{ für „Salzlösung“}$$

Gesucht ist nun die Klasse y_i , die zum Datenpunkt w_i gehört. In Abb. 5.2-27 ist ein 2D-Beispiel dargestellt. In einem separierbaren Datensatz, bestehend aus 2 Klassen, existieren viele mögliche Trennebenen.

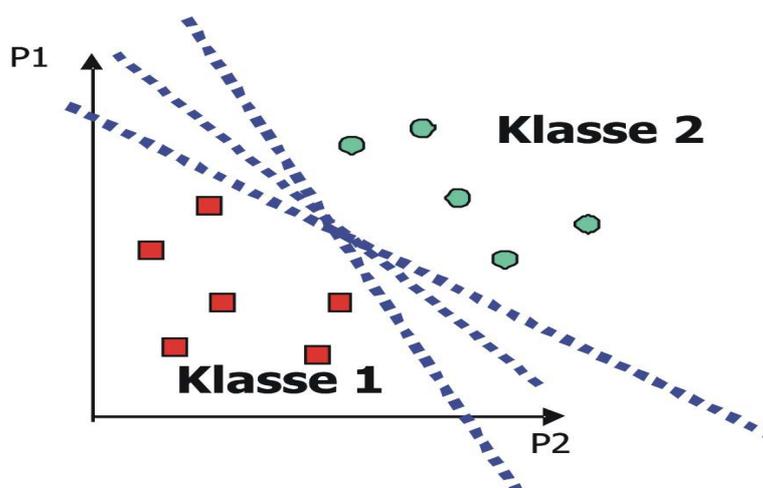


Abb. 5.2-27 Klassifizierung SVM: mögliche Trennebenen

Eine SVM berechnet diejenige Trennebene, die zu den ihr nächstgelegene Datenpunkten (Support-Vektoren) den maximalen Abstand hat. Diese Berechnung vollzieht sich über die

Bestimmung oder Abschätzung der zugrunde liegenden Abbildungsfunktion $f: w_i \rightarrow y_i$ im SVM-Algorithmus. Ziel ist es, dass die Trennebene soweit wie möglich von beiden Klassen entfernt ist, d.h. der Wert für m ist zu maximieren (Abb. 5.2-28). Das Auffinden der Klassengrenze erfolgt über die Lösung des Optimierungsproblems: Minimierung von $\|w\|^2$ unter der Bedingung

$$y_i (w^T x_i + b) \geq 1.$$

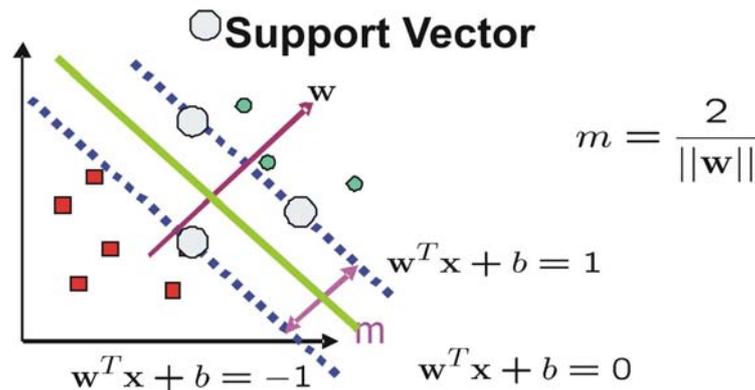


Abb. 5.2-28 Klassifizierung SVM: Supportvektoren

Bei der Anwendung der SVM-Methode auf geophysikalische Daten wird wie folgt vorgegangen:

- Abgleich auf einheitlichen Profilabschnitt und Tiefe = gemeinsam überdeckter Bereich
- Messpunkte in Übereinstimmung bringen, z.B. jeden Meter: $dx = 1 \text{ m}$
- Wellenverfahren: momentane Energie (Envelope) berechnen, Summierung über gleiche Tiefenintervalle dz , z.B. $dz = 1 \text{ m}$
- Geoelektrik: Interpolation der Widerstände auf entsprechende Gittergröße

Im Ergebnis erhält man Tiefenschnitte der momentanen Energie als Raster mit Elementen auf $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Danach werden diese messpunktbezogenen Daten in eine Matrix sortiert, mit x-Koordinate, z-Koordinate, Enveloppe 1 bis Enveloppe 4. Diese Matrix bilden die sogenannten Testdaten, d. h. den auszuwertenden Datensatz.

Der nächster Schritt ist die Erzeugung des Trainingsdatensatzes mit Klassenzuordnung: Label $Y=(+1; -1)$. Trainingsdaten können über Vorwärts-Modellierungen, aus prozessierten Daten der Einzelverfahren (wenn a priori Informationen über anormale Bereiche vorliegen) oder einer Kombination beider erzeugt werden.

Im dritten Schritt wird die SVM trainiert und nachfolgend die gelernten Trennebenen auf die Testdaten (umgearbeitete Messdaten) angewandt. Abschließend erfolgt eine räumliche Zuordnung der Klassen-Label auf die Volumenelemente des festgelegten Gitters.

5.2.2.3 Künstliche Neuronale Netze (ANN)

Ein künstliches neuronales Netz (Artificial Neuronal Network, ANN) besteht aus einer Anzahl von synthetischen Neuronen, die in Schichten angeordnet sind (Abb. 5.2-29). Jedes Neuron besitzt mindestens einen Eingang und im Allgemeinen nur einen Ausgang für die Ausgabewerte. Der Ausgabewert berechnet sich aus der gewichteten Summe aller Eingabewerte am Neuron über eine Aktivierungsfunktion.

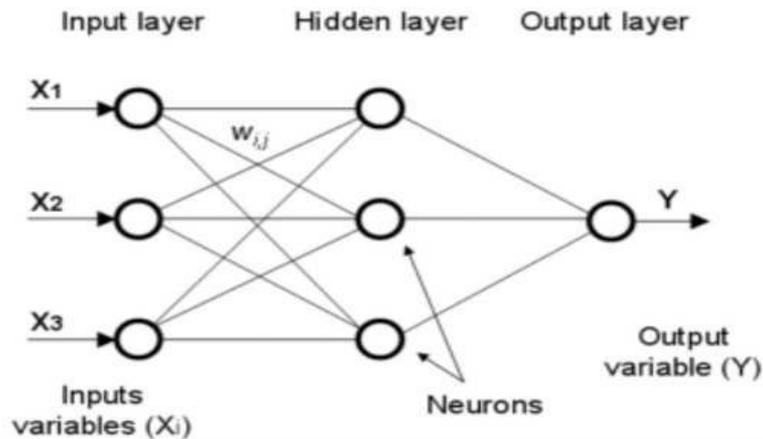


Abb. 5.2-29 Schema eines Artificial Neuronal Network ANN

Man unterscheidet hierbei noch überwachtes und unüberwachtes Lernen. Beim überwachten Lernen erfolgt der Lernprozess mit vorgegebenen Zielgrößen (Ausgabewerte). Das können Klassenwerte oder Merkmalswerte sein. Beim unüberwachten Lernen mit ANN wird die Klassifizierung innerhalb des neuronalen Netzwerkes durch Selbstorganisation realisiert, d.h. das neuronale Netz organisiert die Daten in Gruppen (cluster) durch unüberwachtes Training.

Von den zahlreich existierenden ANNs ist das sogenannte multilayer feed-forward ANN (vorwärtsgeregeltes Mehrschicht-Netzwerk) am weitesten verbreitet und wird auch hier verwendet. Dieses Netz hat eine Eingabeschicht, eine oder mehrere verdeckte Schichten und eine Ausgabeschicht und arbeitet gewöhnlich mit einem Backpropagation-Algorithmus (Abb. 5.2-30). Der Name des Algorithmus leitet sich aus dem Zurückführen des Fehlers ab. Dabei wird ein Eingabemuster angelegt und vorwärts durch das Netz geführt. Die Eingabe des Netzes wird mit der gewünschten Ausgabe verglichen. Die Differenz der beiden Werte wird als Fehler des Netzes definiert. Der Fehler wird nun wieder über die Ausgabe- zur Eingabeschicht zurück geschickt, dabei werden die Gewichte der Neuronenverbindungen in Abhängigkeit von ihrem Einfluss auf den Fehler geändert. Dies garantiert bei einem erneuten Anlegen der Eingabe eine Annäherung an die gewünschte Ausgabe.

Die Anwendung der ANN auf geophysikalische Daten erfolgt analog der SVM-Methode.

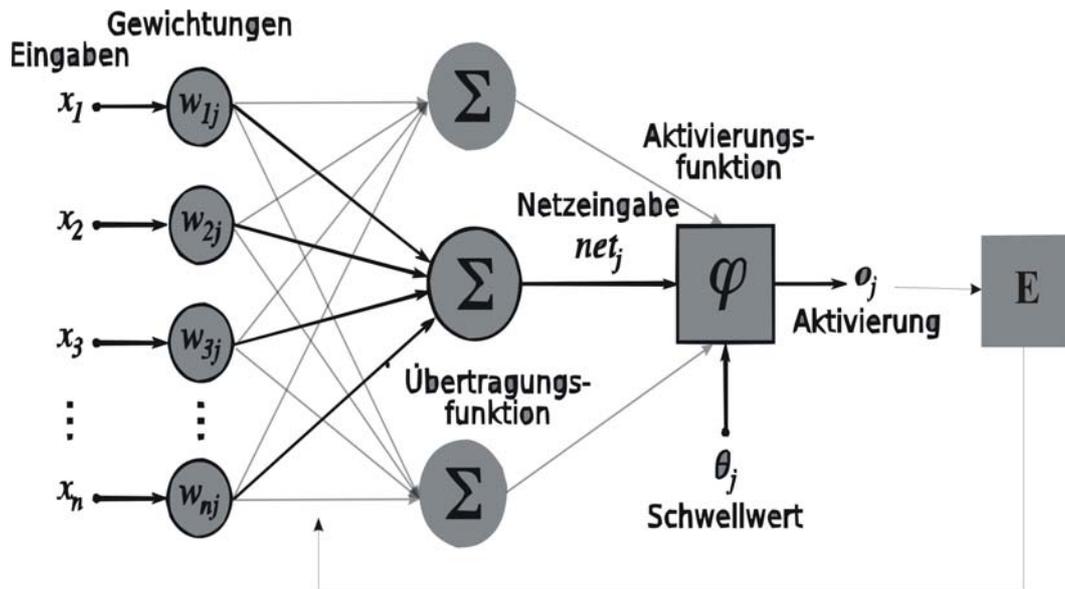


Abb. 5.2-30 Schema der Backpropagation

5.2.2.4 Modellrechnungen (SVM und ANN)

Um das Problem der Mustererkennung geophysikalischer Anomalien im Salinar zu analysieren, wurde mit einfachen Modellrechnungen die prinzipielle Anwendbarkeit dieser Verfahren untersucht.

Modell: Quader

Als Modell diente ein Quader in einem horizontal geschichteten Medium. Angesetzt wurden zwei Schichten: Anhydrit unter Steinsalz. In die Anhydritschicht ist eine Salzlösungszone mittlerer Größe eingelagert („Quader“). Für die Schichten und die Salzlösungszone wurden plausible Werte für die Gesteinsparameter gewählt (Tab. 5.2-3) die aus Messungen und der Literatur gemittelt wurden (GEVANTMAN 1981, LANDOLT-BOERNSTEIN 1950, MUNDRY & THIERBACH 1985).

Tab. 5.2-3 Im Modell verwendete gesteinsphysikalische Parameter

Parameter	ϵ_r	ρ_s	d	v_s v_p
Gestein				
Steinsalz (Na 2, 3)	5,75	10^7	2,1	2600 4500
Kalisalz (K)	6,0	10^7	1,9	2000 4000
Anhydrit (A)	6,7	10^5	2,9	3300 6000
Hauptdolomit	7,25	10^7	2,8	3300 5500

Annahmen Modellparameter				
Modellschicht 1	5,8	10^7	2,1	2600 4500
Modellschicht 2	6,7	10^7	2,9	3300 6000
Salzlösungszone (L)	7,5	10^2	2,9	3000 5000 ($v_L < v_A$)
Übergangszone	7,0	10^3	2,9	3000 5000 ($v_L < v_A$)

- ϵ_r Dielektrizitätskonstante
- ρ_s spez. elektrischer Widerstand [Ωm]
- d Dichte [g/cm^3]
- v_p, v_s P-/S-Wellengeschwindigkeit [m/s]
- v_L Wellengeschwindigkeit [m/s] Salzlösungszone
- v_A Wellengeschwindigkeit [m/s] Anhydrit

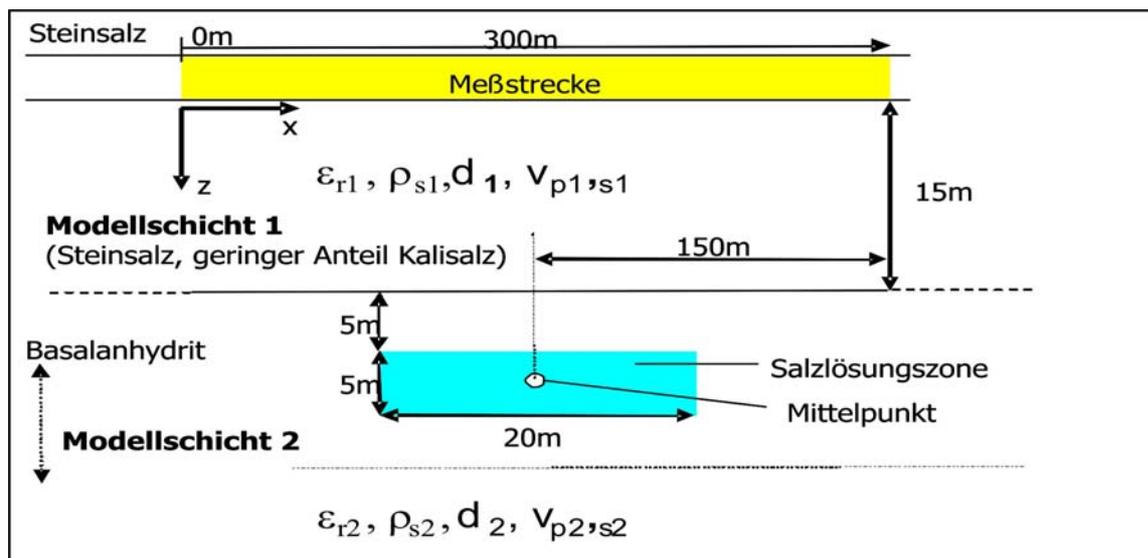


Abb. 5.2-31a Quadermodell mit Salzlösungszone

- ϵ_r Dielektrizitätszahl
- ρ_s spezifischer elektrischer Widerstand [Ωm]
- d Dichte [g/cm^3]
- v_p, v_s P-/S-Wellengeschwindigkeit [m/s]

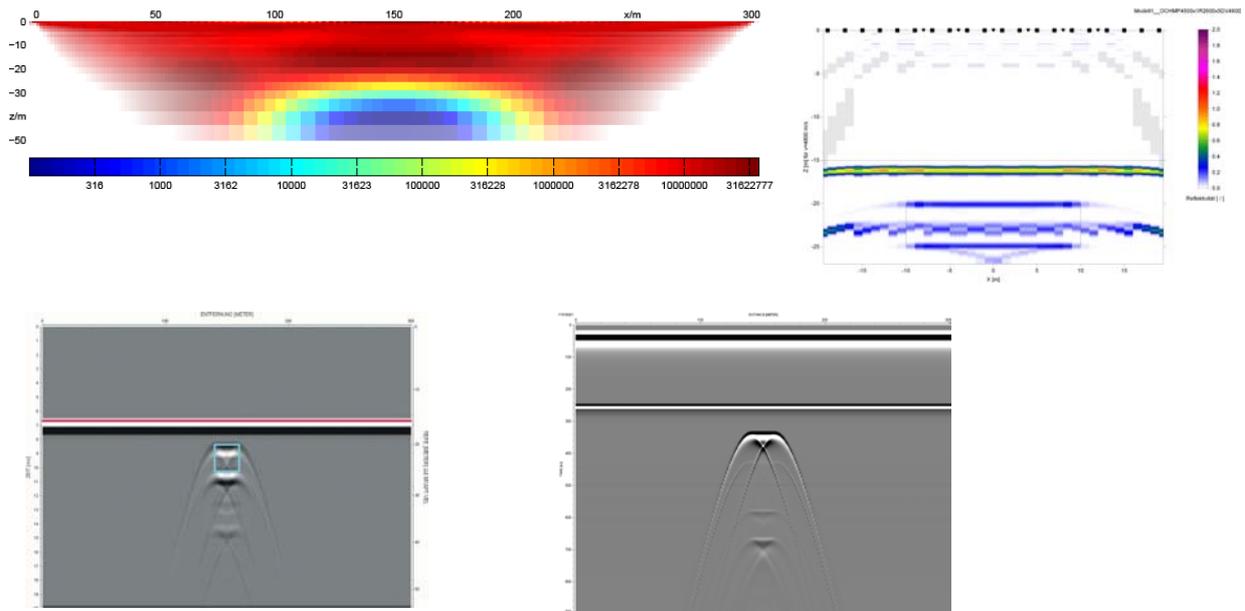


Abb. 5.2-31b Ergebnisse der numerischen Modellrechnungen für Radar, Geoelektrik, Sonar und Seismik basierend auf dem Quadermodell

Die numerische Modellierung erfolgte durch die Projektpartner (Abb. 5.2-31b). Nach Vorliegen der Modellierungsergebnisse wurden die Modelldaten einem einheitlichen 2D-Gitter zugeordnet (Abb. 5.2-32).

