# Ableitung eines standortspezifischen Langzeit-Monitoringkonzeptes für EGR unter Einbeziehung der rechtlichen und sicherheitstechnischen Vorgaben sowie hydrogeochemisches Monitoring im flachen Grundwasserleiter

Teilprojekte Mo1 und Mo3
des Themenverbundes IV ($CO_2$-MONITOR)

im F&E-Projekt

**CLEAN**
($CO_2$ Enhanced Gas Recovery in the Altmark Natural Gas Field)

**Endbericht**
(November 2011)

Bearbeiter:

Dr. R. Köber, Dipl.-Geol. C. Wiegers, PD Dr.-Ing. D. Schäfer, Prof. Dr. A. Dahmke

*CAU – Christian-Albrechts-Universität zu Kiel*
*Institut für Geowissenschaften*
*Lehrstuhl für Angewandte Geologie*
*Olshausenstraße 40*
*24098 Kiel*

Prof. Dr.-Ing. habil. J. Großmann, Dipl.-Ing. L. Tischer, Dipl.-Ing. M. Beyer

*GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH*
*Tiergartenstraße 48*
*01219 Dresden*

Projektförderung: BMBF
Projektlaufzeit: 01.07.2008 bis 30.06.2011
Förderkennzeichen: 03G0704H (CAU) und 03G0704O (GICON)

## INHALTSVERZEICHNIS:

**A) VORWORT 3**

**B) ZUSAMMENFASSUNG DES VERBUNDPROJEKTS CLEAN 4**

***B.1 Themenkomplex „Technikumsanlage Injektion von $CO_2$“ 7***

***B.2 Themenverbund „Bohrungsintegrität“ 8***

***B.3 Themenverbund „Geowissenschaftliche Prozessbeschreibung“ 9***

***B.4 Themenverbund „Umwelt- und Prozessmonitoring“ 13***

***B.5 Themenkomplex „Öffentliche Akzeptanz“ 17***

***B.6 Danksagung 17***

**C) KURZDARSTELLUNG DER TEILPROJEKTE MO1 UND MO3 18**

***C.1 Aufgabenstellung 18***

***C.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 19***

***C.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 19***

***C.4 Wissenschaftlicher Stand, an den angeknüpft wurde 20***

***C.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 21***

**D) EINGEHENDE DARSTELLUNG DER TEILPROJEKTE MO1 UND MO3 22**

***D.1 Verwendung der Zuwendung, Projektziele und Projektergebnisse 22***

D.1.1 Teilprojekt Mo1: Ableitung eines standortspezifischen Betriebs- und Langzeitmonitoring-Konzepts für EGR unter Einbeziehung der rechtlichen und sicherheitstechnischen Vorgaben 22

D.1.1.1 Sicherheitstechnische Risikobewertung von EGR am Standort Altmark mit Angabe von Gefährdungspfaden und sicherheitstechnischen Optionen (GICON) 22

D.1.1.2 Juristische Bewertung und Einordnung des Monitorings von EGR in den bestehenden rechtlichen Rahmen (Dr. Angelika Leppin, Prof. Dr. Wolfgang Ewer) 29

D.1.1.3 Erarbeitung eines Monitoringkonzepts (CAU) 31

D.1.2 Teilprojekt Mo3: Erkundung, Monitoring und Bewertung hydrogeologischer und hydrogeochemischer Parameter am EGR-Standort 38

D.1.2.1 Erarbeitung eines geologischen Strukturmodells (GICON) 38

D.1.2.2 Bohrungsarbeiten und Sedimentanalysen (CAU/GICON) 42

D.1.2.3 Grundwassermonitoring (GICON/CAU) 47

D.1.2.4 Geophysikalische Untersuchungen (CAU) 54

D.1.2.5 Modellierung (CAU) 59

***D.2 Zahlenmäßiger Nachweis 69***

***D.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 69***

***D.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 69***

*D.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen 70*

*D.6 Veröffentlichungen 70*

*D.7 Literatur: 73*

**E) LISTE DER ANHÄNGE: 74**

*E.1 Monitoringkonzept 74*

*E.2 Rechtliches Gutachten 74*

*E.3 Strukturmodell 74*

*E.4 Arbeitsprogramm Bohrarbeiten 74*

*E.5 Bohrprofile, Ausbaupläne, Schichtenverzeichnisse 74*

*E.6 Ergebnisse der Festphasenuntersuchungen 74*

*E.7 Konzeption des Grundwassermonitorings 74*

*E.8 Probenahmeplanung 74*

*E.9 Ergebnisse des Grundwassermonitorings 75*

*E.10 Bericht Geoelektrik-Messungen 75*

*E.11 Bericht SkyTEM-Messungen 75*

*E.12 Modellierung 75*

# A) VORWORT

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der beiden Teilprojekte Mo1: "Ableitung eines standortspezifischen Betriebs- und Langzeit-Monitoringkonzeptes für EGR unter Einbeziehung der rechtlichen und sicherheits-technischen Vorgaben" und TV IV, Mo3: "Erkundung, Monitoring und Bewertung hydrogeologischer und hydrogeochemischer Parameter am EGR-Standort" des CLEAN-Verbundprojekts dargestellt. Beide Teilprojekte sind Bestandteil des Themenverbundes IV „Umwelt- und Prozessmonitoring“ und wurden gemeinsam von der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und der GICON GmbH bearbeitet.

Nach Vorgaben des Projektträgers wurde von beiden Zuwendungsempfängern für beide Teilprojekte gemeinsam ein zusammenhängender kurzgefasster Gesamtbericht erstellt. Weiterführende Dokumentationen der Projektarbeiten finden sich im Anhang des Berichts. Der Darstellung der Projektarbeitungen vorausgestellt ist eine Zusammenfassung des gesamten Verbundprojekts, die unter Zuarbeit aller Teilprojekte von der Projektkoordination verfasst wurde.

# B) ZUSAMMENFASSUNG DES VERBUNDPROJEKTS CLEAN

## $CO_2$ LARGE-SCALE ENHANCED GAS RECOVERY IN THE ALTMARK NATURAL GAS FIELD (CLEAN)

MAJA TESMER[1], PETER PILZ[1], MICHAEL KÜHN[1] & CLEAN-PARTNER[2]

[1] Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum - Zentrum für $CO_2$-Speicherung, Telegrafenberg, 14473 Potsdam

[2] im Folgenden aufgeführt:

Das Verbundprojekt CLEAN war ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (F&E) von insgesamt 16 Institutionen der deutschen Wissenschaft und Wirtschaft, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Zeitraum von 01.07.2008 bis 30.06.2011 gefördert wurde. Es handelte sich bei diesem F&E-Vorhaben um das wissenschaftliche Begleitprogramm zu einem EGR-Pilotprojekt („Enhanced Gas Recovery“), welches gemeinschaftlich von GDF SUEZ E&P Deutschland GmbH (GDF SUEZ) und Vattenfall Europe durchgeführt werden sollte. Hierzu wurden seitens des Lagerstättenbetreibers das nahezu vollständig abgebaute, strukturell und hydraulisch vom Hauptfeld isolierte Teilfeld Altensalzwedel ausgewählt und die zur Durchführung des Pilotprojektes erforderliche ober- und untertägige Infrastruktur eingerichtet bzw.

bereitgestellt. Das Verbundprojekt CLEAN hatte zum Ziel, (1) die Möglichkeiten der Mobilisierung konventionell nicht förderbarer Erdgasmengen zur Steigerung der Erdgasförderung zu testen, und (2) die generelle Tauglichkeit der Lagerstätte für die Injektion und Speicherung als auch die generelle Injizierbarkeit von $CO_2$ zu untersuchen. Im Rahmen des Pilotvorhabens war geplant, nahezu 100.000 Tonnen $CO_2$ in das Teilfeld Altensalzwedel zu injizieren.

Der Forschungsschwerpunkt von CLEAN lag dabei in der Entwicklung und Optimierung geeigneter Technologien und Verfahren (1) zur optimalen $CO_2$-Injektion in Bezug auf eine größtmögliche Ausbeute des Erdgasreservoirs, (2) zur technischen Überwachung der $CO_2$-Ausbreitung in der Lithosphäre unter Berücksichtigung umweltrelevanter Prozesse, (3) zur Realisierung eines Langzeitbohrungsverschlusses, (4) zur Ermittlung und Beurteilung der Bohrungsintegrität älterer Bohrungen sowie (5) der Untersuchung, Beschreibung und Bewertung aller mit der $CO_2$-Injektion und der Verdrängung von Erdgas verbundenen Prozesse. Darüber hinaus sollte durch die Weiterentwicklung der wissenschaftlichen open-source Software OpenGeoSys und deren Anpassung speziell an Reservoirmodellierungen ein effektives Simulationswerkzeug für künftige EGR- und $CO_2$-Speicherprojekte zur Verfügung gestellt werden.

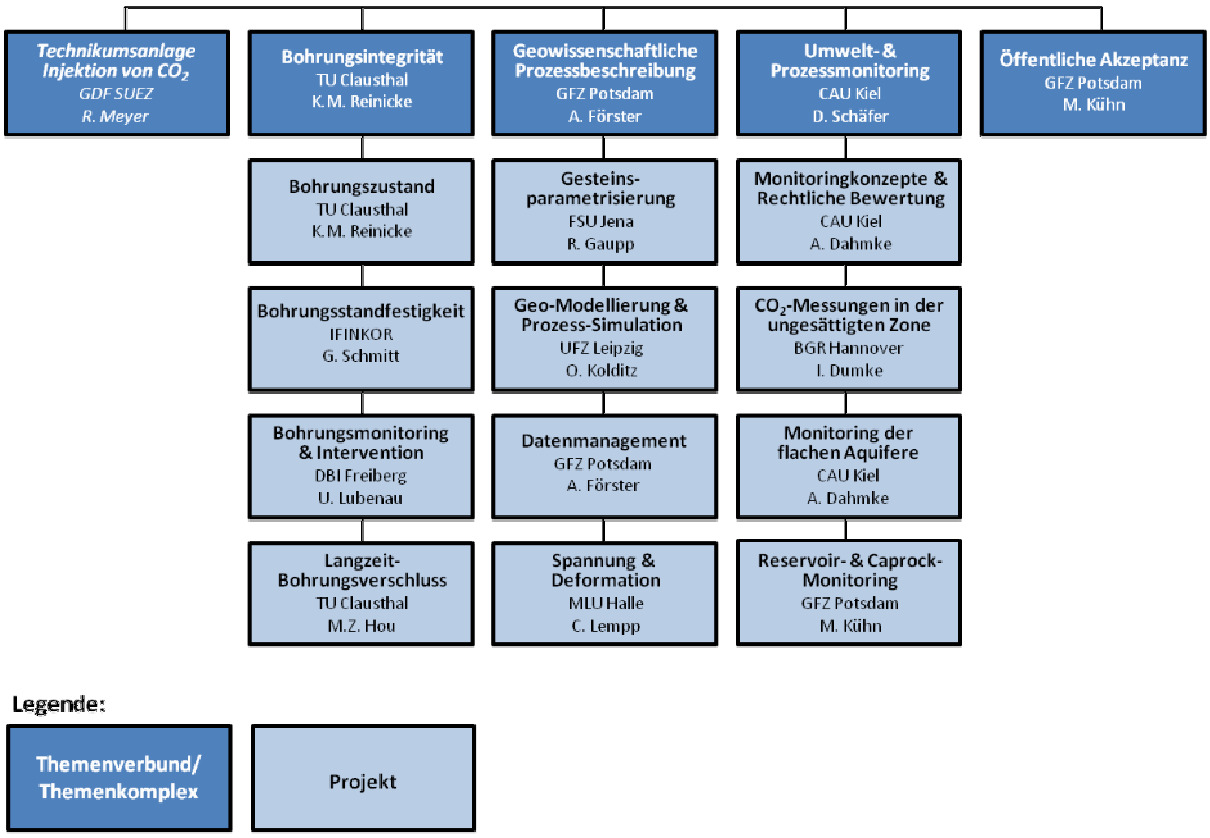



***Abb. A:*** *Organigramm des F&E-Verbundvorhabens CLEAN*

Das Verbundvorhaben wurde vom Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungs-Zentrum (GFZ) in enger Abstimmung mit dem Verbundpartner und Lagerstättenbetreiber GDF SUEZ koordiniert. Drei Themenverbünde bildeten den Kernbereich des Verbundvorhabens: „Bohrungsintegrität“, „Geowissenschaftliche Prozessbeschreibung“ sowie „Umwelt- und Prozessmonitoring“ (s. Abb. A). Jeder Themenverbund setzte sich aus 4 Projekten zusammen, die wiederum den Rahmen für verschiedene Teilprojekte bildeten. Ungeachtet dieser Strukturvorgabe waren die Teilprojekte auch untereinander verbundübergreifend vernetzt.

Zusätzlich wurde der ebenfalls vom BMBF geförderte Themenkomplex „Öffentliche Akzeptanz“ zur sachlichen Aufklärung und qualifizierten Information der regionalen Bevölkerung an das F&E-Vorhaben angegliedert. Die Aktivitäten in diesem Themenkomplex wurden vom GFZ aus geleitet und in engem Kontakt mit GDF SUEZ und dem BMBF realisiert. Mit CLEAN assoziiert war zudem der Themenkomplex „Technikumsanlage – Injektion von $CO_2$“. Dieser von GDF SUEZ verantwortete Themenkomplex hatte sich zur Aufgabe gestellt, die technische Basis für die wissenschaftlichen Arbeiten im CLEAN-Vorhaben inklusive der Infrastruktur zur $CO_2$-Injektion zu Verfügung zu stellen.

Für die interne Kommunikation stand für alle Projektpartner eine von der Firma GICON entwickelte und gepflegte, Web-basierte Informationsplattform zur Verfügung.

Der unerwartet große politische Einfluss auf das bergrechtliche Genehmigungsverfahren sowie die Verzögerungen bei der Umsetzung der europäischen Richtlinie zur Abscheidung, zum Transport und zur Speicherung von $CO_2$ auf bundesdeutscher Ebene hatten zur Folge, dass die zuständige Behörde (Landesamt für Geologie und Bergwesen, Sachsen-Anhalt) während der Projektlaufzeit keine Erlaubnis für die Injektion von $CO_2$ erteilte.

Trotz dieses massiven Einschnitts in das CLEAN-Vorhaben konnten die Arbeiten zum überwiegenden Teil erfolgreich umgesetzt werden, wobei partiell verschiedene Anpassungen an die Durchführung und Ziele erforderlich waren. Die Themenverbünde „Bohrungsintegrität“ sowie „Geowissenschaftliche Prozessbeschreibung“ konnten ihre Ziele weitestgehend unbeeinflusst umsetzen. Im Themenverbund „Umwelt- und Prozessmonitoring“ wurden alle Projekte - mit Ausnahme des Projektes „Reservoir- & Caprock-Monitoring“ - mit geringfügigen Anpassungen realisiert. Alle im Projekt „Reservoir- & Caprock-Monitoring“ entwickelten Methoden konnten aber alternativ an anderen Standorten erfolgreich getestet werden.

Im 2. Quartal 2010 wurde, entsprechend der zu diesem Zeitpunkt immer noch unklaren politischen Rahmenbedingungen, von GDF SUEZ die Vergabe noch ausstehender Fremdleistungen ausgesetzt. Die betriebsbereite Informationsstelle in Salzwedel konnte nicht eröffnet werden. Die Öffentlichkeitsarbeit wurde an diese Situation angepasst weitergeführt. Das er-

arbeitete Informationsmaterial konnte alternativ im Besucherzentrum Ketzin der Öffentlichkeit präsentiert werden.
Insgesamt führten die im CLEAN-Verbundprojekt durchgeführten Arbeiten zu einer umfassenden Bewertung des EGR-Potentials der Altmark-Lagerstätte. Es wurden sowohl digitale Datenbanken und Modelle als auch Bewertungen der Bohrungsintegrität, der Förderpotentiale sowie der Folgeerscheinungen bzw. Risiken einer EGR-Technologie am Standort Altmark erarbeitet. Auch konnten die wesentlichen in Verbindung mit einer $CO_2$-Speicherung in-situ ablaufenden Prozesse dokumentiert, bilanziert und beurteilt werden. Die Weiterentwicklung und Erprobung unterschiedlicher Monitoringmethoden ermöglicht eine verbesserte Überwachung von $CO_2$-Speicherstandorten. Hierdurch wurde der Kenntnisstand nicht nur im Bereich von EGR und $CO_2$-Speicherung, sondern generell für Untersuchungen des tiefen Untergrundes (z. B. Geothermie, Kohlenwasserstoffexploration) befördert. Ein weiteres Resultat des Verbundvorhabens ist die Schaffung der technischen, logistischen und konzeptionellen Voraussetzungen für die Durchführung eines EGR-Pilotprojektes mit $CO_2$-Injektion für den Standort Altmark.

Der wirtschaftliche Nutzen der bisher erfolgten Arbeiten besteht vorrangig in der optimierten Nutzung des potenziellen unterirdischen Speicherraumes und der Verringerung von Risiken bei künftigen EGR- bzw. $CO_2$-Speichervorhaben. De facto aber hängt der wirtschaftliche Erfolg der geleisteten Arbeiten in starkem Maß von der politischen Entwicklung in den nächsten Jahren und Jahrzehnten ab.

Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse im Einzelnen vorgestellt:

## B.1 Themenkomplex „Technikumsanlage Injektion von $CO_2$“

Im diesem Themenverbund wurden in der Projektlaufzeit folgende Arbeiten vorgenommen:

- Installation der Injektionsanlage,
- Materialbeschaffung (Rohrleitungen, Komplettierung der Injektoren),
- Schulung von Personal.

Aufgrund der während der Projektlaufzeit nicht erteilten bergrechtlichen Genehmigungen konnten die Übernahme des $CO_2$, die Konditionierung des $CO_2$, der Betrieb der Konditionierungsanlage, die Injektion des $CO_2$ in den Rotliegend-Speicher, die Erfassung der Platznahme des $CO_2$ in der Lagerstätte, die Bewertung der Injektivität der Bohrungen und des unmittelbar angrenzenden Speicherbereichs, die teilfeldbezogene Bewertung des EGR-Effektes sowie die Messung und der Nachweis der prognostizierten, gesteigerten Erdgasausbeute nicht durchgeführt werden.

## B.2 Themenverbund „Bohrungsintegrität“

Im Themenverbund „Bohrungsintegrität“ standen folgende Ziele im Vordergrund der Untersuchungen und wurden in vollem Umfang erreicht:

- Entwicklung wissenschaftlicher Methoden zur Erfassung und Bewertung des Bohrungszustandes im Hinblick auf dessen langfristige Eignung für eine sichere und ökologisch unbedenkliche $CO_2$-Speicherung,
- Entwicklung wissenschaftlicher Konzepte zur Szenariendefinition und -bewertung möglicher $CO_2$-Leckagen,
- Entwicklung von Monitoringprogrammen und Maßnahmen zur Vermeidung, Reparatur und Bekämpfung von Leckagen sowie
- Entwicklung eines dauerhaften geologischen Verschlusskonzepts von Bohrungen.

Basierend auf den aktuellen Monitoringtechniken und den potenziellen, relevanten Schadensprozessen wurden Bewertungsschemata zur Beurteilung des aktuellen Bohrungszustandes sowie der Langzeitsicherheit entwickelt. Verschiedene Prüfverfahren wurden einander gegenübergestellt und evaluiert. Als relevante Schadensprozesse wurden chemische Korrosion, mechanisch-thermische Beanspruchung sowie Herstellungsdefizite identifiziert und beschrieben. Bei offenen Bohrungen besteht das Prüfschema u. a. aus Bohrlochmessungen zur Ausweisung potenzieller Leckagewege, zur Feststellung der Druckdichte sowie dem Ausschluss von Fluidbewegungen. Für verfüllte Bohrungen wurde ein Kriterienkatalog zur Beurteilung der Qualität der Verfüllung entwickelt. Die Prognose der Langzeitsicherheit wurde anhand der Methode der „Features, Events and Processes (FEPs)“ durchgeführt. In Laborexperimenten konnten Selbstheilungsprozesse im Verbundsystem (an den Grenzflächen Salz-Zement und Zement-Casing sowie innerhalb des Zements) nachgewiesen werden.

Zur Quantifizierung der langfristigen Integritätsentwicklung von Bohrungen wurden Laborexperimente zum Korrosionsverhalten unterschiedlicher Stähle im Kontakt mit $scCO_2$ unter verschiedenen Einflussfaktoren (Wasser, Chlor, Temperatur, Inhibitoren und den Gasen $O_2$, CO und $H_2S$) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Vorhandensein von Wasser in dem System die Korrosion deutlich erhöht. Aus diesem Grund sollte $CO_2$, bevor es in Rohrleitungen oder Injektionssonden gelangt, getrocknet werden. Beimengungen von Gasen sollten einen noch festzulegenden Grenzwert nicht überschreiten. Die Komplettierung der Sonden sollte mit 13Cr-Stahl erfolgen.

Nach Auswertung und Interpretation der von GDF SUEZ zur Verfügung gestellten Bohrlochuntersuchungen (1975 - 2000) im Untersuchungsgebiet wurden für repräsentative Bohrungsintervalle Festigkeitsberechnungen für alle Bohrungen gegenüber Kollaps und Bersten unter Beachtung der Korrosionsrate und injektionsbedingter Thermospannungen durchgeführt. Die berechneten Sicherheiten zeigen, dass die technische Bohrungsintegrität der 12 untersuch-

ten Sonden für das EGR-Pilotprojekt CLEAN (3 Jahre mit insgesamt 100.000 t $CO_2$ Injektion) ohne weitere Intervention gegeben ist. Für den Fall einer Leckage wurden ein Maßnahmenkatalog erarbeitet und hierzu Risikoszenarien modelliert. Zementundichtigkeiten können durch Polymergelinjektionen oder Sekundärzementation behoben werden. Für Casing-Reparaturen wird die Patch-Technologie empfohlen.

Für Langzeitbohrungsverschlüsse bieten natürliche Materialien (Steinsalz, Ton, Schwefel) gegenüber Stahl und Zement einen besseren Korrosionsschutz. Deshalb wurde für ein langzeitstabiles Bohrungsverschlussverfahren im salinaren Deckgebirge ein Konzept entwickelt, welches durch das Einbeziehen der natürlichen Kriecheigenschaften einer mehrere hundert Meter mächtigen Steinsalzformation im Verbund mit weiteren, vorgesehenen Verschlussmaterialien (Polymergele im Porenraum, Zementbrücken unterhalb der Salzbarriere) zusätzliche Sicherheit bringen soll. Zur Ermittlung der Kriechparameter von Steinsalz wurden Laborexperimente durchgeführt, die in die numerischen Simulationen des Langzeitbohrungsverschlusses einflossen. In einem Feldversuch wurde die Eignung der Verschlusstechnologie getestet. Hierzu wurde eine Bohrungssektion im Bereich der Steinsalzformation durch Ausfräsung von Verrohrung und Zementation geöffnet und die natürliche Steinsalzkonvergenz zum Verschluss der Bohrung beobachtet. Die Untersuchungen wurden von numerischen Simulationen begleitet. Im Vergleich mit den Verifikationssimulationen verliefen die in-situ Beobachtungen zur Steinsalzvolumenkonvergenz jedoch etwa 12- bis 15-fach langsamer. Das Feldexperiment wurde mit der zweiten Workover-Phase im Juni 2011 beendet. Die Begutachtung des gewonnenen Kernmaterials sowie die Auswahl von geeigneten Proben für die Laborversuche an Steinsalzkernen dauern derzeit an. Die Ergebnisse des Experiments sind im Abschlussbericht dargestellt.

## B.3 Themenverbund „Geowissenschaftliche Prozessbeschreibung“

Die Arbeiten in diesem Themenverbund waren auf ein verbessertes, ganzheitliches Systemverständnis der bei einer $CO_2$-Injektion bzw. -Speicherung ablaufenden physiko-chemischen Vorgänge fokussiert. Die Forschungsschwerpunkte lagen auf der umfassenden geowissenschaftlichen Charakterisierung des geologischen Gesamtsystems der Reservoirgesteine, Fluide und des Deckgebirges sowie aller durch die $CO_2$-Injektion induzierten Prozesse.
Folgende Zielsetzungen und Fragestellungen wurden verfolgt:

- Aufbau eines effizienten, ganzheitlichen Daten-Management-Systems zur optimalen Vernetzung der Themenverbundmitglieder als Voraussetzung einer ganzheitlichen geowissenschaftlichen Systemanalyse,
- Entwicklung neuer Laborverfahren und numerischer Methoden, die speziell auf die Belange einer $CO_2$-Injektion ausgelegt sind,

- Demonstration und Quantifizierung von zu erwartenden Prozessen in verschiedenen Skalen: (1) Labor, (2) Bohrlocheffekte, (3) „Nah-Feld"-Effekte, (4) Reservoir- und Deckgestein-Skala und (5) Lagerstättenskala.

Es wurde ein Web-basiertes Informationssystem zur interaktiven Benutzung für die Arbeitsgruppen des Themenverbundes entwickelt. In diesem Informationssystem wurden die von GDF SUEZ übergebenen Daten digital zur Verfügung gestellt. Es erfolgte ferner eine Verifizierung und Interpretation der geowissenschaftlichen Daten. Das Daten-Management-System diente zusätzlich der Archivierung neu erhobener chemischer, mineralogischer und thermodynamischer Daten sowie der Bereitstellung von Modellen, Simulationen und anderer Dokumente. Hierdurch wurde eine Plattform für eine verbesserte wissenschaftliche Kommunikation und einen schnellen Transfer von Daten geschaffen.

Für das Deckgebirge wurde ein geologisches Modell entwickelt und parametrisiert. Um die vorherrschenden Stressregime zu charakterisieren und künftige Entwicklungen der Spannungszustände in Bezug auf anthropogene Einwirkungen einzuschätzen, wurden in-situ Spannungsmodellierungen durchgeführt. Die Auswertung von Archivdaten erlaubte Rückschlüsse auf den aktuellen Spannungszustand im Untersuchungsgebiet. Zusätzliche Experimente an Gesteinen wurden im Labor durchgeführt, um weitere erforderliche gebirgsmechanische Parameter für die Modelle zu erhalten. Ein 3D-ArcGIS Deckgebirgsmodell wurde für das Untersuchungsgebiet bis in eine Tiefe von etwa 3 km entwickelt. Die ebenfalls im GIS-Modell enthaltenen Daten über Bohrlochrandausbrüche zeigen den Charakter der räumlichen Verteilung von Spannungsanisotropien in verschiedenen geologischen Horizonten.

Die sedimentologischen Untersuchungen der Rotliegendsedimente führten zur Klassifizierung der Sandsteine in verschiedene Litho- und Diagenesefaziestypen, die auf einer kontinentalen Überflutungsebene in einem Sabhka-Milieu abgelagert wurden. Detaillierte geochemische und mineralogische Untersuchungen zeigen zudem enge Zusammenhänge zwischen geochemischer Gesteinszusammensetzung, mineralchemischen und -morphologischen Charakteristika (besonders bei Chlorit- und Karbonattypen), spezifischen (reaktiven) Mineraloberflächen und petrophysikalischen Parametern (z. B. Porosität, Permeabilität, nicht reduzierbarer Wassersättigung, „wettability") und den verschiedenen Litho- und Diagenesetypen. Dadurch wurden in den höher porösen und permeablen äolischen Faziestypen Fluid-Gestein-Reaktionen begünstigt, die zu einer Bleichung der ursprünglich roten Sandsteine führte. Die dabei beteiligten Fluide führten $CO_2$ und Kohlenwasserstoffe, welche eine Reduzierung von Eisenverbindungen und einen Massentransport von Elementen begünstigten. Die Lithofazies beeinflusst dabei stark die früh- bis spätdiagenetischen Mineralbildungs- und Lösungsprozesse, die wiederum großen Einfluss auf die Porositäten und Permeabilitäten haben. Hierbei erreichen äolische Dünen- und Flächensanden die höchsten Porositäten und Permeabilitäten. Das Ausmaß der Gestein/Fluid-Wechselwirkungen hängt im Wesentlichen von der Korngröße und -sortierung bzw. Porengröße, -form und -

vernetzung ab. Die gefundenen Korrelationen konnten in Clustergruppen zusammengefasst werden und können somit zukünftige PETREL™-Modellierungen verfeinern. $CO_2$-Beschlagungsexperimente zeigten, dass mit $CO_2$ gesättigte Solen zur Lösung von Mineralen und Änderungen der Fluid- und Transporteigenschaften der Sandsteine führen. Die dabei beobachteten Gesteinsalterationen zeigten große Ähnlichkeiten zu den gefundenen Phänomenen in den gebleichten (diagenetisch alterierten) Sandsteinen. In weiteren Laboruntersuchungen wurden geomechanische und geohydraulische Gesteinsuntersuchungen durchgeführt, das Primärspannungsfeld ermittelt sowie ein „multi-layer caprock reservoir"-2D-Modell erstellt. Die Laboruntersuchungen bestätigen die Eignung des Teilfelds Altensalzwedel für eine Pilotinjektion der geplanten 100.000 t $CO_2$ und lieferten wichtige Eingangsparameter für die numerische Prozessmodellierung.

Numerische Prozessmodellierung und -simulation führten zu einem verbesserten Prozess- und Systemverständnis, auf dessen Basis fundierte Prognosen für die Effektivität und Sicherheit der EGR-Technologie mittels $CO_2$-Injektion getroffen werden konnten. In diesem Zusammenhang wurden zur Beschreibung der beobachteten thermo-hydro-mechanisch-chemisch gekoppelten Prozesse sowohl kommerzielle Simulatoren genutzt (z. B. Eclipse 100/300, TOUGH, FEFLOW, FLAC) als auch das wissenschaftliche open-source Softwareprojekt OpenGeoSys von verschiedenen Projektpartnern weiterentwickelt. Durch Code-Vergleiche bezüglich unterschiedlicher Aspekte der EGR-Prozesskette konnten Realitätsbezug und Zuverlässigkeit der entwickelten Modelle und deren Implementierung in OpenGeoSys nachgewiesen werden. Für unterschiedliche Untersuchungsskalen, die vom Bohrloch über das Reservoir-Nahfeld bis in das Gebiet der Gesamtlagerstätte reichten, wurden Modelle entwickelt und kalibriert. Zur Modellkalibrierung konnten neben Literaturdaten in vielfältiger Weise Ergebnisse von Laborexperimenten herangezogen werden, die im Projekt durchgeführt wurden (z. B. hydraulische, geomechanische und geochemische Parameter). Aufgrund der nicht genehmigten $CO_2$-Injektion konnten die Modellierungen nicht anhand von neu erhobenen Messdaten (Injektionsmengen, -raten, etc.) validiert werden. Die erforderliche Leistungsfähigkeit der verwendeten bzw. entwickelten numerischen Codes konnte jedoch durch ein umfangreiches Benchmarking der untersuchten Vorgänge (physikalisch-chemische Einzelprozesse, gekoppelte Phänomene unterschiedlicher Komplexität) sichergestellt werden. In realistischen Szenariensimulationen wurde u. a. im Rahmen eines Code-Vergleichs zwischen Eclipse und OpenGeoSys der für das Untersuchungsgebiet geplante Tracer-Test modelliert, woraus sich Hinweise für effektive Monitoringstrategien und -verfahren ergaben.

Die Bohrlochmodelle zeigen u. a., dass bei einer gasförmigen Injektion des $CO_2$ in der Injektionssonde keine signifikanten thermischen Beanspruchungen des Zements oder des Casings zu erwarten sind. Basierend auf den Bohrlochmodellen wurde ein Konzept zur optimalen $CO_2$-Injektion entwickelt. Im Rahmen der Entwicklung geeigneter Monitoringstrategien für die Erfassung der Temperaturentwicklung in unmittelbarer Bohrlochumgebung wurde das Wiederaufwärmverhalten der Speicher- und Deckgesteinhorizonte numerisch simuliert. Wie

bei allen durchgeführten Code-Vergleichen konnten auch hier sehr gute Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen kommerzieller Codes (hier: FEFLOW) und OpenGeoSys erzielt werden.

Das Programm PHREEQC wurde weiterentwickelt und mit dem Simulationsprogramm OpenGeoSys gekoppelt, um physiko-chemische Prozesse, die bei EGR und $CO_2$-Speicherung im Reservoir ablaufen, besser beschreiben und quantifizieren zu können. Hierzu wurde der Quellcode des Programms PHREEQC um zusätzliche Datensätze erweitert, Schnittstellen zu anderen Programmen entwickelt und eine Effizienzsteigerung der geochemischen Berechnungen durch algorithmische Beschleunigungen und Parallelisierung erreicht. In der PHREEQC/OpenGeoSys-Kopplung wird u. a. die wechselseitige Lösung von $CO_2$ in Wasser bzw. Wasser in $CO_2$ bei nicht-isothermen Gasfluss in porösen Medien berücksichtigt. Dies ermöglicht die Modellierung von Austrocknungseffekten im bohrlochnahen Bereich und von $CO_2$-induziierten Fluid-Gestein-Wechsel-wirkungen. Ferner wurden Methoden zur Überprüfung von Unsicherheiten in chemischen Datenbanken basierend auf „small random perturbations“ entwickelt. In einem weiteren Schritt wurde eine systematische, multivariate Analyse zur Qualitätskontrolle der Datensätze und der chemischen Simulationen durchgeführt. Modellierungsergebnisse zur Injektion von CO2 in der Altmark wurden mit veröffentlichten Ergebnissen natürlicher Analoga (z. B. Fizzy Gas Reservoir, Rotliegend, Nordsee) verglichen. Die durchgeführten Arbeiten waren maßgeblich für die Entwicklung des Simulators OpenGeoSys im Bereich der geochemischen Modellierung.

Die bereits erwähnten positiven Ergebnisse von Codevergleichen mit kommerzieller Simulationssoftware zeigen, dass die im Projekt geplante Weiterentwicklung der wissenschaftlich genutzten Software OpenGeoSys, als offenes, den Projektpartnern im Quellcode verfügbares System, den angestrebten Entwicklungsstand erreichen konnte. Als Vorteile gegenüber kommerziellen Lösungen sind u. a. die Realisierung innovativer Modelle für die Zustandsgleichungen realer Gase bzw. deren Mischungen sowie die modellseitige Kopplung unterschiedlicher physikalischer und chemischer Prozesse einschließlich deren effizienter Umsetzung in einem einheitlichen Softwarekonzept zu sehen. Die Software OpenGeoSys enthält zudem ein flexibles Schnittstellenmanagement für den Datenaustausch mit numerischen Werkzeugen der Geoinformatik, Prä- und Postprozessoren sowie anderen Simulatoren. Algorithmen für das Höchstleistungsrechnen sind ebenso implementiert wie Schnittstellen zu wissenschaftlichen 3D-Visualisierungs-instrumenten.

Geomechanische Simulationen im bohrlochnahen Bereich, die mit hydraulischen und thermischen Prozessen gekoppelt wurden, zeigten unter den geplanten Injektionsbedingungen zu keiner Zeit das Risiko der Schädigung des Speicher- bzw. Deckgesteins. Diese Aussage ließ sich auch auf das gesamte Reservoirmodell übertragen. Das Materialverhalten aller betrachteten Gesteinsschichten erwies sich über den gesamten Zeitraum während und nach der

Injektion von $CO_2$ als elastisch. Plastische Effekte als Anzeichen für potenzielles mechanisches Versagen wurden nicht festgestellt.

Zur Kontrolle der $CO_2$-Injektion und Injektivität der Speicherhorizonte wurde ein Bohrlochmodell mit dem Reservoirmodell gekoppelt. Für das Reservoirmodell wurde ein History-Matching erfolgreich durchgeführt. Die Simulationen zeigen, dass die geplante Injektion von knapp 100.000 t im Vergleich zur Größe des Injektionsgebiets nur geringen Einfluss sowohl auf den Lagerstättendruck als auch auf den Ausbeutefaktor hat. Die Ausbreitung des $CO_2$ variiert in Abhängigkeit von der Reservoirheterogenität und den angenommen Injektionsregimes. Die modellierten Szenarien lassen den Schluss zu, dass es innerhalb der Injektionsphase von 2 Jahren zu keinem $CO_2$-Durchbruch an der 1.600 m vom Injektor entfernten Produktionssonde kommt, während in einer etwa 600 m entfernten Beobachtungssonde nach ungefähr einem Jahr bereits ein Anstieg der $CO_2$-Konzentrationen messbar sein sollte.

## B.4 Themenverbund „Umwelt- und Prozessmonitoring“

Zu den Aufgaben dieses Themenverbundes gehörten die Entwicklung und Erprobung von Monitoringmethoden sowie die Ableitung eines Umwelt- und Betriebsmonitoringkonzeptes. Hierbei wurden die ungesättigte Zone, die oberflächennahen Grundwasserleiterkomplexe, das Deckgebirge und das Reservoir voneinander unterschieden. Folgende Ziele sollten erreicht werden:

- Die Entwicklung und Erprobung von Methoden zum Prozessmonitoring für die genannten Gebiete sowie die Durchführung des jeweiligen Monitorings:
    - geophysikalisches Monitoring (Seismik, Druck, Temperatur),
    - geochemisches und isotopengeochemisches Monitoring,
    - Erfassung der mikrobiellen Biozönosen,
    - Durchführung von Bodengasmessungen,
    - hydrogeologisches Monitoring.
- Die Erfassung der natürlich und anthropogen verursachten Schwankungsbreiten der jeweiligen Parameter und möglicher Indikatoren vor und während der EGR-Maßnahme.
- Die Bewertung der verschiedenen Methoden sowie Identifizierung, Ausweisung und Dokumentation der für ein EGR-Monitoring relevanten Parameter und Indikatoren.

Für die ungesättigte Zone sowie den Bereich der oberflächennahen Grundwasserleiterkomplexe konnte das geplante Bodengasmonitoring in vollem Umfang durchgeführt werden, da die Untersuchungen von einer $CO_2$-Injektion unabhängig waren. Für das Bodengasmonitoring wurde ein Messnetz mit automatischer Datenübertragung im Untersuchungsgebiet aufgebaut, welches kontinuierlich die Konzentration von $CO_2$ und $CH_4$ in der Bodenluft aufzeichnete. Die Messungen zeigen natürliche Konzentrationsschwankungen, die sowohl zeitlich als auch räumlich stark variieren. Jahreszeitlich bedingte und auch auf kurzer Zeitskala

beobachtete Veränderungen sind abhängig von der Temperatur und der Bodenfeuchte, die wesentliche Steuerparameter für den mikrobiellen Abbau sind. Mikrobiologische Untersuchungen bestätigen eine relativ große und aktive mikrobielle Population im Nahfeld der Messstationen, die natürlich vorkommendes organisches Material zu $CO_2$ umsetzen. Räumliche Konzentrationsunterschiede ergeben sich aus dem Flurabstand und dem Gehalt an organischen Substanzen. Um die natürliche Bandbreite der Gasmessungen abschätzen zu können, wird empfohlen, langjährige Baseline-Messungen durchzuführen, die es dann ermöglichen sollen, $CO_2$-Leckagen von natürlichen Konzentrationsschwankungen zu unterscheiden.

Zur Erfassung der natürlichen Schwankungsbreiten der Konzentrationen von Wasserinhaltsstoffen in oberflächennahen Grundwasserleitern als Referenzzustand vor einer möglichen $CO_2$-Injektion wurde das vorhandene Grundwasserbeobachtungsnetz durch zusätzliche Beobachtungspegel erweitert. In den neuen Messstellen wurden das Grundwasser sowie die Sedimente beprobt und analysiert und damit eine Basislinie definiert. Mittels geophysikalischer Messungen (Hubschrauber gestützte Aeromagnetik, Bohrloch/Oberflächen-Geoelektrik) wurden lineare und flächenhafte Informationen zur Verteilung des elektrischen Widerstands im Untergrund gewonnen, die ebenfalls als Basislinien-Messungen dienen und zusätzlich Aufschlüsse über die geologische Struktur am Standort liefern. Basierend auf vorhandenen geologischen Daten zur Stratigrafie des Untergrunds als auch unter Berücksichtigung der neuen Bohrprofile wurde ein geologisches Strukturmodell für die oberflächennahen Grundwasserleiter am Standort erstellt. Das Strukturmodell wurde in ein hydrogeologisches Strömungsmodell überführt und anhand gemessener Grundwasserstände kalibriert. Das hydrogeologische Modell diente als Datengrundlage zur Simulation von Szenarien zum $CO_2$-Aufstieg in den oberflächennahen Grundwasserkomplex und zum Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Ausbreitung der Gasphase. Darüber hinaus wurden die geochemischen Auswirkungen einer $CO_2$-Lösung im Grundwasser zur Beurteilung von Detektionsmöglichkeiten modelliert.

Im Bereich des Deckgebirgs- und Reservoirmonitoring wurden von den Arbeitsgruppen Monitoringkonzepte für das Untersuchungsgebiet entwickelt. Basislinien-Messungen zur Geochemie und Mikrobiologie wurden planmäßig durchgeführt, während die geophysikalischen Untersuchungen (Seismik, Druck, Temperatur) aufgrund des Projektverlaufs in der Altmark nicht umgesetzt werden konnten. Alternativ wurden von den betroffenen Arbeitsgruppen die neu- oder weiterentwickelten Monitoringmethoden (hybrides Bohrlochmesssystem, Gas-Membran-Sensor-Systems (GMS)) und die neu erworbene Geophonkette an anderen Standorten (Groß Schönebeck, Windischeschenbach) erfolgreich getestet. Sämtliche Monitoringmethoden stehen basierend auf den durchgeführten Entwicklungen und Tests für ein Monitoring im Untersuchungsgebiet nun zur Verfügung.

Das seismische Monitoring teilte sich in die Teilbereiche aktive und passive Seismik auf. Im Bereich der aktiven Seismik wurden die Effekte der $CO_2$-Injektion auf die physikalischen Eigenschaften des Reservoirs aufgezeigt. Diese zeigen, dass eine direkte Lokalisierung des $CO_2$ im Reservoir unwahrscheinlich ist und das Hauptaugenmerk bei den Messungen auf eine Beobachtung der oberhalb des Reservoirs liegenden Grundwasserleiter zu richten ist. Dort sind Änderungen im seismischen Wellenfeld aufgrund größerer Dichteunterschiede zwischen $CO_2$ und Wasser schon bei geringen Mengen entweichenden Kohlendioxids zu erwarten. Im Teilbereich der passiven Seismik wurde im Rahmen des CLEAN-Projektes ein Algorithmus zur automatischen Lokalisierung seismischer Ereignisse basierend auf Diffraktionssummation entwickelt und erfolgreich an synthetischen Datensätzen getestet. Grundlage dieser Datensätze waren das realistische Geschwindigkeitsmodell der Altmark, die geplante Empfängergeometrie und eine P- und S-Wellen abstrahlende Quelle. Ausgehend von diesen Tests ist es möglich die Methode zu nutzen, um mögliche injektionsinduzierte seismische Ereignisse schnell zu detektieren und zu lokalisieren. Dies ist wichtig, da ein seismisches Ereignis im Caprock theoretisch zu einer Undichtigkeit der Lagerstätte und somit zu einem Austritt des $CO_2$ führen kann.

Die auf die Bedingungen der Altmark abgestimmten thermo-hydraulischen Simulationen zeigten, dass passive Temperaturmessungen wichtige Beiträge für eine Injektions- und Produktionsprofilierung leisten können. Die ursprünglich geplante Anwendung der Wärmepulsmethode wurde aufgrund neuer Informationen zu den standortspezifischen Reservoirbedingungen und den für das Monitoring zur Verfügung stehenden Bohrungen verworfen. Als weiterer Beitrag zur Untersuchung injektionsbedingter Änderungen im bohrlochnahen Bereich wurde eine Sensitivitätsstudie zur Anwendbarkeit des Pulsed Neutron-Gamma-Verfahrens durchgeführt. Es zeigte sich, dass dieses Verfahren aufgrund des geringen Kontrasts zwischen $CO_2$ und dem im Reservoir vorhandenen Erdgas in der Altmark nur sehr eingeschränkt anwendbar wäre.

Um bei einer künftigen $CO_2$-Injektion in das Gasreservoir bereits kleinste Änderungen (im ppm- bis ppb-Bereich) in der Fluid- und Gaszusammensetzung wie der Isotopensignatur detektieren zu können, wurden umfangreiche geochemische Untersuchungen von Gasen und Fluiden aus diesem Bereich vorgenommen und eine entsprechende Daten-Baseline erstellt. Die durchgeführten Messungen belegen darüber hinaus, dass innerhalb des Gasreservoires eine deutliche Variation der isotopischen, gas- und hydrochemischen Zusammensetzung existiert, und dass diese Variation bei anhaltender Förderung dynamischen Veränderungen unterliegt. Zudem wurde deutlich, dass die Art der Probenahme Einfluss auf die verschiedenen Parameter hat. So führten die Einfahrten mit gebräuchlichen Probennehmern wie Doppelkugelbüchse und „Positive Displacement Sampler“ zur partiellen Entgasungen insbesondere der Gase mit geringerer Löslichkeit. Damit limitiert das Probenahmeverfahren die Sensitivität der Messmethoden, sowohl für die Gas- als auch für die Isotopenmessungen. Es wird daher empfohlen, für Gas- und Isotopenmessungen in den Fluiden die GMS-

Technologie (Gas-Membran-Sensor) zu verwenden. Um unter den p/T-Bedingungen der Altmark eingesetzt werden zu können, wurde das GMS-System im CLEAN-Projekt weiterentwickelt und umgerüstet.

Darüber hinaus wurden an einer speziell für die p/T-Bedingungen der Altmark angepassten Hochdruckapparatur die Permeation aller reservoirrelevanten Gase durch die PDMS-Membran (Polydimethylsiloxan) des GMS unter verschiedenen p/T-Bedingungen bestimmt. Die Permeationsraten der Gase sind grundlegende Parameter für die Kalibration der GMS.
Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die natürlichen Isotopensignaturen der Fluide signifikant von dem zu injizierenden $CO_2$ unterscheiden, sodass $\delta^{13}C$ und $\delta^{18}O$ die Kalkulation von Isotopenmassenbilanzen ermöglichen und Aussagen über das Verhalten des injizierten $CO_2$ in der Lagerstätte erlauben. Anhand von Laborexperimenten wurde der Einfluss der p/T-Bedingungen und der Ionenstärke auf Isotopenfraktionierung und Kinetiken bestimmt und modelliert.

Als Ergebnis mikrobiologischer Untersuchungen wurden in moderat temperierten Produktionswässern mit PCR-SSCP-Analysen (Polymerase Chain Reaction - Single Strand Conformation Polymorphism) Mikroorganismen des Fe- und S-Kreislaufes identifiziert. Dagegen deuten die Ergebnisse der durch hohe Temperaturen und hohe Salinitäten gekennzeichneten Tiefenproben auf deutlich geringere DNA-Gehalte hin. Die nested-PCR-DGGE-Methode (Polymerase Chain Reaction - Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) war sensitiv genug, um die direkt extrahierte DNA in den Fluidproben zu amplifizieren und verschiedene Mikroorganismen im heißen, hochsalinaren Reservoirfluid zu identifizieren. Daneben wurden Langzeitversuche zur $CO_2$-Exposition von Gesteinsproben aus der Altmark unter in-situ Bedingungen durchgeführt. Die Fluidzusammensetzung nach der $CO_2$-Exposition wies nach 10 Monaten eine leichte Erhöhung der Eisengehalte im Vergleich zur Ausgangszusammensetzung auf.

Zusammenfassend wurden standortunabhängige Monitoringempfehlungen auf Grundlage nationaler und internationaler Leitfäden zum Monitoring von CCS und EGR sowie der EU-Richtlinie erfasst, verglichen und dokumentiert. Zur Bewertung der zur Verfügung stehenden $CO_2$-Detektionsmethoden wurden Methodensteckbriefe erstellt, die einen schnellen Vergleich unterschiedlicher Methoden erlauben und als Grundlage zur Erstellung von Monitoringkonzepten dienen.

Neben den Arbeiten zum Monitoring erfolgten auch Betrachtungen zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit von EGR. Schwerpunkte der Betrachtung stellten $CO_2$-Freisetzungen aus dem Speicherbereich bzw. der Obertageanlage dar. Es erfolgten Berechnungen zur Ausbreitung des freigesetzten $CO_2$ und darauf basierende Gefahrenbeurteilungen. Damit stehen belastbare Werkzeuge und Aussagen zur Bewertung derartiger Gefahrenpotenziale zur Verfügung.

## B.5 Themenkomplex „Öffentliche Akzeptanz“

Der Themenkomplex „Öffentliche Akzeptanz“ hatte zum Ziel, die allgemeine Öffentlichkeit objektiv und sachkundig über das Thema „Enhanced Gas Recovery“ zu informieren und aufzuklären, um weitgehende Akzeptanz für eine großtechnische $CO_2$-Speicherung zu erreichen. Hierzu sollten folgende Aufgaben umgesetzt werden:

- Informationsveranstaltungen in öffentlichen Räumen,
- Qualifizierte Information der Presse,
- Installation eines internetbasierten virtuellen Informationsforums,
- Einrichtung und Betrieb eines Informationszentrums,
- Entwicklung von Informationsmaterialien und Exponaten.

Die Öffentlichkeit wurde durch Presseinformationen, Podiumsdiskussionen und Interviews über die Inhalte, Ziele und den aktuellen Sachstand des F&E-Vorhabens CLEAN informiert. Anfragen einer Bürgerinitiative, der Presse und von Politikern wurden schriftlich beantwortet oder bei direkten Treffen aufgegriffen. Eine Internetplattform stellte Informationen zum F&E-Vorhaben CLEAN zur Verfügung. Die geplante Eröffnung eines Informationszentrums in Salzwedel wurde im Einvernehmen mit dem BMBF und GDF SUEZ aufgrund des Projektverlaufs ausgesetzt. Unabhängig davon wurde die Öffentlichkeitsarbeit durch das GFZ weitergeführt, u. a. auch durch Präsentation der Exponate im Besucherzentrum des Pilotstandortes Ketzin. Zudem wurden umfangreiche Informationsmaterialien (Flyer, Exponate, Informationstafeln, Filme) zusammengestellt und entwickelt. Die Informationsmaterialien wurden der Öffentlichkeit im Besucherzentrum, auf Tagungen und anderen öffentlichen Veranstaltungen zugänglich gemacht.

## B.6 Danksagung

Die Autoren danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung des F&E-Vorhabens CLEAN, dem Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN für die sehr gute Kooperation, den Projektpartnern für die effektive Zusammenarbeit und die erbrachten Leistungen sowie dem Projektträger Jülich, Außenstelle Rostock, für die herausragende Betreuung des F&E-Vorhabens CLEAN.

# C) KURZDARSTELLUNG DER TEILPROJEKTE MO1 UND MO3

## C.1 Aufgabenstellung

Ziel des Teilprojekts Mo1 war es, synoptisch die Ergebnisse und Erfahrungen der Teilprojekte des Themenverbundes „EGR/Altmark-Monitoring“ in Form eines Konzeptes im Hinblick auf methodische, sicherheitstechnische und verwaltungsrechtliche Aspekte zusammenzufassen. Auf Grundlage einer Methodenübersicht und Methodenbewertungen sollten im ersten Schritt standortunabhängige Monitoringempfehlungen und darauf aufbauend ein standortspezifisches Monitoringkonzept entwickelt und von einer sicherheitstechnischen Risikoanalyse und verwaltungsrechtlichen Einordnung der geplanten EGR-Maßnahmen in das bestehende Gesetzesregelwerk begleitet werden. Durch die Einbindung von KMUs (Kanzlei Weissleder und Ewer; Ingenieurbüro GICON), die jahrelange Erfahrungen in der Handhabung und Umsetzung von Umweltfragestellungen besitzen, sollte zudem der Bezug zur Praxis hinsichtlich zukünftiger Genehmigungsverfahren sichergestellt werden.

Die Zielsetzung von Mo3 bestand in der großräumigen hydrogeochemischen und hydrogeologischen Erkundung der/des oberflächennahen Grundwasserleiter/s im Hangenden des Erdgaslagers vor und während der EGR-Maßnahme. Da nicht zu erwarten war, dass während und wahrscheinlich auch nach der Injektionsphase eine $CO_2$-Immission in die hangenden Grundwasserleiter auftritt, war dieses Arbeitspaket hauptsächlich zur Erfassung der natürlichen hydrogeologischen und hydrogeochemischen Schwankungen und der Ableitung von Indikatorwerten im Falle eines späteren $CO_2$-Eintrags vorgesehen. Dafür waren anhand vorhandener und noch zu gewinnender geologischer und geochemischer Daten die oberflächennahen Grundwasserleiter am Standort Altmark zu charakterisieren und zu einem hydrogeologischen Strukturmodell zusammenzufassen. Wären im späteren Verlauf der $CO_2$-Injektion Veränderungen der Grundwasserchemie beobachtet worden, hätte sich anhand des Baseline-Monitorings feststellen lassen, ob die Veränderungen im natürlichen Schwankungsbereich liegen oder möglicherweise anthropogen verursacht sind.

Zweites Ziel von Mo3 war die Durchführung numerischer Simulationen zur Abschätzung der Folgen eines potentiellen $CO_2$-Eintritts in die oberflächennahen Aquifere. Die Simulationen sollten der Identifikation von Parametern dienen, die sich aufgrund eines Kontaktes mit $CO_2$ besonders deutlich verändern und deshalb als Indikatoren geeignet sind, sowie der Auslegung eines Monitoringnetzwerkes (in Kooperation mit Mo1).

## C.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

CCS (einschließlich EGR) hat sich während der Projektlaufzeit sowohl in der Bevölkerung, insbesondere aber in politischer Hinsicht, zu einem äußerst umstrittenen Thema entwickelt, was wesentliche Auswirkungen auf die Projektbearbeitung hatte. Durch die zögerliche rechtliche Regelung der Erforschung und Anwendung dieser Technologie, die bis zum Abschluss des Projekts keine gesetzliche Grundlage liefern konnte, mussten wesentliche Einschränkungen hinsichtlich der ursprünglichen Planung und zusätzlicher organisatorischer Aufwand in Kauf genommen werden, was z.B. an verschiedenen Stellen zu Verzögerungen führte. Die aus diesem Grunde nicht erfolgte $CO_2$-Injektion führte bei anderen Teilprojekten teilweise zu einem Ausfall der Geländeuntersuchungen. Kenntnisse die zu diesen Untersuchungsmethoden insbesondere in Bezug auf deren standortspezifische Anwendbarkeit entwickelt worden wären, konnten so nicht in die Monitoringempfehlungen mit einbezogen werden.

Der Widerstand von Bürgerinitiativen aus verschiedenen Bundsländern, der teilweise bis zu persönlichen Diffamierungen führte, fokussierte sich wiederholt auf den Lehrstuhl der Angewandten Geologie der CAU Kiel. Die Auseinandersetzung hiermit nahm ein weit größeres Ausmaß an, als erwartet werden konnte.

## C.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Neben den Jahrestreffen des Gesamtprojekts fanden verschiedene themenbezogene Teilprojekttreffen statt, bei denen das Vorgehen mit den jeweiligen Betreffenden geplant und abgestimmt wurde. Die durchgeführten Projektarbeiten sowie die jeweils Verantwortlichen und Beteiligten sind aus Tabelle 1 ersichtlich. Die Planung und Durchführung der Geländearbeiten erfolgte in enger Zusammenarbeit der CAU, GICON und GDF SUEZ sowie den jeweiligen Kooperationspartnern (s. Tabelle 2).

**Tabelle 1: Durchgeführte Projektarbeiten mit Verantwortlichen und Beteiligten.**

| Aufgabe | Verantwortlich | Beteiligt |
|---|---|---|
| **Mo1** | | |
| Erarbeitung eines Monitoringkonzepts | CAU Kiel | |
| Rechtliche Bewertung (nachträglich gestrichen) | Weissleder & Ewer | |
| Sicherheitstechnische Risikobewertung | GICON | |

| **Mo3** | | |
|---|---|---|
| Geologisches Strukturmodell | GICON | CAU |
| Bohrarbeiten | GICON/CAU Kiel | BTR, GDF SUEZ |
| Sedimentcharakterisierung | CAU Kiel | |
| Planung Grundwassermonitoring | GICON/CAU Kiel | |
| Grundwasserprobenahmen | GICON | BGD |
| Grundwasseranalysen | CAU Kiel | |
| $CO_2$-Kombisonden | CAU Kiel | |
| Geoelektrik | CAU Kiel | Geoserve |
| Aeroelektromagnetik | CAU Kiel | SkyTEM, Uni Aarhus, GDF SUEZ, GICON |
| Modellierung | CAU Kiel | |

## C.4 Wissenschaftlicher Stand, an den angeknüpft wurde

Zum Zeitpunkt der Projektiniziierung bestanden keine allgemeinen Monitoringkonzepte, die die Aussageunsicherheit als Funktion der erforderlichen räumlichen und zeitlichen Messdichte und natürlicher Signalschwankungen berücksichtigen. Darüber hinaus sind die Anforderungen an Monitoringkonzepte und deren Umsetzung stets standortabhängig, d.h. auch abhängig von dessen jeweiligem Erkundungsgrad [1]. Chalaturnyk und Gunter [2] forderten deshalb die Entwicklung von Monitoringstrategien, mit denen es möglich ist, den jeweils aktualisierten Datenbestand an einem Standort zu berücksichtigen, die identifizierten Unsicherheiten zu verringern und flexibel auf unerwartete Ereignisse reagieren zu können [1]. Insgesamt ist festzustellen, dass das Design für Monitoring-Netzwerke und die Entwicklung entsprechender Strategien für einen gesamten Standort noch am Anfang stand [2] und bisher nur allgemeine Hinweise für die Entwicklung von standortabhängigen Strategien bestanden. Wildenborg et al. [3] präsentierten so z.B. einen allgemeinen Ansatz, beruhend auf der FEP-Methode (Features, Events, Processes). Der mit diesem Teilprojekt beantragte Schritt von der Auswahl geeigneter Monitoringverfahren über das Monitoring hin zu einer umsetzbaren sicherheitstechnischen Risikoanalyse, d.h. mit der Betrachtung bzw. Festlegung von Handlungserfordernissen unter Berücksichtigung der verwaltungsrechtlichen Rahmenbedingungen, war bisher noch nicht vollzogen.

Erfahrungen hinsichtlich neuer Untersuchungsverfahren, die möglicherweise wesentliche Beiträge für das Monitoring in oberflächennahen Aquiferen liefern können, wie z.B. Aeroelektromagnetik, Geoelektrik, Permanentmessungen mittels $CO_2$-Kombisonden oder Isotopenuntersuchungen lagen vor Projektbeginn noch nicht vor. Innerhalb der Literaturrecherchen im Rahmen von Mo1 wurde das Potential dieser Verfahren näher betrachtet und aufgrund der festgestellten viel versprechenden Möglichkeiten zusätzlich in das Untersuchungsprogramm von Mo3 aufgenommen.

Für die Erstellung eines Monitoringkonzepts für oberflächennahe Aquifere ist die Kenntnis über das Ausbreitungsverhalten der $CO_2$-Phase von zentraler Bedeutung, da die Wahl und die Auslegung der Untersuchungsmethoden hiervon abhängen. Diesbezügliche Untersuchungen lagen bisher noch nicht vor und wurden deshalb unter besonderer Schwerpunktsetzung bearbeitet.

## C.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen ist in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2: Zusammenarbeit mit anderen Stellen.**

| | |
|---|---|
| GDF SUEZ | Umfangreiche Unterstützung bei den Feldarbeiten, Bereitstellung von Sedimentproben durch das Projekt an GDF Suez |
| CLEAN-Partner | Bereitstellung von Sedimentproben durch das Projekt an CLEAN-Partner |
| BTR Rosswag | Durchführung der Bohrarbeiten zur Errichtung neuer Grundwassermessstellen und zur Gewinnung von Bohrkernen |
| BGD | Durchführung der Grundwasserprobenahmen |
| Geoserve | Geoelektrik-Feldmessungen |
| SkyTEM | Durchführung der SkyTEM-Befliegungen |
| Universität Arhus | Inversionsberechnungen auf Grundlage der SkyTEM-Daten |
| UIT | Entwicklung der $CO_2$-Sonden |
| Leibnitz Labor Kiel | Isotopenanalysen |

# D) EINGEHENDE DARSTELLUNG DER TEILPROJEKTE MO1 UND MO3

## D.1 Verwendung der Zuwendung, Projektziele und Projektergebnisse

### D.1.1 Teilprojekt Mo1: Ableitung eines standortspezifischen Betriebs- und Langzeitmonitoring-Konzepts für EGR unter Einbeziehung der rechtlichen und sicherheitstechnischen Vorgaben

#### D.1.1.1 Sicherheitstechnische Risikobewertung von EGR am Standort Altmark mit Angabe von Gefährdungspfaden und sicherheitstechnischen Optionen (GICON)

##### *D.1.1.1.1 Vorbemerkung und Systematisierung Untersuchungsraum*

Enhanced gas recovery (EGR) und Carbon capture storage (CCS) sind mit Gefahrenpotentialen durch den Umgang mit den Gasen Erdgas und $CO_2$ verbunden, wobei beide ggf. auch im Gemisch auftreten können.

Bei einem nicht bestimmungsgemäßen Betrieb der Speicherformation kann es zu Gefährdungen verschiedener Schutzgüter kommen. Nicht bestimmungsgemäße Betriebszustände können nie ausgeschlossen werden. Sie können verschiedenste Ursachen wie Materialversagen, unvorgesehene Prozessabläufe und vor allem menschliches Versagen haben. Aktuelle Untersuchungen zu Störfallursachen in Chemieanlagen belegen, dass menschliches Versagen inzwischen die häufigste Störfallursache darstellt. Für das Risikomanagement solcher Vorhaben und somit für deren Genehmigungsfähigkeit und Akzeptanz kommt der Darstellung des sicheren Umgangs mit den Gasen eine erhebliche Bedeutung zu.

Grundlage für eine systematische Risikoanalyse sind klare Definitionen zum Untersuchungsgegenstand. In Abbildung 1 sind die Vorschläge von Großmann/Dahmke einer risikoorientierten Systematik der Aufteilung des Untergrundes bei einer $CO_2$-Speicherung anhand eines idealisierten Profils des norddeutschen Untergrundes visualisiert.

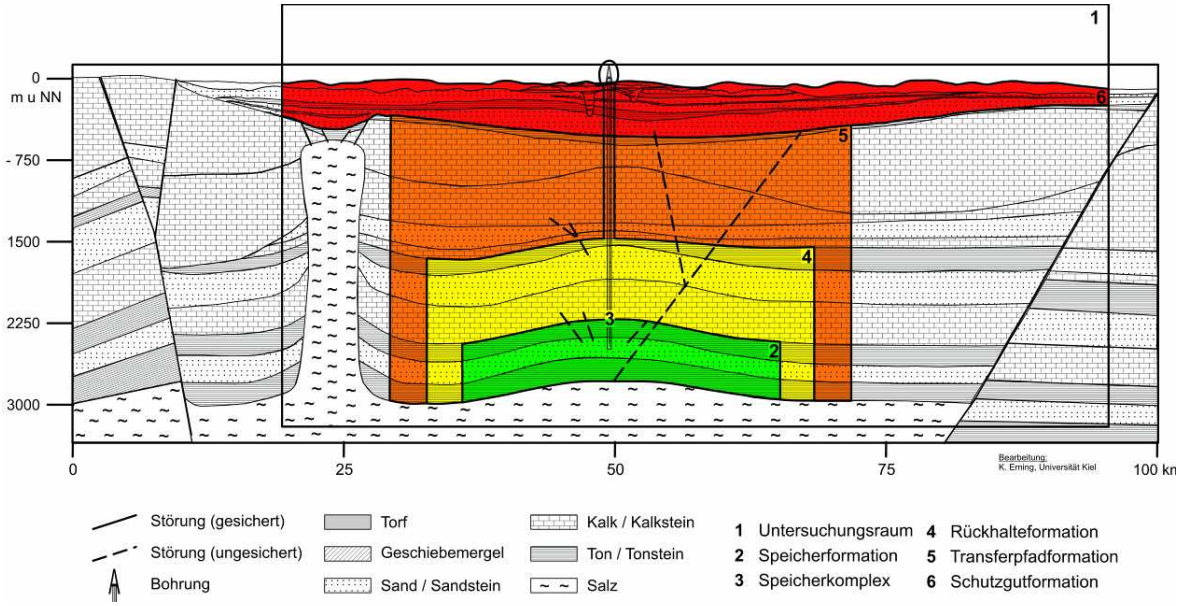



**Abbildung 1: Visualisierung der räumlichen Definitionen zur unterirdischen $CO_2$-Speicherung (hier in einer salinaren Porenformation) an einem idealisierten geologischen Profil Norddeutschlands. Die räumlichen Skalen dienen zur groben Angabe der Größe der jeweiligen Monitoringräume.**

Die Darstellung in Abbildung 1 reflektiert im Wesentlichen die Definitionen der EU-Richtlinie. In Ergänzung zur EU-Richtlinie werden folgende Ergänzungen vorgeschlagen:

- Hangend zur Speicherstätte können ein oder mehrere Rückhalteformationen vom Betreiber definiert werden, die ihrerseits wieder aus einem Speichergestein und einem nur gering permeablen Deckgestein aufgebaut sind und so ein Multibarrierensystem für die eigentliche Speicherstätte bilden. Der massive Übertritt des $CO_2$ aus der Speicherformation in die Rückhalteformationen gehört nicht zum bestimmungsgemäßen Betrieb, ist aber im Rahmen der Beherrschung von Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebes erlaubt und löst weitere und intensivierte Monitoringmaßnahmen sowie ggf. auch Interventionsmaßnahmen aus.

- In Anlehnung an die Herangehensweise im UVPG sollte ein Untersuchungsraum definiert werden. Der Untersuchungsraum repräsentiert den Raum (geologischer Raum zzgl. der oberirdisch potentiell betroffenen Schutzgüter wie Luft, Flora, Fauna und Mensch sowie Kultur- und Sachgüter), der auch bei bestimmungsgemäßen Betrieb signifikant in seinen physiko-chemischen Eigenschaften unmittelbar und mittelbar beeinflusst wird. Für diesen Untersuchungsraum ist zu belegen, dass es durch den Betrieb des Speichers zu keinen erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen kommt. Die Methodik des Nachweises ist aus dem Bundes-Immissionschutzgesetz sowie dem UVPG bekannt.

### *D.1.1.1.2 Grundsätze der Risikobewertung*

Die Bearbeitung erfolgt in den folgenden Schritten:

- Systematische Untersuchung der Gefahrenquellen (betriebliche und umgebungsbedingte Gefahrenquellen) sowie Auswahl möglicher Gefährdungsszenarien incl. deren Eintrittswahrscheinlichkeit;
- Quantifizierung/Berechnung der Szenarien;
- Schutzgutbewertung, Bewertung der möglichen Gefährdung;
- Risikobewertung auf der Basis Eintrittswahrscheinlichkeit und des erwarteten Schadensausmaßes;
- Ableitung von ggf. erforderlichen Interventionsmaßnahmen (Überwachungsmaßnahmen, Schutzmaßnahmen, Gefahrenabwehrmaßnahmen).

Bei der Wertung der Szenarien für das Wirksamwerden von Gefahrenquellen wird im Störfallrecht zwischen folgenden Fällen unterschieden:

- ➔ Vernünftigerweise nicht auszuschließende Gefahrenquellen (Gefahrenabwehrplanung, Maßnahmen zur Verhinderung von Gefährdungsszenarien),
- ➔ Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen (Katastrophenschutzplanung, Maßnahmen zur Auswirkungsbegrenzung),
- ➔ „Exzeptionelle“ Gefahrenquellen, die sich jeder Erfahrung und Berechenbarkeit entziehen (Katastrophenschutzplanung, in der Regel keine Maßnahmen, Bereich des akzeptablen Restrisikos).
- ➔

Die Einordnung der Szenarien ist in der folgenden Abbildung übersichtlich dargestellt:

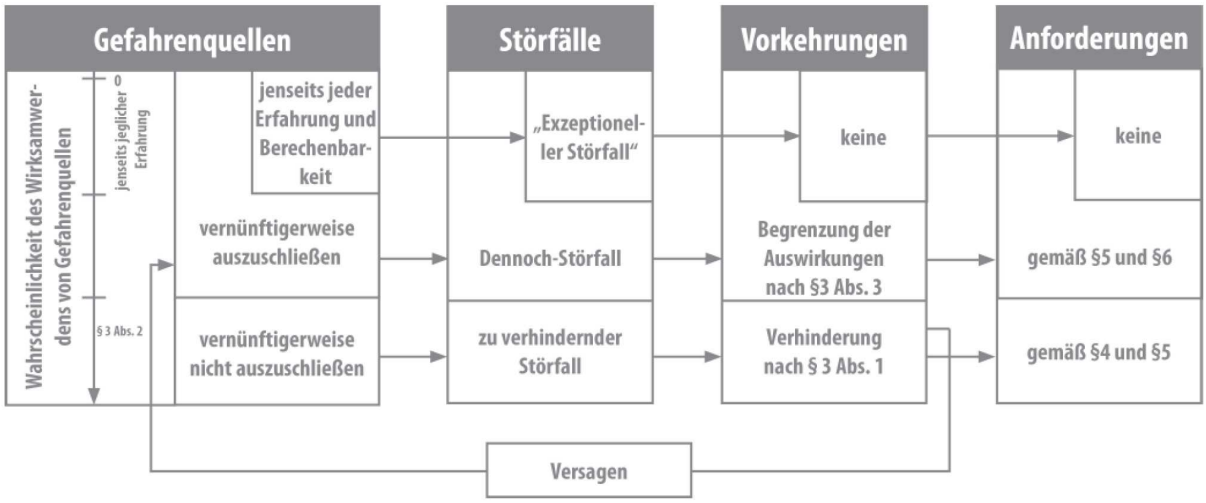



**Abbildung 2: Szenarien nach Störfallverordnung (Quelle UBA).**

Bei Anwendung dieser Einteilung aus dem deutschen Störfallrecht lassen sich die möglichen Umweltauswirkungen von EGR und CCS wie folgt gruppieren (beispielhafte Darstellung):

*Vernünftigerweise nicht auszuschließende Gefahrenquellen*

- Landhebung, Landsenkung über das für den bestimmungsgemäßen Betrieb prognostizierte Maß hinaus,
- Beeinflussung der Grundwasserleiter, insbesondere der Salz-/Süßwassergrenze durch Aufstieg von Formationswasser über das für den bestimmungsgemäßen Betrieb prognostizierte Maß hinaus,
- signifikante Leckage anderer Gase, z. B. Methan in Schutzgüter,
- erhöhte Seismizität während der Injektionsphase und Postinjektionsphase,
- $CO_2$-Austritt in das Grundwasser und/oder die Atmosphäre aus aktiven und alten Bohrungen (incl. eruptive $CO_2$-Freisetzung),
- Freisetzung von $CO_2$ aus Obertageeinrichtungen bei der Verpressung von $CO_2$.

*Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen*

- signifikante $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z. B. über Klüfte und Störungen,
- unbeabsichtigte zukünftige Erschließung der $CO_2$-Speicherformation in Folge anderer wirtschaftlicher Nutzungsaspekte,
- signifikante Freisetzung aus Obertageeinrichtungen bei der Verpressung von $CO_2$.

*Exzeptionelle Gefahrenquellen, die sich jeder Berechenbarkeit entziehen*

- eruptive $CO_2$-Freisetzung aus der Speicherformation über Gesteinsklüfte und Störungen z. B. in Folge von Starkbeben, Meteoriteneinschlägen oder vulkanogenen Ereignissen,
- starke Erdbeben oder lokale Gebirgsschläge,
- komplette Zerstörung von Obertageanlagen.

Die Einstufung ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines solchen Ereignisses. Je wahrscheinlicher ein Ereignis ist und umso größer die ggf. damit verbundenen negativen Auswirkungen sind, umso mehr Maßnahmen müssen zur Erkennung und Vermeidung dieser Ereignisse ergriffen werden. In allen Fällen, auch für letztlich vernünftigerweise auszuschließende Ereignisse, müssen Auswirkungsbetrachtungen durchgeführt werden, um im Katastrophenfall auch auf ein solches Ereignis vorbereitet zu sein.

#### *D.1.1.1.3 Risikobewertung am Beispiel einer $CO_2$-Freisetzung*

Ein Schwerpunkt ist dabei die Beschreibung einer störfallbedingten unkontrollierten Gasfreisetzung und der nachfolgenden Gasausbreitungsprozesse in der freien Atmosphäre sowie sich ggf. hieraus ergebender Gefahrenpotentiale für die Menschen und Tiere incl. der Darstellung der Wirksamkeit getroffener Gefahrenabwehrmaßnahmen. Während die Darstellung derartiger Prozesse für Erdgas (incl. Sauergas) bisher übliche Praxis war, stellt die Be-

schreibung der Ausbreitungsprozesse für $CO_2$ eine neue Kategorie dar. Als besonderes Problem beim Risikomanagement erweisen sich dabei die Eigenschaften von $CO_2$ als weder sichtbares noch riechbares Schwergas.

Wesentlich für die Bestimmung der Gefahrenpotentiale sind folgende Mechanismen:

- $CO_2$-Freisetzung und Ausbreitung im Quellbereich (mengenabhängig)
    - Freistrahlausbreitung
    - Direkte impulslose Gasausbreitung
    - Gasausbreitung aus der Lache (Sekundäre Freisetzung von vereistem $CO_2$)
- Gasausbreitung nach Schwergasabfluss
- Gasausbreitung im natürlichen Windfeld

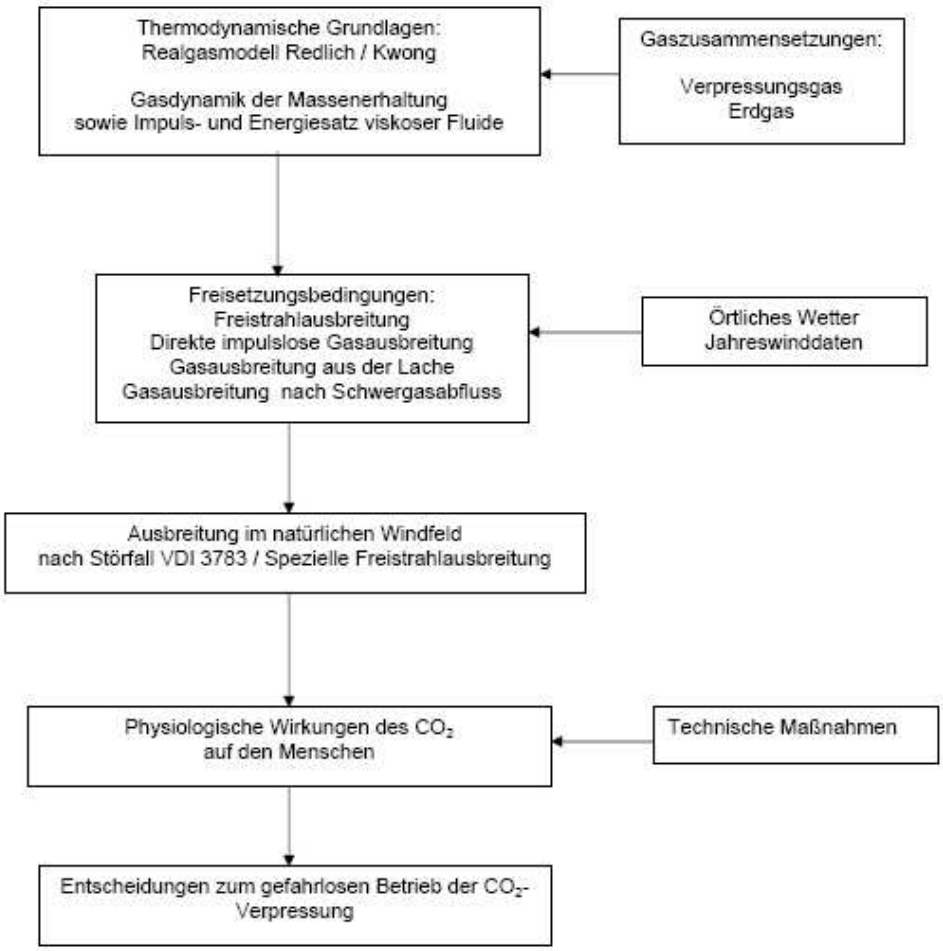



Abbildung 3: Ablaufschema der Berechnungen zur Gefahrenbeurteilung.

Für die Berechnung der Gasfreisetzung und Gasausbreitung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, die verifiziert und kombiniert werden müssen. Neben allgemein verfügbaren Programmsystemen verfügt GICON auch über eigene Programmsysteme, die auf experimentellen Untersuchungen im Auftrag des ehemaligen Instituts für Bergbausicherheit Freiberg und theoretischen Untersuchungen von Prof. Dr.-Ing. habil G. Naue basieren. Die Be-

wertung möglicher Gefahrenpotentiale bei einer $CO_2$-Freisetzung in die Atmosphäre erfolgt nach dem in Abbildung 3 dargestellten Ablauf.

Beispielhafte Darstellung von Berechnungsergebnissen

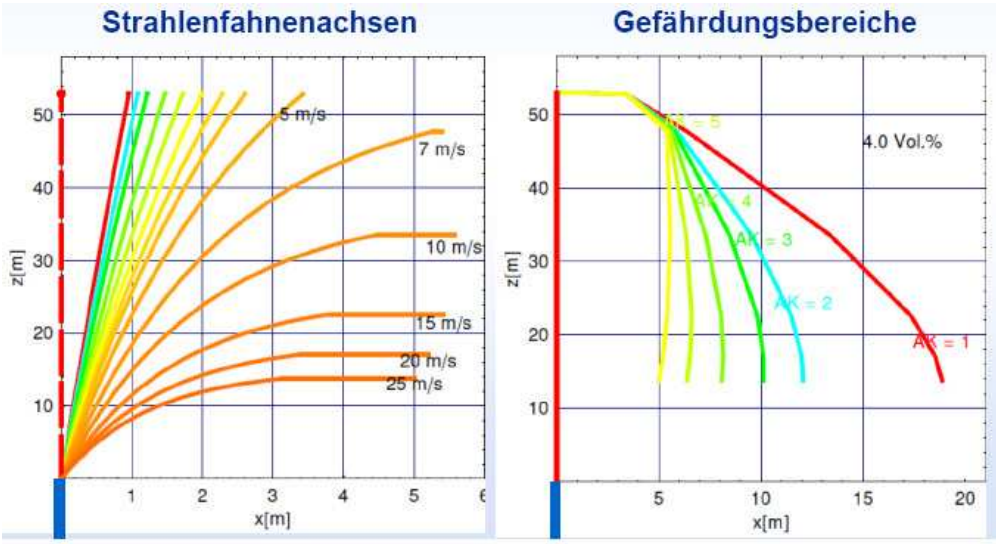



**Abbildung 4: Strahlenfahnenachsen und Gefährdungsbereiche beim vertikalen Ausbläser.**

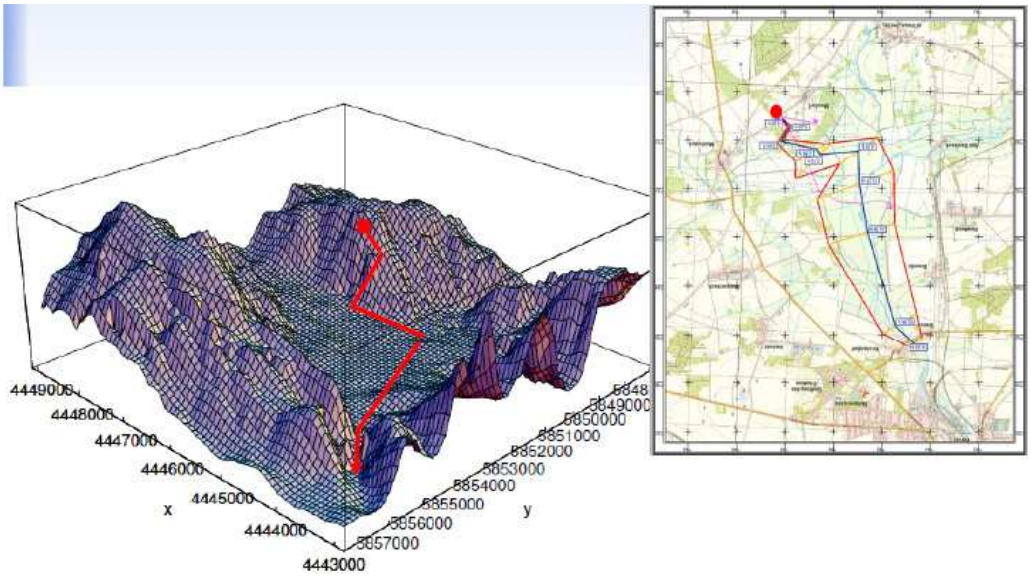



**Abbildung 5: Schwergasausbreitung im profilierten Gelände.**

#### *D.1.1.1.4 Gefahrenabwehrmaßnahmen*

Für den Fall des Erfordernisses von Gefahrenabwehrmaßnahmen werden diese gestuft wie folgt abgeleitet:

- Vorsorgende primäre Sicherungsmaßnahmen zur Verhinderung einer Gasfreisetzung
- Vorsorgende sekundäre Sicherungsmaßnahmen zur Reduzierung der Gasfreisetzung
- Überwachungsmaßnahmen (Gasfreisetzung und Gasausbreitung)
- Alarmierungsmaßnahmen (Gasfreisetzung und Gasausbreitung)
- Nachsorgende Gefahrenabwehrmaßnahmen (Reduzierung der Freisetzungsmengen im Freisetzungsfall)
- Gefahrenabwehrmaßnahmen (Behinderung der Ausbreitung)
- Schutzmaßnahmen für die Bevölkerung

### D.1.1.2 Juristische Bewertung und Einordnung des Monitorings von EGR in den bestehenden rechtlichen Rahmen (Dr. Angelika Leppin, Prof. Dr. Wolfgang Ewer)

Auf Grundlage des bewilligten Forschungsantrags sollte durch Beauftragung der Kanzlei Weissleder und Ewer eine juristische Bewertung und Einordnung des Monitorings von EGR in den bestehenden rechtlichen Rahmen erfolgen und Fragen zu Haftungsverpflichtungen etc. erörtert werden. Die juristischen Bewertungen sollten das Forschungsprojekt dabei über die gesamte Projektdauer begleiten. Da die Förderung der beantragten Arbeiten jedoch größtenteils nachträglich zurückgezogen wurde, konnte nur die juristische Lage bis Anfang 2009 im Rahmen einer rechtsgutachterlichen Stellungnahme zu den bergrechtlichen Rahmenbedingungen für eine $CO_2$-Speicherung im Projekt CLEAN dargestellt werden. Die Inhalte der ausführlichen Darstellungen (Stand Dezember 2009) lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

In rechtswissenschaftlicher Hinsicht ist als erstes Ergebnis die intensive Verfolgung des Gesetzgebungsprozesses auf nationaler und europäischer Ebene zu nennen, also die Entwicklung

- der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinien 85/337/EWG und 96/61/EG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 (CCS-Richtlinie)

sowie

- des Entwurfs eines Gesetzes zur Regelung von Abscheidung, Transport und dauerhafter Speicherung von Kohlendioxid – Kohlendioxid-Speicherungsgesetz - KSpG.

In einer rechtswissenschaftlichen Stellungnahme ist im Zusammenhang mit den - ursprünglich anwendbaren – Regelungen aus dem Bergrecht der Frage nachgegangen worden, welche Anforderungen das bergrechtliche Regime im Vergleich zu dem mit dem Kabinettsbeschluss vom 01.04.2009 beschlossenen Entwurf eines des Gesetzes zur Regelung von Abscheidung, Transport und dauerhafter Speicherung von Kohlendioxid – Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG-E) stellt.

So ist in diesem Kontext darauf hinzuweisen, dass das KSpG-E auch für Forschungsprojekte gilt, allerdings in § 37 Abs. 2 KSpG-E einen Privilegierungstatbestand für solche Forschungsprojekte geschaffen hat. Allerdings ist nach dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz – im Gegensatz zu den bergrechtlichen Anforderungen – als weiteres

Schutzgut das der „Umwelt“ aufgenommen worden. Dies hat zur Folge, dass auch im Rahmen eines (bloßen) Forschungsprojektes im Rahmen der Injektionsgenehmigung nachzuweisen wäre, dass Gefahren für Menschen *und Umwelt* nicht hervorgerufen werden dürfen.

Vor dem Hintergrund, dass der Entwurf des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes in § 44 KSpG-E zwar eine Übergangsregelung vorsieht, dies aber bislang lediglich bestimmt, dass bereits nach § 7 Bundesbergrecht (BBergR) begonnene Verfahren, die sich auf die *Aufsuchung* von Bodenschätzen, insbesondere von Sole, in potentiellen Speicherkomplexen beziehen, nach § 7 KSpG-E weitergeführt werden können, stellt sich die Frage, ob nicht – sofern nicht bis dahin eine Injektionsgenehmigung vorliegt – das Verfahren weiter nach dem Rechtsregime des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes durchzuführen wäre.

Da aber bislang das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz noch nicht in Kraft getreten ist und nicht prognostiziert werden kann, ob es bei der derzeitigen Übergangsregelung verbleibt, kann diese Frage nicht abschließend beantwortet werden.

### D.1.1.3 Erarbeitung eines Monitoringkonzepts (CAU)

Die wesentlichen Ergebnisse des Arbeitspakets A1 (Erarbeitung eines Monitoringkonzeptes) im Teilprojekt Mo1 des Forschungsvorhabens CLEAN wurden innerhalb eines ausführlichen Berichts mit dem Titel „Ableitung eines standortspezifischen Monitoringkonzepts für die $CO_2$-Speicherung im Rahmen einer EGR- oder CCS-Maßnahme“ (Köber & Dahmke, 2011, s. Anhang E.1) dargestellt. Innerhalb dieses Kapitels wird in kurzer Form auf die Inhalte dieses Berichts hingewiesen.

Die übergeordnete Zielsetzung des Arbeitspakets A1 bestand in der Erstellung eines Monitoring-Strategiekonzepts für die Betriebs- und Nachsorgephase einer EGR-Maßnahme, das alle Tiefenbereiche vom Reservoir bis zur Atmosphäre umfasst und auf publizierten sowie innerhalb von CLEAN erarbeiteten Erkenntnissen und Anforderungen basiert. Das Konzept sollte im Wesentlichen aus den folgenden drei Teilen bestehen:

1. Methodenübersicht und Bewertung
2. Allgemeine standortunabhängige Monitoringempfehlungen
3. Standortspezifisches Monitoringkonzept

Der im Forschungsantrag vorgesehene Umfang war auf die Bewertung und Berücksichtigung von Methoden zur $CO_2$-Detektion beschränkt. Aufgrund der sich abzeichnenden Anforderungen wurde der Bearbeitungsumfang jedoch auch auf weitere Überwachungstechnologien ausgedehnt, die zur Erhöhung der Sicherheit und zur Begrenzung der Umweltrisiken beitragen können. Mit den innerhalb des Berichts (Anhang E.1) zusammengestellten Informationen soll auch ein Beitrag dazu geleistet werden, Projektverantwortlichen wie Projektmanagern oder Behörden einen Überblick über die zu berücksichtigenden Faktoren, Möglichkeiten und Anforderungen bei der Erstellung standortspezifischer Monitoringkonzepte zu geben.

Eine Herausforderung bei der Bearbeitung bestand darin, dass zu Projektbeginn noch keine Systematik oder Vergleichsbeispiele für die Erstellung solcher Monitoringkonzepte bestanden und bis zum aktuellen Zeitpunkt noch keine nationale gesetzliche Regelung inklusive Grenz- oder Richtwerten vorliegt. Eine Bearbeitungssystematik mit den einzelnen Bearbeitungsschritten und unter Einbeziehung der zu berücksichtigen Faktoren musste erst entwickelt werden, wobei während der Projektlaufzeit von anderen entwickelte Vorgaben oder Empfehlungen mit aufgenommen wurden. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang auf Kapitel D.1.1.1 (Risikobewertung) und den UBA-Bericht über die Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung [4] hinzuweisen, der eine Systematik zur Bewertung der Technologieanwendung vorschlägt, die von Projektbeteiligten (Dahmke/Großmann) erarbeitet wurde.

#### *D.1.1.3.1 Standortunabhängige Monitoringempfehlungen und Methodenbewertung*

Im Rahmen des Berichts (Anhang E.1) werden die wichtigsten zusammenfassenden Berichte, Leitfäden, Empfehlungen und Richtlinien zusammenfassend wiedergegeben, die bei der Erstellung eines Monitoringkonzepts berücksichtigt werden sollten. Von dieser Literatur geben u.a. die EU-Richtlinie für die geologische Speicherung von Kohlendioxid [5], die NETL-Studie zum Monitoring von CCS [6] sowie der UBA-Bericht über die Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung [4] zentrale Leitlinien für die Entwicklung von Monitoirngkonzepten vor. Vorgaben und Empfehlungen hieraus stellen Grundlagen für die weiteren Kapitel des Berichts.

Die wichtigsten Aspekte eines Monitoringkonzepts liegen in der Auswahl der einzusetzenden Monitoringmethoden und der Konzeptionierung ihrer Anwendung. Die Methodenauswahl bzw. -kombination ist zum einen von den Methodencharakteristika abhängig und zum anderen von den gestellten Monitoringzielen, der Projekt- bzw. Monitoringphase sowie der Festlegung der Monitoringkompartimente mit deren Größe und deren Aufgaben.

Das Kapitel „Monitoringphasen“ gibt einen Überblick über die unterschiedlichen publizierten Begrifflichkeiten, die im Zusammenhang mit den verschiedenen Projekt- und Monitoringphasen zu berücksichtigen sind und stellt die in den jeweiligen Phasen zu leistenden Anforderungen dar. Im Kapitel „Monitoringziele“ wird zunächst auf die Aufgaben der Standorterkundung eingegangen. Die Standortcharakterisierung ist zwar nicht Gegenstand des Teilprojekts und des Berichts, da die Auslegung des Monitorings jedoch auf deren Ergebnissen aufbaut, wurden die Ziele der Erkundung und deren Umfang mitberücksichtigt. Im Anschluss hieran werden alle in der EU-Richtlinie, der NETL-Studie und dem UBA-Bericht geforderten Monitoringziele aufgeführt. Diese Ziele werden im Einzelnen jeweils bei der Bewertung der Monitoringmethoden sowie innerhalb der Monitoringempfehlungen betrachtet. Die Darstellung der für die Konzipierung des Monitorings relevanten Monitoringkompartimente (Kapitel 5) verwendet und erläutert die Einteilung aus Abbildung 1 (Kapitel D.1.1.1.1).

Einen Überblick über die für die unterschiedlichen Kompartimente zur Verfügung stehenden Monitoringmethoden mit Methodensteckbriefen und weiterführender methodenspezifischer Literatur liefert Kapitel 5. In den innerhalb des CLEAN-Projekts erstellten Methodensteckbriefen sind für die jeweiligen Methoden folgende, für die Methodenauswahl hilfreiche Merkmale aufgeführt: Monitoringprinzip, erforderliche Analytik, Messhäufigkeit, Messposition, Messdauer, Messbereich, Messgenauigkeit, Nachweisgrenze, Aussagereichweite, Monitoringphase, Leckagendetektierbarkeit, Entwicklungsstand, bisheriger Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten, Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen, Online-Übertragungsmöglichkeit, Vorteile, Nachteile, Bewertung, Kosten, Sonstiges/Anmerkungen, Anwendung in CLEAN, weiterführende Literatur. Als eine weitere Entscheidungsgrundlage und eventuell als Checkliste wurde eine umfangreiche Methodenmatrix erstellt, der die methodischen Möglichkeiten

zu entnehmen sind, die zu verschiedenen Monitoringzielen beitragen können. Um die Nutzbarkeit der Matrix möglichst flexibel zu halten, wurden neben den Anforderungen aus der EU-Richtlinie auch die in der UBA- und der NETL-Studie geforderten Monitoringziele getrennt mit aufgenommen. Da sich zum einen einige Methoden noch im Entwicklungs- bzw. Validierungstatus befinden, sich zum anderen die Rahmenbedingungen von Standort zu Standort unterscheiden und die jeweils verantwortlichen Länderbehörden vermutlich unterschiedliche Anforderungen stellen, wurden innerhalb der Matrix zunächst noch keine Priorisierung für bestimmte Methoden vorgenommen.

Da viele der geforderten Monitoringziele, insbesondere die der EU-Richtlinie, sehr allgemein und unspezifisch gehalten sind, für das Erreichen der Monitoringziele weitgehend keine Methoden vorgeschrieben werden und hierfür teilweise mehrere Methoden in Frage kommen, werden im nächsten Schritt standortunabhängige Empfehlungen zur Methodenauswahl gegeben. Viele der Methoden können einen Beitrag zu verschiedenen Monitoringzielen leisten, ihr Einsatzbereich fokussiert sich häufig jedoch auf ein spezielles Monitoringkompartiment wie z.B. die Speicherformation, das Grundwasser oder die Atmosphäre. Auch aus diesem Grunde wurden die Monitoringempfehlungen spezifisch für die einzelnen Monitoringkompartimente (Bohrlöcher, Speicherformation, Rückhalteformation, Transferpfadformation und für die Schutzgüter Grundwasser, Bodenzone, Luft sowie Flora und Fauna) zusammengestellt. Aufgrund der zahlreichen Ziele, die sich häufig auch überschneiden, wären Empfehlungen zu den einzelnen Zielen zu unübersichtlich und nur wenig hilfreich. Die Empfehlungen sind unterteilt in ein Basismonitoring, das Bestandteil eines jeden Monitoringkonzeptes sein sollte und im Idealfall zur Erfüllung der vorgegebenen Anforderungen ausreichen kann, und in ein erweitertes Monitoring. Für das als obligatorisch betrachtete Basismonitoring wurden nach Möglichkeit nur dem Stand der Technik entsprechende Technologien berücksichtigt, für die es bereits - zumindest in anderen Einsatzbereichen - langjährige Erfahrungen und Kenntnisse über deren Sensitivität gibt, und die auch in bisherigen CCS-Pilotprojekten zum Einsatz kamen. Das Basismonitoring ist dafür ausgelegt, den bestimmungsgemäßen Betrieb eines $CO_2$-Speichers bzw. einer EGR-Maßnahme zu verifizieren und um Anzeichen für Abweichungen davon erkennen zu können. Die Messergebnisse einer Methode alleine reichen häufig nicht aus, um mit hoher Sicherheit beurteilen zu können, ob unerwartete Messwerte ein Abweichen vom bestimmungsgemäßen Betrieb anzeigen, oder es sich um tolerierbare Schwankungen des Messparameters handelt. Innerhalb eines Monitoringkonzepts ist es deshalb anzustreben, dass sich ein relevantes Ereignis möglichst durch mindestens zwei unterschiedliche Methoden detektieren lässt. Hierzu können die Standardmethoden des Basismonitorings auch um optionale Methoden des erweiterten Monitorings ergänzt werden. Tabelle 3 zeigt am Beispiel der mittels Fernerkundung sowie im Reservoir und Deckgebirge einzusetzenden Methoden einen Überblick über die Methoden des Basismonitorings und des erweiterten Monitorings. Entsprechende Übersichten zu Methoden, die an der Atmosphäre, oberflächennah oder in Bohrlöchern einzusetzen sind, finden sich in Anhang E.1.

**Tabelle 3: Für das obligatorische Basismonitoring (●) und ein erweitertes optionales Monitoring (+) der einzelnen Kompartimente zur Verfügung stehende Methoden. 2. Mittels Fernerkundung sowie im Reservoir und Deckgebirge einzusetzende Methoden.**

| | Methode \ Zu überwachendes Monitoring-kompartiment | Offene Bohrungen | Verfüllte Bohrungen | Speicherformation | Rückhalte- und Transferpfadformation | Grundwasser (Schutzgut) | Bodenzone (Schutzgut) | Luft (Schutzgut) | Flora und Fauna (Schutzgut) | Bausubstanz (Schutzgut) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fernerkundung | Aeroelektromagnetik (TEM, HEM, etc.) | + | + | | | + | | | | |
| | CIR (Color Infrared Transp.) | | | | | | + | + | + | |
| | (In)SAR (Synth. Apert. Radar) | | | ●* | ●* | | | | | |
| | Hyperspectral Scanner/Eagle | | | | | | + | + | + | |
| | ATM (Airb. thematic mapper) | | | | | | + | + | + | |
| | CASI2 (Compact Airb. Spec. Imager) | | | | | | + | + | + | |
| | Geodät. Vermessung (Satellit, GPS) | | | ●* | ●* | | | | | + |
| | LIDAR (Light detection & ranging) | | | | | | + | + | + | |
| | Digitalkamera | | | | | | + | + | + | |
| | Schweremessungen (Flugz. o. Sat.) | | | + | + | | | | | |
| Reservoir und Deckgebirge | Tracer | | + | + | + | + | + | + | | |
| | Gravimetrische Methoden | | | + | + | | | | | |
| | Seismik (2D, 3D, VSP, MSP, … ) | | | ● | ● | | | | | |
| | Druckmessungen in Aquiferen | | | ● | ● | ● | | | | |
| | Fluidanalysen (geochem, etc.) | ● | | ● | ● | ● | | | | |
| | Gasanalysen (z.B. GMS) | | | ● | | | + | + | | |
| | Mikroseismik | | | ● | ● | | | | | |
| | EMIT (Elektromagn. Indukt.) | | | + | + | + | | | | |
| | Elektromagnetik | | | + | + | + | | | | |
| | ERT (El. Widerstandstomographie) | | | + | + | + | | | | |
| | Magnetotellur. Sondierungen | | | + | + | | | | | |
| | Analyse von Kernmaterial | | | + | + | + | | | | |

*) für das obligatorische Basismonitoring ist eine der mit * gekennzeichneten Methoden ausreichend (s. auch zugehörige Tabellen in Anhang E.1)

Neben der Auswahl an Monitoringmethoden ist im Rahmen einer Monitoringkonzepterstellung der Monitoringumfang festzulegen und zu begründen. Der Umfang des Monitorings setzt sich zusammen aus Art und Anzahl der einzusetzenden Methoden, räumlicher Anordnung und Anzahl der Messungen, zeitlicher Auflösung der Messungen sowie der Dauer der einzelnen Monitoringphasen. Die Auslegung des Monitoringumfangs muss grundsätzlich standortspezifisch erfolgen, wobei folgende Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind:

a) Monitoringphasen
b) Standortspezifische Monitoringziele in den einzelnen Monitoringkompartimenten
c) Größe der Monitoringkompartimente
d) Eintrittwahrscheinlichkeit potentieller Gefährdungsereignisse
e) Schadensausmaß potentieller Gefährdungsereignisse
f) Interventionsmöglichkeiten für Gefährdungsereignisse und Schadensfälle

Die Punkte a) bis c) werden im Rahmen des Berichts erläutert. Die Punkte d) und e) sind Gegenstand der Risikobewertung. Für die Risikobewertung sind die Anforderungen in der EU-Richtlinie (Anhang II, Stufe 3.3) in allgemeiner Form dargestellt, eine Untersetzung dieser Anforderungen und Empfehlungen zur Bearbeitung werden in Kapitel D.1.1.1 und von Großmann et al. [2011, 7] gegeben. Hierin wird empfohlen, das Risk-Management für die $CO_2$-Speicherung in Anlehnung an die grundlegende Methodik der Störfallverordnung sowie der zugehörigen Verwaltungsvorschriften durchzuführen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird z.B. in folgende Klassen eingeteilt:

1) Vernünftigerweise nicht auszuschließende Gefahrenquellen
2) Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen
3) Exzeptionelle Gefahrenquellen, die sich jeder Berechenbarkeit entziehen

Die Klassifizierung ist standortspezifisch vorzunehmen und ist beispielhaft für eine allgemeine Betrachtung in Kapitel D.1.1.1.2 aufgeführt. Umso höher das Schadensausmaß potentieller Gefährdungsereignisse und umso schlechter die vorhandenen Interventionsmöglichkeiten für Gefährdungsereignisse sowie Schadensfälle sind, desto größer muss der Monitoringumfang zur Gewährleistung der Sicherheit sein. Im Falle von Gefährdungsereignissen oder Schadensfällen zur Verfügung stehende Gegenmaßnahmen werden z.B. bei Großmann et al. (2011) [8] oder Schilling (2009) [9] diskutiert.

#### *D.1.1.3.2 Standortspezifische Monitoringempfehlungen*

Zur Erstellung eines standortspezifischen Monitoringplans müssen neben den vorgesehenen Injektionsbedingungen (Injektionsraten, etc.) auch die detaillierten Ergebnisse der Standortcharakterisierung und der Risikobewertung bereits vorliegen. Die einzelnen geforderten Kriterien zur Charakterisierung des Speichers und seiner Umgebung, zur Erstellung eines statischen geologischen Modells sowie zu den dynamischen Modellprognosen, wie sie in der EU-Richtlinie oder in der UBA-Studie gefordert sind, wurden hierfür zusammengestellt. Zu den jeweiligen Kriterien wurde für das CLEAN-Projekt der aktuelle Bearbeitungsstand, Ansprechpartner und die Verfügbarkeit der Informationen aufgeführt. Mehrere für die Erstellung eines standortspezifischen Überwachungsplans erforderliche Untersuchungen wurden bisher noch nicht oder noch nicht in ausreichendem Umfang durchgeführt. Dies hängt u.a mit den Ziel-

setzungen von CLEAN sowie der aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen nicht durchgeführten $CO_2$-Injektion und dem verbundenen Aussetzen einiger Projektarbeiten zusammen.

Modellsimulationen für Leckagefälle oder einen nichtbestimmungsgemäßen Betrieb wurden nicht für alle Kompartimente, sondern nur für einzelne Szenarien wie Bohrlochleckagen in die Atmosphäre (DBI/GICON) oder tiefe (1000 m) Aquifere (DBI) und Leckagen in flache Aquifere (CAU Kiel) durchgeführt. Insbesondere Simulationen von nichtbestimmungsgemäßen Betriebszuständen im Bereich der Speicher-, Rückhalte- und Transferpfadformation waren weitgehend nicht Bestandteil von CLEAN. Zur Festlegung der lateralen Erstreckung der Monitoringräume sind jedoch besonders diese Simulationen erforderlich. Hangende Monitoringkompartimente müssen dabei immer mindestens eine genauso große laterale Erstreckung wie tiefer liegende Kompartimente aufweisen. Wegen möglicher lateraler Ausbreitungen von Leackagen oder Formationswasseraufstiegen sollte i.d.R. die horizontale Erstreckung von tiefer liegenden Kompartimenten zu den höher gelegenen Kompartimenten zunehmen. Ohne Kenntnis über die Ausdehnung der basalen Monitoringkompartimente lässt sich somit auch nicht die Kompartimentgröße im Bereich der Oberfläche festlegen.

Simulationen von nichtbestimmungsgemäßen Betriebszuständen im Bereich der Speicher-, Rückhalte- und Transferpfadformation müssen auch wesentlicher Bestandteil für die standortspezifische Eignungsprüfung der Monitoringmethoden für diese Kompartimente sein. Nur wenn sichergestellt ist, dass die methodentypischen Detektionsgrenzen dafür ausreichen, die prognostizierten Systemänderungen nachzuweisen, können die Methoden in den Monitoringplan aufgenommen werden. Aufgrund der bisher ausgesetzten $CO_2$-Injektion ließen sich für verschiedene Methoden (z.B. Seismik) auch noch keine standortspezifischen Tests zur Prüfung der Methodeneignung und als Grundlage für eine Optimierung der Methodenanwendung durchführen.

Für das standortspezifische Monitoring am CLEAN-Standort wird empfohlen, dies entsprechend des vorausgegangenen Kapitels sowie Anhang E.1 durchzuführen und hierbei die gegebenen Hinweise mit einzubeziehen. Da die $CO_2$-Einspeisung in eine weitgehend ausgeförderte Gaslagerstätte erfolgt, ist zu Beginn der Injektion von einer allgemeinen Gasdichtigkeit auszugehen, da durch das Vorhandensein der Lagerstätte diese Gasdichtigkeit bereits über geologische Zeiträume nachgewiesen wurde. Die chemischen Unterschiede zwischen $CO_2$ und dem bisher gespeicherten Erdgas sind hierbei jedoch zu beachten. Aufgrund der Reaktion von $CO_2$ mit Wasser und der hierbei auftretenden Säurebildung können Stahl, Zement und Gestein infolge einer $CO_2$-Injektion wesentlich schnelleren Lösungsprozessen unterliegen, als unter den bisher vorliegenden Bedingungen. Da infolge der Exploration zahlreiche Bohrungen im Speicherbereich vorhanden sind, muss die Überwachung der Bohrungen einen wesentlich größeren Umfang einnehmen als z.B. bei der $CO_2$-Speicherung in salinen Aquiferen. Während für offene Bohrungen eine Reihe etablierter Methoden zur Verfügung

stehen, mit denen innerhalb des Bohrlochs die Unversehrtheit sicher gestellt werden kann, lassen sich Altbohrungen und deren direkte Umgebung nur von der Oberfläche aus überwachen. Eine Überprüfung diesbezüglicher Überwachungsansätze, die z.B. Geoelektrik, Aeroelektromagnetik und Grundwassermonitoring beinhalten könnten, steht derzeit noch aus.

Da der aktuelle Reservoirdruck viel geringer als der initiale Lagerstättendruck und auch als die Drücke in den Formationen im Umfeld des Reservoirs ist, sind Gefährdungen durch entweichendes $CO_2$ oder Formationswasser an diesem Standort als äußerst unwahrscheinlich einzuschätzen, solange durch eine Injektion die Initialdrücke nicht überschritten werden. Bei der $CO_2$-Einspeisung in eine Erdgaslagerstätte sollte aber in jedem Fall das Verhalten von Methan und anderen Gasen innerhalb des Monitorings überwacht werden. Im Falle nicht bestimmungsgemäßer Zustände könnten solche Gase unter Umständen gelöst oder gasförmig in Schutzgutformationen transportiert werden. Ob und inwieweit diese Prozesse als potenzielle Gefahrenquelle an diesem Standort relevant sind, ist schwer zu beurteilen, da insgesamt bisher kaum Untersuchungen zu dieser Thematik durchgeführt wurden.

Aufgrund der aufgezeigten Defizite und der während der Projektbearbeitung noch fortschreitenden und vielfach bisher nicht abgeschlossenen Entwicklung in Bereichen, die als Grundlage für eine detaillierte Konzeptentwicklung benötigt werden (Monitoringtechnologie, Simulationssoftware, Szenarienmodellierung, Risikobewertung, Standorterkundung), lassen sich die hier gegebenen Empfehlungen teilweise bisher nicht weiter spezifizieren. Eine detailliertere Spezifizierung muss einhergehend mit der Kenntnisentwicklung in folgenden Vorhaben noch erfolgen.

## D.1.2 Teilprojekt Mo3: Erkundung, Monitoring und Bewertung hydrogeologischer und hydrogeochemischer Parameter am EGR-Standort

### D.1.2.1 Erarbeitung eines geologischen Strukturmodells (GICON)

Als Grundlage für die Planung der zu errichtenden Grundwassermessstellen am Standort sowie als Basis für das Grundwasserströmungsmodell wurde durch GICON ein geologisches Strukturmodell für die quartären Schichten des Untersuchungsgebietes erarbeitet.

Großräumig liegt das Untersuchungsgebiet zwischen den Endmoränenzügen des Warthevorstoßes der Saale-Kaltzeit im Süden und des Brandenburger Stadiums der Weichsel-Eiszeit im Norden. Prägend sind hier Hochflächen (Altmarkplatten, z.B. Jeetze-Dumme-Platte) und Niederungen (z.B. Jeetze-Purnitz – Niederung). Die Hochflächen bestehen im Wesentlichen aus Grundmöränenablagerungen (Geschiebemergel) und Schmelzwassersanden der Saale-Kaltzeiten (Vor- und Nachschüttbildungen). Diese Bereiche werden von schmelzwassersanderfüllten Erosionsrinnen umgeben. In den Niederungsbereichen lagern geringmächtige holozäne schluffige und anmoorige Bildungen den sandig-kiesigen Talsandablagerungen auf. Diese wiederum werden von limnischen Bildungen der Eem-Warmzeit und sallekaltzeitliche, glazifluviatilen Sanden und/oder Geschiebemergeln unterlagert.

Für die Erstellung des geologischen Strukturmodells standen die Informationen der Lithofazieskarten Quartär (LKQ), der Hydrogeologischen Grundkarten (HK 50) sowie geologische Aufschlüsse aus verschiedenen Quellen zur Verfügung. Die Methodik zur Generierung des Strukturmodells wurde in folgende Arbeitsschritte gegliedert:

- Ableitung von Verbreitungen der geologischen Einheiten
- Klassierung der Schichtenansprache (lithologisch)
- Ableitung der Schichtgeometrien hydrogeologischer Einheiten
- Schichtflächen und Qualitätssicherung
- Anpassung der Verbreitungsgrenzen hydrogeologischer Einheiten
- Ableitung der Mächtigkeitsverteilungen hydrogeologischer Einheiten
- Aufbau des dreidimensionalen, raumfüllenden Strukturmodells

Zur Erstellung des hydrogeologischen Strukturmodells wurde das Modellierungsprogramm GMS 6.5 („Groundwater Modeling System“, Aquaveo, Utah, USA) angewendet. Das Modellgebiet umfasst eine Fläche von ca. 10 km². Im Nordwesten wird das Modellgebiet durch die Flüsse Purnitz und Jeetze begrenzt und erstreckt sich von diesen über 4 km in südöstliche Richtung. Maxdorf befindet sich innerhalb des Modellgebietes. Die Mächtigkeit des Quartärs beträgt im Modellgebiet bis zu 100 m.

Das Strukturmodell basiert konsequenterweise auf der regionalen Grundgliederung (Normalprofil) des Untersuchungsgebietes. Aus dem Normalprofil heraus wurden die 7 Modellschichten nach den für die Grundwasserströmung relevanten Kriterien zu Leiter- und Stauerkomplexen (GWL/GWH) unter Beibehaltung der genetisch geologischen Schichtabfolge vor Ort zusammengefasst (Tabelle 4).

**Tabelle 4: Schichten des Strukturmodells.**

| Layer | Stratigrafie | Einstufung |
|---|---|---|
| **1** | limnische Ablagerungen des Holozän | GWH |
| **2** | flufiatile Ablagerungen der Weichselkaltzeit | GWL 1 |
| **3** | Grundmoräne der Saale II | GWH |
| **4** | Nachschüttbildungen Saale I, Vorschüttbildungen Saale II | GWL 2 |
| **5** | Grundmoräne der Saale I | GWH |
| **6** | Nachschüttbildungen Elster, Holstein-Interglazial, Saale I Vorschüttbildungen | GWL 3 |
| **7** | Grundmoräne der Elster | GWH |

Im Rahmen der Strukturmodellierung zeigte sich, dass nur wenige der vorhandenen Aufschlüsse im Modellgebiet für die Modellentwicklung verwendbar waren. Aus diesem Grund musste zur Modellerstellung verstärkt auf die Lithofazieskarten Quartär bzw. die Informationen der HK 50 zurückgegriffen werden. Abbildung 6 zeigt 3 Schnitte durch das Strukturmodell im Kontext der verwendeten geologischen Aufschlüsse.

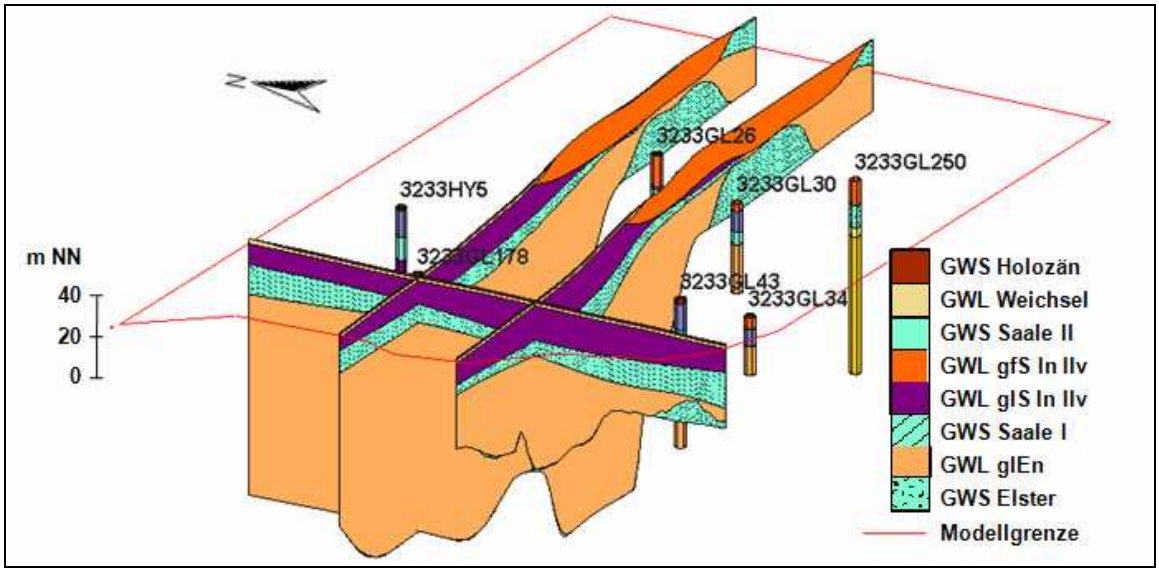



**Abbildung 6: Schnitte durch das Strukturmodell im Kontext von stratifizierten Aufschlüssen.**

Nach dem Bau der in Kapitel D.1.2.2 beschriebenen 12 Grundwassermessstellen standen weitere geologische Daten zur Ertüchtigung des geologischen Strukturmodells zur Verfügung. Insbesondere die Ansprache der gewonnenen Bohrkerne an 2 Grundwassermessstellen lieferte eine detaillierte Beschreibung des geologischen Aufbaus. Für die übrigen Messstellen konnten über Analogien beim Bohrfortschritt Aussagen zum geologischen Aufbau durch den Bohrmeister getroffen werden. Diese neuen Informationen wurden in einem nächsten Schritt in das Strukturmodell übernommen. Im Wesentlichen bestätigten die neuen geologischen Daten die bisher getroffenen Annahmen. Im Detail gab es jedoch Abweichungen, so dass das Strukturmodell auf der Grundlage der aktuellen Daten angepasst und vor dem Hintergrund der folgenden Grundwasserströmungsmodellierung vereinfacht wurde.

Das angepasste Strukturmodell weist eine Mächtigkeit von 30 m bis 50 m auf. Die 4 relevanten Schichten sind in **Tabelle 5** aufgeführt. Abbildung 7 zeigt 3 Schnitte durch das Strukturmodell im Kontext der neuen Bohrungen.

Tabelle 5: Schichten des angepassten Strukturmodells.

| Layer | Stratigrafie | Einstufung |
|---|---|---|
| **1** | Holozän,<br>Grundmoräne Saale II | GWH |
| **2** | Ablagerungen der Weichselkaltzeit,<br>Nach- und Vorschüttbildungen der Saale I/II | GWL |
| **3** | Grundmoräne Saale I | GWH |
| **4** | Nachschüttbildungen Elster,<br>Saale I Vorschüttbildungen | GWL |

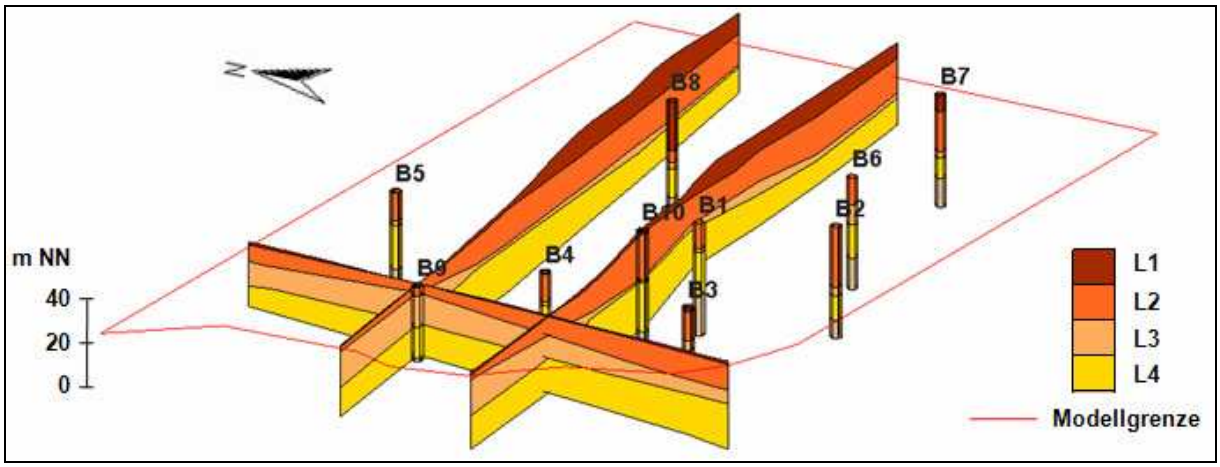



**Abbildung 7: Schnitte durch das angepasste Strukturmodell im Kontext der neuen geologischen Aufschlüsse.**

Auf dem Plateau im Südosten des Modellgebietes bilden die Schmelzwassersande der Saale I Nachschüttbildungen beziehungsweise der Saale II Vorschüttbildungen den Hauptgrundwasserleiter unter einer 10 – 20 m mächtigen Geschiebemergelschicht der Saale II Grundmoräne. Im Nordwesten besteht der obere Grundwasserleiter aus Sedimenten der Weichselkaltzeit und Schmelzwassersanden der Saale I Nachschüttbildungen beziehungsweise der Saale II Vorschüttbildungen. Diese werden Teilweise von limnischen Ablagerungen des Holozäns überlagert. Der obere Grundwasserleiter ist größtenteils durch die Grundmoräne der Saale I vom darunter liegenden Grundwasserleiter getrennt. Im Bereich des Vorfluters weist der Geschiebemergel eine Mächtigkeit größer 10 m auf (Bereich B9). Der untere Grundwasserleiter besteht aus Sedimenten der Saale I Vorschüttbildungen sowie der Elster Nachschüttbildungen.

### D.1.2.2 Bohrungsarbeiten und Sedimentanalysen (CAU/GICON)

#### *D.1.2.2.1 Planung und Durchführung der Bohrarbeiten zur Einrichtung neuer Grundwassermessstellen*

Mit der Durchführung der technischen Arbeiten (Bohrarbeiten, Einrichtung von Grundwassermessstellen) wurde die Sensatec GmbH Sanierungs- und Sensoriktechnologien (Kiel) in Kooperation mit der BTR Bohrtechnik Roßwag GmbH & Co.KG (Vaihingen/Enz) durch die CAU – Christian-Albrechts-Universität zu Kiel beauftragt. Die Bohrarbeiten begannen, nach einer Einweisung und Belehrung des eingesetzten Personals, in der 11. KW und wurden in der 19. KW 2010 beendet. Die Bohrarbeiten wurden durch die CAU und GICON geologisch und fachtechnisch betreut. Die Vermessungsarbeiten an den neu errichteten GWMS nach Lage und Höhe wurden nach Fertigstellung durch die GDF SUEZ durchgeführt.

Ziel des konzipierten GW-Monitorings, das an den neu errichteten Grundwassermessstellen (GWMS) durchgeführt wurde, war die hydrogeologische und geochemische Charakterisierung der oberflächennahen Grundwasserleiter auf einer Fläche, die möglicherweise bei einem $CO_2$-Austritt aus dem Reservoir beeinflusst werden könnte (s. Kapitel D.1.2.3)

Die bestehenden Sondenplätze der GDF SUEZ standen nach Abstimmung mit der GDF SUEZ für die Positionierung der neuen GWMS direkt zur Verfügung. Für die geplanten Messstellen in anderen Bereichen wurde die Zugänglichkeit geprüft, die jeweiligen Eigentümer ermittelt und die Erlaubnis der Grundstückseigentümer eingeholt. Vor Beginn der Bohrarbeiten wurden weitere erforderliche Genehmigungen (Schachtscheine: EON Avacon, VKWA, Telekom, GDF SUEZ, Klärung der Eigentumsverhältnisse / Betretungserlaubnisse, Sondernutzungsgenehmigungen GDF SUEZ, etc.) eingeholt. Für die qualitätsgerechte Ausführung der Bohrarbeiten wurde ein Arbeitsprogramm Bohrarbeiten in Abstimmung mit der GDF SUEZ für die an den Bohrungen beteiligten Projektpartner und dem Bohrfachbetrieb aufgestellt (Anhang E.4).

Durch die BTR Bohrtechnik Roßwag GmbH & Co.KG wurden im oberflächennahen Aquifer mittels des Bohrverfahrens Sonic-Drilling (∅ 146 mm) insgesamt 12 Bohrungen im Modellgebiet (Abbildung 8) abgeteuft und als 2“ – GWMS in HDPE-Ausführung ausgebaut. Die Ergebnisse dieser Bohrungen wurden in die vorliegende Auswertung einbezogen, die Dokumentationen (Schichtenverzeichnisse, Bohrprofile und Ausbaupläne) sind im Anhang E.5 dargestellt. Die realisierten Ausbautiefen und eingebauten Filterstrecken der neuen Messstellen können Tabelle 6 und Abbildung 9 entnommen werden. Der Pegelabschluss erfolgte mittels SEBA-Kappe. Nach Einrichtung der Grundwassermessstellen erfolgte das Klarpumpen. Im Bereich der Sondenplätze wurden aufgrund der von GDF SUEZ geforderten Befahrbarkeit der Sondenplätze die Messstellen mit Straßenkappe in Unterflurbauweise installiert. Die anderen Messstellen wurden Überflur errichtet (hohe Vegetation im Modellgebiet).

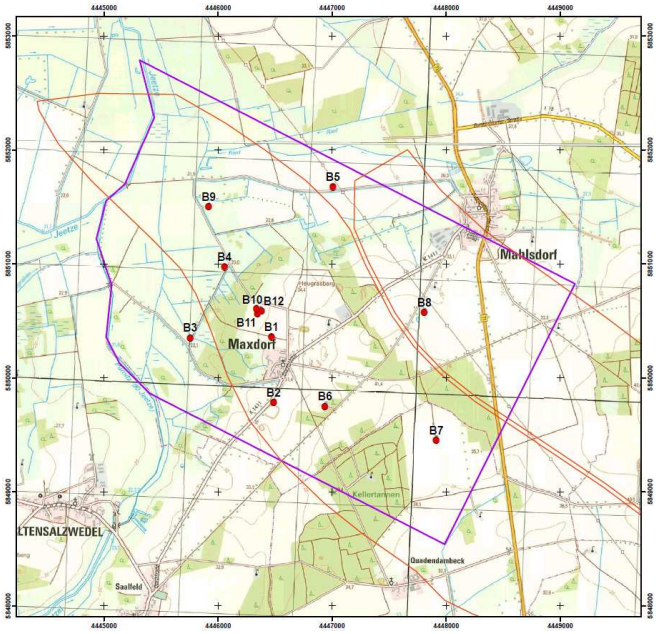



**Abbildung 8: Lage der Bohrungen.**

**Tabelle 6: Filterstrecken und Ausbautiefen der neu eingerichteten Grundwassermessstellen.**

| Messstelle | Filteroberkante [m u. GOK] | Filterunterkante [m u. GOK] | Filterstrecke [m] | Ausbautiefe [m u. GOK] |
|---|---|---|---|---|
| B01 | 15,0 | 32,0 | 17,0 | 32,68 |
| B02 | 31,0 | 40,0 | 9,0 | 44,45 |
| B03 | 21,0 | 31,9 | 10,9 | 31,89 |
| B04 | 17,0 | 29,2 | 12,2 | 29,22 |
| B05 | 17,0 | 35,0 | 18,0 | 35,05 |
| B06 | 22,0 | 35,9 | 13,9 | 35,89 |
| B07 | 30,0 | 37,0 | 7,0 | 43,88 |
| B08 | 32,0 | 41,5 | 9,5 | 41,46 |
| B09 | 23,0 | 32,0 | 9,0 | 48,85 |
| B10 | 10,0 | 46,0 | 36,0 | 46 |
| B11 | 25,0 | 41,2 | 16,2 | 41,16 |
| B12 | 42,0 | 58,0 | 16,0 | 59,94 |

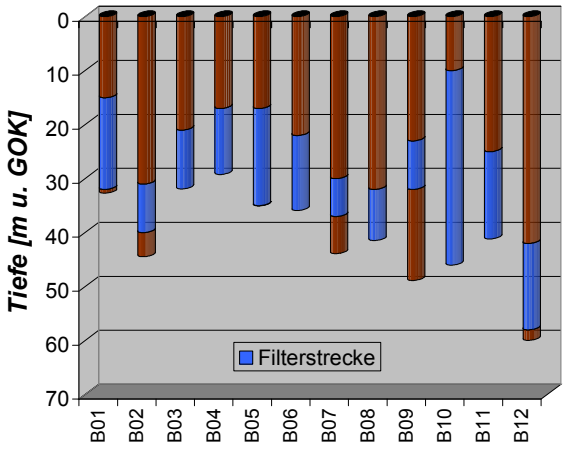



**Abbildung 9: Filterstrecken und Ausbautiefen der neu eingerichteten Grundwassermessstellen.**

Die ingenieurtechnische Begleitung durch CAU und GICON erfolgte zur Überwachung der Einhaltung der Arbeitsschutzmaßnahmen sowie zur Qualitätssicherung der Bohrungen. Zur

Spezifizierung der Festphasenzusammensetzung des für die Simulation von Leckageszenarien entwickelten Standortmodells wurden an zwei Standorten (B08 und B11) ungestörte Proben mittels Liner gewonnen und nach Fertigstellung der Bohrung Feststoffproben entnommen (Abbildung 10). Nach Fertigstellung der GWMS erfolgte durch CAU und GICON eine Abnahme/Oberflächenabnahme der beauftragten Leistung mit den Grundstückseigentümern und der GDF SUEZ. Daran anschließend wurden von GICON das Grundwassermonitoring über 6 Kampagnen durchgeführt bzw. beauftragt (Kapitel D.1.2.3).

**Abbildung 10: Bohrarbeiten (Fotos links) und Sedimentbeprobung aus Kernbohrungen (Fotos rechts).**

### *D.1.2.2.2 Sedimentanalysen (CAU)*

Zur Charakterisierung der Sedimente wurden Proben aus den beiden Kernbohrungen B08 und B11 aus unterschiedlichen Tiefen an der CAU Kiel untersucht. Zur Bestimmung der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung wurden zunächst Vollaufschlüsse durchgeführt und im Anschluss die Hauptkationen mittels ICP-OES und Spurenelemente sowie Schwermetall mittels ICP-MS analysiert. Die Messung von anorganischen (IC) und organischen (OC) Kohlenstoffkonzentrationen erfolgte coulometrisch. Hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte ($K_f$-Werte) wurden auf Grundlage der aus Siebungen und Schlämmungen ermittelten Korngrößenverteilungen (Abbildung 28 bis Abbildung 30) berechnet. Anhand von Röntgendiffraktometrie (XRD) der Feinkornfraktion wurden mineralogische Komponenten untersucht.

Die elementare Zusammensetzung der untersuchten Geschiebemergel- und Sand-Schichten spiegelt erwartungsgemäß eine höhere mineralogische Diversität des Geschiebemergels im Vergleich zu den Quarz-dominierten Sandschichten wider (Tabelle 6). Für die Sandschichten ließ sich aufgrund der geringen gemessenen Elementkonzentrationen und dem damit verbundenen hohen Siliziumanteil bei den XRD-Messungen bedingt durch die Nachweisgrenze des Verfahrens ausschließlich Quarz detektieren (Abbildung 31, Anhang E.6). In den Proben aus dem Geschiebemergel konnte mit den XRD-Messungen neben Quarz auch Kalzit nachgewiesen werden (Abbildung 32, Anhang E.6).

Da jedoch das Vorhandensein auch von geringen Mineralgehalten für Modellsimulationen eine wichtige Rolle spielt, wurden diese aus den Elementkonzentrationen abgeschätzt (Tabelle 6). Diese Berechnungen weisen darauf hin, dass bis zu 5% Orthoklas, 2.5% Albit, 1.5% Eisenhydroxid, 2.5% Anorthit und 0.4% Kalzit in den sandigen Schichten, in denen sich $CO_2$ im Leckagefall vorwiegend ausbreiten würde, vorhanden sein könnten. Auf diese Informationen bauen numerische Modellrechnungen zur Simulation von Reaktionen zwischen $CO_2$, diesen Mineralen und den analysierten Grundwässern auf (Kapitel D.1.2.5). Die Konzentrationen der gemessenen Spurenelemente und Schwermetalle (Tabelle 9, Anhang E.6) sind sehr niedrig und liegen mehrere Größenordnungen unter den Prüf-, Vorsorge- und Maßnahmenwerten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung.

**Tabelle 7: $K_f$-Werte sowie aus Vollaufschlüssen ermittelte Elementkonzentrationen und hieraus berechnete Mineralkonzentrationen. Auf Grundlage der in Klammern gesetzten Elemente erfolgte die Berechnung der jeweiligen Mineralkonzentration. (GM: Geschiebemergel, S: Sand, DS: Durchschnitt)**

| | | | | | | | | | | | | Orthoklas | Albit | Eisenhydroxid | Anorthit | Kalzit | Kalzit |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Position | Tiefe | Geologie | $K_f$-Wert | IC | OC | Ca | Fe | K | Mg | Mn | Na | $KAlSi_3O_8$ | $NaAlSi_3O_8$ | $Fe(OH)_3$ | $CaAl_2Si_2O_8$ | $CaCO_3$ | $CaCO_3$ |
| | | | | | | | | | | | | (K) | (Na) | (Fe) | (Ca) | (Ca) | (C) |
| | [mbs] | | [m/s] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] |
| B08 | 3-4 | GM | 3,4E-07 | 5,33 | 0,74 | 29,4 | 18,4 | 15,5 | 4,05 | 0,26 | 4,47 | 110,4 | 51,0 | 35,2 | 203,9 | 73,4 | 44,5 |
| B08 | 5-6 | GM | 6,9E-07 | 16,9 | 1,33 | 70,4 | 14,7 | 12,0 | 5,14 | 0,33 | 4,07 | 85,2 | 46,4 | 28,2 | 488,1 | 175,7 | 140,6 |
| B08 | 10-11 | GM | *1,0E-04* | 5,99 | 1,01 | 4,22 | 4,36 | 5,87 | 0,77 | 0,08 | 1,96 | 41,7 | 22,3 | 8,3 | 29,3 | 10,5 | 50,0 |
| B08 | 11-12 | S | 1,3E-04 | 0,51 | 0,28 | 1,79 | 2,89 | 4,92 | 0,48 | 0,06 | 1,42 | 35,0 | 16,2 | 5,5 | 12,4 | 4,5 | 4,3 |
| B08 | 16-17 | S | 8,3E-05 | 0,02 | 0,10 | 0,51 | 1,62 | 4,04 | 0,25 | 0,03 | 1,43 | 28,7 | 16,3 | 3,1 | 3,5 | 1,3 | 0,15 |
| B08 | 21-22 | S | 6,4E-05 | 0,02 | 0,43 | 0,53 | 1,67 | 4,24 | 0,20 | 0,03 | 1,56 | 30,2 | 17,8 | 3,2 | 3,6 | 1,3 | 0,13 |
| B11 | 2-4 | S | 5,8E-05 | 0,01 | 1,58 | 1,47 | 7,95 | 6,83 | 0,59 | 0,10 | 2,25 | 48,6 | 25,6 | 15,2 | 10,2 | 3,7 | 0,04 |
| B11 | 4-6 | GM | 1,4E-06 | 0,18 | 4,72 | 4,19 | 15,0 | 8,46 | 1,95 | 0,13 | 2,25 | 60,2 | 25,6 | 28,7 | 29,0 | 10,5 | 1,51 |
| B11 | 8-10 | S | 5,4E-05 | 0,51 | 3,66 | 3,64 | 7,59 | 7,39 | 0,82 | 0,10 | 2,07 | 52,6 | 23,6 | 14,5 | 25,3 | 9,1 | 4,28 |
| B11 | 12-14 | S | 6,5E-04 | 0,01 | 10,4 | 1,20 | 3,04 | 3,13 | 0,23 | 0,02 | 0,91 | 22,3 | 10,3 | 5,8 | 8,3 | 3,0 | 0,06 |
| B11 | 19-20 | S | 6,1E-04 | 0,01 | 1,42 | 0,91 | 3,17 | 4,29 | 0,25 | 0,06 | 1,65 | 30,5 | 18,8 | 6,1 | 6,3 | 2,3 | 0,09 |
| B11 | 25-26 | S | 6,1E-05 | 0,01 | 0,91 | 0,63 | 2,88 | 3,28 | 0,17 | 0,06 | 1,25 | 23,3 | 14,2 | 5,5 | 4,4 | 1,6 | 0,06 |
| B11 | 33-34 | S | 2,2E-04 | 0,01 | 0,35 | 0,00 | 1,41 | 2,60 | 0,10 | 0,01 | 0,17 | 18,5 | 1,9 | 2,7 | 0,0 | 0,0 | 0,06 |
| B11 | 39-40 | S | 1,0E-04 | 0,01 | 9,72 | 0,43 | 1,97 | 4,14 | 0,09 | 0,01 | 0,31 | 29,4 | 3,6 | 3,8 | 3,0 | 1,1 | 0,07 |
| B11 | 45-46 | S | 6,4E-05 | 0,01 | 10,3 | 0,75 | 3,64 | 5,03 | 0,34 | 0,03 | 0,33 | 35,8 | 3,7 | 7,0 | 5,2 | 1,9 | 0,07 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | GM (min) | 3,4E-07 | 0,18 | 0,74 | 4,19 | 4,36 | 5,87 | 0,77 | 0,08 | 1,96 | 41,73 | 22,29 | 8,34 | 29,05 | 10,46 | 1,51 |
| | | GM (max) | 1,4E-06 | 16,9 | 4,72 | 70,4 | 18,4 | 15,5 | 5,14 | 0,33 | 4,47 | 110,41 | 50,96 | 35,24 | 488,06 | 175,7 | 140,60 |
| | | GM (DS) | 8,1E-07 | 7,09 | 1,95 | 27,1 | 13,1 | 10,5 | 2,98 | 0,20 | 3,19 | 74,39 | 36,31 | 25,10 | 187,57 | 67,51 | 59,14 |
| | | S (min) | 5,4E-05 | 0,01 | 0,10 | 0,00 | 1,41 | 2,60 | 0,09 | 0,01 | 0,17 | 18,49 | 1,91 | 2,70 | 0,00 | 0,00 | 0,04 |
| | | S (max) | 6,5E-04 | 0,51 | 10,4 | 3,64 | 7,95 | 7,39 | 0,82 | 0,10 | 2,25 | 52,56 | 25,64 | 15,22 | 25,25 | 9,09 | 4,30 |
| | | S (DS) | 2,0E-04 | 0,11 | 3,76 | 1,04 | 2,99 | 4,31 | 0,29 | 0,04 | 1,11 | 30,63 | 12,64 | 5,72 | 7,20 | 2,59 | 0,93 |

### D.1.2.3 Grundwassermonitoring (GICON/CAU)

#### *D.1.2.3.1 Zielsetzung*

Zielsetzung im Arbeitspaket ist die hydrogeologische und geochemische Charakterisierung der oberflächennahen Grundwasserleiter (flache Aquifere) auf einer Fläche, die möglicherweise bei einem $CO_2$-Austritt aus dem Reservoir beeinflusst werden könnte. Da aber nicht zu erwarten ist, dass während und auch nach der Injektionsphase eine $CO_2$-Immission in den flachen Aquifer auftritt, dienen die für das Monitoring geplanten Messstellen hauptsächlich der Erfassung der natürlichen hydrogeologischen und hydrogeochemischen Schwankungen im gewählten Modellgebiet und der Ableitung von Indikatorwerten im Falle eines späteren $CO_2$-Eintrages. Zielstellungen des zu konzipierenden Grundwassermonitorings der flachen Aquifere sind die Beschreibung von Zustandsänderungen der Stoffverteilung in einem „potentiellen“ $CO_2$-Austrittsbereich auf der Grundlage der Zustandserfassung der Grundwasserdynamik und der Grundwasserbeschaffenheit sowie die Erfassung der Ausbreitung des geochemisch veränderten Wassers im Grundwasserabstrom.

#### *D.1.2.3.2 Konzeption Grundwassermonitoring*

Hinsichtlich der abzuleitenden Monitoringmaßnahmen für die o.g. Zielstellungen war zwischen Grundwasserstandsmessungen und Qualitätsmessungen zu unterscheiden. Im Anhang E.7 ist die Konzeption zum Grundwassermonitoring der flachen Aquifere beigelegt, weshalb auf nähere Erläuterungen nachfolgend verzichtet wurde. In der Konzeption zum Monitoring wurden Daten der GDF SUEZ (zu den Sondenplätzen und zu den durch die GDF SUEZ unterhaltenen Messstellen), des LHW Sachsen-Anhalts und des Landratsamtes Altmarkkreises Salzwedel zu dem unterhaltenen Messstellen im Modellraum berücksichtigt:

#### *D.1.2.3.3 Notwendigkeit der Errichtung von GWMS*

Im Ergebnis der Auswertung der vorhandenen Daten zu den Messstellen der GDF SUEZ, des LHW Sachsen-Anhalts und des Landratsamtes Altmarkkreises Salzwedel wurde eine Errichtung von GWMS für die o.g. Zielstellungen als erforderlich erachtet. Die Erforderlichkeit der Messstellen begründete sich vor allem aus der geringen Messstellendichte im Modellgebiet/an den Modellrändern bzw. aufgrund der geringen Tiefenlagen vorhandener GWMS. Im Rahmen des Monitoringkonzeptes (Anhang E.7) wurden basierend auf dem geologischen Strukturmodell, dem Gefährdungspotential für Rezeptoren und vorhandenen Beobachtungspegeln mögliche Messstellenstandorte ausgewählt. Für die Zustandsbeschreibung wurde eine Errichtung von insgesamt 12 Messstellen im Bereich des Modellgebietes als erforderlich abgeleitet.

Die im Bereich des Modellgebietes bestehenden Sondenplätze der GDF SUEZ (zu denen über die GDF SUEZ ein direkter Zugang besteht) boten aufgrund der gegebenen Zugäng-

lichkeit die Möglichkeit, einige Messstellen (B06 bis B12) auf den Sondenplätzen zu errichten. Für die geplanten GWMS-Standorte außerhalb vorhandener Sondenplätze (B01 bis B05) im Modellraum waren die Zugänglichkeit zu klären, die Eigentümer zu ermitteln und die Erlaubnis der jeweiligen Eigentümer einzuholen sowie Entschädigungsverhandlungen durchzuführen.

#### *D.1.2.3.4 Methodik der Grundwasserprobenahme*

Die Planung des vor der Grundwasserprobenahme an jeder GWMS abzupumpenden Wasservolumens erfolgte gemäß BWK Merkblatt 5 „Grundwasserprobenahme“ des DVWK Merkblatt 245/1997. Die daraus resultierenden Wasservolumina wurden auf der Grundlage der in den Unterlagen enthaltenen Ausbaudaten der GWMS berechnet und dem Anhang E.8 (Probenahmeplanung) beigefügt. Bei der Berechnung des vor der Grundwasserprobenahme abzupumpenden Wasservolumens wurde für alle GWMS das 1,5-fache Filtervolumen entsprechend ihrer Kiesschüttung angenommen.

Die repräsentativen (sanften) Entnahmen der Grundwasserproben erfolgten unter Berücksichtigung von an die geohydraulischen Gegebenheiten des Untergrundes angepassten Pumpenförderströmen, deren Abpumpzeiten zwischen 30 Minuten und maximal 2 Stunden, unter Beachtung vertretbarer Absenkungen liegen. Für die Planung einer sanften Grundwasserprobenahme, d.h. die Ermittlung der einzustellenden Pumpenförderleistung bei geohydraulisch vertretbarer Wasserspiegelabsenkung in der Grundwassermessstelle, ist die Kenntnis der geohydraulischen Bedingungen des Grundwasserentnahmebereiches (gespannt/ ungespannt, Mächtigkeit des Grundwasserleiters und hydraulischer Durchlässigkeitskoeffizient ($k_f$-Wert)) eine grundlegende Voraussetzung. Sollte der $k_f$-Wert des Grundwasserentnahmebereiches nicht bekannt sein, so wird dieser unter Nutzung der DIN 4220 und Erfahrungswerten ermittelt. Weiterhin wurden die Angaben der Bohrprofile ausgewertet.

#### *D.1.2.3.5 Durchführung der Grundwasserprobenahme (GICON)*

Mit der Durchführung der Grundwasserprobenahme wurde nach der Einholung und Bewertung von 3 Leistungsangeboten, dass akkreditierte Labor BGD - Boden- und Grundwasserlabor GmbH (Dresden) beauftragt. Die Entnahme von Grundwasserproben aus den 12 GWMS erfolgte im Zeitraum zwischen dem 25.08.2010 und dem 18.05.11. in 6 Kampagnen

Im Rahmen der GW-PN wurde vor Beginn der PN eine Messung des Grundwasserspiegels in den 12 Monitoringmessstellen sowie in den im Modellgebiet nutzbaren Messstellen der GDF SUEZ, des LHW Sachsen-Anhalts und des Landratsamtes Altmarkkreises Salzwedel durchgeführt. Für jede PN-Kampagne wurde somit eine Stichtagsmessung für das Modellgebiet realisiert.

Vor dem Einbau der Probenahmetechnik erfolgte eine äußere und innere Zustandsprüfung der Grundwassermessstellen. An den GWBM wurden Tiefenserien der Parameter Temperatur, elektr. Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotential sowie Sauerstoffgehalt/-sättigung mit einer Tiefensonde vom Typ HYDROLAB MS 4 aufgenommen. Die grafischen Darstellungen dieser Serien können den Probenahme-Protokollen entnommen werden.

Die Beprobung der GWMS erfolgte in allen Kampagnen mit einer MP1-Pumpe. Das Probenahmesystem wurde entsprechend der Ausbauangaben in Entnahmetiefen von jeweils 1 m über der Filteroberkante eingebaut. Die Entnahme der Grundwasserproben erfolgte on-site:

- mit der selben Pumpenförderleistung wie während der vorangehenden Abpumpphase, wobei das on-site Abfüllen der Probenahmeflaschen aus einem Bypass mit einem Volumenstrom von ca. 1 l/min erfolgt und
- nach dem das hydraulische Abbruchkriterium erreicht wurde.

In den Probenahmeprotokollen wurden u.a. die Ergebnisse der organoleptischen und optischen Bewertung der Grundwasserproben, die in der Messzelle festgestellte Ausgasung des geförderten Grundwassers (resultierend aus der in der Förderleitung wirkenden Druckverringerung in der Grundwasserprobe), Bodensatz sowie die Endwerte der Leitkennwerte notiert. Die grafische Auswertung der Tiefenprofile und der zeitlichen Verläufe der Leitkennwerte während der jeweiligen Abpumpphase ist ebenfalls den Protokollen zu entnehmen. Nach dem die on site zu entnehmenden Grundwasserproben in die entsprechenden Gefäße abgefüllt und verschlossen waren, wurde die MP1 abgeschaltet und das Probenahmesystem ausgebaut.

### *D.1.2.3.6 Analytik und Ergebnisse des Grundwassermonitorings (CAU)*

Die Hauptkationen Calzium, Eisen, Kalium, Magnesium, Mangan, Natrium und Silizium wurden mittels ICP-OES, Chlorid und Sulfat ionenchromatographisch, TIC (Total Inorganic Carbon) und TOC (Total Organic Carbon) mittels TIC/TOC-Analyser und die Spurenelemente und Schwermetalle an einer ICP-MS am Institut für Geowissenschaften der CAU Kiel analysiert.

Für eine mögliche Permanentmessung wurden zwei Kombisonden (CTDplus-Messsystem) der UIT GmbH (Dresden) getestet. Beide Messsysteme enthielten eine $CO_2$-Sonde (Servinghaus-Prinzip) und eine MSM-S3-Sonde zur Messung von pH-Wert, elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur. Die MSM-S3-Sonde kann zusätzlich auch mit einem Druckaufnehmer, einer Redoxsonde, einem Sauerstoffsensor oder einem Chloridsensor ausgestattet werden.

Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings zeigten, dass die zeitlichen Schwankungen an den einzelnen Grundwassermessstellen innerhalb eines Jahres für die meisten Parameter

relativ gering ausfallen und gegenüber den Unterschieden zwischen diesen Messstellen klein sind (Abbildung 11, Anhang E.9: Abbildung 33 bis Abbildung 38). Die Unterschiede zwischen den Messstellen werden z.B. durch Leitfähigkeiten zwischen 300 und 700 µS/cm, Kalziumkonzentrationen zwischen 50 und 120 µg/l oder TIC-Konzentrationen zwischen 10 und 100 mg/l gekennzeichnet. Nur einzelne Parameter wie z.B. die Eisenkonzentration zeigen zeitliche Änderungen, die möglicherweise im Zusammenhang mit Grundwasserschwankungen und veränderlichen Redoxbedingungen stehen.

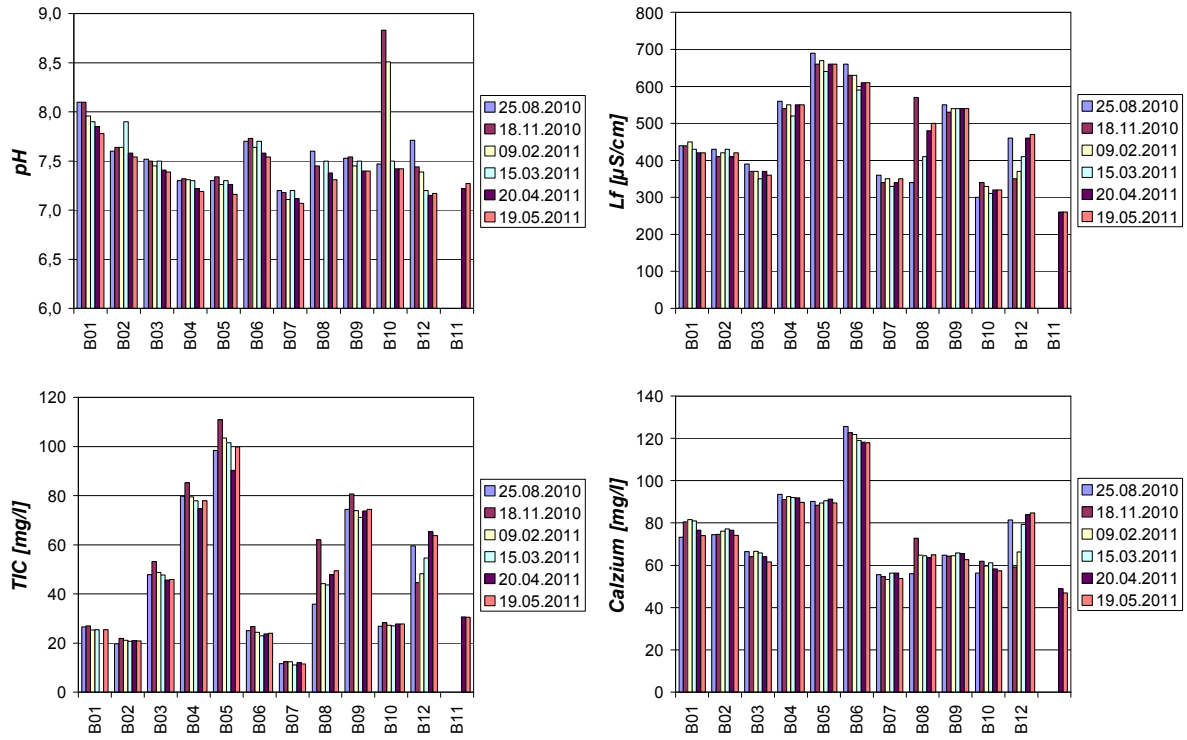



**Abbildung 11: Ausgewählte Ergebnisse des Grundwassermonitorings: pH-Werte, elektrische Leitfähigkeiten (Lf), anorganischer Kohlenstoff (TIC) und Calzium.**

Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass einzelne Grundwassermessstellen zunächst nicht als repräsentativ für größere Bereiche angesehen werden können. Im Falle eines Eintritts von gasförmigem $CO_2$ in den Grundwasserleiter ist jedoch von einer Änderung der Indikator-Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und TIC auszugehen (s. geochemische Modellierung, Kapitel D.1.2.5), welche die ermittelten Schwankungsbereiche bei Weitem übersteigt. Das bedeutet, dass anhand von Grundwasseruntersuchungen mit relativ großer Sicherheit beurteilen lässt, ob das beprobte Grundwasser in Kontakt mit einer $CO_2$-Gasphase stand. Ob eine $CO_2$-Gasblase in oberflächennahen Aquiferen auf diese Weise detektierbar ist, hängt also im Wesentlichen von der Größe des Gasphasenkörpers und den Abständen zwischen Grundwassermessstellen ab. Welche Randbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Größe des Gasphasenkörpers haben und mit welchen Ausdehnungen zu rechnen ist, wurde im Rahmen der Mehrphasenmodellierung (Kapitel D.1.2.5) untersucht.

Für den Fall dass mit anderen Monitoringmethoden, wie z.B. Geoelektrik oder Hubschrauber-basierter Elektromagnetik (Kapitel D.1.2.4) Anzeichen für ein Eindringen von $CO_2$-Gas oder salinarem Formationswasser aus der Tiefe in einen Grundwasserleiter festgestellt werden, lassen sich diese Anzeichen auch durch eine nachträgliche Untersuchung des Grundwassers an dieser Stelle überprüfen. Das Vorhandensein einer Messstelle mit vorliegenden Baselinemessungen genau an der zu untersuchenden Position ist am untersuchten Standort nicht zwingend erforderlich, wenn die Annahme der Repräsentativität der erzielten Ergebnisse für das gesamte Untersuchungsgebiet zutrifft.

Aufgrund von Verzögerungen bei der Herstellung der neu entwickelten $CO_2$-Kombisonden zur Permanentmessung im Grundwasser konnten diese leider nur über einen relativ kurzen Zeitraum von zwei Monaten getestet werden. Für die Parameter $CO_2$-Konzentration, pH-Wert und Temperatur zeigten sich über diesen Zeitraum relativ stabile Messwerte mit nur geringen

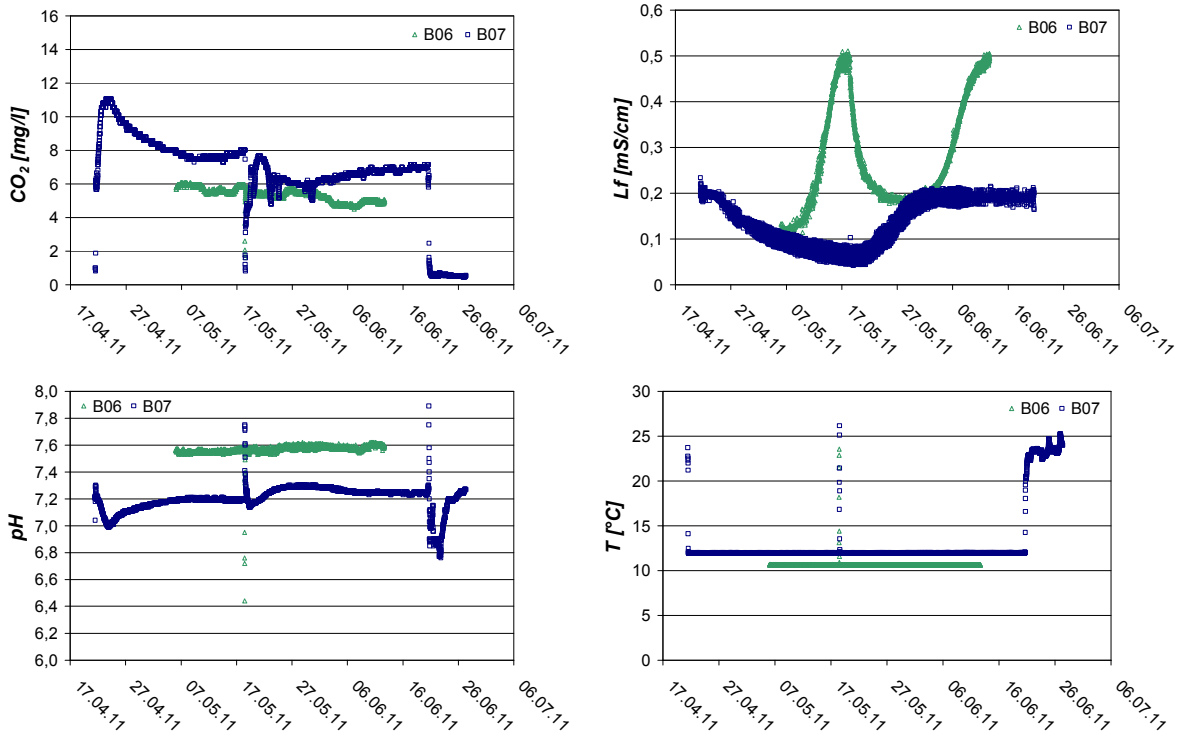



**Abbildung 12: Mit den $CO_2$-Kombisonden gemessene Parameter $CO_2$-Konzentration, elektrische Leitfähigkeit, (Lf), pH-Wert und Temperatur (T).**

Schwankungsbereichen (Abbildung 12). Die auffälligen kurzzeitigen Änderungen wurden durch das Einhängen bzw. die Herausnahme der Sonden bei Grundwasserprobenahmen hervorgerufen. Bei der $CO_2$-Konzentration und dem pH-Wert ist zudem zu beobachten, dass es relativ lange (bis zu zwei Wochen) dauert, bis sich die Messwerte stabilisiert haben. Die großen Schwankungen bei der elektrischen Leitfähigkeit können bisher nicht erklärt werden. Zu diesen Punkten besteht noch Untersuchungs- und Optimierungsbedarf. Sollte sich in zu-

künftigen Versuchen bestätigen, dass sich mit diesen Sonden auch über längere Zeiträume eine Permanentüberwachung durchführen lässt, so bestünde hiermit eine wichtige Ergänzung bestehender Monitoringtechnologien, da die Messwerte dieser Sonden auch per Datenfernübertragung aufgezeichnet und online überwacht werden können. Eine solche Onlineüberwachung könnte an ausgewählten Verdachtsflächen wie z.B. im Umfeld von Bohrungen zu einer erhöhten Sicherheit beitragen.

Da Änderungen der TIC-Konzentration nicht nur durch $CO_2$-Leckagen, sondern auch auf verschiedenen natürlichen Wegen (z.B. Karbonatlösung, Wurzelatmung, Abbau organischer Substanz, atmosphärischer Eintrag) erfolgen können, lässt sich durch einen Anstieg des TIC nicht in jedem Fall auf eine $CO_2$-Leckage schließen. Hinweise auf den Ursprung der $CO_2$-Spezies oder einen Kontakt des beprobten Wasser mit größeren Massen von $CO_2$–Phase lassen sich über die Messung von Isotopensignaturen (z.B. $\delta^{13}C_{CO_2}$ oder $\delta^{18}O_{H_2O}$) ermitteln. Die theoretischen Hintergründe hierzu werden im Teilprojekt „Monitoring mit stabilen isotopengeochemischen Messungen für EGR Anwendungen“ der FAU Erlangen-Nürnberg sowie in Fachpublikationen von Johnson et al. (z.B. [10, 11]) erläutert. Im Rahmen des Grundwassermonitorings wurden an vier Stichtagsbeprobungen auch Proben für die Messung von $\delta^{13}C_{CO_2}$ und $\delta^{18}O_{H_2O}$ am Leibniz-Labor für Altersbestimmung und Isotopenforschung der CAU Kiel genommen.

Die Ergebnisse der verschiedenen Grundwassermessstellen liegen für $\delta^{18}O_{H_2O}$ mit Werten von -8,4 bis -9,2 ‰ V-SMOW in einem sehr engen Bereich (Abbildung 13). Sieht man bei den $\delta^{13}C_{CO_2}$ Werten von der Messstelle B05 ab, so treten hier Werte zwischen -9,5 und -16,1 ‰ VPDB auf. Der Grund für die deutlich abweichenden Werte an B05 ist bisher unbekannt. Vergleicht man diese Ergebnisse mit entsprechenden Isotopensignaturen von $CO_2$, das an EOR-Standorten injiziert wurde (Tabelle 8), so zeigt sich, dass sich die Isotopensignaturen von jeder dieser $CO_2$-Chargen deutlich von den im Grundwasser gemessenen Signaturen unterscheiden. Es ist davon auszugehen, dass an einem Kohlekraftwerk abgetrenntes $CO_2$ ebenfalls wesentlich unterschiedliche Isotopensignaturen wie die des Grundwassers aufweisen und somit verpresstes $CO_2$ anhand solcher Analysen im Grundwasser identifiziert werden kann, sofern keine zu großen Verdünnungseffekte auftreten.

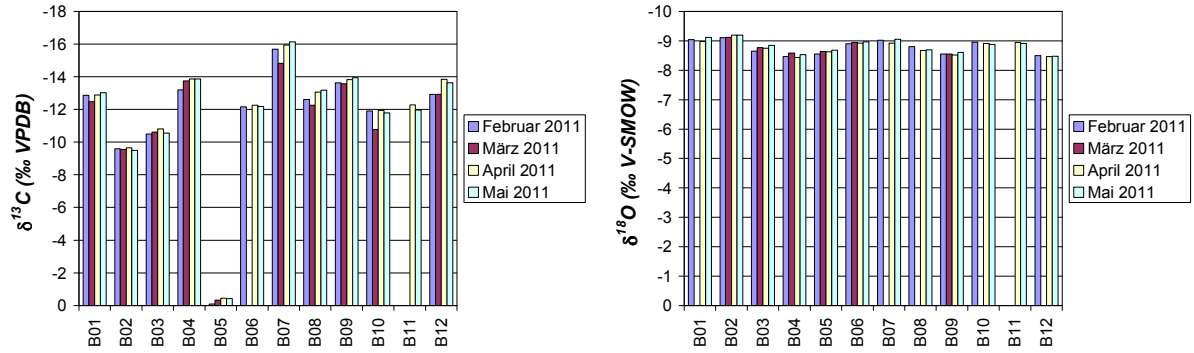



**Abbildung 13: $\delta^{13}C$- und $\delta^{18}O$-Signaturen der Grundwasserproben.**

**Tabelle 8: Isotopensignaturen des injizierten $CO_2$ verschiedener EOR-Standorte.**

| | $\delta^{13}C_{CO_2}$ | $\delta^{18}O_{H_2O}$ | Quelle |
|---|---|---|---|
| Pembia (injiziertes $CO_2$) | -4,5±2‰ | +28,6‰ | [10] |
| Weyburn (injiziertes $CO_2$) | -20,4‰ | +4,9‰ | [10] |
| Frio (injiziertes $CO_2$) | -34 bis -44‰ | | [12] |

### D.1.2.4 Geophysikalische Untersuchungen (CAU)

Mit geoelektrischen Untersuchungen ist es möglich, Unterschiede des elektrischen Widerstands im Untergrund zu bestimmen, der zum einen von der Leitfähigkeit der Festphase und zum anderen von der Leitfähigkeit des Grundwassers abhängig ist. Hierdurch lassen sich in quartären Ablagerungen wie sie am CLEAN-Standort vorliegen, z.B. Sande mit geringer Leitfähigkeit von Tonen oder Mergeln mit hohen Leitfähigkeiten abgrenzen. Eine Unterscheidung von Süßwasser, salinen Tiefenwässern und wasser-ungesättigten Bereichen ist ebenfalls möglich. Geoelektrische Methoden bieten gegenüber Untersuchungen an Kernmaterial oder Bohrlochmessungen den Vorteil, dass relativ große Bereiche und räumliche Informationen erhoben werden können.

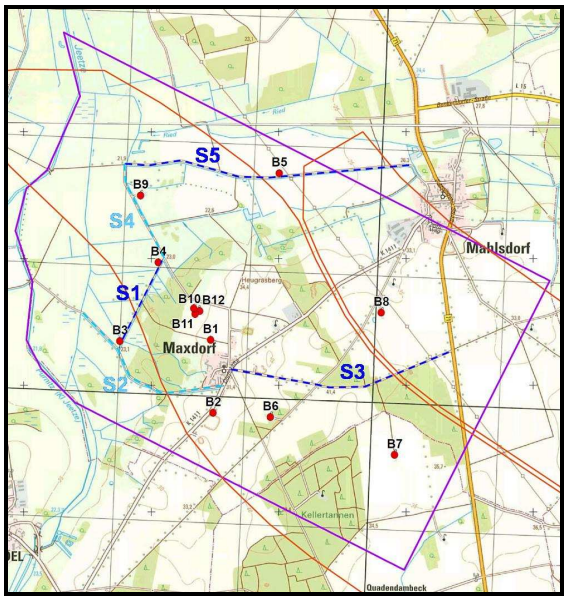



**Abbildung 14: Lageplan des Untersuchungsgebiets (blauer Rahmen) mit den neu eingerichteten Grundwassermessstellen (B1-B12) und den Profilstrecken der Geoelektrik-Messungen (S1-S5) .**

Im Rahmen dieses Teilprojekts wurden einerseits geoelektrische Messungen an der Oberfläche und in oberflächennahen Bohrlöchern (ERT: Electric resistivity tomography) und andererseits Hubschrauber-basierte Elektromagnetik (AEM: Aeroelektromagnetik) durchgeführt. Mit dem Einsatz dieser Verfahren sollten zum einen die Möglichkeiten dieser Methoden am CLEAN-Standort untersucht, detaillierte Daten zum Untergrundaufbau erhoben und Baselinemessungen für eine mögliche spätere Überwachung gegenüber Eintritten von $CO_2$ oder Formationswasser in oberflächennahen Aquifere durchgeführt werden.

#### *D.1.2.4.1 Geoelektrik*

Im Vorfeld der Geoelektrik-Feldmessungen wurde eine numerische Modellstudie zur Optimierung der Messelektrodenanordnung durchgeführt, die darauf abzielt, auch relativ dünne Lagen von ca. 3-5 m erfassen zu können. Eine aufgrund der Modellergebnisse viel versprechende Multigradienten-Methode wurde daraufhin auch im Gelände zur Aufnahme von fünf 800-2240 m langen Profilen mit 160-448 Elektroden jeweils im Abstand von 5 m eingesetzt (Abbildung 14 und Abbildung 15). Zusätzlich erfolgten Messungen zwischen Elektroden an der Oberfläche und in den Grundwassermessstellen im Filterbereich eingesetzten Elektroden an den Messstellen B03 und B04.

**Abbildung 15: Geoelektrikelektroden.**

Da Widerstände unterhalb von 30 Ω typisch für tonige Sedimente und Widerstände größer 50 Ω repräsentativ für sandige Schichten sind, deuten die Ergebnisse der Oberflächenprofile auf eine heterogene Wechsellagerung von Ton und Sandschichten (Abbildung 16). Die außergewöhnlich hohen Widerstände innerhalb des Profils S3 werden wahrscheinlich durch eine Reihe von Gaspipelines verursacht, die das Profil unauswertbar machen. Für die hochohmigen Bereich innerhalb des Profils S1 ist wahrscheinlich die darüber befindliche, quer

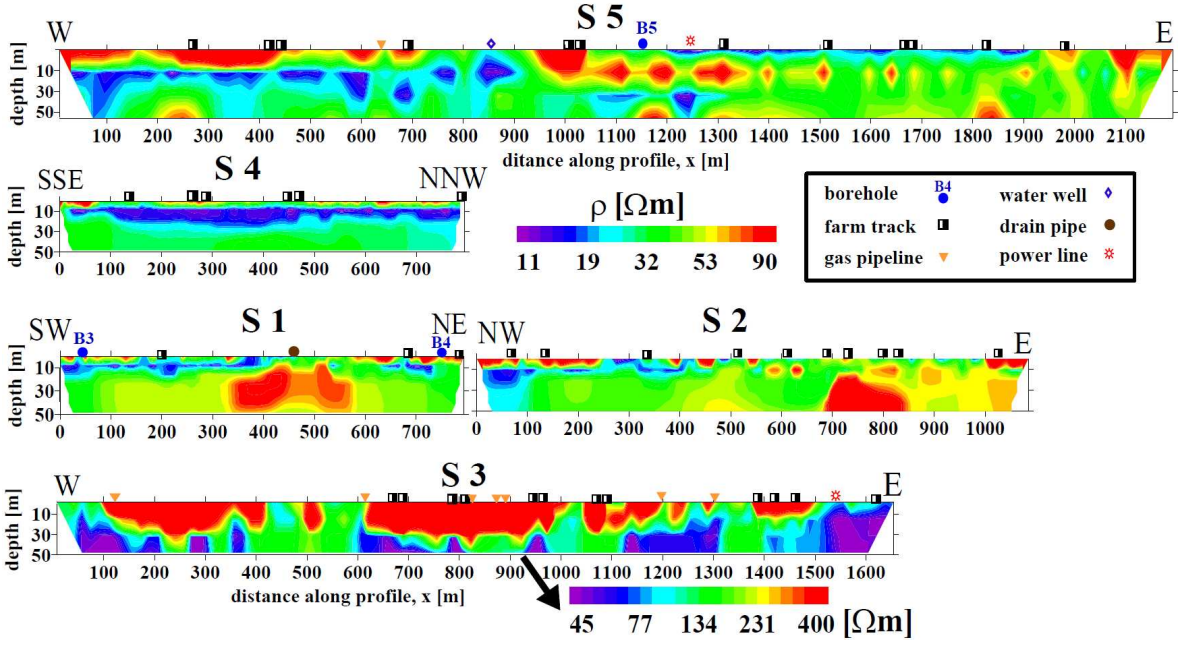



**Abbildung 16: Mittles Geoelektrik von der Geländeoberfläche aufgenommene Profile des elektrischen Widerstandes.**

verlaufende Drainage verantwortlich. Abgesehen von diesen Unregelmäßigkeiten lassen sich aus den Ergebnissen deutlich ausgebreitete geologische Strukturen, wie z.B. eine tonige Lage in Tiefen zwischen 5 und 30 m im westlichen und nördlichen Untersuchungsgebiet identifizieren. Eine solche hydraulisch schlecht durchlässige Schicht würde zu einer Rückhaltung und Ausbreitung von aufsteigendem $CO_2$ führen. Mit der Kenntnis über solche, für das

Ausbreitungsverhalten von $CO_2$ oder Formationswasser relevante geologische Schichten lassen sich Positionen und Tiefen von Monitoringmaßnahmen optimieren. Noch detaillierte Informationen lassen sich durch die allerdings auch aufwändigeren Oberfläche/Bohrlochmessungen ermitteln (Abbildung 17).

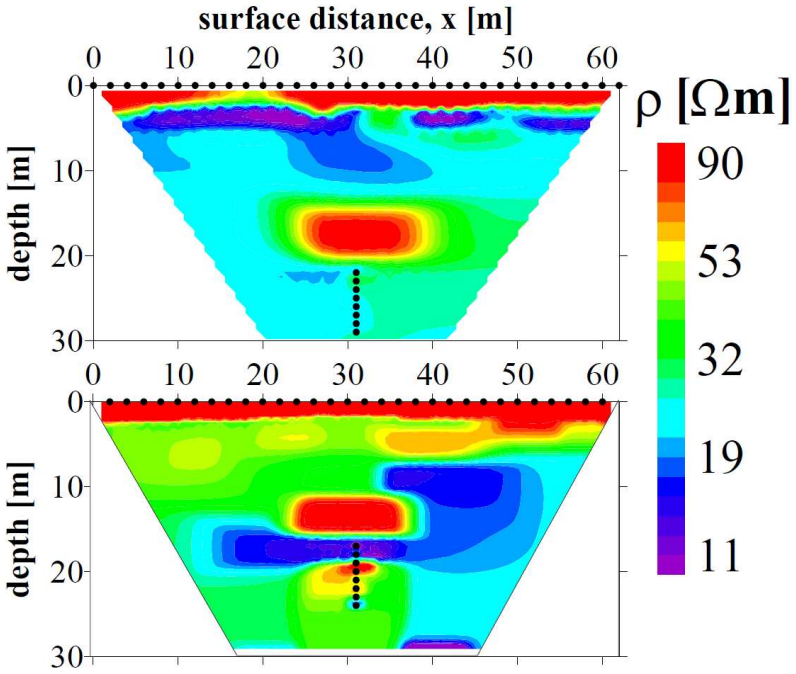



**Abbildung 17: Mittels Geoelektrik durch Oberfläche-Bohrloch-Messungen aufgenommene Profile des elektrischen Widerstandes.**

### *D.1.2.4.2 Aeroelektromagnetik (AEM)*

Um einen dreidimensionalen Überblick über die geologischen Schichtungen zu erhalten und den aktuellen Zustand der Grundwasserverhältnisse zu dokumentieren, wurde die Fa. SkyTEM Aps. (Beder/Dänemark) in Kooperation mit der Univeristät Aarhus mit einer AEM-Untersuchung des gesamten Untersuchungsgebiets beauftragt. Die Messung entlang von 154 Flugkilometern (Abbildung 19) erfolgte mit dem SkyTEM-System, einem absolut kalibrierten transienten elektromagnetischen Hochleistungssystem (Abbildung 14). Die Messdaten wurden mit dem Aarhus-Workbench Processing and Inversion Softwarepackage [13, 14] ausgewertet. Möglicherweise durch Infrastruktur wie Straßen oder Leitungen beeinträchtigte Daten werden aus der Gesamtdarstellung herausgenommen, sodass das Endergebnis frei von Artefakten ist und die Widerstandsvariationen ausschließlich Geologie und Hydrogeologie wiedergeben.

Aus den so erhaltenen Messungen lassen sich z.B. in Schrittweiten von 10 m Tiefe die Widerstandsverteilungen abbilden. Exemplarische Ergebnisse sind in Abbildung 19 für die Tiefen von 60-70 m und 160-170 m und in Abbildung 20 für zwei Querschnittstransekten darge-

stellt, die vollständigen Ergebnisse finden sich in Anhang E.11. Bei den in Abbildung 20 grün dargestellten Bereichen handelt es sich vermutlich um Geschiebemergel, unter dem aufsteigendes $CO_2$ sich akkumulieren würde und durch Wiederholungsmessungen detektiert werden könnte. Solche Bereiche sind im Rahmen des Grundwassermonitorings in besonderem Maße zu überwachen.

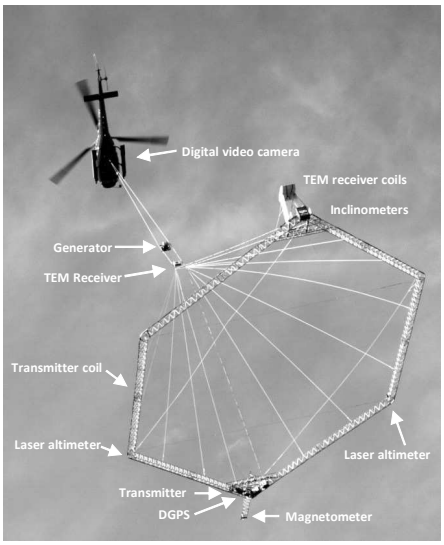



**Abbildung 18: SkyTEM System.**

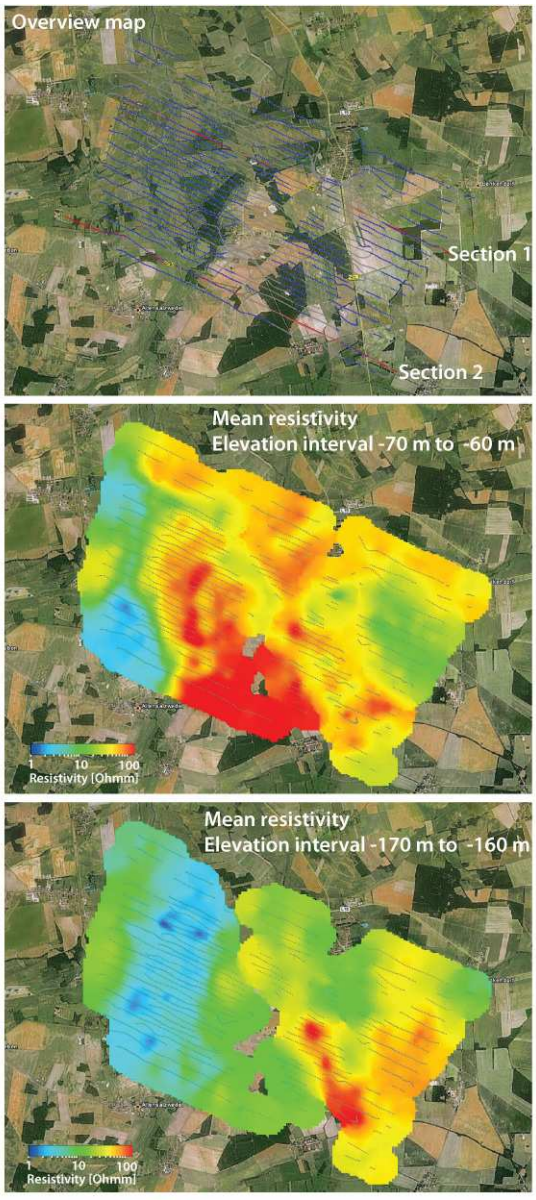



**Abbildung 19: Fluglinien und Lage der Querschnittsprofile von Abbildung 20 (oben). Durchschnittliche Widerstände in Tiefen 60-70 m (mitte) und 160-170 m (unten).**

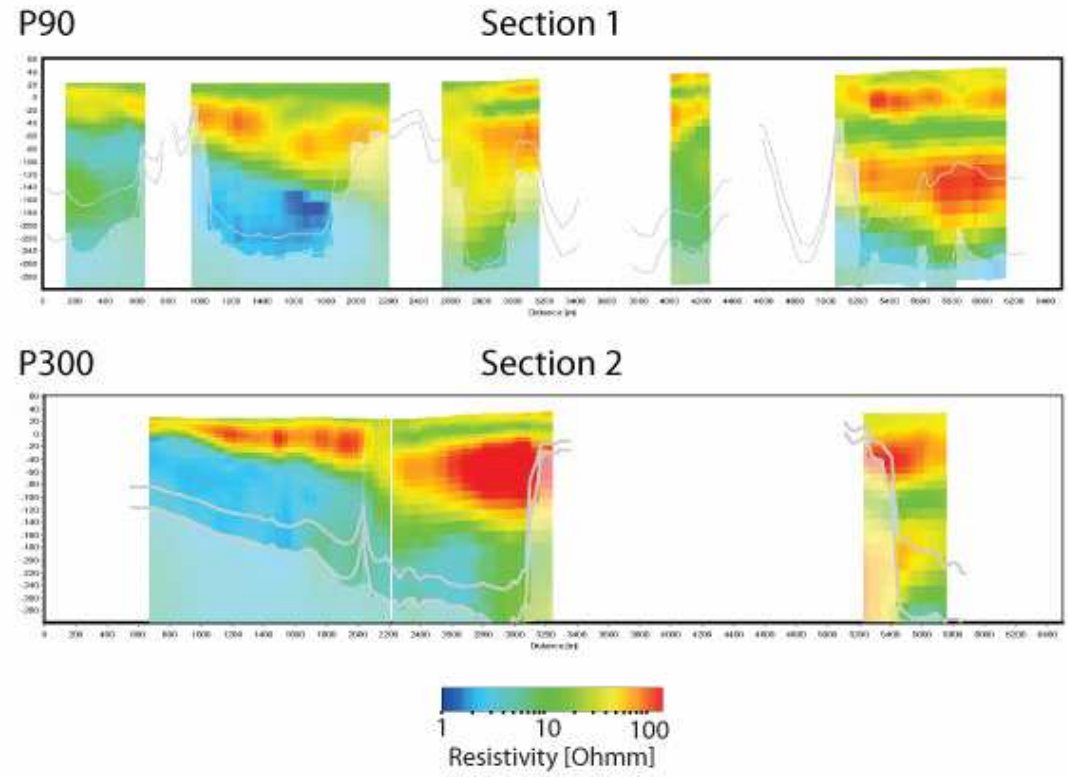



**Abbildung 20: Querschnitte der gemessenen Widerstände für die Bereiche Section 1 und Section 2, deren Lage in Abbildung 19 dargestellt sind. In den leer gelassenen Bereichen wurden die Daten ausgeschnitten, da es hier zu Störungen der Messungen durch Straßen oder Leitungen kam. Der Bereich zwischen den beiden weißen Linien weist eine geringere Verlässlichkeit auf wie Bereiche darüber. Messwerte unter der unteren weißen Linie sind nicht mehr vertrauenswürdig.**

## D.1.2.5 Modellierung (CAU)

### *D.1.2.5.1 Einleitung*

Dringt gasförmiges $CO_2$ in einen Grundwasserleiter ein, wird es im Wasser gelöst, bis das geochemische Gleichgewicht zwischen der Gasphase und dem Wasser hergestellt ist. Die Dissoziation der Kohlensäure führt in der Regel zur Abnahme des pH-Werts, und in Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung kommt es zu Reaktionen zwischen den Aquifersedimenten und dem mit $CO_2$ gesättigten Wasser. Dabei könnten durch Minerallösung z.B. Schwermetalle mobilisiert und somit die Trinkwasserqualität verschlechtert werden. Für das Monitoringkonzept eines CCS-/EGR-Standorts ist es wichtig zu wissen, welche geochemischen Änderungen durch eine $CO_2$-Leckage an einem Standort zu erwarten sind und ob diese Änderungen vor dem Hintergrund der natürlichen Schwankungen als signifikant zu betrachten sind. Weiterhin ist es erforderlich, die Größe eines von einer $CO_2$-Leckage beeinflussten Bereichs abzuschätzen, die neben der Leckagerate auch von der geologischen Struktur und der Hydrogeologie des Aquifers abhängen. Folgende Fragestellungen wurden mithilfe von numerischen Szenariomodellierungen bearbeitet:

1. Wie ist das Ausbreitungsverhalten von gasförmigem und im Wasser gelöstem $CO_2$ in einem oberflächennahen Aquifer?
2. Welche geochemischen Prozesse werden als relevant erachtet?
3. Welche Parameter sind für eine Detektion einer $CO_2$-Leckage in einen oberflächennahen Aquifer geeignet?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde zunächst anhand der geologischen Daten des CLEAN-Standortes ein Strömungsmodell erstellt, auf dessen Grundlage ein konservatives Transportmodell aufgebaut wurde, um zu ermitteln, wie sich im Fall einer Leckage das gelöste $CO_2$ am CLEAN-Standort mit der Grundwasserströmung ausbreitet. Die Ergebnisse des Strömungsmodells werden außerdem herangezogen, um das Ausbreitungsverhalten von $CO_2$-Gasphasenkörpern unter dem Einfluss geologischer Parameter zu untersuchen. Geochemische Gleichgewichtssimulationen sollen klären, welche Änderungen der Wasserzusammensetzung durch eine $CO_2$-Leckage in einem oberflächennahen Grundwasserleiter am Standort auftreten können. Weiterhin wurde mit einem reaktiven Transportmodell das Ausbreitungsverhalten der geochemischen Veränderung des Aquifers durch den reaktiven Transport des gelösten $CO_2$ und dessen Bedeutung für ein Monitoring einer $CO_2$-Leckage durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers untersucht.