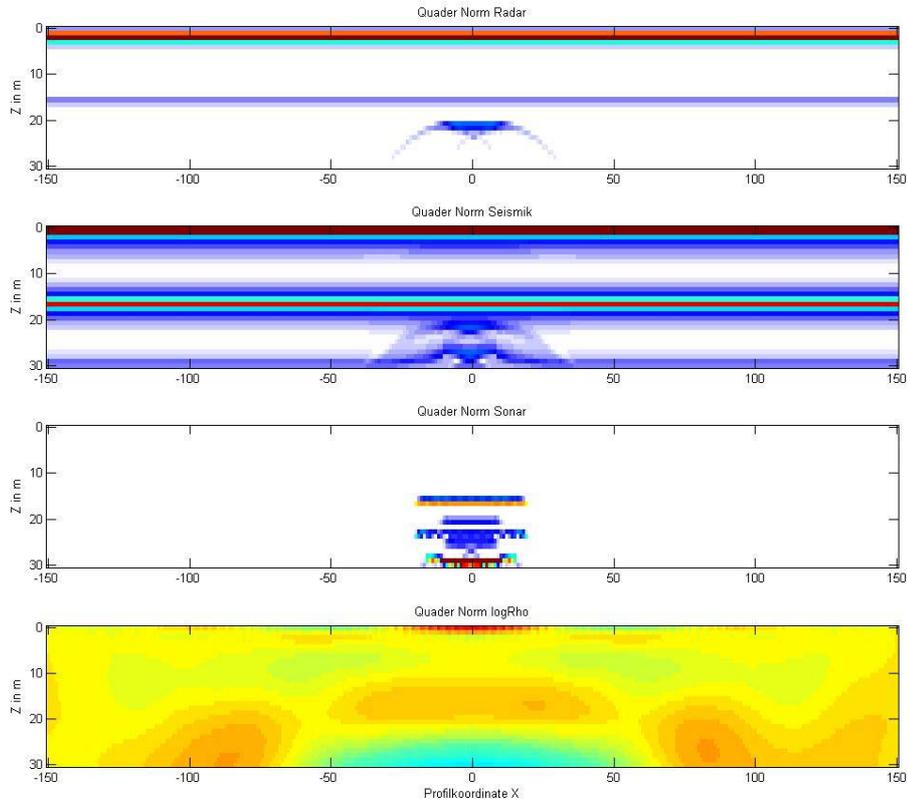


Abb. 5.2-33 Modellierung Quader im einheitlichen Gitter (Radar, Seismik, Sonar, Geoelektrik)

Die geometrisch zugeordneten Datensätze wurden auf eine für SVM und ANN geeignete Struktur angepasst. Nach Testung verschiedener Parameter für die Lernalgorithmen SVM und ANN erfolgte die Mustererkennung mit beiden Methoden. Als Trainingsdaten dienten die Werte der vorgegebenen Salzlösung im „Quader“ und ein ungestörter Teilbereich. Die Aufgabe der Mustererkennung bestand in der richtigen Klassifizierung des vorgegebenen Bereiches. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.2-33 und 5.2-34 dargestellt.

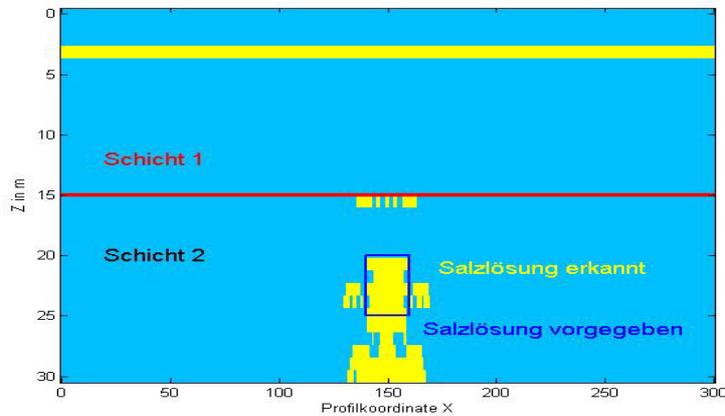


Abb. 5.2-33 Ergebnis der SVM-Methode: Modell Quader, Daten aus Radar, Seismik, Sonar, Geoelektrik

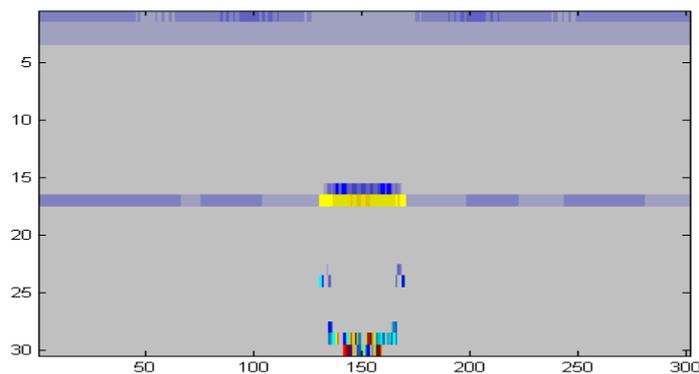


Abb. 5.2-34 Ergebnis der ANN-Methode: Modell Quader, Daten aus Radar, Seismik, Sonar, Geoelektrik

Sowohl der SVM als auch ANN erkannten die vorgegebene Quaderstruktur. SVM erkennt alle Gitterzellen im Quaderbereich, aber auch Gitterzellen außerhalb dieser Zone (falsche Klassifizierung). Der Quader (fiktive Salzlösung) konnte hinreichend genau abgebildet werden. Dagegen erkennt das verwendete ANN nur den Rand der Anomalie.

Die Übertragbarkeit der Daten auf reale Verhältnisse sowie auf die einzelnen Messlokationen ist problematisch, da sich die berechneten Modelldaten von den Messdaten unterscheiden. Das betrifft sowohl die Amplitudengröße als auch das Signal-Rauschverhältnis. Eine strenge Validierung der realen Verhältnissen sehr nahe kommenden Modellsimulationen von Salzlösungen ist derzeit noch nicht möglich; jedoch die Ableitung allgemeingültiger Größenverhältnisse aus den Rechenwerten zum Erhalt geeigneter Trainingsdaten für die Mustererkennung. Daher erfolgte der Aufbau von Lerndatensätzen sowohl empirisch auf der Grundlage von a-priori-Kenntnissen bekannter Salzlösungszonen (Bohrungen in Sigmundshall, Tropfstelle Bischofferode) als auch auf den Modellergebnissen.

5.2.3 Quantitative Charakterisierung von Problemzonen an Referenz-Standorten mittels multivariater Lernmethoden

5.2.3.1 Ergebnisse Sollstedt

Ausgangspunkt der nachfolgenden Bearbeitungen bildeten die in Abbildung (Abb. 5.2-35) dargestellten prozessierten geophysikalischen Messdaten.

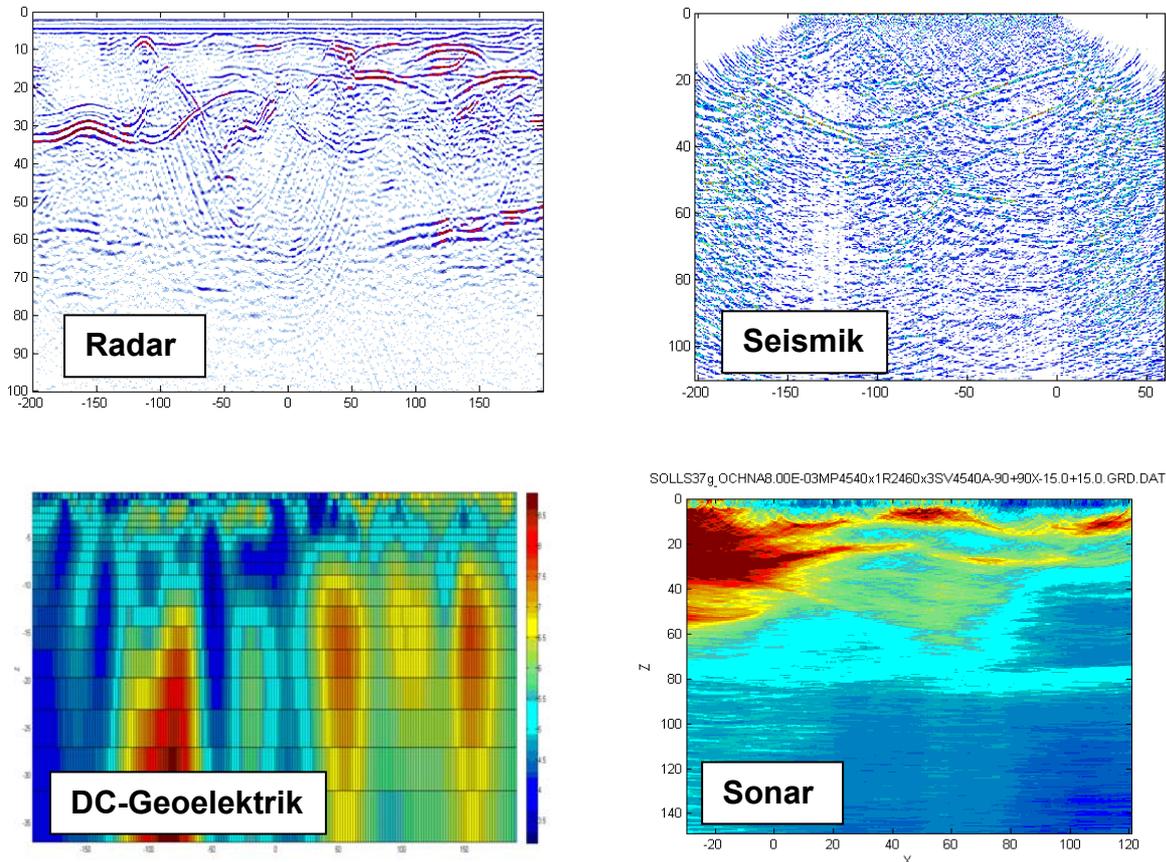


Abb. 5.2-35 Sollstedt prozessierte Messdaten der Einzelverfahren: Anomaliebereiche werden erfasst (alle Darstellungen tiefengestreckt)

Der gemeinsam überdeckte Bereich umfasste 150 Profilmeter und eine Tiefe bis 40 m unterhalb der Streckensohle

Zur integrierten Auswertung der Messdaten wurden zunächst die gemeinsam überdeckten Bereiche ausgewählt und anschliessend verschiedenen Parametertests der Lernalgorithmen unterzogen sowie das SVM- und das ANN-Verfahren angewendet. Die prozessierten Messdaten der Einzelverfahren weisen auf einige übereinstimmende aber keine zwingend notwendig interpretierbaren anomalen Bereiche im untersuchten Gesteinsbereich hin (Abb. 5.2-36).

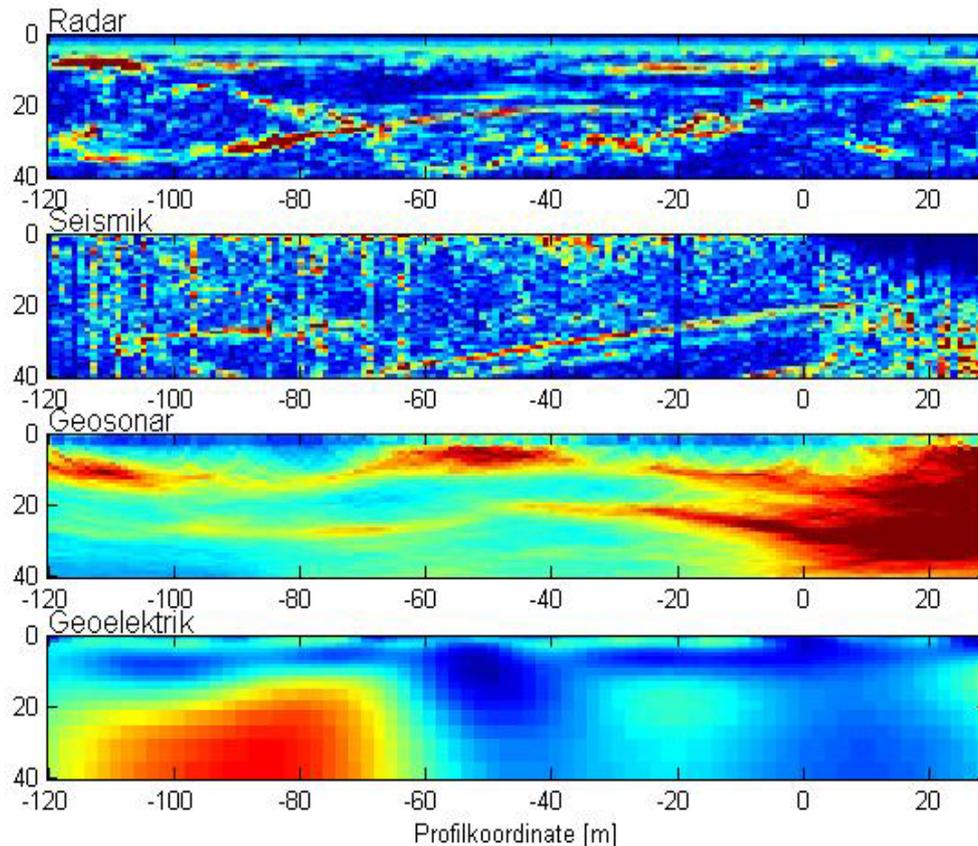


Abb. 5.2-36 Sollstedt: Angepasste Messdaten für die Mustererkennung
Radar, Seismik, Sonar, Geoelektrik

Allein auf der Grundlage dieser Darstellung ist eine belastbare integrierte Interpretation nicht möglich. Zwar weisen einige Daten im Bereich um Profilkordinate $x = -50$ m auf eine Anomalie hin. Sie sind aber erst die kombinierte Interpretation aller Daten der anderen geophysikalischen Verfahren als solche unterlegt.

Es zeigte sich, dass die Anwendung der Methode auf die Messdaten standortspezifisch ist, also die Daten anderer Messlokationen sind nicht systematisch auf neue Messorte übertragbar sind. Aus diesem Grund erfolgte für beide Mustererkennungsmethoden der Aufbau von Lerndatensätzen empirisch auf der Grundlage der von der Geoelektrik ermittelten Bereiche mit den Widerstandsminima. Sie wurden zusätzlich abgeglichen mit a-priori- Kenntnissen bekannter Salzlösungszonen (Bohrungen in Sigmundshall, Tropfstelle Bischofferode) und mit den Modellergebnissen vom „Quadermodell“.

Mustererkennung mit SVM

Die Methode der SVM klassifiziert die unbekanntes Daten anhand der gelernten Muster ausschließlich in zwei Kategorien: Muster erkannt und Muster nicht erkannt. Ersteres entspricht dem zugeordneten Klassenlabel 1, letzteres dem Klassenlabel -1. Das bedeutet, dass in der Ergebnisdarstellung auch nur zwei Klassen sichtbar werden. Als Resultat der Bearbeitung ergibt sich für den Untersuchungsbereich die Abbildung 5.2-37.

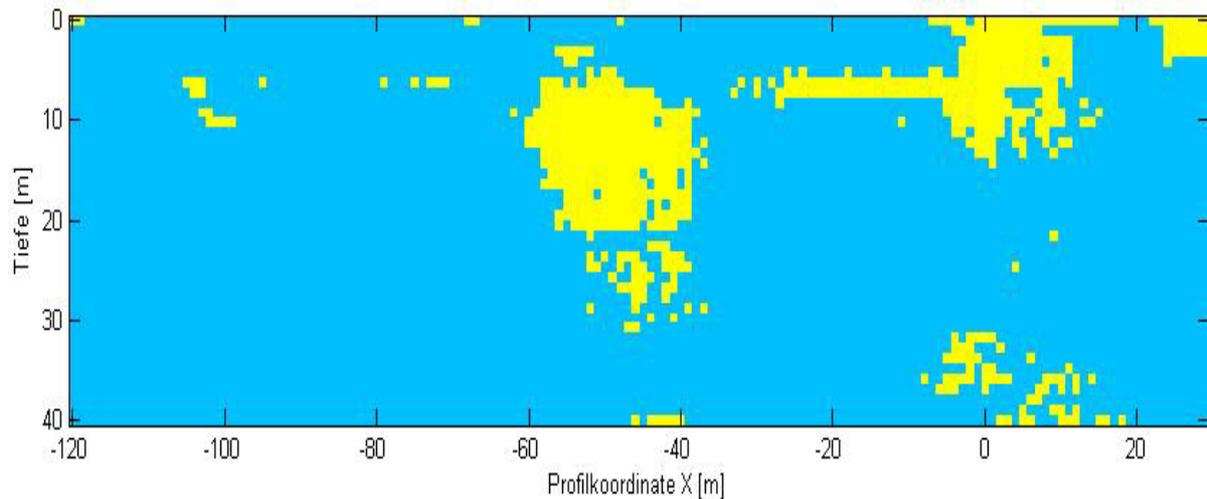


Abb. 5.2-37 Sollstedt SVM: Georadar, Seismik, Sonar, Geoelektrik.
(gelb: Klassenlabel 1 - Muster erkannt, blau: Klassenlabel -1 - Muster nicht erkannt)

Das Bild ähnelt der Darstellung der Geoelektrikdaten. Dieser Fakt ist jedoch erklärbar, da zum einen die Daten der Geoelektrik im Datenpool der Trainingsdaten enthalten sind und zum anderen im Datenpool der zu untersuchenden Messdaten vorkommen. Das heißt, dass das Erkennungsprogramm diese Muster finden muss, wenn solche vorhanden sind. Zur Überprüfung, ob die Mustererkennungsmethode SVM Übergewichtungen vornimmt, wurden die Daten ohne Geoelektrik durchmustert. Das Ergebnis ist in Abb. 5.2-38 dargestellt.

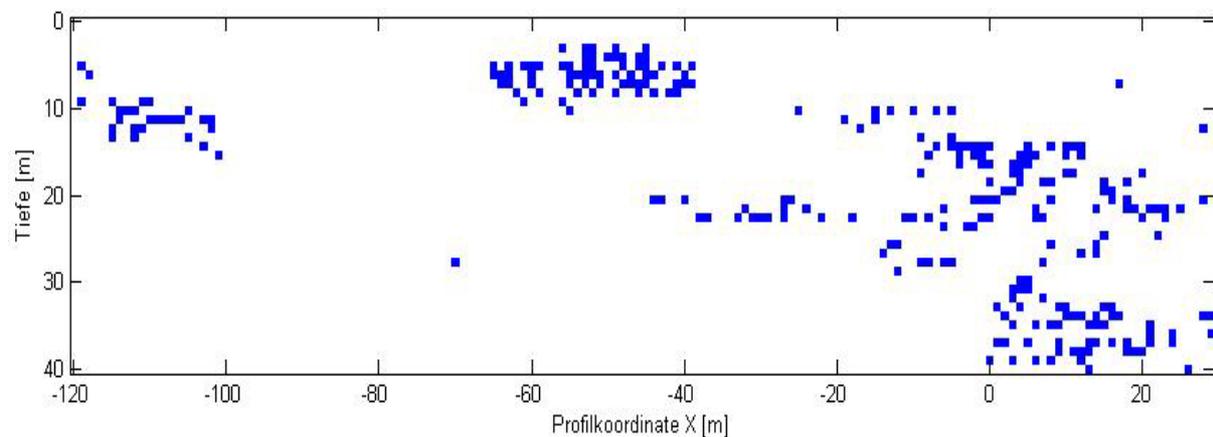


Abb. 5.2-38 Sollstedt SVM: Radar, Seismik, Sonar. Ohne Geoelektrik

In dieser Abbildung, die ausschließlich auf den Daten der Wellenverfahren basiert, sind anomale Zonen in ähnlicher Weise wie bei Einbeziehung der Geoelektrikdaten vorhanden.

In der Darstellung SVM ohne Geoelektrik spiegeln sich anomale Zonen in den Bereichen zwischen Profilmeter $x = -120$ m bis $x = -100$ m, $x = -60$ m bis $x = -40$ m sowie $x = -0$ m bis $x = +20$ m wieder. Die SVM ohne Geoelektrik kann jedoch den großen leitfähigen Bereich um Profilkordinate $x = -50$ m nur im oberen Teil finden. Insgesamt liefert die SVM-Methode einen Beitrag zur Erhöhung der Vertrauenswürdigkeit der Aussagen über die von den Einzelverfahren detektierten anomalen Bereiche.

Mustererkennung mit ANN

Um die Aussagesicherheit weiter zu verbessern, wurden aus der Palette der Mustererkennungsmethoden verschiedene künstliche neuronale Netze eingesetzt. Die künstlichen neuronalen Netze zeigten unterschiedliche Ergebnisse, je nachdem, welche Parameter verwendet wurden. Das betrifft insbesondere die Netzwerkarchitektur (Anzahl verdeckter Schichten, Neuronenanzahl), die Lernrate sowie die vorzugebende Anzahl der Iterationsschritte.

Die Resultate der ANN-Bearbeitung zeigen geologisch und geophysikalisch erklärbare Muster, die im Wesentlichen mit denen aus der SVM- Bearbeitung übereinstimmen. Sowohl die SVM-Bearbeitung als auch die neuronalen Netze lieferten ähnliche Ergebnisse. Als Beispiele sind in den Abbildungen Abb. 5.2-39 bis Abb. 5.2-40 die Ergebnisse von Bearbeitungen mit verschiedenen ANN unter Einbeziehung verschiedener geophysikalischer Verfahren dargestellt. Hierin bedeuten N=Neuronenanzahl, L=Lernrate, I=Iterationsschritte; x-Achse = Profilkordinaten, z-Achse = Tiefe unter Sohle. Die Trainingsdaten wurden aus den Bereichen $x = -45$ m und $x = -100$ m erzeugt und empirisch abgeglichen.

Einige Beispiele der Anwendung ANN ohne Geoelektrik zeigen, dass für den Standort Sollstedt mit dieser Lernmethode unter ausschließlicher Verwendung der Wellenverfahren keine befriedigenden Ergebnisse zu erzielen waren (Abb. 5.2-39 und 40). Es zeichnen sich zwar anomale Muster ab, diese können jedoch nicht zweifelsfrei einer bestimmten geologischen Situation zugeordnet werden.

ANN Sollstedt: Radar, Seismik, Sonar. Ohne Geoelektrik

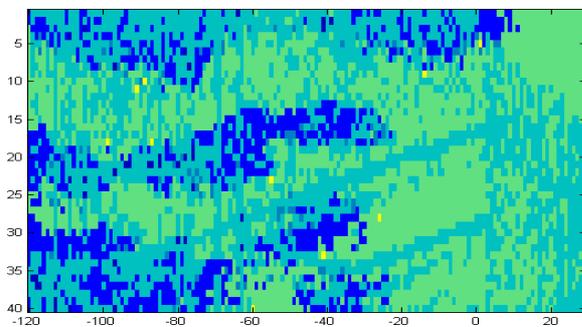


Abb. 5.2-39 ANN mit N=10, L=0.5, I=100

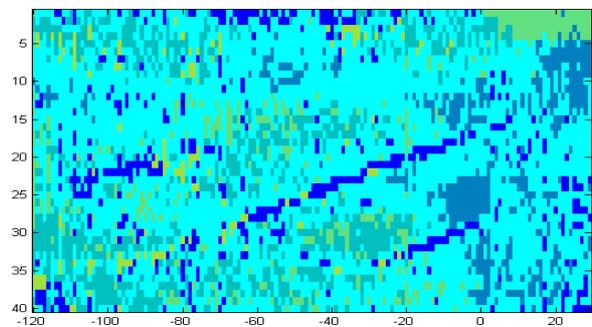


Abb. 5.2-40 ANN mit N=7, L=1, I=100

Bei Einbeziehung der Geoelektrikdaten werden geologisch erklärbare Anomalien in den Mustern gefunden. Die besten Ergebnisse mit den ANN wurden somit bei Einbeziehung aller 4 geophysikalischen erreicht und davon wiederum bei Verwendung der Netzparameter mit 5 Neuronen, einer Lernrate von 0.01 sowie 5 Iterationsschritten (Abb. 5.2-41, Abb. 5.2-42).

ANN Sollstedt: Radar, Seismik, Sonar, Geoelektrik

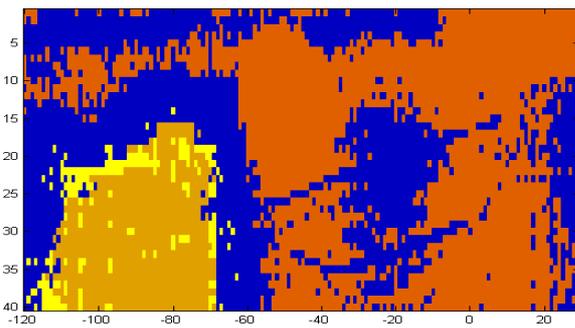


Abb. 5.2-41 ANN mit $N=10$, $L=0.1$, $I=100$

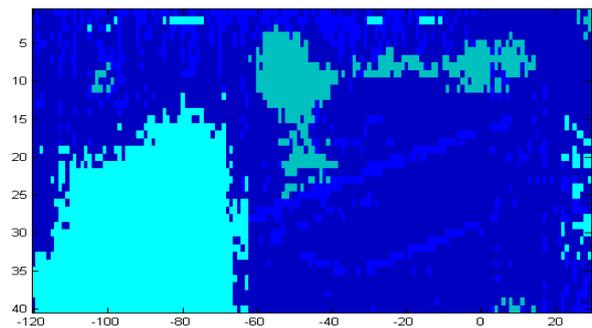


Abb. 5.2-42 ANN mit $N=5$, $L=0.01$, $I=100$

5.2.3.2 Ergebnisse Teutschenthal

Die Daten aus Teutschenthal wurden in analoger Weise wie für Sollstedt bearbeitet. Die vier geophysikalischen Verfahren überdeckten gemeinsam einen Bereich von etwa 140 Messprofilmetern und bis ca. 35 m in die Tiefe. Wie unter Punkt 5.2.1.1.2 angedeutet, weisen die prozessierten Messdaten der Einzelverfahren auf zahlreiche korrespondierende anomalen Bereiche hin. Ziel der Mustererkennung ist es nun, diese Hinweise durch die gemeinsame Datenauswertung zu untermauern.

Grundlage der Bearbeitung der Teutschenthaldaten mit den Mustererkennungsmethoden waren die in Abb. 5.2-43 abgebildeten prozessierten geophysikalischen Messdaten. Hier sind die jeweiligen auf ein 1 m x 1 m Gitter summierten Energieverteilungen (Envelope) der Wellenverfahren sowie die invertierte Geoelektriksektion wiedergegeben.

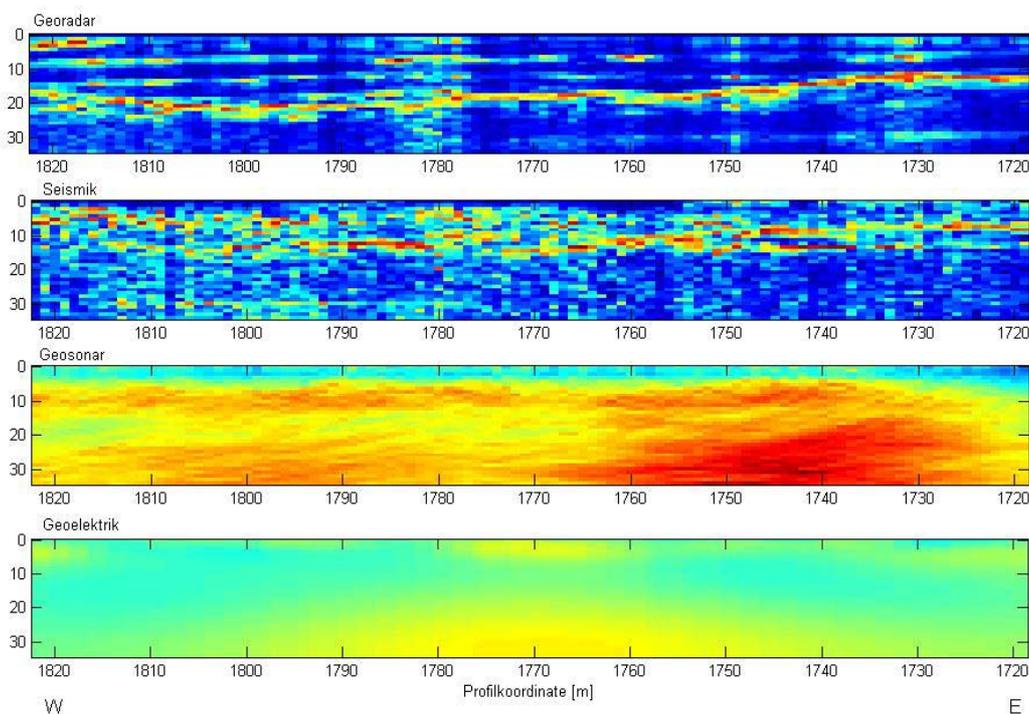


Abb. 5.2-43 Teutschenthal: Messdaten für die Mustererkennung (Summen der Enveloppen Radar, Seismik, Sonar und Widerstände), $x = 140$ m, $z = 35$ m, Gittergröße: $\Delta x = \Delta z = 1$ m

Zuerst erfolgte der Aufbau des Datenpools für die Trainingsdaten. Auf der Grundlage, der bei der univariaten Analyse erlangten Erkenntnisse zur Lage vermutlicher Anomalien wurde der Bereich um Profilkoordinate $x = 1750$ m ausgewählt. Auf diese Daten wurden Parametertests für die zwei Mustererkennungsmethoden angewendet. Danach wurde sowohl dieser Trainingsdatensatz als auch der Trainingsdatensatz von Sollstedt über SVM und ANN auf den gesamten überdeckten Bereich bezogen.

Mustererkennung mit SVM

Um einen Eindruck und den Einfluss verschiedener SVM-Parameter zu vermitteln, sind in den nachfolgenden Abbildungen 5.2-44 bis 5.2-46 die Ergebnisse verschiedener SVM-Bearbeitungen mit unterschiedlichen Kernen dargestellt.