Eine detaillierte Beschreibung der erstellten numerischen Modelle und der Ergebnisse finden sich in Anhang E.12.

### *D.1.2.5.2 Grundwasserströmungsmodell*

Um die vorherrschenden Grundwasserströmung und das daraus resultierende Transportverhalten des Aquifers zu untersuchen, wurde auf der Grundlage des erstellten Geostrukturmodells (Kapitel D.1.2.1) ein Grundwasserströmungsmodell mit dem Modellprogramm MODFLOW erstellt. Aufgrund der am Standort ermittelten hydraulischen Durchlässigkeiten wurde das Modellgebiet in die vier hydrogeologischen Schichten L1, L2, L3 und L4 untergliedert (Abbildung 21). Für L1 und L3 werden Geschiebemergel ($K_f$=1*10$^{-7}$ m/s) und für L2 und L4 werden Sande ($K_f$=1*10$^{-4}$ m/s) als Sedimente angenommen, deren effektive Porosität ($n_e$) 20 % beträgt. Randbedingungen und Modellannahmen sind im Anhang E.12 dargestellt.

Die Kalibrierung des Strömungsmodells ergab das in Abbildung 21 (rechts) dargestellte Strömungsfeld. Die ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten im Modellgebiet betragen minimal 0.01 m/d und maximal 0.63 m/d. Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit beträgt ca. 0.3 m/d. Die im Strömungsmodell ermittelten Parameter werden in den Transportmodellen und in den Szenarien zur Gasausbreitung verwendet.

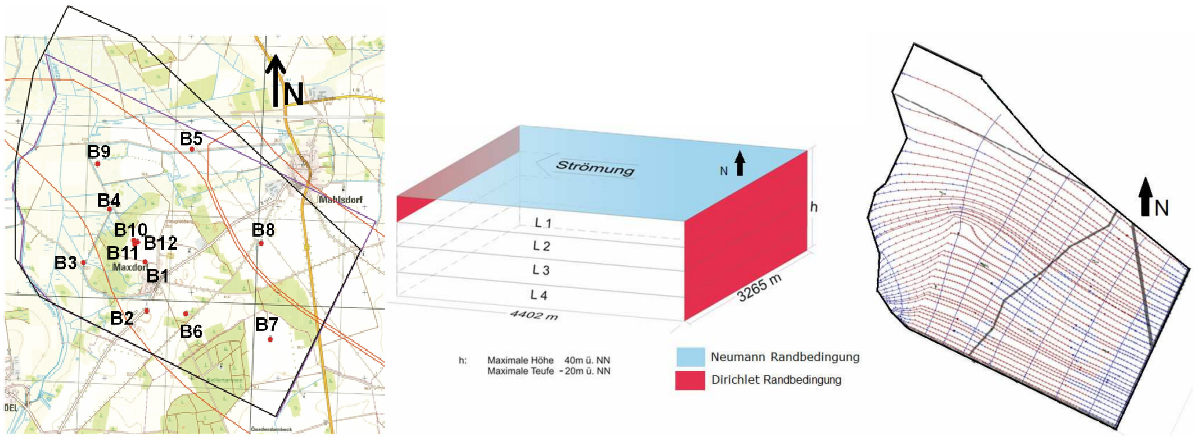



**Abbildung 21: Rand des Untersuchungsgebietes (lila) und der Rand des Strömungsmodellgebietes (schwarz) (links). Vereinfachte Skizze des konzeptionellen Strömungsmodells mit Längenangaben, Randbedingungen und Strömungsrichtung (Mitte). Kalibriertes Strömungsfeld mit Isohypsen und Bahnlinien des CLEAN-Untersuchungsgebietes (rechts).**

### *D.1.2.5.3 Ausbreitung von gasförmigem $CO_2$*

Die Ausbreitung einer $CO_2$-Leckage in einem Aquifer setzt sich aus der Migration der $CO_2$-Gasphase und des im Wasser gelösten $CO_2$ zusammen. Zunächst wird die Ausbreitung von gasförmigem $CO_2$ in einem oberflächennahen Aquifer mit dem Modellprogramm TOUGHREACT EOS 2 simuliert. Der betrachtete Aquifer ist in allen Simulationen gespannt und das Sediment ist ein Sand mit einer Permeabilität von K=4,2*10$^{-11}$ m² ($K_f$-Wert = 1*10$^{-4}$ m/s) in horizontaler und K=4,2*10$^{-12}$ m² ($K_f$-Wert = 1*10$^{-5}$ m/s) in vertikaler Richtung. Zur Berechnung der relativen Permeabilitäten und der Kapillardruck-Sättigungsbeziehungen wurden die van Genuchten Gleichungen gewählt. Die Leckage wird als punktförmig angenommen und

die Leckageraten variieren zwischen 1,16*10$^{-2}$ kg/s und 1,16*10$^{-7}$ kg/s und sind in Annäherung an Naturanaloga gewählt.

### Einfluss der Leckagerate auf die Größe eines $CO_2$ Gasphasenkörpers

Die Größe des sich bildenden $CO_2$-Gasphasenkörpers unter einem Grundwasserstauer hängt von der Masse des $CO_2$ ab, das in den Aquifer gelangt. Um zu quantifizieren, wie sich die Größe des Gasphasenkörpers mit der Leckagerate ändert, wurde eine radialsymmetrische Modellgeometrie verwendet. Der Aquifer hat eine horizontal planare Aquifergeometrie und eine punktförmige Leckagequelle im Mittelpunkt des Modellgebiets an der Unterkante des Aquifers.

Erst bei Leckageraten größer 1,16*10$^{-5}$ kg/s bildet sich im Betrachtungszeitraum von einem Jahr ein $CO_2$-Gasphasenkörper im Aquifer. Das gasförmige $CO_2$ steigt bis unter den Grundwasserstauer auf und breitet sich dort radialsymmetrisch horizontal aus. Mit zunehmender Leckagerate wachsen die Radien der sich bildenden Gasphasenkörper (Abbildung 22). Bei der größten verwendeten Leckagerate von 1,16*10$^{-2}$ kg/s beträgt der Radius nach einem Jahr Leckagezeit 500 m. Die Mächtigkeit der sich unter einem Grundwasserstauer bildenden Gasphasenkörper sind dabei geringmächtiger als ein Meter.

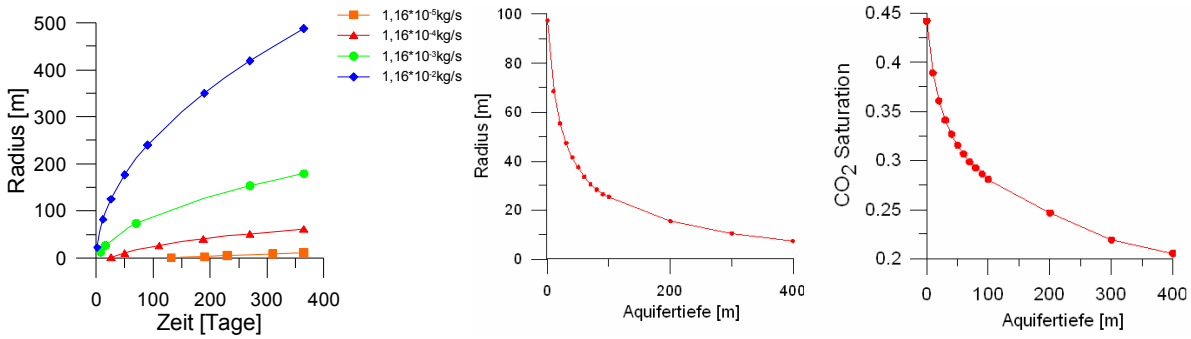



**Abbildung 22: Radien der sich ausbreitenden $CO_2$-Gasphasenkörper unterhalb einer undurchlässigen Deckschicht bei Leckageraten von 1,16*10$^{-5}$ kg/s bis 1,16*10$^{-2}$ kg/s über die Leckagezeit von einem Jahr (links). Verkleinerung der Radien des $CO_2$-Gasphasenkörpers (Mitte) und die Verringerung der maximalen $CO_2$ Gassättigung im Aquifer in einem gespannten Aquifer in Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck nach einem Jahr Simulationszeit (rechts). Die Ergebnisse der Simulationen mit variierter Leckagerate und variiertem hydrostatischen Druck sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da die Modellgitter nicht gleich diskretisiert wurden.**

### Einfluss der Aquifertiefe und des hydrostatischen Drucks auf die Größe eines $CO_2$ Gasphasenkörpers

Da Trinkwasser in Abhängigkeit vom geologischen Untergrund auch aus Tiefen bis über 400 m entnommen werden kann, wurde mit radialsymmetrischen Modell auch der Einfluss der Aquifertiefe auf die Ausbreitung eines $CO_2$-Gasphasenkörpers unterhalb eines Grundwasserstauers quantifiziert. Es wurde eine konstante Leckagerate von 1,16*10$^{-4}$ kg/s ver-

wendet und die Aquifertiefe von 0 m bis 400 m variiert. Mit zunehmender Aquifertiefe und damit zunehmendem hydrostatischen Druck nimmt der Radius des $CO_2$-Gasphasenkörpers bei konstanter Leckagerate ab (Abbildung 22). Im Bereich der Geländeoberkante beträgt der Radius 97 m und bei 400 m Tiefe 10 m. Die maximal erreichten Gassättigungen im Porenraum des Aquifers sinken von 45 % bei 0 m Tiefe auf 20 % bei 400 m Tiefe (Abbildung 22). Der $CO_2$ Gasphasenkörper wird mit zunehmendem hydrostatischen Druck kleiner, weil zum einen die Löslichkeit des $CO_2$ im Wasser größer wird (Duan, 2006) und zum anderen wird das Gasvolumen zunehmend komprimiert. Die gleichen Prozesse beeinflussen die maximale Gassättigung.

Für die Detektion einer $CO_2$ Leckage bedeutet dies, dass mit zunehmender Aquifertiefe die Detektierbarkeit der Gasphase aufgrund des kleiner werdenden Phasenkörpers einerseits abnimmt, andererseits aber die Abstromfahne eine Gasphasenkörpers aufgrund der zunehmenden Löslichkeit größer wird. Für die Detektierbarkeit ist hierbei zu berücksichtigen, dass der technische Aufwand für ein Monitoring mit zunehmender Tiefe größer wird, da zum einen die Auflösung geophysikalischer Methoden ungenauer wird und zum anderen auch eine Beprobung mithilfe von Grundwassermessstellen sehr kostenintensiv und aufwändig wird.

### Einfluss der Grundwasserströmung auf die Ausdehnung eines $CO_2$-Gasphasenkörpers

Zur Untersuchung des Einflusses der Grundwasserströmung auf die Ausbreitung des gasförmigen $CO_2$ wurden dreidimensionale Modell-Szenarien aufgebaut. Da die Ergebnisse des Grundwasserströmungsmodells (Kapitel D.1.2.5.2) zeigten, dass im Untersuchungsgebiet Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 0.6 m/d zu erwarten sind, wurden von Strömungsgeschwindigkeiten 0.0 m/s, 0.2 m/d, 0.4 m/d, 0.5 m/d betrachtet. Als Aquiferparameter wurden die Werte der radialsymmetrischen Simulationen verwendet.

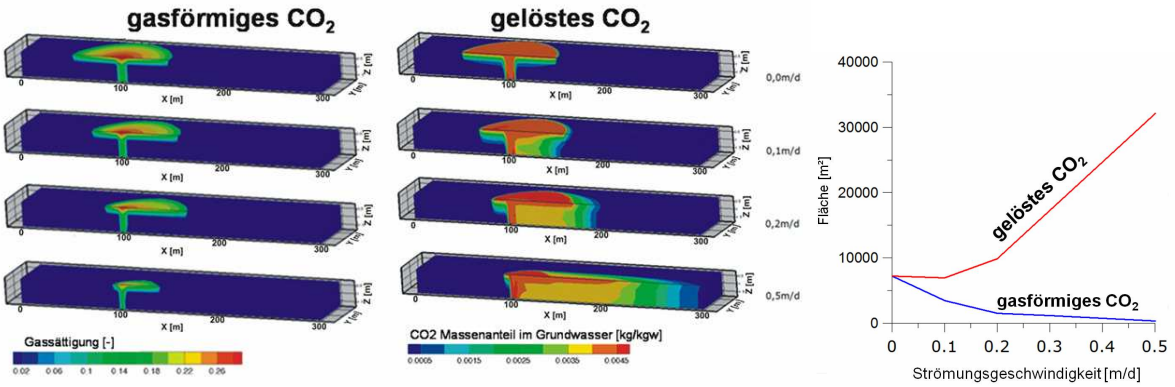



**Abbildung 23: Räumliche Ausbreitung der $CO_2$-Gasphasenkörper und der Fahne des gelösten $CO_2$ in Abhängigkeit von der Grundwasserströmung (links) und Vergleich der maximalen Querschnittsflächen nach einem Jahr Simulationszeit (rechts).**

Bei vorhandener Grundwasserströmung wird der Gasphasenkörper deformiert und in Richtung der Grundwasserströmungsrichtung gestreckt. Mit zunehmender Grundwasserströmung nehmen auch Deformation und Streckung zu (Abbildung 23). Weiterhin wird mit zunehmender Grundwasserströmung der Gasphasenkörper kleiner, da bei höherer Strömungsgeschwindigkeit mehr gelöstes $CO_2$ stromabwärts transportiert wird und mehr $CO_2$ gelöst werden kann. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von z.B. 0.5 m/d ist der Gasphasenkörper nach einem Jahr ca. 200 m² groß und die Fahne des gelösten $CO_2$ hat eine Fläche von ca. 30000 m². Die Ausdehnung der Fahne des gelösten $CO_2$ mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit ist für die betrachteten Verhältnisse größer als die Größenabnahme des gasförmigen $CO_2$, sodass sich insgesamt der $CO_2$-beeinflusste Bereich vergrößert.

**Abbhängigkeit der $CO_2$-Gasphasenausbreitung vom Relief der Aquiferoberkante**

In den bisherigen Simulationen wurde die Oberkante des Aquifers als planar angenommen. Um den Einfluss des Aquiferreliefs auf die Migration des gasförmigen $CO_2$ zu untersuchen, wurde das Relief des Aquifers L4 (Abbildung 24, oben links) in die Modellgeometrie eingebaut. Die Leckagerate beträgt in allen Szenarien $1{,}16*10^{-2}$ kg/s. Die Aquiferparameter entsprechen wieder denen des radialsymmetrischen Modells.

Nach einer Leckagezeit von 3 Jahren haben die $CO_2$-Gasphasenkörper eine Fläche von 176 m² (Leckage A), 207 m² Leckage B, 250 m²(Leckage C) und 400 m² (Leckage D) unterhalb der Aquiferoberkante gebildet und nach 10 Jahren nehmen die Gasphasenkörper Flächen von 200 m² (Leckage A), 210 m² (Leckage B), 723 m² (Leckage C) und 2724 m² (Leckage D) ein. Über das Relief wird das migrierende $CO_2$ in bevorzugte Fließwege gelenkt und sammelt sich teilweise in Fallenstrukturen (Leckage D). Abhängig von der Geometrie der Fallenstruktur wird sich auch die Geometrie des Phasenkörpers ausbilden. Weiterhin zeigt sich der Einfluss des hydrostatischen Drucks auf die Größe des $CO_2$-Gasphasenkörpers, da sich bei gleicher Leckagerate in den höher liegenden Bereichen des Aquifers größere Phasenkörper ausbilden.

Kennt man also an einem Standort das Relief eines Aquifers, so können zum einen gezielt Grundwassermessstellen in Bereichen, in denen eine $CO_2$-Gasansammlung erwartet wird, installiert werden und zum anderen kann die Information über das Relief für eine Abschätzung der Migrationswege und damit für eine Risikoabschätzung verwendet werden. Hat die Aquiferoberkante keinen oder nur einen geringen Gradienten, wird sich unter Umständen ein nur sehr geringmächtiger $CO_2$-Gasphasenkörper bilden, der mit geophysikalischen Methoden nur schwer detektierbar ist. Bei der Nutzung von Beobachtungspegeln zum Monitoring des Phasenkörpers sollte daher die Filterstrecke direkt unterhalb eines Grundwasserstauers vorgesehen werden.

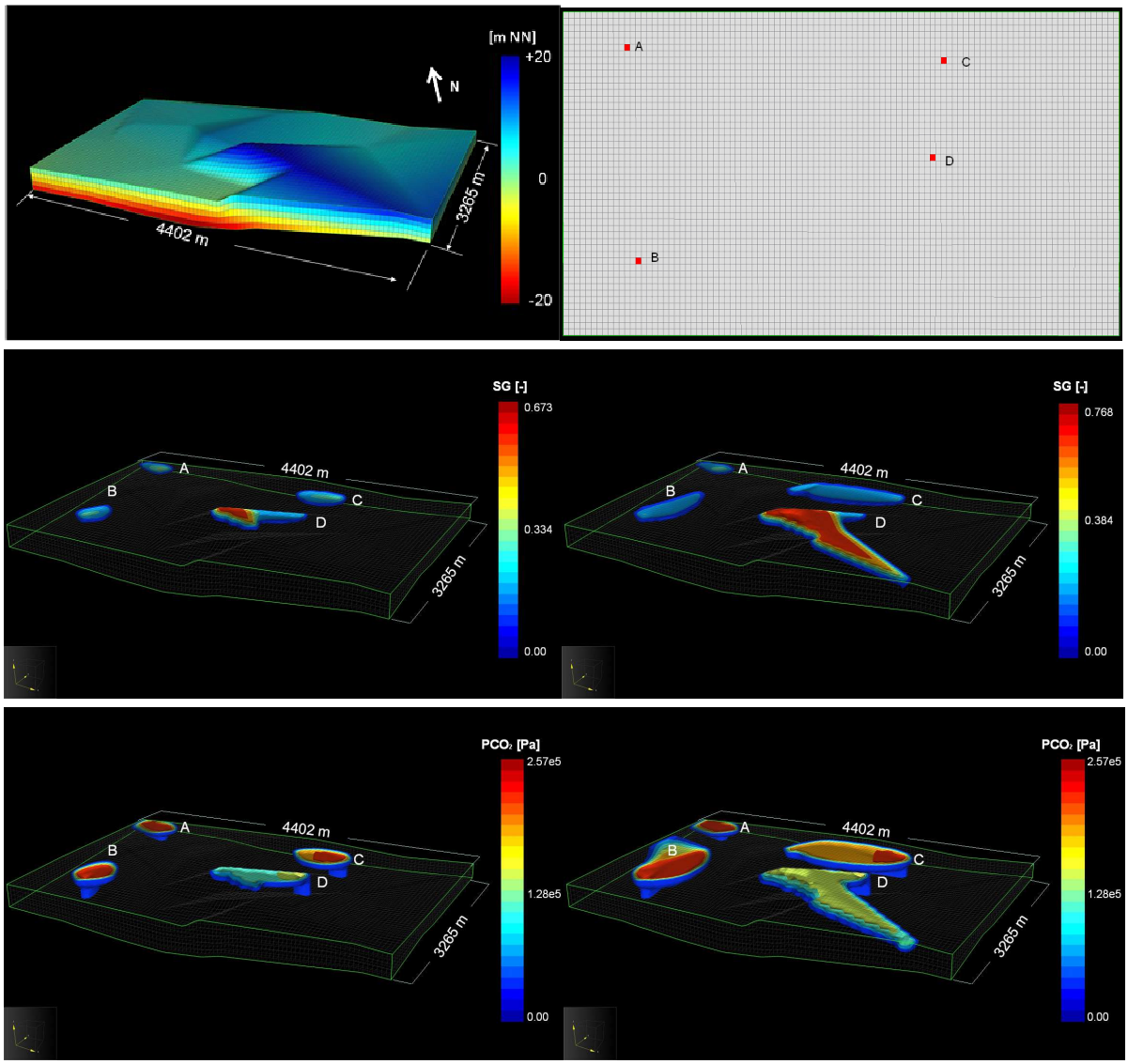



**Abbildung 24: 3D-Modell zur Untersuchung des Einflusses der Aquifertopographie auf die Ausbreitung des $CO_2$-Gasphasenkörpers (oben links). Modellgebiet mit den Positionen der gewählten Leckagepunkte (A,B,C,D) (oben rechts). Verteilung des gasförmigen $CO_2$ nach einer Leckagezeit von 3 Jahren (mitte links) und 10 Jahren (mitte rechts). Partialdrücke des gelösten $CO_2$ nach 3 Jahren (unten links) und nach 10 Jahren (unten rechts) Leckagezeit. Die Blickrichtung ist nach Norden gerichtet. 15-fach überhöht.**

### *D.1.2.5.4 Konservatives Transportmodell*

Um eine Stoffausbreitung in wässriger Lösung am CLEAN-Standort zu untersuchen, wurde das Strömungsmodell verwendet um auf dessen Grundlage einen konservativen Transport mit MT3D zu simulieren. Das Grundwasserströmungsfeld entspricht den in Kapitel D.1.2.5.2 dargestellten Ergebnissen. Als Dispersionslängen wurde longitudinal 10 m und transversal 1m gewählt. Die Positionen der Leckagequellen sind frei gewählt, ihre Größen sind angelehnt an die Ergebnisse der Mehrphasensimulationen (Kapitel D.1.2.5.3). Die Leckagequellen mit kleiner Fläche entsprechen ca. Leckageraten von $1{,}16*10^{-4}$ kg/s und die große Leckagequelle entspricht einer Rate von ca. $1{,}16*10^{-2}$ kg/s. Die Migration der Gasphase kann

in MT3D nicht berücksichtigt werden. Die auf die Anfangskonzentration normierte Konzentration des gelösten $CO_2$ beträgt in den Quellenbereichen 1 (Abbildung 25), die Konzentration in diesen Bereichen ist über die Zeit konstant.

Die Verteilungen des gelösten $CO_2$ nach einem Jahr und nach 10 Jahren Leckagezeit sind in Abbildung 25 dargestellt. Der Stofftransport zeigt die lokalen Unterschiede im Strömungsfeld (Richtung und Geschwindigkeit). Nach einem Jahr bilden sich Fahnen mit einer maximalen Länge von ca. 100 m in Strömungsrichtung. Nach 10 Jahren Simulationszeit ist zu sehen, dass die Fahne der anfänglich größten Leckage in ihrer Größe nur um 100 m angewachsen ist. Die Fahnen der drei kleineren Leckagen hingegen haben nach 10 Jahren eine Länge von ca. 1 km. Bildet sich also ein relativ großer $CO_2$-Phasenkörper in einem Bereich niedriger Strömungsgeschwindigkeit, so wird der Transport des gelösten $CO_2$ nicht zu einer wesentlichen Vergrößerung des beeinflussten Bereichs führen. Im Vergleich dazu kann es bei ausreichend großer Strömungsgeschwindigkeit auch bei geringen Leckageraten zu großen beeinflussten Bereichen kommen. Diese Ergebnisse verdeutlichen nochmals, dass die Transportgeschwindigkeit am CLEAN-Standort einen ähnlich großen Einfluss auf die von $CO_2$ beeinflusste Fläche haben kann wie die Leckagerate.

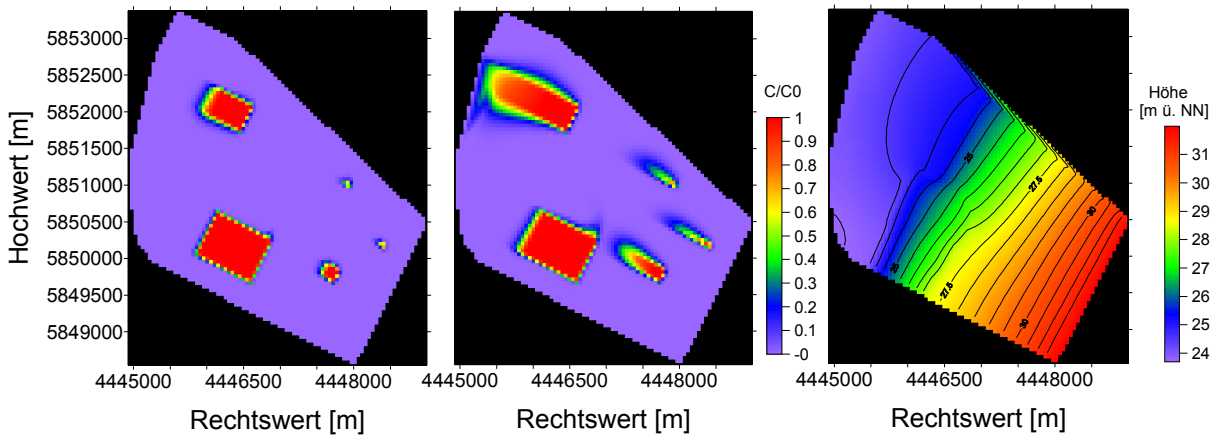



**Abbildung 25: Verteilung des konservativen Tracers nach einem Jahr (links) und nach 10 Jahren Simulationszeit (Mitte). Kalibrierte Wasserstände des Strömungsmodells (rechts).**

## *D.1.2.5.5 Geochemische Simulationen*

### Geochemische Gleichgewichtssimulationen

Zur Untersuchung der geochemischen Veränderung des CLEAN-Standortwassers durch eine $CO_2$-Leckage in einen oberflächennahen Aquifer wurden zunächst Gleichgewichtssimulationen durchgeführt. Ziel war u.a. die Ermittlung von sensitiven geochemischen Parametern für das Monitoring. Dazu wurde das Standortwasser im ersten Schritt mit $CO_2$ ins Gleichgewicht gebracht, sodass das Wasser mit gelöstem $CO_2$ gesättigt ist. Um den Einfluss der unterschiedlichen Mineralphasen der Sedimentmatrix zu untersuchen, wurde das

mit $CO_2$ equilibrierte Standortwasser nachfolgend einzeln mit den Mineralphasen Albite, Anorthit, Kalifeldspat und Kalzit ins Gleichgewicht gebracht.

Eine signifikante Änderung durch eine $CO_2$-Leckage in einem oberflächennahen Aquifer zeigen der pH-Wert, die TIC-Konzentration und die elektrische Leitfähigkeit (Abbildung 26). Die $Ca^{2+}$-Konzentrationen zeigen nur bei der Anwesenheit von Kalzit und Anortit eine signifikante Änderung. Da aber die Lösung von Feldspäten ein langsamer Prozess ist, führt die Änderung der Wasserchemie durch die Lösung von Feldspäten erst nach langer Zeit zu einem signifikanten Signal. Für kalzitfreie Aquifere eignen sich als Monitoringparameter der pH-Wert und die TIC-Konzentration und für kalzithaltige Aquifere zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit und die $Ca^{2+}$-Konzentration.

Die durch eine Leckage auftretenden Messwertänderungen sind wesentlich größer als die räumlichen und zeitlichen Variationen, die im Rahmen des Grundwassermonitorings für den CLEAN-Standort festgestellt wurden. Anhand der Grundwasseranalysen lässt sich hier also mit hoher Sicherheit beurteilen, ob das beprobte Wasser in Kontakt mit einem $CO_2$-Gaskörper gestanden hat.

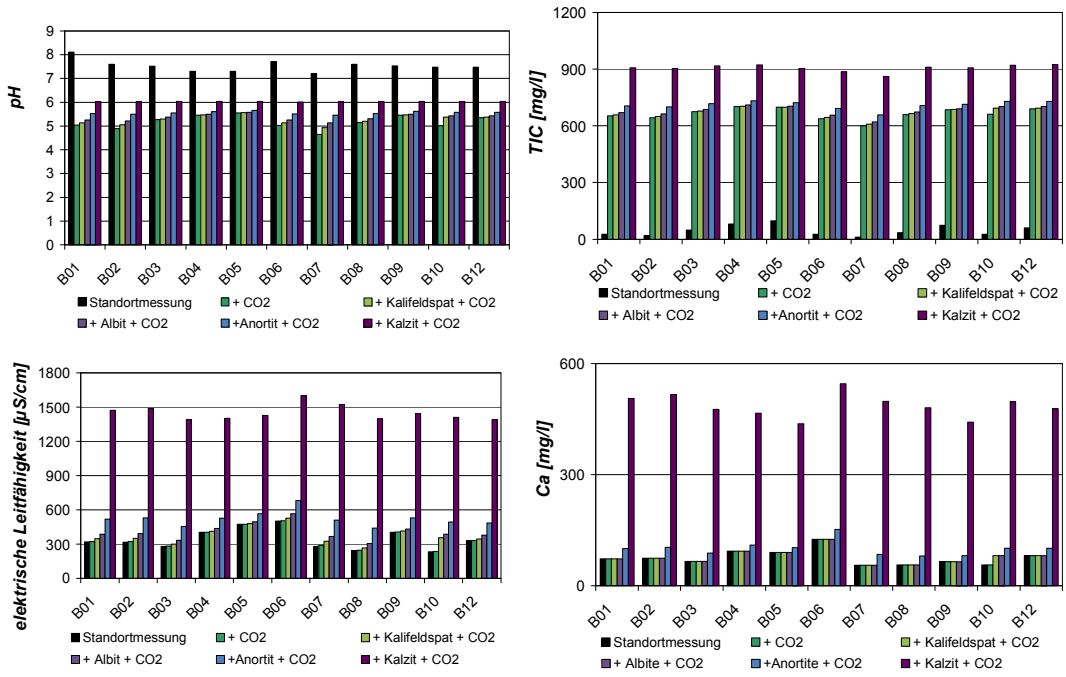



**Abbildung 26: pH–Werte, TIC–Konzentration, elektrische Leitfähigkeit und Kalzium–Konzentration der am Standort gemessenen Wasserproben und der simulierten Wässer. Das Grundwasser wurde jeweils mit $CO_2$ (+$CO_2$) oder mit einer Mineralphase und $CO_2$ (+Mineralphase+$CO_2$) ins Gleichgewicht gebracht.**

**Reaktive Transportmodellierung**

Anhand von 2D reaktiven Transportsimulationen mit dem Modellprogramm OpenGeoSys sollte gezeigt werden, welchen Einfluss der reaktive Stofftransport auf die Veränderung der geochemischen Zusammensetzung des Standortwassers hat. Der Einfluss von Kalzit auf die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit wurde im vorigen Abschnitt bereits dargestellt. In diesem Kapitel soll der Fokus exemplarisch auf die Ausbreitung der elektrischen Leitfähigkeit durch den Stofftransport gelegt werden. Dazu wurde eine $CO_2$-Leckage in einen Aquifer mit 3 unterschiedlichen Kalkgehalten simuliert. Alle weiteren Minerale wurden nicht berücksichtigt, da sie nur einen untergeordneten Einfluss auf die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit haben. Neben der Lösung von Kalzit ist als weiterer Prozess der Kationenaustausch im Modell implementiert.

Ist im Sediment Kalzit enthalten, tritt im gesamten Bereich der $CO_2$-Fahne eine deutliche Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers auf. Ist nur wenig Kalzit enthalten, ist nach 320 Tagen Simulationszeit das Kalzit im Bereich der Quelle aus dem Sediment gelöst und die elektrische Leitfähigkeit zeigt ein deutlich schwächeres Signal (Abbildung 27). Mit fortschreitender Zeit wird der Bereich der erhöhten elektrischen Leitfähigkeit kleiner und der Kontakt zu $CO_2$-Leckage bricht ab. Bei geringen Kalzitkonzentrationen sind unter Umständen im Bereich der Leckage als Monitoringparameter also nur noch die TIC-Konzentration und der pH-Wert verwendbar.

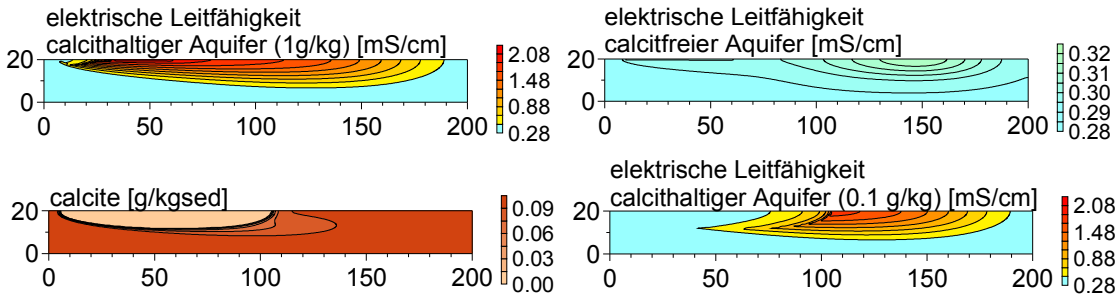



**Abbildung 27: Simulierte elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers nach 320 Tagen bei Kalkgehalten des Sediments von 1 g/kg, 0 g/kg und 0.1 g/kg. Simulierter Kalzitgehalt im Sediment (links unten) nach 320 Tagen bei einem initialen Kalkgehalt von 0.1 g/kg. Das Grundwasser strömt von links nach rechts.**

### *D.1.2.5.6 Ausblick*

Um in Zukunft genauere Aussagen über die Verteilung von gelöstem und gasförmigen $CO_2$ an einem bestimmten Standort machen zu können, sollten idealerweise in Szenarien der Mehrphasentransport, die Grundwasserströmung, die geochemischen Reaktionen und die Geostruktur miteinander kombiniert werden. An diesem Punkt besteht allerdings noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Modellprogramme und ihrer Anwendbarkeit. Ein geeignetes Modell wäre für den Standort CLEAN sehr komplex und bedarf einer hohen Rechenleistung, die ohne leistungsfähige Computer wie z.B. Großrechenanlagen nicht zu bewältigen

wäre. Außerdem sollte die Datengrundlage für ein solches Szenario mithilfe weiterführender Untersuchungen im Gelände zusätzlich verbessert werden. So könnte die geologische Struktur des Standortes durch eine eingehende Evaluierung der Daten aus elektromagnetischen Untersuchungen detaillierter ermittelt werden. Ein entsprechend komplexes Modell könnte während einer Monitoringphase durch hinzugewonnene Daten kontinuierlich verbessert werden, um dann über Leckageszenarien eine Risikoabschätzung durchführen zu können. Weiterhin können komplexe Modelle, in denen geochemische Prozesse und die Mehrphasenströmung gekoppelt sind, dazu dienen, Messmethoden und Interventionsmaßnahmen zu testen.

## D.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis wird für beide Teilprojekte separat erbracht.

## D.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Ergebnisse und entwickelten Erkenntnisse des Vorhabens bilden eine notwendige Voraussetzung für die Durchführung einer EGR-Maßnahme am CLEAN-Standort und das damit einhergehende Monitoring und die Sicherheitsbetrachtung. Da auch für ähnliche Vorhaben vergleichbare Untersuchungen durchzuführen und ebenfalls Kenntnisse wie die hier ermittelten erforderlich sind, bestand auch ein übergeordnetes Interesse an den durchgeführten Arbeiten. Vor diesem Hintergrund erscheinen auch die eingehende Tiefe und der Umfang als angemessen. Trotz des großen Aufwandes bestehen jedoch noch weitere Fragen, die sich auch teilweise erst während der Projektbearbeitung verdeutlicht haben und eine eingehendere Untersuchung erfordern. Insbesondere wären hier Kenntnisdefizite zur Sensitivität nicht etablierter Messverfahren zu nennen.

## D.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Teilprojekts Mo1 wurde ein Monitoringkonzept entwickelt, das neben standortspezifischen Empfehlungen umfassende Informationen und Hinweise für eine Monitoringkonzeptentwicklung zur Verfügung stellt, die zum einen für den Fall einer $CO_2$-Injektion am CLEAN-Standort und zum anderen auch für andere Standorte genutzt werden kann. Hierin enthalten sind z.B. eine Übersicht über zu berücksichtigende nationale und internationale Vorgaben und Empfehlungen, Entscheidungshilfen und Checklisten zu Monitoringzielen und für deren Erreichung geeignete Monitoringmethoden sowie eine Darstellung der für die Monitoringkonzepterstellung erforderlichen Leistungen und Informationen, die bereits im Vorfeld vorliegen müssen. Das Konzept wurde in einem ausführlichen Bericht (s. Anhang) dokumentiert und ist somit auch für andere verfügbar.

Unter Einbeziehung etablierter sowie neuester Erkundungs- und Monitoringmethoden (z.B. SkyTEM, Geoelektrik, $CO_2$-Sonden, SonicDrilling) erfolgte für den oberflächennahen Aquiferbereich eine Charakterisierung des aktuellen Zustandes. Die hieraus gewonnenen Informationen dokumentieren die natürlichen Schwankungsbereiche und können als Referenzzustand für eine spätere Überwachung dienen. Auf Grundlage recherchierter Daten sowie der neu erhobenen Informationen wurde ein geologisches Strukturmodell aufgebaut, das die Basis für Modellsimulationen darstellt und eine Optimierung von Monitoringmaßnahmen ermöglicht. Die gesammelten Erfahrungen mit den neuen Methoden haben einen großen Nutzen für die Weiterentwicklung und Markteinführung dieser Verfahren sowie bei der Durchführung nachfolgender Projekte.

Anhand geochemischer numerischer Modellsimulationen wurden Messgrößen identifiziert, anhand derer relativ sicher beurteilt werden kann, ob das untersuchte Grundwasser in Kontakt mit einem $CO_2$-Gasphasenkörper gestanden hat oder nicht. Die Ausdehnung solcher Gasphasenkörper in den unterschiedlichen Richtungen sowie relevante Einflussgrößen auf die Ausdehnung wurden mit Hilfe von Mehrphasenmodellierungen quantifiziert. Aufbauend auf den Feldmessungen konnten unter Verwendung des erstellten Strömungsmodells und den am Standort vorliegenden geochemischen Randbedingungen mit einem reaktiven Transportmodell die Ausbildung und Auswirkungen von Abstromfahnen an $CO_2$-Gasphasenkörpern dargestellt werden.

Die durchgeführten Standortuntersuchungen wie auch die Modellsimulationen stellen eine zentrale Grundlage für die (ursprünglich) geplante $CO_2$-Injektion und das einhergehende Monitoring dar. Darüber hinausgehend sind diese Ergebnisse auch von großem Nutzen für andere zukünftige Vorhaben, bei denen ebenfalls ein Eindringen von Gasphasen oder salinem Wasser in oberflächennahe Aquifere zu überwachen ist.

Einige der im Rahmen von Mo1 und Mo3 entwickelten Kenntnisse fanden auch an anderer Stelle, wie z.B. innerhalb des UBA-Berichts oder im F&E-Projekt $CO_2$-MOPA bereits Berücksichtigung.

## D.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen

Während der gesamten Projektbearbeitung wurden durch alle Projektbeteiligten Publikationen und Ergebnisse der internationalen Forschung und Entwicklung fortlaufend recherchiert und verwertbare Erkenntnisse in die Projektarbeit einbezogen. Hierzu gehören auch die Ergebnisse aus den anderen CLEAN-Teilprojekten. Die Entwicklung Vorhabens-bezogener Kenntnisse bei anderen ist v.a. in den Kapiteln bzw. Einzelberichten im Anhang z.B. zu den Arbeitspaketen Monitoringkonzept und Modellierung dargestellt.

## D.6 Veröffentlichungen

Bauer, S. & Schäfer, D. (im Druck): Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherungsprozesse – Sicherheit- und umweltrelevante Prozesse; Teilbericht Druckaufbau im Untergrund und Verdrängung des Formationswassers. Bericht für das Umweltbundsamt. 50 S..

Dahmke, A. (2009): Was bedeutet CCS – Stand der Forschung und Entwicklung.- Einladung als Referent u. Podiumsvertreter für Öffentlichkeitsvortrag im Rahmen einer Informationsveranstaltung des Kreises Schleswig-Flensburg u. d. Amtes Schafflund am 1.07.2009, Mehrzweckhalle Schafflund.

Dahmke, A. (2009): CCS und Umweltschutzgüter – eine Risikoabwägung. Panel Diskussion, 6. BMBF-Forum für Nachhaltigkeit – Einen Schritt weiter, 9.-10. September 2009, PROTOTYP Lofts, Hamburg.

Hagenah, M. (in prep): Numerische Simulationen der Detektierbarkeit von $CO_2$ Leckagen mit Beobachtungspegeln am Beispiel des CLEAN-Standorts in der Altmark.

Großmann, J., Schilling, F. & Dahmke, A. (im Druck): Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherungsprozesse – Zusammenfassende Darstellung zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherprozesse. Bericht für das Umweltbundsamt. 76 S..

Großmann, J., Woiwode, R. & Dahmke, A. (im Druck): Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherungsprozesse – Schadensvorsorge und –beseitigung; Teilbericht Schutzgutbetrachtung, Risikomanagement. Bericht für das Umweltbundsamt. 50 S..

Köber, R., Großmann, J., Beyer, M., Hornbruch, G., Schäfer, D. & Dahmke, A. (2009): Development of EGR Monitoring Concepts. Poster beim Statusseminar „Geological storage of $CO_2$" R&D-Programme GEOTECHNOLOGIEN, 30.11-01.12.2009, RWTH Aachen.

Köber, R., Hornbruch, G., Wiegers, C., Dahmke, A., Großmann, J., Beyer, M. & Tischer, L. (2010): Ableitung eines standortspezifischen Langzeit-Monitoringkonzeptes für EGR unter Einbeziehung der rechtlichen und sicherheitstechnischen Vorgaben sowie hydrogeochemisches Monitoring im flachen Grundwasserleiter. Vortrag beim CLEAN-Jahrestreffen, 28.01.2010, GFZ Potsdam.

Köber, R., Großmann, J., Beyer, M., Hornbruch, G., Schäfer, D. & Dahmke, A. (2010): Development of EGR Monitoring Concepts. Poster beim CLEAN-Jahrestreffen, 28.01.2010, GFZ Potsdam.

Köber, R., Großmann, J., Tischer, L., Beyer, M., Wiegers, C., Schäfer, D. & Dahmke, A. (2010): 1 TV IV.1/TV IV.3 – Development of EGR monitoring concepts. Poster beim GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar, 27.- 28. September 2010, Jena.

Köber, R., Wiegers, C., Schäfer, D., Dahmke, A., Großmann, J., Beyer, M. & Tischer, L. (2011): Charakterisierung und Monitoring der oberflächennahen Grundwasserleiter und Ableitung eines standortspezifischen Langzeit-Monitoringkonzeptes für EGR. Vortrag beim CLEAN-Jahrestreffen, 28.01.2011, GFZ Potsdam.

Köber, R. & Dahmke, A. (in prep.): Development of monitoring concepts for geologically stored $CO_2$.

Köber, R., Wiegers, C., Schäfer, D. Beyer, M., Tischer, L., Großmann, J., Al Hagrey, S., Helkjaer, M., Auken, E., Foged, N., Gräber, M., Dahmke, A. (eingereicht): Baseline monitoring and simulated effects of $CO_2$ leakages in near-surface aquifers. 8 pp..

Köber, R., Wiegers, C., Schäfer, D., Großmann, J., Tischer, L., Beyer, M., Dahmke, A. (2011): Site characterization and $CO_2$ migration scenarios for nearsurface aquifers as basis for a monitoring concept. CLEAN Final Conference – $CO_2$ Large-Scale enhanced Gas Recovery in the Altmark Natural Gas Field, Conference Contributions, May 17/18, 2011, Potsdam, Germany, p. 12.

Köber, R. & Dahmke A. (2011): Ableitung eines standortspezifischen Monitoringkonzepts für die $CO_2$-Speicherung im Rahmen einer EGR- oder CCS-Maßnahmen. Bericht zum Forschungsvorhaben CLEAN. Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. 86 S.

Schäfer, D. (im Druck): Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherungsprozesse – Erkundungs- und Monitoringmethoden, Schutzgutbetrachtungen; Teilbericht Erkundung und Monitoring des Schutzgutes Grundwassers. Bericht für das Umweltbundsamt. 20 S..

Wiegers, C. E., 2009, Vergleich unterschiedlicher reaktiver Transportmodelle und Modellierung von Szenarien zur $CO_2$-Leckage in einem typischen norddeutschen Aquifer, Diplomarbeit am Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 67 S..

Wiegers, C., Köber, R., Schäfer, D., Dahmke A. (2010): $CO_2$ leakage in shallow aquifers: Factors affecting the geometry and dimension of CO2 phase bodies. Poster beim GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar, 27.- 28. September 2010, Jena.

Wiegers, C., Köber, R., Schäfer, D., Dahmke A. (eingereicht): $CO_2$ leakage in shallow aquifers: Impact of geology, leakage rate and groundwater flow on the CO2 gas phase body and monitoring strategies. Abstract für Tenth Annual Carbon Capture and Sequestration Conference, May 2-5, 2011.

Wiegers, C. E., (in prep.): Szenarienmodellierung zur Ausbreitung und Migration von $CO_2$ Gasphasenkörpern in oberflächennahen Aquiferen, Doktorarbeit am Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Wiegers, C. E., Köber, R., Schäfer, D., Dahmke, A. (in prep): Quantification of impacts of leakage rates and groundwater pore velocities on the migration and extension of $CO_2$ gas phase bodies in shallow groundwater aquifers.

Wiegers, C. E., Köber, R., Schäfer, D., Dahmke, A. (2011): Szenarienmodellierung zur Ausbreitung von gasförmigem und gelöstem $CO_2$ in oberflächennahen Aquiferen. Teilbericht zum Forschungsvorhaben CLEAN. Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. 37 S.

## D.7 Literatur:

1. IPCC, *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Summary for Policymakers and Technical Summary*, B. Metz, et al., Editors. 2007, Intergovernmental Panel on Climate Change.
2. Chalaturnyk, R. and W.D. Gunter. *Geological storage of CO2: Time frames, monitoring and verification*. in *7th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-7)*. 2005. Vancouver, Canada, September 5-9, 2004, .
3. Wildenborg, T., et al. *Long-Term Safety Assessment of $CO_2$ Storage: The Scenario Approach.* . in *Proceedings 7th International Conference of Greenhouse Gas Technologies*. 2004 Vancouver.
4. Großmann, J., et al., *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung – Speicherprozesse*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 454.
5. Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, *Richtlinie 2009/31/EG über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 3001/80/EG, 3004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006*. 2009, Amtsblatt der Europäischen Union. p. L140/114-135.
6. NETL, *Monitoring, Verification, and Accounting of $CO_2$ Stored in Deep Geologic Formations*. 2009, NETL - National Energy Technology Laboratory. p. 132.
7. Großmann, J., F. Schilling, and A. Dahmke, *Schadensvorsorge und -beseitigung - Teilbericht Schutzgutbetrachtung, Risikomanagement*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 50.
8. Großmann, J., F. Schilling, and A. Dahmke, *Zusammenfassende Darstellung zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 76.
9. Schilling, F.R., *Monitoring, Überwachung zukünftiger $CO_2$-Speicher*, in *Die dauerhafte geologische Speicherung von $CO_2$ in Deutschland - Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven*, L. Stroink, et al., Editors. 2009, Koordinierungsbüro GEOTECHNOLOGIEN: Potsdam. p. 88-102.
10. Johnson, G., et al., *The use of stable isotope measurements for monitoring and verification of $CO_2$ storage.* Energy Procedia 1, 2009. **GHGT-9**: p. 2315-2322.
11. Johnson, G., et al., *Using oxygen isotope ratios to quantitatively assess trapping mechanisms during $CO_2$ injection into geological reservoirs: The Pembia case study.* Chemical Geology, 2011. **283**: p. 185-193.
12. Kharaka, Y.K., et al., *Potential environmental issues of $CO_2$ storage in deep saline aquifers: Geochemical results from the Frio-I Brine Pilot test, Texas, USA.* Applied Geochemistry, 2009. **24**: p. 1106-1112.
13. Auken, E., et al., *An integrated processing scheme for high-resolution airborne electromagnetic surveys, the SkyTEM system.* Exploration Geophysics, 2009. **40**: p. 184-192.
14. Sørensen, K.I. and E. Auken, *SkyTEM - A new high-resolution helicopter transient electromagnetic system.* Exploration Geophysics, 2004. **35**: p. 191-199.

Eine umfangreiche Literaturliste findet sich im Anhang E.1.

# E) LISTE DER ANHÄNGE:

## E.1 Monitoringkonzept

Titel: Ableitung eines standortspezifischen Monitoringkonzepts für die $CO_2$-Speicherung im Rahmen einer EGR- oder CCS-Maßnahme (R. Köber & A. Dahmke, 2011. 84 S.)

## E.2 Rechtliches Gutachten

Titel: Rechtsgutachterliche Stellungnahme zu den bergrechtlichen Rahmenbedingungen für eine $CO_2$-Speicherung im Projekt CLEAN (W. Ewer & A. Leppin, 2009. 26 S.)

## E.3 Strukturmodell

Titel: Erarbeitung eines geologischen Strukturmodells (M. Beyer & J. Großmann, 2011. 19 S.)

## E.4 Arbeitsprogramm Bohrarbeiten

Titel: Informationen zu den für Februar/März 2010 geplanten Bohrarbeiten zur Errichtung neuer Grundwassermesstellen im Teilprojet Mo3 (R. Köber, A. Dahmke, J. Großmann, M. Beyer, L. Tischer. 7 S.)

## E.5 Bohrprofile, Ausbaupläne, Schichtenverzeichnisse

(41 S.)

## E.6 Ergebnisse der Festphasenuntersuchungen

(4 S.)

## E.7 Konzeption des Grundwassermonitorings

Titel: Konzeption zum Grundwassermonitoring der flachen Aquifere (L. Tischer & R. Köber, 2010, 8 S.)

## E.8 Probenahmeplanung

(1 S.)

## E.9 Ergebnisse des Grundwassermonitorings

(6 S.)

## E.10 Bericht Geoelektrik-Messungen

Titel: Geoelektrik-Messungen in Salzwedel (Ismaeil, Siebrands, Gudjonsson, Al Hagrey & Gräber, 2011. 12 S.)

## E.11 Bericht SkyTEM-Messungen

Titel: SkyTEM Survey Maxdorf 2011 (Auken, E., Foged, N., Roth, B., & Mikkelsen, P., 2011. 83 S.)

## E.12 Modellierung

Titel: Szenarienmodellierung zur Ausbreitung von gasförmigem und gelöstem $CO_2$ in oberflächennahen Aquiferen (Wiegers, C., Köber, R., Schäfer. D. & Dahmke, A., 2011. 37 S.)

# E.1 Monitoringkonzept

# Ableitung eines standortspezifischen Monitoringkonzepts für die $CO_2$-Speicherung im Rahmen einer EGR- oder CCS-Maßnahme

R. Köber & A. Dahmke

Lehrstuhl für Angewandte Geologie
Institut für Geowissenschaften
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

*(Anlage E.1 zum Endbericht der Teilprojekte Mo1 und Mo3 im Themenverbund 4 (Monitoring) des F&E-Vorhabens CLEAN – $CO_2$ Enahnced Gas Recovery in the Altmark Natural Gas Field)*

# Inhaltsverzeichnis

**1 EINLEITUNG 3**

**2 BESTEHENDE NATIONALE UND INTERNATIONALE MONITORINGEMPFEHLUNGEN 4**

**3 PROJEKT- UND MONITORINGPHASEN 8**

**4 MONITORINGZIELE 11**

**5 MONITORINGKOMPARTIMENTE 17**

**6 MONITORINGMETHODEN 19**

**7 STANDORTUNABHÄNGIGE MONITORINGEMPFEHLUNGEN 33**

***7.1 Monitoring von Bohrungen 38***
7.1.1 Monitoring offener Bohrungen 39
7.1.2 Monitoring verfüllter Bohrungen 40

***7.2 Monitoring der Speicherformation / Reservoirmonitoring (inkl. primärem Deckgestein) 40***

***7.3 Monitoring der Rückhalteformation 43***

***7.4 Monitoring der Transferpfadformation 45***

***7.5 Monitoring der Schutzgüter 47***
7.5.1 Monitoring des (oberflächennahen) Grundwassers 47
7.5.2 Monitoring der Bodenzone 50
7.5.3 Monitoring der Luft 51
7.5.4 Monitoring von Flora und Fauna 52
7.5.5 Überwachung der Bausubstanz 53

**8 MONITORINGUMFANG 54**

**9 STANDORTSPEZIFISCHES MONITORINGKONZEPT 56**

**10 LITERATUR 65**

**11 ANHANG 71**

***11.1 Methodensteckbriefe 71***

# 1 Einleitung

Im vorliegenden Bericht werden die wesentlichen Ergebnisse des Arbeitspakets A1 (Erarbeitung eines Monitoringkonzeptes) im Teilprojekt Mo1 des Forschungsvorhabens CLEAN dargestellt. Die übergeordnete Zielsetzung des Arbeitspakets A1 bestand in der Erstellung eines Monitoring-Strategiekonzepts für die Betriebs- und Nachsorgephase einer EGR-Maßnahme, das alle Tiefenbereiche vom Reservoir bis zur Atmosphäre umfasst und auf publizierten sowie innerhalb von CLEAN erarbeiteten Erkenntnissen und Anforderungen basiert. Das Konzept sollte im Wesentlichen aus den folgenden drei Teilen bestehen:

1. Methodenübersicht und Bewertung
2. Allgemeine standortunabhängige Monitoringempfehlungen
3. Standortabhängiges Monitoringkonzept

Der im Forschungsantrag vorgesehene Umfang war auf die Bewertung und Berücksichtigung von Methoden zur $CO_2$-Detektion beschränkt. Aufgrund der sich abzeichnenden Anforderungen wurde der Bearbeitungsumfang jedoch auch auf weitere Überwachungstechnologien ausgedehnt, die zur Erhöhung der Sicherheit und der Begrenzung der Umweltrisiken beitragen können. Mit den innerhalb dieses Berichts zusammengestellten Informationen soll auch ein Beitrag dazu geleistet werden, Projektverantwortlichen wie Projektmanagern oder Behörden einen Überblick über die zu berücksichtigenden Faktoren, Möglichkeiten und Anforderungen bei der Erstellung standortspezifischer Monitoringkonzepte zu geben.

Eine besondere Herausforderung bei der Bearbeitung bestand darin, dass zu Projektbeginn noch keine Systematik oder Vergleichsbeispiele für die Erstellung solcher Monitoringkonzepte bestanden und bis zum aktuellen Zeitpunkt noch keine nationale gesetzliche Regelung inklusive Grenz- oder Richtwerten vorliegt. Eine Bearbeitungssystematik mit den einzelnen Bearbeitungsschritten und unter Einbeziehung der zu berücksichtigen Faktoren musste erst entwickelt werden, wobei während der Projektlaufzeit von anderen entwickelte Vorgaben oder Empfehlungen mit aufgenommen wurden. Aufgrund der während der Projektbearbeitung noch fortschreitenden und vielfach bisher nicht abgeschlossenen Entwicklung in Bereichen, die als Grundlage für eine detaillierte Konzeptentwicklung benötigt werden (Monitoringtechnologie, Simulationssoftware, Szenarienmodellierung, Risikobewertung, Standorterkundung), ließen sich die hier gegebenen Empfehlungen teilweise nicht weiter spezifizieren. Eine detailliertere Spezifizierung muss einhergehend mit der Kenntnisentwicklung in folgenden Vorhaben noch erfolgen.

In Kapitel 2 (Bestehende nationale und internationale Monitoringempfehlungen) werden die wichtigsten zusammenfassenden Berichte, Leitfäden, Empfehlungen und Richtlinien vorgestellt, die bei der Erstellung eines Monitoringkonzepts berücksichtigt werden sollten. Von dieser Literatur geben u.a. die EU-Richtlinie für die geologische Speicherung von Kohlendi-

oxid [1], die NETL-Studie zum Monitoring von CCS [2] sowie der UBA-Bericht über die Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung [3] zentrale Leitlinien für die Entwicklung von Monitoringkonzepten vor. Vorgaben und Empfehlungen hieraus stellen Grundlagen für die weiteren Kapitel dieses Berichts.

Die wichtigsten Aspekte eines Monitoringkonzepts liegen in der Auswahl der einzusetzenden Monitoringmethoden und der Konzeptionierung ihrer Anwendung. Die Methodenauswahl bzw- -kombination ist neben den Methodencharakteristika abhängig von den gestellten Monitoringzielen, der Projekt- bzw. Monitoringphase sowie der Festlegung der Monitoringkompartimente mit deren Größe und deren Aufgaben. In den Kapiteln 3 (Projekt- und Monitoringphasen), 4 (Monitoringziele) und 5 (Monitoringkompartimente) werden die bisher zu den jeweiligen Themen diskutierten und geforderten Aspekte zusammenfassend bzw. vergleichend wiedergegeben.

Einen Überblick über die für die unterschiedlichen Kompartimente zur Verfügung stehenden Monitoringmethoden mit Methodensteckbriefen und weiterführender methodenspezifischer Literatur liefert Kapitel 6. Des Weiteren wurde hier eine umfassende Matrix entwickelt, der zu entnehmen ist, welche Methoden grundsätzlich zur Erreichung der unterschiedlichen Monitoringziele beitragen können. Im Rahmen der standortunabhängigen Monitoringempfehlungen (Kapitel 7) wird für jedes Monitoringkompartiment dargestellt, welche Maßnahmen im Umfang eines obligatorischen Basismonitorings enthalten sein sollten und welche Methoden für ein erweitertes Monitoring zur Verfügung stehen, das z.B. im Falle von Unregelmäßigkeiten durchzuführen ist. Neben der Auswahl an Monitoringmethoden ist im Rahmen einer Monitoringkonzepterstellung der Monitoringumfang festzulegen und zu begründen. Auf die hierbei zu berücksichtigen Einflussfaktoren weist Kapitel 8 hin.

In Kapitel 9 wurden neben den Anforderungen an ein standortspezifisches Monitoringkonzept insbesondere auch die Voraussetzungen und Voruntersuchungen zusammengestellt, die als Grundlage für eine detaillierte standortspezifische Konzepterstellung bereits vorhanden sein müssen. Zu den jeweiligen Kriterien wurde für das CLEAN-Projekt der aktuelle Bearbeitungsstand sowie die Verfügbarkeit der notwendigen Informationen dargestellt und die noch vorliegenden Kenntnisdefizite aufgezeigt. Im Rahmen des Fazits werden Wissensdefizite angesprochen und Empfehlungen für den weiteren Entwicklungsprozess genannt.

# 2 Bestehende nationale und internationale Monitoringempfehlungen

Die Richtlinie 2009/31/EG über die geologische Speicherung von Kohlendioxid (im weiteren nur noch EU-Richtlinie oder EU-RL genannt) stellt zum aktuellen Zeitpunkt den rechtlichen Rahmen für CCS. Für den Gültigkeitsbereich der Richtlinie wird zwar EGR nicht aufgeführt, da bisher jedoch keine speziellen Richtlinien oder Empfehlungen für EGR vorliegen, wird in

den hier angestellten Betrachtungen davon ausgegangen, dass für das Monitoring von EGR in weiten Teilen dieselben Grundlagen wie für CCS heranzuziehen sind. Die Richtlinie schreibt den EU-Mitgliedsstaaten eine Umsetzung in nationales Recht bis 2011 vor, eine hierfür vorbereitete bundesdeutsche Gesetzesvorlage wurde jedoch am 23.09.2011 im Bundesrat abgelehnt.

Neben einer Vielzahl von Einzelpublikationen zu speziellen CCS- oder EGR-relevanten Themen, wurde in den letzten Jahren eine Reihe zusammenfassender Berichte, Leitfäden und Empfehlungen publiziert, die eine wesentliche Grundlage bei der Erstellung von Monitoringkonzepten darstellen können und Berücksichtigung finden sollten. Die maßgeblichen hiervon sind im Folgenden zusammenfassend dargestellt und weitere in Tabelle 1 aufgeführt.

***Richtlinie 2009/31/EG über die geologische Speicherung von Kohlendioxid [1]***

- Rechtlicher Rahmen für die geologische Speicherung von $CO_2$ für den Geltungsbereich der Europäischen Union (nicht gültig für F+E-Projekte)
- Regelung von Standortauswahl, Explorations- und Speichergenehmigungen, Betrieb, Überwachung, Schließung und Nachsorgeverpflichtungen
- Anhang 1: Kriterien für die Charakterisierung und Bewertung des potenziellen Speicherkomplexes und der umliegenden Gebiete
  1. Stufe: Datenerhebung
  2. Stufe: Erstellung eines dreidimensionalen statischen geologischen Modells
  3. Stufe: Charakterisierung des dynamischen Speicherverhaltens und der Sensibilität sowie Risikobewertung
- Anhang 2: Kriterien für die Aufstellung und Aktualisierung des Überwachungsplans und für die Nachsorgeüberwachung
- Insgesamt relativ flexibel gehaltene Vorgaben, die weitere Untersetzungen erfordern

***Best Practices for: Monitoring, Verification, and Accounting of $CO_2$ Stored in Deep Geologic Formations (NETL) [2]***

- Mointoringziele
- Umfangreiche Darstellung und Bewertung von Monitoringmethoden
- Methodenempfehlungen zur Erreichung der Monitoringziele
- Zusammenfassung der relevanten nationalen gesetzlichen Regulierungen
- Darstellung von Standortbedingungen, Risikobewertung, Strategien zur Risikominderung und Monitoringaktivitäten für 5 großskalige Feldversuche

***Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung – Speicherprozesse (UBA) [3]***

- *Umfangreichste und aktuellste Studie zur Beurteilung der Sicherheit und Umweltverträglichkeit geologischer $CO_2$-Speicherung*

- *Zusammenstellung aus folgenden Teilberichten:*
  1. *Zusammenfassende Darstellung zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung-Speicherprozesse [4]*
  2. *Reaktion mit dem Formationswasser, dem Formationsgestein und dem Deckgestein [5]*
  3. *Modellrechnungen: Untersuchungen und Bewertung gängiger Rechenmodelle für die Darstellung des geologischen Untergrundes im Speicher und die Darstellung im Speicher [6]*
  4. *Versagensrisiko von Bohrungen [7]*
  5. *Druckaufbau im Untergrund und Verdrängung des Formationswassers [8]*
  6. *Speichercharakterisierung: Erkundungsmöglichkeiten, Umfang und Monitoring [9]*
  7. *Erkundung und Monitoring des Schutzgutes Grundwasser [10]*
  8. *$CO_2$-Freisetzung in die Atmosphäre und $CO_2$-Ausbreitung in der Luft [11]*
  9. *Schutzgutbetrachtungen und Risikomanagement [12]*
- *Systematische Untersetzung der EU-Richtlinie hinsichtlich des Monitorings*
- *Darstellung von Wissenslücken und Forschungsbedarf*

***Anforderungen und Vorschläge zur Erstellung von Leitfäden und Richtlinien für eine dauerhafte und sichere Speicherung von $CO_2$* (BGR) [13]**

- Standortauswahlkonzept
- Bewertung und Dichtigkeit verfüllter Altbohrungen
- Entwicklung von Sicherheitskonzepten für den geologischen Teil einer Speicherstätte auf Grundlage der EU-Richtlinie
- Überwachungskonzepte für die $CO_2$-Speicherung in Aquiferen und erschöpften Erdgaslagerstätten
- Resultate eines Workshops über die Anforderungen an eine sichere $CO_2$-Speicherung
- Umfangreicher Anhang mit Auszügen, Abbildungen und Tabellen zu relevanten Richtlinien, Gesetzen, bisher vorgeschlagenen Überwachungsansätzen und Überwachungstechnologien

***General Technical Support Document for Injection and Geologic Sequestration of Carbon Dioxide: Subparts RR and UU. (US-EPA) [14]***

- Umfangreiche Empfehlungen zur Umsetzung der US-amerikanischen Gesetzgebung
- Darstellung und Hinweise zum Einsatz vieler Monitoringmethoden
- Empfehlungen zur Erstellung von Monitoringplänen

**Tabelle 1: Weitere für die Bewertung von Monitoringmethoden und die Entwicklung von Monitoringkonzepten hilfreiche Zusammenstellungen (Reviews, Berichte, Konzepte, Bewertungen, etc.).**

| Quelle | | Erläuterung |
|---|---|---|
| Aarnes et al. 2009 | [15] | CO2QUALSTORE-Bericht; v.a Standortauswahl, Vorgehensweisen, Risikobetrachtung nur wenig Monitoring |
| Benson et al. 2002 | [16] | Methodenübersicht |
| Benson et al. 2004 | [17] | Monitoring-Leitfaden |
| Benson et al. 2005 | [18] | Monitoringübersicht auch mit Kosten |
| Benson 2006 | [19] | Kurze Methodenevaluation, Anforderungen, Nachweisgrenzen, u.v.m. |
| Benson 2007 | [20] | Review zu Zielsetzungen und Methoden |
| Chadwick et al. 2009 | [21] | Zusammenfassung von flachen und tiefen Methoden, und deren Einsatz an verschiedenen Standorten, Review-Paper |
| DIN EN 1918-1 | [22] | Untertagespeicherung von Gas, Teil 1: Speicherung in Aquiferen |
| DIN EN 1918-2 | [23] | Untertagespeicherung von Gas, Teil 2: Speicherung in Öl- und Gasfeldern |
| GEO-SEQ-Project-Team 2004 | [24] | allg. Monitoring und atmosphärisches Monitoring |
| IEA-GHG 2005 | [25] | Monitoring Network Meeting 2005 |
| IEA-GHG 2007 | [26] | Monitoring Network Meeting 2006 |
| Mathieson et al. 2010 | [27] | Übersichtstabelle über in Krechba InSalah durchgeführte Monitoring-Programme |
| Oldenburg et al. 2003 | [28] | Zusammenfassung zu Monitoringmethoden |
| Pearce et al. 2005 | [29] | Monitoringempfehlungen mit Zielen, Methoden, etc. |
| Shuler et al. 2002 | [30] | Review zu atmosphärischer $CO_2$-Detektion |
| Whittaker et al. 2004 | [31] | Umfangreicher Bericht über Weyburn |
| Winthaegen et al. 2005 | [32] | Methodenübersicht, viel Reservoir |

# 3 Projekt- und Monitoringphasen

CCS/EGR-Projekte lassen sich im Wesentlichen in drei bis vier Projektphasen gliedern (Tabelle 2), von denen jede andere Anforderungen an die durchzuführenden Untersuchungen stellt. Die Aufgaben innerhalb der einzelnen Projektphasen sind in Tabelle 3 zusammengestellt. In Hinsicht auf das Monitoring muss zunächst zwischen der Standortcharakterisierung, die alle Eignungsuntersuchungen sowie das Baselinemonitoring umfasst, und der Überwachung der Maßnahme unterschieden werden. Innerhalb dieses Berichts werden mit dem Begriff Monitoring alle Überwachungsmaßnahmen während der Injektionsphase und der Postinjektionsphase einschließlich der Baselinemessungen, die bereits innerhalb der Präinjektionsphase stattfinden müssen, bezeichnet. Hiervon zu unterscheiden ist die Standorterkundung bzw. Charakterisierung, innerhalb der im ersten Schritt über die grundsätzliche Eignung eines Standorts entschieden wird und im positiven Falle in einem nächsten Schritt eine detaillierte Charakterisierung erfolgt. Ein Überblick über die unterschiedlichen Ziele der Erkundung und des Monitorings findet sich in Kapitel 4. Die Standortcharakterisierung wird in der EU-Richtlinie in folgende Stufen unterteilt:

Stufe 1: Datenerhebung (Erkundungsuntersuchungen)
Stufe 2: Erstellung eines dreidimensionalen statischen geologischen Erdmodells
Stufe 3: Charakterisierung des dynamischen Speicherverhaltens und der Sensibilität sowie Risikobewertung

Während in Anhang I der Richtlinie die Anforderungen an die Standortcharakterisierung relativ detailliert beschrieben sind, sind die Anforderungen an das Monitoring („Nachsorgeüberwachung“, Anhang II, EU-RL) bis auf wenige Aspekte eher flexibel gehalten. Die Ergebnisse aller drei Stufen der Standortcharakterisierung sind bei der Erstellung eines standortspezifischen Monitoringkonzepts zu berücksichtigen und müssen deshalb vor der Auslegung des Monitoringkonzepts bereits vorliegen. Für alle im aufzustellenden Überwachungsplan aufge-

**Tabelle 2: Unterschiedliche Bezeichnungen der Projekt- und Untersuchungsphasen.**

<table>
<tr><th></th><th></th><th colspan="2">EU-RL</th><th>UBA</th><th>NETL</th></tr>
<tr><td>Standortcharakterisierung (Erkundung)</td><td>Vorbereitungsphase inkl. Baselinemonitoring</td><td colspan="2">Projektbeginn</td><td>Präinjektionsphase</td><td>Pre-Operation</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Überwachung (Monitoring)</td><td>Betriebsphase</td><td colspan="2">Betrieb</td><td>Injektionsphase</td><td>Operation</td></tr>
<tr><td>Rückbauphase</td><td rowspan="2">Nachsorge</td><td>Betreiber</td><td>Instationäre Postinjektionsphase</td><td>Closure</td></tr>
<tr><td>Langzeitmonitoringphase</td><td>Behörde</td><td>Stationäre Postinjektionsphase</td><td>Post-Closure</td></tr>
</table>

**Tabelle 3: Umfang der Projektphasen.**

| **Vorbereitungsphase (Pre-Operation)** |
|---|
| • Auslegung des Projekts<br>• Aufzeichnung der Ausgangsbedingungen (Baseline-Monitoring)<br>• Geologische Charakterisierung<br>• Identifizierung von Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsrisiken<br>• Lokalisierung und Bewertung von Altbohrungen<br>• Caprock-Integritäts-Tests<br>• Injektionstest von kleinerem Umfang können zur Verbesserung der Kenntnis über die Speichereigenschaften und zur Injektionsoptimierung durchgeführt werden (optional)<br>• Entwicklung des Monitoringkonzepts<br>• Einrichtung von Injektionsbohrungen<br>• Einrichtung technischer Anlagen<br>• Entwicklung von Notfallplänen |
| **Betriebsphase (Operation)** |
| • Betriebs-, Nachweis- und Umwelt-Monitoring<br>• Zunehmender Umfang des Monitorings<br>• Monitoringergebnisse sind im Vergleich zu den Baselinedaten der Vorbereitungsphase auszuwerten. |
| **Rückbau- und Langzeitmonitoringphase (Closure + Post-Closure)** |
| • Übergangsphase unmittelbar nach Injektionsende in der zu überprüfen ist, ob die Speicherung wie vorgesehen stattfindet und eine schrittweise Verringerung der Monitoringaktivitäten gerechtfertigt ist oder ob die Monitoringmaßnahmen zunächst in vollem Umfang wie in der Betriebsphase weiterzuführen sind.<br>• Verschluss von nicht mehr erforderlichen Bohrlöchern mit Verschlussmaterialien, die kompatibel zu den in Kontakt tretenden standortspezifischen Fluiden und Dokumentation der Verschlussprozesse sind<br>• Versicherung, dass vertikale Leckagen nur in minimalem Umfang stattfinden<br>• Rückbau von nicht mehr erforderlichen Einrichtungen und Gerätschaften<br>• Verbleib nötiger Monitoringausrüstung<br>• Festlegung der Positionen, Methoden und Überwachungsintervalle für das Langzeitmonitoring<br>• Das Langzeitmonitoring kann eingestellt werden, wenn sich zeigen lässt, dass keine Migration der $CO_2$-Phase mehr stattfindet und das $CO_2$ somit endgültig in seiner Zielformation verbleibt. |

führten Monitoringmethoden sind vor der $CO_2$-Injektion im Rahmen des Baselinemonitorings Messungen zur Feststellung des Ausgangszustandes durchzuführen. Messungen der Standortcharakterisierung werden hierbei bereits einen Teil des Baselinemonitorings darstellen. Da sich Baselinemessungen zu einem späteren Zeitpunkt nicht nachholen lassen, darf deren Umfang (Methoden, Wiederholungsmessungen, räumliche Auflösung) nicht zu knapp bemessen werden. Auch für Methoden, die nur im Falle eines unvorhergesehenen Verlaufs zusätzlich zum Einsatz kommen sollen, sind bereits Baselinemessungen durchzuführen. Vor

Beendigung der Baselinemessungen muss also bereits ein abgeschlossenes Monitoringkonzept mit Festlegung solcher optionaler Methoden (vgl. Kapitel 7), die nur eventuell und unter Umständen erst zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt herangezogen werden, vorliegen.

Nach Beendigung der Injektion verringern sich die Drücke im Nahbereich der Injektionen, wodurch sich in diesen Bereichen druckinduzierte Risiken verringern. In weiter von den Injektionsstellen entfernten Lagen (z.B. Fallenstrukturen), in die das $CO_2$ noch nach Beendigung der Injektion migriert, können die Drücke auch im weiteren Verlauf ansteigen [33] und auch noch mehrere Jahre nach dem Injektionsende hier zu einer Erhöhung des Risikos führen. Durch $CO_2$ verursachte Lösungsreaktionen von Gestein oder Verrohrungen (Korrosion) können unter Umständen zwar in ihrer Geschwindigkeit durch abnehmende Lösungsraten abnehmen, schreiten in fortwährender Gegenwart von $CO_2$ jedoch trotzdem voran. Eine Verringerung hiermit verbundener Risiken ist also noch nicht unmittelbar nach Injektionsende zu erwarten.

Der zeitliche Verlauf der einzelnen Risiko-darstellenden Prozesse ist so weit möglich aus numerischen Simulationen abzuleiten und innerhalb der Risikobewertung ortspezifisch darzustellen. Aufbauend auf diese Informationen kann dann das Monitoring ausgelegt werden. Ist auf Grundlage der Vorhersagen und durch Messergebnisse validiert von einem zeitlichen Rückgang verschiedener Risiken auszugehen, so kann die Monitoringintensität durch eine räumliche oder zeitliche Reduktion der Messungen oder durch eine Beschränkung der eingesetzten Methoden nach Absprache mit den Behörden angepasst werden.

Vor der Übertragung der Verantwortung auf die zuständige Behörde ist hinsichtlich des Monitorings vom Betreiber der Speicherstätte nachzuweisen, dass:

- alle verfügbaren Hinweise auf eine vollständige und dauerhafte Rückhaltung des gespeicherten $CO_2$ hindeuten,
- das tatsächliche Verhalten des injizierten $CO_2$ mit dem modellierten Verhalten übereinstimmt,
- keine Leckagen feststellbar sind und
- die Speicherstätte sich hin zu einem Zustand langfristiger Stabilität entwickelt.

Die Dauer der Nachweisphase hierfür darf i.d.R. 20 Jahre nicht unterschreiten. Nach Übertragung der Verantwortung an die Behörde kann das routinemäßige Monitoring, wie es vor der Übertragung durchgeführt wurde, eingestellt werden. Jedoch ist ein weiteres Monitoring in Verantwortung der Behörde durchzuführen, das eine Detektion von Leckagen oder erheblichen Unregelmäßigkeiten noch ermöglicht. Die Ausführungen in der EU-Richtlinie geben jedoch keine weiteren Anhaltspunkte, in welcher Art sich das Monitoring vor und nach der Übertragung der Verantwortung unterscheiden und welche Kriterien und Zeiträume für eine endgültige Beendigung der Überwachungsmaßnahmen anzusetzen sind. Zu beiden Punkten

besteht Definitionsbedarf. Grundlage für die Festlegung sollte in beiden Fällen die Güte der erstellten Modellprognosen im Vergleich zu den bis zur Übertragung erhobenen Monitoringergebnissen und eine diese berücksichtigende Risikobewertung sein.

Grundsätzlich können alle in den Kapiteln 6 und 7 dargestellten bzw. empfohlenen Methoden in den verschiedenen Monitoringphasen eingesetzt werden. Es gibt also keine Zuordnung der Methoden zu bestimmten Monitoringphasen. Da im Laufe der Nachsorgeüberwachung jedoch der Monitoringumfang und gegebenenfalls auch die Anzahl eingesetzter Methoden auf das Nötigste begrenzt wird, müssen die verbleibenden Methoden möglichst umfangreiche Aussagen zulassen und die Einhaltung der Kriterien verlässlich belegen. Für die Nachsorge nehmen Druckmessungen, 3D-Seismik sowie geochemische Analysen von Formationsfluiden und Grundwasser eine zentrale Position ein. Ein Überblick über die verschiedenen Ziele, zu denen mit den einzelnen Methoden beigetragen werden kann, findet sich in Kapitel 6.

# 4 Monitoringziele

In Kapitel 3 wurden die Unterschiede zwischen der Standortcharakterisierung (Erkundung) und dem eigentlichen Monitoring (Überwachung) erläutert. Die Standortcharakterisierung ist zwar nicht Gegenstand dieses Berichts, da die Auslegung des Monitorings jedoch auf deren Ergebnissen aufbaut, sind die Ziele der Erkundung und somit deren Umfang in Tabelle 4 bis Tabelle 7 zusammengefasst. Es handelt sich hierbei um die in der EU-Richtlinie formulierten Anforderungen, die um die im UBA-Bericht geforderten Erweiterungen ergänzt wurden. Welche dieser Ziele auch innerhalb des CLEAN-Projekts behandelt wurden und der Bearbeitungsstand hierzu ist in Kapitel 8 dargestellt.

Auf die Zwecke bzw. Ziele, die innerhalb des Monitorings und in Form eines Überwachungsplans zu berücksichtigen sind, weist die EU-Richtlinie zum einen innerhalb des § 13 (Tabelle 8, I-a bis I-g) und zum anderen im Anhang II (Tabelle 8, I-h bis I-l) hin. Während die unter I-h bis I-m genannten Überwachungen auf jeden Fall und ständig oder in regelmäßigen Abständen erfolgen sollen, werden für die Ziele I-a bis I-g keine bestimmten Überwachungsintervalle, Überwachungspositionen oder Methoden gefordert oder empfohlen. Die im Referentenentwurf für das KSpG (Kohlendioxid-Speichergesetz) vom 23.07.2010 formulierten Monitoringziele entsprechen jenen der EU-Richtlinie. Unter den ständig oder in regelmäßigen Abständen zu erfolgenden Überwachungen wurde jedoch die Überwachung der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Grundwassers ergänzt.

Die im UBA-und NETL-Bericht geforderten Ziele (Tabelle 9 und Tabelle 10) überschneiden sich in weiten Teilen mit denen der EU-Richtlinie (Tabelle 8). Während einige Ziele in der EU-Richtlinie jedoch eher undifferenziert formuliert sind („Feststellung erheblicher Unregelmäßigkeiten“, „Feststellung erheblicher nachteiliger Auswirkungen auf die Umgebung“), wur-

de v.a. im UBA-Bericht hier Konkretisierungsbedarf gesehen und zusätzlich erforderliche Ziele wie z.B. die Überwachung von Landhebung/Landsenkung, Mikroseismizität oder Formationswasserbewegungen benannt. Der hier zusammengestellte Überblick über die verschiedenen bisher formulierten Monitoringziele soll zu einer vereinfachten Spezifierung standortrelevanter Monitoringziele beitragen. Sind die Monitoringziele für einen Standort festgelegt, so können im nächsten Schritt die Auswahl der einzusetzenden Methoden und die Auslegung der Messungen erfolgen. Eine Übersicht, welche Methoden zum Erreichen der einzelnen Monitoringziele beitragen können, findet sich in Kapitel 6.