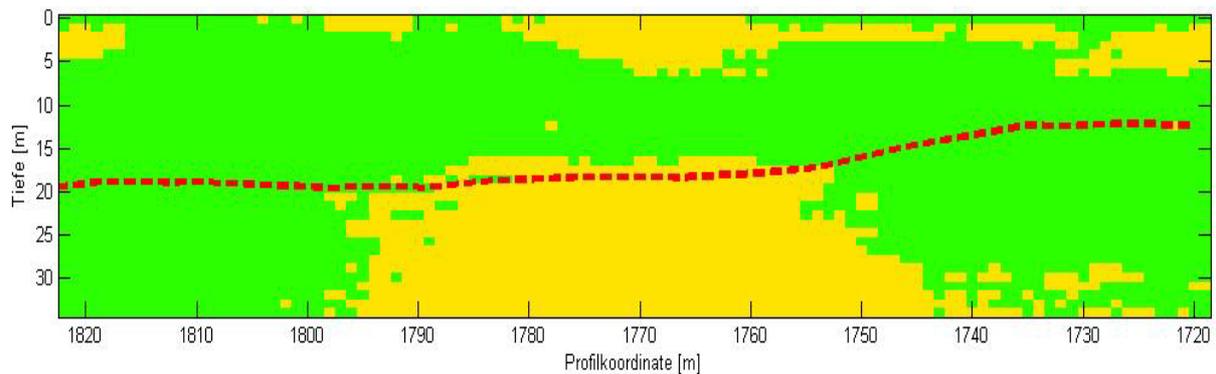


Abb. 5.2-44 Teutschenthal: SVM mit linearem Kern, *Grün*: anomale Bereiche, *Rot gestrichelt*: Anhydritoberkante

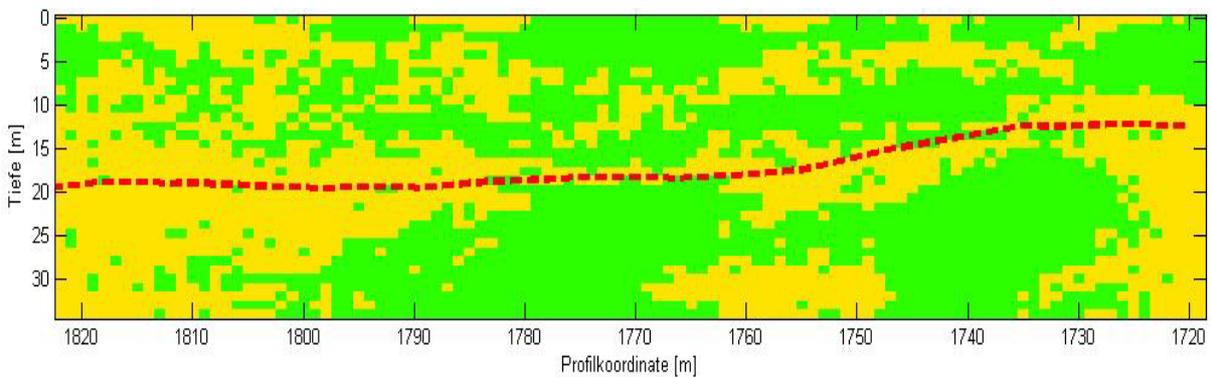


Abb. 5.2-45 Teutschenthal: SVM mit Polynom 3. Grades als Kern, *Grün*: anomale Bereiche, *Rot gestrichelt*: Anhydritoberkante

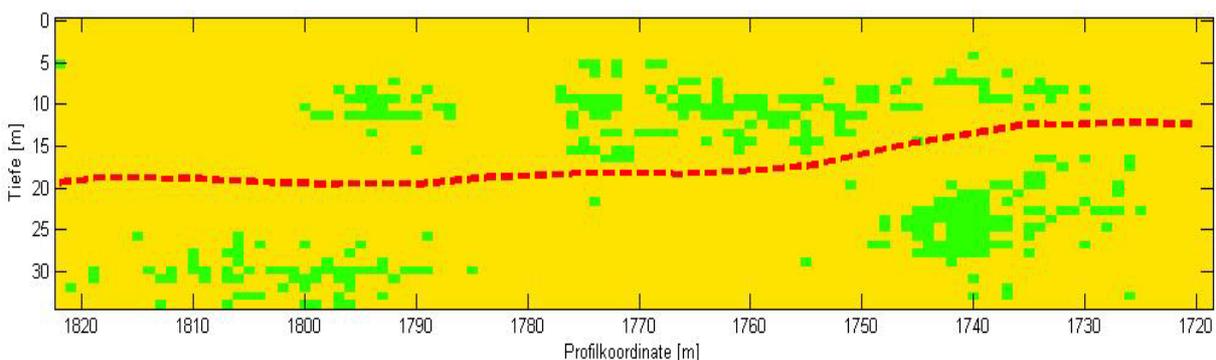


Abb. 5.2-46 Teutschenthal: SVM mit Gaussian Kern, *Grün*: anomale Bereiche, *Rot gestrichelt*: Anhydritoberkante

Offensichtlich leistet die SVM mit Gauß-Kern (Abb. 5.2-46) das beste Ergebnis. Dabei sind Übereinstimmungen mit der Geoelektrik vorhanden, aber ebenso charakteristische Abweichungen. So werden dort um Profilkordinate $x = 1740$ m und $x = 1800$ m anomale Zonen in größerer Tiefe als im Geoelektrikschnitt ausgewiesen. Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten an den Rändern geoelektrischer Inversionsergebnisse sollte dieses SVM-Ergebnis bei der Gesamtinterpretation Berücksichtigung finden.

Mustererkennung mit ANN

Als zweite Mustererkennungsmethode wurden wieder ANN mit unterschiedlicher Netzarchitektur eingesetzt. Abbildung Abb. 5.2-47 zeigt das Bearbeitungsergebnis mit einem unüberwachten Netz auf der Basis von Trainingsdaten aus dem Sollstedt-Modell. Das Netzwerk ist ein selbstorganisierendes Netzwerk, d.h. es lernt automatisch aus den angebotenen Eingabewerten auf Grundlage der Abstände zwischen den Eingabevektoren (KOHONEN 1987) ohne Backpropagation. Das erzielte Ergebnis ist in Anbetracht der verwendeten Lerndaten eines anderen Standortes als gut einzuschätzen.

Das nächste Beispiel wurde mit einem Multilayer Feedforward Backpropagation Netzwerk (MFANN) berechnet. Diese Netzwerke besitzen mehrere Schichten (Eingabeschicht, ein oder mehrere verdeckte Schichten, Ausgabeschicht). Für die Backpropagation werden unterschiedliche Methoden verwendet, hier die weit verbreitete quasi-Newton-Methode oder die Konjugierte-Gradienten-Methode im nächsten Netzwerkbeispiel.

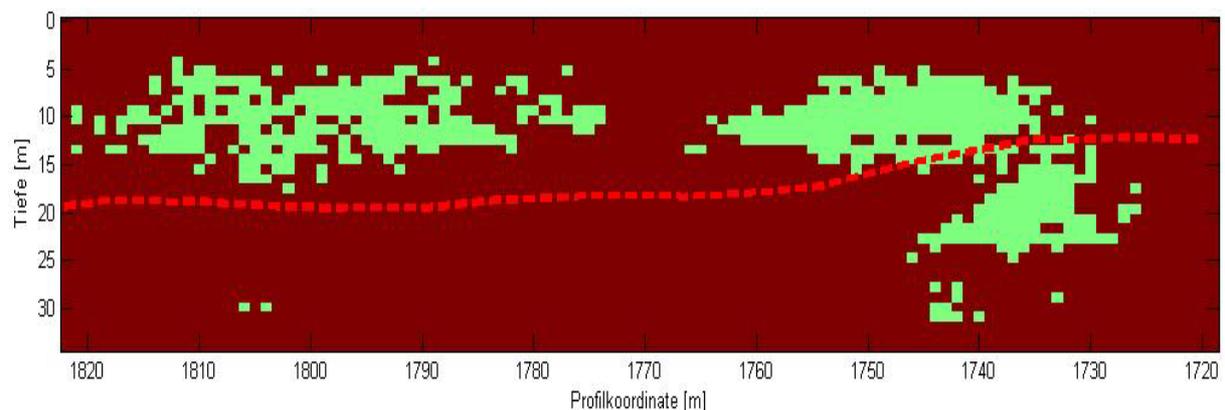


Abb. 5.2-47 Teutschenthal: Unüberwachtes ANN mit $N=4$, $L=0.1$, $I=100$; *Grün*: anomale Bereiche, *Rot gestrichelt*: Anhydritoberkante; Trainingsdaten: Sollstedt

Die Trainingsdaten wurden empirisch aus dem ρ_{\min} -Bereich der Geoelektriksektion bestimmt. In der Bearbeitung MFANN in Abb. 5.2-48 nehmen die anomalen Bereiche einen relativ großen Raum ein. Die Ursache hierfür kann nicht näher spezifiziert werden. Das ist nicht nur in diesem Beispiel der Fall, sondern gehört zu den Nachteilen der ANN. Es ist jedoch festzustellen, dass das Netzwerk die Anomalien im Wesentlichen erkannt hat.

In Abb. 5.2-49 ist das Ergebnis desselben Netzwerkes dargestellt, aber mit einer anderen, nicht weniger verbreiteten Backpropagation-Methode des Conjugate Gradient (HESTENES & STIEFEL 1952). Mit dieser Methode konnte gegenüber dem Vorgängermodell ein besseres Ergebnis erzielt werden. Die anomalen Bereiche besitzen eine deutlich geringere Ausdehnung, was den Resultaten der Einzelverfahren eher entspricht.

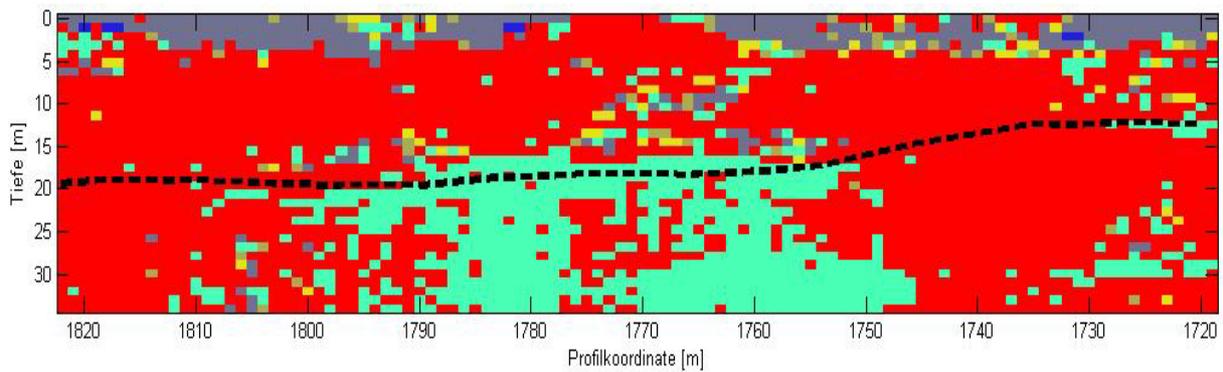


Abb. 5.2-48 Teutschenthal: Überwachtes MFANN mit $N=20$, $L=0.01$, $I=1000$;
Rot: anomale Bereiche, *Schwarz gestrichelt*: Anhydritoberkante;
 Backpropagation-Methode: quasi-Newton; Trainingsdaten empirisch aus dem ρ_{\min} -Bereich

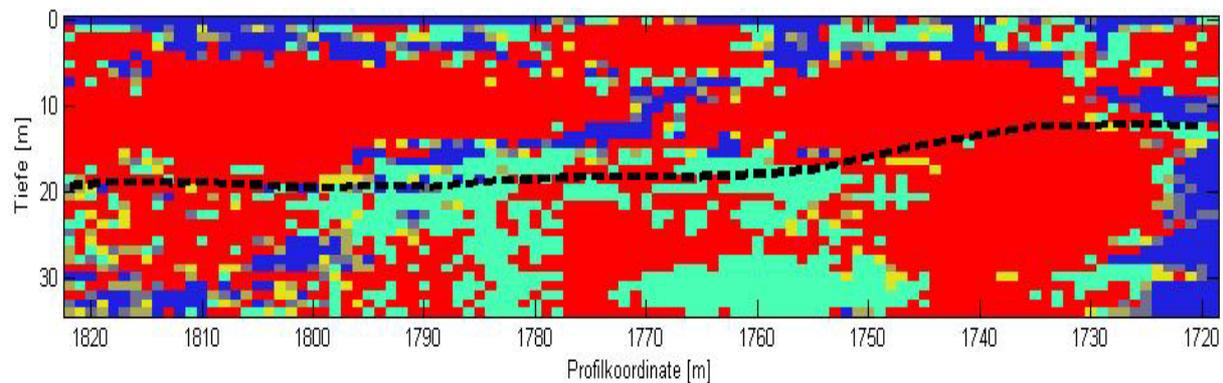


Abb. 5.2-49 Teutschenthal: Überwachtes MFANN mit $N=20$, $L=0.01$, $I=1000$;
Rot: anomale Bereiche, *Schwarz gestrichelt*: Anhydritoberkante;
 Backpropagation-Methode: Conjugate Gradient; Trainingsdaten empirisch aus dem ρ_{\min} -Bereich

Die Ergebnisse der Bearbeitung der Daten Teutschenthal zeigen mit ANN geologisch relevante Muster, die ähnlich denen aus der SVM-Bearbeitung sind. Die Auflösung der anomalen Bereiche, korrespondierend zur Anhydritgrenze, erreichte hier nur das unüberwachte Netzwerk mit dem Trainingsdatensatz von Sollstedt.

Im Gegensatz dazu gelang der optimierten SVM, wie in Abb. 5.2-46 dargestellt, eine höhere Auflösungsgenauigkeit bei der Bestimmung anomaler Zonen.

Zur allgemeinen Charakterisierung und Schlussfolgerung aus der Arbeit mit den hier verwendeten Neuronalen Netzen lässt sich feststellen, dass erstens die zu verwendende Netzarchitektur von vornherein erst einmal unbestimmt ist und weitestgehend von den Erfahrungen des Anwenders abhängt; zweitens ein schematischer Einsatz der ANN demzufolge nicht möglich ist und drittens daraus ein sehr hoher Zeitaufwand zur Erzielung befriedigender Resultate folgt. Ein Vorteil beim Einsatz der ANN ist die Möglichkeit, die Datensätze in sehr viele Klassen einteilen zu können.

Demgegenüber besitzen die SVM nicht so viele „Parameter-Stellschrauben“ und sind auf Grund dessen schneller, robuster und einfacher zu handhaben. Die Klassifizierung wird dadurch genauer.

5.2.3.3 Ergebnisvergleich Teutschenthal

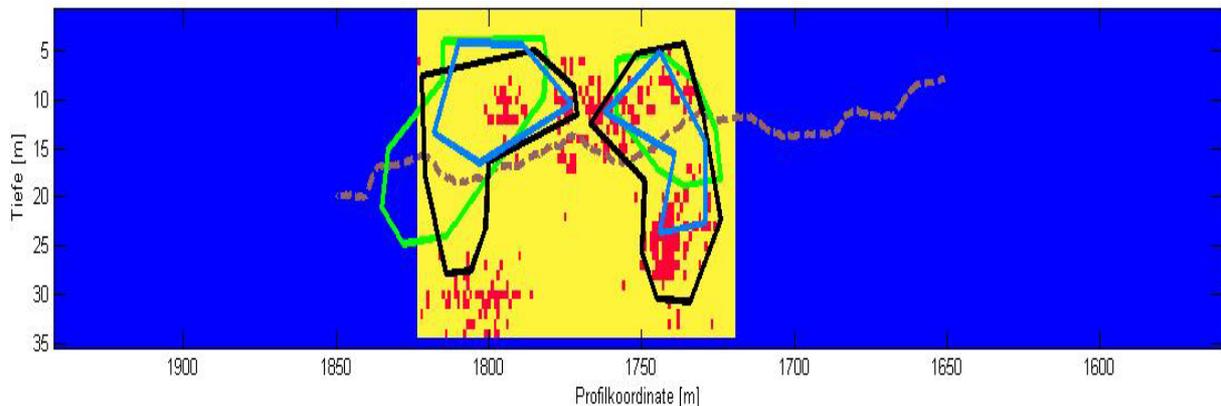


Abb. 5.2-50 Teutschenthal: Ergebnisvergleich der statistischen Verfahren
 Rote Pixel: SVM (Gauß-Kern)-Anomalien
 Schwarz: MFANN-Anomalien
 Grün: Problemindex der univariaten Methode
 Braun gestrichelt: Anhydritoberkante nach Radar

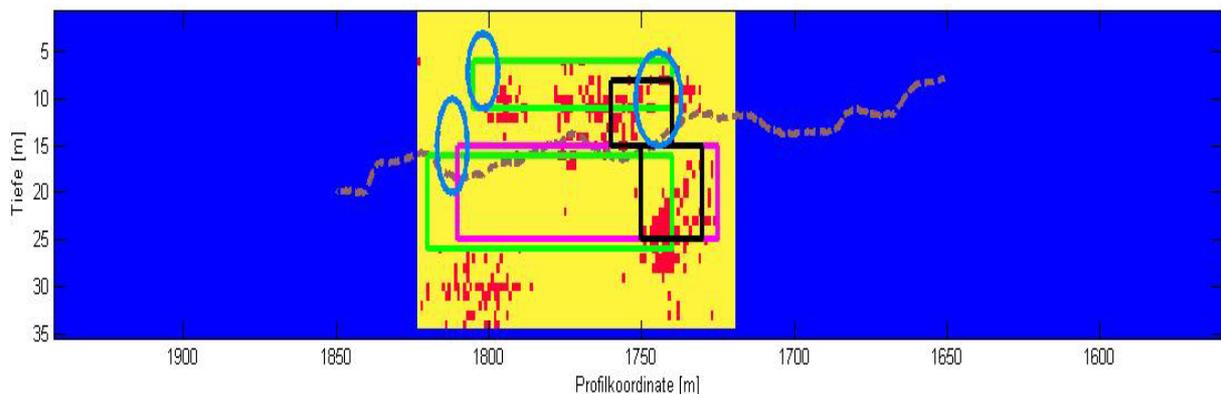


Abb. 5.2-51 Teutschenthal: SVM (Gauß-Kern)-Ergebnis + Anomalien der Einzelverfahren
 Rote Pixel: SVM-Anomalien
 Schwarz: Sonar: hohe Reflektivität
 Magenta: Seismik: Reflektorstörungen, einzelne Reflektorelemente
 Grün: Radar: Reflektorstörungen, Reflektorelemente
 Blau: Geoelektrik: ρ_{\min} -Kernbereiche
 Braun gestrichelt: Anhydritoberkante nach Radar

Im Bild 5.2-50 sind die anomalen Bereiche aus den statistischen Verfahren zusammengefasst. Zum Vergleich wurden in Bild 5.2-51 die Anomalien der Einzelverfahren vor dem Hintergrund des SVM-Ergebnisses schematisch dargestellt. Aus diesen Gesamtdarstellungen lassen sich zunächst formal folgende Aussagen ableiten. Die Anhydritoberkante trennt anomale Zonen oberhalb mit ρ_{\min} -Kernbereiche, hohen Sonar-Reflektivitäten, gestörten Radar-Reflektorelementen und unterhalb mit Reflektorstörungen im seismischen Wellenbild sowie stark gestörten Radar-Reflektorelementen. Die ausgewiesenen Anomaliezonen aus dem Problemindex, der SVM-Bearbeitung, der MFANN-Bearbeitung sowie die ρ_{\min} -Bereiche in ihrer Gesamtausdehnung überdecken die Anhydritoberkante.

In der Gesamtbetrachtung kann daraus abgeleitet werden:

- Radar und Seismik erfassen die Anhydritoberkante.
- Die Anhydritschicht ist im oberen Bereich stark gestört und weist mit hoher Wahrscheinlichkeit zahlreiche Bruch- und Rissstrukturen auf.
- Die vielen kleinen Störungen oberhalb der Anhydritoberkante werden besonders vom Sonar auf Grund der geringen Wellenlängen erfasst und verursachen hier die hohen Reflektivitäten.
- Auch auf Grund der ermittelten hohen elektrischen Leitfähigkeiten ober- und unterhalb der gestörten Anhydritoberkante muss davon ausgegangen werden, dass sich dort Feuchtezone gebildet haben.

5.2.4 Standorte der Projektphasen Salinargeophysik I und II (Bischofferode, Sigmundshall) – Anwendung SVM

5.2.4.1 Standort Bischofferode (Messungen Firste)

Aus den Daten von Bischofferode wurden für die Wellenverfahren die Enveloppen berechnet und aus der Geoelektrik die Widerstandswerte verwendet (Abb. 5.2-52).

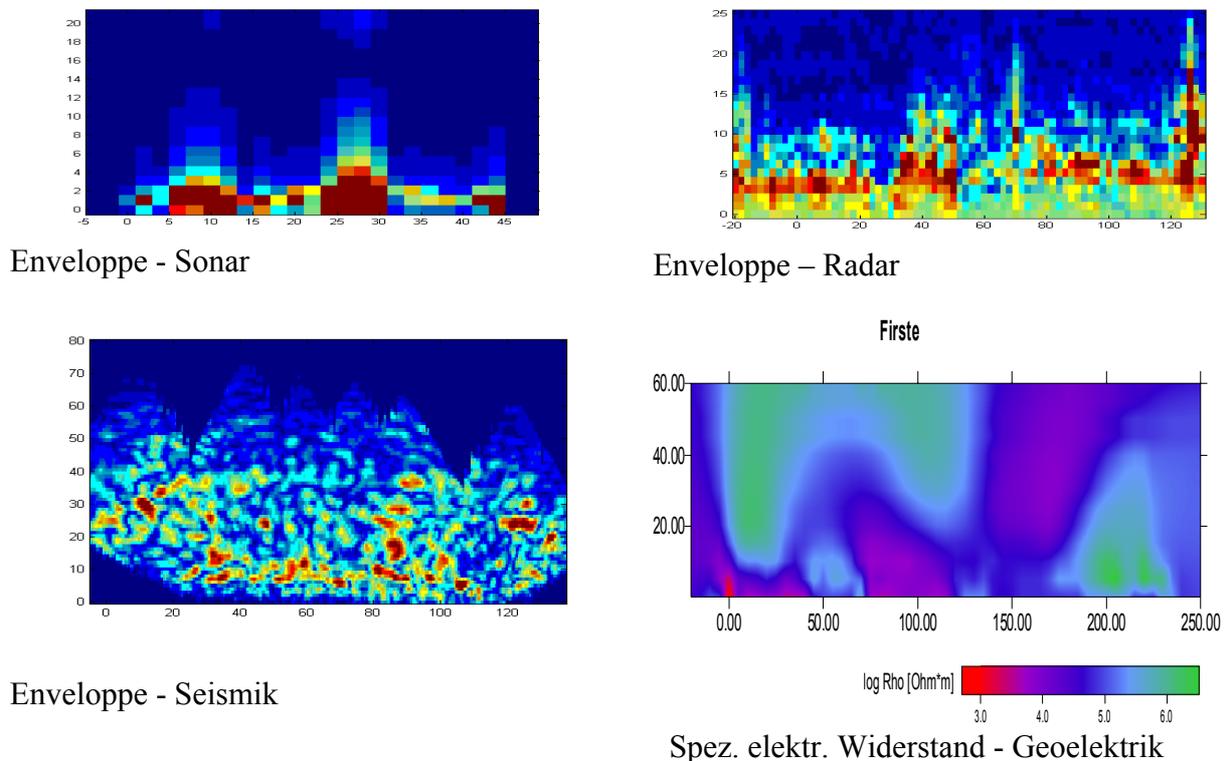


Abb. 5.2-52 Enveloppen Sonar, Radar, Seismik. Widerstände Geoelektrik.

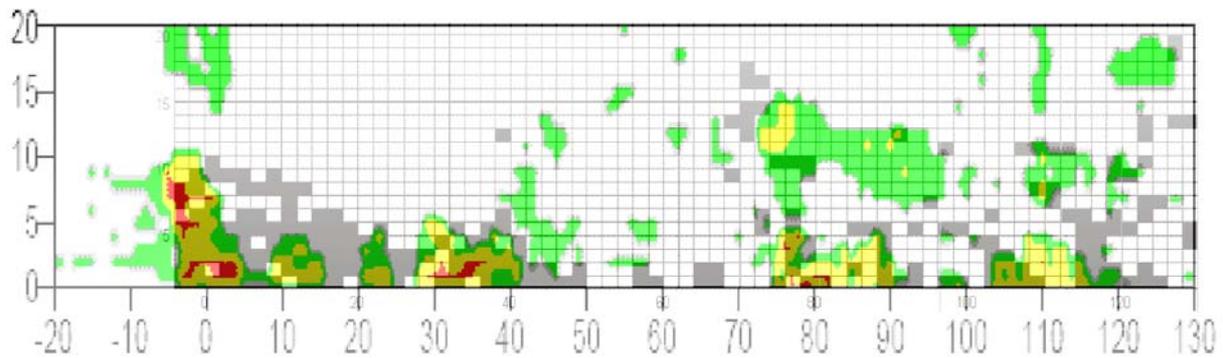


Abb. 5.2-53 Problemindex aus Salinargeophysik I (farbig) und SVM aus Salinargeophysik III (grau unterlegt)

Die im Projekt Salinargeophysik I (1998-2001) ermittelten Problemzonen im Bereich der Profilpunkte 0 m (bekannte Laugenstelle), 35 m, 80 m und 110 m konnten bestätigt werden. Diese Zonen wurden mit der SVM jedoch größer ausgewiesen und es kamen weitere kleinere Problemzonen hinzu.

5.2.4.2 Standort Sigmundshall

Am Standort Sigmundshall (Salinargeophysik II) war durch zwei Horizontalbohrungen bekannt, dass in ca. 70 m bis 80 m Entfernung vom Stoss ein Salzlösungsvorkommen existiert. Es wurde in der jetzigen Projektphase versucht, durch Einsatz der SVM-Methode diese Problemzone näher zu spezifizieren. Dafür kamen nur die Daten der Seismik und des Radar in Frage, da die Methoden Geosonar und Geoelektrik nicht die notwendige Erkundungstiefe erreichten (JUST et al. 2004).

IGEL et al. (2006) leiteten aus Radarmessungen ein geophysikalisch-geologisches Modell des Schichtenaufbaus im Bereich des Untersuchungsstandortes ab. Diese Modellvorstellungen sind in Abb. 5.2-54 dargestellt sowie das SVM-Ergebnis hineinprojiziert. Die von der SVM ausgewiesenen Problemzonen korrespondieren mit dem in der linken Bohrung angetroffenen Salzlösungsvorkommen. Die Lage der SVM-Problemzone innerhalb des Hauptanhydrits bestätigt zudem die Vorstellung vom Vorkommen feuchter Bereiche im Salinar.

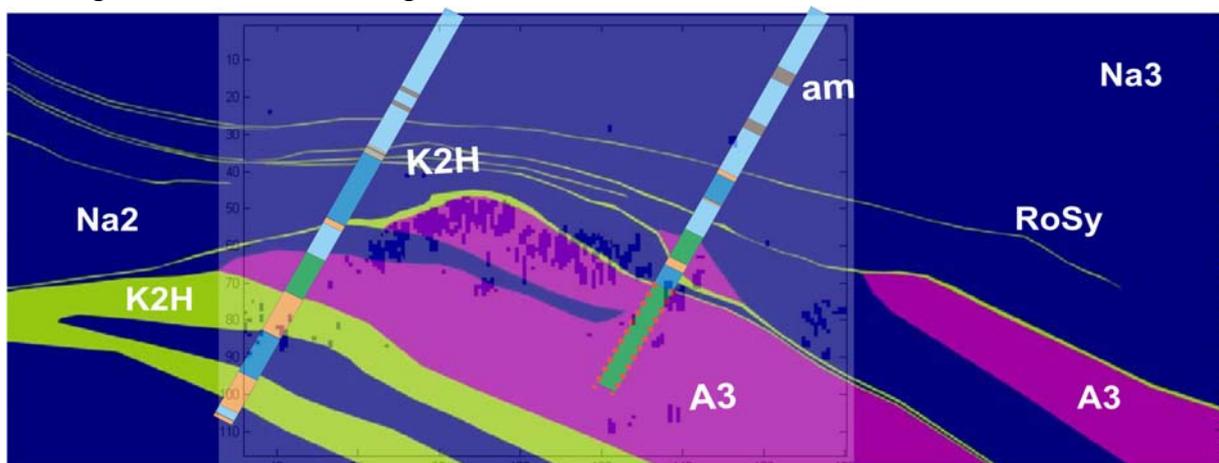


Abb. 5.2-54 Sigmundshall: SVM (violett unterlegte Gitterzellen im A3 zwischen Bohrungen). Georadar (100 MHz, 25 MHz) und Seismik. Lerndaten nach statischer Analyse aus dem Bohrungsbereich. (Na3 Leine-Steinsalz, Na2 Staßfurt-Steinsalz, A3 Hauptanhydrit, K2H Kaliflöz Staßfurt)

5.2.5 Zusammenfassung der statistischen Charakterisierung von Problemzonen

Zur Charakterisierung von Problemzonen im Salinar wurden zwei statistische Verfahren eingesetzt.

Die Ergebnisse der univariaten Methode zeigen anomale Bereiche mit einer Anomalieindex von 50% bis 70% für Sollstedt und bis zu 50% für Teutschenthal. Anomale Bereiche werden deutlich herausgearbeitet (Abb. 5.2-25) und lassen sich unter Zuhilfenahme von a-priori Informationen sinnvoll interpretieren. Zu berücksichtigen ist, dass bei der hier vorgestellten Methode die Geoelektrikdaten im Vergleich zu den Wellenverfahren einen höheren Wichtungseinfluss besaßen. Weiterhin ist festzustellen, dass die Anomalienauflösung geringer und der Zeitaufwand für die Bearbeitung deutlich höher als bei den Lernmethoden ist.

Das zweite angewendete statistische Verfahren der Lernmethoden (Support-Vector-Maschine, Artificial Neuronal Network), welches zu den multivariaten Verfahren gehört, verarbeitet die gemessenen Daten simultan. Dieser neuartige Ansatz wurde erstmals in diesem Projektabschnitt verfolgt, und erzielte überzeugende Resultate. Das Auflösungsvermögen ist mit dem der univariaten Verfahren vergleichbar, teilweise sogar besser. Eine Überwichtung der Geoelektrikdaten konnte nur bei den ANN festgestellt werden. Die besten Ergebnisse wurden mit SVM an den Standorten Sollstedt und Teutschenthal und mit ANN in Teutschenthal erreicht. Der im Rahmen dieses Projektes entwickelte Ansatz steht nun zur Weiterentwicklung und Anwendung zur Verfügung. Hinsichtlich des Auflösungsvermögens, der Aussagesicherheit sowie Standortunabhängigkeit sind weitere Trainingsdaten bzw. Modellsituationen notwendig.

Aus den Ergebnissen der Mustererkennung lässt sich ableiten, dass auf der Referenzmessstrecke im Bergwerk Sollstedt mit hoher Wahrscheinlichkeit bei Profilkordinate -50 m in einer Tiefe von 10 m bis 20 m eine Problemzone existiert. Mit dem in den Radarergebnissen dort angezeigten Übergang von Steinsalz zu Basalanhydrit sowie der über geoelektrische Messungen ermittelten relativ hohen elektrischen Leitfähigkeit kann man davon ausgehen, dass diese Problemzone einer Salzlösung zuzuordnen ist (Abb. 5.2-42).