**Tabelle 4: Aufgaben der Stufe 1 der Erkundung: a) Datenzusammenstellung zu Speicherstätte und Speicherkomplex. (Zusammengestellt aus der EU-Richtlinie und dem UBA-Bericht)**

| Aufgabe | Gefordert in |
|---|---|
| Geologie und Geophysik (des gesamten Untersuchungsgebiets) | EU-RL / UBA |
| Hydrogeologie (insbesondere für Verbrauch bestimmtes Grundwasser) | EU-RL / UBA |
| Lagerstättentechnik (z.B. Porosität) | EU-RL / UBA |
| Geochemie (Lösungsgeschwindigkeit, Mineralisierungsgeschwindigkeit) | EU-RL / UBA |
| Geomechanik (Permeabilität, Frac-Druck) | EU-RL / UBA |
| Seismizität | EU-RL / UBA |
| Vorhandensein und Bedingung natürlicher und anthropogener Wege, einschließlich Brunnen und Bohrlöcher, die als Leckagewege dienen könnten | EU-RL / UBA |
| Bisherige natürlich und anthropogen hervorgerufene Veränderungen der Salz/Süßwassergrenze im Gebiet des Speicherkomplexes | UBA |
| Bisherige natürlich und anthropogen hervorgerufene Landhebungen und -senkungen im Gebiet des Speicherkomplexes | UBA |
| Bisherige natürlich und anthropogen hervorgerufene Seismizität im Gebiet des Speicherkomplexes | UBA |

**Tabelle 5: Aufgaben der Stufe 1 der Erkundung: b) Datenzusammenstellung zu Umgebung des Speicherkomplexes (= Untersuchungsraum). (Zusammengestellt aus der EU-Richtlinie und dem UBA-Bericht)**

| Aufgabe | Gefordert in |
|---|---|
| Den Speicherkomplex umgebende (geologische?) Ausbildungen, die durch die Speicherung von $CO_2$ in der Speicherstätte beeinträchtigt werden könnten | EU-RL |
| Bevölkerungsverteilung über dem Gebiet der Speicherstätte | EU-RL |

| | |
|---|---|
| Nähe zu wertvollen natürlichen Ressourcen | EU-RL |
| Tätigkeiten im Umfeld des Speicherkomplexes und mögliche Wechselwirkungen mit diesen Tätigkeiten (z.B. Exploration, etc.) | EU-RL / UBA |
| Entfernung zur $CO_2$-Lieferquelle, verfügbare $CO_2$-Menge, Verfügbarkeit angemessener Transportwege | EU-RL |

**Tabelle 6: Aufgaben der Stufe 2 der Erkundung: Erstellung eines dreidimensionalen statischen geologischen Erdmodells. (Zusammengestellt aus der EU-Richtlinie und dem UBA-Bericht)**

| Aufgabe | Gefordert in |
|---|---|
| Geologische Struktur der Falle | EU-RL / UBA |
| Geomechanische, geochemische und strömungstechnische Eigenschaften der Lagerstätte (Speicherformation), des Deckgebirges und der umliegenden Formationen (Untersuchungsraum) | EU-RL / UBA |
| Charakterisierung von Bruchsystemen und Vorhandensein anthropogener Wege (z.B. Bohrungen) | EU-RL / UBA |
| Räumliche und vertikale Ausdehnung des Speicherkomplexes / Untersuchungsraumes | EU-RL / UBA |
| Porenraumvolumen inkl. Porositätsverteilung | EU-RL |
| Parametrisierung der physikalischen Eigenschaften der jeweiligen Formationen | UBA |
| Jedes weitere wichtige Merkmal | EU-RL / UBA |

**Tabelle 7: Aufgaben der Stufe 3.1 der Erkundung: Charakterisierung des dynamischen Speicherverhaltens (Modellprognosen). (Zusammengestellt aus der EU-Richtlinie und dem UBA-Bericht)**

| Aufgabe (Berücksichtigung von) | Gefordert in |
|---|---|
| Mögliche Injektionsraten und Eigenschaften des $CO_2$-Stroms | EU-RL |
| Wirksamkeit von gekoppelter Verfahrensmodellierung (Interaktion von Einzelwirkungen) | EU-RL |
| Reaktive Prozesse (Wechselwirkungen von Fluiden und Festphasen) | EU-RL |
| Verwendete Lagerstättensimulatoren (Vergleich verschiedener Modellprogramme) | EU-RL |
| Kurz- und langfristige Simulationen (bis Jahrtausende) | EU-RL |
| Druck der Speicherformation als Funktion der Injektionsrate und der Injektionsmenge im Zeitverlauf | EU-RL / UBA |

| | |
|---|---|
| Räumliche und vertikale Ausdehnung der Speicherformation im Laufe der Zeit | EU-RL / UBA |
| Art des $CO_2$-Flusses in der Lagerstätte einschließlich Phasenverhalten | EU-RL / UBA |
| $CO_2$-Rückhaltemechanismen und –raten (inkl. Spillpoints, seitliche und vertikale Abdichtungen) | EU-RL |
| Sekundäre $CO_2$-Anreichungen in der unterirdischen Umgebung des Speicherkomplexes | EU-RL |
| Speicherkapazität und Druckgradienten in der Speicherstätte | EU-RL |
| Risiko der Bildung von Rissen in der (den) Speicherformation(en) und im Deckgestein | EU-RL |
| Risiko des Eintritts von $CO_2$ in das Deckgestein | EU-RL |
| Risiko von Leckagen aus der Speicherstätte (z. B. durch aufgegebene oder unsachgemäß abgedichtete Bohrlöcher) | EU-RL / UBA |
| Migrationsrate (bei Lagerstätten mit einer Öffnung (Open-ended Lagerstätten)) | EU-RL / UBA |
| Rissverschlussgeschwindigkeit | EU-RL |
| Veränderungen an der Fluidchemie der Formation(en) und dadurch verursachte Reaktionen (z. B. Änderung des pH-Werts oder Mineralisierung) und Einbeziehung in die reaktive Modellierung zur Folgenabschätzung | EU-RL |
| Verdrängung der ursprünglich vorhandenen Formationsfluide | EU-RL / UBA |
| Verstärkte seismische Aktivität und Aufwerfung der Oberfläche | EU-RL / UBA |
| Auswirkungsanalyse für Leckagen aus Bohrungen hinsichtlich einer pot. Grundwasserschädigung | UBA |
| Auswirkungsanalyse für Leckagen aus Bohrungen hinsichtlich einer pot. Bodenluftschädigung | UBA |
| Auswirkungsanalyse für Leckagen aus Bohrungen hinsichtlich einer pot. Gefährdung des Schutzgutes Mensch | UBA |

**Tabelle 8: In der EU-Richtlinie 2009/31/EG geforderte Monitoringziele.**

| | |
|---|---|
| I-a | Vergleich zwischen dem tatsächlichen und dem modellierten Verhalten des $CO_2$ des Formationswassers in der Speicherstätte |
| I-b | Feststellung erheblicher Unregelmäßigkeiten |
| I-c | Feststellung der Migration von $CO_2$ |
| I-d | Feststellung von $CO_2$-Leckagen |
| I-e | Feststellung erheblicher nachteiliger Auswirkungen auf die Umgebung, ein- |

| | |
|---|---|
| | schließlich insbesondere des Trinkwassers, auf die Bevölkerung oder auf Nutzer der umliegenden Biosphäre |
| I-f | Bewertung der Wirksamkeit von gemäß Artikel 16 getroffenen Abhilfemaßnahmen |
| I-g | Aktualisierung der Bewertung der mittel- bzw. langfristigen Sicherheit und Unversehrtheit des Speicherkomplexes sowie Beurteilung der Frage, ob das gespeicherte $CO_2$ vollständig und dauerhaft zurückgehalten wird |
| I-h | Überwachung flüchtiger Emissionen von $CO_2$ in der Injektionsanlage |
| I-i | Überwachung des volumetrischen $CO_2$-Flusses an den Bohrlochköpfen |
| I-j | Überwachung von Druck und Temperatur des $CO_2$ an den Injektionsköpfen (zur Bestimmung des Massenflusses) |
| I-k | Überwachung chemischer Analysen des injizierten Materials |
| I-l | Überwachung von Lagerstättentemperatur und -druck (zur Bestimmung des Verhaltens und des Zustands der $CO_2$-Phase) |
| I-m | Überwachung der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Grundwassers (nur im KSpG-Entwurf vom 23.07.2010 enthalten) |

**Tabelle 9: Im UBA-Bericht geforderte Monitoringziele (Überwachung der aufgeführten Prozesse).**

| | |
|---|---|
| II-a | Landhebung bzw. Landsenkung |
| II-b | Beeinflussung der Grundwasserleiter insbesondere der Salz-/Süßwassergrenze durch Aufstieg von Formationswasser (vgl. I-e und I-m) |
| II-c | Leckage anderer Gase (z.B. Methan) in andere Schutzgüter |
| II-d | Erhöhte Seismizität insbesondere während der Injektionsphase aber auch in der Postinjektionsphase |
| II-e | $CO_2$-Austritt in das Grundwasser und/oder Atmosphäre aus aktiven und alten Bohrungen (vgl. I-d) |
| II-f | Freisetzung aus Obertageeinrichtungen bei der Verpressung von $CO_2$ (vgl. I-h) |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen (vgl. I-d) |
| II-h | Unbeabsichtigte zukünftige Erschließung der $CO_2$-Speicherformation in Folge anderer wirtschaftlicher Nutzungen |
| II-i | Druckausbreitung (gesamter Untersuchungsraum) |
| II-j | Bildung neuer Wegsamkeiten (im Speicherkomplex) |
| II-k | Migration des $CO_2$-Phasenkörpers (Speicherformation) (vgl. I-c) |
| II-l | Erfassung der gelösten $CO_2$-Masse (Speicherformation) |

| | |
|---|---|
| II-m | Migration des Formationswassers (Speicherformation) |
| II-n | $CO_2$-Fluid/Gas-Leckage aus der Speicherformation in die Rückhalteformation |
| II-o | $CO_2$-Fluid/Gas-Leckage aus der Rückhalteformation in die Transferpfadformation |

**Tabelle 10: III) Im NETL-Bericht geforderte Monitoringziele.**

| | |
|---|---|
| III-a | Erfassung der Ausgangsbedingungen gegenüber denen ein möglicher Einfluss der $CO_2$-Injektion beurteilt werden kann |
| III-b | Überwachung der Planmäßigkeit des Injektionsprozesses |
| III-c | Feststellung der Lage und der Ausdehnung der $CO_2$-Phase im Reservoir |
| III-d | Nachweis Reservoirdichtigkeit und der Leckagefreiheit (vgl. I-d) |
| III-e | Überprüfung der Bohrlochintegrität verschlossener und aufgegebener Bohrungen |
| III-f | Identifizierung und Nachweis der Speicherprozesse |
| III-g | Kalibrierung und gegebenenfalls Nachjustierung Modellsimulationen |
| III-h | Detektion und Quantifizierung von $CO_2$-Austritten in die Atmosphäre (vgl. I-d) |
| III-i | Überwachung der Auswirkungen möglicher Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit (vgl. I-e) |
| III-j | Überwachung möglicher durch die $CO_2$-Injektion ausgelöster Mikroseismizität |
| III-k | Charakterisierung von $CO_2$-Austritten zur Auslegung der Verschlussmaßnahmen |
| III-l | Speichernachweis und -dokumentation zur Regelung monetärer Transaktionen und von Emissionszielen |
| III-m | Beurteilung von Nutzungskonflikten mit anderen geologischen Ressourcen |
| III-n | Beurteilungsbasis für Rechtsauseinandersetzungen in Schadensfällen |
| III-o | Nachweis der Effektivität und Sicherheit zur Unterstützung der öffentlichen Akzeptanz. Hierzu kann das Monitoringprogramm auch über den gesetzlich vorgeschriebenen Rahmen hinaus ausgedehnt werden, um dem Sicherheitsempfinden der Öffentlichkeit zusätzlich Sorge zu tragen. |

# 5 Monitoringkompartimente

In der EU-Richtlinie werden zwar die Einheiten „Speicherstätte“, „Speicherkomplex“ und „sekundäre Rückhalteformation“ getrennt aufgeführt, diese Begriffe werden jedoch teilweise unterschiedlich gehandhabt, und eine klare Definition der relevanten Monitoringkompartimente ist nicht gegeben. Vor diesem Hintergrund wurde innerhalb des UBA-Berichts in Zusammenhang mit einer Risikobewertung eine systematische Gliederung der zu betrachtenden Monitoringkompartimente vorgenommen, die aus der Störfallverordnung abgeleitet ist (Abbildung 1). Eine schematische Gliederung ist in Tabelle 11 gegeben, ausführliche Darstellungen finden sich im UBA-Bericht. Da es sich bei den Kompartimenten Speicherkomplex und Deckgebirge bei dieser Einteilung nur um Zusammenschlüsse aus anderen Kompartimenten handelt, die u.a. als Bezug zur EU-Richtlinie definiert wurden, sind für das Monitoring folgende Kompartimente zu betrachten:

- Bohrungen
- Speicherformation
- Rückhalteformation
- Transferpfad-Formation
- Schutzgut-Formationen
- Obertageanlage
- Untersuchungsraum

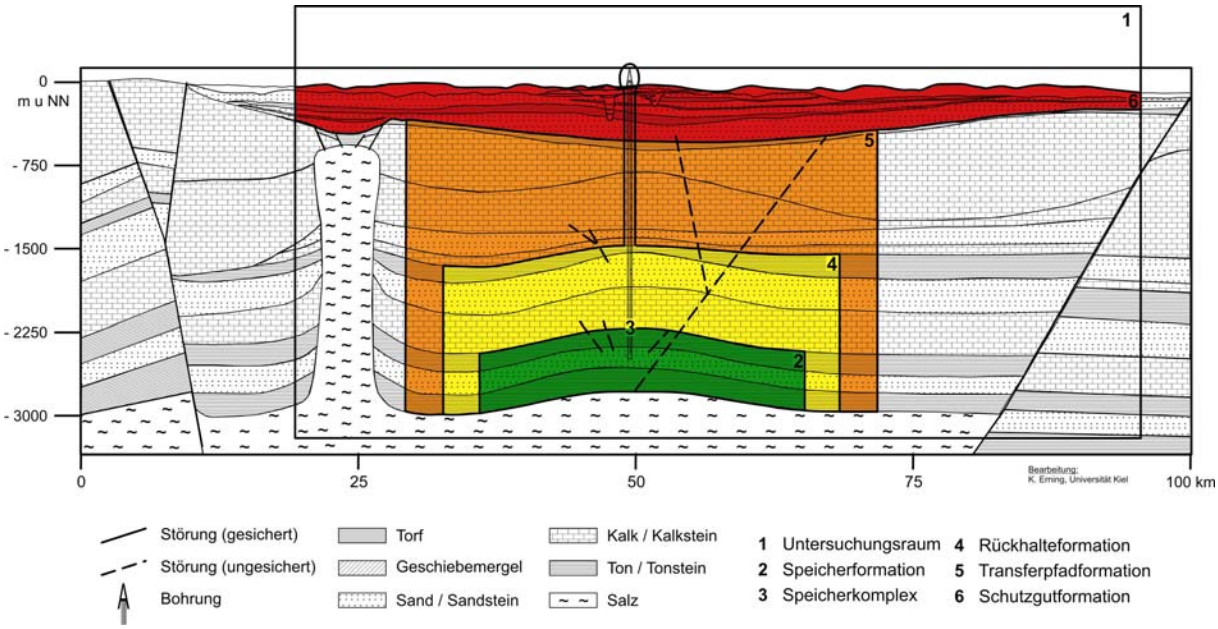



**Abbildung 1: Visualisierung der räumlichen Definitionen zur unterirdischen $CO_2$-Speicherung (hier in einer salinaren Porenformation) an einem idealisierten geologischen Profil Norddeutschlands. Die räumlichen Skalen dienen zur groben Angabe der Größe der jeweiligen Monitoringräume. (Quelle: UBA-Bericht)**

Die räumliche Ausdehnung der einzelnen Kompartimente ist auf Grundlage von Modellsimulationen festzulegen, wobei laterale Begrenzungen z.B. durch Störungen, Diskordanzen oder Salzstöcke gegeben sein können. Hierbei ist die reale, aktuelle Ausdehnung von der potentiellen, maximalen Ausdehnung der Kompartimente zu unterscheiden. Das Monitoring kann also so ausgelegt werden, dass dieses im Umfang auf die reale, aktuelle Ausdehnung fokussiert ist und im Bereich der maximalen Ausdehnung (sofern diese sich von der aktuellen unterscheidet) nur mit reduziertem Aufwand erfolgt (z.B. Baselinemessungen).

**Tabelle 11: Untergliederung unterschiedlicher Kompartimente entsprechend des UBA-Berichts.**

| **Kompartimente** | **Beschreibung** |
|---|---|
| Speicherformation | • Speichergestein + abdichtendes primäres Deckgestein |
| Rückhalteformation | • sekundäre Speicher- und Deckgesteine<br>• ein oder mehrere Rückhalteformationen möglich<br>• (Multibarrierensystem)<br>• massiver Übertritt von $CO_2$ aus der Speicher- in die Rückhalteformation ist nicht Bestandteil des bestimmungsgemäßen Betriebs, im Rahmen der Beherrschung von Störungen aber erlaubt → löst Intensivierung des Monitorings und ggf. Interventionsmaßnahmen aus |
| *Speicherkomplex* | • alle ober- und unterirdischen Anlagen (inkl. Bohrungen) + *Speicherformation* + *Rückhalteformation* |
| *Deckgebirge* | • *Rückhalteformation* + *Transferpfad-Formation* + *Grundwasser* + *Boden* |
| Transferpfad-Formation | • Liegt zw. Rückhalteformation und Schutzgütern (i.d.R. Grundwasserleiter)<br>• massiver Übertritt von $CO_2$ aus der Rückhalte- in die Transferpfad-Formation ist nicht erlaubt und stellt eine Störung dar, es resultiert jedoch kein Schaden für Schützgüter → löst Intensivierung des Monitorings und ggf. Interventionsmaßnahmen aus |
| Schutzgut-Formationen | • Schutzgüter: Grundwasser, Boden, Bausubstanz, Luft/Mensch, Flora/Fauna<br>• Gefährdungen oder Schädigungen sind vorbeugend zu vermeiden |
| Untersuchungsraum | • Raum der im bestimmungsgemäßen Betrieb signifikant in seinen physiko-chemischen Eigenschaften beeinflusst wird |

# 6 Monitoringmethoden

Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es noch keine Beispiele für bereits entwickelte oder verfügbare, der EU-Richtlinie entsprechende Monitoringpläne oder untergesetzliche Regelungen, die als Richtlinie für die Entwicklung eines Monitoringkonzepts verwendet werden könnten. Es ist bisher noch nicht absehbar, welche Anforderungen von Behörden zur Erfüllung der in der EU-Richtlinie formulierten Monitoringziele gestellt werden und ob hierbei auch an anderer Stelle (UBA, NETL) geforderte Aspekte mit zu berücksichtigen sind. Die verschiedenen Monitoringziele sind in Kapitel 4 dargestellt. Eine zentrale Aufgabe bei der Erstellung eines Monitoringkonzepts bestehen in der Wahl der jeweiligen Methoden zur Erfüllung der einzelnen Überwachungsaufgaben. In Tabelle 12 sind die wesentlichen Überwachungsmethoden für CCS und EGR zusammengestellt und nach verschiedenen Anwendungsbereichen (Atmosphäre, Bohrloch, Reservoir, etc.) gruppiert. Eine eingehende Erklärung aller Methoden mit Darstellung von Vor- und Nachteilen, Entwicklungsstand, etc. würde den Rahmen dieses Berichts sprengen. In Tabelle 12 sind deshalb ebenfalls Angaben zu weiterführender Literatur zu allen Methoden gegeben. Publikationen z.B. von NETL [2], Schilling [9, 34] und Reinicke [35] geben eine guten schnellen Überblick über Messprinzipien und Anwendungsmöglichkeiten zahlreicher Verfahren. Für eine Reihe von Methoden wurden innerhalb dieses Teilprojekts unter Mitarbeit verschiedener CLEAN-Partner auch Methoden-Steckbriefe mit wesentlichen Methodeneigenschaften (Monitoringprinzip, erforderliche Analytik, Messhäufigkeit, Messposition, Messdauer, Messbereich, Messgenauigkeit, Nachweisgrenze, Aussagereichweite, Monitoringphase, Leckagendetektierbarkeit, Entwicklungsstand, bisheriger Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten, Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen, Online-Übertragungsmöglichkeit, Vorteile, Nachteile, Bewertung, Kosten, Sonstiges/Anmerkungen, Anwendung in CLEAN, weiterführende Literatur) entwickelt. Diese Methoden-Steckbriefe sind im Anhang zu finden und stehen als Entscheidungshilfe für die Methodenauswahl bzw. für die Konzipierung von Überwachungsplänen zur Verfügung.

Obwohl die Messgenauigkeit und Nachweisgrenze für viele Methoden bekannt ist, gibt es bisher nur wenige Angaben dazu, wie groß wesentliche Beurteilungsgrößen wie z.B. Leckageraten oder $CO_2$-Gasphasenvolumen bzw. -masse sein müssten, um mit einer bestimmten Methode detektierbar zu sein. Dies resultiert daraus, dass eine solche Übersetzung methodenspezifischer Nachweisgrenzen in beurteilungsrelevante Parameter einer Reihe von Annahmen über die relevanten Prozessabläufe bedarf (z.B. über Wegsamkeiten, physikalische und geochemische Randbedingungen und Wechselwirkungen) und mit nicht unerheblichen Unsicherheiten verbunden ist. Da hier viele Faktoren ineinander greifen, ist es notwendig, für die verschiedenen Beurteilungskompartimente plausible Leckageszenarien für die Bandbreite der möglichen Randbedingungen zu entwickeln und die Auswirkungen auf die jeweiligen Messgrößen abzuschätzen. Aufgrund der Komplexität dieser Aufgabe wird eine solche Beurteilung für die meisten Methoden nur mit Hilfe numerischer Simulationen möglich sein. Weiterhin sind zukünftige Feldversuche zur Untersuchung der Sensitivitäten verschiedener Moni-

toringmethoden erforderlich. Einen Überblick über die Ergebnisse bisher durchgeführter Sensitivitätsabschätzungen gibt Tabelle 13.

Als eine weitere Entscheidungsgrundlage und eventuell als Checkliste wurde eine umfangreiche Methodenmatrix erstellt, der die methodischen Möglichkeiten zu entnehmen sind, die zu verschiedenen Monitoringaufgaben beitragen können (Tabelle 14 bis Tabelle 22). Um die Nutzbarkeit der Matrix möglichst flexibel zu halten, wurden neben den Anforderungen aus der EU-Richtlinie auch die in der UBA- und der NETL-Studie geforderten Monitoringziele getrennt mit aufgenommen, wobei sich die Ziele teilweise überschneiden. Die Matrix ist das Resultat einer umfangreichen Literaturstudie unter Einbeziehung der innerhalb des CLEAN-Projekts gemachten Erfahrungen.

Da sich zum einen einige Methoden noch im Entwicklungs- bzw. Validierungstatus befinden, sich zum anderen die Rahmenbedingungen von Standort zu Standort unterscheiden und die jeweils verantwortlichen Länderbehörden vermutlich unterschiedliche Anforderungen stellen, wurden innerhalb der Matrix keine Priorisierungen für bestimmte Methoden berücksichtigt. Empfehlungen zur Methodenauswahl für die einzelnen Monitoringkompartimente finden sich in Kapitel 7.

**Tabelle 12: Methodenübersicht für unterschiedliche Anwendungsbereiche mit Angaben zu Methodenbeschreibungen und weiterführender Literatur.**

| | | NETL [2] | Schilling, 2009 [34] | Schilling, 2011 [9] | Reinicke & Fichter [35] | EPA 2010 [14] | CLEAN-Steckbrief | Sonstige |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Atmosphärisch | $CO_2$-Detektoren (IR) | + | | | | + | | |
| | Laser Systeme und LIDAR | + | | | | + | | |
| | Eddy-Kovarianz | + | | | | + | + | [36-41] |
| | Advanced Leak Detection System | + | | | | | | [42] |
| | Isotopen (Gas, Tracer) | + | | | | + | + | [28, 43-53] |
| Oberflächennah | Isotopen (Grundwasser) | | | | | | + | [28, 43-53] |
| | Grundwassermonitoring | + | + | | | + | + | [44, 47, 48, 50, 53, 54] |
| | Flache 2D Seismik | + | | | | | | |
| | Bodenluftuntersuchungen | + | | | | | + | [52, 53, 55-64] |
| | Akkumulationskammer | + | | | | + | + | [36, 37, 39, 52, 53, 61, 62, 65-68] |
| | Tracer | + | | | | | + | [2, 53-55, 60, 69-72] |
| | Induzierte Polarisation (IP) | + | | | | | | |
| | (Spontanes) Eigenpotential | + | | | | | | |
| | Neigungsmessungen (Tiltmeter) | + | | + | | + | | [72] |
| | Analyse von Kernmaterial | | | (+) | | | | |
| | Ökosystem-Stress-Monitoring | + | + | | | | | |
| | Geodät. Vermessung (konvent.) | | + | | | + | | |
| | Inelastic Neutron Scattering | | | | | | | [53, 73-75] |
| Fernerkundung | Aeroelektromagnetik (TEM, HEM, etc.) | | | + | | | + | |
| | Fotogr. Überw. (Veg./Deform.) | | | | | + | | |
| | CIR (Color Infrared Transp.) | + | | | | + | | |
| | (In)SAR (Synth. Apert. Radar) | + | | + | | + | + | [72, 76-79] |
| | Hyperspectral Scanner/Eagle | + | | | | + | | [56, 80] |
| | ATM (Airb. thematic mapper) | | | | | | | [56] |
| | CASI2 (Compact Airb. Spec. Imager) | | | | | | | [56] |
| | Geodät. Vermessung (Satellit, GPS) | | + | + | | | | |
| | LIDAR (Light detection & ranging) | | | | | | | [56] |
| | Digitalkamera | | | | | | | [56] |
| | Schweremessungen (Flugz. o. Sat.) | | + | + | | | | |

| | | NETL [2] | Schilling, 2009 [34] | Schilling, 2011 [9] | Reinicke & Fichter [35] | EPA 2010 [14] | CLEAN-Steckbrief | Sonstige |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Reservoir und Deckgebirge | Tracer | | | | | + | + | [2, 53-55, 60, 69-72] |
| | Gravimetrische Methoden | + | + | + | | + | | |
| | Seismik (2D, 3D, VSP, MSP, … ) | + | + | + | | + | + | |
| | Druck in Aquiferen | | + | | | | | [22, 81-83] |
| | Fluidanalysen (geochem, etc.) | + | + | + | | + | | |
| | Gasanalysen (z.B. GMS) | + | + | + | | | + | |
| | Mikroseismik | + | +? | + | | + | | |
| | EMIT (Elektromagn. Indukt.) | + | + | + | | | + | [55, 84, 85] |
| | Elektromagnetik | + | + | + | | | | [72] |
| | ERT (El. Widerstanstomographie) | + | + | + | | | + | [55, 70, 86-89] |
| | Magnetotellur. Sondierungen | + | | + | | | | |
| | Analyse von Kernmaterial | | | + | | | | |
| Bohrloch/Loggingverfahren | Injektionsrate und -volumen | | + | | | | | |
| | Druck am Bohrlochkopf | | | | | | | [83] |
| | Druck im Ringraum (kontinuierlich) | + | | | + | | | |
| | Ringraumdrucktest | + | | | + | + | | |
| | Mechanischer Integritätstest | | | | | + | | [90] |
| | Formationsdruck(/Reservoirdr.) | | + | | | | | [72, 83, 91] |
| | Crosswellseismik | + | + | + | | + | | [72, 83] |
| | Cement Bond Logs (Ultrasonic) | + | | | + | + | | |
| | Temperatur-Logging | | + | | + | + | + | [91] |
| | Reservoirsättigungsmessung (Pulsed Neutron Capture Logs, PNC) | + | | | (+) | | | [54, 91, 92] |
| | Widerstandslogs | + | + | + | | | | [83] |
| | Optisches Logging | + | | | | | | |
| | Schall-Logging (Noise, Sonic) | + | + | + | | + | | [83] |
| | RHOB (Dichte Logs) | + | | | | | | |
| | Gamma-Ray Logging | + | | + | | | | |
| | Kaliberlog | | + | + | | + | | |
| | Magn. Field und Magn. Susceptibility Logs | | | + | | | | |
| | Isolation Scanner | | | | + | | | |
| | Mudlogging (p, T, el. Leitf.) | | + | + | | + | | |
| | NMR-Logging (Nukleare Magn. Resonanz) | | | + | | | | |
| | Hydro-Frac (Gesteinsfestig.,Spannungsfeld) | | + | + | | | | |
| | Radioaktive Tracermessungen | | | | | | | [7] |
| | Oxygen Activation-Log | | | | | | | [7] |

**Tabelle 13: Sensitivitäten von Messmethoden.**

| Methode | Nachweisgrenze | Genauigkeit | Quellen |
|---|---|---|---|
| $CO_2$-Detektoren (atmosphärisch) | | 0,2 ppm bei 350 ppm Hinter-grund | [28] |
| Akkumulationskammer | 0,46 µg $(m^2)^{-1}$ $s^{-1}$ | 10% des $CO_2$-Flusses | [2, 28] |
| Eddy-Kovarianz | 10 µg $(m^2)^{-1}$ $s^{-1}$ | 5-30% des $CO_2$-Flusses | [2, 19, 28] |
| | 300 kg $d^{-1}$ | | [39] |
| Raman LIDAR und DIAL | 1 ppm | 1-5% der $CO_2$-Konzentration | [2, 28] |
| Drucksensoren | 0,1 psi Druckän-derung | | [2, 19] |
| | Änderung des $CO_2$-Flusses um 200 t/d in 1 km Abstand | | [81] |
| 3-D-Seismik | $CO_2$-Anreicherungen von 1-10 kt | ±20% der $CO_2$-Plumegröße | [2, 19] |

**Tabelle 14: Untersuchungsmethoden die in der Atmosphäre oder oberflächennah zum Erreichen der in der EU-Richtlinie genannten Monitoringziele beitragen können.**

| | | **Atmosphärisch** | | | | | **Oberflächennah** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bezug Kap.xy | **Ziele entsprechend der EU-Richtlinie**<br><br>(ausführliche Beschreibung der einzelnen Ziele s. Kapitel xy) | $CO_2$-Detektoren | Laser-Systeme und LIDA | Eddy-Kovarianz | Advanced Leak Detection System | Tracer / Isotopen | Chem. Injektionsfluidanalyse | Grundwassermonitoring | Flache 2D Seismik | Bodenluftuntersuchungen | Akkumulationskammer | Tracer | Leitfähigkeit (Geophysikal.) | Induzierte Polarisation | (Spontanes) Eigenpotential | Tiltmeter | Analyse von Kernmaterial | Ökosystem-Stress-Monitoring | Geodät. Vermessung (konvent.) | Inelastic Neutron Scattering | | | | | | |
| I-a | Vgl. Modell/$CO_2$-Formationswasser | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-b | Erhebliche Unregelmäßigkeiten | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | (+) | (+) | + | - | + | + | + | | | | | | |
| I-c | Feststellung $CO_2$-Migration | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-d | Feststellung $CO_2$-Leckagen | + | + | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | - | - | + | - | + | | | | | | |
| I-e | Feststt. neg. Auswirkungen Umgebung | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | + | + | | | | | | |
| I-f | Bewert. Wirksamkeit v. Abhilfemaßn. | + | + | + | (+) | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | - | - | (+) | - | + | | | | | | |
| I-g | Akual. d. Bewert. d. Speicherunversehrtheit | (+) | (+) | (+) | - | (+) | - | + | + | (+) | (+) | (+) | + | + | (+) | - | - | (+) | - | (+) | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| I-h | $CO_2$-Emissionen i.d. Injektionsanlage | + | + | (-) | - | (-) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-i | Volum. $CO_2$-Fluss an den Bohrlochköpfen | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-j | p/T des $CO_2$ an Injektionsköpfen (Massenfl.) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-k | Chem. Analysen des Injizierten $CO_2$ | - | - | - | - | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-l | Lagerstättentemp und -druck | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |

Tabelle 15: Untersuchungsmethoden die in der Atmosphäre oder oberflächennah zum Erreichen der in der UBA-CCS-Studie genannten Monitoringziele beitragen können.

| | | **Atmosphärisch** | | | | | **Oberflächennah** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bezug Kap.xy | **Ziele der UBA-CCS-Studie**<br><br>(ausführliche Beschreibung der einzelnen Ziele s. Kapitel xy) | $CO_2$-Detektoren | Laser-Systeme und LIDA | Eddy-Kovarianz | Advanced Leak Detection System | Tracer / Isotopen | Chem. Injektionsfluidanalyse | Grundwassermonitoring | Flache 2D Seismik | Bodenluftuntersuchungen | Akkumulationskammer | Tracer | Leitfähigkeit (Geophysikal.) | Induzierte Polarisation | (Spontanes) Eigenpotential | Tiltmeter | Analyse von Kernmaterial | Ökosystem-Stress-Monitoring | Geodät. Vermessung (konvent.) | Inelastic Neutron Scattering | | | | | | |
| II-a | Landhebung/Landsenkung | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | + | - | | | | | | |
| II-b | Grundwasserbeeinfl., Formationswasseraufstieg | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | + | + | + | + | - | - | + | - | - | | | | | | |
| II-c | Leckage anderer Gase in Schutzgüter (z.B. $CH_4$) | - | (+) | + | + | + | - | + | - | + | + | - | - | - | - | - | - | + | - | + | | | | | | |
| II-d | Erhöhte Seismizität | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | | | | | | |
| II-e | $CO_2$-Austritt aus Bohrungen (GW, Atmosphäre) | + | + | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | - | - | + | - | + | | | | | | |
| II-f | Freisetzung aus Obertageeinrichtungen | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | (+) | - | - | | | | | | |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus Speicher in Schutzgüter | + | + | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | - | - | + | - | + | | | | | | |
| II-h | Unbeabsicht. spätere $CO_2$-Speichererschließung | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| II-i | Druckausbreitung im ges. Untersuchungsraum | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | | | | | | |
| II-j | Bildung neuer Wegsamkeiten (Störungen) | - | - | - | - | - | - | (+) | + | - | (+) | + | + | + | + | + | - | - | - | - | | | | | | |
| II-k | Migration $CO_2$-Phasenkörper (Speicherformat.) | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| II-l | Erfassung gelöster $CO_2$-Masse (Speicherformat.) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| II-m | Migration des Formationswassers (Speicherfor.) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| II-n | $CO_2$-Leckage in Rückhalteformation | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| II-o | $CO_2$-Leckage in Transferpfadformation | - | - | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | | | | | | |

**Tabelle 16: Untersuchungsmethoden die in der Atmosphäre oder oberflächennah zum Erreichen der in der NETL-Studie genannten Monitoringziele beitragen können.**

| | | **Atmosphärisch** | | | | | **Oberflächennah** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bezug Kap.xy | **Ziele aus NETL**<br><br>(ausführliche Beschreibung der einzelnen Ziele s. Kapitel xy) | $CO_2$-Detektoren | Laser-Systeme und LIDA | Eddy-Kovarianz | Advanced Leak Detection System | Tracer / Isotopen | Chem. Injektionsfluidanalyse | Grundwassermonitoring | Flache 2D Seismik | Bodenluftuntersuchungen | Akkumulationskammer | Tracer | Leitfähigkeit (Geophysikal.) | Induzierte Polarisation | (Spontanes) Eigenpotential | Tiltmeter | Analyse von Kernmaterial | Ökosystem-Stress-Monitoring | Geodät. Vermessung (konvent.) | Inelastic Neutron Scattering | | | | | | |
| III-a | Ausgangsbed. z. Beurteilg. $CO_2$-Einfluss | + | + | + | - | + | - | + | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | | | |
| III-b | Überw. Planmäßigkeit Injektionsprozess | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| III-c | $CO_2$-Lage und –Ausdehnung im Reservoir | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | (+) | - | | | | | | |
| III-d | Reservoirdichtigkeit und Leckagenfreiheit | (+) | (+) | (+) | - | (+) | - | + | + | (+) | (+) | + | + | + | + | - | - | (+) | - | (+) | | | | | | |
| III-e | Bohrlochintegrität | (-) | (-) | (-) | - | (-) | - | (+) | (-) | - | - | - | (-) | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| III-f | Identifizierg. u. Nachw. d. Speicherprozesse | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | | | | | | |
| III-g | Kalibrierung u. Nachjust. d. Modellsim. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - | (+) | - | | | | | | |
| III-h | Detektion und Quantifizierungen v. $CO_2$-Austritten in die Atmosphäre | + | + | + | + | + | - | (-) | - | (+) | + | - | - | - | - | - | - | + | - | + | | | | | | |
| III-i | Überw. d. Auswirkungen pot. Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit | + | + | + | + | - | - | + | - | + | + | - | - | - | - | + | + | + | + | + | | | | | | |
| III-j | Überwachung Mikroseismizität | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| III-k | Charakterisierung v. $CO_2$-Austritten | + | + | + | (+) | + | - | + | + | + | + | (+) | - | - | - | - | - | (+) | - | + | | | | | | |
| III-l | Nachweis/Dokumentation f. Emissionsziele | - | - | - | - | - | (+) | (+) | (+) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| III-m | Nutzungskonfl. m. anderen geol. Ressourcen | - | - | - | - | - | - | (+) | - | - | - | - | (+) | (+) | (+) | - | + | - | + | - | | | | | | |
| III-n | Beurteilungsgrundlage f. Rechtsfragen | (+) | (+) | (+) | - | (+) | (-) | + | (-) | + | (+) | (+) | (+) | (+) | (+) | + | (+) | (+) | + | (-) | | | | | | |
| III-o | Verbesserung öffentlicher Akzeptanz | + | + | + | + | + | (-) | + | (+) | + | + | + | + | (+) | (+) | + | (+) | + | + | (+) | | | | | | |

Tabelle 17: Untersuchungsmethoden die durch Fernerkundung oder im Reservoir und im Deckgebirge zum Erreichen der in der EU-Richtlinie genannten Monitoringziele beitragen können.

| | | **Fernerkundung** | | | | | | | | | | **Reservoir und Deckgebirge** | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bezug Kap.xy | **Ziele entsprechend der EU-Richtlinie**<br><br>(ausführliche Beschreibung der einzelnen Ziele s. Kapitel xy) | Fotogr. Überw. (Veg./Deform.) | CIR (Color Infrared Transp.) | (In)SAR (Synth. Apert. Radar) | Hyperspectral Scanner/Eagle | ATM (Airb. Thematic mapper) | CASI2 (Comp. Airb. Spec. Imag.) | Geodät. Vermessung (Satellit) | LIDAR (Light detect. & rang.) | AEM (Aeroelektromagnetik) | Gravimetrische Methoden | Seismik (2D, 3D, VSP, ... ) | Mikroseismik | Fluidanalysen (geochem etc.) | Gasanalysen (z.B. GMS) | Druck im 1. Aquifer über Caprock | Tracer | EMIT (Elektromagn. Indukt.) | ERT (Electr. Resistivity Tomogr.) | Magnetotellur. Sondierungen | Zeitaufgel. Gravitationsmess. | | | | | | |
| I-a | Vgl. Modell/$CO_2$-Formationswasser | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | + | + | - | + | + | + | + | | | | | | | |
| I-b | Erhebliche Unregelmäßigkeiten | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | | | | |
| I-c | Feststellung $CO_2$-Migration | - | - | - | - | - | - | (+) | - | - | + | + | + | + | + | (+) | - | + | + | + | | | | | | | |
| I-d | Feststellung $CO_2$-Leckagen | + | + | - | + | + | + | (-) | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | | | | |
| I-e | Feststt. neg. Auswirkungen Umgebung | + | + | + | + | (-) | + | + | - | - | - | - | - | + | + | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| I-f | Bewert. Wirksamkeit v. Abhilfemaßn. | + | + | - | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | (+) | + | + | + | | | | | | | |
| I-g | Akual. d. Bewert. d. Speicherunversehrtheit | + | + | - | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | (+) | + | + | + | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| I-h | $CO_2$-Emissionen i.d. Injektionsanlage | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | | | | | | | |
| I-i | Volum. $CO_2$-Fluss an den Bohrlochköpfen | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| I-j | p/T des $CO_2$ an Injektionsköpfen (Massenfl.) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| I-k | Chem. Analysen des Injizierten $CO_2$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| I-l | Lagerstättentemp und –druck | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | (+) | - | - | - | - | | | | | | | |

Tabelle 18: Untersuchungsmethoden die durch Fernerkundung oder im Reservoir und im Deckgebirge zum Erreichen der in der UBA-CCS-Studie genannten Monitoringziele beitragen können.

| | | **Fernerkundung** | | | | | | | | | | **Reservoir und Deckgebirge** | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bezug Kap.xy | **Ziele der UBA-CCS-Studie**<br><br>(ausführliche Beschreibung der einzelnen Ziele s. Kapitel xy) | Fotogr. Überw. (Veg./Deform.) | CIR (Color Infrared Transp.) | (In)SAR (Synth. Apert. Radar) | Hyperspectral Scanner/Eagle | ATM (Airb. Thematic mapper) | CASI2 (Comp. Airb. Spec. Imag.) | Geodät. Vermessung (Satellit) | LIDAR (Light detect. & ranging) | AEM (Aeroelektromagnetik) | Gravimetrische Methoden | Seismik (2D, 3D, VSP, ... ) | Mikroseismik | Fluidanalysen (geochem etc.) | Gasanalysen (z.B. GMS) | Druck im 1. Aquifer über Caprock | Tracer | EMIT (Elektromagn. Indukt.) | ERT (Electr. Resistivity Tomogr.) | Magnetotellur. Sondierungen | | | | | | |
| II-a | Landhebung/Landsenkung | + | - | + | - | - | - | + | - | - | - | + | + | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| II-b | Grundwasser, Aufstieg von Formationswasser | + | + | - | + | - | + | - | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | | | |
| II-c | Leckage anderer Gase in Schutzgüter (z.B. $CH_4$) | (+) | (+) | - | (+) | - | (+) | - | (+) | + | + | + | + | + | + | + | - | + | + | + | | | | | | |
| II-d | Erhöhte Seismizität | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | + | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| II-e | $CO_2$-Austritt aus Bohrungen (GW, Atmosphäre) | + | + | - | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | (+) | | | | | | |
| II-f | Freisetzung aus Obertageeinrichtungen | + | + | - | + | - | + | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus Speicher in Schutzgüter | + | + | - | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | | | |
| II-h | Unbeabsicht. spätere $CO_2$-Speichererschließung | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| II-i | Druckausbreitung im ges. Untersuchungsraum | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | | | | | | |
| II-j | Bildung neuer Wegsamkeiten (Störungen) | - | - | (+) | - | - | - | - | - | - | - | + | + | - | - | + | + | + | + | + | | | | | | |
| II-k | Migration $CO_2$-Phasenkörper (Speicherformat.) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | + | + | - | + | + | + | + | | | | | | |
| II-l | Erfassung gelöster $CO_2$-Masse (Speicherformat.) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | + | + | + | | | | | | |
| II-m | Migration des Formationswassers (Speicherfor.) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | + | + | + | + | | | | | | |
| II-n | $CO_2$-Leckage in Rückhalteformation | - | - | - | - | - | - | - | - | - | (+) | + | + | + | + | - | + | + | + | + | | | | | | |
| II-o | $CO_2$-Leckage in Transferpfadformation | - | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | | | |

**Tabelle 19: Untersuchungsmethoden die durch Fernerkundung oder im Reservoir und im Deckgebirge zum Erreichen der in der NETL-Studie genannten Monitoringziele beitragen können.**

| | | **Fernerkundung** | | | | | | | | | | **Reservoir und Deckgebirge** | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bezug Kap.xy | **Ziele aus NETL**<br><br>(ausführliche Beschreibung der einzelnen Ziele s. Kapitel xy) | Fotogr. Überw. (Veg./Deform.) | CIR (Color Infrared Transp.) | (In)SAR (Synth. Apert. Radar) | Hyperspectral Scanner/Eagle | ATM (Airb. thematic mapper) | CASI2 (Comp. Airb. Spec. Imag.) | Geodät. Vermessung (Satellit) | LIDAR (Light detect. & rang.) | AEM (Aeroelektromagnetik) | Gravimetrische Methoden | Seismik (2D, 3D, VSP, ...) | Mikroseismik | Fluidanalysen (geochem etc.) | Gasanalysen (z.B. GMS) | Druck im 1. Aquifer über Caprock | Tracer | EMIT (Elektromagn. Indukt.) | ERT (Electr. Resistivity Tomogr.) | Magnetotellur. Sondierungen | Zeitaufgel. Gravitationsmess. | | | | | |
| III-a | Ausgangsbed. z. Beurteilg. $CO_2$-Einfluss | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | | + | + | + | | | | | | |
| III-b | Überw. Planmäßigkeit Injektionsprozess | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - | - | - | | | | | | |
| III-c | $CO_2$-Lage und –Ausdehnung im Reservoir | - | - | - | - | - | - | (-) | - | - | + | + | + | + | + | - | | + | + | + | | | | | | |
| III-d | Reservoirdichtigkeit und Leckagenfreiheit | (+) | (+) | - | (+) | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | | + | + | + | | | | | | |
| III-e | Bohrlochintegrität | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - | - | - | | | | | | |
| III-f | Identifizierg. u. Nachw. d. Speicherprozesse | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | + | - | | + | + | + | | | | | | |
| III-g | Kalibrierung u. Nachjust. d. Modellsim. | (+) | - | (+) | - | - | - | - | - | - | + | + | + | + | + | - | | + | + | + | | | | | | |
| III-h | Detektion und Quantifizierungen v. $CO_2$-Austritten in die Atmosphäre | + | + | - | + | + | + | - | + | - | - | - | - | - | - | - | | (+) | (+) | (+) | | | | | | |
| III-i | Auswirkungen potentieller Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit | + | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | | - | - | - | | | | | | |
| III-j | Überwachung Mikroseismizität | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | | - | - | - | | | | | | |
| III-k | Charakterisierung v. $CO_2$-Austritten | (+) | (+) | - | (+) | + | + | - | + | - | - | - | - | - | - | - | | - | - | - | | | | | | |
| III-l | Nachweis/Dokumentation f. Emissionszielen | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | (+) | | - | - | - | | | | | | |
| III-m | Nutzungskonfl. m. anderen geol. Ressourcen | - | - | (+) | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | (+) | (+) | | + | + | (+) | | | | | | |
| III-n | Beurteilungsgrundlage f. Rechtsfragen | + | + | + | + | + | + | + | + | + | - | (+) | (+) | + | (+) | (+) | | + | + | (+) | | | | | | |
| III-o | Verbesserung öffentlicher Akzeptanz | + | + | + | + | + | + | + | + | + | (+) | + | + | + | + | + | | + | + | + | | | | | | |

Tabelle 20: Untersuchungsmethoden die innerhalb von Bohrungen zum Erreichen der in der EU-Richtlinie genannten Monitoringziele beitragen können.

| | | Bohrung / Loggingverfahren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bezug Kap.xy | **Ziele entsprechend der EU-Richtlinie**<br><br>(ausführliche Beschreibung der einzelnen Ziele s. Kapitel xy) | Druck am Bohrlochkopf | Druck im Ringraum | Reservoirdruck/Formationsdruck | Druck im 1. Aquif. ü. Caprock | Injektionsrate und -volumen | Ringraumdrucktest | Ringraum-Drucküberwachung | Crosswellseismik | Cement Bond Logs (Ultrasonic) | Temperatur-Logging | Reservoirsättigungsmessung (PNC) | Widerstandslogs | Optisches Logging | Noise-Logging | RHOB (Dichte Logs) | Gamma-Ray Logging | Isolation-Scanner | | | | | | |
| I-a | Vgl. Modell/$CO_2$-Formationswasser | - | - | + | - | - | - | - | + | - | - | + | + | - | - | + | - | - | | | | | | |
| I-b | Erhebliche Unregelmäßigkeiten | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | - | + | | | | | | |
| I-c | Feststellung $CO_2$-Migration | - | - | + | - | - | - | - | + | - | - | + | + | - | - | + | - | - | | | | | | |
| I-d | Feststellung $CO_2$-Leckagen | + | + | + | + | - | + | + | + | - | + | + | + | (+) | + | + | - | - | | | | | | |
| I-e | Feststst. neg. Auswirkungen Umgebung | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-f | Bewert. Wirksamkeit v. Abhilfemaßn. | + | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | (+) | + | + | - | + | | | | | | |
| I-g | Akual. d. Bewert. d. Speicherunversehrtheit | + | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | - | + | + | - | - | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| I-h | $CO_2$-Emissionen i.d. Injektionsanlage | + | + | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-i | Volum. $CO_2$-Fluss an den Bohrlochköpfen | + | + | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-j | p/T des $CO_2$ an Injektionsköpfen (Massenfl.) | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-k | Chem. Analysen des Injizierten $CO_2$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| I-l | Lagerstättentemp und –druck | - | - | + | (+) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |

**Tabelle 21: Untersuchungsmethoden die innerhalb von Bohrungen zum Erreichen der in der UBA-CCS-Studie genannten Monitoringziele beitragen können.**

| | | Bohrung / Loggingverfahren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bezug Kap.xy | **Ziele der UBA-CCS-Studie**<br><br>(ausführliche Beschreibung der einzelnen Ziele s. Kapitel xy) | Druck am Bohrlochkopf | Druck im Ringraum | Reservoirdruck/Formationsdruck | Druck im 1. Aquif. ü. Caprock | Injektionsrate und -volumen | Ringraumdrucktest | Ringraum-Drucküberwachung | Crosswellseismik | Cement Bond Logs (Ultrasonic) | Temperatur-Logging | Reservoirsättigungsmessung (PNC) | Widerstandslogs | Optisches Logging | Noise-Logging | RHOB (Dichte Logs) | Gamma-Ray Logging | Isolation-Scanner | | | | | | | |
| II-a | Landhebung/Landsenkung | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| II-b | Grundwasser, Aufstieg von Formationswasser | + | + | + | + | - | - | + | (+) | - | + | + | + | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| II-c | Leckage anderer Gase in Schutzgüter (z.B. $CH_4$) | + | - | + | + | - | - | + | + | - | + | + | + | - | - | + | - | - | | | | | | | |
| II-d | Erhöhte Seismizität | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| II-e | $CO_2$-Austritt aus Bohrungen (GW, Atmosphäre) | + | + | + | + | + | + | + | + | (+) | + | + | + | + | + | + | - | (+) | | | | | | | |
| II-f | Freisetzung aus Obertageeinrichtungen | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus Speicher in Schutzgüter | + | - | + | + | + | - | - | + | - | - | - | + | - | - | + | - | - | | | | | | | |
| II-h | Unbeabsicht. spätere $CO_2$-Speichererschließung | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| II-i | Druckausbreitung im ges. Untersuchungsraum | - | - | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| II-j | Bildung neuer Wegsamkeiten (Störungen) | + | - | + | + | + | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| II-k | Migration $CO_2$-Phasenkörper (Speicherformat.) | + | - | + | - | - | - | - | + | - | + | + | + | - | - | + | - | - | | | | | | | |
| II-l | Erfassung gelöster $CO_2$-Masse (Speicherformat.) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| II-m | Migration des Formationswassers (Speicherfor.) | + | - | + | - | - | - | - | (+) | - | - | - | + | - | - | (+) | - | - | | | | | | | |
| II-n | $CO_2$-Leckage in Rückhalteformation | + | - | + | - | + | - | - | + | - | + | + | + | - | - | + | - | - | | | | | | | |
| II-o | $CO_2$-Leckage in Transferpfadformation | (+) | - | + | + | + | - | - | + | - | + | + | + | - | - | + | - | - | | | | | | | |

**Tabelle 22: Untersuchungsmethoden die innerhalb von Bohrungen zum Erreichen der in der NETL-Studie genannten Monitoringziele beitragen können.**

| | | Bohrung / Loggingverfahren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bezug Kap.xy | **Ziele aus NETL**<br><br>(ausführliche Beschreibung der einzelnen Ziele s. Kapitel xy) | Druck am Bohrlochkopf | Druck im Ringraum | Reservoirdruck/Formationsdruck | Druck im 1. Aquif. ü. Caprock | Injektionsrate und -volumen | Ringraumdrucktest | Ringraum-Drucküberwachung | Crosswellseismik | Cement Bond Logs (Ultrasonic) | Temperatur-Logging | Reservoirsättigungsmessung (PNC) | Widerstandslogs | Optisches Logging | Noise-Logging | RHOB (Dichte Logs) | Gamma-Ray Logging | Isolation-Scanner | | | | | | | |
| III-a | Ausgangsbed. z. Beurteilg. $CO_2$-Einfluss | - | - | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | (+) | + | | | | | | | |
| III-b | Überw. Planmäßigkeit Injektionsprozess | + | + | + | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| III-c | $CO_2$-Lage und –Ausdehnung im Reservoir | - | - | + | - | - | - | - | + | - | - | + | + | - | - | + | - | - | | | | | | | |
| III-d | Reservoirdichtigkeit und Leckagenfreiheit | - | - | + | + | - | - | - | + | - | - | + | + | - | + | + | - | - | | | | | | | |
| III-e | Bohrlochintegrität | + | + | - | - | (+) | + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | - | + | | | | | | | |
| III-f | Identifizierg. u. Nachw. d. Speicherprozesse | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| III-g | Kalibrierung u. Nachjust. d. Modellsim. | - | - | + | - | - | - | - | + | - | - | + | + | - | - | + | - | - | | | | | | | |
| III-h | Detektion und Quantifizierungen v. $CO_2$-Austritten in die Atmosphäre | (+) | (+) | - | - | - | - | - | - | - | (+) | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| III-i | Auswirkungen potentieller Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| III-j | Überwachung Mikroseismizität | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| III-k | Charakterisierung v. $CO_2$-Austritten | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| III-l | Nachweis/Dokumentation f. Emissionszielen | + | + | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| III-m | Nutzungskonfl. m. anderen geol. Ressourcen | - | - | + | + | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| III-n | Beurteilungsgrundlage f. Rechtsfragen | + | + | + | + | + | + | + | + | - | + | + | + | + | + | + | - | + | | | | | | | |
| III-o | Verbesserung öffentlicher Akzeptanz | + | + | + | + | (+) | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | - | + | | | | | | | |

# 7 Standortunabhängige Monitoringempfehlungen

Da viele der in Kapitel 4 dargestellten Monitoringziele insbesondere die der EU-Richtlinie sehr allgemein und unspezifisch gehalten sind, für das Erreichen der Monitoringziele weitgehend keine Methoden vorgeschrieben sind und teilweise mehrere Methoden in Frage kommen (vgl.Kapitel 6), werden in diesem Kapitel Empfehlungen zur Methodenauswahl gegeben. Viele der Methoden können einen Beitrag zu verschiedenen Monitoringzielen leisten, ihr Einsatzbereich fokussiert sich häufig jedoch auf ein spezielles Monitoringkompartiment wie z.B. die Speicherformation, das Grundwasser oder die Atmosphäre. Auch aus diesem Grunde wurden die Monitoringempfehlungen für die in Kapitel 7 erläuterten Kompartimente Bohrlöcher, Speicherformation, Rückhalteformation, Transferpfadformation und für die Schutzgüter Grundwasser, Bodenzone, Luft sowie Flora und Fauna zusammengestellt. Aufgrund der zahlreichen Ziele, die sich häufig auch überschneiden, wären Empfehlungen zu den einzelnen Zielen zu unübersichtlich und nur wenig hilfreich.

Da Monitoringkonzepte bzw. die in der EU-Richtlinie geforderten Monitoringpläne immer die spezifischen Gegebenheiten der jeweiligen Standorte und die aus der Modellierung erhaltenen Kenntnisse über zu erwartende Verhalten eines $CO_2$-Speichers zu berücksichtigen haben und nicht im Ganzen übertragbar sind, werden innerhalb dieses Kapitels standortunabhängige, allgemeingültige Empfehlungen dargestellt. Die zusammengestellten Informationen sollen Projektverantwortlichen wie Projektmanagern oder Behörden einen leichteren Überblick über die für die einzelnen Kompartimente zu beachtenden Anforderungen sowie die hierfür zur Verfügung stehenden Mittel geben, um hierauf aufbauend eine standortspezifische Auswahl und eine spezielle Auslegung der jeweiligen Methodenanwendungen vornehmen zu können.

Die Empfehlungen sind unterteilt in ein Basismonitoring, das Bestandteil eines jeden Monitoringkonzeptes sein sollte und im Idealfall ausreichen kann, die vorgegebenen Anforderungen zu erfüllen, und in ein erweitertes Monitoring. Für das als obligatorisch betrachtete Basismonitoring wurden nach Möglichkeit nur dem Stand der Technik entsprechende Technologien berücksichtigt, für die es bereits - zumindest in anderen Einsatzbereichen - langjährige Erfahrungen und Kenntnisse über deren Sensitivität gibt, und die auch in bisherigen CCS-Pilotprojekten zum Einsatz kamen. Das Basismonitoring ist dafür ausgelegt, den bestimmungsgemäßen Betrieb eines $CO_2$-Speichers bzw. einer EGR-Maßnahme zu verifizieren und um Anzeichen für Abweichungen davon erkennen zu können. Die Messergebnisse einer Methode alleine reichen häufig nicht aus, um mit hoher Sicherheit beurteilen zu können, ob unerwartete Messwerte ein Abweichen vom bestimmungsgemäßen Betrieb anzeigen, oder es sich um tolerierbare Schwankungen des Messparameters handelt. Innerhalb eines Monitoringkonzepts ist es deshalb anzustreben, dass sich ein relevantes Ereignis möglichst durch mindestens zwei unterschiedliche Methoden detektieren lässt. Hierzu können die Standard-

methoden des Basismonitorings auch um optionale Methoden des erweiterten Monitorings ergänzt werden.

Treten während des Basismonitorings Hinweise auf, die möglicherweise durch ein Abweichen vom bestimmungsgemäßen Betrieb verursacht worden sein könnten, so ist das Monitoring im Rahmen eines erweiterten Monitorings zu intensivieren. Dies kann einerseits eine Intensivierung der bereits eingesetzten Methoden durch zeitlich oder räumlich verdichtende Messungen, eine eingehendere Auswertung der bereits vorliegenden Messergebnisse oder eine Hinzunahme zusätzlicher Messmethoden beinhalten. So lange die Ursachen für die Abweichungen nicht geklärt sind und eine Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb nicht auszuschließen ist, ist die Injektion zunächst zu stoppen, um einen weiteren Druckaufbau und somit potentielle Gefährdungen zu begrenzen.

Bei den optionalen Methoden des erweiterten Monitorings sind ebenfalls etablierte Technologien vertreten, zu einem Großteil handelt es sich hier jedoch um Methoden, deren Praxistauglichkeit im Bereich CCS/EGR erst noch zu zeigen ist. Einige von ihnen verfügen über ein großes Anwendungspotential und könnten im Falle positiver Entwicklungen z.B. im Rahmen von Pilotprojekten in Zukunft auch einen Bestandteil des Basismonitorings darstellen.

In den nachfolgenden Kapiteln ist für jedes Monitoringkompartiment einzeln aufgelistet, zu welchen Monitoringzielen das Monitoring des jeweiligen Kompartiments beitragen kann und welche Methoden dazu für das Basismonitoring und das erweiterte Monitoring zur Verfügung stehen. Es werden jeweils nur die Monitoringaktivitäten dargestellt, die zur Überwachung des jeweiligen Kompartiments eingesetzt werden können. Zum Bohrungsmonitoring werden also nur die Methoden zur Überwachung der Bohrungen erläutert. Methoden, die zwar in bzw. von Bohrungen aus anwendbar sind, jedoch zur Überwachung anderer Kompartimente (z.B. Speicherformation, Rückhalteformation, usw.) dienen, werden in den entsprechenden Kapiteln behandelt. Auf das Basismonitoring wird jeweils näher eingegangen. Einen zusammenfassenden Überblick liefern Tabelle 23 bis Tabelle 25. Nähere Hinweise zu den einzelnen Methoden finden sich in Kapitel 6.

**Tabelle 23: Für das obligatorische Basismonitoring (●) und ein erweitertes optionales Monitoring (+) der einzelnen Kompartimente zur Verfügung stehende Methoden. 1. An der Atmosphäre und oberflächennah einzusetzende Methoden.**

| | Methode \ Zu überwachendes Monitoring-kompartiment | Offene Bohrungen | Verfüllte Bohrungen | Speicherformation | Rückhalte- und Transferpfadformation | Grundwasser (Schutzgut) | Bodenzone (Schutzgut) | Luft (Schutzgut) | Flora und Fauna (Schutzgut) | Bausubstanz (Schutzgut) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Atmosphärisch | $CO_2$-Detektoren (IR) | + | ● | | | | + | + | | |
| | Laser Systeme und LIDAR | + | + | | | | | + | | |
| | Eddy-Kovarianz | + | + | | | | | + | | |
| | Advanced Leak Detection System | | | | | | | + | | |
| | Isotopen (Gas, Tracer) | + | + | | | | + | + | | |
| Oberflächennah | Isotopen (Grundwasser) | + | + | | | + | | | | |
| | Grundwassermonitoring | + | ● | | | ● | | | | |
| | Flache 2D Seismik | | | | + | + | | | | |
| | Bodenluftuntersuchungen | | | | | | + | | | |
| | Akkumulationskammer | | | | | | + | + | | |
| | Tracer | + | + | | | + | + | | | |
| | Induzierte Polarisation (IP) | | | | + | + | | | | |
| | (Spontanes) Eigenpotential | | | | | + | | | | |
| | Neigungsmessungen (Tiltmeter) | | | ● | ● | | | | | |
| | Analyse von Kernmaterial | | | + | + | + | | | | |
| | Ökosystem-Stress-Monitoring | | | | | | + | | + | |
| | Geodät. Vermessung (konvent.) | | | ●* | ●* | | | | | + |
| | Inelastic Neutron Scattering | | | | | | + | | | |

*) für das obligatorische Basismonitoring ist eine der mit * gekennzeichneten Methoden ausreichend (s. auch Tabelle 24)

**Tabelle 24: Für das obligatorische Basismonitoring (●) und ein erweitertes optionales Monitoring (+) der einzelnen Kompartimente zur Verfügung stehende Methoden. 2. Mittels Fernerkundung sowie im Reservoir und Deckgebirge einzusetzende Methoden.**

| | Methode \ Zu überwachendes Monitoring-kompartiment | Offene Bohrungen | Verfüllte Bohrungen | Speicherformation | Rückhalte- und Transferpfadformation | Grundwasser (Schutzgut) | Bodenzone (Schutzgut) | Luft (Schutzgut) | Flora und Fauna (Schutzgut) | Bausubstanz (Schutzgut) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fernerkundung | Aeroelektromagnetik (TEM, HEM, etc.) | + | + | | | + | | | | |
| | CIR (Color Infrared Transp.) | | | | | | + | + | + | |
| | (In)SAR (Synth. Apert. Radar) | | | ●* | ●* | | | | | |
| | Hyperspectral Scanner/Eagle | | | | | | + | + | + | |
| | ATM (Airb. thematic mapper) | | | | | | + | + | + | |
| | CASI2 (Compact Airb. Spec. Imager) | | | | | | + | + | + | |
| | Geodät. Vermessung (Satellit, GPS) | | | ●* | ●* | | | | | + |
| | LIDAR (Light detection & ranging) | | | | | | + | + | + | |
| | Digitalkamera | | | | | | + | + | + | |
| | Schweremessungen (Flugz. o. Sat.) | | | + | + | | | | | |
| Reservoir und Deckgebirge | Tracer | | + | + | + | + | + | + | | |
| | Gravimetrische Methoden | | | + | + | | | | | |
| | Seismik (2D, 3D, VSP, MSP, … ) | | | ● | ● | | | | | |
| | Druckmessungen in Aquiferen | | | ● | ● | ● | | | | |
| | Fluidanalysen (geochem, etc.) | ● | | ● | ● | ● | | | | |
| | Gasanalysen (z.B. GMS) | | | ● | | | + | + | | |
| | Mikroseismik | | | ● | ● | | | | | |
| | EMIT (Elektromagn. Indukt.) | | | + | + | + | | | | |
| | Elektromagnetik | | | + | + | + | | | | |
| | ERT (El. Widerstandstomographie) | | | + | + | + | | | | |
| | Magnetotellur. Sondierungen | | | + | + | | | | | |
| | Analyse von Kernmaterial | | | + | + | + | | | | |

*) für das obligatorische Basismonitoring ist eine der mit * gekennzeichneten Methoden ausreichend (s. auch Tabelle 23)

**Tabelle 25: Für das obligatorische Basismonitoring (●) und ein erweitertes optionales Monitoring (+) der einzelnen Kompartimente zur Verfügung stehende Methoden. 3. Bohrloch- und Logging-Verfahren.**

| | Methode \ Zu überwachendes Monitoring-kompartiment | Offene Bohrungen | Verfüllte Bohrungen | Speicherformation | Rückhalte- und Transferpfadformation | Grundwasser (Schutzgut) | Bodenzone (Schutzgut) | Luft (Schutzgut) | Flora und Fauna (Schutzgut) | Bausubstanz (Schutzgut) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bohrloch/Loggingverfahren | Injektionsrate und -volumen | ● | | ● | ● | | | | | |
| | Druck am Bohrlochkopf | ● | | | | | | | | |
| | Druck im Ringraum (kontinuierlich) | ● | | | | | | | | |
| | Ringraumdrucktest | + | | | | | | | | |
| | Mechanischer Integritätstest | + | | | | | | | | |
| | Formationsdruck/Reservoirdruck | | | ● | ● | | | | | |
| | Crosswellseismik | | | + | + | | | | | |
| | Cement Bond Logs (Ultrasonic) | ● | | | | | | | | |
| | Temperatur-Logging | ● | | ● | | | | | | |
| | Reservoirsättigungsmessung (Pulsed Neutron Capture Logs, PNC) | + | | + | | | | | | |
| | Widerstandslogs | + | | + | | | | | | |
| | Optisches Logging | + | | | | | | | | |
| | Schall-Logging (Noise, Sonic) | + | | + | | | | | | |
| | RHOB (Dichte Logs) | $+^E$ | | $+^E$ | | | | | | |
| | Gamma-Ray Logging | $+^E$ | | $+^E$ | | | | | | |
| | Kaliberlog | ● | | | | | | | | |
| | Magn. Field und Magn. Susceptibility Logs | $+^E$ | | $+^E$ | | | | | | |
| | Isolation Scanner | + | | | | | | | | |
| | Mudlogging (p, T, el. Leitf.) | + | | | | | | | | |
| | NMR-Logging (Nukleare Magn. Resonanz) | + | | + | | | | | | |
| | Hydro-Frac (Gesteinsfestig., Spannungsfeld) | $+^E$ | | $+^E$ | $+^E$ | | | | | |
| | Radioaktive Tracermessungen | + | | | | | | | | |
| | Oxygen Activation-Log | + | | | | | | | | |

$^E$) nur für Erkundung

## 7.1 Monitoring von Bohrungen

Tiefbohrungen (= über 500m) stellen den wichtigsten potentiellen $CO_2$-Leckagepfad aus der Speicherformation dar und erfordern eine besonders intensive Überwachung (). Beim Bohrungsmonitoring sind aktive bzw. offene Bohrungen dabei grundsätzlich anders zu betrachten als verfüllte Altbohrungen.

Im Rahmen des CLEAN-Themenverbundes 2.1 (Bohrungszustand) wurden Prüfstrategien zur Bewertung von Bohrungszuständen sowie Messprogramme für das Monitoring einer laufenden EGR-Maßnahme entwickelt. Ausführliche Darstellungen der Forschungsergebnisse finden sich in den Berichten der entsprechenden Teilprojekte, die hier zusammenfassend aufgegriffen werden.

**Tabelle 26: Anforderungen an das Monitoring an Bohrungen.**

| | |
|---|---|
| | ***EU-Richtlinie*** |
| I-b | Feststellung erheblicher Unregelmäßigkeiten |
| I-d | Feststellung von $CO_2$-Leckagen |
| I-f | Bewertung der Wirksamkeit von gemäß Artikel 16 getroffenen Abhilfemaßnahmen |
| I-i | Überwachung des volumetrischen $CO_2$-Flusses an den Bohrlochköpfen (nur Injektionsbohrungen) |
| I-j | Überwachung von Druck und Temperatur des $CO_2$ an den Injektionsköpfen (zur Bestimmung des Massenflusses) |
| | ***UBA*** |
| II-b | Beeinflussung der Grundwasserleiter insbesondere der Salz-/Süßwassergrenze durch Aufstieg von Formationswasser |
| II-c | Leckage anderer Gase (z.B. Methan) in andere Schutzgüter |
| II-e | $CO_2$-Austritt in das Grundwasser und/oder Atmosphäre aus aktiven und alten Bohrungen |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen |
| II-i | Druckausbreitung (gesamter Untersuchungsraum) |
| II-n | $CO_2$-Fluid/Gas-Leckage aus der Speicherformation in die Rückhalteformation |
| II-o | $CO_2$-Fluid/Gas-Leckage aus der Rückhalteformation in die Transferpfadformation |
| | ***NETL*** |
| III-a | Erfassung der Ausgangsbedingungen gegenüber denen ein möglicher Einfluss der $CO_2$-Injektion beurteilt werden kann |
| III-b | Überwachung der Planmäßigkeit des Injektionsprozesses (nur Injektionsbohrungen) |
| III-k | Charakterisierung von $CO_2$-Austritten zur Auslegung der Verschlussmaßnahmen |
| III-l | Speichernachweis und -dokumentation zur Regelung monetärer Transaktionen und von Emissionszielen |
| III-n | Beurteilungsbasis für Rechtsauseinandersetzungen in Schadensfällen |
| III-o | Nachweis der Effektivität und Sicherheit zur Unterstützung der öffentlichen Akzeptanz |

### 7.1.1 Monitoring offener Bohrungen

Für das Monitoring aktiver Bohrungen steht eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung, mit denen sich die Integrität und Dichtigkeit der Bohrungen während der $CO_2$-Speicherung überwachen lässt. Der Großteil dieser Methoden entspricht dem Stand der Technik, sodass die hiermit erhobenen Informationen eine hohe Zuverlässigkeit gewährleisten. Im Rahmen der Erkundung einer Speicherstätte und der Bewertung vorhandener Bohrungen kommen diese Methoden bereits zum Einsatz und dokumentieren hierbei den Ausgangszustand, der ebenfalls zur Beurteilung der Messergebnisse während der Speicherungsphase dient. Eingehende Darstellungen dieser Methoden finden sich bei Reinicke (2011) [7] und Reinicke (2010) [35]. Von einer technischen Integrität einer Bohrung ist auszugehen, wenn zum einen keine signifikanten Leckagen (> 50kg/d, [93]) auftreten und zum anderen entlang einer Bohrung kein signifikanter Aufstieg von Flüssigkeiten oder Gasen stattfindet. Das Monitoring aktiver Bohrungen sollte Folgendes beinhalten [7]:

- Beobachtung von Bohrlochkopfdrücken, Injektions- und Produktionsraten, Temperaturen, Kumulativ-Volumina, Fluidzusammensetzung.
- Verfolgung und Dokumentation von Ringraumdrücken und des Fluidniveaus, als Voraussetzung für die Möglichkeit schneller Korrekturmaßnahmen bei Leckagen des Packers oder des Produktions-/Injektionsstrangs.
- Regelmäßige Untersuchungen des Zustandes des Produktionsstranges in Form von Kaliber-Messungen, insbesondere wenn Inhibierungen das Mittel des Korrosionsschutzes sind.
- Untersuchungen von Bohrlochkopf und ggf. Casing auf Anzeichen von Erosion und Korrosion. Zur Untersuchung der Ventilkörper des E-Kreuzes sollte der Einsatz von Videokameras und Ultraschallprüfungen (UT) in Betracht gezogen werden.
- Zur Überwachung der Korrosivität des Milieus im Bohrloch sollte die Platzierung von Korrosionscoupons überlegt werden, Cameron et al. (1992).
- Zur Überwachung der Zementintegrität sind Wiederholungen von richtungsabhängigen Zementbonduntersuchungen ratsam.

Die kontinuierliche Überwachung von Bohrlochkopfbedingungen und Ringraumdrücken liefern wichtige Informationen über den aktuellen Integritätszustand von Bohrungen, ohne die Notwendigkeit, den Betrieb der Bohrungen zu unterbrechen. In regelmäßigen Abständen oder wenn Messungen während des Betriebs bzw. andere Faktoren auf die Möglichkeit einer Leckage hindeuten, sind weitergehende Untersuchungen durchzuführen. Geeignete Methoden hierfür sind Ringraumdrucktests, Noise-Logs, Temperatur-Logs und radioaktive Tracermessungen (vgl. Tabelle 27).

**Tabelle 27: Für das Basismonitoring offener Bohrungen erforderliche (Standard) und ein erweitertes Monitoring zusätzlich verfügbare (Optional) Methoden.**

| |
|---|
| *Standard:* |
| Injektionsrate und –volumen, Druck am Bohrlochkopf, Fluidzusammensetzung, Fluidniveau, Druck im Ringraum, Cement Bond Logs, Temperatur-Logging, Kaliber-Log, |
| *Optional:* |
| Ringraumdrucktests, Mechanischer Integritätstest, Optisches Logging, Korrosions-Coupons, Reservoirsättigungsmessungen (Pulsed Neutron Capture Logs, PNC) Widerstandslogs, Schall-Logging (Noise, Sonic), $CO_2$-Detektoren, Laser-Systeme und LIDAR, Eddy-Kovarianz, Isotopen, Tracer, Aeroelektromagnetik, Fluidanalysen, Isolation-Scanner, Mud-logging (p, T. el. Lietf.), NMR-Logging (Nukleare Magnet-Resonanz), Radioaktive Tracer-messungen, Oxygen Activation-Log |

### 7.1.2 Monitoring verfüllter Bohrungen

Die Bewertung und Überwachung verfüllter Bohrungen stellt eine wesentlich schwierigere Aufgabe dar als bei offenen Bohrungen, da das Einbringen von Messgeräten nicht möglich ist. Alle alten Bohrungen aufzubohren und nach heutigen Standards neu zu verfüllen, wäre besonders in zuvor genutzten Erdgas- oder Erdöllagerstätten aus Kostengründen in den meisten Fällen nicht zu realisieren [94]. Im Rahmen der Speichererkundung und -charakterisierung werden verfüllte Bohrungen anhand von vorliegenden Informationen aus alten Untersuchungen in unterschiedliche Risikoklassen eingeteilt. Während für Bohrungen mit hohem Risiko empfohlen wird, diese zu sanieren, ist für die Umgebung von Bohrungen mit geringerem Risiko ein Monitoring durchzuführen. Im Rahmen des UIC-Programms (Underground Injection Control) der amerikanischen Umweltbehörde EPA wird für diesen Bereich ein Mindestradius von 400m vorgegeben [95]. Zwar ist bei neu verfüllten Bohrungen das Risiko einer Leckage wesentlich geringer, verschiedene Autoren weisen jedoch darauf hin, dass Leckagen an verfüllten Bohrungen besonders unter dem Einfluss von $CO_2$ grundsätzlich nie völlig ausgeschlossen werden können [95-97]. Deshalb muss es Ziel sein, alle verfüllten Bohrungen mit in das Monitoring einzuschließen, was im Rahmen flächenhafter Überwachungen in den oberflächennahen Kompartimenten (vgl. Kapitel 7.5) umzusetzen ist. Dies bedeutet eine spezielle Überwachung von Grundwasser, Bodenzone und Atmosphäre im Umfeld verfüllter Altbohrungen.

## 7.2 Monitoring der Speicherformation / Reservoirmonitoring (inkl. primärem Deckgestein)

Das Monitoring der Speicherformation umfasst zusammen mit dem Bohrlochmonitoring die wichtigsten Überwachungsmaßnahmen einer geologischen $CO_2$-Speicherung bzw. einer

EGR-Maßnahme. Für die an das Monitoring der Speicherformation gestellten Anforderungen (Tabelle 28) stehen die in Tabelle 29 aufgeführten Methoden zur Verfügung, von denen einige dem Stand der Technik entsprechen, für andere aber noch weiterer Entwicklungsbedarf besteht, und v.a. quantitative Erfahrungen im Anwendungsbereich CCS/EGR weitgehend noch fehlen.

**Tabelle 28: Anforderungen an das Monitoring der Speicherformation.**

| | ***EU-Richtlinie*** |
|---|---|
| I-a | Vergleich zwischen dem tatsächlichen und dem modellierten Verhalten des $CO_2$ des Formationswassers in der Speicherstätte |
| I-c | Feststellung der Migration von $CO_2$ |
| I-d | Feststellung von $CO_2$-Leckagen |
| I-f | Bewertung der Wirksamkeit von gemäß Artikel 16 getroffenen Abhilfemaßnahmen |
| I-g | Aktualisierung der Bewertung der mittel- bzw. langfristigen Sicherheit und Unversehrtheit des Speicherkomplexes sowie Beurteilung der Frage, ob das gespeicherte $CO_2$ vollständig und dauerhaft zurückgehalten wird |
| I-l | Überwachung von Lagerstättentemperatur und -druck (zur Bestimmung des Verhaltens und des Zustands der $CO_2$-Phase) |
| | ***UBA*** |
| II-a | Landhebung bzw. Landsenkung |
| II-d | Erhöhte Seismizität insbesondere während der Injektionsphase aber auch in der Postinjektionsphase |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen |
| II-i | Druckausbreitung (gesamter Untersuchungsraum) |
| II-j | Bildung neuer Wegsamkeiten (im Speicherkomplex) |
| II-k | Migration des $CO_2$-Phasenkörpers (Speicherformation) |
| II-l | Erfassung der gelösten $CO_2$-Masse (Speicherformation) |
| II-m | Migration des Formationswassers (Speicherformation) |
| II-n | $CO_2$-Fluid/Gas-Leckage aus der Speicherformation in die Rückhalteformation |
| | ***NETL*** |
| III-a | Erfassung der Ausgangsbedingungen gegenüber denen ein möglicher Einfluss der $CO_2$-Injektion beurteilt werden kann |
| III-c | Feststellung der Lage und der Ausdehnung der $CO_2$-Phase im Reservoir |
| III-d | Nachweis Reservoirdichtigkeit und der Leckagefreiheit |
| III-f | Identifizierung und Nachweis der Speicherprozesse |
| III-g | Kalibrierung und gegebenenfalls Nachjustierung Modellsimulationen |
| III-j | Überwachung möglicher durch die $CO_2$-Injektion ausgelöster Mikroseismizität |
| III-l | Speichernachweis und -dokumentation zur Regelung monetärer Transaktionen und von Emissionszielen |
| III-n | Beurteilungsbasis für Rechtsauseinandersetzungen in Schadensfällen |
| III-o | Nachweis der Effektivität und Sicherheit zur Unterstützung der öffentlichen Akzeptanz |

Druckmessungen im Reservoir und aktive seismische Untersuchungen stellen zwei obligatorische Verfahren dar, anhand derer sich feststellen lässt, ob sich das injizierte $CO_2$ wie vorhergesagt in der Speicherformation ausbreitet, oder ob es zu wesentlichen Abweichungen

hiervon kommt. Während mit beiden Verfahren prinzipiell die Unversehrtheit des Speicherkomplexes und die Zurückhaltung des injizierten $CO_2$ dokumentiert werden kann, sind Abweichungen von den erwarteten Messergebnissen unterschiedlich zu bewerten. Tritt $CO_2$ aus der Speicherformation aus, so kann dies durch Seismik direkt abgebildet werden, und liefert somit einen Nachweis sowie weitere Informationen über Position und Umfang der Leckage. Abweichungen von der prognostizierten Druckentwicklung weisen jedoch nur auf einen unerwarteten Verlauf hin, der außer einer Leckage jedoch auch verschiedene andere Möglichkeiten (z.B. Modellunsicherheiten) haben kann.

**Tabelle 29: Für das Basismonitoring der Speicherformation erforderliche (Standard) und ein erweitertes Monitoring zusätzlich verfügbare (Optional) Methoden.**

| |
|---|
| *Standard:* |
| Formationsdruck/Reservoirdruck, Druckmessung in Aquiferen, Lagerstättentemperatur, Seismik, Mikroseismik, Injektionsrate und –volumen, (In)SAR/Geodätische Vermessung/ Neigungsmessungen, Fluidanalysen, Gasanalysen |
| *Optional:* |
| Analyse von Kernmaterial, Schweremessungen, Tracer, Gravimetrie, EMIT (Elektromagn. Induktion), Elektromagnetik, ERT (El. Widerstandstomographie), Magnetotellurische Sondierungen, Temperatur-Logging, Reservoirsättigungsmessung (Pulsed Neutron Capture Logs, PNC), Widerstandslogs, Schall-Logging (Noise, Sonic), NMR-Logging (Nukleare Magn. Resonanz) |

Wie für die meisten Methoden, so gibt es auch für diese beiden nur wenige quantitative Hinweise auf deren Sensitivität in Bezug zu einem CCS/EGR-Monitoring. Aus Untersuchungen am Demonstrationsprojekt in Cranfield [81] wurde abgeleitet, dass Druckänderungen, wie sie durch eine Änderung des $CO_2$-Flusses von 200 t/d hervorgerufen würden, noch in einem Abstand von 1 km messbar wären. Die am Sleipner Gasfeld durchgeführte Time-lapse-3D-Seismik lässt darauf schließen, dass rund 2400 t $CO_2$ am Top des Reservoirs in ca. 1000 m Tiefe nachweisbar sind, während in 500 m Tiefe aufgrund der geringeren $CO_2$-Dichte bereits weniger als 600 t $CO_2$ nachweisbar wären [21]. Diese Abschätzungen gehen davon aus, dass das $CO_2$ zusammenhängend z.B. in einer Fallenstruktur und nicht fein verteilt über größere Areale vorliegt. Während kleinräumige horizontale $CO_2$-Akkumulationen mit größerer Mächtigkeit in gut permeablen Schichten relativ gut nachzuweisen sind, wird ein Nachweis von $CO_2$ in gering permeablen Schichten sowie Leckagen entlang von Klüften hierin nur schwer möglich sein. Wenn Bohrungen im Untersuchungsbereich zur Verfügung stehen, ist durch Cross-Hole-Seismik eine höhere Auflösung und somit auch eine geringere Nachweisgenauigkeit zu erreichen. Messungen am Nagaoka $CO_2$-Injektions-Experiment deuten auf Nachweisgrenzen von einigen 100 t hin [98].

Die Überwachung von induzierter Seismizität, Reaktivierung von Störungen, aber auch der $CO_2$-Ausbreitung und der vorauseilenden Druckwelle kann mit Hilfe passiver Seismik (Mikroseismik) erfolgen. Die Zuordnung von gemessenen Ereignissen zu den verantwortlichen Prozessen ist jedoch noch Gegenstand nationaler und internationaler Forschung [9].

Anhand von Messungen der Lagerstättentemperatur zusammen mit Fluid- und Gasanalysen lassen sich das Verhalten und der Zustand der $CO_2$-Phase überwachen. Diese Messungen tragen auch zu einer Kontrolle der Migration des $CO_2$-Phasenkörpers sowie zur Erstellung von Massenbilanzen und somit auch zur Identifizierung und zum Nachweis der Speicherprozesse bei.

Da in der Regel von einer Deformation der Geländeoberfläche im Millimeter- bis Zentimeterbereich auszugehen ist, muss mit Hilfe mindestens einer der Methoden geodätische Vermessung (konventionell oder GPS), (In)SAR oder Neigungsmessung überwacht werden, ob sich die Landhebungs bzw- Landsenkungsbewegungen im vorhergesagten Ausmaß bewegen.

Neben diesen Verfahren, die als Standard des Basismonitorings der Speicherformation in jedem Fall einzusetzen sind, sind in Tabelle 29 unter „Optional“ weitere Methoden aufgelistet, die in Abhängigkeit der Standortbedingungen und der Ergebnisse des Basismonitorings hinzuzuziehen sind. Da die Messergebnisse eines einzelnen Verfahrens sich häufig nicht eindeutig interpretieren lassen, ist es grundsätzlich ratsam, parallel ergänzende Untersuchungen durchzuführen, um die Resultate gegenseitig zu hinterfragen bzw. validieren zu können. Sollte das Basismonitoring Hinweise auf einen nicht vorhergesehenen Verlauf der Injektion oder auf Abweichungen im Verhalten des $CO_2$ liefern, so ist das Monitoring zunächst durch eine zeitliche und gegebenenfalls auch räumliche Verdichtung der bereits zum Einsatz gekommenen Messungen, bei Bedarf aber auch durch Hinzunahme zusätzlicher Methoden zu intensivieren. Dieses adaptive Vorgehen ist grundsätzlich auch in den anderen Monitoring-Kompartimenten anzuwenden.

## 7.3 Monitoring der Rückhalteformation

Die primären Anforderungen an das Monitoring der Rückhalteformation (Tabelle 30) bestehen im Nachweis der Reservoirdichtigkeit und der Leckagefreiheit, wobei standortspezifisch neben einer $CO_2$-Leckage auch der Austritt von Formationswasser oder anderen Gasen wie z.B. Methan zu überwachen sind. Während Leckage-bedingte Systemänderungen im Bereich der Speicherformation nur zu relativ kleinen Änderungen gegenüber den bisherigen Messwerten führen (z.B. Druckänderung oder Ausdehnung der $CO_2$-Phase), so stellen solche Veränderungen innerhalb der Rückhalteformation eine weitaus größere Abweichung in Bezug auf das Baseline-Monitoring dar und sind somit hier einfacher zu detektieren.

Ein Eindringen von $CO_2$, anderer Gase oder Formationswasser aus der Speicherformation in die Rückhalteformation stellt keine Gefährdung dar, da aufgrund der Speicherkapazität der

**Tabelle 30: Anforderungen an das Monitoring der Rückhalteformation.**

| | ***EU-Richtlinie*** |
|---|---|
| I-d | Feststellung von $CO_2$-Leckagen |
| I-f | Bewertung der Wirksamkeit von gemäß Artikel 16 getroffenen Abhilfemaßnahmen |
| I-g | Aktualisierung der Bewertung der mittel- bzw. langfristigen Sicherheit und Unversehrtheit des Speicherkomplexes sowie Beurteilung der Frage, ob das gespeicherte $CO_2$ vollständig und dauerhaft zurückgehalten wird |
| | ***UBA*** |
| II-a | Landhebung bzw. Landsenkung |
| II-c | Leckage anderer Gase (z.B. Methan) in andere Schutzgüter |
| II-d | Erhöhte Seismizität insbesondere während der Injektionsphase aber auch in der Postinjektionsphase |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen |
| II-i | Druckausbreitung (gesamter Untersuchungsraum) |
| II-j | Bildung neuer Wegsamkeiten (im Speicherkomplex) |
| II-n | $CO_2$-Fluid/Gas-Leckage aus der Speicherformation in die Rückhalteformation |
| II-o | $CO_2$-Fluid/Gas-Leckage aus der Rückhalteformation in die Transferpfadformation |
| | ***NETL*** |
| III-a | Erfassung der Ausgangsbedingungen gegenüber denen ein möglicher Einfluss der $CO_2$-Injektion beurteilt werden kann |
| III-d | Nachweis Reservoirdichtigkeit und der Leckagefreiheit |
| III-g | Kalibrierung und gegebenenfalls Nachjustierung Modellsimulationen |
| III-i | Überwachung der Auswirkungen möglicher Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit |
| III-j | Überwachung möglicher durch die $CO_2$-Injektion ausgelöster Mikroseismizität |
| III-l | Speichernachweis und -dokumentation zur Regelung monetärer Transaktionen und von Emissionszielen |
| III-n | Beurteilungsbasis für Rechtsauseinandersetzungen in Schadensfällen |
| III-o | Nachweis der Effektivität und Sicherheit zur Unterstützung der öffentlichen Akzeptanz |

**Tabelle 31: Für das Basismonitoring der Rückhalteformation erforderliche (Standard) und ein erweitertes Monitoring zusätzlich verfügbare (Optional) Methoden.**

| *Standard:* |
|---|
| Formationsdruck/Reservoirdruck, Druckmessung in Aquiferen, Seismik, Mikroseismik, Injektionsrate und –volumen, (In)SAR/Geodätische Vermessung/Neigungsmessungen, Fluidanalysen |
| *Optional:* |
| Cross-Well-Seismik, Analyse von Kernmaterial, Schweremessungen, Tracer, Gravimetrik, EMIT (Elektromagn. Induktion), Elektromagnetik, ERT (El. Widerstandstomographie), |

| Magnetotellurische Sondierungen, Induzierte Polarisation |
|---|

Rückhalteformation die austretenden Massen hier aufgenommen und vor einem weiteren Aufsteigen zurückgehalten werden können. Durch einen Masseneintrag in die Rückhalteformation wird der Druck in diesen Schichten ansteigen und zu einer erhöhten Belastung der innerhalb der Rückhalteformation abdichtenden Schichten (Tone und Salze) führen. Zur Beherrschung solcher Vorgänge und zur Entscheidung, ab welchem Zustand Interventionsmaßnahmen erforderlich sind, ist es deshalb notwendig auch die Frac-Drücke dieser Schichten zu kennen. Sollte ein nicht erwartetes Verhalten detektiert werden, so sind als Konsequenz in jedem Falle die Monitoringmaßnahmen zu intensivieren, um festzustellen, ob dieses durch eine Leckage oder andere Gründe verursacht wurde.

Zur Detektion von Leckagen, der Bildung neuer Wegsamkeiten oder einhergehender erhöhter Seismizität stehen dieselben Methoden zur Verfügung wie für das Monitoring der Speicherformation (vgl. Kapitel 7.2 und Tabelle 31). Während das Eindringen von gasförmigem oder fluidem $CO_2$ sowie anderen Gasen aufgrund vom Formationswasser der Rückhalteformation abweichenden physikalischen Eigenschaften relativ gut zu erkennen ist, stellt die Detektion einer Formationswasser-Leckage aus der Speicherformation in die Rückhalteformation bisher noch eine Herausforderung dar, da sich die Formationswässer der unterschiedlichen Formationen i.d.R. physikalisch nur geringfügig unterscheiden. Unterschiede in der geochemischen Zusammensetzung können durchaus vorliegen, jedoch sind diese nicht durch flächenhaft ansetzende Methoden, sondern nur durch Analysen von Punktproben an i.d.R. nur in begrenztem Umfang zur Verfügung stehenden Überwachungsbohrungen zu realisieren. Hieraus wird deutlich, dass besonders Druckmessungen auch oberhalb der Speicherformation erforderlich sind, um frühzeitig Hinweise auf Formationswasserbewegungen außerhalb der Speicherformation bekommen zu können.

## 7.4 Monitoring der Transferpfadformation

Die Transferpfadformation stellt das letzte Kompartiment dar, dass aufsteigendes $CO_2$, andere Gase oder Formationswasser an einer Schädigung der Schutzgüter (Grundwasser, Boden, Luft/Mensch, Flora und Fauna, Bausubstanz) hindern kann, und bedarf deshalb einer besonders intensiven Überwachung. Anforderungen an das Monitoring der Tranferpfadformation (Tabelle 32) und hierfür zur Verfügung stehende Methoden (Tabelle 33) entsprechen im Wesentlichen denen des Monitorings der Rückhalteformation, jedoch liegen zwei wichtige Unterschiede bezüglich der Überwachungsmöglichkeiten vor. Da zum einen die Sensitivität der vorhandenen Methoden i.d.R. mit zunehmender Entfernung abnimmt, besteht in der Transferpfadformation durch deren wesentlich geringere Tiefe und die damit verbundenen niedrigeren Bohrlochkosten die Möglichkeit einer wesentlich höheren Überwachungsdichte und -sicherheit als für die Rückhalteformation. Zum anderen wird in den meisten Fällen der Bereich des Phasenübergangs von fluidem zu gasförmigem $CO_2$ (ca. 800 m Tiefe) im Be-

reich der Transferpfadformation liegen. Der Phasenübergang hat zur Folge, dass das $CO_2$ als Gas ein weitaus größeres Volumen einnimmt als in fluider Form. Des Weiteren sind die Unterschiede der physikalischen Eigenschaften zwischen Formationswasser und Gas erheblich größer als die von Formationswasser und fluidem $CO_2$. Beide Aspekte tragen zu einer wesentlich besseren $CO_2$-Detektierbarkeit bei.