In Teutschenthal (Abb. 5.2-46,47) wurde zwischen Profilkordinate 1730 m und 1770 m in einer Tiefe von 5 m bis 25 m ein anomales Muster detektiert. Unter Berücksichtigung der von den Wellenverfahren hier ausgewiesenen Zerrüttungszone und der gleichzeitig vorhandenen hohen elektrischen Leitfähigkeiten ist mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem salzlösungsführenden Bereich auszugehen. In den Ergebnissen der SVM und ANN ist der anomale Bereich noch weiter untergliedert. Orientiert man sich an der hier vorhandenen Schichtgrenze zwischen Steinsalz und Hauptanhydrit, so befinden sich ein anomaler Teilbereich oberhalb und ein anomaler Teilbereich unterhalb dieser Grenze. Eine mögliche Erklärung wäre das Eindringen von Wässern in eine Zerrüttungszone und anschließend einsetzende Lösungsprozesse. Zusätzlich könnte durch Druckänderungen in diesem Bereich auch Kristallwasser aus der Steinsalzmatrix freigesetzt worden sein.

Zwischen Profilkordinate 1785 m und 1800 m existiert eine weitere Problemzone in einer Tiefe zwischen 5 m und 10 m, die nicht so stark ausgeprägt ist und mit der ersten Problemzone in Verbindung steht. Außerdem weist das Ergebnis aus den SVM auf eine dritte

Problemzone zwischen Profilkordinate 1790 m und 1810 m im Tiefenbereich um etwa 30 m hin. Diese Zone korrespondiert mit der Karbonateinlagerung im Hauptanhydrit (Radarergebnis) und markiert relativ genau den Übergangsbereich von gestörter zu ungestörter Lage dieser geringmächtigen Karbonateinlagerung. Auch hier könnten Lösungsprozesse, ausgelöst durch migrierende Wässer im Bruchfeld, ein Feuchtevorkommen verursacht haben.

Mit den verwendeten statistischen Verfahren wurden Problemzonen erkannt, die geologisch erklärbar sind und auf problematische Barrierebereiche hinweisen. Mit den detektierten anomalen Mustern können die Strukturaussagen der Wellenverfahren erweitert und mit den Ergebnissen der Geoelektrik in Zusammenhang gebracht werden. Die Mustererkennungsmethoden verknüpfen die Ergebnisse der geophysikalischen Einzelverfahren und verdichten die nur andeutungsweise oder nicht eindeutig zuzuordnenden Informationen über anomale Bereiche. Dadurch liefern sie wichtige und mathematisch fassbare Zusatzinformationen über die Lage potentieller Problemzonen.

5.3 Literatur

- [1] CRISTIANINI, N. & SHAWE-TAYLOR, J. (2000). An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods, Cambridge University Press.
- [2] GEVANTMAN, L. H. (1981). Physical Properties Data for Rock Salt.- NBS Monograph 167, 282 p. U.S. Department of Commerce/National Bureau of Standards, Washington.
- [3] HESTENES, M. R. & STIEFEL, E. (1952). Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems Journal of Research of the National Bureau of Standards Vol. 49, No. 6.
- [4] IGEL, J., KURZ, G. & SCHULZ, R. (2006). Detecting brine zones in salt deposits with the ground penetrating radar (GPR) for safety assessments of underground waste disposals. Near Surface Geophysics 4, 265-274.
- [5] JUST, A., KRAUSE, Y., TUCH, A., KNIEß, R., JACOBS, F., SCHUCK, A., SCHMIDT, V., ROST, F., LINDNER, U., SCHICHT, TH., SCHWANDT, A., KURZ, G., IGEL, J., SCHULZ, R., SCHULZE, E. & H. KÜHNICKE (2004). Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02 C 0851, 02 C 0861, 02 C 0871, Leipzig.
- [6] KLÖPPEL, S., STONNINGTON, C. M., CHU, C., DRAGANSKI, B., SCAHILL, R. I., ROHRER, J. D., FOX, N. C., JACK, C. R., ASHBURNER, J. & R. FRACKOWIAK. (2008). Automatic classification of MR scans in Alzheimer's disease. Brain (131), 681-689.
- [7] KOHONEN, T. (1987). Self-Organization and Associative Memory, 2nd Edition, Berlin: Springer-Verlag.
- [8] KULENKAMPF, J., ASCHMANN, L., JUST, A., BERGMANN, K., MOISE, E., JACOBS, F., SCHUCK, A., LINDNER, U., SCHWANDT, A., KURZ, G., FLUCHE, B., SCHULZ, R., KÜHNICKE, H., REUTTER, O. & F. SCHUBERT (2002). Komplexes Mess- und Auswertearbeitsinstrumentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und

Untertagedeponien (UTD) im Salinar. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02C0558, 02C0568, 02C0578, Leipzig.

- [9] KURZ, G., ASCHMANN, L., JACOBS, F., KULENKAMPPF, J., MOISE, E., SCHUCK, A. & SCHULZ, R. (2002). Auswertekonzept zur geophysikalischen Erkundung von Problemzonen im Salinar, *Z. Angew. Geol.*, 2: 56-62
- [10] LANDOLT-BOERNSTEIN, Group V (1b) (1950). G. Anheiser (ed.), Springer-Verlag, Berlin.
- [11] LIPPMAN, R. P. (1987). An introduction to computing with neural nets: *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 4, 4-22.
- [12] MUNDY, E. & THIERBACH, R. (1985). Erkundung unerschlossener Bereiche von Salzlagerstätten durch hochfrequente elektromagnetische Bohrlochmeßverfahren. BMFT-Abschlussbericht, BGR /NLFb Archiv-Nr. 98180; Hannover.
- [13] RUMELHART, D. E., HINTON, G.E. & R. J. WILLIAMS (1986). Learning internal representations by error propagation. In *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition*, 1, 318-362. MIT Press, Cambridge.
- [14] SCHÖLKOPF, B. & SMOLA, A. (2002). *Learning With Kernels*, MIT-Press Cambridge.
- [15] THEODORIDIS, S. & KOUTROUMBAS, K. (1999). *Pattern Recognition*, Academic Press.
- [16] VAPNIK, V. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer-Verlag New York.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entsorgung von chemisch-toxischen und radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen ist eine bevorzugte Variante, da sie besonders geeignet ist, die Biosphäre vor der toxischen Wirkung des Abfalls langfristig zu schützen. Voraussetzung ist dabei, dass Wirt- und Barrieregesteine genutzt werden, die für Lösungen wie auch Gase undurchlässig sind. Untertagedeponien (UTD) im Salinar haben in der deutschen Entsorgungspraxis einen besonderen Stellenwert. Seit mehr als drei Jahrzehnten werden sie für die Beseitigung von besonders gefährlichen Abfällen genutzt. Eine sichere **untertägige Entsorgung** chemisch-toxischer Abfälle in Salzformationen, z.B. in einer Untertagedeponie, sowie die Endlagerung radioaktiver Abfälle setzt die Kenntnis potentieller Problemzonen in der geologischen Barriere voraus. Nur auf der Grundlage einer komplexen Sicherheitsanalyse lässt sich abschätzen, ob eine dauerhafte Isolation von der Biosphäre an einem konkreten Standort gewährleistet ist.

Die geophysikalische Erkundung zur Charakterisierung der Barrierewirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches verschiedener Standorte ist in der Lage, einen wichtigen Beitrag zur Vorerkundung für die Planung von Untertagedeponien und Endlagern und für den Nachweis der Langzeitsicherheit zu leisten. Die Barrierewirksamkeit wird durch die Anwesenheit potentieller Problemzonen wie z. B. tektonischer Störungszonen, lithologisch vorgeprägter Schwächezonen und Strukturelemente sowie bergbaulich bedingter Auflockerungszonen beeinträchtigt. Insbesondere ist sie durch Salzlösungsvorkommen und Bereiche erhöhter Fluidwegsamkeit gefährdet. Zur Bewertung der Sicherheit der geologischen Barriere als Teil des **Multibarriersystems** ist ihre räumliche Erkundung ins Unverritzte mit zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden zwingend erforderlich. Die Anwendung nichtinvasiver **geophysikalischer Messverfahren** gewährleistet dies in effektiver Weise.

Im Rahmen eines seit 1998 in drei Phasen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten **Forschungsverbundprojekts Salinargeophysik (SALGY)** wurde zunächst in den ersten beiden Phasen „Salinargeophysik I“ und „Salinargeophysik II“ ein komplexes geophysikalisches Mess- und Auswerteinstrumentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen im Salinar entwickelt. Dieses wurde an zwei geologisch und bergbaulich verschiedenen Standorten erfolgreich erprobt.

Die Durchführung einer dritten Phase von drei miteinander gekoppelten Forschungsverbundprojekten (Salinargeophysik III, Förderkennzeichen 02C1305, 02C1315, 02C1325) beinhaltet wiederum die Kombination leistungsfähiger geophysikalischer Einzelmessverfahren und die Weiterentwicklung des universellen integrierten geophysikalischen Mess- und Auswerteinstrumentariums für die untertägige Erkundung von Problemzonen bei gleichzeitiger Adaption von Techniken und Erfahrungen auf zwei weitere Referenzstandorte mit anderen geologischen Verhältnissen. Ausgewählt wurden das ehemalige Kaliwerk Sollstedt im Südharzrevier sowie eine in Betrieb befindliche Untertageversatzanlage im ehemaligen Kalibergwerk Teutschenthal, westlich von Halle / Saale gelegen. Im Gegensatz zur flachen Lagerung mit Problemzonen im Hangenden am ersten Standort, Bischofferode

(Salinargeophysik I), sowie zur Salzstockstruktur mit engen Verfaltungen und Zerschörungen der Schichten mit erbohrten Lösungsvorkommen am zweiten Standort, Sigmundshall (Salinargeophysik II) handelte es bei den ausgewählten neuen Referenzlokationen um Bereiche mit bruchtektonisch bedingten Problemzonen im Liegenden der Untersuchungsstrecken, im Bereich der flachen Lagerung der Salinargesteine. Das Untersuchungsziel waren die an den Basal-/Hauptanhydrit bzw. Hauptdolomit gebundenen möglichen Salzlösungsvorkommen sowie potentielle Wegsamkeiten für Salzlösungen infolge erhöhter Permeabilitäten im Bereich eines Gebirgsschlages.

Das universelle integrierte geophysikalischer Mess- und Auswertearmamentarium wurde an den Standorten A – Sollstedt und B – Teutschenthal mit den weiterentwickelten Einzelverfahren Seismik, Radar, Sonar, Elektromagnetik und Geoelektrik eingesetzt. Ergänzend zu den Untersuchungen im Rahmen von Salinargeophysik II erfolgten seismische und Sonar-Messungen am Standort C – Sigmundshall.

Für die Erarbeitung der umfassenden Bewertung der Barrierenintegrität des Salinargesteins sind verschiedene, teilweise ineinander greifende Methoden zwingend notwendig. Die Einzelergebnisse aus den geophysikalischen Messungen zeigen eine gute gegenseitige Ergänzung hinsichtlich ihrer Auflösung und Aussagetiefen. Methodisch bedingt waren teils sehr streckennahe und teils weit entfernte Raumbereiche nur durch Einzelverfahren überdeckt. Aus den integrierten Informationen der unterschiedlichen Verfahren kann der interne Aufbau der Salzstrukturen abgeleitet werden.

Anhand der struktursensiblen **Wellenverfahren** Seismik, Radar und Sonar liegen Informationen über Schicht- und Strukturgrenzen im Liegenden für einen Erkundungsbereich bis in eine Entfernung von bis zu 100 m von der Messstrecke an beiden Referenzstandorten vor. Die mit einem Wechsel der petrophysikalischen Eigenschaften verbundenen Strukturgrenzen zeichnen sich durch Reflexionselemente in den Ergebnissen der Wellenverfahren ab. Darüber hinaus kann anhand der Kombination von seismischen und Radar-Verfahren präzisiert werden, welche geologischen Schichtgrenzen den verschiedenen Radarreflektoren zuzuordnen sind. Die akustische Reflektivität - ermittelt durch die Geosonarmessungen - gibt Aufschluss über potentielle Auflockerungszonen im Salinargebirge bis in eine Entfernung von 100 m von der Messstrecke.

Die räumliche Verteilung der Gesteinseigenschaft elektrische Leitfähigkeit, bestimmt mit dem **Potentialverfahren** Geoelektrik, bietet neben strukturellen Informationen hauptsächlich Hinweise auf das Vorhandensein durchfeuchteter Gebirgsbereiche. Aufgrund der – im Verhältnis zu trockenem Salzgestein - um mehrere Größenordnungen erhöhten elektrischen Leitfähigkeit können vorhandene Salzlösungsvorkommen und wässrige Kluffüllungen detektiert werden. Eine Kalibrierung der Leitfähigkeit auf Feuchtegehalte ist mit Labormessungen möglich. Die Nachweismöglichkeiten mittels Geoelektrik nehmen mit zunehmender Entfernung des Untersuchungsziels von der Messstrecke (> 30 m) deutlich ab.

Am *Referenzstandort Sollstedt* wurden Salzlösungsvorkommen im Bereich des Liegenden des Basalanhydrits bzw. Hauptdolomit angenommen. Mittels geophysikalischer Erkundung

konnte die Lage der Schichtenfolge im Bereich der Hauptförderstrecke, die im Wesentlichen durch die Aufsattelung des Basalanhydrits bestimmt wird, ermittelt werden. Das Ausmaß der Sattelstruktur wurde erst im Rahmen der geophysikalischen Untersuchungen nachgewiesen. Anomale Zonen werden von nahezu allen Verfahren im unmittelbaren Bereich der Sattelstruktur sowie im Umfeld der bergbauinduzierten Auflockerungszonen detektiert und durch die Komplexinterpretation präzisiert. Sie geben einen Hinweis auf Bereiche mit erhöhtem Wassergehalt.

Der *Referenzstandort Teutschenthal* zeichnet sich durch eine extreme gebirgsmechanische Beanspruchung der Salinarbarriere aufgrund eines Gebirgsschlages aus. Die geophysikalischen Messungen lieferten ein detailliertes Modell der Profilumgebung im Hangenden der westlichen Bruchfeldkante. Die Ergebnisse von Seismik- und Georadar zeigen den strukturellen Aufbau des Salinargebirges und verweisen auf einen gestörten Bereich im Umfeld der Bruchfeldkante. Dieses wird sowohl von der Sonarmethode als auch von der Geoelektrik bestätigt. Der anomale Bereich ist ein Hinweis auf die geodynamische Beanspruchung aufgrund des Bruchgeschehens, welches markante Schädigungen in Form von luftgefüllten Zerrungsklüften im Deckgebirge verursachte. Numerische Modellrechnungen zum gebirgsmechanischem Integritätsverhalten bestätigen diese Resultate.

Das geophysikalische Modell des *Referenzstandortes Sigmundshall* wurde durch ergänzende Messungen verfeinert. Anhand der geophysikalischen Messungen wurden die Kenntnisse über die komplizierten geologischen Verhältnisse (geringmächtige, steil gelagerte Schichtenfolgen mit engen Verfaltungen und Abschnürungen) präzisiert. Die mittels der Komplexinterpretation ausgewiesene Problemzone korrespondiert mit einem in der Horizontalbohrung HB2 angetroffenem Salzlösungsvorkommen.

Im Rahmen der Projektlaufzeit konnten die einzelnen Verfahren optimiert und verbessert werden. Bei der **Seismik** konnten durch Auswertung verschiedener Quellentests wertvolle Erfahrungen zur Optimierung der Signalanregung gewonnen werden. Die separate Auswertung der S-Wellen lieferte einen beträchtlichen Informationsgewinn. Die Sensitivität der Methode konnte durch die Nachweisbarkeit kleiner Hohlräume im benachbarten Grubengebäude eindeutig bewiesen werden.

Eine Verbesserung der Richtungszuordnung von Reflexionen gelang durch die Optimierung der Multi-Offset-Technik beim **Radarverfahren**.