Während das Monitoring der Rückhalteformation also eine Früherkennung von Unregelmäßigkeiten ermöglicht und dafür Abstriche in der Detektionssicherheit und der Quantifizierung mit sich bringt, muss und kann das Monitoring der Transferpfadformation hinsichtlich Detektion, Lokation und Quantifizierung eine deutlich höhere Sicherheit bieten, lässt jedoch geringere zeitliche Handlungsspielräume im Falle erforderlicher Interventionsmaßnahmen zu. Um die jeweiligen Vorteile zu nutzen, ist ein Monitoring in beiden Formationen erforderlich, wobei die Priorisierung standortspezifisch und mit den zuständigen Behörden abzustimmen ist.

**Tabelle 32: Anforderungen an das Monitoring der Transferpfadformation.**

| | ***EU-Richtlinie*** |
|---|---|
| I-d | Feststellung von $CO_2$-Leckagen |
| I-f | Bewertung der Wirksamkeit von gemäß Artikel 16 getroffenen Abhilfemaßnahmen |
| I-g | Aktualisierung der Bewertung der mittel- bzw. langfristigen Sicherheit und Unversehrtheit des Speicherkomplexes sowie Beurteilung der Frage, ob das gespeicherte $CO_2$ vollständig und dauerhaft zurückgehalten wird |
| | ***UBA*** |
| II-a | Landhebung bzw. Landsenkung |
| II-c | Leckage anderer Gase (z.B. Methan) in andere Schutzgüter |
| II-d | Erhöhte Seismizität insbesondere während der Injektionsphase aber auch in der Postinjektionsphase |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen |
| II-i | Druckausbreitung (gesamter Untersuchungsraum) |
| II-j | Bildung neuer Wegsamkeiten (im Speicherkomplex) |
| II-o | $CO_2$-Fluid/Gas-Leckage aus der Rückhalteformation in die Transferpfadformation |
| | ***NETL*** |
| III-a | Erfassung der Ausgangsbedingungen gegenüber denen ein möglicher Einfluss der $CO_2$-Injektion beurteilt werden kann |
| III-i | Überwachung der Auswirkungen möglicher Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit |
| III-j | Überwachung möglicher durch die $CO_2$-Injektion ausgelöster Mikroseismizität |
| III-l | Speichernachweis und -dokumentation zur Regelung monetärer Transaktionen und von Emissionszielen |
| III-n | Beurteilungsbasis für Rechtsauseinandersetzungen in Schadensfällen |
| III-o | Nachweis der Effektivität und Sicherheit zur Unterstützung der öffentlichen Akzeptanz |

**Tabelle 33: Für das Basismonitoring der Transferpfadformation erforderliche (Standard) und ein erweitertes Monitoring zusätzlich verfügbare (Optional) Methoden.**

| |
|---|
| *Standard:* |
| Formationsdruck, Druckmessung in Aquiferen, Seismik, Mikroseismik, Injektionsrate und –volumen, (In)SAR/Geodätische Vermessung/Neigungsmessungen, Fluidanalysen |
| *Optional:* |
| Cross-Well-Seismik, Analyse von Kernmaterial, Schweremessungen, Tracer, Gravimetrik, EMIT (Elektromagn. Induktion), Elektromagnetik, ERT (El. Widerstandstomographie), Magnetotellurische Sondierungen, Induzierte Polarisation |

## 7.5 Monitoring der Schutzgüter

### 7.5.1 Monitoring des (oberflächennahen) Grundwassers

Erhebliche nachteilige Auswirkungen auf das Grundwasser durch im Störungsfall eintretendes $CO_2$, andere Gase oder Formationswasser sind nur bei hohen Immissonsraten oder bei Einträgen über ausgedehnte Zeiträume zu erwarten. Der Eintrag geringer Frachten führt zu keiner Schädigung des Schutzguts, da der Großteil der transportierten Stoffe in moderatem Umfang auch unter natürlichen Bedingungen im Grundwasser und der Aquifermatrix vorliegen. Schwellenwerte, deren Überschreitung zu einer Gefährdung der Grundwassergüte führen, sind u.a. von der geochemischen Zusammensetzung des Grundwassers und des Gesteins, der Aquifermächtigkeit, der Grundwasserfließgeschindigkeit und der Aquiferstruktur abhängig und müssen im Rahmen des Grundwasser-Baselinemonitorings ermittelt werden.

Das Einhalten der Immissions-Schwellenwerte lässt sich entweder im Rahmen des Monitorings der tiefer liegenden Kompartimente nachweisen, wenn durch eine ausreichend hoch aufgelöste Überwachung mit hoher Wahrscheinlichkeit sicher gestellt werden kann, dass keine Gefährdung des Grundwasser vorliegt, oder innerhalb des Grundwassermonitorings.

Ob für die im CCS-Gesetzentwurf vorgeschriebene Überwachung der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Grundwassers die Kontrolle an einzelnen Grundwassermessstellen ausreichend ist, oder ob zusätzlich in regelmäßigen Abständen eine flächenhafte Überwachung mit Hilfe geophysikalischer Methoden zu erfolgen hat, hängt von den Standortgegebenheiten und den zulässigen Schwellenwerten ab. Dies wird zwar für den Einzelfall zu beurteilen zu sein, aufgrund der großen Erstreckung des zu überwachenden Untersuchungsraums und der relativ geringen Größe der durch eine $CO_2$-Leckage innerhalb eines Jahres zu erwartenden beeinflussten Bereiche (typischerweise 10er bis 100er m, max. 1km, s. TP Mo3, [99]), wird in den meisten Fällen eine flächenhafte Überwachung erforderlich sein.

Die Grundwasserprobenahme über Grundwassermessstellen zur Überwachung der Grundwassergüte stellt eine etablierte Technologie dar, die auch in vielen anderen Bereichen eingesetzt wird. Innerhalb von CLEAN (Mo3) und anderen aktuellen Forschungsvorhaben (u.a. $CO_2$-MOPA) wurde die Aussagesicherheit des Grundwassermonitorings anhand von verschiedenen Szenariensimulationen charakterisiert. Hierbei zeigte sich, dass es sich anhand verschiedener Parameter (z.B. pH, elektrische Leitfähigkeit, TIC) mit hoher Sicherheit beurteilen lässt, ob im Erfassungsbereich des untersuchten Grundwassers eine $CO_2$-Leckage vorliegt oder nicht. Neu entwickelte Sonden zur Messung von $CO_2$, pH, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und Druck können hierfür zur permanenten Überwachung zum Einsatz kommen.

Der hydrostatische Druck und somit die Aquifertiefe hat einen wesentlichen Einfluss auf die Größe sich bildender $CO_2$-Phasenkörper [99]. Für eine mittlere Leckagerate von $1{,}16*10^{-4}$ kg/s bildet sich z.B. in einem als planar angenommenen Aquifer in einer Aquifertiefe von 10 m ein $CO_2$-Phasenkörper mit einem Radius von ca. 70 m aus. Bildet sich unter denselben Bedingungen ein solcher $CO_2$-Phasenkörper in einer Tiefe von 400 m, so beträgt dessen Radius nur noch 10 m, wodurch sich dessen Detektion erschwert. Ein weiterer Vorteil eines oberflächennahen Grundwassermonitorings besteht auch in der höheren Sensitivität verschiedener geophysikalischer Monitoringmethoden, die sich mit zunehmender Tiefe verringert. Da sich die Grundwasserfließbedingungen in signifikantem Maße auf die Ausbreitung sowohl des gelösten als auch des gasförmigen $CO_2$ auswirken [99], sind die standortspezifischen Verhältnisse bei der Auslegung zu berücksichtigen.

Flächenhaft lassen sich die oberflächennahen Aquifere auch für die sehr großen Areale eines CCS/EGR-Monitorings bis in eine Tiefe von bis zu 300 m mit der von einem Hubschrauber aus eingesetzten Aeroelektromagnetik überwachen. Die Messungen liefern Aufschlüsse über die im Untergrund vorliegenden elektrischen Widerstände und geben somit Auskunft einerseits über die Aquiferstruktur, also die Verteilung von Grundwasserleitern (Kiese/Sande) und Grundwasserstauern (Mergel/Tone), und andererseits über den Mineralisierungsgrad des Grundwassers. Eine gute Kenntnis über die Aquiferstruktur ist u.a. für realistische standortspezifische Modellsimulationen zur Identifizierung von Bereichen erhöhter Gefährdung und somit zur Monitoringoptimierung erforderlich. Da das Vorliegen einer separaten Gasphase (z.B. $CO_2$-Leckage) innerhalb des Grundwassers zu einer Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit führt, eine durch $CO_2$ verursachte Minerallösung oder das Eindringen von Tiefenformationswasser diese andererseits erhöht, ließen sich solche Ereignisse durch aeroelektromagnetische Wiederholungsmessungen detektieren und anschließend durch Grundwasseruntersuchungen validieren und charakterisieren.

Mit auf solchen detaillierten Untersuchungen aufbauenden und die Aquiferstruktur wiedergebenden Modellen ist es möglich, die durch Auftrieb gesteuerte Migration des gasförmigen $CO_2$ zu prognostizieren. Auf Grundlage solcher Prognosen lassen sich die Bereiche identifi-

zieren, an denen sich $CO_2$-Gas im Leckagefalle voraussichtlich sammelt und von denen unter Umständen eine erhöhte Gefährdung ausgeht [99]. Mithilfe dieser Informationen lässt sich das Monitoring auf gefährdete Bereiche fokussieren.

**Tabelle 34: Anforderungen an das Grundwassermonitoring.**

| | ***EU-Richtlinie*** |
|---|---|
| I-d | Feststellung von $CO_2$-Leckagen |
| I-e | Feststellung erheblicher nachteiliger Auswirkungen auf die Umgebung, einschließlich insbesondere des Trinkwassers, auf die Bevölkerung oder auf Nutzer der umliegenden Biosphäre |
| I-f | Bewertung der Wirksamkeit von gemäß Artikel 16 getroffenen Abhilfemaßnahmen |
| I-g | Aktualisierung der Bewertung der mittel- bzw. langfristigen Sicherheit und Unversehrtheit des Speicherkomplexes sowie Beurteilung der Frage, ob das gespeicherte $CO_2$ vollständig und dauerhaft zurückgehalten wird |
| I-m | Überwachung der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Grundwassers (nur im KSpG-Entwurf vom 23.07.2010 enthalten) |
| | ***UBA*** |
| II-b | Beeinflussung der Grundwasserleiter insbesondere der Salz-/Süßwassergrenze durch Aufstieg von Formationswasser |
| II-c | Leckage anderer Gase (z.B. Methan) in Schutzgüter |
| II-e | $CO_2$-Austritt in das Grundwasser und/oder Atmosphäre aus aktiven und alten Bohrungen |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen |
| II-i | Druckausbreitung (gesamter Untersuchungsraum) |
| | ***NETL*** |
| III-a | Erfassung der Ausgangsbedingungen gegenüber denen ein möglicher Einfluss der $CO_2$-Injektion beurteilt werden kann |
| III-i | Überwachung der Auswirkungen möglicher Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit |
| III-k | Charakterisierung von $CO_2$-Austritten zur Auslegung der Verschlussmaßnahmen |
| III-l | Speichernachweis und -dokumentation zur Regelung monetärer Transaktionen und von Emissionszielen |
| III-n | Beurteilungsbasis für Rechtsauseinandersetzungen in Schadensfällen |
| III-o | Nachweis der Effektivität und Sicherheit zur Unterstützung der öffentlichen Akzeptanz |

**Tabelle 35: Für das Basismonitoring des Schutzguts Grundwasser erforderliche (Standard) und ein erweitertes Monitoring zusätzlich verfügbare (Optional) Methoden.**

| *Standard:* |
|---|
| Grundwassermonitoring, Druckmessung in Aquiferen, Aeroelektromagnetik |
| *Optional:* |
| Isotopen, Flache 2D-Seismik, Tracer, Induzierte Polarisation, (Spontanes) Eigenpotential, Analyse von Kernmaterial, EMIT (Elektromagnetische Induktion), Elektromagnetik, ERT (Elektrische Widerstandstomographie) |

### 7.5.2 Monitoring der Bodenzone

Die natürlich auftretenden $CO_2$-Konzentrationen in der Bodenluft sind zeitlich stark von Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Wasserstand und Bodenfeuchte abhängig. Diese Parameter und weitere Einflussgrößen wie der Anteil organischen Bodenmaterials und der Bewuchs unterliegen zudem häufig auch starken kleinräumigen Schwankungen, wobei zunächst davon auszugehen ist, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Messstellen des insgesamt zu untersuchenden Raumes häufig größer sind, als durch eine $CO_2$-Leckage hervorgerufene Änderungen (vgl. Mo2). Sollen $CO_2$-Eintritte in die Bodenzone also anhand von Bodenluftmessungen überwacht oder charakterisiert werden, so sind unbedingt Baselinemessungen über einen längeren Zeitraum direkt an der zu beurteilenden Stelle erforderlich.

Abschätzungen oder Modellsimulationen zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeit, mit der eine $CO_2$-Leckage mit einer Bodenluftmessstelle zu detektieren wäre, wurden bisher noch nicht durchgeführt. Es ist jedoch anzunehmen, dass aufgrund des Kontakts zur Atmosphäre und durch Ausgasung wesentlich kleinere Flächen betroffen wären als z.B. in gespannten Grundwasserleitern, in denen sich das $CO_2$ akkumuliert. Aufgrund der oben dargestellten Variabilitäten ist für eine flächenhafte Überwachung vermutlich von einem sehr engmaschigen und somit unrealistischen Messstellennetz auszugehen. Mit Akkumulationskammern oder dem Inelastic Neutron Scattering lassen sich zwar wesentlich mehr Positionen als mit fest installierten Messstellen untersuchen, eine flächenhafte Überwachung scheint jedoch nur mit Hilfe eines Ökosystem-Stress-Monitorings oder Fernerkundungsverfahren (vgl. Tabelle 37) möglich. Die Beurteilung der Sensitivität dieser Methoden ist jedoch noch Gegenstand aktueller Forschung (z.B. [56]).

**Tabelle 36: Anforderungen an das Monitoring der Bodenzone.**

| | ***EU-Richtlinie*** |
|---|---|
| I-d | Feststellung von $CO_2$-Leckagen |
| I-e | Feststellung erheblicher nachteiliger Auswirkungen auf die Umgebung, einschließlich insbesondere des Trinkwassers, auf die Bevölkerung oder auf Nutzer der umliegenden Biosphäre |
| I-f | Bewertung der Wirksamkeit von gemäß Artikel 16 getroffenen Abhilfemaßnahmen |
| I-g | Aktualisierung der Bewertung der mittel- bzw. langfristigen Sicherheit und Unversehrtheit des Speicherkomplexes sowie Beurteilung der Frage, ob das gespeicherte $CO_2$ vollständig und dauerhaft zurückgehalten wird |
| | ***UBA*** |
| II-c | Leckage anderer Gase (z.B. Methan) in Schutzgüter |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen |
| | ***NETL*** |
| III-a | Erfassung der Ausgangsbedingungen gegenüber denen ein möglicher Einfluss der |

| | |
|---|---|
| | $CO_2$-Injektion beurteilt werden kann |
| III-i | Überwachung der Auswirkungen möglicher Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit |
| III-k | Charakterisierung von $CO_2$-Austritten zur Auslegung der Verschlussmaßnahmen |
| III-n | Beurteilungsbasis für Rechtsauseinandersetzungen in Schadensfällen |
| III-o | Nachweis der Effektivität und Sicherheit zur Unterstützung der öffentlichen Akzeptanz |

**Tabelle 37: Für das Basismonitoring des Schutzguts Bodenzone erforderliche (Standard) und ein erweitertes Monitoring zusätzlich verfügbare (Optional) Methoden.**

| |
|---|
| *Standard:* |
| - |
| *Optional:* |
| Bodenluftuntersuchungen, Akkumulationskammer, Gasanalysen, $CO_2$-Detektoren, Isotopen, Tracer, Ökosystem-Stress-Monitoirng, Inelastic Neutron Scattering, CIR (Color Infrared Transparency), Hyperspectral Scanner/Eagle, ATM, (Airborne thematic Mapper), CASI2 (Compact airborne spectrographic imager), LIDAR (Light detection and ranging), Digitalkamera |

### 7.5.3 Monitoring der Luft

Für die Messung der $CO_2$-Konzentration in der Luft stehen verschiedene Methoden wie z.B. $CO_2$-Detektoren, Eddy-Kovarianz-Messtürme oder Laser-Systeme zur Verfügung. Diese Verfahren eignen sich für kleinräumige Messungen und erfordern aufgrund erheblicher natürlicher zeitlicher und räumlicher Schwankungen ein sorgfältiges Baselinemonitoring zur Interpretation der Messdaten. Für eine flächenhafte Überwachung sind diese Methoden nicht geeignet. Für eine flächenhafte Erstdetektion können nur Verfahren der Fernerkundung oder ein Ökosystem-Stress-Monitoring herangezogen werden (Tabelle 39). Für eine Validierung einer Verdachtsfläche und die nähere Charakterisierung einer festgestellten Austrittsfläche lassen sich dann die zuerst genannten Methoden einsetzen. Im Rahmen des Basismonitorings sollten in jedem Falle die $CO_2$-Konzentrationen an Arbeitsplätzen und sonstigen Positionen mit erhöhtem Risiko mit $CO_2$-Detektoren kontrolliert werden.

**Tabelle 38: Anforderungen an das Monitoring der Luft.**

| | ***EU-Richtlinie*** |
|---|---|
| I-d | Feststellung von $CO_2$-Leckagen |
| I-e | Feststellung erheblicher nachteiliger Auswirkungen auf die Umgebung, einschließlich insbesondere des Trinkwassers, auf die Bevölkerung oder auf Nutzer der umliegenden Biosphäre |
| I-f | Bewertung der Wirksamkeit von gemäß Artikel 16 getroffenen Abhilfemaßnahmen |
| I-g | Aktualisierung der Bewertung der mittel- bzw. langfristigen Sicherheit und Unver- |

| | |
|---|---|
| | sehrtheit des Speicherkomplexes sowie Beurteilung der Frage, ob das gespeicherte $CO_2$ vollständig und dauerhaft zurückgehalten wird |
| | ***UBA*** |
| II-c | Leckage anderer Gase (z.B. Methan) in Schutzgüter |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen |
| II-f | Freisetzung aus Obertageeinrichtungen bei der Verpressung von $CO_2$ |
| | ***NETL*** |
| III-a | Erfassung der Ausgangsbedingungen gegenüber denen ein möglicher Einfluss der $CO_2$-Injektion beurteilt werden kann |
| III-h | Detektion und Quantifizierung von $CO_2$-Austritten in die Atmosphäre |
| III-i | Überwachung der Auswirkungen möglicher Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit |
| III-k | Charakterisierung von $CO_2$-Austritten zur Auslegung der Verschlussmaßnahmen |
| III-n | Beurteilungsbasis für Rechtsauseinandersetzungen in Schadensfällen |
| III-o | Nachweis der Effektivität und Sicherheit zur Unterstützung der öffentlichen Akzeptanz |

**Tabelle 39: Für das Basismonitoring des Schutzguts Luft erforderliche (Standard) und ein erweitertes Monitoring zusätzlich verfügbare (Optional) Methoden.**

| |
|---|
| *Standard:* |
| $CO_2$-Detektoren |
| *Optional:* |
| Laser-Systeme und LIDAR, Eddy-Kovarianz, Advanced Leak Detection System, Akkumulationskammer, Isotopen, Tracer, CIR (Color Infrared Transparency), Hyperspectral Scanner/Eagle, ATM, (Airborne thematic Mapper), CASI2 (Compact airborne spectrographic imager), LIDAR (Light detection and ranging), Digitalkamera |

### 7.5.4 Monitoring von Flora und Fauna

Die Überwachung von Flora und Fauna kann anhand verschiedener Fernerkundungsmethoden sowie eines Ökosystem-Stress-Monitorings erfolgen. Diese Methoden liefern gleichzeitig auch wichtige Informationen für das Monitoring der Bodenzone und der Luft.

**Tabelle 40: Anforderungen an das Monitoring von Flora und Fauna.**

| | |
|---|---|
| | ***EU-Richtlinie*** |
| I-d | Feststellung von $CO_2$-Leckagen |
| I-e | Feststellung erheblicher nachteiliger Auswirkungen auf die Umgebung, einschließlich insbesondere des Trinkwassers, auf die Bevölkerung oder auf Nutzer der umliegenden Biosphäre |
| I-f | Bewertung der Wirksamkeit von gemäß Artikel 16 getroffenen Abhilfemaßnahmen |
| I-g | Aktualisierung der Bewertung der mittel- bzw. langfristigen Sicherheit und Unversehrtheit des Speicherkomplexes sowie Beurteilung der Frage, ob das gespeicherte |

| | |
|---|---|
| | $CO_2$ vollständig und dauerhaft zurückgehalten wird |
| | ***UBA*** |
| II-c | Leckage anderer Gase (z.B. Methan) in Schutzgüter |
| II-g | $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen |
| II-f | Freisetzung aus Obertageeinrichtungen bei der Verpressung von $CO_2$ |
| | ***NETL*** |
| III-a | Erfassung der Ausgangsbedingungen gegenüber denen ein möglicher Einfluss der $CO_2$-Injektion beurteilt werden kann |
| III-h | Detektion und Quantifizierung von $CO_2$-Austritten in die Atmosphäre |
| III-i | Überwachung der Auswirkungen möglicher Leckagen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit |
| III-k | Charakterisierung von $CO_2$-Austritten zur Auslegung der Verschlussmaßnahmen |
| III-n | Beurteilungsbasis für Rechtsauseinandersetzungen in Schadensfällen |
| III-o | Nachweis der Effektivität und Sicherheit zur Unterstützung der öffentlichen Akzeptanz |

**Tabelle 41: Für das Basismonitoring des Schutzguts Flora und Fauna erforderliche (Standard) und ein erweitertes Monitoring zusätzlich verfügbare (Optional) Methoden.**

| |
|---|
| *Standard:* |
| - |
| *Optional:* |
| Ökosystem-Stress-Monitoring, CIR (Color Infrared Transparency), Hyperspectral Scanner/Eagle, ATM, (Airborne thematic Mapper), CASI2 (Compact airborne spectrographic imager), LIDAR (Light detection and ranging), Digitalkamera |

### 7.5.5 Überwachung der Bausubstanz

Die Überwachung des Schutzguts Bausubstanz wird im Rahmen dieser Zusammenstellung nicht thematisiert.

# 8 Monitoringumfang

Der Umfang des Monitorings setzt sich zusammen aus Art und Anzahl der einzusetzenden Methoden, räumlicher Anordnung und Anzahl der Messungen, zeitlicher Auflösung der Messungen sowie der Dauer der einzelnen Monitoringphasen. Die Auslegung des Monitoringumfangs muss grundsätzlich standortspezifisch erfolgen, wobei folgende Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind:

a) Monitoringphasen
b) Standortspezifische Monitoringziele in den einzelnen Monitoringkompartimenten
c) Größe der Monitoringkompartimente
d) Eintrittwahrscheinlichkeit potentieller Gefährdungsereignisse
e) Schadensausmaß potentieller Gefährdungsereignisse
f) Interventionsmöglichkeiten für Gefährdungsereignisse und Schadensfälle

Die Punkte a) bis c) wurden bereits in den vorausgegangenen Kapiteln erläutert. Die Punkte d) und e) sind Gegenstand der Risikobewertung (siehe Kapitel XY im Endbericht zu Mo1/Mo3). Für die Risikobewertung sind die Anforderungen in der EU-Richtlinie (Anhang II, Stufe 3.3) in allgemeiner Form dargestellt, eine Untersetzung dieser Anforderungen und Empfehlungen zur Bearbeitung werden von Großmann et al. [2011, 12] gegeben. Hierin wird empfohlen, das Risk-Management für die $CO_2$-Speicherung in Anlehnung an die grundlegende Methodik der Störfallverordnung (vgl. Abbildung 2) sowie der zugehörigen Verwaltungsvorschriften durchzuführen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird z.B. in folgende Klassen eingeteilt:

1) Vernünftigerweise nicht auszuschließende Gefahrenquellen
2) Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen
3) Exzeptionelle Gefahrenquellen, die sich jeder Berechenbarkeit entziehen

Die Klassifizierung ist standortspezifisch vorzunehmen und könnte bei allgemeiner Betrachtung folgendermaßen erfolgen:

*Vernünftigerweise nicht auszuschließende Gefahrenquellen*

- Landhebung, Landsenkung über das für den bestimmungsgemäßen Betrieb prognostizierte Maß hinaus
- Beeinflussung der Grundwasserleiter, insbesondere der Salz-/Süßwassergrenze durch Aufstieg von Formationswasser über das für den bestimmungsgemäßen Betrieb prognostizierte Maß hinaus
- signifikante Leckage andere Gase z.B. Methan in Schutzgüter
- Erhöhte Seismizität während der Injektionsphase und Postinjektionsphase

- $CO_2$-Austritt in das Grundwasser und/oder die Atmosphäre aus aktiven und alten Bohrungen (incl. eruptive CO2-Freisetzung)
- Freisetzung von $CO_2$ aus Obertageeinrichtungen bei der Verpressung von $CO_2$

*Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen*

- signifikante $CO_2$-Leckage aus der Speicherformation in die Schutzgutbereiche einschließlich Atmosphäre, z.B. über Klüfte und Störungen
- unbeabsichtigte zukünftige Erschließung der $CO_2$-Speicherformation in Folge anderer wirtschaftlicher Nutzungsaspekte
- signifikante Freisetzung aus Obertageeinrichtungen bei der Verpressung von $CO_2$

*Exzeptionelle Gefahrenquellen, die sich jeder Berechenbarkeit entziehen*

- eruptive $CO_2$-Freisetzung aus der Speicherformation über Gesteinsklüfte und Störungen z.B. in Folge von Starkbeben, Meteoriteneinschläge oder vulkanogenen Ereignissen
- starke Erdbeben oder lokale Gebirgsschläge
- komplette Zerstörung von Obertageanlagen

Umso höher das Schadensausmaß potentieller Gefährdungsereignisse und umso schlechter die vorhandenen Interventionsmöglichkeiten für Gefährdungsereignisse sowie Schadensfälle sind, desto größer muss der Monitoringumfang zur Gewährleistung der Sicherheit sein. Im Falle von Gefährdungsereignissen oder Schadensfällen zur Verfügung stehende Gegenmaßnahmen werden z.B. bei Großmann et al. (2011) [4] oder Schilling (2009) [34] diskutiert.

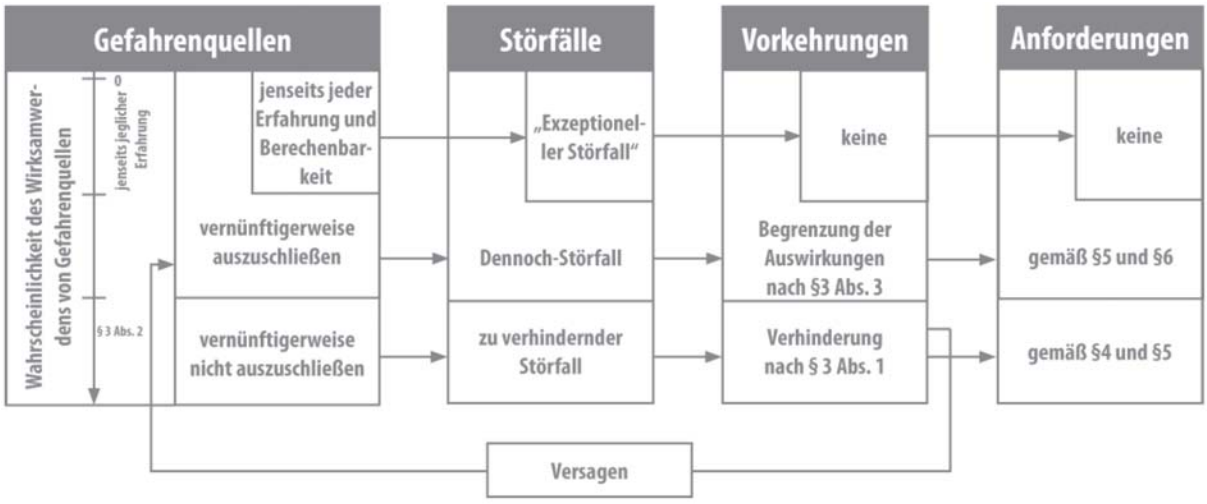



**Abbildung 2: Szenarien nach Störfallverordnung (Umweltbundesamt, 1999)**

# 9 Standortspezifisches Monitoringkonzept

Ein standortspezifischer Überwachungsplan muss entsprechend der EU-Richtlinie [1] (EU-RL, Anhang II) unter Zugrundelegung der vorgeschriebenen Risikobewertung (EU-RL, Anhang I, Stufe 3.3) aufgestellt und aktualisiert werden. Der Überwachungsplan regelt für die wesentlichen Projektphasen (Projektbeginn/Präinjektionsphase/Baselinemonitoring, Betriebs-/Injektionsphase, Nachsorge/Postinjektionsphase) die Überwachung. Die Ziele bzw. Anforderungen an das Monitoring wurden bereits in Kapitel 4 dargestellt. Die überwachten Parameter, eingesetzte Überwachungstechnologien und Gründe für deren Wahl, Überwachungsstandorte und Gründe für die Wahl der Flächenstichproben sowie die Durchführungshäufigkeit und Gründe für die Wahl der Zeitstichproben sind hierbei für jede Projektphase zu spezifizieren. Die Wahl der Überwachungsmethode hat dabei auf den zum Planungszeitpunkt besten verfügbaren Verfahren zu beruhen. So fern möglich, sind Technologien zu verwenden, die sich weiträumig einsetzen lassen, damit im Falle erheblicher Unregelmäßigkeiten oder bei Migration des $CO_2$ aus dem Speicherkomplex überall innerhalb der räumlichen Grenzen des gesamten Speicherkomplexes und außerhalb davon Daten über zuvor nicht erkannte potenzielle Leckagewege erfasst werden können [1].

Zur Aktualisierung des Überwachungsplans sind die innerhalb des Monitorings erhobenen Daten mit den Ergebnissen der Speichercharakterisierung und der dynamischen Modellierung zu vergleichen. Bei Abweichungen zwischen dem beobachteten und dem prognostizierten Verhalten sind die Modelle zu rekalibrieren und aufgrund neuer Simulationen die Gefahrenszenarien und Risikobewertung zu aktualisieren.

Die Nachsorgeüberwachung stützt sich auf die innerhalb des Monitorings erhobenen Daten und stellt die für die Übertragung der Verantwortung erforderlichen Informationen (EU-RL Artikel 18) zur Verfügung. Alle Hinweise müssen dabei darauf hindeuten, dass das gespeicherte $CO_2$ vollständig und dauerhaft zurückgehalten wird. Es ist nachzuweisen, dass das tatsächliche Verhalten des injizierten $CO_2$ mit dem modellierten Verhalten übereinstimmt, keine Leckagen feststellbar sind und sich die Speicherstätte hin zu einem Zustand langfristiger Stabilität entwickelt. Eine Mindestfrist von 20 Jahren ist hierbei einzuhalten.

Zur Erstellung eines standortspezifischen Monitoringplans müssen neben den vorgesehenen Injektionsbedingungen (Injektionsraten, etc.) also auch die detaillierten Ergebnisse der Standortcharakterisierung und der Risikobewertung bereits vorliegen. Die einzelnen geforderten Kriterien zur Charakterisierung des Speichers und seiner Umgebung, zur Erstellung eines statischen geologischen Modells sowie zu den dynamischen Modellprognosen, wie sie in der EU-Richtlinie oder in der UBA-Studie gefordert sind, sind in Tabelle 42 bis Tabelle 45 aufgeführt. Zu den jeweiligen Kriterien wurde für das CLEAN-Projekt der aktuelle Bearbeitungsstand, Ansprechpartner und die Verfügbarkeit der Informationen zusammengestellt. Der dargestellte Bearbeitungsstand muss dabei nicht in jedem Falle dem Stand nach Projek-

tende entsprechen, da zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts die Endberichte der Teilprojekte noch nicht verfügbar waren. Wie sich zeigt, sind wesentliche, für die Erstellung eines standortspezifischen Überwachungsplans erforderliche Untersuchungen, bisher noch nicht oder noch nicht in ausreichendem Umfang durchgeführt worden. Dies hängt u.a mit der aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen nicht durchgeführten $CO_2$-Injektion und dem verbundenen Aussetzen einiger Projektarbeiten zusammen.

Modellsimulationen für Leckagefälle oder einen nichtbestimmungsgemäßen Betrieb wurden nicht für alle Kompartimente, sondern nur für einzelne Szenarien wie Bohrlochleckagen in die Atmosphäre (DBI/GICON) oder tiefe (1000m) Aquifere (DBI) und Leckagen in flache (0-400m) Aquifere (CAU) durchgeführt. Insbesondere Simulationen von nichtbestimmungsgemäßen Betriebszuständen im Bereich der Speicher-, Rückhalte- und Transferpfadformation waren weitgehend nicht Bestandteil von CLEAN. Zur Festlegung der lateralen Erstreckung der Monitoringräume sind jedoch besonders diese Simulationen erforderlich. Hangende Monitoringkompartimente müssen dabei immer mindestens eine genauso große laterale Erstreckung wie tiefer liegende Kompartimente aufweisen. Wegen möglicher lateraler Ausbreitungen von Leckagen oder Formationswasseraufstiegen sollte i.d.R. die horizontale Erstreckung von tiefer liegenden Kompartimenten zu den höher gelegenen Kompartimenten zunehmen. Ohne Kenntnis über die Ausdehnung der basalen Monitoringkompartimente lässt sich somit auch nicht die Kompartimentgröße im Bereich der Oberfläche festlegen.

Simulationen von nichtbestimmungsgemäßen Betriebszuständen im Bereich der Speicher-, Rückhalte- und Transferpfadformation müssen auch wesentlicher Bestandteil für die standortspezifische Eignungsprüfung der Monitoringmethoden für diese Kompartimente sein. Nur wenn sichergestellt ist, dass die methodentypischen Detektionsgrenzen dafür ausreichen, die prognostizierten Systemänderungen nachzuweisen, können die Methoden in den Monitoringplan aufgenommen werden. Aufgrund der bisher ausgesetzten $CO_2$-Injektion ließen sich für verschiedene Methoden (z.B. Seismik) auch noch keine standortspezifischen Tests zur Prüfung der Methodeneignung und als Grundlage für eine Optimierung der Methodenanwendung durchführen.

Für das standortspezifische Monitoring am CLEAN-Standort wird empfohlen, dies entsprechend der vorausgegangenen Kapitel durchzuführen und hierbei die gegebenen Hinweise mit einzubeziehen. Da die $CO_2$-Einspeisung in eine weitgehend ausgeförderte Gaslagerstätte erfolgt, ist zu Beginn der Injektion von einer allgemeinen Gasdichtigkeit auszugehen, da durch das Vorhandensein der Lagerstätte diese Gasdichtigkeit bereits über geologische Zeiträume nachgewiesen wurde. Die chemischen Unterschiede zwischen $CO_2$ und dem bisher gespeicherten Erdgas sind hierbei jedoch zu beachten. Aufgrund der Reaktion von $CO_2$ mit Wasser und der hierbei auftretenden Säurebildung können Stahl, Zement und Gestein infolge einer $CO_2$-Injektion wesentlich schnelleren Lösungsprozessen unterliegen, als unter den bisher vorliegenden Bedingungen. Da infolge der Exploration zahlreiche Bohrungen im Spei-

cherbereich vorhanden sind, muss die Überwachung der Bohrungen einen wesentlich größeren Umfang einnehmen als z.B. bei der $CO_2$-Speicherung in salinen Aquiferen. Während für offene Bohrungen eine Reihe etablierter Methoden zur Verfügung stehen, mit denen innerhalb des Bohrlochs die Unversehrtheit sicher gestellt werden kann, lassen sich Altbohrungen und deren direkte Umgebung nur von der Oberfläche aus überwachen. Eine Überprüfung diesbezüglicher Überwachungsansätze hinsichtlich ihrer Sensitivität, die z.B. Geoelektrik, Aeroelektromagnetik und Grundwassermonitoring beinhalten könnten, steht derzeit noch aus.

Da der aktuelle Reservoirdruck viel geringer als der initiale Lagerstättendruck und auch als die Drücke in den Formationen im Umfeld des Reservoirs ist, sind Gefährdungen durch entweichendes $CO_2$ oder Formationswasser an diesem Standort als äußerst unwahrscheinlich einzuschätzen, solange durch eine Injektion die Initialdrücke nicht überschritten werden. Bei der $CO_2$-Einspeisung in eine Erdgaslagerstätte sollte aber in jedem Fall das Verhalten von Methan und anderen Gasen innerhalb des Monitorings überwacht werden. Im Falle nicht bestimmungsgemäßer Zustände könnten solche Gase unter Umständen gelöst oder gasförmig in Schutzgutformationen transportiert werden. Ob und inwieweit diese Prozesse als potenzielle Gefahrenquelle an diesem Standort relevant sind, ist schwer zu beurteilen, da insgesamt bisher kaum Untersuchungen zu dieser Thematik durchgeführt wurden.

Aufgrund der aufgezeigten Defizite und dem dadurch zurzeit in einigen Bereichen noch unzureichenden Kenntnisstand kann zum aktuellen Zeitpunkt für den CLEAN-Standort noch keine detaillierte Spezifizierung eines Monitoringplans erfolgen.

**Tabelle 42: Verfügbare Informationen für den CLEAN-Standort bezüglich EU-Richtlinie, Stufe 1 der Erkundung: a) Datenzusammenstellung zu Speicherstätte und Speicherkomplex.**

| *Aufgabe* | *Gefordert in* | *Ansprechpartner* | *Aktueller Stand* | *In CLEAN verfügbar* | *Grundlage für Überwachungsplan* |
|---|---|---|---|---|---|
| Geologie und Geophysik (des gesamten Untersuchungsgebiets) | EU-RL / UBA | GDF | Geologisches Modell für gesamtes Untersuchungsgebiet wurde durch GDF erstellt, die Nutzungsmöglichkeiten sind jedoch eingeschränkt | eingeschränkt | ja |
| Hydrogeologie (insbesondere für Verbrauch bestimmtes Grundwasser) | EU-RL / UBA | CAU, GICON | Die Hydrogeologie wurde für einen Teilbereich über dem Reservoir untersucht | Für Teilbereich | ja |
| Lagerstättentechnik (z.B. Porosität) | EU-RL / UBA | TUC (Ganzer) | Ergebnisse liegen vor | ja | Indirekt |
| Geochemie (Lösungsgeschwindigkeit, Mineralisierungsgeschwindigkeit) | EU-RL / UBA | FSU, Uni Tübingen | Ergebnisse liegen vor | ja | Bedingt |
| Geomechanik (Permeabilität, Frac-Druck) | EU-RL / UBA | TUC (Hou) LMU | Ergebnisse liegen vor | ja | Ja |
| Seismizität | EU-RL / UBA | GFZ, FUB, DMT | Simulationsergebnisse liegen vor, keine Messergebnisse | nein | Ja |
| Vorhandensein und Bedingung natürlicher und anthropogener Wege, einschließlich Brunnen und Bohrlöcher, die als Leckagewege dienen könnten | EU-RL / UBA | GDF, TUC (Reinicke) | Informationen über vorhandene Bohrungen und Störungen liegen vor. Die Zustände sind nur für die Bohrungen bekannt. | eingeschränkt | Ja |
| Bisherige natürlich und anthropogen hervorgerufene Veränderungen der Salz/Süßwassergrenze im Gebiet des Speicherkomplexes | UBA | | Nicht Gegenstand von CLEAN | nein | Ja |
| Bisherige natürlich und anthropogen hervorgerufe- | UBA | | Nicht Gegenstand von CLEAN | nein | ja |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ne Landhebungen und -senkungen im Gebiet des Speicherkomplexes | | | | | |
| Bisherige natürlich und anthropogen hervorgerufene Seismizität im Gebiet des Speicherkomplexes | UBA | GFZ, FUB, DMT | Konnte nicht bearbeitet werden | nein | ja |

**Tabelle 43: Verfügbare Informationen für den CLEAN-Standort bezüglich EU-Richtlinie, Stufe 1 der Erkundung: b) Datenzusammenstellung zu Umgebung des Speicherkomplexes (= Untersuchungsraum).**

| *Aufgabe* | *Gefordert in* | *Ansprechpartner* | *Aktueller Stand* | *In CLEAN verfügbar* | *Grundlage für Überwachungsplan* |
|---|---|---|---|---|---|
| Den Speicherkomplex umgebende (geologische?) Ausbildungen, die durch die Speicherung von $CO_2$ in der Speicherstätte beeinträchtigt werden könnten | EU-RL | GDF | Nicht Gegenstand von CLEAN | nein | Ja |
| Bevölkerungsverteilung über dem Gebiet der Speicherstätte | EU-RL | GICON | Nichtzugängliche vertrauliche Informationen | nein | Ja |
| Nähe zu wertvollen natürlichen Ressourcen | EU-RL | GICON/GDF | Nichtzugängliche vertrauliche Informationen | nein | Ja |
| Tätigkeiten im Umfeld des Speicherkomplexes und mögliche Wechselwirkungen mit diesen Tätigkeiten (z.B. Exploration, etc.) | EU-RL / UBA | GICON/GDF | Nichtzugängliche vertrauliche Informationen | nein | ja |
| Entfernung zur $CO_2$-Lieferquelle, verfügbare $CO_2$-Menge, Verfügbarkeit angemessener Transportwege | EU-RL | GDF | Nicht Gegenstand von CLEAN. Informationen müssten verfügbar sein. | | nein |

**Tabelle 44: Verfügbare Informationen für den CLEAN-Standort bezüglich EU-Richtlinie, Stufe 2 der Erkundung: Erstellung eines dreidimensionalen statischen geologischen Erdmodells.**

| *Aufgabe* | *Gefordert in* | *Ansprechpartner* | *Aktueller Stand* | *In CLEAN verfügbar* | *Grundlage für Überwachungsplan* |
|---|---|---|---|---|---|
| Geologische Struktur der Falle | EU-RL / UBA | GDF, TUC | Modell liegt vor. | ja | ja |
| Geomechanische, geochemische und strömungstechnische Eigenschaften der Lagerstätte (Speicherformation), des Deckgebirges und der umliegenden Formationen (Untersuchungsraum) | EU-RL / UBA | Verschiedene | Die Modellentwicklung erfolgte i.W. nur für die Speicherformation und den oberflächennahen Aquiferbereich | nur teilweise | Ja |
| Charakterisierung von Bruchsystemen und Vorhandensein anthropogener Wege (z.B. Bohrungen) | EU-RL / UBA | TUC (Reinicke), DBI, MLU | Auswertung alter Logs erfolgt. Keine neuen Logs aufgenommen. Keine Charakterisierung von Bruchsystemen. | nur teilweise | Ja |
| Räumliche und vertikale Ausdehnung des Speicherkomplexes / Untersuchungsraumes | EU-RL / UBA | GDF | Nur für die Speicherformation bekannt, nicht für den Untersuchungsraum | nur teilweise | Ja |
| Porenraumvolumen inkl. Porositätsverteilung | EU-RL | TUC | Porositäten sind bekannt | ja | Ja |
| Parametrisierung der physikalischen Eigenschaften der jeweiligen Formationen | UBA | Verschiedene | Im Wesentlichen nur für die Speicherformation bekannt | nur teilweise | Ja |
| Jedes weitere wichtige Merkmal | EU-RL / UBA | | | | Ja |

**Tabelle 45: Verfügbare Informationen für den CLEAN-Standort bezüglich EU-Richtlinie, Stufe 3.1 der Erkundung: Charakterisierung des dynamischen Speicherverhaltens (Modellprognosen).**

| *Aufgabe (Berücksichtigung von)* | *Gefordert in* | *Ansprechpartner* | *Aktueller Stand* | *In CLEAN verfügbar* | *Grundlage für Überwachungsplan* |
|---|---|---|---|---|---|
| Mögliche Injektionsraten und Eigenschaften des $CO_2$-Stroms | EU-RL | TUC (Ganzer) | Verhalten bei verschiedenen Injektionsraten für 100.000t $CO_2$ berechnet | | Ja |
| Wirksamkeit von gekoppelter Verfahrensmodellierung (Interaktion von Einzelwirkungen) | EU-RL | Verschiedene | Erfolgt | ja | Nein |
| Reaktive Prozesse (Wechselwirkungen von Fluiden und Festphasen) | EU-RL | Verschiedene | Erfolgt | ja | Ja |
| Verwendete Lagerstättensimulatoren (Vergleich verschiedener Modellprogramme) | EU-RL | Verschiedene | Erfolgt | ja | Nein |
| Kurz- und langfristige Simulationen (bis Jahrtausende) | EU-RL | TUC, DBI, UFZ | Nur Simulationen über wenige Jahre erfolgt. | nur teilweise | Ja |
| Druck der Speicherformation als Funktion der Injektionsrate und der Injektionsmenge im Zeitverlauf | EU-RL / UBA | TUC | Modellierung erfolgt. | ja | Ja |
| Räumliche und vertikale Ausdehnung der Speicherformation im Laufe der Zeit | EU-RL / UBA | TUC | Modellierung erfolgt. | ja | Ja |
| Art des $CO_2$-Flusses in der Lagerstätte einschließlich Phasenverhalten | EU-RL / UBA | TUC | Druck-Modellierung erfolgt. | ja | Ja |
| $CO_2$-Rückhaltemechanismen und –raten (inkl. Spillpoints, seitliche und vertikale Abdichtungen) | EU-RL | UFZ, CAU, TUD, TUC | Modellentwicklung erfolgt. | ja | Ja |
| Sekundäre $CO_2$-Anreichungen in der unterirdischen Umgebung des Speicherkomplexes | EU-RL | | In CLEAN nicht betrachtet | nein | Ja |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Speicherkapazität und Druckgradienten in der Speicherstätte | EU-RL | TUC | Modellierung erfolgt. | ja | Ja |
| Risiko der Bildung von Rissen in der (den) Speicherformation(en) und im Deckgestein | EU-RL | MLU Halle | Spannungsbedingungen und Deformationsverhalten im Deckgebirge untersucht | nur indirekt | Ja |
| Risiko des Eintritts von $CO_2$ in das Deckgestein | EU-RL | Verschiedene | In CLEAN nicht betrachtet | nein | Ja |
| Risiko von Leckagen aus der Speicherstätte (z. B. durch aufgegebene oder unsachgemäß abgedichtete Bohrlöcher) | EU-RL / UBA | Bohrungen: TUC (Reinicke) | Beurteilung anhand alter Logs erfolgt. Keine neuen Messungen | teilweise | Ja |
| Migrationsrate (bei Lagerstätten mit einer Öffnung (Open-ended Lagerstätten)) | EU-RL / UBA | | Nicht zutreffend für CLEAN | nein | Ja |
| Rissverschlussgeschwindigkeit | EU-RL | TUC (Reinicke) | Selbstheilung von Bohrköchern experimentell untersucht. Verschlussverhalten von Klüften nicht untersucht. | teilweise | Ja |
| Veränderungen an der Fluidchemie der Formation(en) und dadurch verursachte Reaktionen (z. B. Änderung des pH-Werts oder Mineralisierung) und Einbeziehung in die reaktive Modellierung zur Folgenabschätzung | EU-RL | UFZ, CAU, TUD, TUC | Modellentwicklung und Modellierung erfolgt. | ja | Ja |
| Verdrängung der ursprünglich vorhandenen Formationsfluide | EU-RL / UBA | | Für EGR/CLEAN nur bedingt relevant | | Ja (nicht für CLEAN) |
| Verstärkte seismische Aktivität und Aufwerfung der Oberfläche | EU-RL / UBA | GFZ, TUC | Hebungsberechnungen von TUC erfolgt | teilweise | Ja |
| Auswirkungsanalyse für Leckagen aus Bohrungen hinsichtlich einer pot. Grundwasserschädigung | UBA | CAU, Kretschmar | Erfolgt: CAU (flache Aquifere), Kretschamar (tiefe Aquifere) | ja | Ja |
| Auswirkungsanalyse für Leckagen aus Bohrungen hinsichtlich einer pot. Bodenluftschädigung | UBA | BGR (Dumke) | $CO_2$-Konzentraionsänderungen durch Leckagen bekannt | teilweise | Ja |
| Auswirkungsanalyse für Leckagen aus Bohrungen hinsichtlich einer pot. Gefährdung des Schutzgutes | UBA | GICON, TUC (Reinicke) | Nichtzugängliche vertrauliche Informationen | bedingt | Ja |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Mensch | | | | | |

# 10 Literatur

1. Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, *Richtlinie 2009/31/EG über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 3001/80/EG, 3004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006*. 2009, Amtsblatt der Europäischen Union. p. L140/114-135.
2. NETL, *Monitoring, Verification, and Accounting of $CO_2$ Stored in Deep Geologic Formations*. 2009, NETL - National Energy Technology Laboratory. p. 132.
3. Großmann, J., et al., *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung – Speicherprozesse*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 454.
4. Großmann, J., F. Schilling, and A. Dahmke, *Zusammenfassende Darstellung zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 76.
5. Ebert, M., *Speicherkomplexcharakterisierung - Teilbericht Reaktion mit dem Formationswasser, dem Formationsgestein und dem Deckgestein*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 41.
6. Bauer, S. and M. Ebert, *Speicherkomplexcharakterisierung -Teilbericht Modellrechnungen: Untersuchungen und Bewertung gängiger Rechenmodelle für die Darstellung des geologischen Untergrundes im Speicher und Darstellung im Speicher*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 63.
7. Reinicke, K.M., *Sicherheit- und umweltrelevante Prozesse - Teilbericht Versagensrisiko von Bohrungen*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 53.
8. Bauer, S. and D. Schäfer, *Sicherheit- und umweltrelevante Prozesse - Teilbericht Druckaufbau im Untergrund und Verdrängung des Formationswassers*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 51.
9. Schilling, F. and C. Krawczyk, *Erkundungs- und Monitoringmethoden, Schutzgutbetrachtungen*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 71.
10. Schäfer, D., *Erkundungs- und Monitoringmethoden, Schutzgutbetrachtungen - Teilbericht Erkundung und Monitoring des Schutzgutes Grundwassers*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 20.
11. Großmann, J., et al., *Erkundungs- und Monitoringmethoden, Schutzgutbetrachtungen - Teilbericht $CO_2$-Freisetzung in die Atmosphäre und $CO_2$-Ausbreitung in der Luft*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 45.
12. Großmann, J., F. Schilling, and A. Dahmke, *Schadensvorsorge und -beseitigung - Teilbericht Schutzgutbetrachtung, Risikomanagement*, in *Sicherheit und Umweltverträglichkeit der $CO_2$-Speicherung*. 2011, UBA - Umweltbundesamt. p. 50.
13. Goerne, G.v., F. Weinlich, and F. May, *Anforderungen und Vorschläge zur Erstellung von Leitfäden und Richtlinien für eine dauerhafte und sichere Speicherung von $CO_2$*. 2010, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). p. 251.
14. US-EPA, *General Technical Support Document for Injection and Geologic Sequestration of Carbon Dioxide: Subparts RR and UU*, in *Greenhouse Gas Reporting Program*. 2010, US EPA - Office of Air and Radiation. p. 98.
15. Aarnes, J., et al., *CO2QUALSTORE - Guideline for SElection and Qualification of Sites and Projects for Geological Storage of $CO_2$*. 2009, Det Norske Veritas: Høvik, Norway. p. 77.
16. Benson, S.M. and L. Myer. *Monitoring to ensure safe and effective geologic sequestration of carbon dioxide*. in *IPCC Workshop for Carbon Capture and Storage*. 2002.

17. Benson, S.M., G.M. Hoversten, and E. Gasperikova, *Overview of Monitoring Requirements for Geological Storage Projects*, I.-G.G.R.D. Programme, Editor. 2004. p. 99.
18. Benson, S.M., E. Gasperikova, and G.M. Hoversten. *Monitoring protocols and life-cycle costs for geologic storage of carbon dioxide*. in *7th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-7)*. 2005. Vancouver, Canada, September 5-9, 2004, .
19. Benson, S., *Monitoring carbon dioxide sequestration in deep geological formationsfor inventory verification and carbon credits*, in *SPE Annual technical conference and exhibition* 2006, SPE: San Antonio, Texas, USA.
20. Benson, S.M., *Monitoring Geological Storage of Carbon Dioxide*, in *Carbon capture ans sequestration: integrating technolog, monitoring and reg*. 2007, Blackwell: Ames , Iowa. p. 73-100.
21. Chadwick, R.A., et al., *Review of monitoring issues and technologies associated with the long-term underground storage of carbon dioxide*, in *Underground gas storage : worldwide experiences and future development in the UK and Europe*, D.J.C. Evans, R.A., Editor. 2009, Geological Society of London: London, UK. p. 257-275.
22. DIN-EN-1918-1, *Untergrundspeicherung von Gas, Teil 1: Funktionale Empfehlungen für die Speicherung in Aquiferen*. 1998, Deutsches Institut für Normung e. V. p. 12.
23. DIN-EN-1918-2, *Untergrundspeicherung von Gas, Teil 2: Funktionale Empfehlungen für die Speicherung in Öl- und Gasfeldern*. 1998, Deutsches Institut für Normung e. V. p. 11.
24. GEO-SEQ-Project-Team, *GEO-SEQ Best Practices Manual - Geologic Carbon Dioxide Sequestration: Site Evaluation to Implementation*. 2004, Earth Sciences Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. p. 40.
25. IEA-GHG. *2nd Meeting of the Monitoring Network Proceedings*. in *2nd Meeting of the Monitoring Network*. 2005. Rome, Italy: International Energy Agency Greenhouse Gas (IEA GHG) R&D Programme.
26. IEA-GHG. *3rd Monitoring Network Meeting Report*. in *3rd Monitoring Network Meeting*. 2007. Melbourne, Australia: International Energy Agency Greenhouse Gas (IEA GHG) R&D Programme.
27. Mathieson, A., et al., *$CO_2$ sequestration monitoring and verification technologies applied at Krechba, Algeria.* The Leading Edge, 2010. **29**(2): p. 216-222.
28. Oldenburg, C.M., J.L. Lewicki, and R.P. Hepple, *Near-surface monitoring strategies for geologic carbon dioxide storage verification*. 2003, Earth Sciences Division, Ernest Orlando Lawrence Berkley National Laboratory: Berkley, CA 94720. p. Size: 54 pages.
29. Pearce, J., et al., *A Technology Status Review of Monitoring Technologies for CO2 Storage*. 2005, U.K. Department of Trade and Industry, London, United Kingdom. p. 104.
30. Shuler, P.J. and Y. Tang, *Atmospheric CO2 Monitoring Systems - A critical review of available techniques and technology gaps, Report for SMV group, The $CO_2$ Capture Project (CCP)*. 2002. p. 33.
31. Whittaker, S., et al., *IEA GHG Weyburn $CO_2$ Monitoring & Storage Project Summary Report 200-2004*. 2004, Petroleum Technology Research Centre: Regina, Saskatchewan, CA. p. 274.
32. Winthaegen, P., R. Arts, and B. Schroot, *Monitoring Subsurface CO2 Storage.* Oil & Gas Science and Technology 2005. **Rev. IFP 60**(3): p. 573-582.
33. Schäfer, F., et al., *Projekt $CO_2$-Drucksimulation - Regionale Druckentwicklung bei der Injektion von $CO_2$ in saline Aquifere*. 2010, BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Hannover. p. 58.
34. Schilling, F.R., *Monitoring, Überwachung zukünftiger $CO_2$-Speicher*, in *Die dauerhafte geologische Speicherung von $CO_2$ in Deutschland - Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven*, L. Stroink, et al., Editors. 2009, Koordinierungsbüro GEOTECHNOLOGIEN: Potsdam. p. 88-102.

35. Reinicke, K.M. and C. Fichter, *Projekt CLEAN - TV 2.1 Zwischenbericht*. 2010, Technische Universität Clausthal, Institut für Erdöl- und Erdgastechnik: Clausthal. p. 71.
36. Madsen, R., et al., *Surface Monitoring Method for Carbon Capture and Storage Projects.* Energy Procedia, 2009. **1**: p. 2161-2168.
37. Lewicki, J.L., et al., *Surface $CO_2$ leakage during two shallow subsurface $CO_2$ releases.* Geophysical Research Letters, 2007. **34**(24): p. L24402.
38. Lewicki, J.L., et al., *Eddy covariance observations of surface leakage during shallow subsurface $CO_2$ releases.* Journal of Geophysical research, 2009. **114**: p. D12302 1-13.
39. Lewicki, J.L., et al., *Detection of $CO_2$ leakage by eddy covariance during the ZERT project's $CO_2$ release experiments.* Energy Procedia, 2009. **1**: p. 2301-2306.
40. Baldocchi, D.D., *Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future.* Global Change Biology, 2003. **9**(4): p. 479-492.
41. Billesbach, D.P., et al., *A Portable Eddy Covariance System for the Measurement of Ecosystem-Atmosphere Exchange of $CO_2$ Water Vapor, and Energy.* Journal of Meteorological Society, 2004. **21**(4): p. 639-650.
42. Kristiansen, M. and A. Jacob, *The Benefits of Advanced Leak Detection For NGL Pipelines.* Pipiline & Gas Journal, 2007. **October**: p. 57-59.
43. Carothers, W.W. and Y.K. Kharaka, *Stable carbon isotopes of $HCO_3^-$ in oil-field waters - implications for the origin of $CO_2$.* Geochimica et Cosmocimica Acta, 1980. **44**: p. 323-332.
44. Kharaka, Y.K., et al., *Potential environmental issues of $CO_2$ storage in deep saline aquifers: Geochemical results from the Frio-I Brine Pilot test, Texas, USA.* Applied Geochemistry, 2009. **24**: p. 1106-1112.
45. Kharaka, Y.K., et al., *Gas-water-rock interactions in Frio formation following CO2 injection: Implications for the storage of greenhaouse gases in sedimentary basins.* Geology, 2006. **34**(7): p. 577-580.
46. Emberley, S., et al., *Geochemical monitoring of fluid-rock interaction and CO2 storage at the Weyburn CO2- injection enhanced oil recovery site, Saskatchewan, Canada.* Energy, 2004. **29**(9-10): p. 1393-1401.
47. Emberley, S., et al., *Monitoring of fluid-rock interaction and $CO_2$ storage through produced fluid sampling at the Weyburn $CO_2$-injection enhanced oil recovery site, Saskatchewan, Canada.* Applied Geochemistry, 2005. **20**: p. 1131-1157.
48. Raistrick, M., et al., *Using Chemical and Isotopic Data to Quantify Ionic Trapping of Injected Carbon Dioxide in Oil Field Brines.* Environmental Science & Technology, 2006. **40**(21): p. 6744-6749.
49. Riding, J.B., *The IEA Weyburn CO2 Monitoring and Storage Project*, in *Advantages in the Geological Storage of Carbon Dioxide*, S. Lombardi, L.K. Altunia, and S.E. Beaubien, Editors. 2004, Springer: Dordrecht, NL. p. 223-230.
50. Smyth, R.C., et al., *Assessing risk to fresh water resources from long term $CO_2$ injection – laboratory and field studies.* Energy Procedia, 2009. **1**: p. 1957–1964.
51. Klusman, R.W., *Rate measurements and detection of gas microseepage to the atmosphere from an enhanced oil recovery/sequestration project, Rangely, Colorado, USA.* Applied Geochemistry, 2003. **18**: p. 1825-1838.
52. Klusman, R.W., *Baseline studies of surface gas exchange and soil-gas composition in preparation for $CO_2$ sequestration research: Teapot Dome, Wyoming.* AAPG Bulletin, 2005. **89**(8): p. 981-1003.
53. Spangler, L.H., et al., *A controlled field pilot for testing near surface CO2 detection techniques and transport models.* Energy Procedia, 2009. **1**: p. 2143-2150.
54. Hovorka, S.D., et al., *Measuring permanence of $CO_2$ storage in saline formations: the Frio experiment.* Environmental Geosciences, 2006. **13**(2): p. 105-121.
55. Strazisar, B.R., et al., *Near-surface monitoring for the ZERT shallow $CO_2$ injection project.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009. **3**: p. 736-744.

56. Bateson, L., et al., *The application of remote-sensing techniques to monitor CO2-storage sites for surface leakage: Method development and testing at Latera (Italy) where naturally produced CO2 is leaking to the atmosphere.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008. **2**: p. 388-400.
57. Klusman, R.W., *Rate measurements and detection of gas microseepage to the atmosphere from an enhanced oil recovery/sequestration project, Rangely, Colorado, USA.* Applied Geochemistry, 2003. **18**(12): p. 1825-1838.
58. Klusman, R.W., *Evaluation of leakage potential from a carbon dioxide EOR/sequestration project.* Energy Conversion and Management, 2003. **44**(12): p. 1921-1940.
59. Humphries, S.D., et al., *Testing carbon sequestration site monitor instruments using a controlled carbon dioxide release facility.* Applied Optics, 2008. **47**(4): p. 548-555.
60. Wells, A., et al., *Atmospheric tracer monitoring and surface plume development at the ZERT pilot test in Bozeman, Montana, USA.* Environmental Earth Sciences, 2009. **online**.
61. Lombardi, S., et al., *Near-Surface Cas Ceochemistry Techniques to Assess and Monitor CO2 Geological Sequestration Sites*, in *Advantages in the Geological Storage of Carbon Dioxide*, S. Lombardi, L.K. Altunia, and S.E. Beaubien, Editors. 2004, Springer: Dordrecht, NL. p. 141-156.
62. Annunziatellis, A., et al., *Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caltera (central Italy): Implications for CO2 storage.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008. **2**: p. 353-372.
63. Riding, J.B. and C.A. Rochelle, *Subsurface characterization and geological monitoring of the CO2 injection operation at Weyburn, Saskatchewan, Canada*, in *Underground gas storage : worldwide experiences and future development in the UK and Europe*, D.J.C. Evans, R.A., Editor. 2009, Geological Society of London: London, UK. p. 227-256.
64. Pironon, J., et al., *On-line greenhouse gas detection from soils and rock formations.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010. **4**: p. 217-224.
65. Chiodini, G., et al., *Soil CO2 flux measurements in volcanic and geothermal areas.* Applied Geochemistry, 1998. **13**(5): p. 543-552.
66. Granieri, D., et al., *Continuous monitoring of CO2 soil diffuse degassing at Phlegraean Fields (Italy): influence of environmental and volcanic parameters.* Earth and Planetary Science Letters, 2003. **212**(1-2): p. 167-179.
67. Cortis, A., C.M. Oldenburg, and S.M. Benson, *The role of optimality in characterizing $CO_2$ seepage from geologic carbon sequestration sites.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008. **2**: p. 640-652.
68. Quattrocchi, F., et al., *Continous/discrete geochemical monitoring of $CO_2$ Natural Analogues and of Diffuse Degassing Structures (DDS): hints for $CO_2$ storage sites geochemical monitoring protocol.* Energy Procedia, 2009. **1**: p. 2135-2142.
69. Wells, A.W., et al., *The use of tracers to assess leakage from the sequestration of CO2 in a depleted oil reservoir, New Mexico, USA.* Applied Geochemistry, 2007. **22**(5): p. 996-1016.
70. Giese, R., et al., *Monitoring at the CO2SINK Site: a Concept Integrating Geophysics, Geochemistry and Microbiology.* Energy Procedia, 2008.
71. Doughty, C., B.M. Freifeld, and R.C. trautz, *Site characterization for $CO_2$ geologic storage and vice versa: the Frio brine pilot, texas, USA as a case study.* Environmental Geology, 2008. **54**: p. 1653-1656.
72. Brink, J.L., et al. *Lost Hills Field Trial - Incorporating New Technology for Reservoir Management*. in *SPE Annual Technical Conference and Exibition*. 2002. San Antonio, Texas: Society of Petroleum Engineers.
73. Wielopolski, L. and S. Mitra, *Near-surface soil carbon detection for monitoring $CO_2$ seepage from a gelogical reservoir.* Environmental Earth Sciences, 2010. **60**(2): p. 307-312.

74. Spangler, L.H., et al., *A shallow subsurface controlled release facility in Bozeman, Montana, USA, for testing near surface $CO_2$ detection techniques and transport models.* Environmental Earth Sciences, 2010. **60**(2): p. 227-239.
75. Wielopolski, L., et al., *Nondestructive System for Analyzing Carbon in the Soil.* Soil Science Society of America Journal, 2008. **72**(5): p. 1269-1277.
76. Mathieson, A., Wright, I., Roberts, D. & Ringrose, P., *Satellite Imaging to Monitor $CO_2$ Movement at Krechba, Algeria.* Energy Procedia, 2009. **1**: p. 2201 - 2209.
77. Onuma, T., Ohkawa, S., *Detection of surface deformation related with CO2 injection by DInSAR at In Salah, Algeria.* Energy Prcedia, 2009. **1**: p. 2177 - 2184.
78. Ringrose, P., Atbi, M., Mason, D., Espinassous, M., Myhrer, O., Iding, M., Mathieson, A. & Wright, I., *Plume development around well KB-502 at the In Salah CO2 storage site.* First Break, 2009. **27**: p. 85 - 89.
79. Sweatman, R., McColpin, G., *Monitoring technology enables long-term CO2 geosequestration.* E&P, 2009.
80. Keith, C.J., et al., *Monitoring effects of a controlled subsurface carbon dioxide release on vegetation using a hyperspectral imager.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009. **3**: p. 626-632.
81. Meckel, T.A. and S.D. Hovorka. *Results from continous downhole monitoring (PDG) at a field-scale $CO_2$ Demonstration project, Cranfield, MS (SPE 127087)*. in *SPE International Conference on CO2 Capture, Storage, and Utilization*. 2009. San Diego, California, USA: Society of Petroleum Engineers
82. Meckel, T.A., S.D. Hovorka, and N. Kalyanaraman. *Continuous pressure monitoring for large volume $CO_2$ injections*. in *9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9)*. 2008. Washington, D.C.
83. Sato, K., et al., *Monitoring and simulation studies for assessing macro- and meso-scale migration of CO2 sequestered in an onshore aquifer: Experiences from the Nagaoka pilot site, Japan.* 2011. **5**(1): p. 125-137.
84. Berryman, J.G., *Surface and Borehole Electromagnetic Imaging of Conducting Contaminant Plumes*. 2000. p. 7.
85. Kirkendall, B. and J. Roberts. *Electromagnetic Imaging of CO2 Sequestration at an Enhanced Oil Recovery Site*. in *First National Conference on Carbon Sequestration*. 2001. Washington, DC, May 14-17: DOE NETL.
86. Christensen, N.B., D. Sherlock, and K. Dodds, *Monitoring $CO_2$ injection with cross-hole electrical resistivity tomography.* Exploration Geophysics, 2006. **37**(1): p. 44-49.
87. Newmark, R.L., A.L. Ramirez, and W.D. Daily. *Monitoring Carbon Dioxide Sequestration Using Electrical Resistance Tomography (ERT): Sensitivity Studies*. in *First National Conference on Carbon Sequestration*. 2001. Washington, DC, May 14-17: DOE NETL.
88. Förster, A., et al., *Baseline characterization of the $CO_2$SINK geological storage site at Ketzin, Germany.* Environmental Geosciences, 2006. **13**(3): p. 145-161.
89. Ramirez, A., et al. *Site characterization using joint reconstructions of disperate data types*. in *CO2SC Symposium*. 2006. Berkeley, California Lawrence Berkeley National Laboratory.
90. Koplos, J., et al. *UIC Programm Mechanical Integrity Testing: Lessons Learned for Carbon Capture and Storage?* in *Fifth Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration*. 2006.
91. Sakurai, S., et al. *Monitoring Saturation Changes for $CO_2$ Sequestration; Petrophysical Support of the Frio Brine Pilot Experiment*. in *46th Annual Logging Symposium*. 2006. Houston, Texas: Society of Petrophysicists and Well Log Analysts.
92. Sakurai, S., et al., *Monitoring Saturation Changes for CO2 Sequestration: Petrophysical Support of the Frio Brine Pilot Experiment.* Petrophysics, 2006. **47**(6): p. 483-496.
93. SMRI. *SMRI Reference for External Well Mechanical Integrity Testing/Performance, Data Evalutaion and Assessment*. in *SMRI Spring Meeting*. 1996. Houston.

94. Reinicke, K.M., C. Teodoriu, and C. fichter, *Bohrlochsicherheit - Entwicklung $CO_2$-resistenter Materialien*, in *Die dauerhafte geologische Speicherung von $CO_2$ in Deutschland - Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven*, L. Stroink, et al., Editors. 2009, Koordinierungsbüro GEOTECHNOLOGIEN: Potsdam. p. 78-85.
95. Ide, S.T., S.J. Friedmann, and H.J. Herzog. *$CO_2$ leakage through existing wells: current technology and regulations. In:* . in *Proceedings of 8th international conference on greenhouse gas control technologies, IEA Greenhouse Gas Programme*. 2006.
96. Nicot, J.-P., *A survey of oil and gas wells in the Texas Gulf Coast, USA, and implications for geological sequestration of $CO_2$.* Environmental Geology, 2009. **57**: p. 1625-1638.
97. Wilson, E.J., S.J. Friedmann, and M.F. Pollak, *Resaerch for Deployment: Incorporating Risk, Regulation, and Liability for Carbon Capture and Sequestration.* Environmental Science & Technology, 2007. **41**(17): p. 5945-5952.
98. Kikuta, K., et al. *Field test of $CO_2$ injection in Nagaoka, Japan*. in *7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. 2005. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd.
99. Wiegers, C., et al., *Szenarienmodellierung zur Ausbreitung von gasförmigem und gelöstem $CO_2$ in oberflächennahen Aquiferen*, in *Anlage zum Endbericht der Teilprojekte Mo1 und Mo3 im Themenverbund 4 (Monitoring) des F&E-Vorhabens CLEAN – $CO_2$ Enhanced Gas Recovery in the Altmark Natural Gas Field*. 2011, Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel: Kiel. p. 37.
100. Förster, A., et al., *Baseline characterization of the CO2SINK geological storage site at Ketzin, Germany.* Environmental Geosciences, V. 13, No. 3, 2006. **13**(3 ): p. 145-161.
101. Allis, R., et al. *Implications of results from CO2 flux surveys over known CO2 systems for long-term monitoring*
in *Fourth Annula Conference on Carbon Capture and Sequestration DOE/NETL*. 2005. Alexandria, Virginia: DOE/NETL.
102. Evans, W.C., et al., *Tracing and quantifying magmatic carbon discharge in cold groundwaters: lessons learned from Mammoth Mountain, USA.* Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2002. **114**: p. 291-312.
103. Aiuppa, A., et al., *Mobility and fluxes of major, minor and trace metals during basalt weathering and groundwater transport at Mt. Etna volcano (Sicily).* Geochimica et Cosmocimica Acta, 2000. **64**(11): p. 1827-1841.
104. Strutt, M.H., et al. *Soil gas as a monitoring tool of deep geological sequestration of carbon dioxide: Preliminary results from the Encana EOR project in Weyburn, Saskatchewan (Canada)*. in *6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. 2003. Kyoto: Elsevier Science Ltd.
105. Strutt, M.H., et al. *Soil gas as a monitoring tool of deep geological sequestration of carbon dioxide: Results from the three year Monitoring of the Encana Eor Project, Weyburn, Saskatchewan (Canada)* in *7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT7)*. 2005.
106. Anderson, D.E. and C.D. Farrar, *Eddy covariance measurement of $CO_2$ flux to the atmosphere from an area of high vocanogenic emissions, Mammoth Mountain, California.* Chemical Geology, 2001. **177**: p. 31-42.
107. Lewicki, J.L., M.L. Fischer, and G.E. Hilley, *Six-week time series of eddy covariance $CO_2$ flux at Mammoth Mountain, California: Performance evaluation and role of meteorological forcing.* Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008. **171**: p. 178-190.
108. Werner, C., et al., *Monitoring volcanic hazard using eddy covariance at Solfatara colcano, Naples, Italy.* Earth and Planetary Science Letters, 2003. **210**: p. 561-577.

# 11 Anhang

## 11.1 Methodensteckbriefe

| **AKKUMULATIONSKAMMER** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** $CO_2$-Fluss-Messung an der Grenze Boden-Atmosphäre durch Eindrücken einer geschlossenen Kammer (∅: 10-20 cm) um 2 cm in den Boden. Zeitliche Messung des Wiederanstiegs der $CO_2$-Konzentration nach deren Absenkung. |
| **Analytik:** Infrarot Gasanalyse |
| **Messhäufigkeit:** variabel |
| **Messposition:** variabel |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** Wenige Minuten pro Messung |
| **Messbereich:** - |
| **Messgenauigkeit:** 10-13% |
| **Nachweisgrenze:** - |
| **Aussagereichweite:** Ca. 30 cm |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Diffuse Leckagen, (Kluft-Leckagen), (Bohrlochleckagen) |
| **Entwicklungsstand:** Stand der Technik |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** *Bozeman (ZERT)* [53], [37], *Ketzin* [100] |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** *Latera [62], Sesta, Siena basin, Siena Rapolano fault, Ciampino, San Vittorino, Fucino* [61], *Farnham Dome, Springville-St. Johns, Crystal Geyser-Ten Mile Graben* [101] |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** - |
| **Vorteile:** Schnelle, einfache Messung; Viele Einzelmessungen (Messnetze) realisierbar; Großer Messbereich |
| **Nachteile:** Automatisierte Wiederholungsmessungen praktisch nur an einzelnen Positionen zu realisieren; Punktinformationen |
| **Bewertung:** - |
| **Kosten:** Ausrüstung (pro Gerät): 7.000-10.000 € |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** - |
| **Anwendung in CLEAN:** - |
| **Literatur:** [53], [39], [65], [36], [52], [66], [67], [37], [61], [37], [62] |

| **TEMPERATUR-BOHRLOCHMESSUNGEN** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** Hinweis auf Vertikalströmungen entlang von Bohrungen durch Messung der Temperaturverteilung. Es stehen grundsätzlich zwei unterschiedliche Messmethoden zur Verfügung: 1) Bohrlochmessung am Kabel (Wireline-Logging), oder 2) Messung kontinuierlicher Temperaturprofile mit der Methode des Distributed Temperature Sensing (DTS) und permanent installierten Messkabeln, teilw. unter zusätzlicher Verwendung einer kontrollierten Wärmequelle (Distributed Thermal Perturbation Sensing, DTPS). |
| **Analytik:** Bohrlochsonde mit Temperatursensor (meist Widerstandsthermometer). DTS: Optical Time-Domain Reflectometry (OTDR), Raman-Effekt. |
| **Messhäufigkeit:** Einzelmessung (Wireline-Logging, DTPS) oder kontinuierliche Beobachtung (DTS). |
| **Messposition:** Im Steigraum des Bohrlochs (Wireline-Logging) oder hinter der Verrohrung bzw. an der Aussenseite eines Tubingstrangs (DTS). |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** Bei Wireline-Logging in Abhängigkeit der Tiefe des Bohrlochs bis zu mehreren Stunden (Fahrgeschwindigkeit ca. 8 m/min). Bei DTS-Messungen kann ein Temperaturprofil in Abhängigkeit der Messgenauigkeit in einem Zeitraum von wenigen Sekunden bis zu ca. 30 Minuten registriert werden. DTPS: ca. 4 Tage |
| **Messbereich:** Bohrloch |
| **Messgenauigkeit:** ca. 0.01 °C (Wireline-Logging), bzw. ca. 0.3 °C (DTS). |
| **Nachweisgrenze:** Grundsätzlich abhängig von den individuellen Bedingungen, es liegen jedoch noch keine Daten oder Untersuchungen speziell für $CO_2$ vor. |
| **Aussagereichweite:** Bohrloch-Nahbereich (dm-Bereich) |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Bohrlochleckagen |
| **Entwicklungsstand:** Stand der Technik, DTPS in Entwicklung. |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** Ketzin |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** DTS per Modbus oder Internet. |
| **Vorteile:** Erkennung von Leckagen hinter der Verrohrung. Mit DTS kontinuierliche Überwachung der gesamten Bohrlochstrecke. Vergleichsweise geringe Kosten. |
| **Nachteile:** I. d. R. keine direkte Detektierbarkeit von $CO_2$. Geringe Leckageraten können ggf. nicht erkannt werden. |
| **Bewertung:** |
| **Kosten:** Wireline-Logging ca. 10.000,- € / Messung, DTS ca. 50.000-100.000,- € für Messkabel und Opto-Elektronische Registriereinheit. |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** |
| **Anwendung in CLEAN:** DTS-Monitoring mit neu entwickeltem Hybrid-Wireline-Loggingkabel zur Injektionsprofilierung (Teilprojekt IV.2) |
| **Literatur:** Freifeld et al. (2009), Hurtig et al. (1994), Henninges et al. (2005), Ramey (1962) |

| **GRUNDWASSERMONITORING** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** V. a. Verringerung von pH sowie Erhöhung von Ca, DIC und Alkalität gegenüber Hintergrundwerten lassen auf Eindringen von $CO_2$ in Grundwasserleiter schließen |
| **Analytik:**<br>• ICP (Ca, Mg, Fe, Mn, Na, K)<br>• Ionenchromatographie, Fotometer (Cl, $SO_4$, $NO_3$)<br>• TIC/TOC-Analyzer (DIC, dissolved inorganic carbon)<br>• Titration (Alkalität)<br>• Sondenmessungen (pH, el. Leitfähigkeit, Redoxpotential, $O_2$, Temperatur)<br>• $CO_2$-Sonden (→)<br>• Isotopen (→) |
| **Messhäufigkeit:** Variabel (monatlich, vierteljährlich, jährlich) |
| **Messposition:** an Messstellen gebunden |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** abh. vom Umfang und Technik, ca. 5 Positionen pro Tag |
| **Messbereich:** abhängig von den Messparametern |
| **Messgenauigkeit:** < 3-5% |
| **Nachweisgrenze:** abhängig von den Hintergrundbedingungen |
| **Aussagereichweite:** ca. 1 m |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Diffuse Leckagen, (Kluft-Leckagen), (Bohrlochleckagen) |
| **Entwicklungsstand:** Stand der Technik |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:**<br>Oberflächennah: *Bozeman (ZERT)* [53]<br>Reservoir und Umgebungbereich: *South Liberty Salt Dome (Frio), Texas* [54], [44], *Weyburn, Kanada* [48], [47], SACROC oil field, [50], *Ketzin* [100] |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** *Mammoth Mountain* [102], *Etna* [103] |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** Teilw. für Sondenmessungen möglich |
| **Vorteile:**<br>• Etablierte und günstige Analytik<br>• Durch Grundwasserströmung sich ausbildende Fahnen leichter detektierbar als Punktquellen<br>• Mehrere Proxies (pH, DIC, Alkalität, Ca, Isotopen) |
| **Nachteile:**<br>• Überlagerung unterschiedlicher $CO_2$-beeinflussender Prozesse<br>• ± Punktinformationen |
| **Bewertung:** Zur Leckagedetektion nur für sehr begrenzte flächen geeignet, Standardverfahren zur Charakterisierung |
| **Kosten:** 5-20 €/Analyse |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** |
| **Anwendung in CLEAN:** Mo3 (CAU/GICON) |
| **Literatur:** [50], [53], [54], [44], [48], [47] |

| **BODENLUFTANALYTIK** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** Änderungen in der Zusammensetzung der Bodenluft ermöglichen Rückschlüsse auf Leckagen. |
| **Analytik:**<br>(a) In-situ-Analyse mit IR- oder elektrochemischen Sensoren oder PN möglich; Sonden an beliebiger (unversiegelter) Stelle einbringbar; Gaschromatographie, Massenspektrometer<br>(b) Laser-basierte Differential-Absorption; Kontinuierliche Messung; Infrarot-Gasanalyse<br><br>Messung von $CO_2$, $N_2$, $O_2$, $H_2$, He, $H_2S$, Methan, Ethylen, Acetylen, Ethan, Propan, Ar, $^{222}Rn$, Tn ($^{220}Rn$), Isotopen (→), Tracergase (→) |
| **Messhäufigkeit:** (a) Stichtagsmessungen oder kontinuierlich, (b) kontinuierlich |
| **Messposition:** mobile, eindrückbare Sonden: 0.3-1.0m u GOK<br>fest installierte Messstellen: 1-10m u GOK |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** kurz |
| **Messbereich:** je nach Sensor 0-1, 0-5, 0-10, 0-20% $CO_2$ |
| **Messgenauigkeit:** - |
| **Nachweisgrenze:** - |
| **Aussagereichweite:** ± Punktinformationen |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Diffuse Leckagen, (Kluft-Leckagen), (Bohrlochleckagen) |
| **Entwicklungsstand:** (a) Stand der Technik, (b) Prototypen |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** *Bozeman (ZERT)* [55], [53], [60], [59], *Tea-pot Dome, Wyoming* [52], *Rangley, Colorad,* [51], *Weyburn* [21], [63], [104], [105], *Ketzin* [100] |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** *Latera* [56], [61], [62], *Sesta* [61] |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** gegeben |
| **Vorteile:** Online-Messung an ausgewählten Positionen möglich, Tiefenhorizontierte Beprobung kann auf $CO_2$-Ursprung hinweisen, Kombinerte $CO_2/O_2$-Messung kann auf $CO_2$-Ursprung hinweisen |
| **Nachteile:** Überlagerung unterschiedlicher $CO_2$-beeinflussender Prozesse, Leckagen ohne Isotopenmessungen nur bedingt von Hintergrundkonzentrationen zu unterscheiden, ± Punktinformationen |
| **Bewertung:** Nur für die Überwachung ausgewählter Positionen mit ausgedehntem Baselinemonitoring geeignet |
| **Kosten:** - |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** Ausführliches Baselinemonitoring aufgrund hoher Hintergrundkonzentrationen besonders wichtig; Starke jahreszeitliche Schwankungen; Winter aufgrund geringeren Hintergrunds besser geeignet |
| **Anwendung in CLEAN:** Mo2 (BGR) |
| **Literatur:** [55], [56], [57], [58], [59], [53], [60], [52], [61], [62], [63] |

| **EDDY-KOVARIANZ** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** Direkte Messung des $CO_2$-Flusses zwischen der oberen Vegetationsgrenze und der Atmosphäre. Hierbei wird berücksichtigt, dass sich horizontale Luftbewegungen aus dreidimensionalen Luftwirbeln unterschiedlicher Ausprägung ergeben. Die vertikalen Massenflüsse, die sich aus den vertikalen Komponenten der Luftwirbel ergeben, werden gemessen. |
| **Analytik:** Präzisionsmessung von vertikalen Windgeschwindigkeiten (akustische Anemometer), Temperatur, Konzentrationen und Feuchtigkeit an hierfür errichteten Türmen mit 3-5 m Höhe. Aufwendige mathematische Datenverarbeitung unter zahlreichen Annahmen. |
| **Messhäufigkeit:** kontinuierlich |
| **Messposition:** Von speziellen Messtürmen aus |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** kontinuierlich |
| **Messbereich:** - |
| **Messgenauigkeit:** 5-30% |
| **Nachweisgrenze:** - |
| **Aussagereichweite:** 100-200m |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Diffuse Leckagen, Kluft-Leckagen, Bohrlochleckagen |
| **Entwicklungsstand:** Kommerziell verfügbar; Eignung für CCS in Untersuchung |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** *SECARB, Virginia* [36] *Bozeman (ZERT)* [53], [39] |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** *Mammoth Mountain, CA* [106], [107], *Solfatara Volcano, Italien* [108] |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** - |
| **Vorteile:** Raum- und zeitintegrierende Messung; Im Vgl. zu anderen Verfahren können größere Flächen überwacht werden; grobe Leckagelokalisierung innerhalb des Integrationsraums möglich |
| **Nachteile:** Geringes räumliches Auflösungsvermögen; kleinere Leckagen kaum detektierbar; Annahme horizontaler und homogener Oberfläche nur eingeschränkt zutreffend; Messergebnis abhängig von meteorologischen Bedingungen und Oberflächenverhältnissen |
| **Bewertung:** Eignung für CCS/EGR noch nicht überprüft |
| **Kosten:** Ausrüstung (pro Messturm): 10.000-30.000 € |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** - |
| **Anwendung in CLEAN:** keine |
| **Literatur:** [36], [37], [38], [39], [40], [41], http://www.licor.com/env/PDF/EddyCovariance_readonly.pdf |

| **ISOTOPENMESSUNGEN (in Flüssig- und Gasphase) (C-, O-, S-Isotopen)** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** Durch Messung der $^{13}C$-Signatur kann Kohlenstoff aus einer $CO_2$-Leckage von Kohlenstoff aus der Karbonatlösung und von atmosphärischem $CO_2$-Eintrag unterschieden werden. Aus der Wurzelzone stammendes $CO_2$ ist mit der $^{13}C$-Analytik jedoch nicht immer von Leckage-$CO_2$. zu unterscheiden. Dies ist jedoch anhand der $^{14}C$-Signaturen möglich, die ihrerseits jedoch keine Unterscheidung zwischen Karbonatlösung und $CO_2$-Leckage zulassen. Zur Charakterisierung des Ursprungs ansteigender $CO_2$-Konzentrationen im Grundwasser oder der Bodenluft werden demzufolge kombinierte Messungen von sowohl $^{13}C$- als auch $^{14}C$-Signaturen empfohlen. Isotopenmessungen können sowohl für Bodenluft (→) als auch für Flüssigphasen (→ Grundwassermonitoring) erfolgen.<br>Durch Isotopenmessungen ($^{13}C$ u. $^{18}O$) im Reservoirbereich lassen sich Massen- und Volumenverhältnisse von $CO_2$ zu Solwasser und der Anteil der ionischen $CO_2$-Bindung als Speicherprozess bestimmen. |
| **Analytik:** $^{13}C(CO_{2,g})$, $^{13}C(HCO_{3,aq})$, $^{13}C(CH_{4,g/aq})$, $^{34}S(SO_{4,aq})$, $^{34}S(H_2S_{aq})$, $^{34}S(H_2S_g)$, $^{18}O(CO_{2,g})$, $^{18}O(HCO_{3,aq})$, $^{18}O(H_2O)$: Massenspektrometer, $^{14}C$: Beschleuniger Massenspektrometer (AMS) |
| **Messhäufigkeit:** Stichtagsmessungen |
| **Messposition:** Grundwasser: an Messstellen gebunden, Bodenluft: mobile eindrückbare Sonden oder fest installierte Messstellen |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** Probenahmedauer entsprechend Grundwassermonitoring (→) oder Bodenluftuntersuchung (→) |
| **Messbereich:** - |
| **Messgenauigkeit:** $^{14}C$: 4-8 ‰; 13C: 0.05 ‰; $^{18}O$: 0.06 ‰ (absolut) |
| **Nachweisgrenze:** $^{14}C$: Leckagen mit Raten von ≥ 1 µmol $CO_2$ $m^{-2}$ $s^{-1}$ können gut nachgewiesen werden. Der Nachweis geringerer Leckagen erfordert ein besonders gut aufgelöstes Baselinemonitoring. |
| **Aussagereichweite:** entsprechend Grundwassermonitoring (→) bzw. Bodenluftuntersuchung (→) (≤ 1 m) |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Diffuse Leckagen, (Kluft-Leckagen), (Bohrlochleckagen) |
| **Entwicklungsstand:** Analytik: Stand der Technik; CCS-Monitoring: Anwendung an Teststandorten |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** South Liberty Oil Field (Frio) [44], [45], Weyburn [46-49], SAROC Oil Field [50], Teapot Dome Oil Field Wyoming [51, 52], Bozeman (ZERT), [53], *Ketzin* [100] |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** Mammoth Mountain [102] |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** nicht gegeben |
| **Vorteile:** Eine der wenigen Methoden zur Unterscheidung zwischen CCS-$CO_2$ und natürlichem $CO_2$, Je nach Standortgegebenheiten kann auch durch alleinige $^{13}C$-Messung (ohne zusätzliche $^{14}C$-Messung) auf $CO_2$-Ursprung geschlossen werden. |
| **Nachteile:** $^{14}C$: teure Analytik, Störung des Messsignals durch Kohlenwasserstoffe möglich |
| **Bewertung:** Im Rahmen des Baselinemonitorings und eines optionalen erweiterten Monitorings sinnvoll |
| **Kosten:** Analysenkosten: $^{13}C$: 15-30,- €, $^{14}C$: 400-600,- €, $^{18}O$: 15-30,- € |

| |
|---|
| **Sonstiges/Anmerkungen:** - |
| **Anwendung in CLEAN:** Mo3 (CAU/GICON), Mo4.3 (GZN) |
| **Literatur:** [28], [43], [44], [45], [46-49], [50], [51, 52], [53] |

| **TRACER** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** Als Tracer (Markeirungsstoffe) benutzt werden können einerseits natürliche Tracer wie z.B. $CO_2$-Isotopen und andererseits dem $CO_2$ zusetzbareTracer wie Edelgase, $SF_6$ oder Perfluorocarbon-Tracer (PFT, z.B. Perfluoroethylcycloethan (PECH), Perfluoromethylcyclohexan (PMCH), Perfluoro-1,2-Dimethylcyclohexan (PDCH), Perfluoro-trimethylcyclohexane (PTCH), Perfluorodimethylcyclobutan (PDCB)). $SF_6$ und PTF haben eine sehr niedrige Nachweisgrenze und eignen sich deshalb durch deren Nachweis z.B. im Grundwasser oder der Bodenluft gut als Leckageanzeiger. Mit Tracern läßt sich das Ausbreitungs- und Durchbruchverhalten im Reservoirbereich überwachen. |
| **Analytik:** PTF: Thermische Desporption, Gaschromatographie mit Elektroneneinfangde-tektion (GC-ECD), Isotopen: (→) |
| **Messhäufigkeit:** Stichtagsbeprobungen oder kontinuierliche Messung |
| **Messposition:** an Messstellen, Probenahmelanzen oder mobile Probenahmetechnologie (z.B. Direct-Push) gebunden |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** - |
| **Messbereich:** Bodenluft, Grundwasser, Reservoirfluide |
| **Messgenauigkeit:** 3-5% |
| **Nachweisgrenze:** $SF_6$: 10 ppb, PTF: ppt bis ppq |
| **Aussagereichweite:** < 1m |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Diffuse Leckagen, (Kluft-Leckagen), (Bohrlochleckagen) |
| **Entwicklungsstand:** Stand der Technik, Analytik in spezialisierten Labors |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** *Bozeman (ZERT)* [53, 55], *West Pearl Queen Öl-Formation* [69], *Weyburn* [2], *Ketzin* [70], *South Liberty Salt Dome (Frio), Texas* [54, 71] |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** - |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** - |
| **Vorteile:** Sensitivität des Nachweises von PFT um mehrere Größenordnungen höher als bei anderen Methoden. Keine natürlichen Hintergrundkonzentrationen. |
| **Nachteile:** I.d.R. keine Vorort-Analysen möglich. In $CO_2$ lösliche Substanzen stellen oft selbst Treibhausgase dar. |
| **Bewertung:** Etabliertes Verfahren, Einsatz nur für spezielle Ziele sinnvoll |
| **Kosten:** - |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** - |
| **Anwendung in CLEAN:** Messung stabiler Isotopen im Reservoirbereich (Mo4.3) und im Grundwasser (Mo3) |
| **Literatur:** [53, 55, 60, 69], [2], [70], [54, 71] |

| **ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTIONS-TOPMOGRAPHIE (EMIT)** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** Durch Anlegen elektromagnetischer Felder über Induktionsspulen (elektromagnetische Dipole), die sich in Bohrlöchern oder an der Geländeoberfläche befinden können, werden im Untergrund ein magnetische Felder induziert, deren vertikale und horizontale Komponenten sich messen lassen. Die Detektoren hierfür können ebenfalls in Bohrlöchern und oberflächlich positioniert werden. Enthalten die Porenräume von Sedimenten oder Gesteinen Wasser, so leiten diese den elektrischen Strom wesentlich besser, als wenn die Porenräume mit $CO_2$ erfüllt sind. Unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten spiegeln sich in unterschiedlicher elektromagnetischer Induzierbarkeit wider, die sich dreidimensional und mit einer besseren Auflösung als die elek. Leitfähigkeit bzw. der elek. Widerstand aufzeichnen lassen. |
| **Analytik:** Elektromagnetisches Induktionsgerät (z.B. Geophex GEM 2). Da die Eindringtiefe eine Funktion der Anregungsfrequenz ist, lassen sich durch die Verwendung verschiedener Frequenzen unterschiedliche Tiefen untersuchen. |
| **Messhäufigkeit:** Etwa drei Bohrloch-Bohrloch-Aufzeichnungen pro Tag möglich. |
| **Messposition:** Positionierung von Transmittern und Detektoren an der Oberfläche und in Bohrlöchern möglich. |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** Etwa drei Bohrloch-Bohrloch-Aufzeichnungen pro Tag möglich. |
| **Messbereich:** Reservoir, Deckgebirge, Aquifere |
| **Messgenauigkeit:** Die Auflösung entspricht ca. 1/20 des Abstandes zw. Transmitter und Detektor. Auflösungen von ca. 0.5m sind praktikabel. |
| **Nachweisgrenze:** - |
| **Aussagereichweite:** - |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Diffuse Leckagen, Kluft-Leckagen, Bohrlochleckagen |
| **Entwicklungsstand:** Technologie in Entwicklung. |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** *Lost Hills Ölfeld* [85], *Bozeman (ZERT)* [55] |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** - |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** nicht gegeben |
| **Vorteile:** 3D-Monitoring. Höhere Auflösung als elektrische Widerstands-Tomographie. |
| **Nachteile:** Relativ neue Technologie mit weiterem Entwicklungsbedarf besonders in der Datenweiterverarbeitung. Nichtleitende Verrohrung zur hoch aufgelösten Aufzeichnung erforderlich. |
| **Bewertung:** - |
| **Kosten:** Geschätzte Einrichtungskosten ca. 200.000,- €, Tägliche Betriebskosten ca. 3.500,- €. Etwa drei Bohrloch-Bohrloch-Aufzeichnungen pro Tag möglich. (Sandia National Laboratories) |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** - |
| **Anwendung in CLEAN:** keine |
| **Literatur:** [55, 84, 85] |

| **ELEKTRISCHE WIDERSTANDS-TOMOGRAPHIE (ERT)** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** Borehole electrodes are installed along fresh/saline water reservoir, caprock and aquitard at intervals depending on the resolution required. 2D/3D qudripole data acquisition (with a pair of current and potential electrodes) are conducted in a suitable electrode configuration and inverted using available subsurface (seismic, logs) data a ppri-ori |
| **Analytik:** ERT in boreholes results in resolution tomograms at the depth interval required, i.e. it overcome the disadvantage of surface survey of the resolution decrease with depth |
| **Messhäufigkeit:** Continuoius (inhole, crosshole) |
| **Messposition:** At the required depth interval via electrodes installed in boreholes (inhole and crosshole) |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** Some hours (depending on the data size and spatial/temporal resolution required) |
| **Messbereich:** Optional, e.g. saline/fresh water reservoir, caprock, aquitard, lateral up to ≈1 km |
| **Messgenauigkeit:** The resolution of detectability is about 0.5-1 unite of electrode spacing |
| **Nachweisgrenze:** - |
| **Aussagereichweite:** The aspect ratio (vertical array length divided by the horizontal crosshole offset) is 1 - 0.5. For aquifer with very high pore water salinity, the maximum borehole offset is ≈1 km |
| **Monitoringphase:** Baseline, $CO_2$ injection and migration |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Diffuse, tectonic |
| **Entwicklungsstand:** ERT technique is well developed |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** ERT modifications and applications for CCS is in development (e.g. $CO_2$-SINK, $CO_2$-MoPa) |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** Uncommon |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** nicht gegeben |
| **Vorteile:** Permanent installation of electrodes for one time during boring, continuous moni-toring with insignificant new costs, deliver better information on the intrinsic parameters of the formation and its petrophysics |
| **Nachteile:** Problem of smearing and artefacts in the results, limited lateral borehole offset that increases the number of the observatory wells |
| **Bewertung:** Very good for continuous monitoring in combination with seismics that can be conducted at moderate to high intervals (years?) depending on the development of the $CO_2$ plume and the temporal resolution required |
| **Kosten:** Messung: ca. 1500,- € pro Profil-km von der Oberfläche aus (bei 60 m Eindringtie-fe) zzgl. Auswertung |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** - |
| **Anwendung in CLEAN:** Mo3 (CAU) |
| **Literatur:** ([86]; [87];[55]; [88];[70];[89]) |

| **HELICOPTER-BORNE TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETIC (HTEM)** |
|---|
| **Monitoringprinzip:** An einen Helikopter ist ein elektromagnetischer Sender angehängt, der in elektrisch leitenden Objekten wie mineralisierten Wässern einen Strom und damit ein Magnetfeld induziert. Wird der anregende Sender plötzlich abgeschaltet, klingt auch das induzierte sekundäre Magnetfeld ab. Ein Empfänger detektiert die Geschwindigkeit des Abklingens des sekundären Magnetfelds (time-domain system, Zeitbereichsystem). Der elektromagnetische Sender wird intermittierend an- und abgeschaltet, wobei der Helikopter das zu untersuchende Gelände streifenförmig abfliegt. |
| **Analytik:** Empfänger zur Detektion der Abklinggeschwindigkeit des elektromagnetischen Felds, der i.A. am vom Helikopter abgehängten Sender angebracht ist. Weiterhin permanente Kontrolle der Senderstärke und Bestimmung der Raumkoordinaten durch GPS und Laser-/Radar-Höhenmesser.<br>Messmethode nicht spezifisch für $CO_2$, sondern für die durch $CO_2$-Eintrag verursachte Veränderung der Leitfähigkeit des Grundwassers. Sollte auch Salzwasserintrusionen detektieren. |
| **Messhäufigkeit:** Stichtagsbefliegungen |
| **Messposition:** Berührungsfreies Befliegen des gesamten Areals, Messung in „Streifen“ |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** Befliegung mit ca. 20-40 km/h, „Streifen“ von ca. 30-40m Breite. Annahme: Gebiet von 10km x 10km => ca. 300 „Streifen“ à 10km => Flugstrecke ca. 3000 km, Zeitbedarf ca. 100 h |
| **Messbereich:** Oberflächennah, Eindringtiefen bis 300m wurden demonstriert, evtl. sind bei ausreichenden Veränderungen der el. Leitfähigkeit größere Tiefen möglich. Andere aeroelektromagnetische Methoden (HEM) haben geringere Eindringtiefen, aber höhere Sensitivität und räumliche Auflösung |
| **Messgenauigkeit:** Leitfähigkeitsänderungen von 25% problemlos detektierbar |
| **Nachweisgrenze:** noch unbekannt |
| **Aussagereichweite:** grobe Faustformel: Durchmesser der zu detektierenden Objekte > Eindringtiefe. Einflüsse durch hangende Ton- u. Schluffschichten, andere elektrisch leitende Gegenstände (Metall, Kabel, …) |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Diffuse Leckagen (?), Kluft-Leckagen, Bohrlochleckagen, Eintrag salinen Wassers |
| **Entwicklungsstand:** Kommerziell angeboten (www.fugroairborne.com) für Salzwasserintrusion, Aquiferstruktur. Permanente Weiterentwicklung zur Erhöhung der Eindringtiefe, Sensitivität, räumlichen Auflösung |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** bisher noch keine |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** unbekannt |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** möglich aber nicht sinnvoll |
| **Vorteile:** Flächiges Scanning nach Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit, auch Detektion von Salzwasserintrusionen möglich. Keine permanenten Installationen oder Eingriffe am Boden erforderlich, keine Behinderung der Messung durch schlechte Zugänglichkeit. Genauere Messungen als bei Geoelektrik an der Oberfläche. |
| **Nachteile:** Nicht spezifisch für $CO_2$, andere Prozesse können el. Leitfähigkeit verändern. Beeinträchtigung der Messung durch Metalle am Boden? Lärmbelästigung der Bewohner durch Helikopter (wieso gibt es die Methode nicht an Zeppelinen?). Evtl. hohe Kosten? |

| |
|---|
| **Bewertung:** Methode zum flächigen Scannen für die Erstdetektion, aber nicht spezifisch für $CO_2$. Detektionsgrenzen, Eindringtiefen, Sensitivität und räumliche Auflösung müssen für diese spezielle Anwendung noch getestet werden. |
| **Kosten:** 10.000,- € pro Arbeitstag zzgl. 10.000,- € Auswertung (insgesamt). Einmalige Untersuchung einer relativ kleinen Fläche von 2x5 km kostet inkl. Auswertung 40.000,- €. Zunehmende Wirtschaftlichkeit bei größeren Flächen. |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** |
| **Anwendung in CLEAN:** Mo3 (CAU) |
| **Literatur:** Siemon, B., A. V. Christiansen, E. Auken (2009) A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. Near Surface Geophysics, p. 629-646. |

| **INSAR** |
|---|
| **Monitoirngprinzip:** InSAR (Interferometric Sythetic Aperture Radar) ist ein satteliten-basiertes Verfahren bei dem Radarwellen ausgesandt und deren Reflektion an der Erd-oberfläche zur Untersuchung von Oberflächendeformationen registriert wird. Durch aus der Tiefe aufsteigendes $CO_2$ könnten Hebungen der Erdoberfläche verbunden sein, die mit diesem Verfahren mit sehr hoher Präzision erfasst werden können. Diese Methode erzielt die besten Ergebnisse in flachem Gelände mit geringer Vegetation und geringer Landnut-zung. Wenn keine oder zu wenig gut definierte Oberflächenreflektoren vorhanden sind, besteht die Möglichkeit, künstliche Reflektoren aufzustellen. Idealerweise sollten InSAR-Messungen mit Neigungsmessern und GPS-Messungen kalibriert werden. |
| **Analytik:** SAR-Satteliten |
| **Messhäufigkeit:** Abhängig von der Sattelitenumlaufzeit (z.B. 26-35 Tage) |
| **Messposition:** sattelitengestützt |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** - |
| **Messbereich:** - |
| **Messgenauigkeit:** Auflösung an der Oberfläche z.B. 3 m² bei RADARSAT2. Die Messge-nauigkeit von PSInSAR beträgt 5 mm/Jahr bzw. 1 mm/Jahr bei Mittelung über mehrere Jahre. |
| **Nachweisgrenze:** unbekannt |
| **Aussagereichweite:** Erfassungsbereich von bis zu 100 mal 100 km |
| **Monitoringphase:** Baselinemonitoring/ Betriebsmonitoring/ Sicherungsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** bisher unbekannt |
| **Entwicklungsstand:** Kommerzielle Anwendungen in verschiedenen Bereichen (Überwa-chung von Setzungserscheinungen bei der Nutzung von Grundwasser- und Öl-Reservoiren, Erdbebenforschung, Exploration geothermaler Ressourcen) |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** Krechba (Algerien) [76], [77], [78], Lost Hills (Kalifornien) [72] |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** nicht bekannt, vgl. Entwicklungsstand |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** standard |
| **Vorteile:** Erfassung sehr großer auch unzugänglicher Gebietein sehr hoher Auflösung. Auch zur Erfassung der $CO_2$-Migration im Speicher geeignet. |
| **Nachteile:** Geländehebungen sind nur indirekte Indikatoren für einen unterirdischen Druckanstieg infolge aufsteigenden $CO_2$ und können auch durch andere Prozesse beein-flusst werden. In Krechba konnte die $CO_2$-Ausbreitung im Speicherhorizont deutlich durch InSAR-Aufnahmen nachvollzogen werden. In wieweit Hebungen im Injektionsbereich intak-ter Speicher von Leckage-bedingten Hebungen zu unterscheiden sind, wurde bisher nicht diskutiert. Steiles Gelände und Vegetation kann die Datenverarbeitung wesentlich beein-trächtigen. |
| **Bewertung:** - |
| **Kosten:** nicht bekannt |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** - |
| **Anwendung in CLEAN:** keine |
| **Literatur:** [76], [77], [78], [72], [79] |

| **SEISMIK** |
|---|
| **Monitoringprinzip:** Aktive Seismik (VSP/MSP): Erzeugung seismischer Wellen durch Vibrationsquellen an der Oberfläche. Empfänger: Geophonkette im Bohrloch auf ca. 3200 m Tiefe (Altmark). Abbildung der räumlichen und zeitlichen Ausbreitung der $CO_2$-Front im Untergrund.<br>Passive Seismik : Registrierung der Mikroseismizität durch Geophone in 200 m tiefen Bohrlöchern (Altmark) zur Unterscheidung natürlicher Seismizität von eventuell durch die $CO_2$-Injektion induzierter Seismizität. |
| **Analytik:** |
| **Messhäufigkeit:** Aktive Seismik: 1 Basismessung und 1 Wiederholungsmessung in einem Jahr Abstand (Altmark). Passive Seismik: kontinuierlich (Altmark). |
| **Messposition:** Geophone im Bohrloch auf 200 m und 3200 m Tiefe (Altmark). |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** Aktive Seismik: 3 Wochen, Passive Seismik: kontinuierlich (Altmark). |
| **Messbereich:** Alles, abhängig von der Stärke der Quelle (dm bis 10er km) |
| **Messgenauigkeit:** Um Einsätze deutlich voneinander trennen zu können, müssten die Schichtgrenzen jeweils mindestens eine seismische Wellenlänge (v/f) entfernt sein. Analyse von überlagerten Signalen möglich. |
| **Nachweisgrenze:** Aussagen über den $CO_2$-Anteil in den Poren sind mit der Seismik i.A. schwer zu treffen, da hauptsächlich der Bereich zwischen 0 und ca. 10 % Porensättigung mit $CO_2$ entscheidend ist. Danach erfolgen nur noch geringe Änderungen, die dazu noch mit unterschiedlichen Vorzeichen anfallen können. |
| **Aussagereichweite:** Abhängig von der Quellstärke. Tiefe von einigen km ist möglich. |
| **Monitoringphase:** Basismessung zwingend notwendig. |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Wird meist verwendet, um flächenhafte Ansammlungen (z.B. unter dem Deckgebirge) zu kartieren. Schmale vertikale Strukturen sind ein Problem. |
| **Entwicklungsstand:** Die am besten untersuchte und entwickelte geophysikalische Methode. Anwendung für CCS-Monitoring im Prinzip nicht neu, aufgrund vieler Parameter und vieler Abhängigkeiten generelle Aussagen schwierig. |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** Praktisch an allen. |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** Nicht bekannt. |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** Datenakquisition und -bearbeitung ist sehr aufwändig, eine Onlineübertragung würde keinen Sinn machen. |
| **Vorteile:** Mit keiner anderen Methode kann man von der Oberfläche eine solche Eindringtiefe und Auflösung erhalten. |
| **Nachteile:** Hohe Kosten und Aufwand. |
| **Bewertung:** |
| **Kosten:** Hardware : 1 Mio. €, Messkampagnen: 0,6 Mio. € (Altmark), (2 Messkampagnen) |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** |
| **Anwendung in CLEAN:** Mo4.1 (DMT, FUB, GFZ) |
| **Literatur:** Extrem umfangreich. Siehe unter „Literatur“ |

| **GAS-MEMBRANE-SENSOR (GMS)** |
|---|
| **Monitoringprinzip:** Eine Schlauchmembran wird an einem speziellen Bohrlochmesskabel in die Zielteufe eines Bohrlochs eingefahren. Hier diffundieren gelöste und freie Gas durch die Membranwand und werden mit einem Trägergas durch das Messkabel zur Analyse nach Übertage transportiert. |
| **Analytik:** Massenspektrometrie, Gaschromatographie, Photoakustiksensor |
| **Messhäufigkeit:** kontinierliche Messung |
| **Messposition:** tiefe Beobachtungsbohrungen, Brunnen, freie Lösung (z.B. maritim) |
| **Messdauer (Zeitaufwand):** kontinierliche Messung |
| **Messbereich:** ppm-Bereich bis Sättigung |
| **Messgenauigkeit:** Konzentrationsabhängig |
| **Nachweisgrenze:** (Welche $CO_2$-Massen oder Leckageraten können noch nachgewiesen werden) |
| **Aussagereichweite:** ca. 1m |
| **Monitoringphase:** Baselinemessungen, Betriebsmonitoring |
| **Leckagendetektierbarkeit:** Durchbruch von $CO_2$ oder weiterer technischer Gase in Bohrlöchern |
| **Entwicklungsstand:** Die Technik ist patentiert, die Feldtauglichkeit wurde in Ketzin nachgewiesen |
| **Einsatz an CCS- oder Versuchs-Standorten:** Pilotanlage Ketzin |
| **Einsatz an natürlichen $CO_2$-Quellen:** bisher noch nicht erfolgt |
| **Online-Übertragungsmöglichkeit:** gegeben, sofern die Technik zur Verfügung steht |
| **Vorteile:** Langzeit- und direkte Methode zur Messung der In-Situ-Gaszusammensetzung und Konzentration in tiefen Bohrlöchern (bis 2000 m). Relativ einfacher Aufbau. mobile Messvorrichtung (i. Vgl. zu U-Tube-Sampler) |
| **Nachteile:** Kalibrationsfaktoren für einzelne Gase müssen jeweils vorher im Labor bestimmt werden um quantitative Aussagen machen zu können. |
| **Bewertung:** |
| **Kosten:** Sonde ca. 5000 €, Bohrlochmesskabel 15€/m |
| **Sonstiges/Anmerkungen:** |
| **Anwendung in CLEAN:** geplant in Beobachtungsbohrungen |
| **Literatur:** Patent No. US 7,523,680 B2 |

# E.2 Rechtliches Gutachten

WEISSLEDER & EWER
Notar • Rechtsanwälte

Dr. sc. pol. Wolfgang M. Weißleder
Notar • Rechtsanwalt • Fachanwalt für Arbeitsrecht
Prof. Dr. Wolfgang Ewer
Rechtsanwalt • Fachanwalt für Verwaltungsrecht
Dr. Angelika Leppin
Rechtsanwältin • Fachanwältin für Verwaltungsrecht
Dr. Marcus Arndt
Rechtsanwalt • Fachanwalt für Verwaltungsrecht
Dr. Marius Raabe
Rechtsanwalt • Fachanwalt für Verwaltungsrecht
Dr. Gyde Otto
Rechtsanwältin
Dr. Gunnar Postel
Rechtsanwalt
Dr. Alexander Behnsen
Rechtsanwalt

24103 Kiel • Walkerdamm 4 - 6
Telefon (0431) 9 74 36-0
Telefax (0431) 9 74 36-36
Internet: www.weissleder-ewer.de
E-Mail: kanzlei@weissleder-ewer.de

Bearbeiter/-in:
RA Prof. Ewer, RAin Dr. Leppin

Unser Zeichen
916/07

Kiel, den

# Rechtsgutachterliche Stellungnahme zu den bergrechtlichen Rahmenbedingungen für eine $Co_2$-Speicherung im Projekt CLEAN

Vorangestellt sei zunächst das folgende

**Inhaltsverzeichnis**

A. Zur bisherigen Eignung des Bergrechts für die Bereitstellung eines Rechtsrahmens zur $CO_2$-Speicherung 3
I. Zu den bergrechtlichen Vorschriften sowie der *geplanten* Regelung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG-E) 5
II. Zu den einzelnen bergrechtlichen Parametern 7
1. Zum Schutzgut „Gesundheit“ nach § 55 Abs. 1 Nr. 3 BBergG 7
2. Zum Schutzgut „Leben“ 9
3. Exkurs nach den Anforderungen des § 37 Abs. 2 i.V.m. § 13 Abs. 1 Nr. 3 KSpG-E 9
a) Zum Schutzgut Umwelt 10
aa) Tiere und Pflanzen sowie Biotope 11
bb) Boden 12
cc) Wasser 12
dd) Luft 14
ee) Landschaft 14
ff) Kulturgüter 15
gg) Wechselwirkungen und Gesamtbelastung 15
hh) Zusammenfassung 16
III. Bezug des Bergrechts zu diesen umweltrechtlich definierten Schutzgütern 16
B. Zur zukünftigen Eignung des Bergrechts oder bergrechtlicher Wertungen für die Bereitstellung eines Rechtsrahmens zur $CO_2$-Speicherung 20
C. Ergebnis 25

Das Projekt CLEAN ist - anders als das lediglich virtuelle Projekt MoPa - darauf ausgerichtet, eine tatsächliche Injektion von $CO_2$ in terrestrische Bereiche in Form der Speicherung von Kohlendioxid im Untergrund vorzunehmen. Angesichts des Umstandes, dass das

- Bergrecht jedoch - mit Ausnahme in einem Forschungsprojekt - nicht geeignet war oder ist, um langfristig einen Rechtsrahmen für die Speicherung von $CO_2$ zu bieten

derzeit jedoch

- bei dem CLEAN-Projekt die bergrechtlichen Wertungen bei der Speicherung von $CO_2$ angewendet werden,

soll nachstehend auf die rechtliche Bewertung des CLEAN-Projektes eingegangen werden.

## A. Zur bisherigen Eignung des Bergrechts für die Bereitstellung eines Rechtsrahmens zur $CO_2$-Speicherung

Die Eignung eines Teilrechtsgebietes zur Bereitstellung eines Rechtsrahmens für die Speicherung von $CO_2$ im Untergrund ist vor allem daran zu messen, ob durch seine Anwendung die gemeinschaftsrechtlichen Vorgaben für das nationale Recht zur $CO_2$-Speicherung umgesetzt werden können. Auch die Anwendung des Bergrechts auf die $CO_2$-Speicherung ist daher an den Vorgaben der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinien 85/337/EWG, 96/61/EG, 200/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 KOM(2008) 18 (im Folgenden als „CCS-RL“ bzw. CCS-Richtlinie bezeichnet) zu messen.

Zentrale Norm dieser Richtlinie in ihrer derzeitigen Entwurfsfassung sind Art. 8 und Art. 4 Abs. 2 CCS-RL. Gemäß Art. 8 CCS-RL darf eine Speichergenehmigung nur erteilt werden, wenn der zuständigen Behörde nachgewiesen wurde, dass alle Anforderungen der CCS-Richtlinie erfüllt sind. Gemäß Art. 4 Abs. 2 CCS-RL zählt zu diesen Anforderungen insbesondere, dass eine geologische Formation nur dann als Speicherstätte ausgewählt und damit auch nur dann als Speicherstätte genutzt werden darf, wenn unter den vorgeschlagenen Nutzungsbedingungen kein wesentliches Leckagerisiko besteht und wenn wesentliche negative Auswirkungen auf die Umwelt oder die Gesundheit unwahrscheinlich sind. In der endgültigen noch von der Gemeinschaft bekannt zu machenden und in Kraft zu setzenden Version der Richtlinie könnte sich nach derzeitigen Entwicklungen auch die Formulierung „Gefahren“ anstatt der Formulierung „negativer Auswirkungen“ finden, was im Hinblick auf die zu betrachtenden Schutzgüter jedoch keinen Unterschied macht.

Mithin muss nationales Recht, welches diese gemeinschaftsrechtlichen Vorgaben umsetzt, der gemeinschaftsrechtlichen Wertentscheidung Rechnung tragen, dass die

Speicherung von $CO_2$ nicht zu wesentlich negativen Auswirkungen auf die Umwelt oder die menschliche Gesundheit bzw. entsprechenden Gefahren führen darf. Es muss mithin auf diese Schutzgüter bzw. ihren Schutz vor Gefahren der $CO_2$-Speicherung ausgerichtet sein.

In dem Clean-Projekt ist vor dem Hintergrund, dass ein *nationaler Rechtsrahmen* in Form eines CCS-Gesetzes noch nicht in Kraft gesetzt war und ist, bislang das bergrechtliche Regime als Grundlage für die Speicherung gewählt worden.

Auch der *Entwurf* des Gesetzes zur Regelung von Abscheidung, Transport und dauerhafter Speicherung von Kohlendioxid – Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG-E) - ist erst am *01.04.2009* vom Kabinett beschlossen worden und hat noch keine Gesetzeskraft erlangt.

Allerdings sieht § 44 Abs. 1 KSpG-E eine Übergangsregelung vor, dass bereits nach § 7 Bundesbergrecht (BBergR) begonnene Verfahren, die sich auf die Aufsuchung von Bodenschätzen, insbesondere von Sole, in potentiellen Speicherkomplexen beziehen, nach § 7 KSpG-E weitergeführt werden können. Einer solchen Weiterführung bedarf es allerdings eines Antrages sowie die hierfür erforderlichen Unterlagen.

Zudem sieht § 44 Abs. 2 KSpG-E vor, dass Untersuchungsergebnisse, die im Rahmen von Aufsucharbeiten nach § 7 des Bundesberggesetzes erzielt werden, für die Untersuchungsgenehmigung nach § 7 KSpG-E verwendet werden können.

Da bislang unklar ist, ob und inwieweit das Verfahren möglicherweise nach dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz fortgeführt wird bzw. inwieweit die Maßstäbe aus diesem Gesetz für die noch ausstehenden Genehmigungen für das CLEAN-Projekt angewandt werden sollen, wird nachstehend auch auf die Neuregelungen des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes einzugehen sein.

Dies gilt umso mehr vor dem Hintergrund, dass § 2 Abs. 2 KSpG-E dieses Gesetzes ausdrücklich auch für die Speicherung von Kohlendioxid zum Zwecke der Forschung gilt.

## I. Zu den bergrechtlichen Vorschriften sowie der *geplanten* Regelung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG-E)

Zu den bergrechtlichen Regelungen ist im Rahmen des Betriebsplanverfahrens nach den §§ 51 ff BBerG die erforderliche Vorsorge gegen Gefahren für Leben, Gesundheit und zum Schutz von Sachgütern vor allem in § 55 Abs. 1 Nr. 3 BBerG geregelt. Danach *ist* (mithin eine sog. „gebundene Entscheidung") die Zulassung eines Betriebsplans zu erteilen, wenn

> „… die erforderliche Vorsorge gegen Gefahren für Leben, Gesundheit und zum Schutz von Sachgütern, Beschäftigter und Dritter im Betrieb insbesondere durch die den allgemein anerkannten Regeln der Sicherheitstechnik entsprechende Maßnahmen, sowie dafür getroffen ist, dass die für die Errichtung und Durchführung eines Betriebes auf Grund dieses Gesetzes erlassenen oder geltenden Vorschriften und die sonstigen Arbeitsschutzvorschriften eingehalten werden (…)."
>
> (Hervorhebung durch die Verfasser)

Vergleicht man diese Regelung mit § 13 Abs. 1 Nr. 3 und 4 KSpG-E wird bereits deutlich, dass in dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz ein anderer, weitgehender Ansatz, gewählt wurde. So *darf* der Plan nur festgestellt und die Plangenehmigung für die Speicherung nur erteilt werden, wenn sichergestellt ist, dass „Gefahren für *Mensch und Umwelt im Übrigen*" nicht hervorgerufen werden können und wenn

> „… die erforderliche Vorsorge gegen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt getroffen, wird, insbesondere durch Verhinderung von erheblichen Unre-

gelmäßigkeiten; die erforderliche Vorsorge bestimmt sich nach dem anerkannten Stand von Wissenschaft und Technik; die Bundesregierung wird dem Deutschen Bundestag mit dem Evaluierungsbereicht nach § 43 gesetzgeberische Vorschläge für die Ausgestaltung des Vorsorgestandards für nach dem Jahr 2017 geplante Anlagen unterbreiten."

(Hervorhebung durch die Verfasser)

Der Vergleich beider Regelungen zeigt, dass nach den bergrechtlichen Bestimmungen der Betriebsplan zunächst im Wege einer gebundenen Entscheidung zuzulassen *ist,* wohingegen die Planfeststellung zur Speicherung als Ermessensentscheidung „darf nur erteilt werden, wenn…" ausgestaltet ist.

Allerdings sieht das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz für bloße „Forschungsprojekte", mithin für eine Speicherung von weniger als 100.000 Tonnen vor, dass auch hier ein *Anspruch* auf eine Genehmigung besteht § 37 Abs. 2 KSpG-E. Bei Forschungsprojekten hat der Gesetzgeber zudem in § 37 Abs. 1 KSpG-E geregelt, dass hier - abweichend von § 11 KSpG-E - kein Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahren erforderlich ist, sondern die zuständige Behörde schlicht eine Genehmigung zu erteilen hat.

Diese Genehmigung ist *zwingend* zu erteilen, sofern die Voraussetzungen des § 13 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 bis 8 und des Satzes 2 KSpG-E vorliegen.

Als Besonderheit für Forschungsvorhaben gilt weiter, dass die Anforderungen des § 13 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2, 4 bis 6 KSpG-E nicht gelten, soweit diese Anforderungen dem „Zweck der Forschung" entgegenstehen.

Damit hat der Gesetzgeber gerade für die „neuralgischen“ Parameter des § 13 Abs. 1 KSpG-E, nämlich des Nachweises über die

- Langzeitsicherheit d. Kohlendioxidspeichers (§ 13 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 KSpG-E),

und

- des Nachweis über die erforderliche Vorsorge gegen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt getroffen, wird, insbesondere durch Verhinderung von erheblichen Unregelmäßigkeiten; die erforderliche Vorsorge bestimmt sich nach dem anerkannten Stand von Wissenschaft und Technik (§ 13 Abs. 1 Satz 1 Nr. 4 KSpG-E)

nicht geführt werden muss, soweit diese Anforderungen dem „Zweck der Forschung“ entgegenstehen. Auch bei Forschungsprojekten muss allerdings sichergestellt werden, dass „Gefahren für Mensch und Umwelt im Übrigen“ nicht hervorgerufen werden können, da § 13 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 KSpG-E, auch nach dem Privilegierungstatbestand des § 37 Abs. 2 KSpG-K weiterhin gilt.

## II. Zu den einzelnen bergrechtlichen Parametern

Wie dargelegt, ist die Zulassung eines Betriebsplans nach § 55 Abs. 1 Nr. 3 BBergG zu erteilen, wenn die „erforderliche Vorsorge für Leben, Gesundheit und zum Schutz von Sachgütern …“ getroffen worden ist.

### 1. Zum Schutzgut „Gesundheit“ nach § 55 Abs. 1 Nr. 3 BBergG

Unter dem Schutzgut Gesundheit wird dabei die menschliche Gesundheit verstanden. Eine positive Definition der menschlichen Gesundheit existiert zwar nicht. Allerdings ist eine negative Abgrenzung in der Form möglich, dass der Begriff der Gesundheitsbeeinträchtigung mittlerweile relativ klar herausgearbeitet ist. Eine solche liegt stets

vor, wenn funktionelle oder morphologische Veränderungen des menschlichen Organismus auftreten, die die natürliche Variationsbreite signifikant überschreiten,

> vgl. VGH Mannheim, Urteil vom 23.10.2001 – 10 S 141/01 –, DVBl. 2002, S. 709.

Notwendig sind in jedem Fall physiologische Effekte,

> vgl. Jarass, Bundesimmissionsschutzgesetz, Kommentar, 7. Aufl., München 2007, § 3, Rdnr. 51.

Es ist dabei unerheblich, ob die Beeinträchtigung gleichermaßen jeden von einer Einwirkung betroffenen Menschen trifft, oder ob sie nur bei besonders empfindlichen Bevölkerungsgruppen auftritt, etwa Kindern, Alten oder Kranken,

> vgl. VGH Mannheim, Urteil vom 28.07.1998 – 10 S 3242/96 –, BImSchG-Rspr. § 3 Nr. 116; Wulfhorst, Der Schutz „überdurchschnittlich empfindlicher“ Personen im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren, NuR 1995, S. 221 ff.,

oder wenn sich die Gesundheitsschäden erst aufgrund langfristiger Einwirkungen ergeben. Auch in letzteren Fällen ist eine rechtlich relevante Gesundheitsbeeinträchtigung zu bejahen. Die besondere atypische Empfindlichkeit einzelner Personen, beispielsweise Allergikern, Asthmatikern, Diabetikern etc. spielt hingegen keine Rolle,

> vgl. VGH Mannheim, Urteil vom 28.07.1998 – 10 S 3242/96 –, BImSchG-Rspr. § 3 Nr. 116; von Lersner, in: von Lersner/Wendenburg, Recht der Abfallbeseitigung, Bd. 1, EL. 04/08, Berlin, Stand: April 2008; § 10 KrW-/AbfG, Rn. 43.

und muss daher auch im Rahmen des bergrechtlichen Verfahrens zur $CO_2$-Speicherung nicht bedacht werden. Dies gilt auch für nur mittels psychologischer oder sozialwissenschaftlicher Methoden zu ermittelnder Wirkungen. Diese stellen lediglich Belästigungen dar, allerdings keine Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit,

vgl. Jarass, Bundesimmissionsschutzgesetz, Kommentar, 7. Aufl., München 2007, § 3, Rdnr. 51.

Von diesem Beeinträchtigungsbegriff wird letztlich auch bei der Auslegung des Begriffes der Gesundheit i.S.d. § 55 Abs. 1 Nr. 3 BBergG auszugehen sein, dass Gesundheitsbeeinträchtigungen bzw. negative Auswirkungen auf die Gesundheit - auch bei einem Forschungsprojekt - unwahrscheinlich sind.

**2. Zum Schutzgut „Leben“**

Zum weiteren Erfordernis, dass die erforderliche Vorsorge gegen Gefahren für „Leben“ getroffen werden muss, ist darauf hinzuweisen, dass – wenn man Vorsorge gegen Gefahren für die Gesundheit trifft – erst Recht eine Vorsorge gegen Gefahren für Leben trifft. Aus diesem Grunde werden auch in der Rechtsprechung,

vgl. etwa zum Bergrecht das Urteil des BVerwG vom 13.12.1991 - 7 C 25/90 -, Buchholz 406.27 § 52 BBergG Nr. 1

die Begriffspaare „Leben und Gesundheit“ nicht getrennt.

**3. Exkurs nach den Anforderungen des § 37 Abs. 2 i.V.m. § 13 Abs. 1 Nr. 3 KSpG-E**

Sofern vor dem Hintergrund des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes nunmehr doch die Speichergenehmigung nach der neuen, zu erwartenden Gesetzeslage, erteilt werden soll, ist anzumerken, dass auch bei *Forschungsvorhaben* die Vorschrift des § 13 Abs. 1 Nr. 3 KSpG-E weiterhin anzuwenden ist, wonach

„… Gefahren für Menschen und Umwelt nicht hervorgerufen werden dürfen.“

Diese Voraussetzung ist auch bei Forschungsprojekten weiterhin nachzuweisen, da die Privilegierung des § 37 Abs. 2 Satz 2 KSpG-E, wie unter A. I. dargestellt, für § 13 Abs. 1 Nr. 3 KSpG-E nicht gilt.

**a) Zum Schutzgut Umwelt**

Unter das Schutzgut „Umwelt“ wird eine ganze Reihe von Unterschutzgütern gefasst (vgl. zur Begriffsbestimmung: § 3 Nr. 12 KSpG-E). Hiernach sind die folgenden Schutzgüter zu betrachten:

- Tiere,
- Pflanzen,
- die biologische Vielfalt,
- Boden,
- Wasser,
- Luft
- Klima,
- Landschaft

sowie

- Kultur und sonstige Sachgüter (Umweltgüter)

einschließlich ihrer Wechselwirkungen.

**aa) Tiere und Pflanzen sowie Biotope**

Hinsichtlich des Schutzgutes Tiere und Pflanzen gebietet das Naturschutzrecht schließlich, dass möglichst jede Vernichtung, Schädigung oder Störung wild lebender Tier- und Pflanzenarten sowie ihrer Lebensgemeinschaften vermieden werden muss und daher hier auch die Grenze des für eine $CO_2$-Speicherung im Untergrund hinnehmbaren Risikorahmens liegt. Im Vorwege einer nach § 37 Abs. 1 Satz 1 KSpG-E zu erteilenden Genehmigung muss nach § 13 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 KSpG-E der Nachweis erbracht werden, dass

- keine solche Menge $CO_2$ aus einer Speicherstätte wieder austreten und an die Oberfläche gelangen kann

die

- zu einer Vernichtung, Schädigung oder Störung der Tier- oder Pflanzenwelt führen kann bzw. in welchem Maße dies geschehen könnte.

oder

- zu einer Beeinträchtigung ganzer Areale führen kann, die u. U. als Biotope bzw. Lebensstätten oder Lebensräume geeignet sind.

Angesichts des Umstandes, dass die Forschung diesen Nachweis der fehlenden Beeinträchtigung auf die Schutzgüter „Tiere und Pflanzen“ erst erbringen soll, müssten folglich solche Nachweise nach dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz schon „im Vorwege“ nachgewiesen werden. Vor dem Hintergrund, dass *weniger als 100.000* Tonnen im Rahmen des Forschungsprojekts injiziert werden, ließe sich eine solche Beeinträchtigung von Tier- und Pflanzenwelt möglicherweise ohne weiteren Aufwand nachweisen.

**bb) Boden**

Ähnliches gilt für das Schutzgut Boden. Auch hier wäre für die Erteilung der Forschungsgenehmigung nachzuweisen, dass „Gefahren für den Boden“ nicht hervorgerufen werden können. Mithin muss dargelegt werden, ob und in welchem Maße das Einbringen von $CO_2$ in den Boden und ggf. das Verhalten des Gases im Boden geeignet ist, wie auch immer gearteten Minderungen der Qualität der Funktionsfähigkeit des Bodens hervorzurufen. Eine solche wäre im Hinblick auf eine Speicherung von $CO_2$ im Untergrund nach dem gegenwärtigen Stand der Rechtsentwicklung vermutlich nicht hinnehmbar und würde daher auch den hinnehmbaren Risikorahmen i. S. d. Art. 8 und des Art. 4 Abs. 2 CCS-RL überschreiten.

Forschungsergebnisse, die diesbezüglich gewonnen werden können, dürften daher gut geeignet sein, zur weiteren Rechtsentwicklung beizutragen, insbesondere zur Definition des Begriffs der wesentlichen negativen Umweltauswirkung i. S. d. Art. 8 und Art. 4 Abs. 2 CCS-RL und des dabei zu betrachtenden Risikorahmens für das Schutzgut Boden.

Darüber hinaus ergibt sich aus dem naturschutzrechtlich vorgegebenen Risikorahmen, dass auch die Bodenfruchtbarkeit zum Schutzgut Boden gezählt werden kann, so dass naturwissenschaftliche Forschung auf diesem Gebiet auch diesen Faktor nicht ausblenden sollte.

**cc) Wasser**

Wesentliche negative Auswirkungen auf die Umwelt in der Form des Schutzguts Wasser sind jedenfalls zu erwarten, wenn die $CO_2$-Speicherung geeignet ist, den guten Zustand eines Gewässers zu zerstören. In diesem Falle wäre eine Speichergenehmigung zu verweigern. Mithin muss auch im Rahmen eines Forschungsprojekts, das den möglichen Risikorahmen der $CO_2$-Speicherung ergründen soll, untersucht werden, welche geologischen Formationen in einer Weise geeignet sind, $CO_2$ so aufzunehmen, dass eine Reaktion mit dem Grundwasser nicht stattfinden kann bzw. dessen guter Zustand nicht beeinträchtigt wird.

Um für die Rechtsentwicklung verwertbare Ergebnisse zu erzielen, wäre es außerdem vorteilhaft, wenn ein naturwissenschaftliches Forschungsprojekt Ergebnisse darüber erzielen würde, ob in Speichergestein eingebrachtes $CO_2$ mit dem Grundwasser in einer Weise reagieren kann, dass dieses wiederum zu einer Verschlechterung des Zustandes von mit ihm in Verbindung stehenden Oberflächengewässern führen kann oder geeignet ist, deren Verbesserung zu beeinträchtigen. Als Oberflächengewässer gelten dabei gemäß Art. 2 Nr. 1 WRRL alle Binnengewässer, Küstengewässer und Übergangsgewässer, also solche Oberflächengewässer in der Nähe von Flussmündungen, die aufgrund ihrer Nähe zu den Küstengewässern einen gewissen Salzgehalt aufweisen, gleichwohl aber im wesentlichen von der Süßwasserströmung beeinflusst werden.

Ferner darf es aufgrund der Speicherung von $CO_2$ nach den Bestimmungen des Anhangs V zur WRRL nicht zu einer signifikanten Verschlechterung der ökologischen oder chemischen Qualität des mit dem Grundwasser in Verbindung stehenden Oberflächengewässers kommen. Ein Forschungsprojekt, das auch für die Rechtsentwicklung verwertbare Erkenntnisse darüber gewinnen soll, wie sich in Speichergestein eingebrachtes $CO_2$ verhält, sollte daher auch versuchen zu ergründen, ob es möglich ist, dass in den Untergrund eingebrachtes $CO_2$ mit solchen Grundwasserkörpern in Verbindung gelangt, die ihrerseits Verbindung zu Oberflächengewässern haben, und ob dies wiederum zu einer Beeinträchtigung der Qualität der Oberflächengewässer führen kann bzw. in welchem Maße dies geschehen kann. Hieraus würde sich dann ableiten lassen, ob dies wiederum eine signifikante Qualitätsverringerung der betroffenen Oberflächengewässer wäre.

Schließlich darf durch die Speicherung von $CO_2$ keine signifikante Schädigung der Landökosysteme eintreten, die unmittelbar von einem Grundwasserkörper abhängen, der von einer $CO_2$-Speicherung beeinflusst würde. Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur virtuellen Erkundung der Risiken einer Speicherung von $CO_2$ bzw. dem Verhalten von in Speichergestein gespeichertem $CO_2$ sollte zur Gewinnung auch für die Rechtsentwicklung verwertbarer Ergebnisse daher erforscht werden, ob $CO_2$ überhaupt mit solchen Grundwasserkörpern reagieren wird, die mit Landökosystemen in Verbindung stehen und welche Auswirkungen dies auf ein Landökosystem haben

wird. Hieran wird sich dann ggf. erkennen lassen, ob die möglichen Auswirkungen auf das Landökosystem als signifikante Verschlechterung i. S. d. Tabelle 2.3.2 des Anhangs V zur WRRL zu werten sind.

Die fehlenden negativen Auswirkungen auf dieses Schutzgut wäre auch im Rahmen einer Injektionsgenehmigung nach dem KSpG dem Antrag beizufügen.

**dd) Luft**

Für das Schutzgut Luft sind v. a. die immissionsschutzrechtlichen Wertungen heranzuziehen. Auch die $CO_2$-Speicherung darf mithin nicht in einer Weise geschehen, dass dies zu schädlichen Umweltauswirkungen führt.

Da gerade das Schutzgut Luft in elementarem Zusammenhang mit anderen Schutzgütern steht, insbesondere dem der menschlichen Gesundheit sowie Tieren und Pflanzen, sind zur Weiterentwicklung des Rechts der $CO_2$-Speicherung daher wiederum v. a. naturwissenschaftliche Ergebnisse von großem Nutzen, die Auskunft darüber geben, ab welcher Konzentration in der Luft verschiedene umweltrechtlich geschützte Schutzgüter, also insbesondere Tiere und Pflanzen, Schaden nehmen können und wie wahrscheinlich es ist, dass im Untergrund gespeichertes $CO_2$ in einer solchen Menge wieder entweichen kann, dass es zu einer solchen Konzentration kommt.

Auswirkungen auf das Klima dürften hingegen nur von Relevanz sein, wenn sie sich auf das globale Klima beziehen.

**ee) Landschaft**

Bei der Frage, was unter den Begriff der „Landschaft“ zu fassen ist, kann etwa eine Anlehnung an das Naturschutzrecht getätigt werden, wonach zum Landschaftsbild gehört alle wahrnehmbaren, unbelebten (geomorphologischen) und belebten (Vegetationen) Elemente der Erdoberfläche, d. h. alle Ausprägungen der Erdoberfläche wie

Berge, Täler, Wälder, Flüsse, Seen, Bäche, bedeutsame Einzelpflanzen oder Pflanzengruppen.

Bei der Speicherung von $CO_2$ im terrestrischen Untergrund ist, jedenfalls von der Injektion an sich, nicht von einer Beeinträchtigung der Landschaft auszugehen.

**ff) Kulturgüter**

Ähnliches wird auch für die Beeinträchtigung von „Kulturgütern“ gelten, welche durch die Injektion an sich wohl nicht beeinträchtigt werden dürften.

**gg) Wechselwirkungen und Gesamtbelastung**

Da das Schutzgut Umwelt gleichzeitig aber als Einheit aufzufassen ist, was schon die Formulierung des Art. 8 und des Art. 4 Abs. 2 CCS-RL zu verstehen gibt, dürfen diese einzelnen Unterschutzgüter bei der Festlegung des für die $CO_2$-Speicherung geltenden Risikorahmens auch nicht isoliert betrachtet werden.

Mithin ist eine Betrachtung der Wechselwirkungen auch in § 3 Nr. 12 KSpG-E vorgesehen.

Es ist, auch aufgrund des durch das Naturschutzrecht gesetzten Risikorahmens, davon auszugehen, dass wesentliche negative Auswirkungen auf die Umwelt auch dann entstehen können, wenn die Wechselwirkungen zwischen diesen einzelnen Schutzgütern betroffen sind.

Für einen ganzheitlichen Forschungsansatz sind daher auch diese Wechselwirkungen zu betrachten. Dies gilt auch im Hinblick darauf, dass eine wesentliche negative Umweltauswirkung und damit ein nicht hinnehmbares Risiko nicht isoliert bzgl. eines einzelnen Speichervorhabens bzw. einer $CO_2$-Leckage betrachtet werden darf, sondern

es nach den Wertungen des in Kraft befindlichen Umweltrechts auf die Gesamtbelastung eines Schutzgutes, auch in Kombination mit anderen Belastungsquellen, ankommt. Für die Bereitstellung umfassender naturwissenschaftlicher Erkenntnisse als Basis für die weitere Rechtsentwicklung wäre es daher schließlich wünschenswert, wenn auch jedenfalls beispielhaft verschiedene Szenarien untersucht würden, die andere Quellen für eine Anreicherung von $CO_2$ in der Atemluft mit einbeziehen.

**hh) Zusammenfassung**

Sowohl hinsichtlich des Schutzgutes Mensch bzw. menschliche Gesundheit als auch hinsichtlich des Schutzgutes Umwelt wäre dann nach den Maßstäben des § 13 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 KSpG-E auch bei einem (bloßen) Forschungsprojekt wie CLEAN nachzuweisen, dass solche Gefahren nicht hervorgerufen werden können.

## III. Bezug des Bergrechts zu diesen umweltrechtlich definierten Schutzgütern

Die grundsätzliche Wertung des Gesetzgebers in § 13 Abs. 1 Nr. 3 und auch in Nr. 4 KSpG, dass auch keine Gefahren für die „Umwelt“ hervorgerufen werden können, zeigt, dass das Bergrecht nicht das richtige Rechtsregime darstellt.

So ist das Bergrecht im engeren Sinne nicht einmal dem Umweltrecht zuzurechnen, sondern in erster Linie dem Wirtschaftsverwaltungsrecht. Zweck des Bundesberggesetzes ist gemäß § 1 BBergG

- die Sicherung der Rohstoffversorgung

und

- die Sicherheit der Betriebe und der Beschäftigten des Bergbaus.

Gleichwohl erkennt das Bergrecht zwar auch die umweltbezogene Komponente des Bergbaus an, so dass gemäß § 1 Nr. 3 BBergG auch die Vorsorge gegen Gefahren, die sich aus bergbaulicher Tätigkeit für Leben, Gesundheit und Sachgüter Dritter er-

geben, zu verstärken und den Ausgleich unvermeidbarer Schäden zu verbessern sind. Ferner ist nach § 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 BBergG die Zulassung eines bergrechtlichen Betriebsplans davon abhängig, dass die erforderliche Vorsorge gegen Gefahren für Leben und Gesundheit getroffen ist. Das Bergrecht ist mithin kein umweltspezifisches Recht, aber jedenfalls in gewisser Weise umweltrelevant,

> vgl. Kremer/Neuhaus, Bergrecht, 1. Aufl., Stuttgart 2001, Rn. 14; Dietrich, $CO_2$-Abscheidung und Ablagerung (CAA) im deutschen und europäischen Energieumweltrecht, 1. Aufl., Baden-Baden 2007, S. 161.

Immerhin weist das Bergrecht außerdem mit dem auf nationaler Ebene noch zu entwickelnden Rechtsregime für die $CO_2$-Speicherung insofern Parallelen auf, als nach § 126 BBergG im Bergrecht schon eine Regelung enthalten ist, die die Errichtung von Untergrundspeichern zum Thema hat. § 126 Abs. 3 BBergG verdeutlicht dabei, dass hiermit nicht nur die kurzfristige (Zwischen-) Speicherung von Stoffen gemeint ist, sondern jedenfalls auch die langfristige (End-) Lagerung von Stoffen, die aufgrund ihrer Gefährlichkeit nicht an der Oberfläche gelagert werden sollen. In einem Untergrundspeicher können dabei nicht nur feste, sondern gemäß § 4 Abs. 9 BBergG auch gasförmige Stoffe gespeichert werden. Da jedoch die bergrechtliche Regelung solcher Untergrundspeicher weniger das Ziel des Schutzes umweltrechtlich relevanter Schutzgüter hat, sondern aus Gründen der Grubensicherheit erfolgt ist,

> vgl. Kremer/Neuhaus, Bergrecht, 1. Aufl., Stuttgart 2001, Rdnrd. 529,

können die bergrechtlichen Aspekte der Risikoeinschätzung allerdings keine hinreichende Auskunft darüber geben, welche Risiken nach den gemeinschaftsrechtlichen Vorgaben hinzunehmen sind, die sich auf umweltrechtlich relevante Schutzgüter beziehen und gerade nicht auf die Fragen der Grubensicherheit. Die bergrechtliche Risikoeinschätzung ist mithin auf andere Risiken bezogen als sie das umweltrechtlich geprägte Gemeinschaftsrecht zur $CO_2$-Speicherung im Blick hat.

Geeignete und erforderliche Schutzmaßnahmen im bergrechtlichen Sinne – also solche hinsichtlich der Grubensicherheit – sind ferner solche, die den allgemein anerkannten Regeln der Sicherheitstechnik entsprechen. Solche allgemeinen Regeln sind speziell für die Speicherung von $CO_2$ indes noch gar nicht vorhanden, sondern müssen erst entwickelt werden. Eine Heranziehung bergrechtlicher Wertungen zur Definition des bei der Speicherung für die Rechtsgüter Umwelt und menschliche Gesundheit hinnehmbaren Risikos wäre daher zirkelschlüssig, da nach dem Bergrecht allgemein anerkannte Sicherheitsstandards heranzuziehen wären, es gerade diese für die vorliegend zu behandelnde Materie aber nicht gibt. Gewisse Anhaltspunkte jedenfalls für die Verpressung von Gasen unter Tage könnten sich allenfalls den Regelungen für die Kohlenwasserstoffspeicherung entnehmen lassen,

> vgl. Gasversorgungssysteme – Untertagespeicherung von Gas – EN 1918-1 und 2.

Allerdings stellen diese keine Rechtsnorm dar. Ferner müssten die hierin enthaltenen Standards angesichts der stofflichen Unterschiede zwischen Erdgas und $CO_2$ hinsichtlich einer Heranziehung ihrer zur Bestimmung der notwendigen Risikobewertung für die Speicherung von $CO_2$ modifiziert werden,

> vgl. Dietrich, $CO_2$-Abscheidung und Ablagerung (CAA) im deutschen und europäischen Energieumweltrecht, 1. Aufl., Baden-Baden 2007, S. 169.

Gerade dies kann jedoch erst geschehen, wenn hinreichende Kenntnisse über die Risiken der $CO_2$-Speicherung vorliegen bzw. die Risiken eines Entweichens des $CO_2$ aus seiner unterirdischen Lagerstätte. Da jedoch dieses Risiko wiederum erst durch naturwissenschaftliche Forschungsprojekte wie das CLEAN-Projekt ermittelt werden soll, ist es nicht möglich, die Regeln über die Speicherung von Kohlenwasserstoffen für die Speicherung von $CO_2$ heranzuziehen. Da nicht klar ist, welche Modifikationen insofern notwendig wären, wäre auch nicht klar, welche Risiken unter Berücksichtigung der Normen über die Kohlenwasserstoffspeicherung bei der $CO_2$-Speicherung eingegangen werden könnten.

Die Vorschriften des Bergrechts bzgl. des Schutzes anderer umweltrechtlich relevanter Schutzgüter sind ebenfalls eher rudimentär ausgeprägt. So lassen sich mit dem Vorsorgegrundsatz des § 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 BBergG schädliche Einwirkungen auf die Schutzgüter Boden und Grundwasser außerhalb des Betriebes eines Bergbauunternehmens nicht ausschließen, da Sachgüter Dritter hiervon nicht erfasst werden,

> vgl. Dietrich, $CO_2$-Abscheidung und Ablagerung (CAA) im deutschen und europäischen Energieumweltrecht, 1. Aufl., Baden-Baden 2007, S. 169.

Auch insofern ist es mithin kaum möglich, das Bergrecht zur näheren Definition der Risikobewertung für die $CO_2$-Speicherung im Untergrund maßgeblich heranzuziehen.

Das Bergrecht ansonsten liefert ebenfalls nur wenig Erkenntnisse für den Rahmen einer Risikobewertung bzgl. der Speicherung von $CO_2$ im Untergrund. Es ist eben doch in aller erster Linie dem Wirtschaftsverwaltungsrecht und nicht dem Umweltrecht zuzuordnen,

> vgl. Kremer/Neuhaus, Bergrecht, 1. Aufl., Stuttgart 2001, Rdnr. 13,

so dass entscheidende Aspekte hinsichtlich der Festlegung einer Risikobewertung für die $CO_2$-Speicherung für die Schutzgüter Gesundheit und Umwelt von einer Anwendung und Auslegung des Bergrechts nicht zu erwarten sind,

> vgl. Mißling, Gestaltung des deutschen Ordnungsrahmens für die geologische Speicherung von $CO_2$, ZUR 2008, S. 286, 290 f.; Much, Rechtsfragen der Ablagerung von $CO_2$ in unterirdischen geologischen Formationen, ZUR 2007, S. 130, 134.

Nach alledem besteht aus rechtswissenschaftlicher Sicht eine Schwierigkeit, das bestehende Bergrecht oder hieraus zu entnehmende Wertungen für die Schaffung eines Rechtsrahmens für die Speicherung von $CO_2$ im Untergrund anwendbar zu machen.

In rechtswissenschaftlicher Hinsicht dürfte dies auch zu den Ergebnissen des CLEAN-Projektes zählen, welches ursprünglich noch von einer Anwendbarkeit des Bergrechts ausging, was nach dem nunmehrigen Stand der rechtswissenschaftlichen Erkenntnisse allerdings nicht mehr der Fall ist.

## B. Zur zukünftigen Eignung des Bergrechts oder bergrechtlicher Wertungen für die Bereitstellung eines Rechtsrahmens zur $CO_2$-Speicherung

Darüber hinaus wird unserer Einschätzung nach das Bergrecht auch bei der zukünftigen Schaffung des Rechtsrahmens für die $CO_2$-Speicherung im Untergrund keine nennenswerte Rolle spielen. Zum einen

- zieht der Gesetzgeber die Schaffung eines nationalen Einlagerungsgesetzes zur Umsetzung der gemeinschaftsrechtlichen Vorgaben für die $CO_2$-Speicherung einer bloßen Anwendung oder Erweiterung des BBergG vor,

zum anderen

- sind in das zu schaffende nationale Einlagerungsgesetz – jedenfalls nach den derzeit vorliegenden Entwürfen – keine nennenswerten bergrechtlichen Wertungen eingeflossen.

Einer Anwendung des Bundesberggesetzes auf die Speicherung von $CO_2$ im Untergrund hat der deutsche Gesetzgeber die Schaffung eines nationalen Einlagerungsgesetzes zur Umsetzung der gemeinschaftsrechtlichen Vorgaben entgegengestellt. So zeigt auch der *Entwurf* des bereits zitierten Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes, dass sich auch der deutsche Gesetzgeber entschlossen hat, den nationalen Rechtsrahmen zur $CO_2$-Speicherung umweltrechtlich wesentlich spezifischer auszugestalten und dabei nicht auf das Bergrecht zurückzugreifen.

So weist schon der in § 1 KSpG-E normierte Gesetzeszweck darauf hin, dass die nationalen Regelungen zur $CO_2$-Speicherung (auch) umweltrechtlicher Natur sein sollen.

Hiernach besteht der Gesetzeszweck in der Gewährleistung einer dauerhaften Speicherung von $CO_2$ in unterirdischen Gesteinsschichten

- im Interesse des Klimaschutzes,

- der möglichst sicheren, effizienten und umweltverträglichen Energieversorgung

sowie

- dem Schutz des Menschen und der Umwelt, auch in Verantwortung für künftige Generationen.

Es werden daher - zumindest nicht in erster Linie - wirtschaftsverwaltungsrechtliche Aspekte in den Vordergrund gestellt, wie sie vom Bergrecht in erster Linie erfasst werden, sondern allgemein und umfassend Bezug auf umweltrechtlich relevante Schutzgüter genommen. Insbesondere werden in den Schutzbereich des Umweltbegriffs dabei gemäß § 3 Nr. 12 KSpG-E die Unterschutzgüter Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt, Wasser, Luft, Klima, Landschaft sowie Kultur und sonstige Sachgüter einschließlich der Wechselwirkungen zwischen diesen Umweltgütern einbezogen.

Ferner ist gemäß § 7 Abs. 1 Nr. 5 und 6 KSpG-E Voraussetzung für die Erteilung einer Genehmigung zur Untersuchung des Untergrundes auf seine Eignung zur Errichtung und zum Betrieb von $CO_2$-Speichern (Untersuchungsgenehmigung), dass

- die erforderlichen Maßnahmen zur Abwehr von Gefahren für Leben, Gesundheit und zum Schutz von Sachgütern Beschäftigter und Dritter getroffen werden

und

- im Interesse der Allgemeinheit und der Nachbarschaft u. a. der Schutz und, soweit nicht möglich, die ordnungsgemäße Wiederherstellung der betroffenen Umweltgüter gewährleistet und entsprechende Vorkehrungen getroffen worden sind.

Auch hier wird mithin zur Bedingung für die Speicherung von $CO_2$ im Untergrund gemacht, dass die menschliche Gesundheit und umweltrechtlich relevante Schutzgüter hinreichend geschützt werden, was eine nähere Ausformung des gesetzgeberisch durch § 1 KSpG-E vorgegebenen Schutzzwecks darstellen dürfte. Gemäß § 9 Abs. 1 KSpG-E können mit derselben Schutzrichtung auch Auflagen zur Untersuchungsgenehmigung nachträglich verfügt, geändert oder ergänzt werden.

Ein Planfeststellungsbeschluss oder eine Plangenehmigung für die Errichtung, den Betrieb oder die wesentliche Änderung eines $CO_2$-Speichers darf gemäß § 13 Abs. 1 Nr. 3 und 4 KSpG-E ebenfalls nur erteilt werden, wenn u. a.

- Gefahren für die in § 1 KSpG-E genannten Schutzgüter, also insbesondere Mensch und Umwelt nicht hervorgerufen werden können

und

- die erforderliche Vorsorge gegen Beeinträchtigungen dieser Schutzgüter getroffen wird.

Auch für die Genehmigung der Errichtung des eigentlichen $CO_2$-Speichers, nicht nur für die Erkundung geeigneter Lagerstätten, macht der Gesetzgeber mithin zur Bedingung, dass keine Gefahren für umweltrechtlich relevante Schutzgüter entstehen können und Vorsorge gegen zu befürchtende Beeinträchtigungen getroffen wird. Diese Bestimmung erinnert stark an die Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) zu den Genehmigungsvoraussetzungen immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftiger Anlagen. Gemäß § 6 Abs. 1 Nr. 1 i. V. m. § 5 Abs. 1 BImSchG ist zu deren Genehmigung nämlich erforderlich, dass

- schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können

und

- Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen getroffen wird.

Da das Immissionsschutzrecht im System der deutschen Rechtsordnung als wichtiger Bestandteil des Umweltrechts eingeordnet wird, spricht auch diese Parallelität der Genehmigungsvoraussetzungen immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftiger Anlagen und $CO_2$-Speichern dafür, das Recht der $CO_2$-Speicherung ebenfalls als Umweltrecht einzustufen und gerade nicht als spezielles Wirtschaftsverwaltungsrecht, dem das Bergrecht in erster Linie zuzuordnen ist.

Dieselben Erwägungen gelten auch für die Genehmigung der Stilllegung eines $CO_2$-Speichers. Auch diese darf nur erfolgen, wenn die Voraussetzungen des § 13 Abs. 1 Nr. 2 bis 4 KSpG-E gewahrt sind, mithin Gefahren für die in § 1 KSpG-E genannten Schutzgüter, also insbesondere Mensch und Umwelt nicht hervorgerufen werden können und die erforderliche Vorsorge gegen Beeinträchtigungen dieser Schutzgüter getroffen wird.

Darüber hinaus hat der Betreiber gemäß § 22 Abs. 1 und Abs. 2 Nr. 3 KSpG-E auf Grundlage eines Überwachungskonzeptes den $CO_2$-Speicher sowie das Verhalten des gespeicherten $CO_2$ auf die umgebende Umwelt kontinuierlich zu überwachen, insbesondere auch im Hinblick auf Art und Ausmaß möglicher nachteiliger Einwirkungen auf die Schutzgüter nach § 1 KSpG-E. Auch in die gesetzliche Regelung zur Eigenüberwachung von $CO_2$-Speichern durch den Betreiber ist mithin ein deutlich umweltrechtlicher gesetzgeberisch gewollter Schwerpunkt aufgenommen worden.

Der Kohlendioxidstrom, also die Gesamtheit der aus Abscheidung und Transport von Kohlendioxid stammenden Stoffe (§ 3 Nr. 5 KSpG-E), darf außerdem nur dann angenommen und in einen $CO_2$-Speicher injiziert werden, wenn u. a. Beeinträchtigungen

der Schutzgüter nach § 1 KSpG-E ausgeschlossen sind. Auch hier findet sich mithin eine auf umweltrechtlich relevante Schutzgüter bezogene Reglementierung, und zwar hier bezogen auf den Betrieb des Speichers.

Schließlich lässt auch die durch den Gesetzesentwurf vorgesehene Zuständigkeitsverteilung darauf schließen, dass das Gesetz eine stark umweltrechtlich geprägte Ausrichtung aufweist. So soll zwar das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie zuständig für die Erstellung und Fortschreibung einer Bewertung der Potenziale von Gesteinsschichten für die Speicherung von $CO_2$ im Hinblick auf den Schutzzweck des Gesetzes sein. Dies soll allerdings im Einvernehmen mit dem Bundesumweltministerium geschehen. Gegen den Willen des für den Schutz der Umwelt zuständigen Ministeriums soll mithin schon nicht einmal die Eignung von Gesteinsschichten für die $CO_2$-Speicherung festgestellt werden dürfen.

Auf Fragen, die in erster Linie das Bergrecht regelt, insbesondere die wirtschaftsverwaltungsrechtlichen Fragen der Ausbeutung von Bodenschätzen, nimmt der Gesetzesentwurf hingegen nahezu keinen Bezug. Lediglich in § 7 Abs. 1 Nr. 3 KSpG-E wird normiert, dass die Erteilung einer Untersuchungsgenehmigung u. a. davon abhängig ist, dass wesentliche Beeinträchtigungen bestehender Bergbauberechtigungen oder Beeinträchtigungen von Bodenschätzen oder anderen Nutzungen des Untergrundes, deren Schutz im öffentlichen Interesse liegt, ausgeschlossen sind. Auch dies zeigt, dass Fragen des Bergbaus und der weiter bestehenden Möglichkeit der Ausbeutung von Bodenschätzen zwar bei der Entscheidung über die Erkundung eines möglichen $CO_2$-Speichers mit einzubeziehen sind, sie aber nicht im Fordergrund der gesetzgeberisch gewollten Schutzwirkung stehen. Dies sind in erster Linie die im Schutzzweck des Gesetzes in § 1 und gleichzeitig in § 7 Abs. 1 Nr. 5 und 6 KSpG-E genannten Rechtsgüter, zu denen der Bergbau indes nicht gehört.

Nach alledem zeigt sich, dass auch nach dem Entwurf eines nationalen Einlagerungsgesetzes für die Beurteilung der Zulässigkeit von $CO_2$-Speicherungen im Unter-

grund vor allem umweltrechtliche und keine speziellen wirtschaftsverwaltungsrechtlichen Erwägungen gelten. Dies gilt sowohl

- für die Erkundung möglicher $CO_2$-Speicher,

als auch

- für ihre Genehmigung

sowie schließlich auch

- für die Stilllegungs- und Nachsorgephase.

Bergrechtliche Erwägungen spielen hingegen allenfalls eine untergeordnete Rolle.

## C. Ergebnis

Als eines der bisherigen Ergebnisse u. a. auch des CLEAN-Projektes bleibt damit in juristischer Hinsicht festzuhalten, dass

- schon in der Vergangenheit und aktuell das Bergrecht nicht geeignet ist, die Risikobewertungen vorzunehmen, die im Hinblick auf die Speicherung von $CO_2$ im Untergrund vorzunehmen sind,

und

- auch zukünftig – unter Geltung des nationalen Einlagerungsgesetzes und der CCS-Richtlinie – bergrechtliche Wertungen bei der Beurteilung der Zulässigkeit von $CO_2$-Speicherung allenfalls eine untergeordnete Rolle spielen werden und vielmehr umweltrechtliche Aspekte im Vordergrund stehen werden.

Dieser Befund schließt es allerdings nicht aus – solange das KSpG-E – noch nicht in Kraft ist, die Genehmigung für das CLEAN-Projekt als Forschungsprojekt nach dem bergrechtlichen Regime durchzuführen.

Vor dem Hintergrund, dass der Entwurf des Kohlendioxid-Speicherungsgesetz zwar eine Übergangsregelung des § 44 KSpG-E eine Übergangsregelung bislang lediglich dergestalt vorsieht, dass bereits nach § 7 Bundesbergrecht (BBergR) begonnene Verfahren, die sich auf die Aufsuchung von Bodenschätzen, insbesondere von Sole, in potentiellen Speicherkomplexen beziehen, nach § 7 KSpG-E weitergeführt werden können, stellt sich die Frage, ob nicht – sofern nicht bis dahin eine Injektionsgenehmigung vorliegt – das Verfahren weiter nach dem Rechtsregime des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes durchzuführen wäre.

Die jetzige Übergangsregelung bezieht sich vom *Wortlaut* jedenfalls bislang nur darauf, dass von Seiten der Antragsteller die Möglichkeit besteht, begonnene Verfahren, die der *Aufsuchung* von Bodenschätzen nach § 7 BBergG dienen, nach der Neuregelung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes *auf Antrag* weitergeführt werden kann.

Welche Rechtsfolge sich jedoch für diejenigen Verfahren ergibt, die begonnen sind, jedoch noch keine (bergrechtliche) Speicherungsgenehmigung existiert, lässt sich der Übergangsregelung jedoch nicht entnehmen.

Da aber bislang das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz noch nicht in Kraft getreten ist und nicht prognostiziert werden kann, ob es bei der derzeitigen Übergangsregelung verbleibt, kann diese Frage noch nicht abschließend beantwortet werden.

Dr. Angelika Leppin
Rechtsanwältin und
Fachanwältin für Verwaltungsrecht

Prof. Dr. Wolfgang Ewer
Rechtsanwalt und
Fachanwalt für Verwaltungsrecht

# E.3 Strukturmodell

# Erarbeitung eines geologischen Strukturmodells

M. Beyer & J. Großmann

GICON, Großmann Ingenieur Consult GmbH
Tiergartenstraße 48
01219 Dresden

*(Anlage E.3 zum Endbericht der Teilprojekte Mo1 und Mo3 im Themenverbund 4 (Monitoring) des F&E-Vorhabens CLEAN – $CO_2$ Enhanced Gas Recovery in the Altmark Natural Gas Field)*

**Inhaltsverzeichnis**

1 Einleitung ....4

2 Geologische Situation ....4

3 Hydrogeologische Verhältnisse: ....4

4 Strukturmodellierung ....6

4.1 Software ....6

4.2 Hydrogeologische Datengrundlage ....6

4.3 Methodik ....7

4.4 Ableitung von Verbreitungen der geologischen Einheiten ....7

4.5 Klassierung der Schichtenansprache ....8

4.6 Ableitung der Schichtgeometrien hydrogeologischer Einheiten ....9

4.7 Schichtflächen und Qualitätssicherung ....9

4.8 Anpassung der Verbreitungsgrenzen hydrogeologischer Einheiten ....10

4.9 Ableitung der Mächtigkeitsverteilungen hydrogeologischer Einheiten ....10

4.10 Aufbau des dreidimensionalen, raumfüllenden Strukturmodells ....10

5 Datenbasis ....11

6 Modellgebietsabgrenzung ....12

7 Schichtenfolge ....13

7.1 Elster-Kaltzeit ....13

7.2 Grundwasserleiter 3 ....14

7.3 Saale I ....15

7.4 Saale In IIv ....15

7.5 Saale II ....16

7.6 Weichsel-Kaltzeit ....16

7.7 Holozän ....17

7.8 Blockmodell ....17

8 Anpassung des Strukturmodells ....18

9 Grundlagen der Strukturmodellierung ....19

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel der geologischen Verbreitung, Ablagerungen der Weichselkaltzeit im Kontext der Lithofazieskarte Quartär sowie geologischer Aufschlüsse ..... 7

Abbildung 2: Hydrogeologische Interpretation / Abstraktion der Aufschlussdaten am Beispiel der Bohrung 3233/HY/5 ..... 8

Abbildung 3: 2 ausmodellierte Schichtflächen im Kontext zu hydrogeologischen Schnitten und Bohrstäbchen ..... 9

Abbildung 4: Plausibilitätskontrolle durch Bohrungsprojektionen auf vorhandene Schichtflächen, Unterkante der Modellschicht GWS Saale I ..... 10

Abbildung 5: Blockmodell der geologischen Einheiten ..... 11

Abbildung 6: Modellgebietsabgrenzung im Kontext der regionalen Grundwassergleichen (schwarz) sowie der Vorflut ..... 12

Abbildung 7: Verbreitung der Elster Grundmoräne (blau) ..... 14

Abbildung 8: Verbreitung des Grundwasserleiters 3 (blau) ..... 14

Abbildung 9: Verbreitung Saale I (blau) ..... 15

Abbildung 10: Verbreitung Saale In IIv (blau) ..... 15

Abbildung 11: Verbreitung Saale II (blau) ..... 16

Abbildung 12: Verbreitung der Ablagerungen der Weichselkaltzeit (blau) ..... 16

Abbildung 13: Verbreitung Holozän (blau-türkis) ..... 17

Abbildung 14: Schnitte durch das Strukturmodell im Kontext von stratifizierten Aufschlüssen ..... 17

Abbildung 15: Schnitte durch das angepasste Strukturmodell im Kontext der neuen geologischen Aufschlüsse ..... 18

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schichten des Strukturmodells ..... 13

Tabelle 2: vorhandene geologische Aufschlüsse im Modellgebiet ..... 13

Tabelle 3: Schichten des angepassten Strukturmodells ..... 18

## 1 Einleitung

Durch GICON erfolgte die Erstellung eines geologischen Strukturmodells für die flachen (quartären) Grundwasserleiter. Diese Leistung umfasste alle erforderlichen Arbeiten von der Datenakquisition über die Datenaufbereitung bis zur Erstellung des geologischen Strukturmodells. Darüber hinaus wurde der bei GICON vorliegende Datenbestand mit eingearbeitet. Das geologische Strukturmodell bildet die Basis für das im nächsten Schritt zu erarbeitende Grundwasserströmung- bzw. Stofftransportmodell (CAU).

## 2 Geologische Situation

Großräumig liegt das Untersuchungsgebiet zwischen den Endmoränenzügen des Warthevorstoßes der Saale-Kaltzeit im Süden und des Brandenburger Stadiums der Weichsel-Eiszeit im Norden. Prägend sind hier Hochflächen (Altmarkplatten, z.B. Jeetze-Dumme-Platte) und Niederungen (z.B. Jeetze-Purnitz-Niederung).
Die Hochflächen bestehen im Wesentlichen aus Grundmoränenablagerungen (Geschiebemergel) und Schmelzwassersanden der Saale-Kaltzeiten (Vor- und Nachschüttbildungen). Diese Bereiche werden von schmelzwassersanderfüllten Erosionsrinnen umgeben.
In den Niederungsbereichen lagern geringmächtige holozäne schluffige und anmoorige Bildungen den sandig-kiesigen Talsandablagerungen auf. Diese wiederum werden von limnischen Bildungen der Eem-Warmzeit und sallekaltzeitliche, glazifluviatilen Sanden und/oder Geschiebemergeln unterlagert.

Im eigentlichen Testfeld bei Altensalzwedel lassen sich zwei grundlegende geologische Bereiche aushalten:

<u>Bereich nordwestlich von Maxdorf (nordwestliches Testfeld):</u>
Nordwestlich von Maxdorf beginnt der Niederungsbereich von Jeetze, Purnitz und Floßgraben. Er umfasst die Bereiche der Sonden Aaz 148, 140 bis 144 (Geländehöhen < 30 m NN). Der oberflächennahe Untergrundaufbau wird durch fluviatile Talsandablagerungen gebildet, die bis max. ca. 3 m Mächtigkeit erreichen. Untergelagert folgen glazilimnische Ablagerungen (feinsandige Schluffe) über Grundmoränenablagerungen (Geschiebemergel). Diese wurden an Aaz 140 bis 12 m u Geländeoberkante (GOK) nachgewiesen.

<u>Bereich südöstlich von Maxdorf (südöstliches Testfeld):</u>
Dieser Bereich gehört zum Hochflächenbereich (GOK > 30 m NN). Die Sonden Aaz 147, 149, 145, 152, 150 und 151 liegen in diesem Bereich. Auch hier stehen an der Oberfläche meist geringmächtige Sandschichten an (bis ca. 2 m mächtig), untergelagert folgt ein Geschiebelehm/-mergelhorizont, der z. B. an Aaz 149 eine Endteufe von 9,5 m u GOK erreicht. Untergelagert folgt eine Wechsellagerung von glazifluviatilen Sanden und Grundmoränenablagerungen der Saalekaltzeiten. An Standort Aaz 149 heißt das konkret bis 26 m u GOK Mittel- Grobsand, von 26 - 28 m u GOK (Endteufe) Geschiebemergel.

## 3 Hydrogeologische Verhältnisse:

Flächendeckend vorhandene Grundwasserleiter und -stauer sind im Quartär im Großraum nicht vorhanden.

Entsprechend der geologischen Verbreitung können auch die hydrogeologischen Verhältnisse in lokale Aquifere der Hochflächen und Niederungen unterteilt werden.

Auf den Hochflächen bilden Schmelzwassersande unter einer ca. 10 - 30 m mächtigen Geschiebemergelabdeckung den Hauptgrundwasserleiter. Es handelt sich um bis zu ca. 30 m mächtige, meist schwach schluffige Fein- und Mittelsande, abgelagert zwischen Geschiebe-

mergelpaketen der Saale-I und der Saale-II-Kaltzeit. Die oberflächennah abgelagerten Sande führen meist nur temporär und lokal Grundwasser („schwebender" oberer Grundwasserleiter).

Im Bereich der Niederungen bilden die weichselkaltzeitlichen und holozänen Talsande den oberen Grundwasserleiter (GWL). Meist ist dieser unbedeckt, nur lokal finden sich Torf- oder Auelehmablagerungen als Überdeckung.

Die Hochflächen stellen Speisungsgebiete für das Grundwasser dar, durch die großflächige Verbreitung von Geschiebemergel ist die Neubildung entsprechend reduziert. Die Niederungsbereiche im Norden und Nordosten der Altmark fungieren hingegen als großräumige Entlastungsbereiche. Hier kommt es auch zu einer Entlastung der unteren GWL in die oberen GWL, sofern der Geschiebemergel erodiert ist. Der GWL unterhalb des Geschiebemergels ist meist gespannt, das Druckpotenzial liegt z.T. oberhalb des freien Wasserspiegels des oberen GWL.

Das Grundwasser des oberen GWL entlastet in die Jeetze mit ihrem weit verzweigten System von Entwässerungsgräben und wird hier nach Norden abgeführt.

Die generelle Grundwasserdynamik wird großräumig durch eine Fließrichtung SW -> NE, für den Testfeldbereich von SE nach NW in Richtung der Jeetzeniederung bestimmt.

Die Flurabstände liegen in den Hochflächenbereichen in der Regel bei 10 bis 15 m u GOK, wobei durch die Geschiebemergelüberdeckung die Verhältnisse in aller Regel gespannt sind. In den Niederungen steht das Grundwasser flurnah an, die Abstände liegen bei 0 - ca. 2 m u GOK.

<u>Bereich nordwestlich von Maxdorf (nordwestliches Testfeld):</u>
Die oberflächennah anstehenden Sande sind wasserführend (GWL 1; S2n – W), der Flurabstand liegt bei 0 - 2 m u GOK (z.B. Aaz 140: < 1 m u GOK). Es handelt sich um einen „schwebenden Grundwasserleiter", der in die Entwässerungsgräben in der Jeetzeniederung entlastet. Der nordöstliche Bereich ist gekennzeichnet durch die Vereinigung von Jeetze, Purnitz und Floßgraben, hier entwässert der oberste GWL nach Norden mit dem Vorfluter. Der GWL ist nicht geschützt gegenüber Schadstoffeintrag.

Der oberste geschützte GWL ist der GWL 3 (iH – S1v). Es handelt sich um glazifluviatile Ablagerungen, überdeckt von Schluff- und Geschiebemergelschichten. Die Oberkante des GWL liegt bei ca. 5 - 15 m NN, d.h. ca. 10 - 20 m u GOK, die Mächtigkeit des GWL liegt nach /HK/ zwischen 8 und 15 m, der k-Wert zwischen 15 - 300 x $10^{-5}$ m/s.

<u>Bereich südöstlich von Maxdorf (südöstliches Testfeld):</u>
Im südöstlichen Testfeldbereich ist der GWL 1 (S2n – W) nicht bzw. nur sehr lokal (saisonal) ausgebildet.

Oberster, flächendeckend vorhandener GWL ist GWL 3 (iH-S1v), zwischen Maxdorf und der B 71 ist auch GWL 2 (S1n – S2v) ausgebildet. Beide GWL stehen hier in hydraulischer Verbindung. Im Bereich nordwestlich von Maxdorf entlasten beide GWL in den GWL 1.

Die OK von GWL 3 liegt zwischen 7 und 20 m u GOK, die Mächtigkeit des GWL wird mit > 15 m angegeben, der k-Wert zwischen 15 - 200 x $10^{-5}$ m/s.

Zur Lage und Ausbildung der tertiären GWL liegen keine Informationen vor.

# 4 Strukturmodellierung

## 4.1 Software

Zur Erstellung des hydrogeologischen Strukturmodells wurde das Modellierungsprogramm GMS 6.5 („Groundwater Modeling System“, Aquaveo, Utah, USA) angewendet. Aufgrund des modularen Aufbaus von GMS 6.5 bietet es die Möglichkeit räumliche geologische sowie hydrogeologische Daten zu dreidimensionalen Struktur-, Parameter- und Strömungsmodellen zu entwickeln. Die benötigten Daten können aus Datenbanken über die Nutzung von Accessroutinen (AML) exportiert und direkt im GMS 6.5 weiterverarbeitet werden. Es ist damit eines der leistungsstärksten Programmpakete für die Lösung komplexer interdisziplinärer Modellierungsaufgaben. Durch die Berücksichtigung von Punkt-, Flächen- und 3D-Informationen können komplexe stratigraphische Modellräume modelliert werden, die eine Berücksichtigung von Klüften/Störungszonen jeder Raumlage zulässt. Des Weiteren können im Programm integrierte Berechnungsverfahren, wie zum Beispiel Interpolations- und Anpassungsalgorithmen, verwendet werden, die zur optimalen Nachbildung der jeweiligen geologischen oder hydrogeologischen Struktur führen. Im Ergebnis ist es möglich, ein 3D-Modell der abzubildenden Realität zu erarbeiten. GMS 6.5 bietet darüber hinaus vielfältige Möglichkeiten der Visualisierung. Diese umfassen:

- um 360° (X,Y,Z) drehbare 3D-Darstellungen
- Darstellung von geologischen Schichtengrenzen als Flächen
- Blockbilder von Schichtmächtigkeiten und Verbreitungen
- (geologische) Schnitte mit beliebiger Orientierung
- Darstellung der Aufschlüsse im Untersuchungsgebiet mit lithologischen oder stratigraphischen Informationen
- Darstellung der Grundwasseroberfläche
- Darstellung der Grundwassermessstellen und deren Filterlagen/Ausbau
- Kontext Bohrung – Messstelle – Grundwasserbrunnen

## 4.2 Hydrogeologische Datengrundlage

Um eine Bewertung und Auswahl von geologischen Aufschlüsse vornehmen zu können, muss der vorhandene Aufschlussdatenbestand zunächst fachgeologisch bewertet und softwaregerecht kodiert werden. Die Grundlage dieser Bewertung bildet die regionale Grundgliederung (Normalprofil) des Untersuchungsgebietes. Vorhandene Aufschlüsse aus Bohrkampagnen der letzten etwa 100 Jahre wurden meist mit verschiedensten Technologien und zur Klärung unterschiedlicher Fragestellungen abgeteuft. Anschließend wurden diese dann durch unterschiedliche Bearbeitergruppen und auf Grundlage meist zueinander inkonsistenter Normalprofile interpretiert. Deshalb besteht die erste Aufgabe darin, ein einheitliches Normalprofil zu erarbeiten, welches die wichtigsten grundwasserströmungsrelevanten hydrostratigraphischen Einheiten berücksichtigt. Dabei müssen Einheiten mit gleichen hydraulischen Eigenschaften, die sich direkt überlagern, zusammengefasst werden, um die entstehende Datenmenge für die Strukturmodellierung in einem überschaubaren Rahmen zu halten. Das erarbeitete Normalprofil wird nachfolgend präsentiert. Die Stratifizierung der einzelnen Aufschlüsse schließt eine Plausibilitätsprüfung und Bewertung der Zuverlässigkeit und Lage mit ein. Im Ergebnis lassen sich die Aufschlüsse in 3 Klassen einteilen:

A: differenzierte Lithologie, eindeutige Stratigraphie
B: differenzierte Lithologie, unklare/mehrdeutige Stratigraphie
C: grobe Lithologie, unklare/mehrdeutige Stratigraphie

Die Aufschlüsse der Klasse A bilden die Grundlage des zu erstellenden Strukturmodells, da sie die belastbarsten Informationen enthalten. Die Aufschlüsse der Klasse B werden ebenfalls zur Erstellung des Strukturmodells und zur Erhöhung der Datendichte verwendet. Diese Aufschlüsse müssen jedoch im Rahmen der Strukturmodellierung immer im Kontext der A-Auf-

schlüsse betrachtet werden, um die lithologischen Informationen den hydrostratigraphischen Einheiten zuordnen zu können. Aufschlüsse der Klassen C werden vorerst nicht verwendet.