Beim **Sonarverfahren** wurden durch Optimierung der Sende- und Empfangsprüfköpfe, Signalkonditionierung und Weiterentwicklung der Auswertemethodik sichere Aussagen über den geomechanischen Aufbau des Gebirges im Bereich bis zu 100 m Entfernung vom Messsystem erreicht. Im Rahmen des Projekts wurde ein bergbautaugliches 16-kanaliges Ultraschall-Messsystem entwickelt, um die Datenqualität und Zuverlässigkeit der Sonar-Messtechnik zu erhöhen. Das dezentral aufgebaute Sonar-Messsystems AE.net soll das bei den In-situ-Untersuchungen im Rahmen des aktuellen Vorhabens eingesetzte mehrkanalige Datenakquisitionssystem AE.engine in Zukunft ersetzen.

Bei der **Geoelektrik** wurde eine wesentliche Verbesserung der Auswertung und Interpretation mittels neuartiger 3D-Inversionstechniken erreicht. So ist mit Hilfe von 3D-FE-Modellierungen der Nachweis erbracht worden, dass bei Vorliegen ausreichender Datensätze (mehrere Profile an allen Streckenoberflächen) eine Richtungszuordnung von Anomalien möglich wird. Die Möglichkeit, zusätzliche Informationen über das Deckgebirge zu erhalten, wurde durch einen Machbarkeitstest für Übertage-Untertage-Messungen grundsätzlich bestätigt.

Bei den **Elektromagnetik**-Messungen gelang es nicht, wie in den Vorgängerprojekten, Störeinflüsse durch im Grubenbau vorhandene Leitungen soweit zu minimieren, dass die Ergebnisse quantitativ auswertbar waren. Damit zeichnet sich ab, dass diese Methode in Untertagedeponien und potentiellen Endlagerstandorten für das universelle integrierte geophysikalische Messinstrumentarium nur bedingt geeignet ist, da sie nur unter ungestörten Bedingungen einen Informationsgewinn liefert.

Die Entwicklung von der kombinierten Interpretation der Einzelverfahren hin zur mathematisch-statistischen Komplexinterpretation der geophysikalischen Modelle auf der Grundlage von Mustererkennungsalgorithmen stellte eine neue Qualität bei der Lokalisierung und quantitativen Charakterisierung potentieller Problemzonen dar. Mehrere fundierte mathematische Konzepte - statistische Lernmethoden wie Support-Vector-Machines, Künstliche Neuronale Netze - wurden eingesetzt, um Muster von Anomalien im Salinargestein zu erkennen und quantitativ als mögliche salzlösungsführende Zone zu bewerten. Die begrenzte Anzahl von Trainingsdaten legte die Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse auf die Suche nach salzlösungsführenden Gesteinsbereichen fest. Die Ergebnisse des neuartigen Ansatzes der Lernverfahren wurden mit Ergebnissen der Methode der Anomalieindices (Ansatz aus Salinargeophysik I) verglichen. Die Untersuchungen mittels Mustererkennung haben überzeugende Resultate erzielt, anomale Bereiche wurden deutlicher herausgearbeitet. Teilweise wurde eine Überwichtung von Resultaten eines Einzelverfahrens (z.B. Geoelektrik) im Gesamtmodell beobachtet, dieses Problem wurde nicht vollständig gelöst. Ein zukünftiger Schritt in Richtung der optimierten Komplexinterpretation geophysikalischer Modelle bietet das Verfahren der Clusteranalyse – ein flexibler Ansatz zur Joint-Inversion unterschiedlicher geophysikalischer Datensätze.

Das im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „Salinargeophysik“ entwickelte Mess- und Auswertinstrumentarium stellt in seiner kombinatorischen Vielfalt ein wichtiges Werkzeug zur untätigen geophysikalischen Erkundung dar. Im Verlauf der drei Projektphasen im Zeitraum von 1998 bis 2008 konnte die deutliche Optimierung der Einzelverfahren im untätigen Betrieb, die Verbesserung des kombinierten Einsatzes der Methoden bei der Erkundung von Problemzonen im Salinargestein sowie die Entwicklung gemeinsamer Auswerte- und Interpretationsalgorithmen erreicht werden. Das komplexe geophysikalische Instrumentarium hat sich unter verschiedenen in-situ-Bedingungen und wechselnden geologischen Verhältnissen bewährt und somit hinsichtlich der geologischen und technischen Rahmenbedingungen eines ausgewählten Standortes als flexibel erwiesen. Dies konnte durch eine mess- und auswertetechnische Weiterentwicklung der einzelnen Messverfahren sowie die Verbesserung der Komplexinterpretation erreicht werden. Die Kombination mehrerer

Messverfahren ermöglicht zum einen die Erkundung komplizierter geologischer Lagerungsformen hinsichtlich der Verteilung petrophysikalischer Parameter, zum anderen gewährleistet sie auch bei Ausfall eines der Verfahren infolge ungünstiger Messbedingungen zuverlässige quantitative Aussagen.

Das universelle integrierte geophysikalische Mess- und Auswertinstrumentarium steht jetzt zur Anwendung bei der Bewertung der Langzeitsicherheit von potentiellen Untertagedeponien und Endlagerstandorten bereit. Durch die vielseitige Auswahl und Bearbeitung von Referenzstandorten unterschiedlicher geologisch-bergbaulicher Ausprägung wurde gesichert, dass die gewonnenen Forschungsergebnisse universell für deponie- und endlagerrelevante Salzformationen flexibel anwendbar bereitstehen.

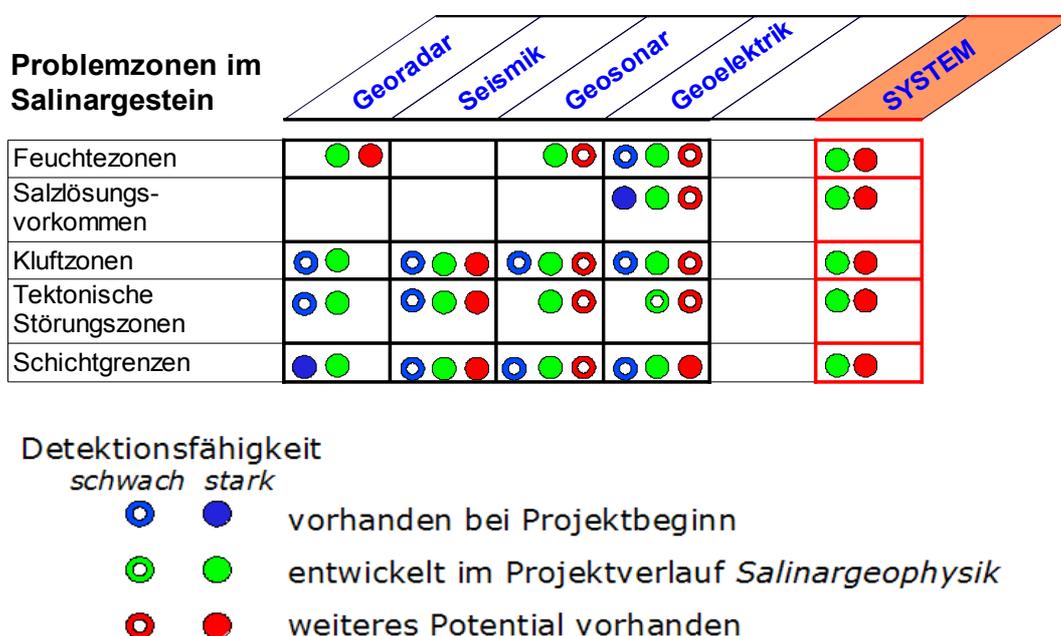


Abb. 6.1: Verfahrensentwicklung im Rahmen des Forschungsverbundprojektes „Salinargeophysik“ von 1998 - 2008

Das geophysikalische Methodenpaket leistet einen unverzichtbaren Beitrag bei der Erstellung belastbarer geologischer Modelle, insbesondere zur Konkretisierung sicherheitsrelevanter Salinareigenschaften und bildet die Basis für weiterführende Bewertungen der Integritätseigenschaften der geologischen Barriere.

Abschließend soll ein Ausblick im Sinne von Handlungsempfehlungen gegeben werden, der weniger von aktuellen förderpolitischen Aspekten und Zuständigkeiten geprägt sein soll, sondern mehr die Belange der zukunftsorientierten Forschungs- und Technologieförderung in den Mittelpunkt stellt.

Dabei muss ausdrücklich betont werden, dass die im speziellen für UTD/UTV und Endlager erreichte problemangepasste Optimierung geophysikalischer Verfahren zur Erkundung und

sicherheitsrelevanten Bewertung geologischer Barrieren auch für die effektive Betriebsführung von Salz- und Kalibergwerken eine wichtige wirtschaftliche Bedeutung beim Abbau von Lagerstätten spielt.

Das Zusammenwirken der verschiedenen geophysikalischen Verfahren muss weiter komprimiert werden, um kürzere Output-Zeiten zu erreichen. Auch unter hohem Zeitdruck (ggf. bei Gefahrensituationen) ist rechtzeitiges operatives Eingreifen zu garantieren. Die geophysikalischen Messgeräte und die Interpretationssoftware sind durch regelmäßige Leistungsvergleiche zu bewerten. Dies könnte ggf. unter der Regie des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (Hannover) erfolgen. Menügesteuerte FEM-Software ist für geophysikalische Machbarkeitsstudien von vorgegebenen geologischen Modellsituationen inklusive petrophysikalischer Parameter zu entwickeln. Qualitativ hochwertiges und zeitlich stabiles geophysikalisches Langzeit-Monitoring (4-D-Geophysik) zur Erfassung von untertägigen Prozessabläufen bleibt weiterhin eine Herausforderung.

Die entwickelten Verfahren sind hinsichtlich der messtechnischen Abläufe, des Datenprozessings, der Interpretationsstrategien und der Umsetzung in geologische Modelle auch in Zukunft auf dem höchsten Stand zu halten. Ohne die weitere Orientierung am rasanten Fortschritt von Wissenschaft und Technik wird das heute auf Spitzenniveau vorliegende Instrumentarium in wenigen Jahren überholt sein.

Die in Deutschland gewonnenen grundlegenden Erkenntnisse über die nichtinvasive geophysikalische Erkundung und Bewertung von Salzgestein bieten Chancen zum internationalen Forschungstransfer.

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 02C1305, 02C1315 und 02C1325 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die langjährige Zusammenarbeit mit dem Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (Bereich Wassertechnologie und Entsorgung) war im hohen Maße geprägt von sachdienlicher Konstruktivität und Kollegialität.

Anhang

Anhang 1 – Geologie

Folge	Symbol	Grube Sollstedt-Westfeld		Grube Teutschenthal		Grube Sigmundshall Gestein
		Gestein	Mächtigkeit (m)	Gestein	Mächtigkeit (m)	
Myophorien-	soMK	Strohgelbe Kalke	0-20	Kalkstein	0-20	Der über den Zechstein entwickelte Buntsandstein wurde durch die Flanken des aufsteigenden Salzstocks Bokeloh seitlich verschoben, nach oben gedrückt und teilweise abgetragen.
	soMT	Myophorien-Ton				
Pelitrot-	soPO	Oberer Bunte Schichten	0-110	Schluffstein-Gips	0-120	
	soPRO	Doppelquarzit				
	soPRD	Untere Rote Schichten				
	soPRU	Untere Bunte Schichten				
Salinarrot-	soSAO	Oberes Sulfat		Gips, Dolomit, Schluffstein	0-50	
	soSANA	Rötsteinsalz				
	soSAU	Unteres Sulfat				
	smSO	Oberer Solling-Sandstein				
Solling-	smSZ	Solling-Zwischenmittel	0-10	Sandstein	0-40	
	smSU	Unterer Solling-Sandstein				
	smH1bis4	Hardegsen-Abfolge 1 bis 4				
Defurth-	smDW	Defurth-Wechsellaagerung	0-30	Sandstein mit 4 Abfolgen	0-65	
			10,0-15,0		15-20	
Volpriehausen-	smDS	Defurth-Sandstein	-30	Defurth-Wechsellaagerung	15-20	
	smVG	Avicula-Schichten				
	smVW	Rotweiße Wechsellaagerung				
	smVS	Basissandstein				
Bernburg-	subWO	Oberer Sandstein-Tonstein-Wechsellaagerung	200-220	Dolomitischer Sandstein	130	
	subR	Oolithische Sandsteine				
	subWU	Untere Sandstein-Tonstein-Wechsellaagerung				
Calvörde-	suCST	Sandige Tonsteinschichten	120-130	Sandige Tonsteine	110	
	suCTS	Tonige Sandsteinschichten				

Abb. A1: Stratigraphie, Ausbildung und Mächtigkeit des Buntsandsteins im Bereich der Kaligrubenfelder Sollstedt-Westfeld, Teutschenthal und Sigmundshall

Folge	Symbol	Grube Sollstedt-Westfeld		Grube Teutschenthal		Grube Sigmundshall	
		Gestein	Mächtigkeit (m)	Gestein	Mächtigkeit (m)	Gestein	Mächtigkeit (m)
Fulda-	z6	Oberer Bröckelschiefer	30-40	Oberer gefaserner Teil Mittlerer grobsandiger Teil Unterer toniger Teil	38		
	z7	Unterer Bröckelschiefer					
Friesland-	z6T	Friesland-Ton	5,0-9,0	Oberste Zechsteinletten	30		
	z5T	Ohre-Ton	<33,8				
Aller-	z4Tb	Oberer Aller-Ton		Grenzanhidrit Aller-Steinsalz	0,1-0,3		
	z4ANb	Oberer Aller-Anhydrit	0,1-0,3				
	z4NA	Aller-Steinsalz	0-40				
	z4ANa	Unterer Aller-Anhydrit	0,5-2,0				
Leine-	z4Ta	Unterer Aller-Ton	3,7-10,3	Pegmatitanhydrit Roter Salztzn	1,0-1,5 11,0-16,0		Tonbrocksalz (Na4) Rosensalz (Na4) Schneesalz (Na4) Basissalz (Na4) Pegmatitanhydrit (A4) Roter Salztzn (T4)
	z3Tb	Oberer Leine-Ton					
	z3NA	Leine-Steinsalz	0-110 (Ø 60-80)				
		Leine-Anhydrit					
		Leine-Karbonat					
Staßfurt-	z3Ta	Unterer Leine-Ton		Hauptanhidrit Grauer Salztzn	30-50 8,0-12,00		Tonmittelsalz (Na3tm) Schwadsalz (Na) Anhydritmittelsalz (Na3) Bank-,Bänder-, (Na3) Buntes Salz Kaliflöz Ronnenberg (K3Ro) Linienalzone (Na3) Hauptanhidrit (A3) Grauer Salztzn (T3)
	z2Tb	Oberer Staßfurt-Ton					
	z2ANb	Oberer Staßfurt-Anhydrit					
	z2KSt	Kalisalzflöz Staßfurt	0-100				
	z2NA	Staßfurt-Steinsalz	0-180				
Werra-	z2ANa	Unterer Staßfurt-Anhydrit	1,0-23,0	Oberer Staßfurt-Anhydrit Kaliflöz Staßfurt Übergangsschichten Staßfurt-Steinsalz Unterer Staßfurt-Anhydrit Staßfurt-Ton-Karbonat	0,2-4,7 100-800 2,0-2,5 5,0-7,0		Geb.Deckanhidrit (A2r) Decksteinsalz (Na2r) Kaliflöz Staßfurt (K2) Staßfurt-Steinsalz (Na2) Basalanhydrit (A2) Haupt-Slinkdolomit (Ca2) Werra-Anhydrit (A1)
	z2D	Staßfurt-Karbonat	19-64				
	z1ANb	Oberer Werra-Anhydrit	20-180				
	z1NA	Werra-Steinsalz					
	z1ANa	Unterer Werra-Anhydrit					
	Werra-Karbonat	3,0-5,0					
	Unterer Werra-Ton / Mutterflöz	0,42	Kupferschiefer	2,5-5,0 0,3-0,5	Zechsteinkalk (Ca1) Kupferschiefer (T1)		

Abb. A2: Stratigraphie, Ausbildung und Mächtigkeit des Zechsteins im Bereich der Kaligrubenfelder Sollstedt-Westfeld, Teutschenthal und Sigmundshall.

Anhang 2 – Messkampagnen der aktiven Seismik

Standort A: Sollstedt

Für die Untersuchungen am Referenzstandort Sollstedt kamen Messverfahren I und II zum Einsatz.

Für das *Messverfahren I* wurde eine Profilkonfiguration gewählt, die 5 sich überlappende Messaufstellungen mit einer jeweils zentral angeordneten, festen Auslage von 32 Geophonen beinhaltet. Zusätzlich wurde mit Schlägen senkrecht zum Profil (Hammer gegen Fräsbank) S-Wellen angeregt.

Nullpunkt (= 0 m): Streckenkreuz Strecke 23 / Hauptförderstrecke nach Haynrode
 Geophonabstand: 1 m
 Anregungspunktabstand: 4 m
 Samplerate: 0,1 μ s (10 kHz)

Auslage	Position AP		Position GP	
Auslage 1	1. Anregungspunkt	-96,5 m	1. Geophon	-32 m
	41. Anregungspunkt	63,5 m	32. Geophon	-1 m
Auslage 2	1. Anregungspunkt	-64,5 m	1. Geophon	0 m
	41. Anregungspunkt	95,5 m	32. Geophon	31 m
Auslage 3	1. Anregungspunkt	-32,5 m	1. Geophon	32 m
	41. Anregungspunkt	127,5 m	32. Geophon	63 m
Auslage 4	1. Anregungspunkt	-0,5 m	1. Geophon	64 m
	41. Anregungspunkt	159,5 m	32. Geophon	95 m
Auslage 5	1. Anregungspunkt	31,5 m	1. Geophon	96 m
	41. Anregungspunkt	191,5 m	32. Geophon	127 m

Messzeitraum: 22.5. – 24.05.06
 Anregung: 1. Hammerschlag (5kg) **vertikal** auf Schlagplatte(5 fach gestapelt)
 2. **horizontal** an Fräsbank (5 fach gestapelt)
 Aufnehmer: Piezoschwinger KB 103
 Apparatur: Bison 48 Kanäle
 Auslage: CDP: -64,25 m bis 159,25 m
 Profillänge: 223,5 m davon 159 m hochüberdeckt

Die Anregung erfolgte neben der Fahrstrecke im Bereich der ehemaligen Förderanlage. Dieser Bereich wies häufig Abschalungen auf, was sich bei der Anregung durch ein dumpfes Schlaggeräusch äußerte.

Das *Messverfahren II* arbeitete mit einem Schusspunktabstand von 1 m bei einem Geophonpunktabstand von ebenfalls 1 m. Es wurden 2 sich überlappende Auslagen abgeschossen.

Nullpunkt (= 0 m): Streckenkreuz Strecke 23 / Hauptförderstrecke nach Haynrode

Geophonabstand: 1 m

Anregungspunktabstand: 1 m

Samplerate: 0,1 μ s (10 kHz)

Auslage	Position AP		Position GP	
Auslage 1	1. Anregungspunkt	-20 m	1. Geophon	0 m
	112. Anregungspunkt	91 m	72. Geophon	71 m
Auslage 2	1. Anregungspunkt	52 m	1. Geophon	72 m
	112. Anregungspunkt	163 m	72. Geophon	143 m

Messzeitraum: 13.06.06

Anregung: 5kg Hammer direkt auf Strecke (keine Vertikalstapelung)

Aufnehmer: 100Hz – Vertikal-Geophone

Apparatur: Summit Kompakt 72 Kanäle

Auslage: CDP: -10 m - 153m

Profillänge: 163 m davon 144 m hochüberdeckt

Standort B: Teutschenthal

Am Referenzstandort Grube Teutschenthal bestand die Möglichkeit, alle vier Messverfahren zu testen.

Messverfahren I

Nullpunkt (= 0 m): Kilometrierung 1750 m in der Verbindungsstrecke

Geophonabstand: 1 m

Anregungspunktabstand: 1 m

Samplerate: 0,1 μ s (10 kHz)

Auslage	Position AP		Position GP	
Auslage 1	1. Anregungspunkt	-128 m	1. Geophon	-63,5 m
	161. Anregungspunkt	32 m	32. Geophon	-32,5 m
Auslage 2	1. Anregungspunkt	-96 m	1. Geophon	-31,5 m
	161. Anregungspunkt	64 m	32. Geophon	-0,5 m
Auslage 3	1. Anregungspunkt	-64 m	1. Geophon	0,5 m
	161. Anregungspunkt	96 m	32. Geophon	31,5 m
Auslage 4	1. Anregungspunkt	-32 m	1. Geophon	32,5 m
	161. Anregungspunkt	128 m	32. Geophon	63,5 m

Messzeitraum: 28.11.06 – 30.11.06
 Anregung: 5 Kg Hammer auf Schlagplatte; keine Stapelung
 Aufnehmer: Piezoschwinger
 Apparatur: Bison 48 Kanäle
 Auslage: CDP: -96,75 m – 96,75 m
 Profillänge: 256 m, davon 193,5 m hochüberdeckt

Messverfahren II

Nullpunkt (= 0 m): Kilometrierung 1750 m in der Verbindungsstrecke
 Geophonabstand: 1 m
 Anregungspunktabstand: 1 m
 Samplerate: 0,1 μ s (10 kHz)

Auslage	Position AP		Position GP	
Auslage 1	1. Anregungspunkt	-91 m	1. Geophon	-71 m
	112. Anregungspunkt	20 m	72. Geophon	0 m
Auslage 2	1. Anregungspunkt	-19 m	1. Geophon	1 m
	112. Anregungspunkt	92 m	72. Geophon	72 m

Messzeitraum: 21.11.06
 Anregung: 5kg Hammer auf Strecke; keine Stapelung
 Aufnehmer: 100 Hz vertikal Geophone
 Apparatur: Summit Kompakt 72 Kanäle
 Auslage: CDP: -81 m – 82 m
 Profillänge: 163 m davon 144 m hochüberdeckt

Messverfahren III

Nullpunkt (= 0 m): Kilometrierung 1750 m in der Verbindungsstrecke
 Geophonabstand: 1 m
 Anregungspunktabstand: 1 m
 Samplerate: 0,25 μ s (4 kHz)

Auslage	Position AP		Position GP	
Auslage 1	1. Anregungspunkt	-196 m	1. Geophon	-96 m
	249. Anregungspunkt	52 m	48. Geophon	-49 m
Auslage 2	1. Anregungspunkt	-148 m	1. Geophon	-48 m
	249. Anregungspunkt	100 m	48. Geophon	-1 m
Auslage 3	1. Anregungspunkt	-100 m	1. Geophon	0 m
	249. Anregungspunkt	148 m	48. Geophon	47 m
Auslage 4	1. Anregungspunkt	-52 m	1. Geophon	48 m
	249. Anregungspunkt	196 m	48. Geophon	95 m

Messzeitraum: 30.11.06
 Anregung: 5 Kg Hammer auf Schlagplatte; keine Stapelung
 Aufnehmer: 60 Hz Geophone
 Apparatur: Bison 48 Kanäle
 Auslage: CDP: -146 m – 145,5 m
 Profillänge: 392 m, davon 291,5 m hochüberdeckt

Am Standort B wurde im Rahmen systematischer Untersuchungen ein Vergleichstest seismischer Quellen durchgeführt. Als Registrierapparat standen zwei Geoden der Firma Geometrics zur Verfügung, welche mit 47 Vertikal-Geophonen (40 Hz) die Einzelschüsse aufzeichneten. Zu Testzwecken wurde eine Profilauslage a 47m aufgebaut. Als Quellen kamen der P-Wellenvibrator der Firma Geosym mit 3 verschiedenen Frequenzbändern, sowie ein 5 kg Metallhammer mit und ohne Schlagplatte und ein 4 kg Kunststoffhammer zum Einsatz.

Nullpunkt (= 0 m): Kilometrierung 1750 m in der Verbindungsstrecke
 Geophonabstand: 1 m
 Anregungspunktabstand: 2 m
 Samplerate: 0,25 μ s (4 kHz)

Auslage	Position AP		Position GP	
Test 1	1. Anregungspunkt	-100 m	2. Geophon	-2 m
	76. Anregungspunkt	50 m	48. Geophon	-48 m
Test 2	1. Anregungspunkt	-100 m	2. Geophon	-2 m
	76. Anregungspunkt	50 m	48. Geophon	-48 m
Test 3	1. Anregungspunkt	-100 m	2. Geophon	-2 m
	76. Anregungspunkt	50 m	48. Geophon	-48 m
Test 4	1. Anregungspunkt	-2 m	1. Geophon	0 m
	24. Anregungspunkt	-48 m	48. Geophon	-48 m
Test 5	1. Anregungspunkt	-2 m	1. Geophon	0 m
	24. Anregungspunkt	-48 m	48. Geophon	-48 m
Test 6	1. Anregungspunkt	-2 m	1. Geophon	0 m
	24. Anregungspunkt	-48 m	48. Geophon	-48 m

Messzeitraum: 26.02.08
 Anregung: Test 1: P-Wellenvibrator: Sweep 15 Hz – 120 Hz, 10 s Sweeplänge
 Test 2: P-Wellenvibrator: Sweep 20 Hz – 160 Hz, 10 s Sweeplänge
 Test 3: P-Wellenvibrator: Sweep 60 Hz – 360 Hz, 10 s Sweeplänge
 Test 4: 5 Kg Metallhammer auf Schlagplatte
 Test 5: 5 Kg Metallhammer auf Sohle

Test 6: 4 Kg Kunststoffhammer auf Sohle
 Aufnehmer: 40 Hz Geophone
 Apparatur: Geode 48 Kanäle

Seismische Messungen Sigmundshall Salinar II

Nullpunkt (= 0 m): Ansatzpunkt der Bohrung HB 311/79/480
 Geophonabstand: 1 m
 Anregungspunktabstand: 4 m
 Samplerate: 0,1 μ s (10 kHz)

Auslage	Position AP		Position GP	
Auslage 1	1. Anregungspunkt	0 m	1. Geophon	64,5 m
	41. Anregungspunkt	160 m	32. Geophon	95,5 m
Auslage 2	1. Anregungspunkt	32 m	1. Geophon	96,5 m
	41. Anregungspunkt	192 m	32. Geophon	127,5 m
Auslage 3	1. Anregungspunkt	64 m	1. Geophon	128,5 m
	41. Anregungspunkt	224 m	32. Geophon	159,5 m

Anregung: 5kg Hammer auf Stoß und Eisenbolzen (4 fach Stapelung)
 Aufnehmer: 3D Piezoschwinger
 Apparatur: Bison 96 Kanäle

Seismische Messungen Sigmundshall Salinar III

Nullpunkt (= 0 m): Ansatzpunkt der Bohrung HB 311/79/480
 Geophonabstand: 1 m
 Anregungspunktabstand: 4 m
 Samplerate: 0,1 μ s (10 kHz)

Auslage	Position AP		Position GP	
Auslage 1	1. Anregungspunkt	-96 m	1. Geophon	-31,5 m
	41. Anregungspunkt	64 m	32. Geophon	-0,5 m
Auslage 2	1. Anregungspunkt	-64 m	1. Geophon	0,5 m
	41. Anregungspunkt	96 m	32. Geophon	31,5 m
Auslage 3	1. Anregungspunkt	-32 m	1. Geophon	32,5 m
	41. Anregungspunkt	128 m	32. Geophon	63,5 m

Messzeitraum: 12.11.-13.11.05
 Anregung: 5kg Hammer auf Stoß und Eisenbolzen (4 fach Stapelung)
 Aufnehmer: 3D Piezoschwinger
 Apparatur: Bison 48 Kanäle
 Auslage: CDP: -63,75 m – 93,75 m
 Profillänge: 157,5 m davon 96m hochüberdeckt

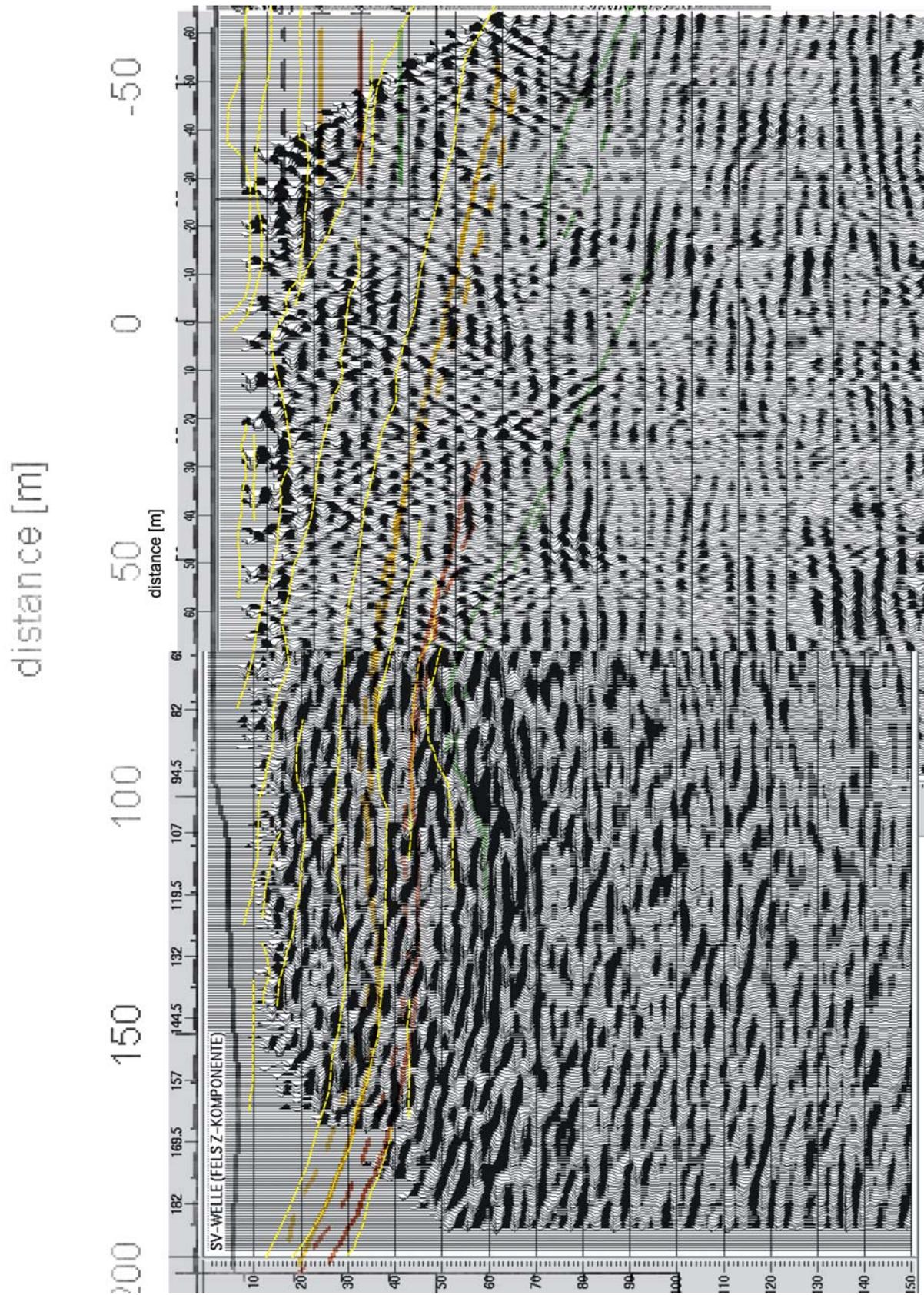


Abb. A3: Ergebnis der S-Wellen-Stapelung von Sigmundshall, Messung 2002 und 2005. Die Reflektoren entsprechen den Radarergebnissen.