### 4.3 Methodik

Das Strukturmodell basiert konsequenterweise auf der regionalen Grundgliederung (Normalprofil) des Untersuchungsgebietes. Die weitere Methodik zur Generierung des Strukturmodells ist in folgende Arbeitsschritte gegliedert:

- Ableitung von Verbreitungen der geologischen Einheiten
- Klassierung der Schichtenansprache (lithologisch)
- Ableitung der Schichtgeometrien hydrogeologischer Einheiten
- Schichtflächen und Qualitätssicherung
- Anpassung der Verbreitungsgrenzen hydrogeologischer Einheiten
- Ableitung der Mächtigkeitsverteilungen hydrogeologischer Einheiten
- Aufbau des dreidimensionalen, raumfüllenden Strukturmodells

### 4.4 Ableitung von Verbreitungen der geologischen Einheiten

Als nächstes erfolgte die Erarbeitung der Verbreitungsgrenzen der im Normalprofil unterschiedenen hydrostratigraphischen Einheiten. Hierzu wurden die im Rahmen der Stratifizierung vorbereiteten Daten im GMS 6.5 im Gesamtkontext ausgewertet. Im Ergebnis liegen für jede relevante hydrogeologische Einheit bezogen auf den Modellraum Verbreitungs- und Nichtverbreitungspolygone vor. Diese Verbreitungen werden in erster Linie auf Grundlage des Aufschlussbestandes und sonstiger Fachkarten „klassisch“, d.h. ohne Nutzung von Software-Automatismen anhand fachgeologischer Interpretationen abgeleitet. Ein Feinabgleich dieser Verbreitungsgrenzen unter Berücksichtigung aller im Modell ausgehaltenen hydrostratigraphischen Einheiten im dreidimensionalen Gesamtkontext erfolgt nach der Ausmodellierung der Schichtgrenzen.

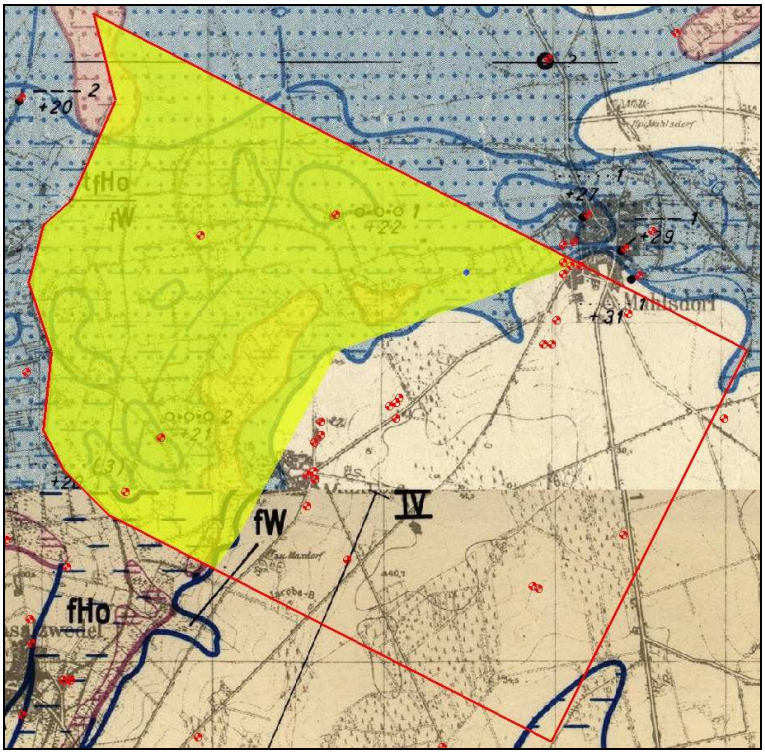



**Abbildung 1: Beispiel der geologischen Verbreitung, Ablagerungen der Weichselkaltzeit im Kontext der Lithofazieskarte Quartär sowie geologischer Aufschlüsse**

## 4.5 Klassierung der Schichtenansprache

Für die rechnergestützte Bearbeitung der Aufschlüsse ist es erforderlich, die Ausgangsschichtdaten der erbohrten Schichtenfolgen definierten Materialklassen zuzuordnen. Die Varianz der Ansprachen umfasst in der Regel mehrere hundert differierende Schichtbeschreibungen, die als Einzelmaterialien zu interpretieren wären. Um diese Varianz für die weitere Modellbildung handhabbar zu machen, muss im nächsten Schritt eine Klassierung mit bündelnder Wirkung durchgeführt werden. Diese Klassierung kann automatisiert über entsprechende Abfragen aus der Datenbank vorgenommen werden.

Die lithologische Klassierung bietet aufgrund ihrer gegenüber dem notwendigerweise generalisierten hydrostratigraphischen Modell höheren lithologischen Auflösung die Möglichkeit, die Struktur des hydrogeologischen Strukturmodells (HSM) zu überprüfen und bei Bedarf Anpassungen durchzuführen, da die grundsätzlichen Gesetzmäßigkeiten der Genese und Lagerungsverhältnisse der zu beschreibenden Einheiten berücksichtigt werden können. Dies bietet den Vorteil, dass sie von den Interpretationen der Stratigraphie frei ist und sich eng an den lithologischen Beschreibungen der Schichtfazies orientiert. Es bleiben hierbei auch lithologische Varianzen innerhalb der stratigraphisch zusammenzufassenden Einzelschichten erhalten.

Für jedes Bohrloch werden sowohl die Informationen der lithologischen Klassierung als auch die erarbeitete Stratifizierung in GMS 6.5 importiert und als Bohrstäbchen mit den entsprechenden Höhenbezügen dargestellt. Die Bohrstäbchen zeigen entweder die lithologische Klassierung oder die Stratifizierung in einem definierten Farbspektrum.

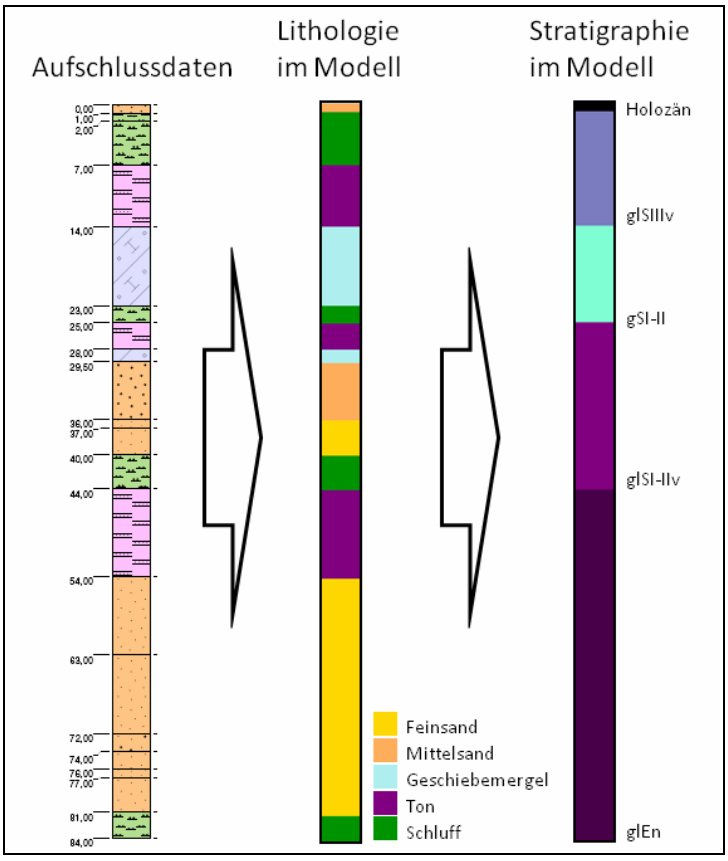



**Abbildung 2: Hydrogeologische Interpretation / Abstraktion der Aufschlussdaten am Beispiel der Bohrung 3233/HY/5**

## 4.6 Ableitung der Schichtgeometrien hydrogeologischer Einheiten

Die Geometrien der einzelnen Schichten werden durch eine Menge von digitalen Punktdatensätzen (X, Y, Z) beschrieben und schichtbezogen trianguliert. Die Auflösung bzw. Genauigkeit des Triangelnetzes hängt in hohem Maße von der räumlichen Dichte der verfügbaren Aufschlüsse ab. Das für (inter-)glaziäre Sedimentationsräume typische in Zeit und Raum heterogene Sedimentationsmilieu sowie die nachfolgende Überprägung und teilweise Erosion der Schichtenfolgen machen eine sichere Vorhersage der Lithologien abseits von Aufschlüssen (Stützpunkten), unabhängig vom Bearbeitungsverfahren, schwierig. Ziel ist deshalb die Ableitung einer möglichst plausiblen Variante der Materialverteilungen im Raum in Bezug auf ihre hydrogeologische Wirksamkeit.

Die Basis-Schicht-Tins werden zunächst für die Stauhorizonte aufgebaut, da hier klare lithologische Grenzschichten vorliegen. Anhand dieser Basis-Tins ist bereits die Geometrie der Schichtfläche von Bohrung zu Bohrung beschrieben. Besondere Strukturen werden durch ergänzend in das Dreiecksnetz auf Grundlage fachgeologischer Interpretation eingefügte Stützpunkte („Dummy-Bohrungen“) abgebildet. Die Stützpunkte werden sodann auf ein feineres, gleichmäßig innerhalb der Schichtverbreitung strukturiertes Dreiecksnetz interpoliert.

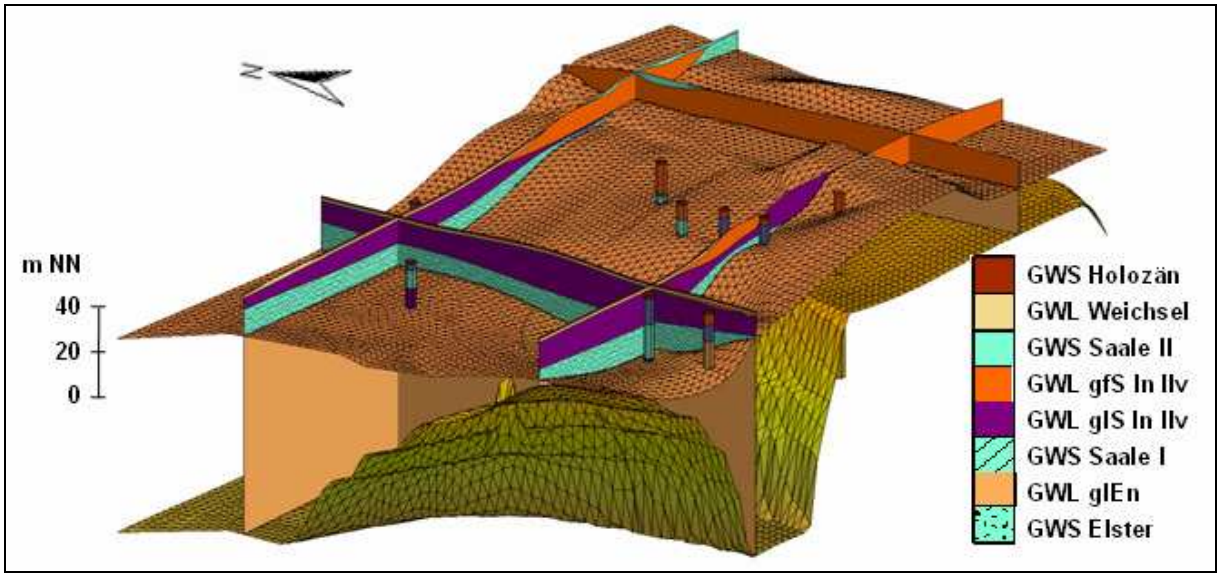



**Abbildung 3: 2 ausmodellierte Schichtflächen im Kontext zu hydrogeologischen Schnitten und Bohrstäbchen**

## 4.7 Schichtflächen und Qualitätssicherung

Die Größe und Auflösung des Modellgebietes sowie der Umfang der verfügbaren und umzusetzenden Daten machen eine permanente Plausibilitätskontrolle obligatorisch. Zur Qualitätssicherung während der Strukturmodellierung werden dazu jeweils nach der Fertigstellung einer Schichtfläche, diese einer Bohrungsprojektion in GMS 6.5 unterzogen. Dadurch wird sichergestellt, dass ein Abgleich der Ergebnisse mit den Ursprungsdaten stattfand. Auf diese Weise kann der Modellfehler minimiert und eventuelle Abweichungen analog durch Anpassung des Triangelnetzes der Schicht berichtigt werden.

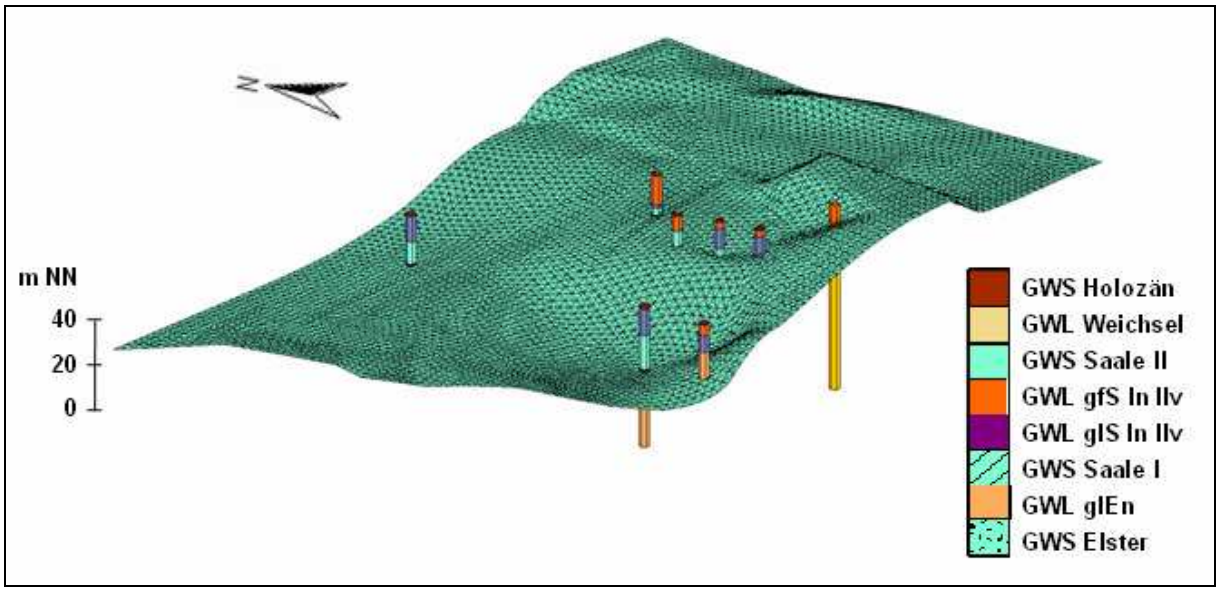



**Abbildung 4: Plausibilitätskontrolle durch Bohrungsprojektionen auf vorhandene Schichtflächen, Unterkante der Modellschicht GWS Saale I**

### 4.8 Anpassung der Verbreitungsgrenzen hydrogeologischer Einheiten

Besonders wegen der mit zunehmender Tiefe der zu modellierenden Einheiten abnehmenden Anzahl der Nachweispunkte können sich in der durch Interpretationen ergänzten Abbildung der Schichtflächen innerhalb der ungefähr kartierten Verbreitungen im Kontext der übrigen Schichtflächen Inkonsistenzen ergeben, die eine Nachbearbeitung sowohl der Verbreitung als auch eventuell eingesetzter Dummy-Bohrungen mit sich bringen.

Dieser iterative, über sog. Verschneidungen von Schichtflächen erfolgende Anpassungsprozess berücksichtigt insbesondere die Randausbildung der Horizonte an Auskeilungs- oder Erosionsgrenzen. Hierbei kommen sog. Abschneide-Algorithmen zum Einsatz („truncate“). Hierbei werden aus der jeweils über- oder unterlagernden Schicht die maßgeblichen Randwerte auf den Verbreitungsrand übertragen, um für die Schichtinterpolation feste Grenzen zu liefern.

### 4.9 Ableitung der Mächtigkeitsverteilungen hydrogeologischer Einheiten

Nach dem die Konsistenz der modellierten Schichten zueinander hergestellt wurde und der Anpassungsprozess bezüglich der Verbreitungen eine hinreichende Genauigkeit erreicht hat, kann über eine Differenzenbildung zwischen dem Hangenden und Liegenden der jeweiligen Einheit aus dem interpolierten Dreiecksnetz die Mächtigkeitsverteilung errechnet werden.

Dafür sind die überlagernden Horizonte in der Gesamtschau bereitzustellen. Hierfür werden für jede Einheit Schichtflächen benötigt, die den gesamten Modellraum ausfüllen. Sie setzen sich aus Verbreitungs- und Nichtverbreitungstins zusammen. Dieser Zusammenschnitt einer Schichtfläche wird auch als „Layer“ bezeichnet.

### 4.10 Aufbau des dreidimensionalen, raumfüllenden Strukturmodells

Sobald für alle Schichtflächen die aus Verbreitung und Nichtverbreitung zusammengesetzten Layerdaten vorliegen, kann daraus über einen reinen Rechenprozess der Modellierungssoftware das raumfüllende Modell als Schichtkörpermodell (sog. „Solids“) gebildet werden.

Die obere Begrenzung bildet dabei das digitale Geländehöhenmodell. Aus dem HSM können dann Modellschnitte bohrungsunabhängig generiert werden. Die stetigen Raumkoordinaten aller Schichtkörper des HSMs dienen als Datenbasis für die Geometrien der Schichtkörper in der weiteren Strömungsmodellierung in beliebiger Rasterweite der Modellzellen.

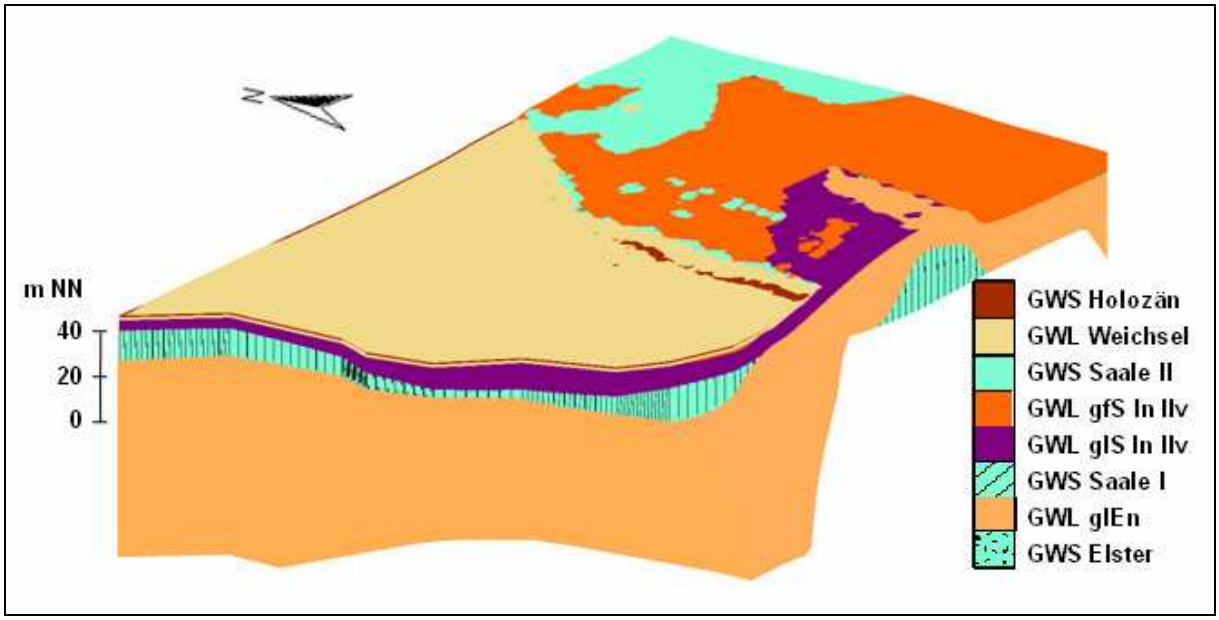



**Abbildung 5: Blockmodell der geologischen Einheiten**

## 5 Datenbasis

Die Grundlage für die Strukturmodellierung bildet die Recherche und Aufarbeitung folgender Daten:

- Lithofazieskarten Quartär, 1:50 000
- Hydrogeologische Grundkarten, 1:50 000
- 242 Aufschlüsse aus der Landesbohrdatenbank des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (SABIS/FIS)
- 2 Grundwassermessstellen (GWMS) des Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (Schichtenverzeichnisse)
- 8 GWMS des Landratsamtes Altmarkkreises Salzwedel (Schichtenverzeichnisse)
- weitere bei GICON vorhandene Daten zur Geologie und Hydrogeologie Schichtenverzeichnisse von Sondierungen
- 41 Schichtenverzeichnisse der Tiefenbohrungen von GdF Suez (bereitgestellt über DMS)

Des Weiteren wurden durch GdF Suez Unterlagen von der Erkundung und Bewertung von Sondenplätzen und Schlammgruben im Untersuchungsbereich bzw. der näheren Umgebung zur Verfügung gestellt.

## 6 Modellgebietsabgrenzung

Vor dem Hintergrund, dass das Strukturmodell die Basis für die Strömungs- und Transportmodellierung darstellt, wurde die Modellgebietsabgrenzung anhand eines großräumigen Grundwassergleichenplans (Hydrogeologische Karte 1:50.000 (HK 50)) durchgeführt. Die Abgrenzung erfolgte in erster Linie unter Berücksichtigung hydraulischer Randbedingungen. Der nördliche und südliche Modellrand wird durch Randstromlinien gebildet. Im Westen bilden die Purnitz und die Jeetze die hydraulische Randbedingung. Im Osten wird der Modellrand durch eine idealisierte Grundwassergleiche auf dem Hochplateau südlich von Mahlsdorf gebildet. Das Modellgebiet ist auf die Bohrung 144 fokussiert und deckt den für diese Fragestellung interessantesten Teil des Grundwasserleiters bzw. des Gasreservoirs östlich der Jeetze ab. Das Grundwasser strömt von der südöstlichen Modellgrenze nach Nordwesten in Richtung der Jeetze, welche hier den Vorfluter darstellt.

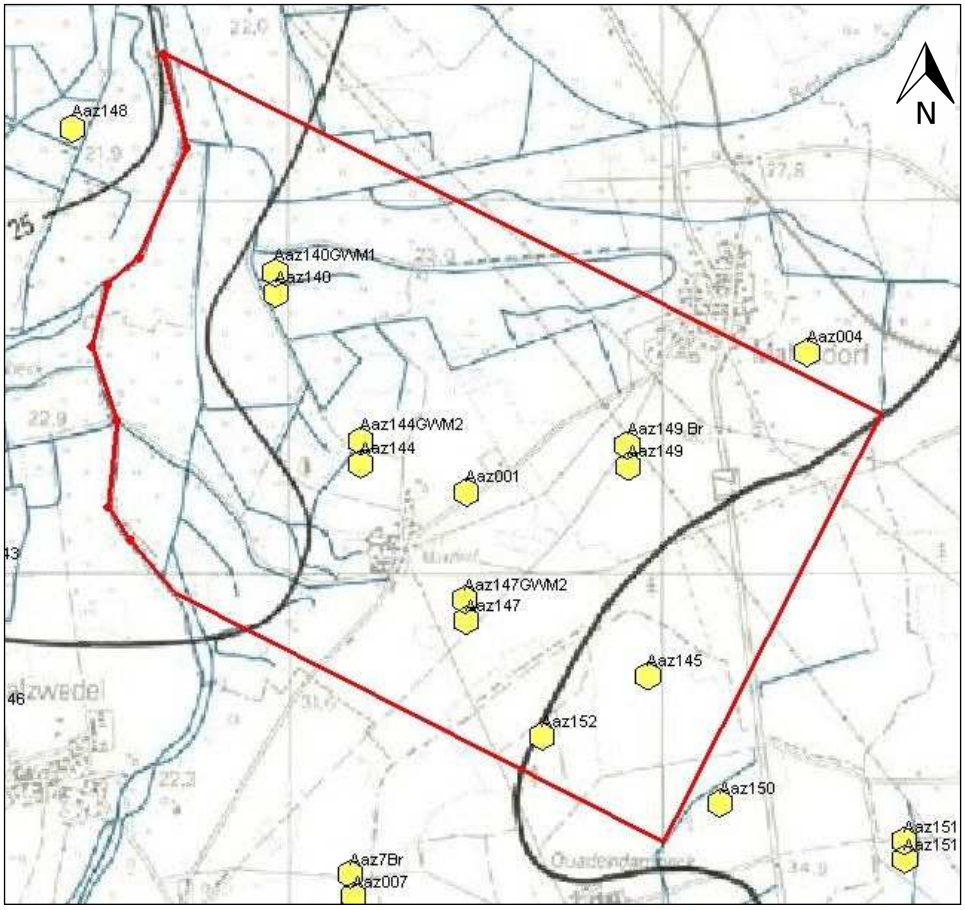



**Abbildung 6: Modellgebietsabgrenzung im Kontext der regionalen Grundwassergleichen (schwarz) sowie der Vorflut**

Die Grundwasserleiterbereiche westlich und östlich der Jeetze sind mehr oder weniger hydraulisch entkoppelt, das Grundwasser fließt von beiden Seiten der Jeetze zu. Aus diesem Grund wurde die Bohrung Aaz 148 (westlich der Jeetze) nicht mit im Monitoringkonzept/Strukturmodell berücksichtigt. Ein größerer Betrachtungsraum bei gleicher geplanter Messstellenanzahl würde die Unsicherheiten erhöhen.

Das Modellgebiet erstreckt sich über eine Fläche von ca. 10 km². Die Geländehöhe beträgt im Bereich der Jeetze ca. 21 m NN und steigt nach Südosten auf über 40 m NN an.

## 7 Schichtenfolge

Das Modell basiert konsequenterweise auf der regionalen Grundgliederung. Dazu wurde das Normalprofil /6/ für das Kerngebiet des Modells verwendet. Aus dem Normalprofil heraus wurden die 7 Modellschichten nach den für die Grundwasserströmung relevanten Kriterien zu Leiter- und Stauerkomplexen (GWH/GWL) unter Beibehaltung der genetisch geologischen Schichtabfolge vor Ort zusammengefasst (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Schichten des Strukturmodells**

| Layer | Stratigraphie | Einstufung |
|---|---|---|
| **1** | limnische Ablagerungen des Holozän | GWH |
| **2** | flufiatile Ablagerungen der Weichselkaltzeit | GWL 1 |
| **3** | Grundmoräne der Saale II | GWH |
| **4** | Nachschüttbildungen Saale I, Vorschüttbildungen Saale II | GWL 2 |
| **5** | Grundmoräne der Saale I | GWH |
| **6** | Nachschüttbildungen Elster, Holstein-Interglazial, Saale I Vorschüttbildungen | GWL 3 |
| **7** | Grundmoräne der Elster | GWH |

Im Rahmen der Strukturmodellierung zeigte sich, dass nur wenige der vorhandenen Aufschlüsse im Modellgebiet lagen für die Modellentwicklung verwendbar waren (Tabelle 2). Die Aufschlüsse aus der Landesbohrdatenbank des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt im Modellgebiet sind mit Tiefen kleiner 20 m meist sehr flache bei guter lithologische Auflösung. Dagegen ist bei den Tiefbohrungen (Aaz) die Auflösung zu gering. Gerade das Quartär wurde zum Teil nur als eine Schicht angesprochen. Aus diesem Grund musste zur Modellerstellung verstärkt auf die Lithofazieskarten Quartär bzw. die Informationen der HK 50 zurückgegriffen werden.

**Tabelle 2: vorhandene geologische Aufschlüsse im Modellgebiet**

| Bohrungen | Bohrungen im Modellgebiet | A-Bohrungen | B-Bohrungen |
|---|---|---|---|
| SABIS/FIS | 18 | 9 | 9 |
| Tiefenbohrungen | 7 | 0 | 7 |
| Messstellen im Bereich der Tiefenbohrungen | 4 | 0 | 4 |

### 7.1 Elster-Kaltzeit

Die Grundmoränen der Elsterkaltzeit mit Ihren mehrere Meter mächtigen Geschiebemergelschichten weisen eine NNO-SSW Orientierung auf. Das wichtigste Merkmal der Elstervergletscherung war die Bildung von glaziären Destruktionsstrukturen (Rinnen und Wannen) in Folge von subglaziär-hydromechanischer Erosion. Eine dieser Rinnen verlief westlich von Maxdorf mit einer NNO-SSW-Orientierung. In diesem Bereich sinkt die Quartärbasis auf über -100 m NN ab.

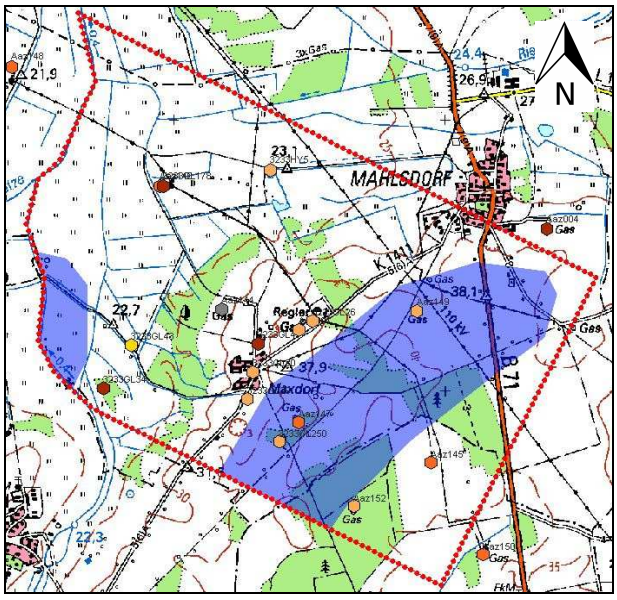



**Abbildung 7: Verbreitung der Elster Grundmoräne (blau)**

## 7.2 Grundwasserleiter 3

Der Grundwasserleiter 3 setzt sich aus den Nachschüttbildungen der Elster-Kaltzeit, Holstein-Interglazial sowie den Vorschüttbildungen der Saale I zusammen und ist flächendeckend im Modellgebiet vorhanden. Durch diese Bildungen wurden die elsterzeitlichen Hohlformen (Rinnen) aufgefüllt. Dadurch ergeben sich Mächtigkeiten von bis zu 50 m. Die Rinnenfüllungen bestehen aus glazilimnischen Sediment, zumeist Fein- und Lößsande mit Schluffeinlagerungen.

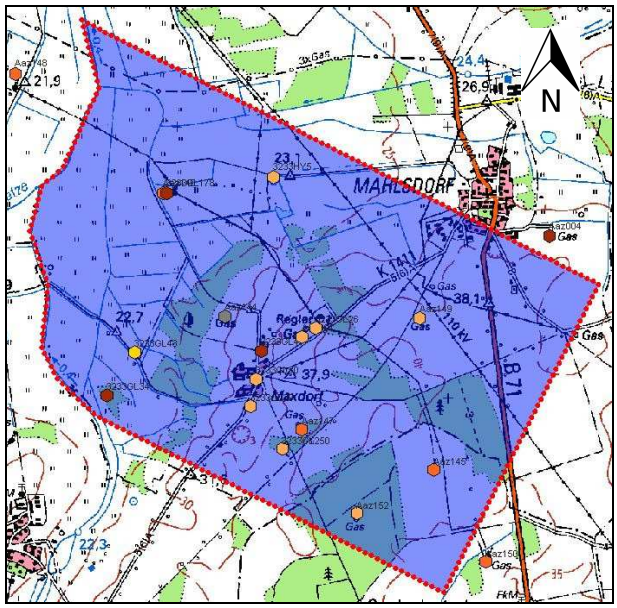



**Abbildung 8: Verbreitung des Grundwasserleiters 3 (blau)**

### 7.3 Saale I

Die meist über 10 m mächtigen Geschiebemergelschichten der Saale I Grundmoräne sind fast flächendeckend im Modellgebiet verbreitet. Im Bereich der Nichtverbreitung stehen die Grundwasserleiter 2 und 3 in direktem hydraulischem Kontakt.

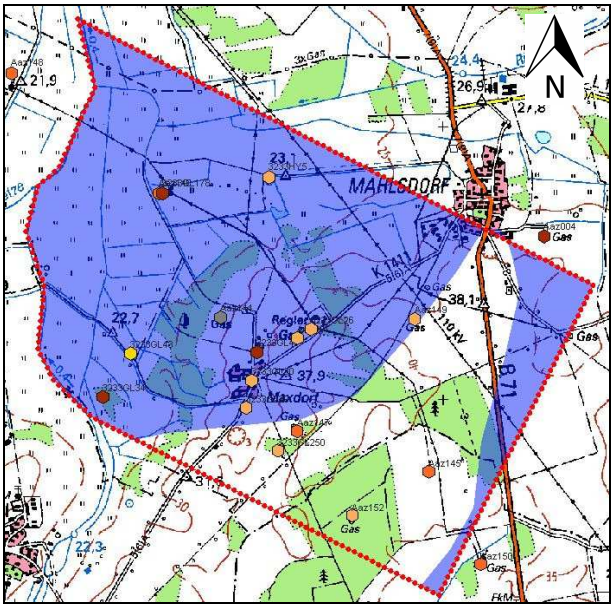



**Abbildung 9: Verbreitung Saale I (blau)**

### 7.4 Saale In IIv

Die glazifluviatilen Nachschüttbildungen der Saale I bzw. die glazifluviatilen Vorschüttbildungen der Saale II bilden den 5 - 20 m Mächtigen 2. Grundwasserleiter. Dieser wird vorwiegend aus groben Sanden und Kiesen gebildet.

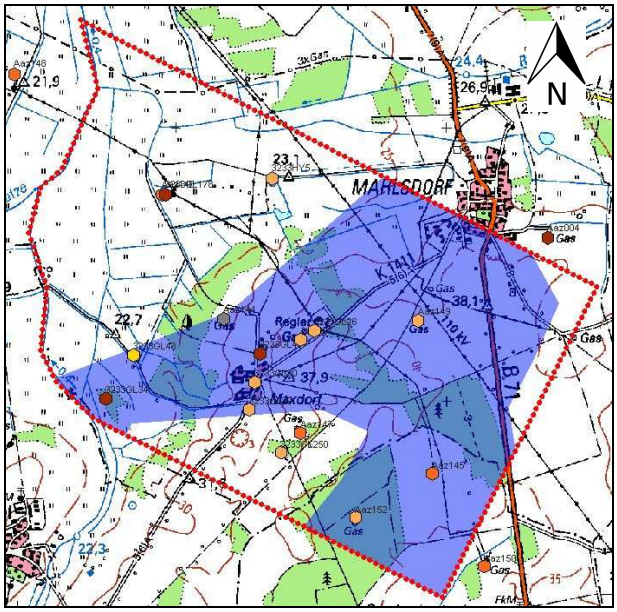



**Abbildung 10: Verbreitung Saale In IIv (blau)**

## 7.5 Saale II

Die Grundmoränenausläufer der Saale II mit ihrer geringen hydraulischen Durchlässigkeit tangieren das Modellgebiet im Osten. Da diese Schicht hier auskeilt, ist die Mächtigkeit meist kleiner als 1m.

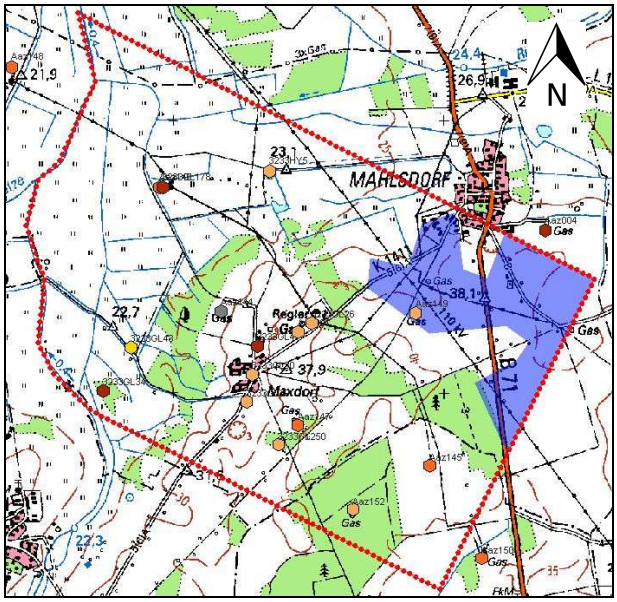



**Abbildung 11: Verbreitung Saale II (blau)**

## 7.6 Weichsel-Kaltzeit

Die sandigen Ablagerungen der Weichsel-Kaltzeit bilden den Grundwasserleiter 1 im Bereich der Flussniederungen mit einer Mächtigkeit von wenigen Metern. Da dieser Grundwasserleiter vollständig vom Geschiebemergel der Saale 1 Kaltzeit unterlagert ist, steht er in keinem hydraulischen Kontakt mit den anderen Grundwasserleitern. Es handelt sich um einen schwebenden Grundwasserleiter.

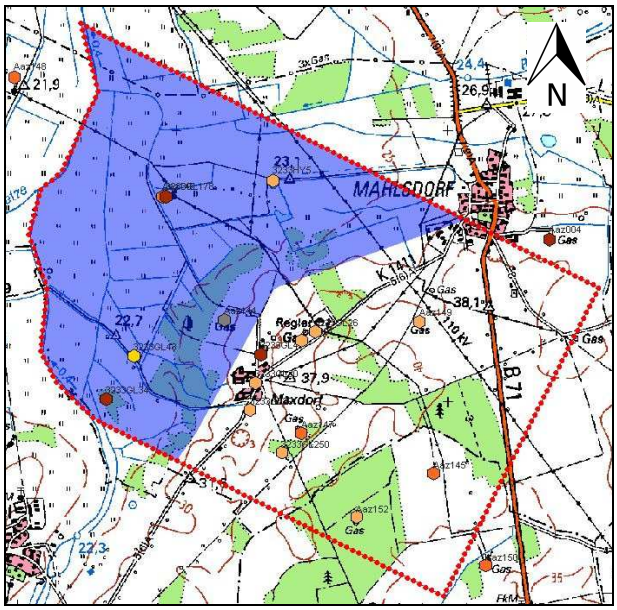



**Abbildung 12: Verbreitung der Ablagerungen der Weichselkaltzeit (blau)**

## 7.7 Holozän

Das Holozän zeichnet sich durch geringmächtige Auelehmablagerungen (1 m) im Bereich der Flussniederungen im westlichen Teil des Modellgebietes aus. Es überlagert die Sedimente der Weichsel-Kaltzeit fast vollständig und bildet die oberste Modellschicht.

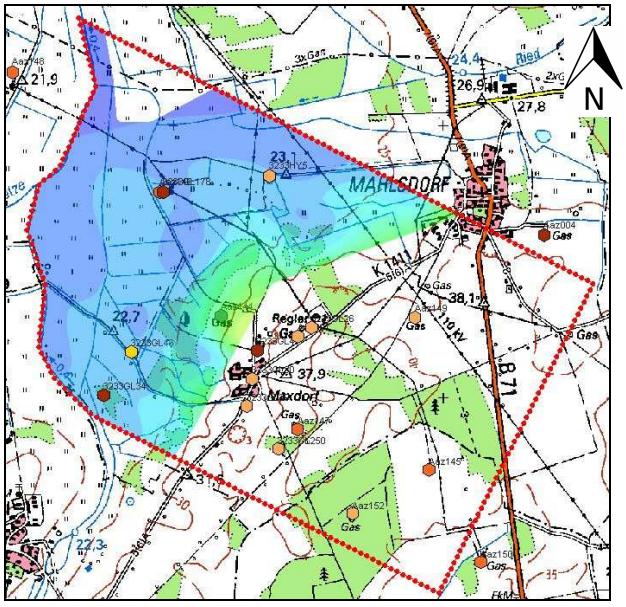



**Abbildung 13: Verbreitung Holozän (blau-türkis)**

## 7.8 Blockmodell

Abbildung 14 zeigt 3 Schnitte durch das Strukturmodell im Kontext der verwendeten geologischen Aufschlüsse.

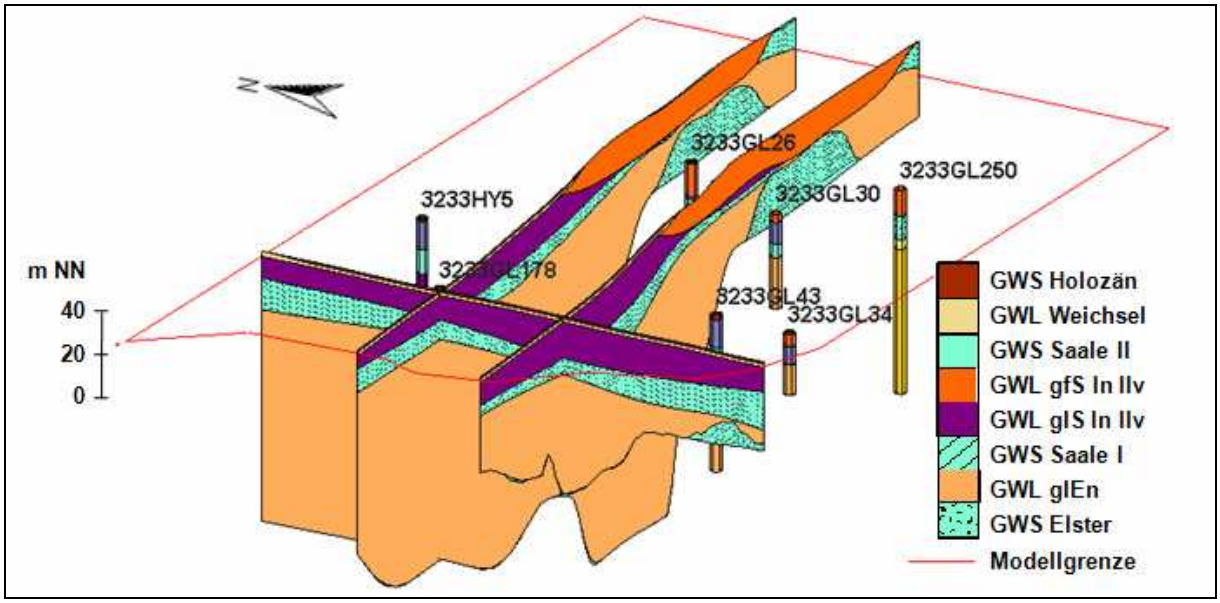



**Abbildung 14: Schnitte durch das Strukturmodell im Kontext von stratifizierten Aufschlüssen**

## 8 Anpassung des Strukturmodells

Nach dem Bau der 12 Grundwassermessstellen standen weitere geologische Daten zur Ertüchtigung des geologischen Strukturmodells zur Verfügung. Insbesondere die Ansprache der gewonnenen Bohrkerne an 2 Grundwassermessstellen lieferte eine detailierte Beschreibung des geologischen Aufbaus. Für die übrigen Messstellen konnten über Analogien beim Bohrfortschritt Aussagen zum geologischen Aufbau durch den Bohrmeister getroffen werden. Diese neuen Informationen wurden in einem nächsten Schritt in das Strukturmodell übernommen. Im Wesentlichen bestätigten die neuen geologischen Daten die bisher getroffenen Annahmen. Im Detail gab es jedoch Abweichungen, so dass das Strukturmodell auf der Grundlage der aktuellen Daten angepasst und vor dem Hintergrund der folgenden Grundwasserströmungsmodellierung vereinfacht wurde.
Das angepasste Strukturmodell weist eine Mächtigkeit von 30 m bis 50 m auf. Die 4 relevanten Schichten sind in Tabelle 3 aufgeführt. Abbildung 15 zeigt 3 Schnitte durch das Strukturmodell im Kontext der neuen Bohrungen.

**Tabelle 3: Schichten des angepassten Strukturmodells**

| Layer | Stratigraphie | Einstufung |
|---|---|---|
| **1** | Holozän,<br>Grundmoräne Saale II | GWH |
| **2** | Ablagerungen der Weichselkaltzeit,<br>Nach- und Vorschüttbildungen der Saale I/II | GWL |
| **3** | Grundmoräne Saale I | GWH |
| **4** | Nachschüttbildungen Elster,<br>Saale I Vorschüttbildungen | GWL |

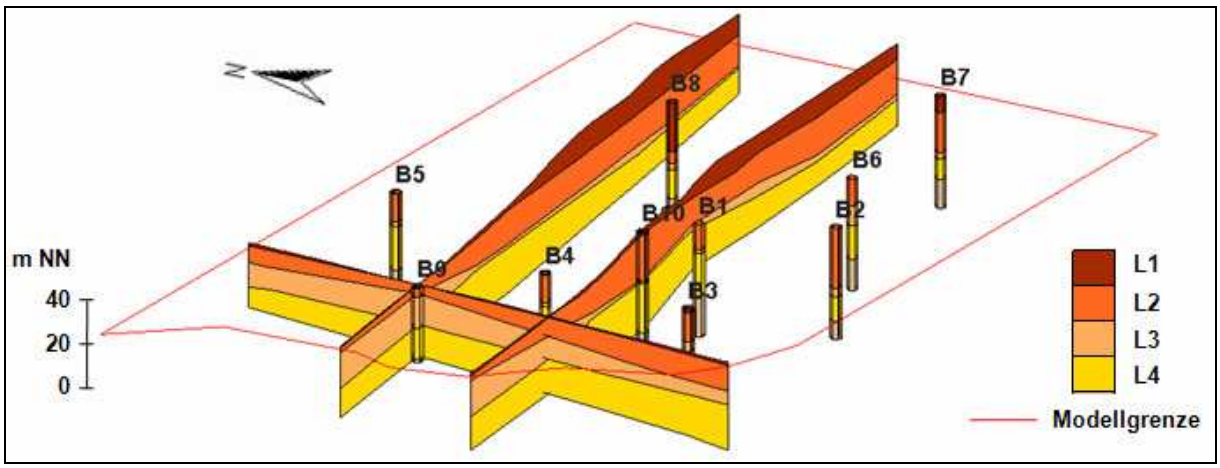



**Abbildung 15: Schnitte durch das angepasste Strukturmodell im Kontext der neuen geologischen Aufschlüsse**

Auf dem Plateau im Südosten des Modellgebietes bilden die Schmelzwassersande der Saale I Nachschüttbildungen beziehungsweise der Saale II Vorschüttbildungen den Hauptgrundwasserleiter unter einer 10 -20 m mächtigen Geschiebemergelschicht der Saale II Grundmoräne. Im Nordwesten besteht der obere Grundwasserleiter aus Sedimenten der Weichselkaltzeit und Schmelzwassersanden der Saale I Nachschüttbildungen beziehungsweise der Saale II Vorschüttbildungen. Diese werden Teilweise von limnischen Ablagerungen des Holozäns überlagert. Der obere Grundwasserleiter ist größtenteils durch die

Grundmoräne der Saale I vom darunterliegenden Grundwasserleiter getrennt. Im Bereich der Vorfluter weist der Geschiebemergel eine Mächtigkeit größer 10 m auf (B9). Der untere Grundwasserleiter besteht aus Sedimenten der Saale I Vorschüttbildungen sowie Elster Nachschüttbildungen.

## 9 Grundlagen der Strukturmodellierung

Neben den vorhandenen geologischen Aufschlüssen wurden folgende Materialien zur Erstellung des Strukturmodells verwendet:

/1/ Standortgutachten und Standortunterlagen, zur Verfügung gestellt durch GDF Produktion Exploration Deutschland GmbH, Bereich Rückbau
/2/ Lithofazieskarten Quartär, 1:50 000, Klötze 1963
/3/ Karte Grundwassergefährdung, 1:50 000, Beetzendorf/Fleetmark 0704-3/4
/4/ Hydrogeologische Grundkarten, 1:50 000, Beetzendorf/Fleetmark 0704-3/4
/5/ HGN: Handlungskonzept zur Erarbeitung von alternativen Sanierungsvarianten für Bohrschlammgruben der EEG; Grundlagen- und Erläuterungsbericht vom 27.05.2005
/6/ Geologie von Sachsenanhalt, Bachmann, Ehling, Eichner, Schwab, 2008

# E.4 Arbeitsprogramm Bohrarbeiten

# CLEAN

## $CO_2$ Enhanced Gas Recovery Altmark

## Themenverbund IV – $CO_2$-MONITOR

## Teilprojekt Mo1 + Mo3:

## Ableitung eines standortspezifischen Langzeit-Monitoringkonzeptes für EGR unter Einbeziehung der rechtlichen und sicherheitstechnischen Vorgaben sowie hydrogeochemisches Monitoring im flachen Grundwasserleiter

# Informationen zu den für Februar/März 2010 geplanten Bohrarbeiten zur Errichtung neuer Grundwassermesstellen im Teilprojet Mo3

CAU – Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Geowissenschaften, Lehrstuhl für Angewandte Geologie
Dr. R. Köber, Prof. Dr. A. Dahmke
Olshausenstraße 40
24098 Kiel

GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH
Prof. Dr.-Ing. habil. J. Großmann, Dipl.-Ing. M. Beyer, Dipl.-Ing. Lars Tischer
Tiergartenstraße 48
01219 Dresden

***Auftraggeber der Bohrarbeiten:***

CAU – Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Vertreten durch Dr. R. Köber, Prof. Dr. A. Dahmke
Institut für Geowissenschaften, Lehrstuhl für Angewandte Geologie
Olshausenstraße 40
24098 Kiel

***Durchführung der Bohrarbeiten:***

Sensatec GmbH Sanierungs- und Sensoriktechnologien
Geschäftsführung: Dr. Stefan Hüttman
Wischhofstr. 1-3
D - 24148 Kiel

In Kooperation mit

BTR Bohrtechnik Roßwag GmbH & Co.KG
Geschäftsführung: Jens Rapp
Seemühle 8
71665 Vaihingen/Enz Roßwag

***Hintergrund der Bohrarbeiten:***
Ziel des in Mo3 vorgesehenen GW-Monitorings, das an den neu einzurichtenden Grundwassermessstellen (GWMS) durchgeführt wird, ist die hydrogeologische und geochemische Charakterisierung der oberflächennahen Grundwasserleiter auf einer Fläche, die möglicherweise bei einem $CO_2$-Austritt aus dem Reservoir beeinflusst werden könnte. Die Ausgangslage für die Positionierung der neuen GWMS war so, dass die Bereiche der bestehenden Sondenplätze der GDF Suez für die Bohrarbeiten direkt zur Verfügung standen, während für andere Bereiche die Zugänglichkeit und die Erlaubnis der jeweiligen Eigentümer noch zu klären war.

Um eine möglichst große Repräsentativität für das gesamte Modellgebiet (Abbildung 1) zu erreichen, wurde unter primärer Nutzung der zur Verfügung stehenden Sondenplätze die vorgesehenen GWMS einigermaßen gleichmäßig im Modellgebiet verteilt (Aaz140, Aaz144, Aaz145, Aaz147, Aaz149). Der Bereich B5 wurde ergänzt, um die hier vorhandene räumliche Lücke zu schließen. Die Bereiche B2, B3 und B4 befinden sich im Grundwasserabstrom des Reservoirbereiches zwischen Aaz144 und Aaz147 für den Leckage-Szenarien simuliert werden sollen. Ohne GWMS in diesem Bereich bestünden keine Stützstellen für Geochemie und Grundwasserstände im Bereich sich ausbildender Leckagefahnen, woraus sich große Unsicherheiten bei den Simulationen ergeben würden. Um dies zu verhindern, sollen weitere drei GWMS in diesen Bereichen positioniert werden. Mit der Position B1 besteht die Möglichkeit, die natürlichen Gegebenheiten für den Bereich zu untersuchen, unter dem sich das $CO_2$ im Reservoirbereich in Richtung der Förderbohrung Aaz147 bewegt.

Im Nahbereich der Injektionsbohrung Aaz144 sind drei GWMS vorsehen, um diesen Bereich mit höherem Gefährdungspotential räumlich besser auflösen zu können. Das Baseline-

Monitoring muss sich somit in diesem prioritären Bereich nicht nur auf eine Einzelmessstelle beschränken, und natürliche Schwankungsbreiten werden besser abgesichert. Auch für den unwahrscheinlichen Fall einer Leckage im Injektionsbereich wird sich die Detektionssicherheit hierdurch deutlich erhöhen.

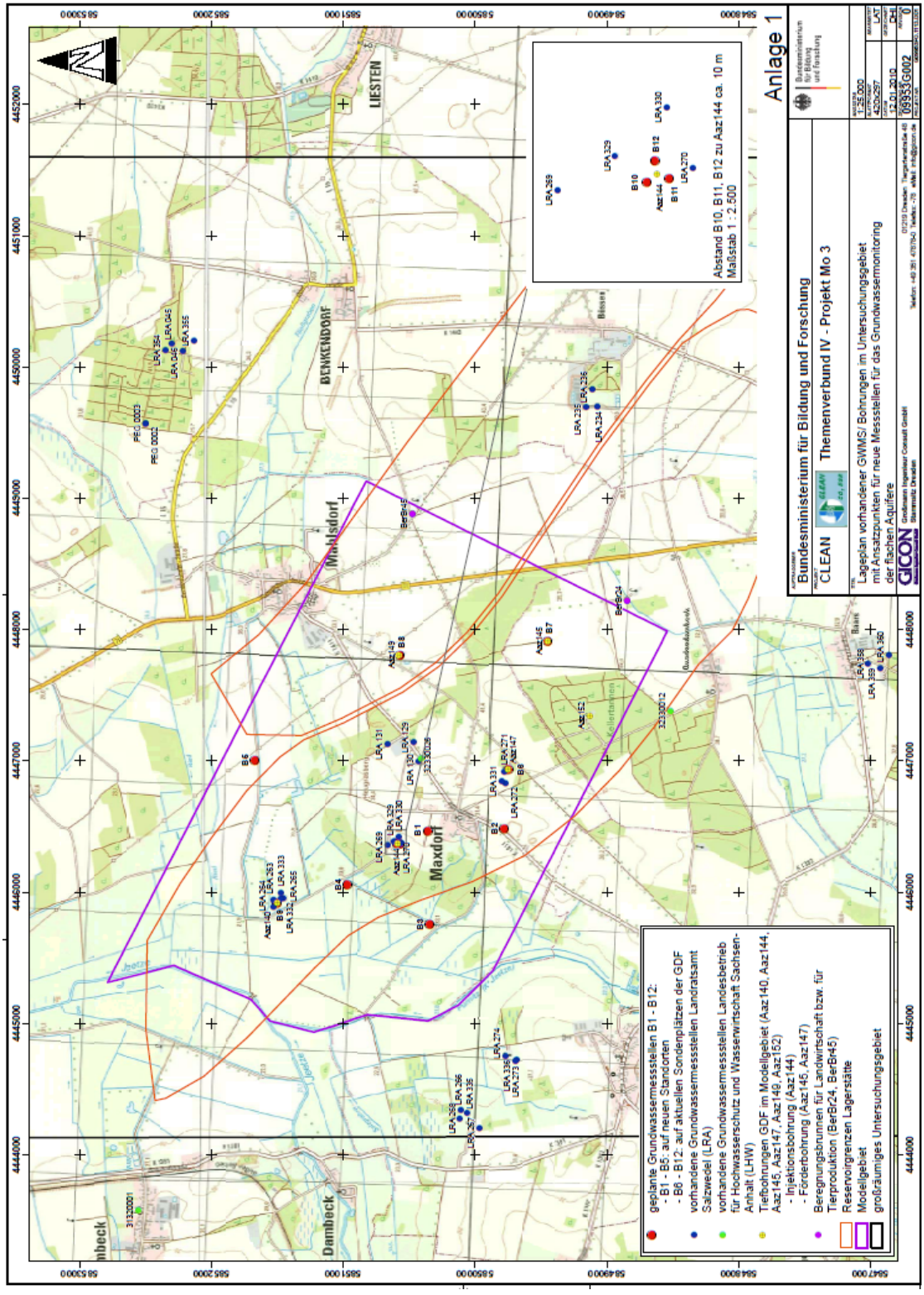



**Abbildung 1: Positionierung neuer Grundwassermessstellen für das Grundwassermonitoring.**

Im Rahmen der im Februar 2010 beginnenden Bohrkampagne werden die GWMS im oberflächennahen Aquifer mittels des Bohrverfahrens Sonic-Drilling errichtet, da sich mit diesem Verfahren ein schnellerer Arbeitsfortschritt als mit konventionellen Bohrverfahren erzielen lässt. Die von der Fa. Sensatec in Kooperation mit BTR Bohrtechnik Roßwag GmbH & Co.KG durchgeführten Bohrungen werden als 2"-GWMS ausgebaut. Zur Spezifizierung der Festphasenzusammensetzung des für die Simulation von Leckageszenarien entwickelten Standortmodells werden während der Bohrungen Feststoffproben entnommen. Nach Fertigstellung der GWMS werden von GICON in einem voraussichtlich vierteljährlichen Rhythmus Grundwasserproben für das Grundwassermonitoring durchgeführt bzw. beauftragt.

| | |
|---|---|
| Geplanter Beginn der Bohrarbeiten: | 22.02.10 |
| Durchmesser der Grundwassermessstellen: | 2" |
| Tiefe der Grundwassermessstellen: | 40-80m<br>(abhängig von der vorgefundenen Geologie) |
| Eingesetzte Bohrtechnik: | Sonic-Drilling |
| Bohrmeister: | Jens Rapp (BTR) |
| Verantwortliche Personen Vorort: | Jens Rapp, B. Erhardt, S. Bücheler |
| Ausbaumaterial der GWM: | HDPE farblos |

**Tabelle 1: Reihenfolge und Dauer (Insgesamt 19 Tage) der Bohrarbeiten.**

| Nr. | Bereich | Bezeichnung | Dauer [Tage] | Erläuterungen |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Aaz 140 | GW-Aaz 140 | 1,5 | Bohrung, Tranport Bohrgerät |
| 2 | Aaz147 | GW-Aaz147 | 1,5 | Bohrung, Tranport Bohrgerät |
| 3 | Aaz 144 | GW-Aaz 144/1 | 3 | Bohrung mit Kernentnahme, Profilaufnahme, Probenentnahme |
| 4 | Aaz 144 | GW-Aaz 144/2 | 1 | Bohrung |
| 5 | Aaz 144 | GW-Aaz 144/3 | 1 | Bohrung |
| 6 | B1 | GW-B1 | 2 | Einweisung, Bohrung, Transport Bohrgerät |
| 7 | B4 | GW-B4 | 1,5 | Bohrung, Tranport Bohrgerät |
| 8 | B3 | GW-B3 | 1,5 | Bohrung, Tranport Bohrgerät |
| 9 | B2 | GW-B2 | 1,5 | Bohrung, Tranport Bohrgerät |
| 10 | Aaz 149 | GW-Aaz 149 | 1,5 | Bohrung, Tranport Bohrgerät |
| 11 | Aaz 145 | GW-Aaz 145 | 1,5 | Bohrung, Tranport Bohrgerät |
| 12 | B5 | GW-B5 | 1,5 | Bohrung, Tranport Bohrgerät |

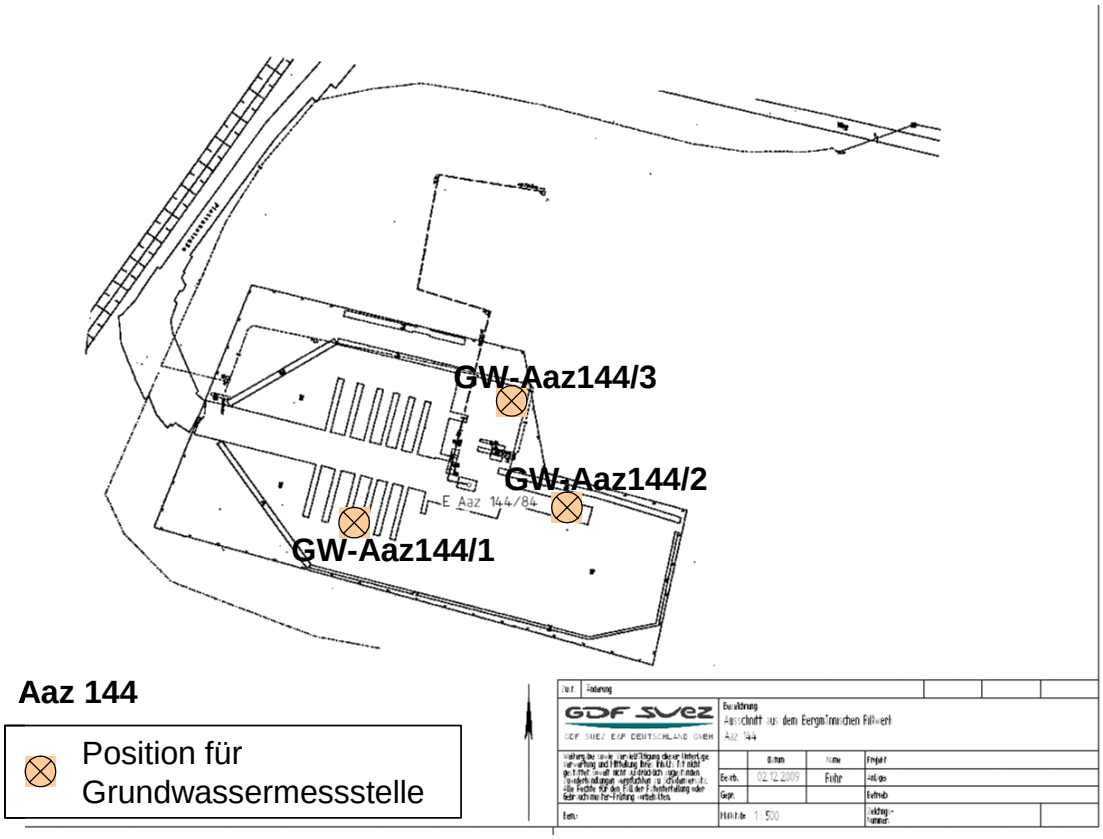



**Abbildung 2: Positionen der Grundwassermessstellen auf dem Sondenplatz Aaz 144.**

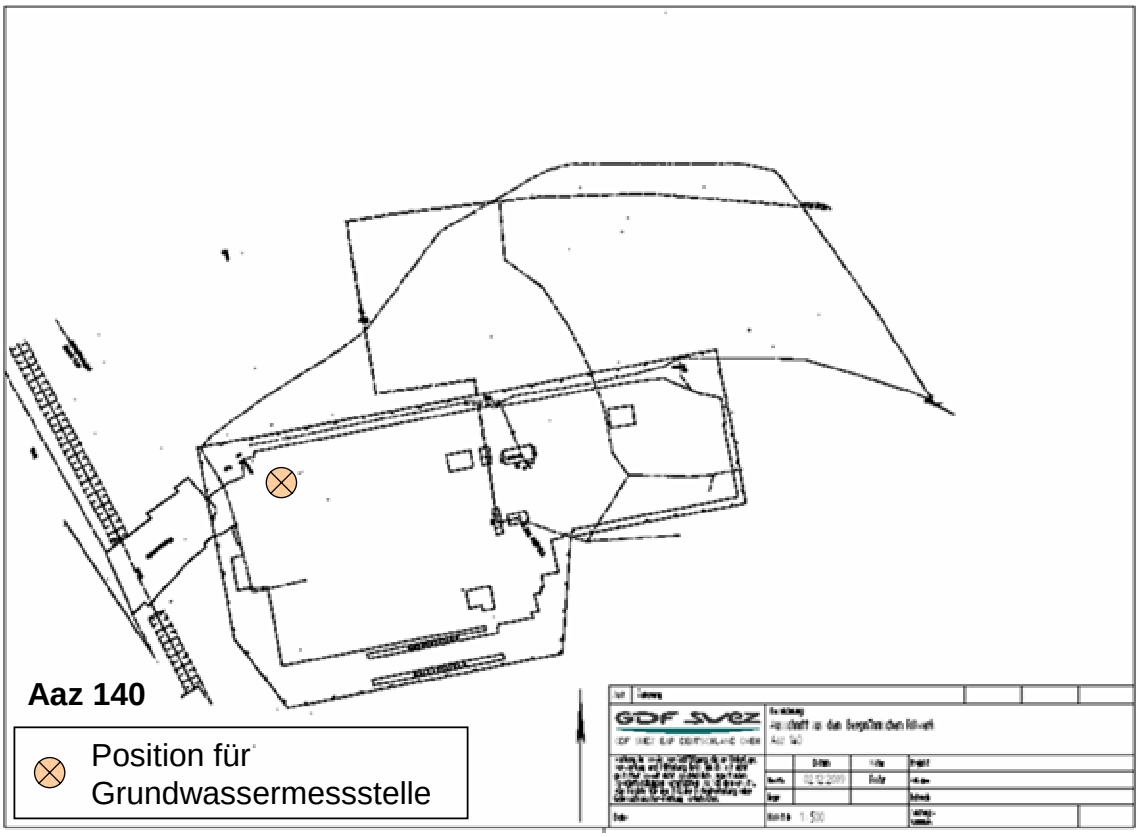



**Abbildung 3: Positionen der Grundwassermessstellen auf dem Sondenplatz Aaz 140.**

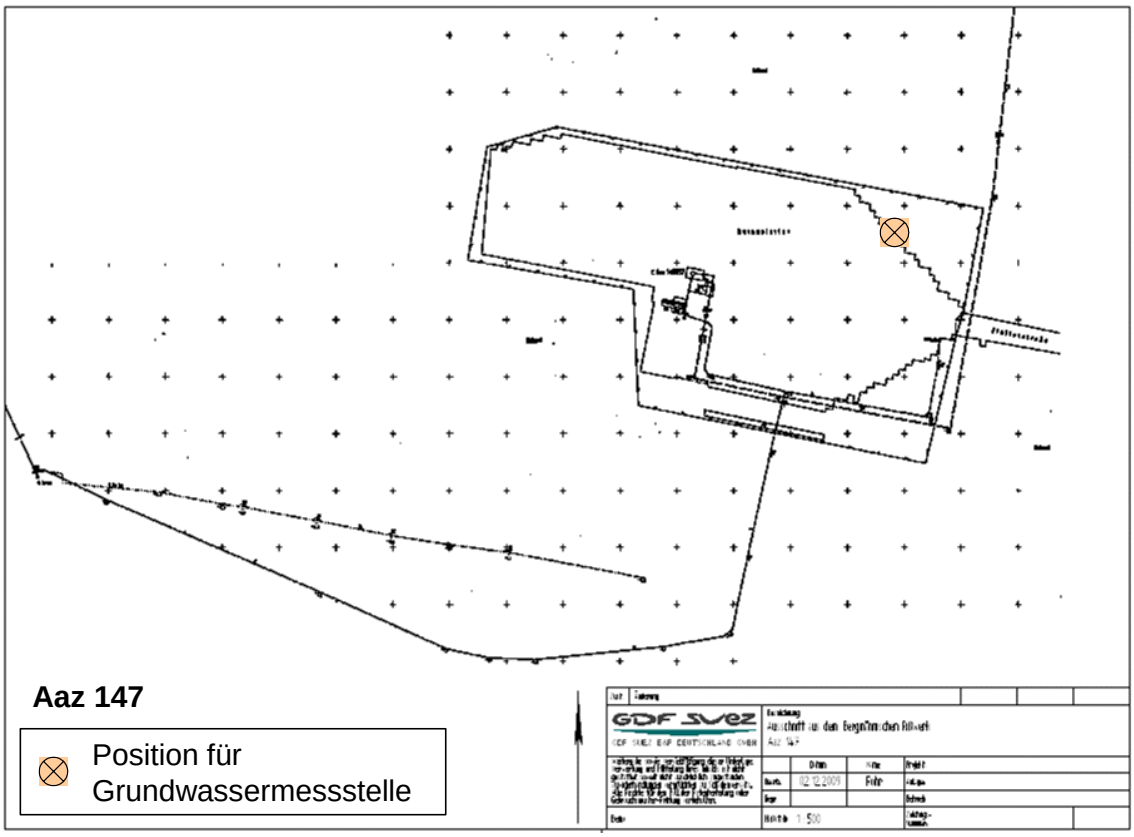



**Abbildung 4: Positionen der Grundwassermessstellen auf dem Sondenplatz Aaz 147.**

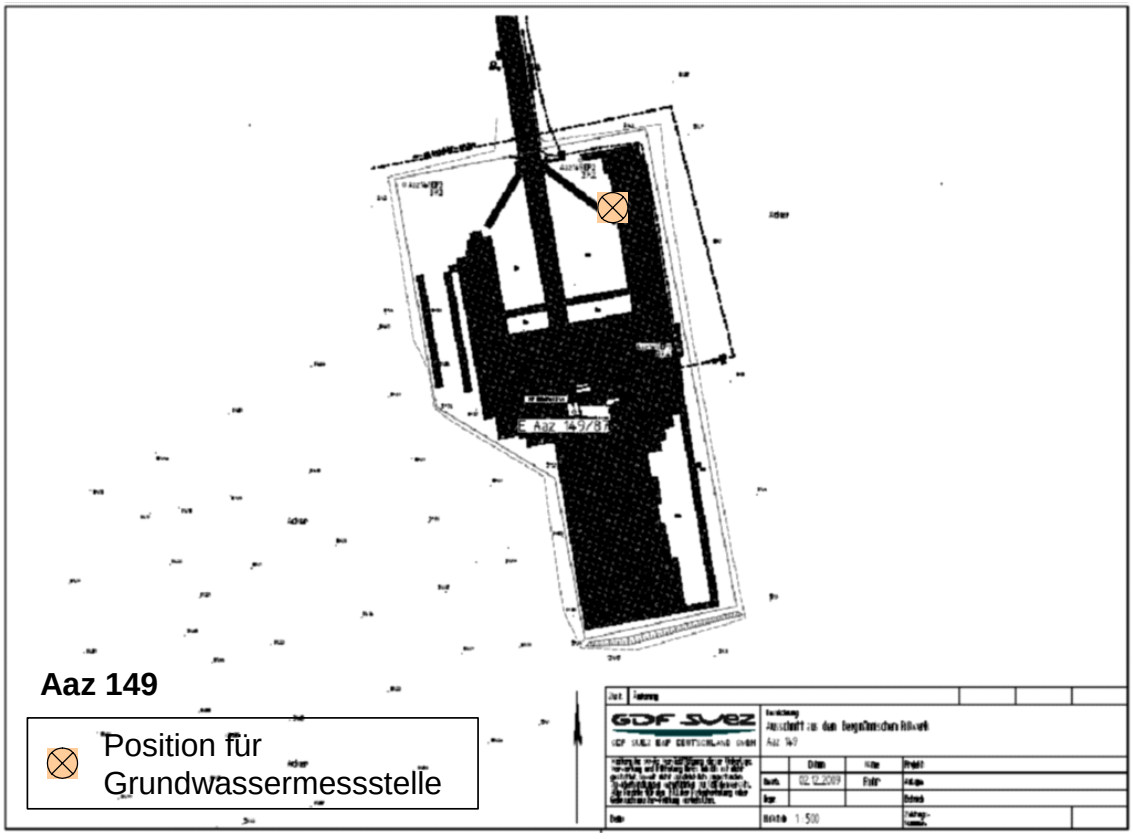



**Abbildung 5: Positionen der Grundwassermessstellen auf dem Sondenplatz Aaz 149.**

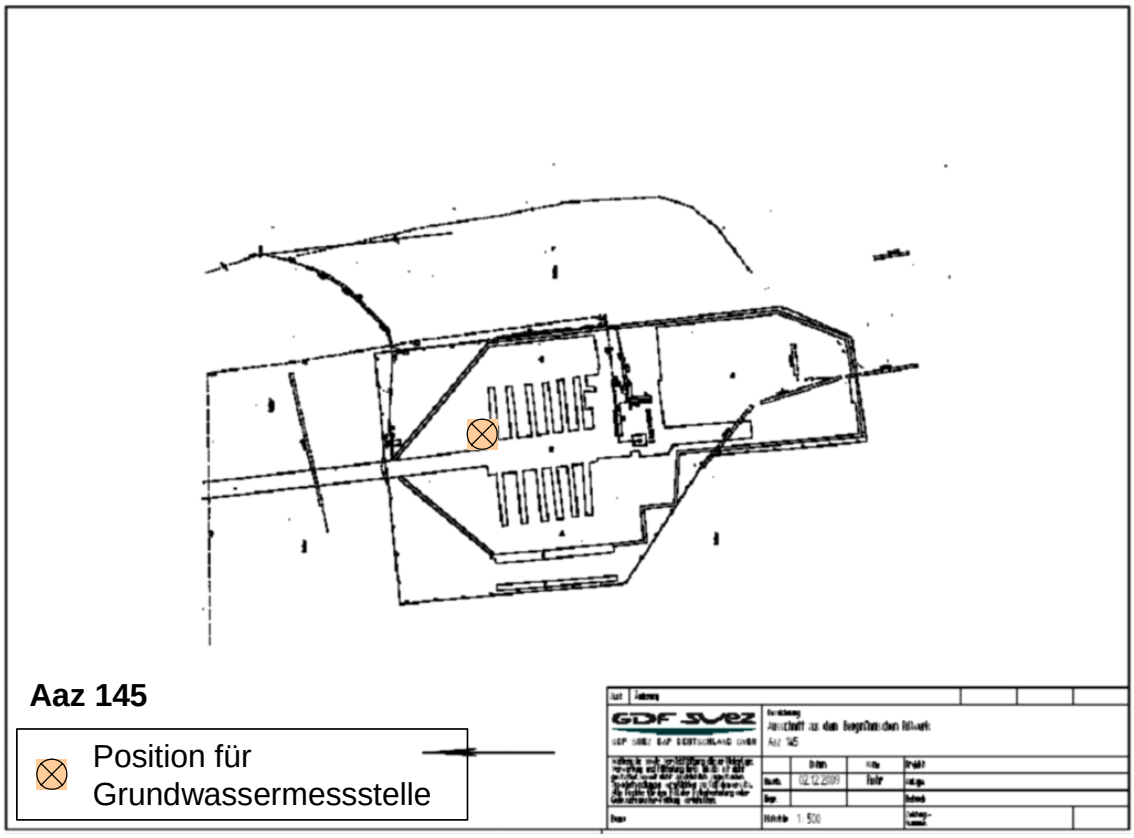
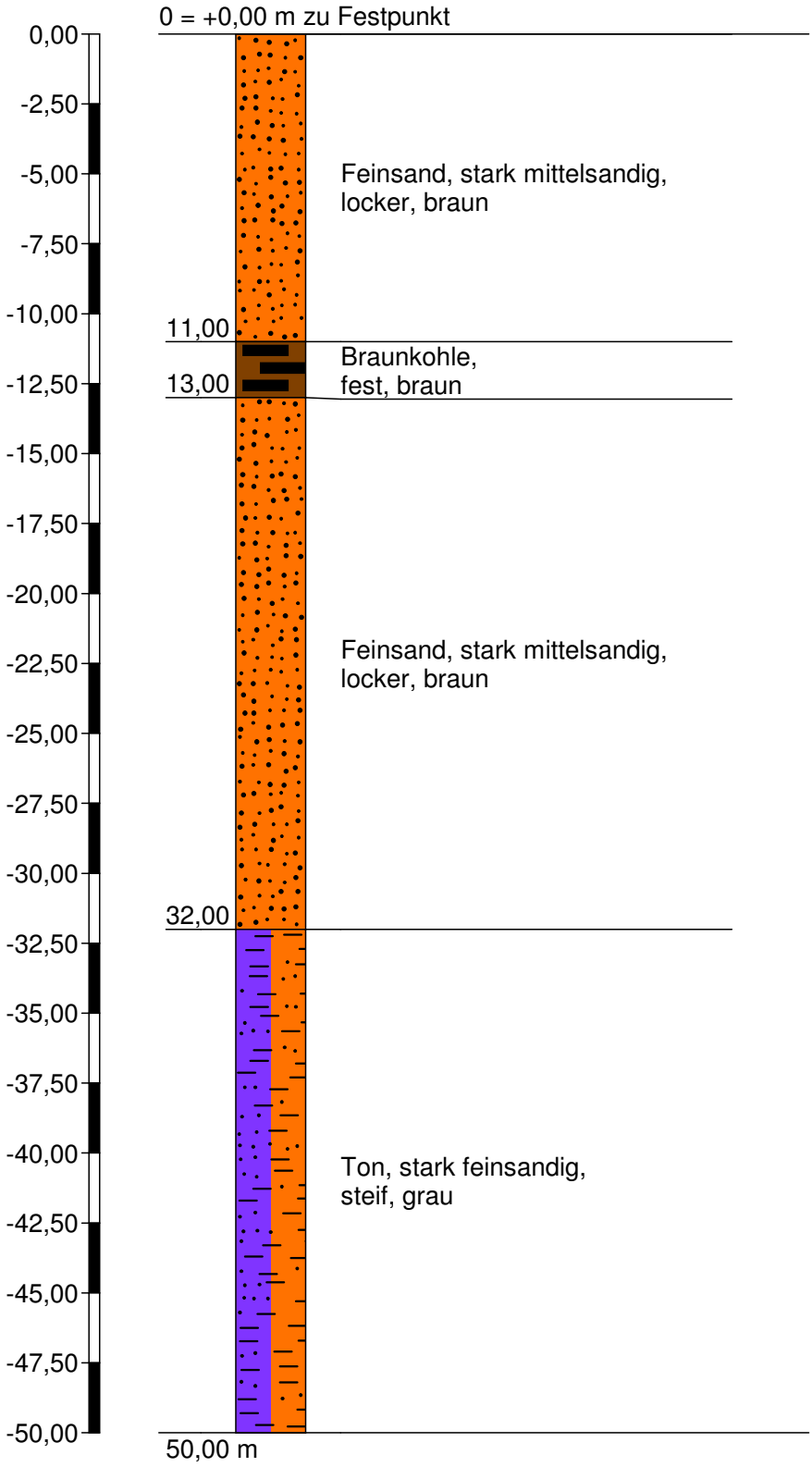



**Abbildung 6: Positionen der Grundwassermessstellen auf dem Sondenplatz Aaz 145.**

# E.5 Bohrprofile, Ausbaupläne, Schichtenverzeichnisse

| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023 | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: GDF Suez<br>Bearb.: Heinle \| Datum: 03.05.2010 |

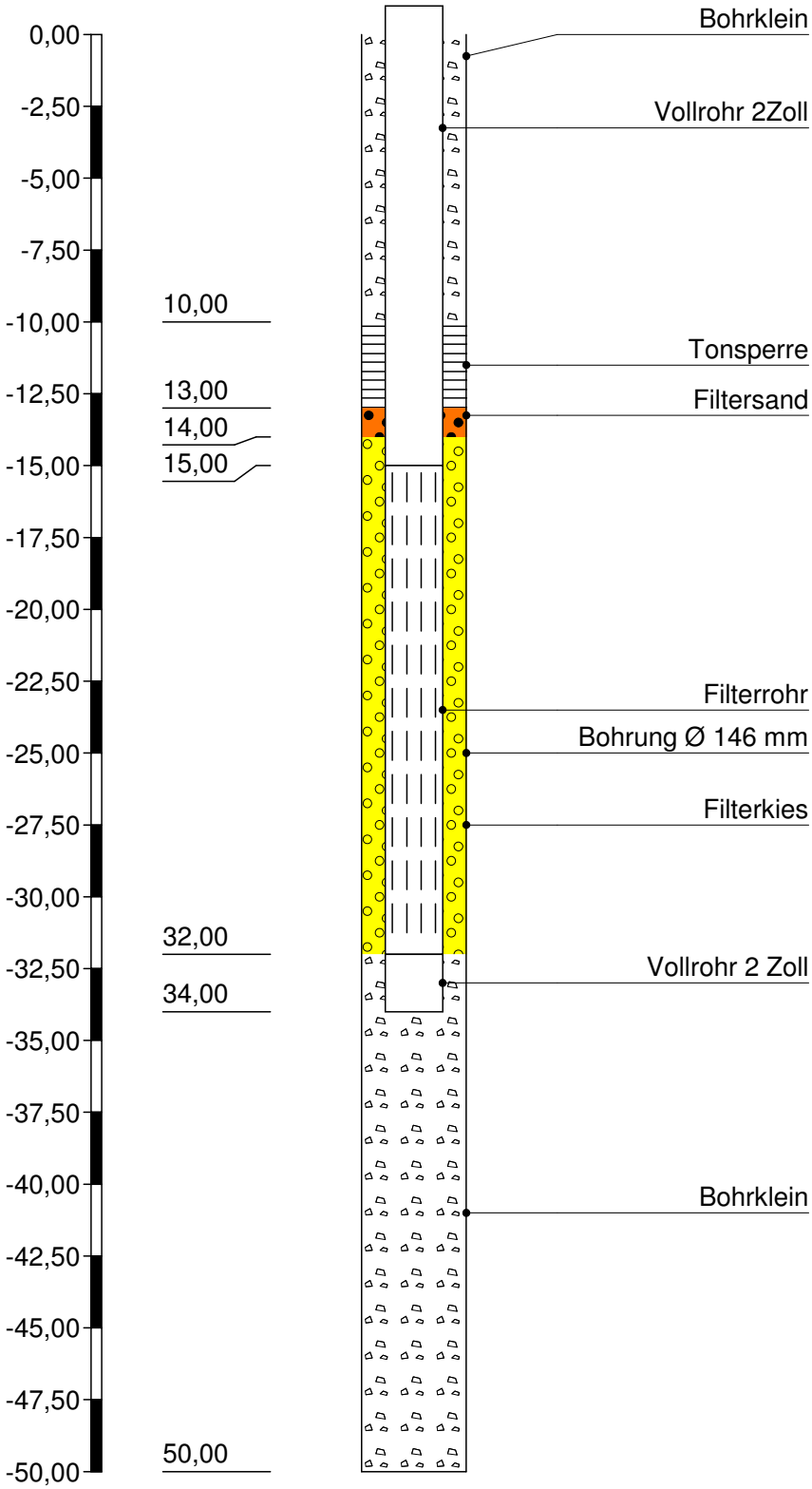
## B 1




**Höhenmaßstab 1:250**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze | Anlage: | |
| | | Projekt: Salzwedel | |
| | | Auftraggeber: GDF Suez | |
| | | Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010 |

## B 1



# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr B 1 /Blatt 1

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 11,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 13,00 | a) Braunkohle | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) fest | d) mittelschwer zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Braunkohle | g) | h) | i) | | | | |
| 32,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 50,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

**BTR Bohrtechnik**
Seemühle 8
71665 Vaihingen/Enz-Roßwag

Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023

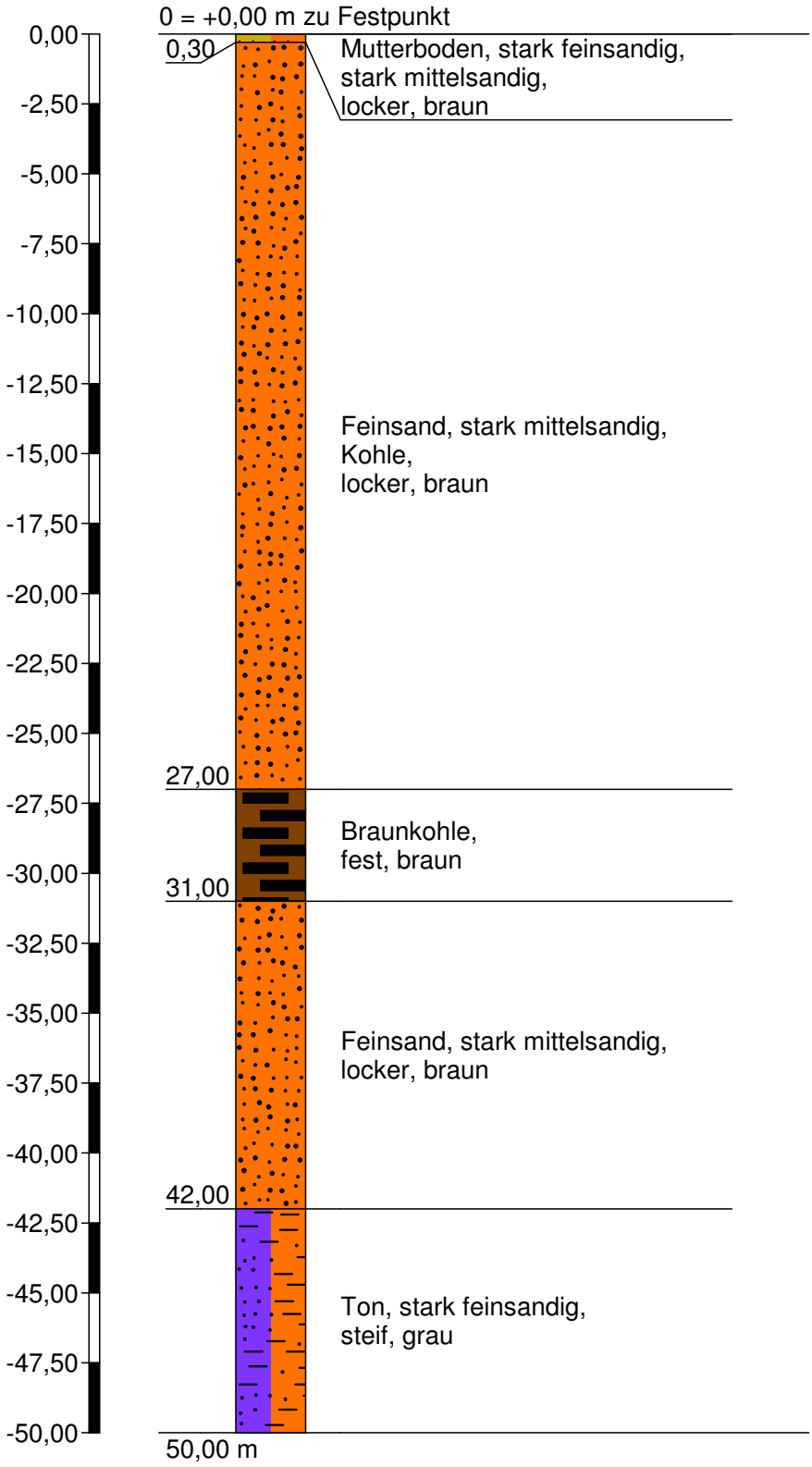
Anlage:

Projekt: Salzwedel

Auftraggeber: GDF Suez

Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010

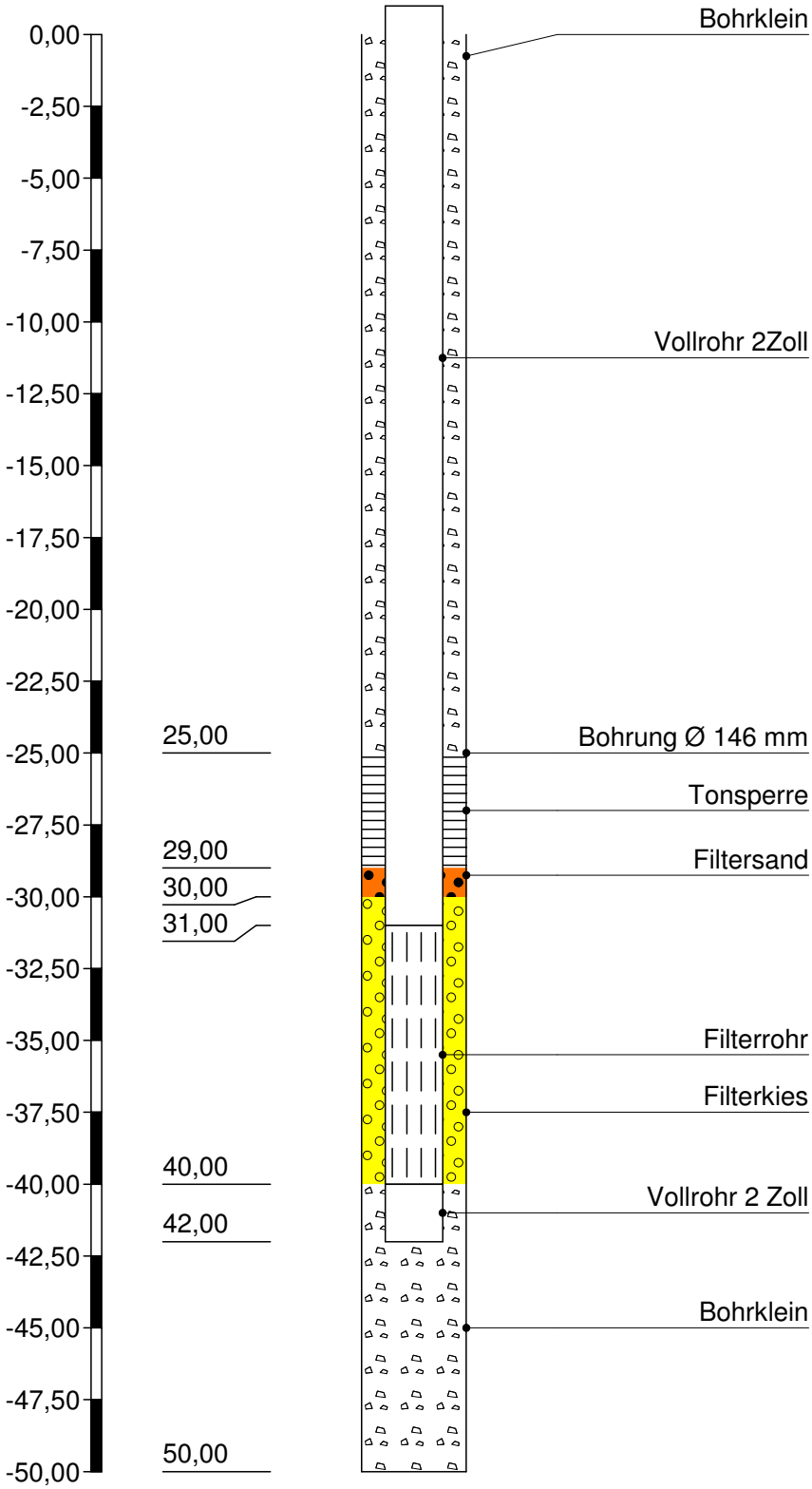
## B 2




**Höhenmaßstab 1:250**

| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze | Anlage: | |
|---|---|---|---|
| | | Projekt: Salzwedel | |
| | | Auftraggeber: GDF Suez | |
| | | Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010 |

## B 2



# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr B 2 /Blatt 1

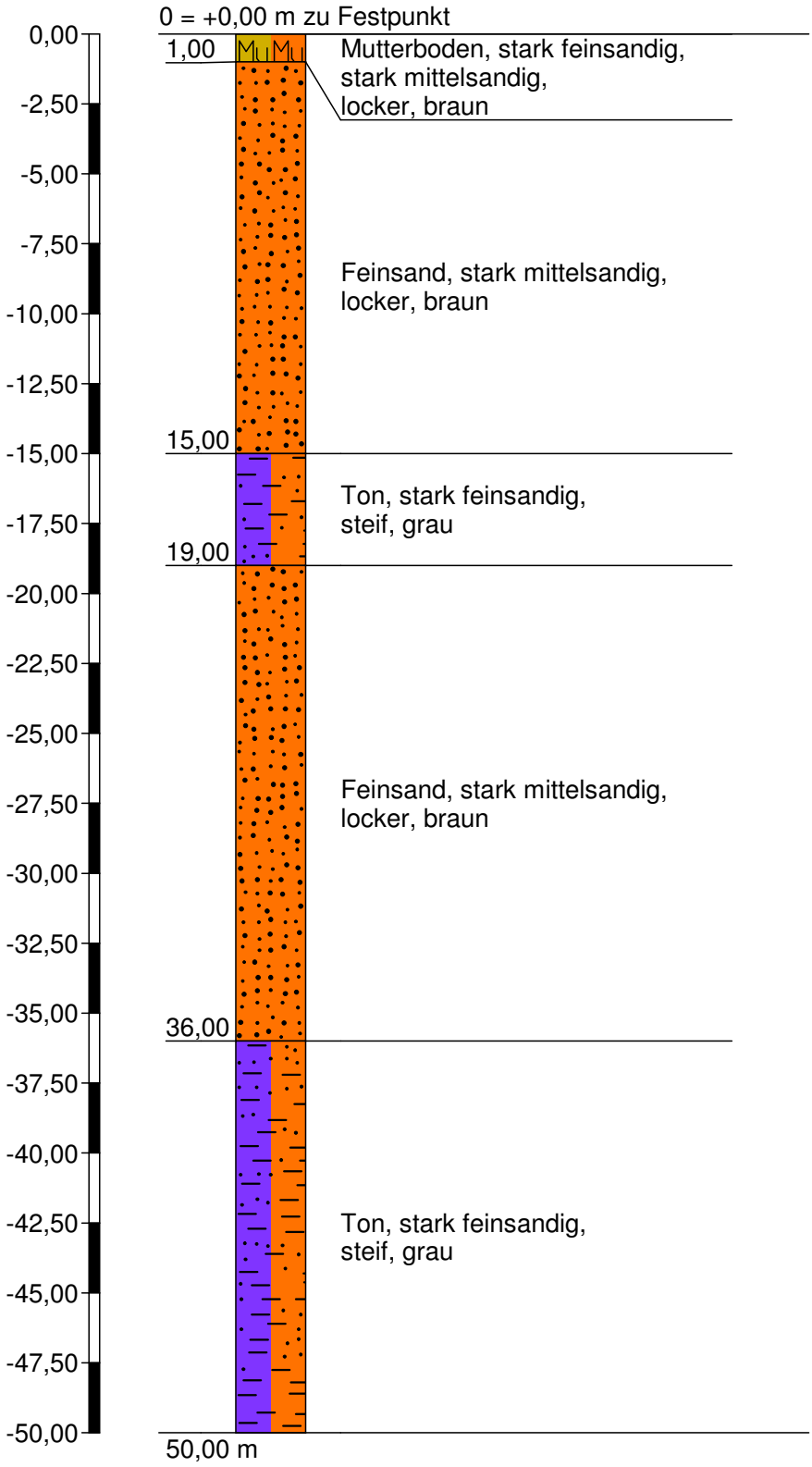
Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 0,30 | a) Mutterboden, stark feinsandig, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Mutterboden | g) | h) | i) | | | | |
| 27,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig, Kohle | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 31,00 | a) Braunkohle | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) fest | d) mittelschwer zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Braunkohle | g) | h) | i) | | | | |
| 42,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 50,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023 | Anlage: | |
|---|---|---|---|
| | | Projekt: Salzwedel | |
| | | Auftraggeber: GDF Suez | |
| | | Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010 |

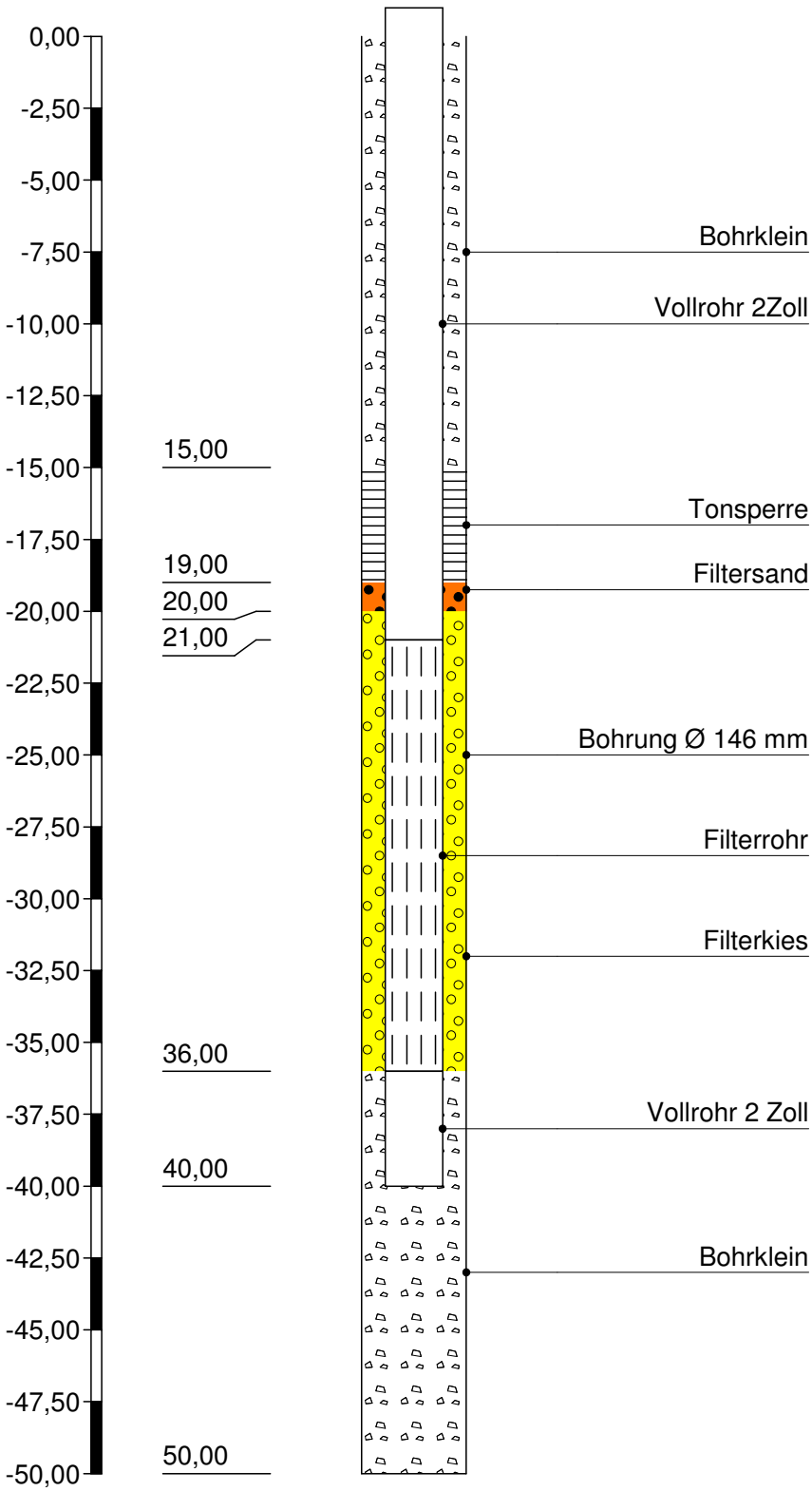
## B 3




**Höhenmaßstab 1:250**

| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: GDF Suez<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |

## B 3



# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr B 3 /Blatt 1

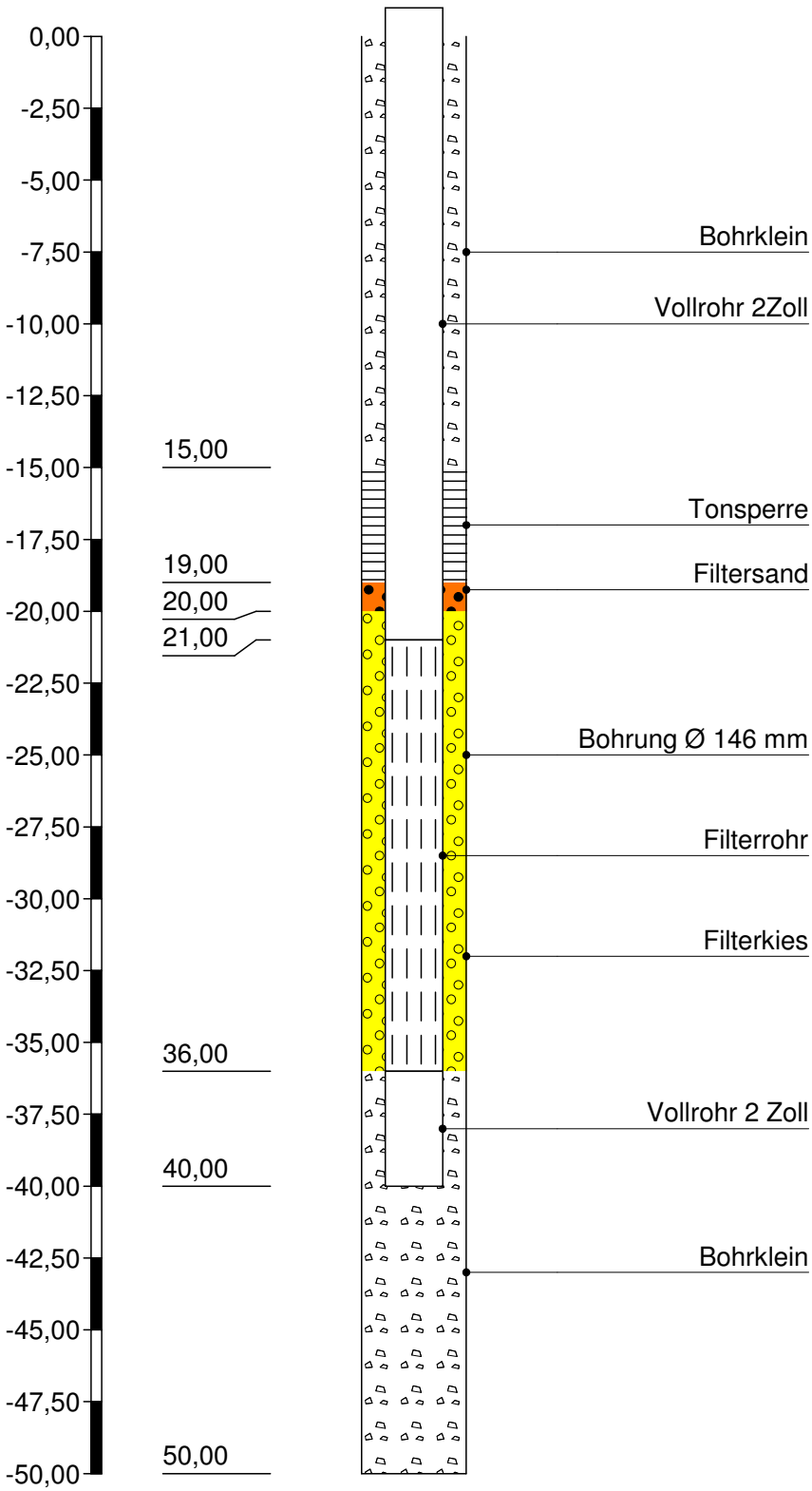
Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 1,00 | a) Mutterboden, stark feinsandig, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Mutterboden | g) | h) | i) | | | | |
| 15,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 19,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 36,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 50,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

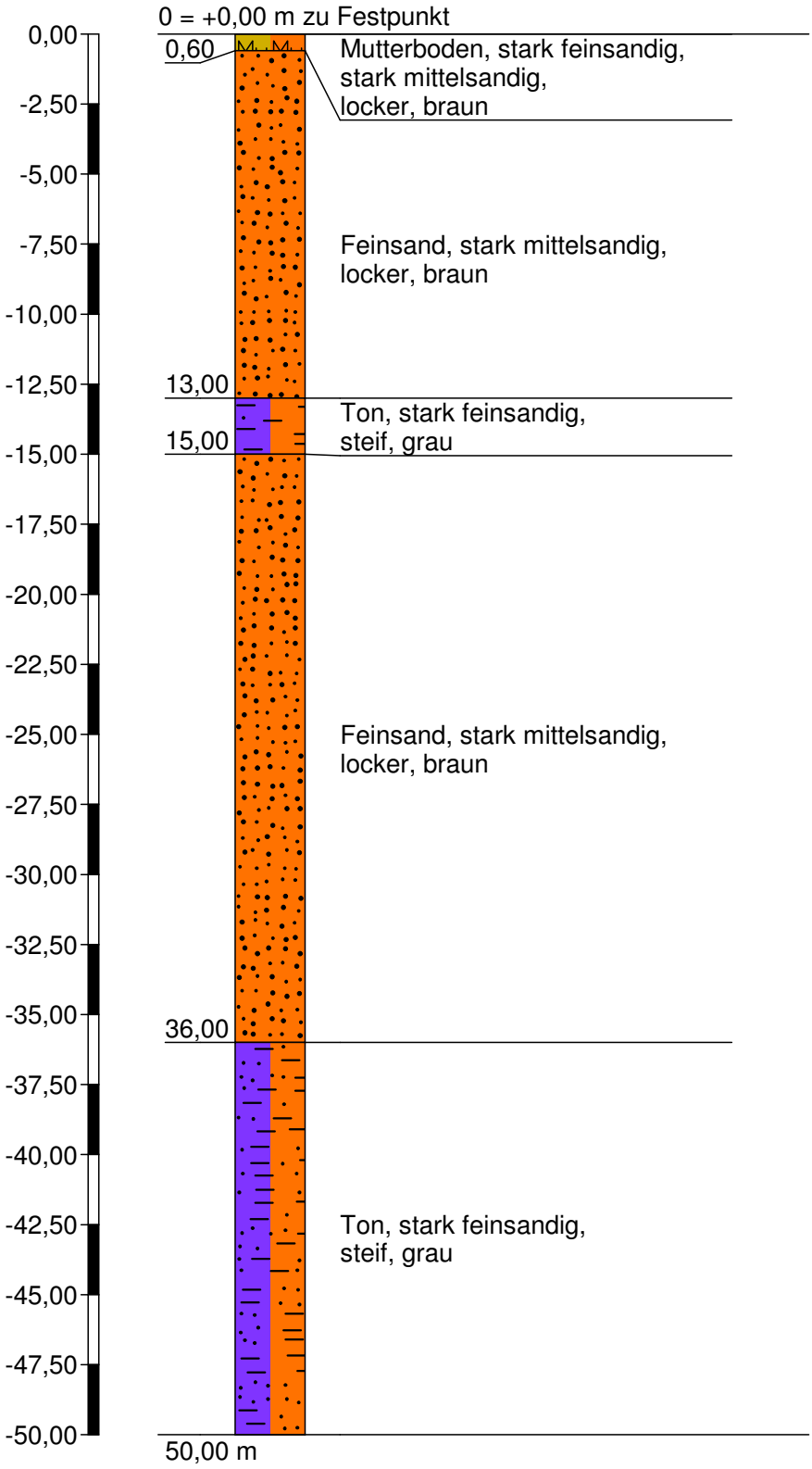
| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: GDF Suez<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |

## B 3



| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023 | Anlage: | |
|---|---|---|---|
| | | Projekt: Salzwedel | |
| | | Auftraggeber: GDF Suez | |
| | | Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010 |

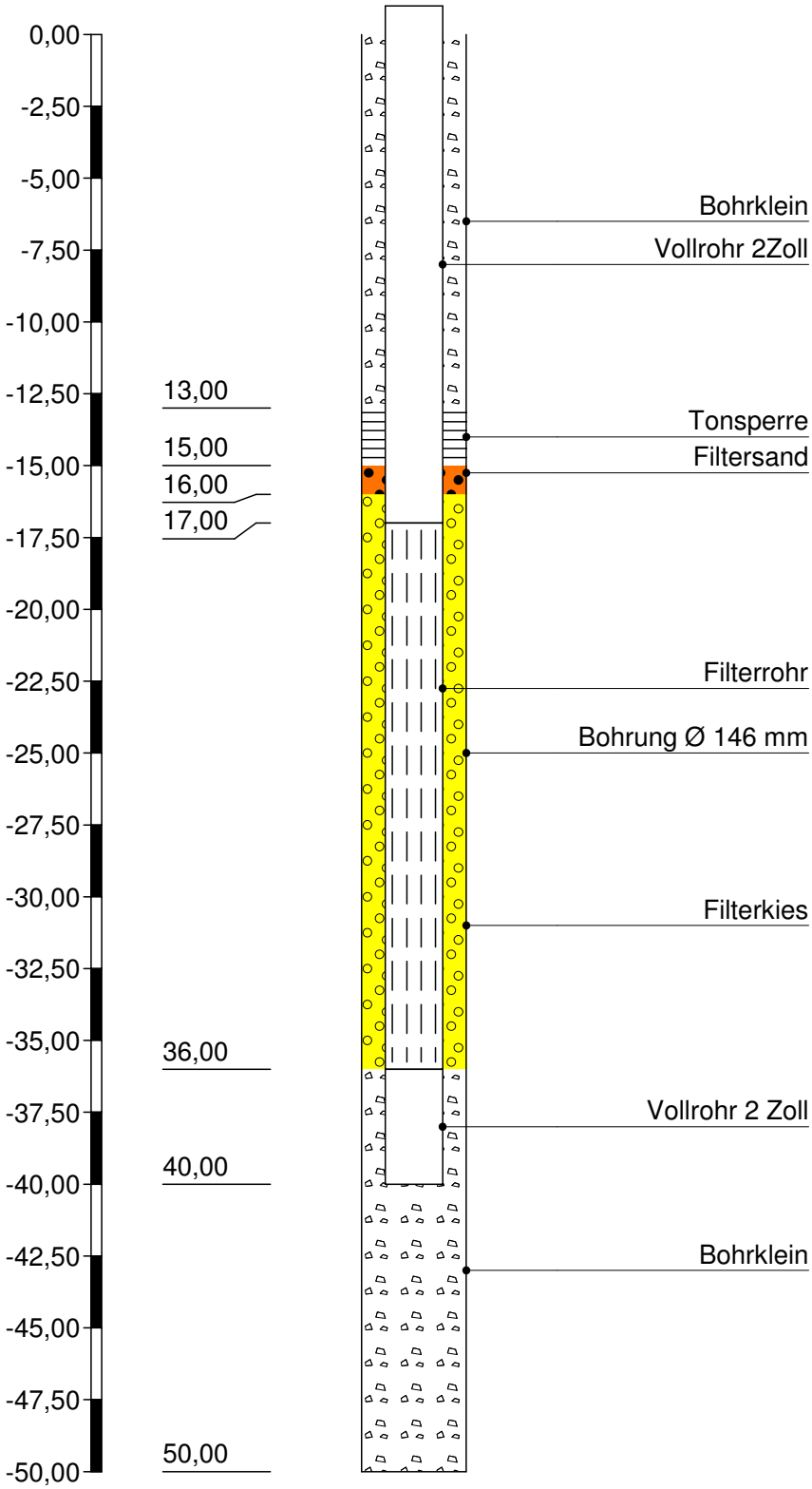
## B 4




**Höhenmaßstab 1:250**

| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze | Anlage: | |
|---|---|---|---|
| | | Projekt: Salzwedel | |
| | | Auftraggeber: GDF Suez | |
| | | Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010 |

## B 4



# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr B 4 /Blatt 1

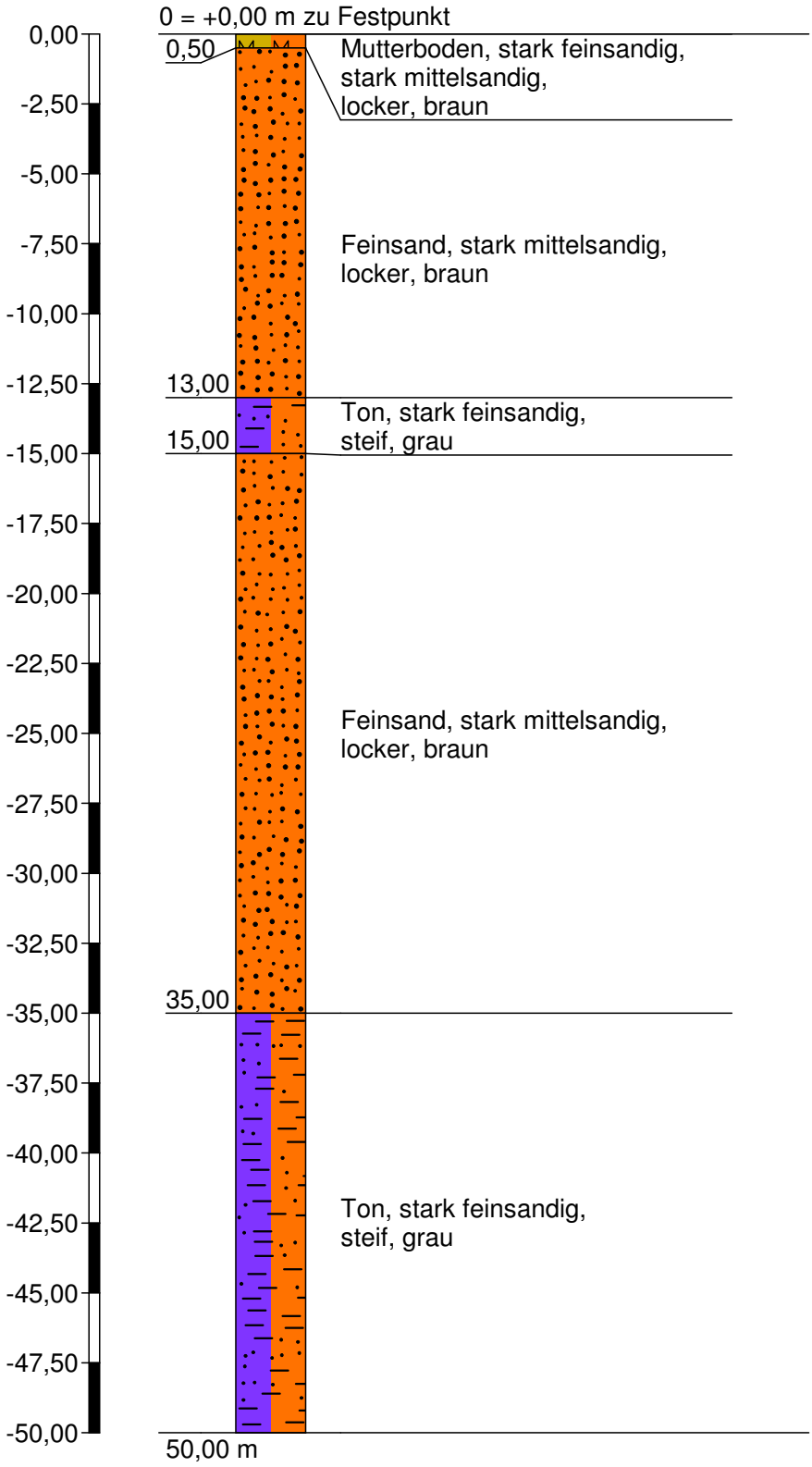
Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 0,60 | a) Mutterboden, stark feinsandig, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Mutterboden | g) | h) | i) | | | | |
| 13,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 15,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 36,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 50,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023 | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: GDF Suez<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |

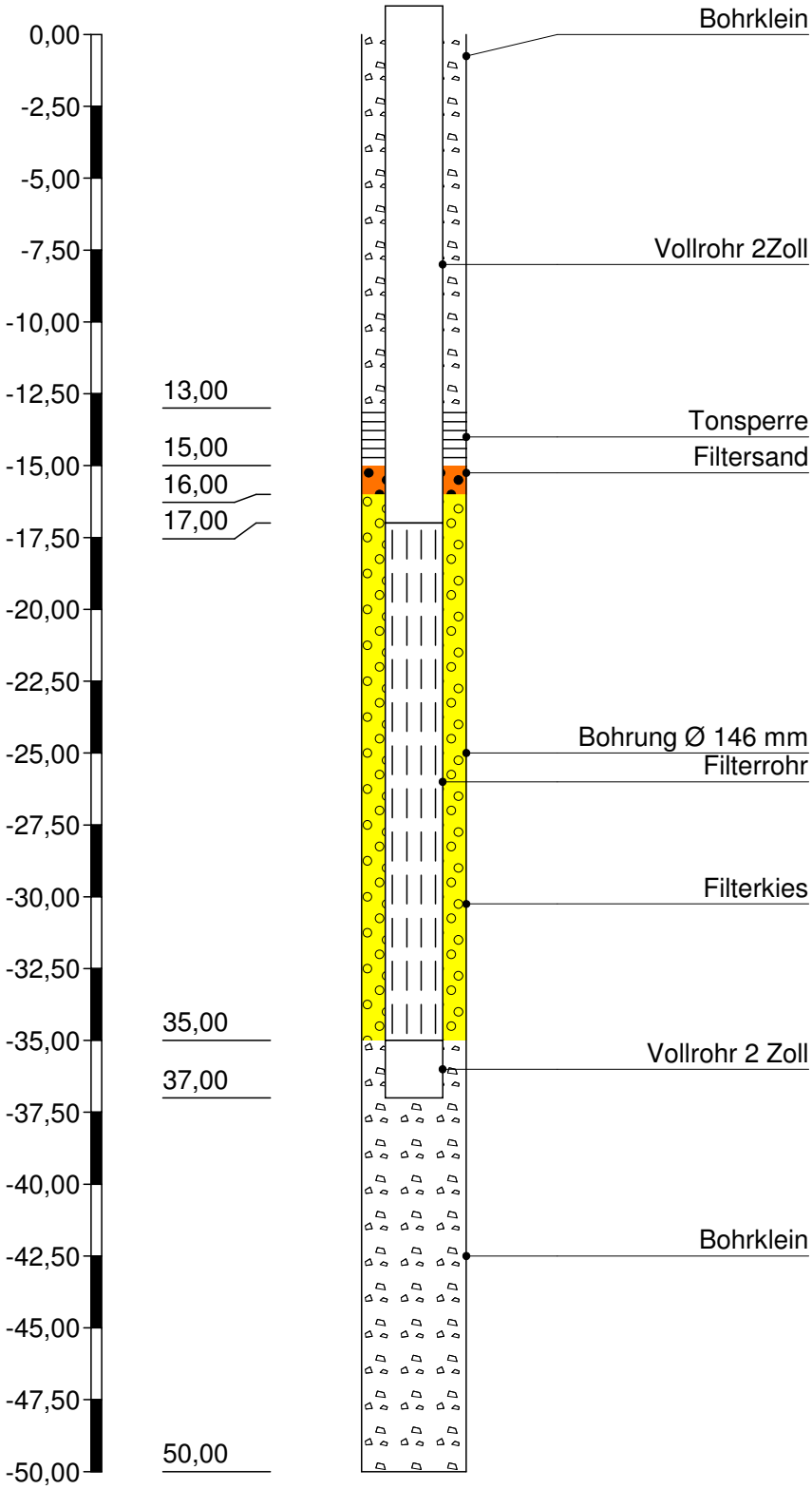
## B 5




**Höhenmaßstab 1:250**

| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: GDF Suez<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |

## B 5



# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr B 5 /Blatt 1

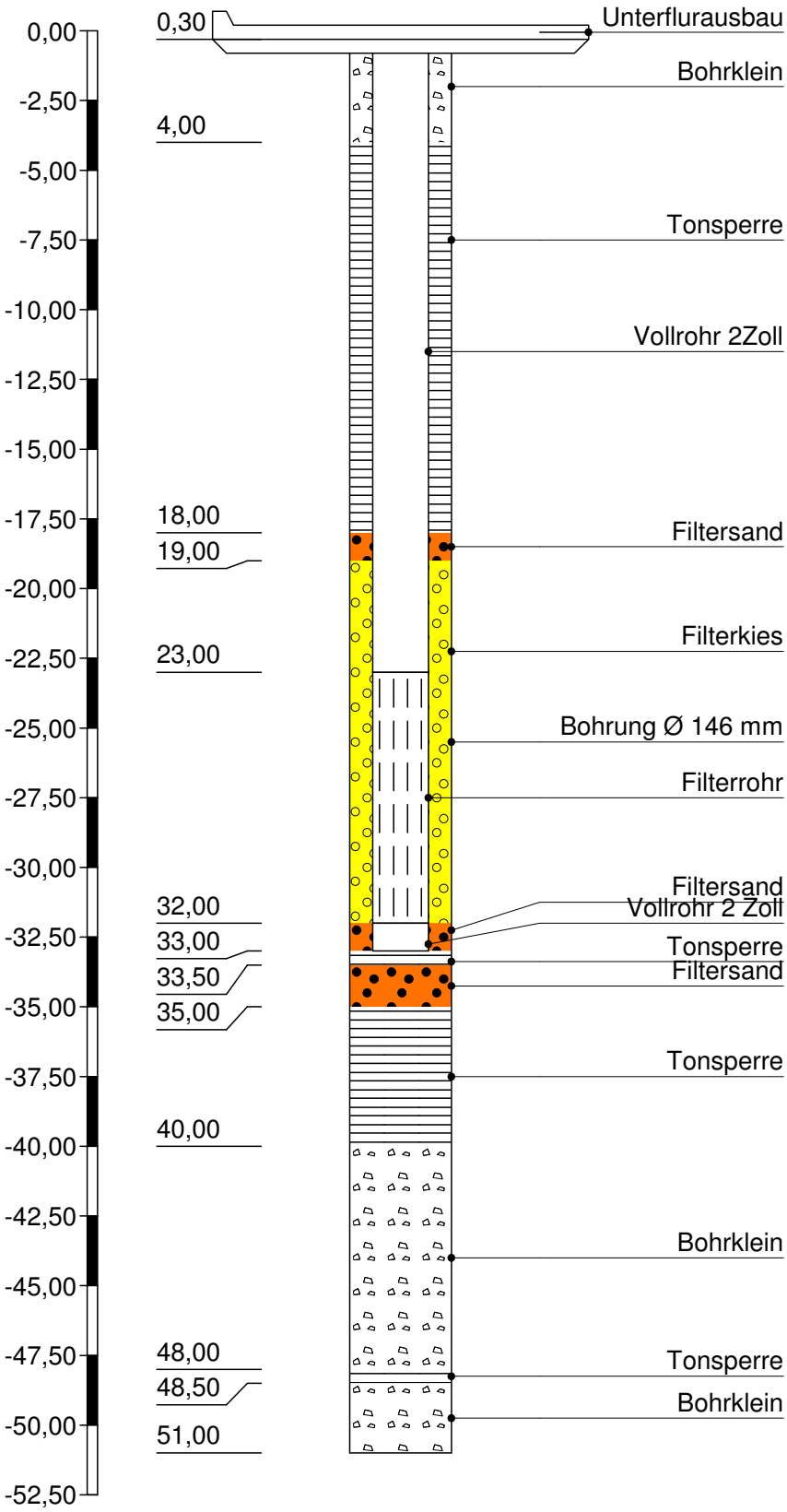
Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 0,50 | a) Mutterboden, stark feinsandig, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Mutterboden | g) | h) | i) | | | | |
| 13,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 15,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 35,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 50,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

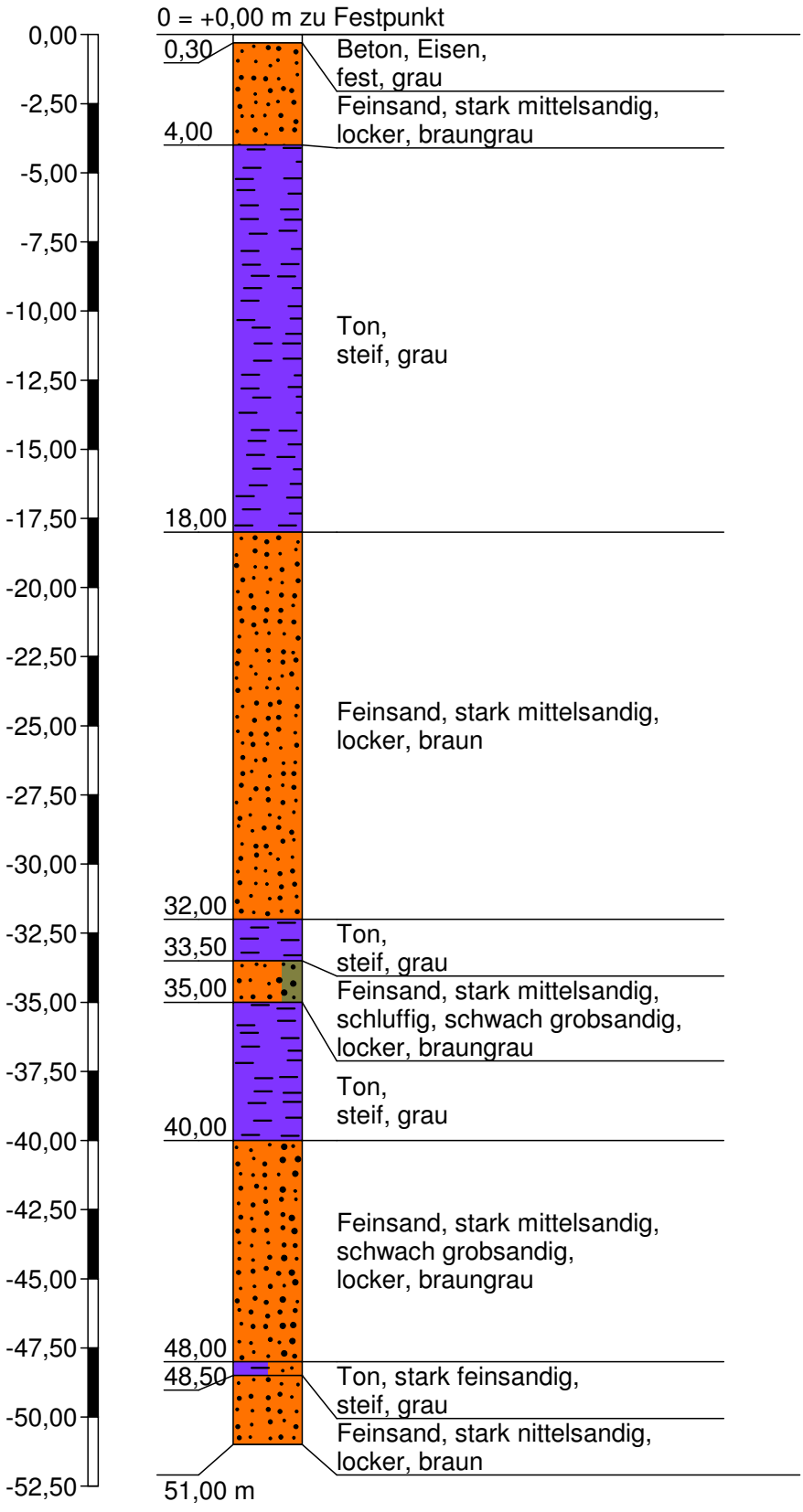
| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: CAU Kiel<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |

## Aaz 140



| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023 | Anlage: | |
|---|---|---|---|
| | | Projekt: Salzwedel | |
| | | Auftraggeber: CAU Kiel | |
| | | Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010 |

## Aaz 140




**Höhenmaßstab 1:250**

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr Aaz 140 /Blatt 1

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 0,30 | a) Beton, Eisen | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) fest | d) schwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Stahlbeton | g) | h) | i) | | | | |
| 4,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braungrau | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 18,00 | a) Ton | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 32,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | Wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 33,50 | a) Ton | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr Aaz 140 /Blatt 2

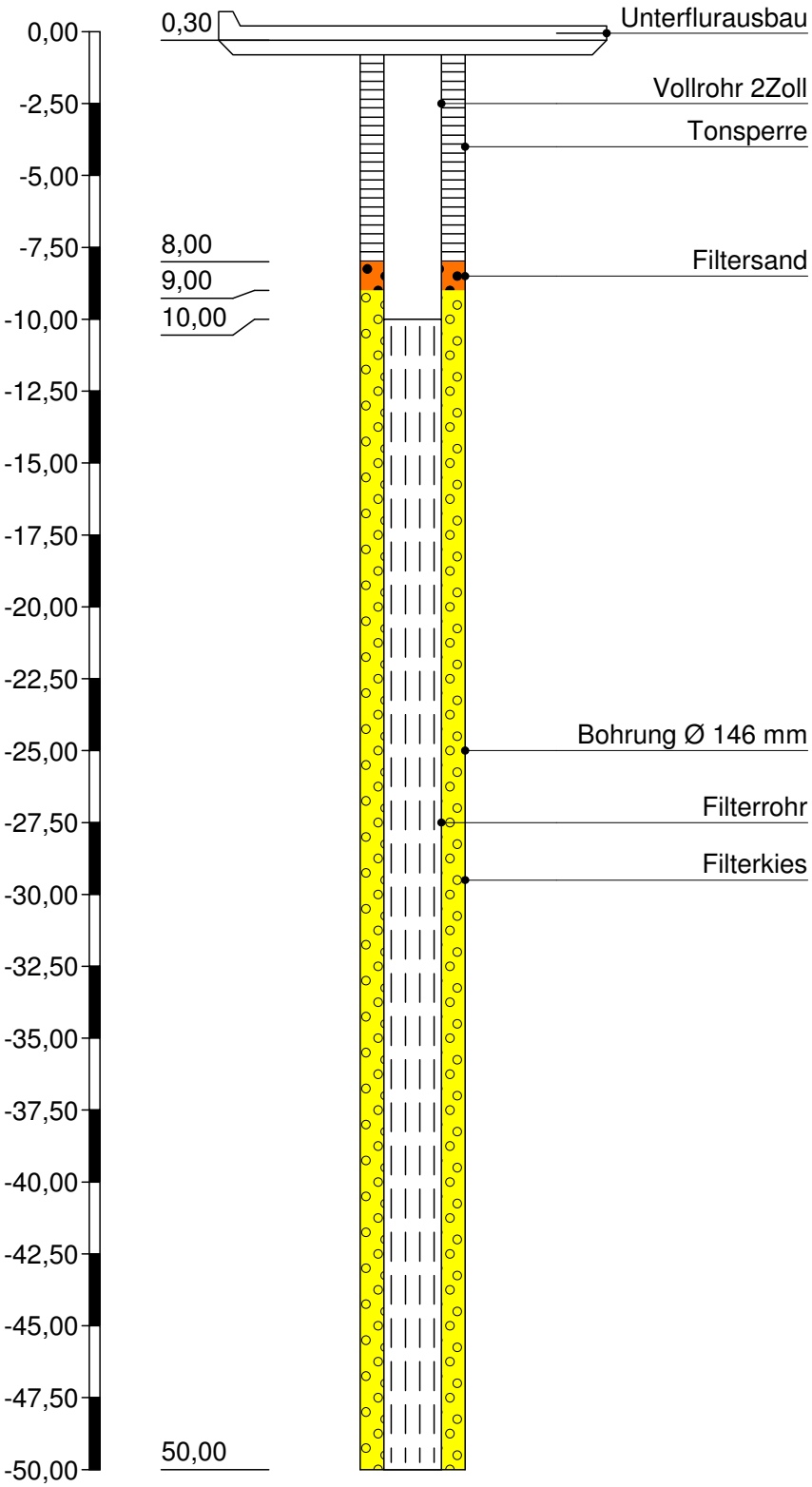
Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 35,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig, schluffig, schwach grobsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braungrau | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 40,00 | a) Ton | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 48,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig, schwach grobsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braungrau | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 48,50 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 51,00 | a) Feinsand, stark nittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |

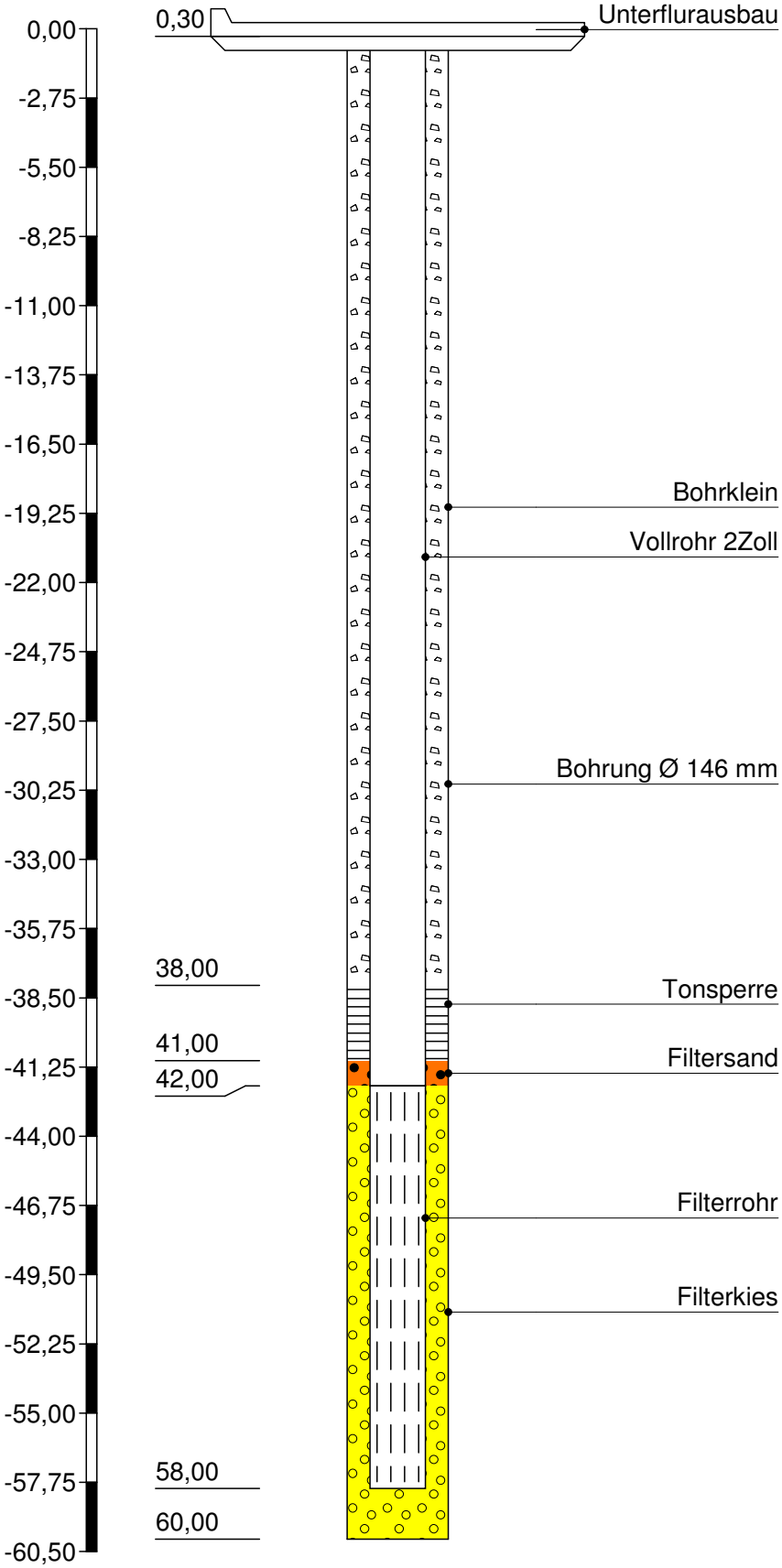
[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: CAU Kiel<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |

## Aaz 144/1



| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze<br><br>**Aaz 144/2** | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: CAU Kiel<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |



**BTR Bohrtechnik**
Seemühle 8
71665 Vaihingen/Enz-Roßwag

Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023

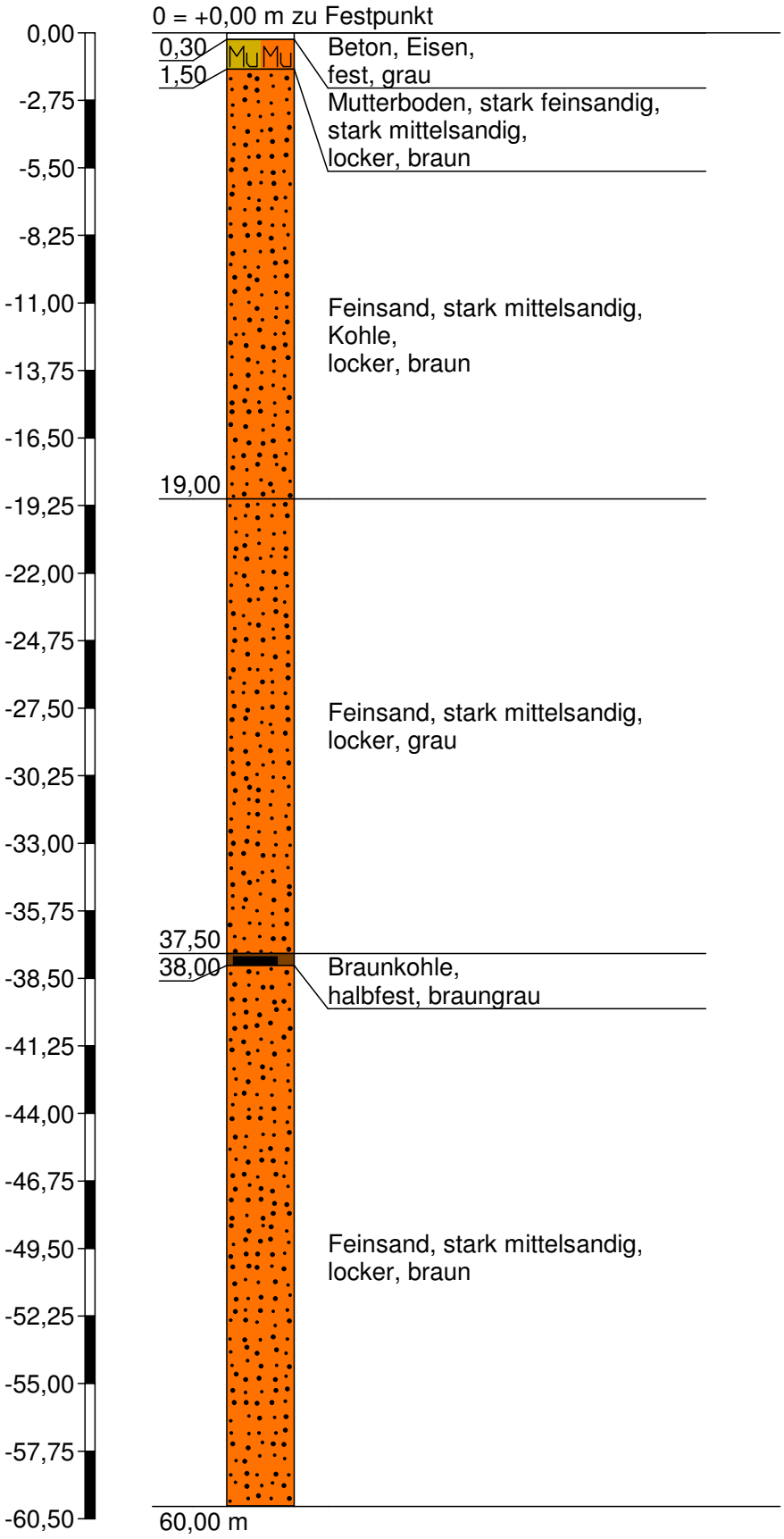
Anlage:

Projekt: Salzwedel

Auftraggeber: CAU Kiel

Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010

## Aaz 144/2




**Höhenmaßstab 1:275**

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr Aaz 144/2 /Blatt 1

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 0,30 | a) Beton, Eisen | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) fest | d) schwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Stahlbeton | g) | h) | i) | | | | |
| 1,50 | a) Mutterboden, stark feinsandig, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Mutterboden | g) | h) | i) | | | | |
| 19,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig, Kohle | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 37,50 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 38,00 | a) Braunkohle | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) halbfest | d) leicht zu bohren | e) braungrau | | | | | |
| | f) Braunkohle | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

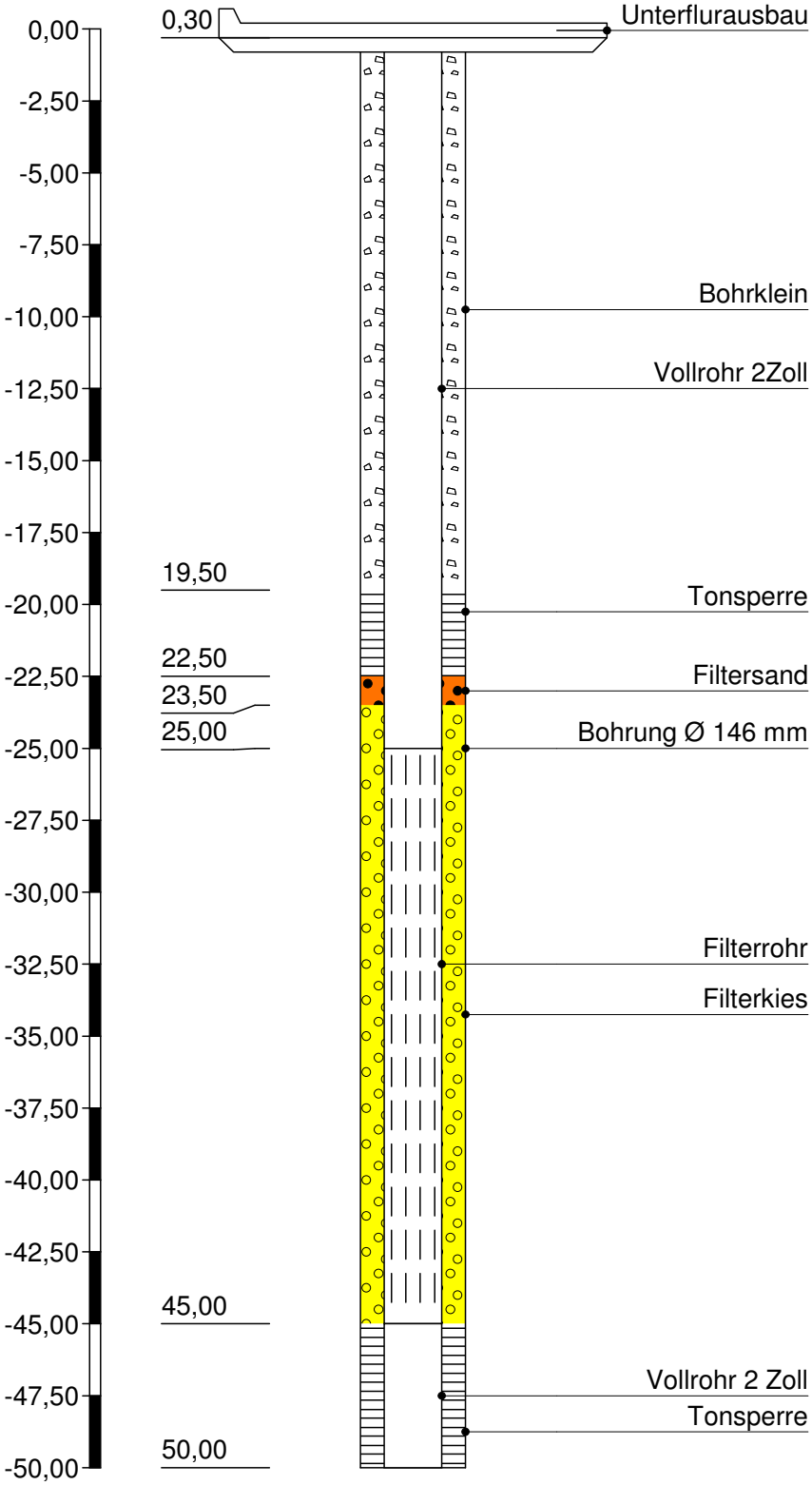
Bohrung Nr Aaz 144/2 /Blatt 2

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen<br>b) Ergänzende Bemerkungen [1]<br>c) Beschaffenheit nach Bohrgut<br>f) Übliche Benennung | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang<br>g) Geologische [1] Benennung | e) Farbe<br>h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | Bemerkungen<br>Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben<br>Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| 60,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig<br>b)<br>c) locker<br>f) Sand | d) leicht zu bohren<br>g) | e) braun<br>h) | i) | wasserführend | | | |
| | a)<br>b)<br>c)<br>f) | d)<br>g) | e)<br>h) | i) | | | | |
| | a)<br>b)<br>c)<br>f) | d)<br>g) | e)<br>h) | i) | | | | |
| | a)<br>b)<br>c)<br>f) | d)<br>g) | e)<br>h) | i) | | | | |
| | a)<br>b)<br>c)<br>f) | d)<br>g) | e)<br>h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze<br><br>**Aaz 144/3** | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: CAU Kiel<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |



**BTR Bohrtechnik**
Seemühle 8
71665 Vaihingen/Enz-Roßwag

Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023

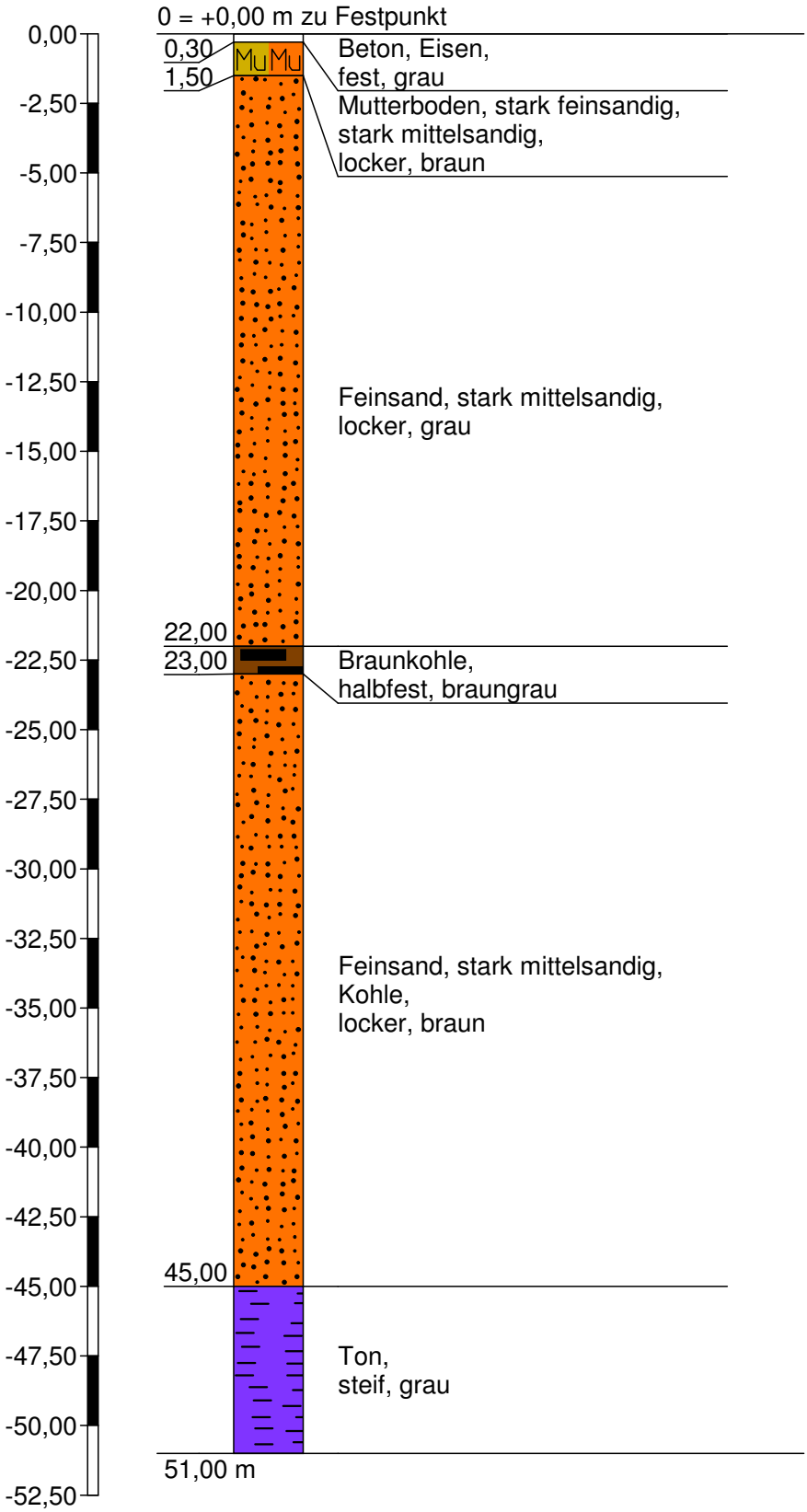
Anlage:

Projekt: Salzwedel

Auftraggeber: CAU Kiel

Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010

## Aaz 144/3




**Höhenmaßstab 1:250**

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr Aaz 144/3 /Blatt 1

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 0,30 | a) Beton, Eisen | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) fest | d) schwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Stahlbeton | g) | h) | i) | | | | |
| 1,50 | a) Mutterboden, stark feinsandig, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Mutterboden | g) | h) | i) | | | | |
| 22,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 23,00 | a) Braunkohle | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) halbfest | d) leicht zu bohren | e) braungrau | | | | | |
| | f) Braunkohle | g) | h) | i) | | | | |
| 45,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig, Kohle | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

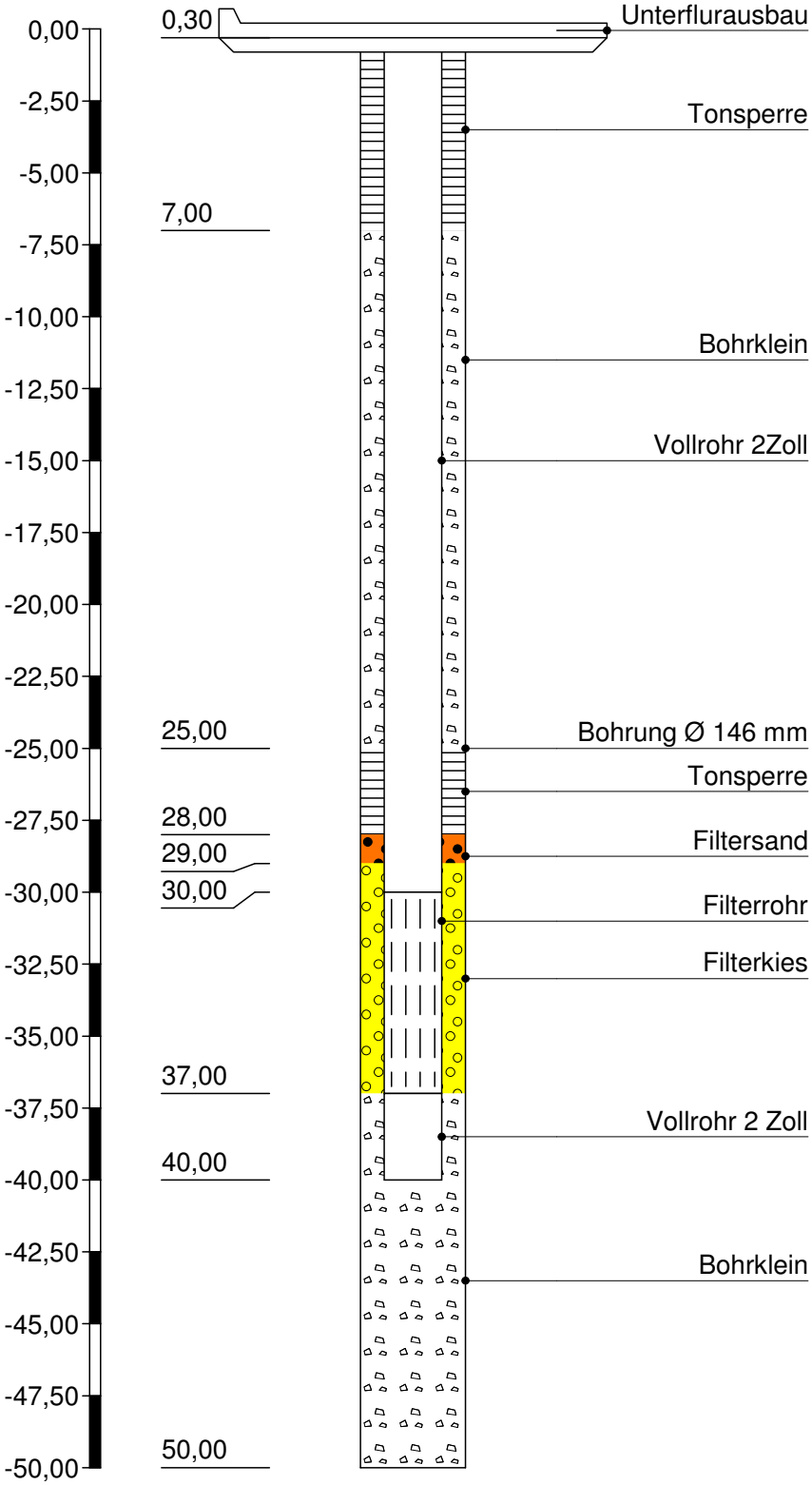
Bohrung Nr Aaz 144/3 /Blatt 2

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 51,00 | a) Ton | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) schwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze<br><br>**Aaz 145** | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: CAU Kiel<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |



**BTR Bohrtechnik**
Seemühle 8
71665 Vaihingen/Enz-Roßwag

Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023

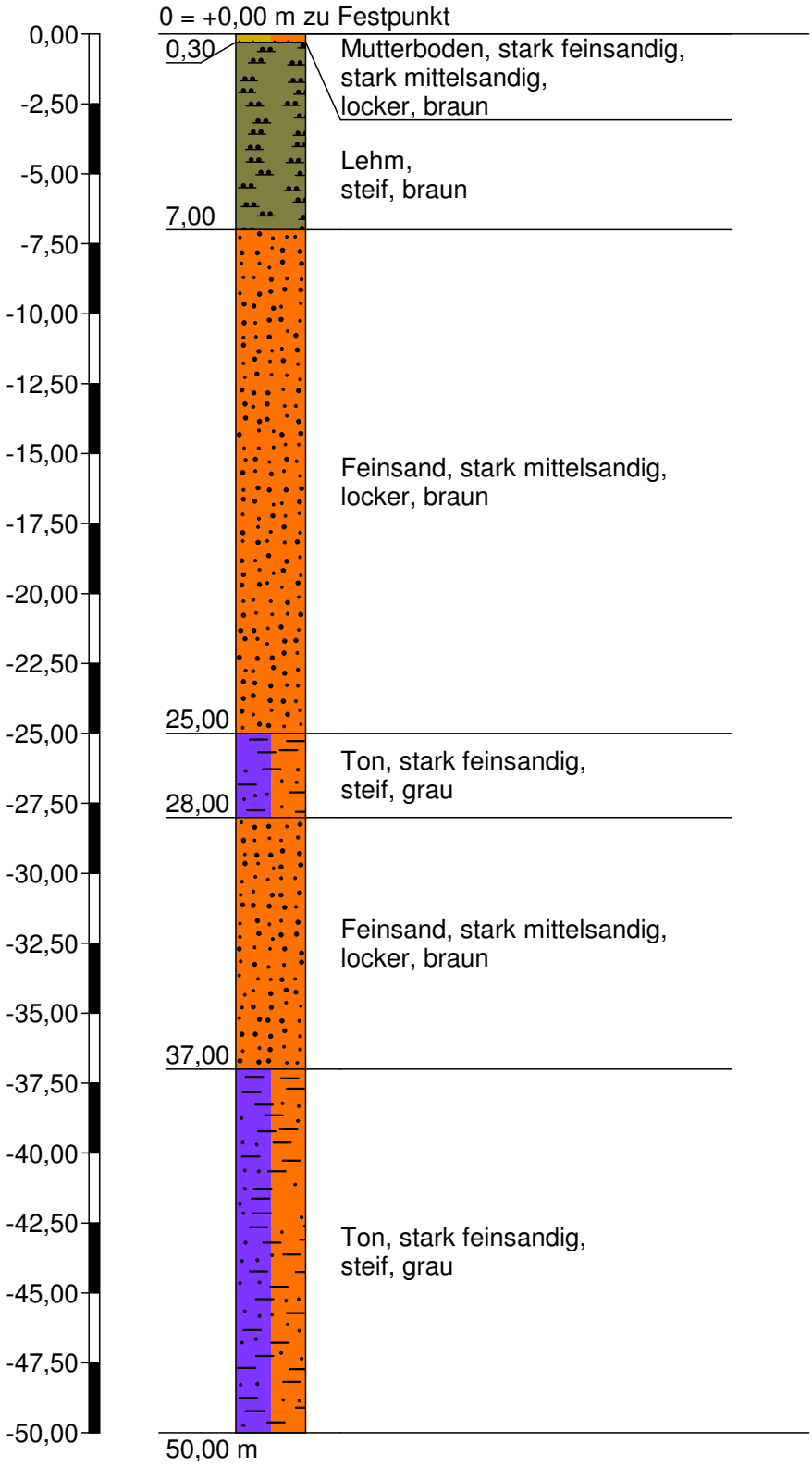
Anlage:

Projekt: Salzwedel

Auftraggeber: CAU Kiel

Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010

## Aaz 145




**Höhenmaßstab 1:250**

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr Aaz 145 /Blatt 1

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 0,30 | a) Mutterboden, stark feinsandig, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Mutterboden | g) | h) | i) | | | | |
| 7,00 | a) Lehm | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Lehm | g) | h) | i) | | | | |
| 25,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 28,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 37,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr Aaz 145 /Blatt 2

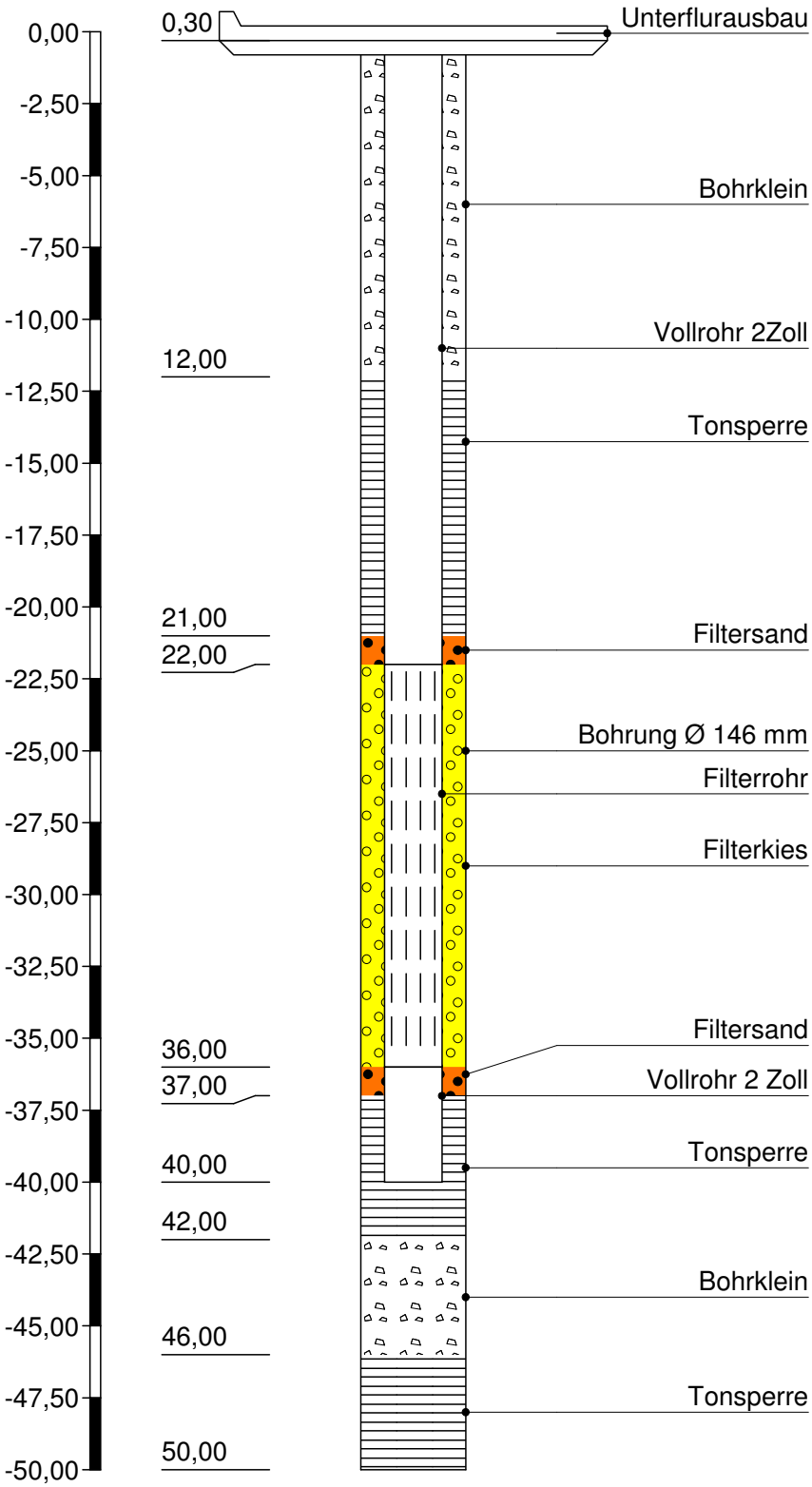
Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 50,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

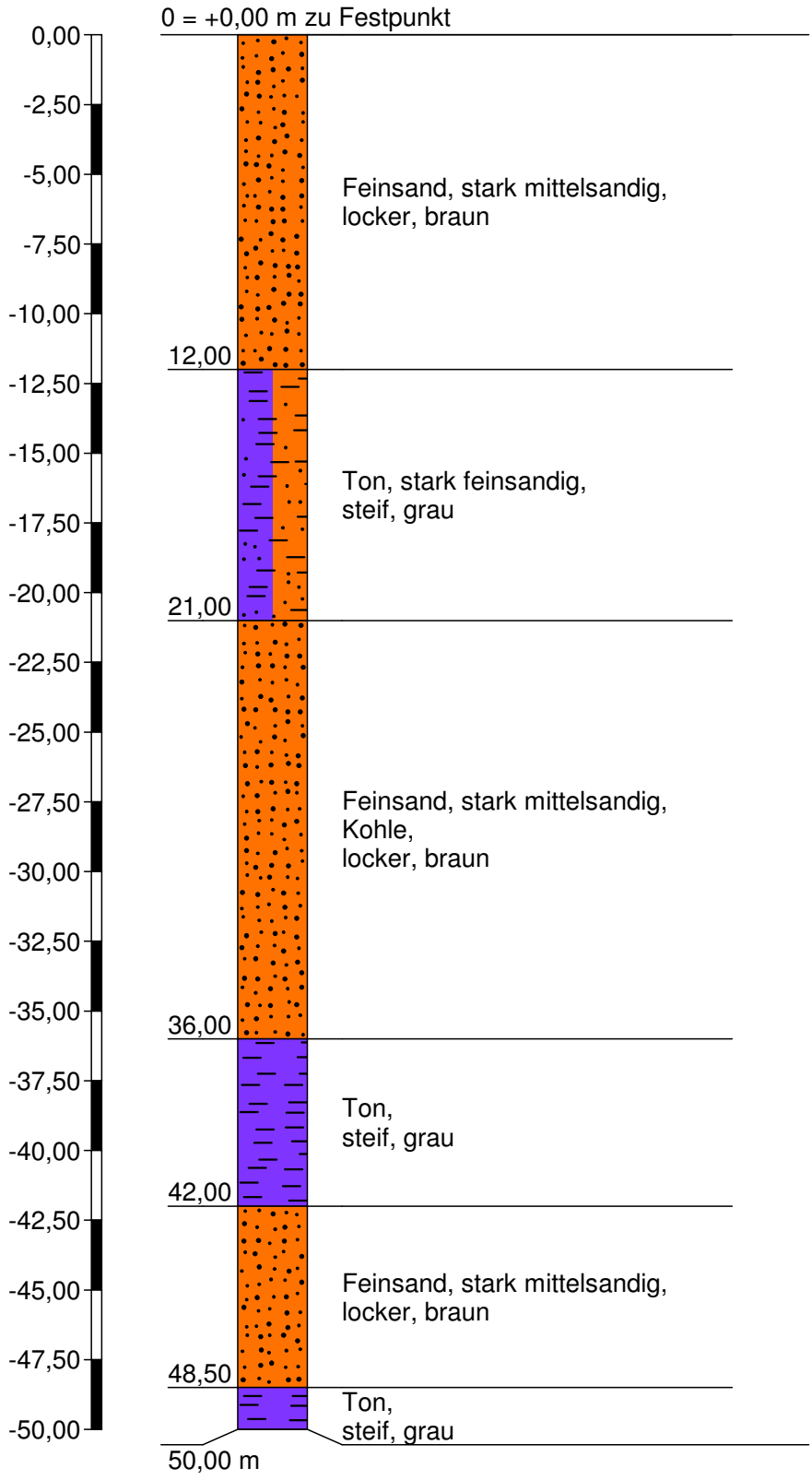
| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: CAU Kiel<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |

## Aaz 147



| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023 | Anlage: | |
|---|---|---|---|
| | | Projekt: Salzwedel | |
| | | Auftraggeber: CAU Kiel | |
| | | Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010 |

## Aaz 147




**Höhenmaßstab 1:250**

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr Aaz 147 /Blatt 1

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 12,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 21,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 36,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig, Kohle | | | | Wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 42,00 | a) Ton | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 48,50 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

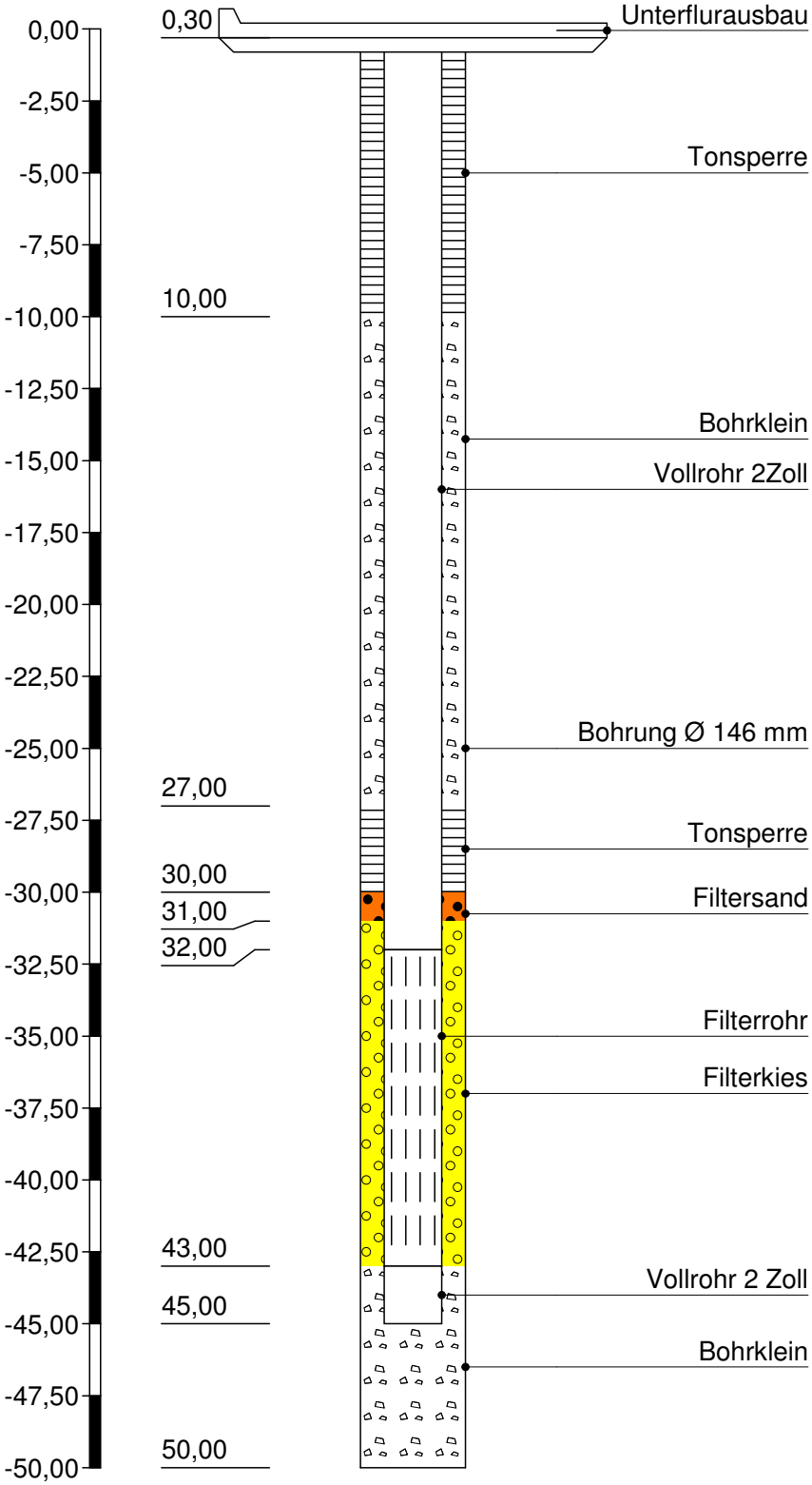
Bohrung Nr Aaz 147 /Blatt 2

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 50,00 | a) Ton | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

| | | |
|---|---|---|
| **BTR Bohrtechnik**<br>Seemühle 8<br>71665 Vaihingen/Enz-Roßwag | Ausbauskizze<br><br>**Aaz 149** | Anlage:<br>Projekt: Salzwedel<br>Auftraggeber: CAU Kiel<br>Bearb.: Heinle — Datum: 03.05.2010 |



**BTR Bohrtechnik**
Seemühle 8
71665 Vaihingen/Enz-Roßwag

Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023

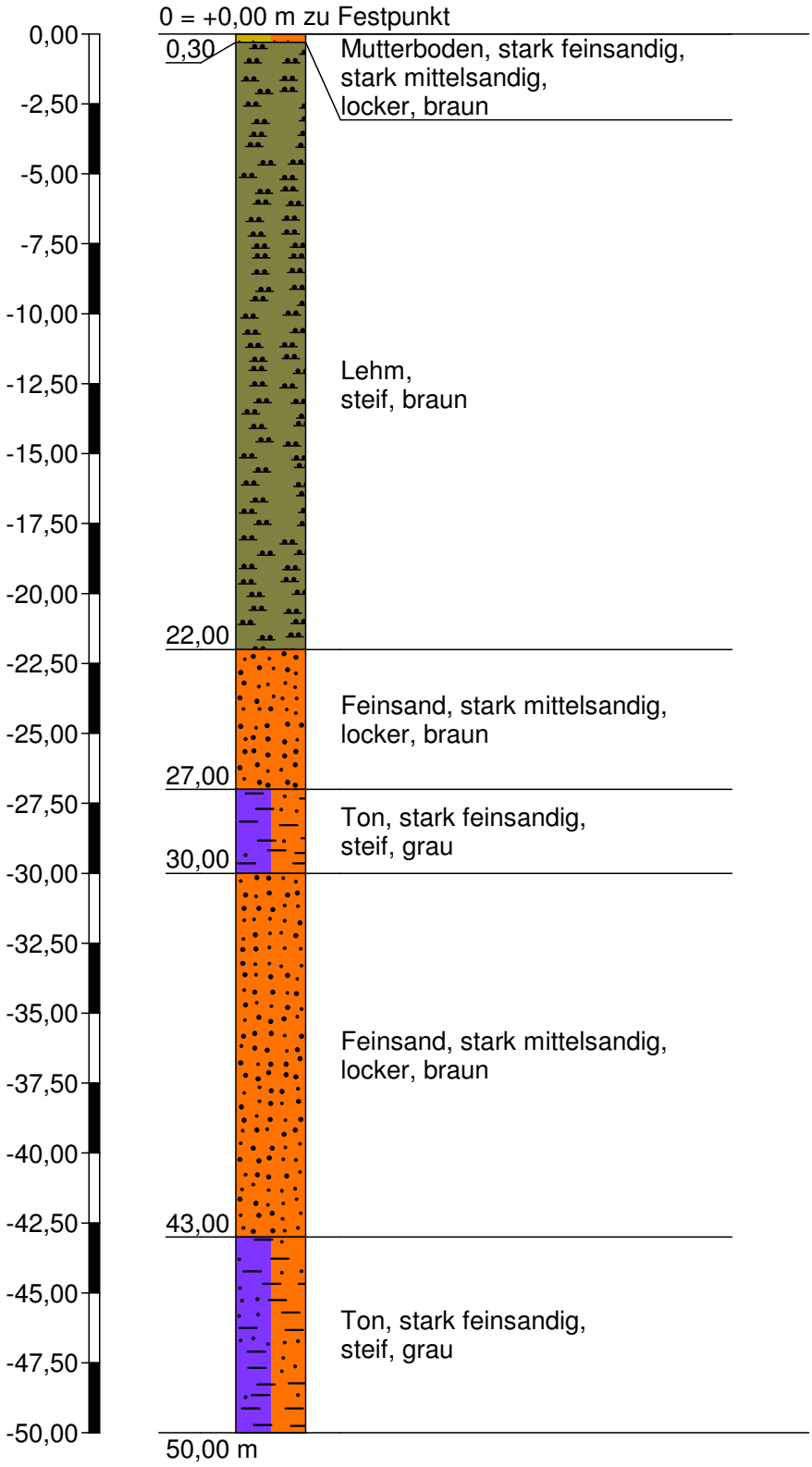
Anlage:

Projekt: Salzwedel

Auftraggeber: CAU Kiel

Bearb.: Heinle | Datum: 03.05.2010

## Aaz 149




**Höhenmaßstab 1:250**

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

Bohrung Nr Aaz 149 /Blatt 1

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 0,30 | a) Mutterboden, stark feinsandig, stark mittelsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Mutterboden | g) | h) | i) | | | | |
| 22,00 | a) Lehm | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Lehm | g) | h) | i) | | | | |
| 27,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |
| 30,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| 43,00 | a) Feinsand, stark mittelsandig | | | | wasserführend | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) locker | d) leicht zu bohren | e) braun | | | | | |
| | f) Sand | g) | h) | i) | | | | |

[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

# Schichtenverzeichnis

für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben

Anlage

Bericht:

Az.:

Bauvorhaben: Salzwedel

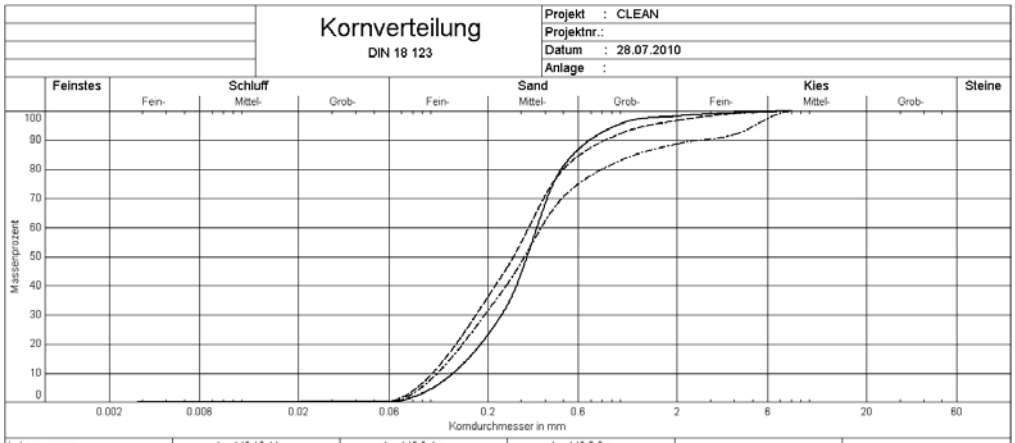
Bohrung Nr Aaz 149 /Blatt 2

Datum: 03.05.2010

| 1 | 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bis . . . . m unter Ansatzpunkt | a) Benennung der Bodenart und Beimengungen | | | | Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges | Entnommene Proben | | |
| | b) Ergänzende Bemerkungen [1] | | | | | Art | Nr. | Tiefe in m (Unterkante) |
| | c) Beschaffenheit nach Bohrgut | d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang | e) Farbe | | | | | |
| | f) Übliche Benennung | g) Geologische [1] Benennung | h) [1] Gruppe | i) Kalkgehalt | | | | |
| 50,00 | a) Ton, stark feinsandig | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) steif | d) mittelschwer zu bohren | e) grau | | | | | |
| | f) Ton | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |
| | a) | | | | | | | |
| | b) | | | | | | | |
| | c) | d) | e) | | | | | |
| | f) | g) | h) | i) | | | | |

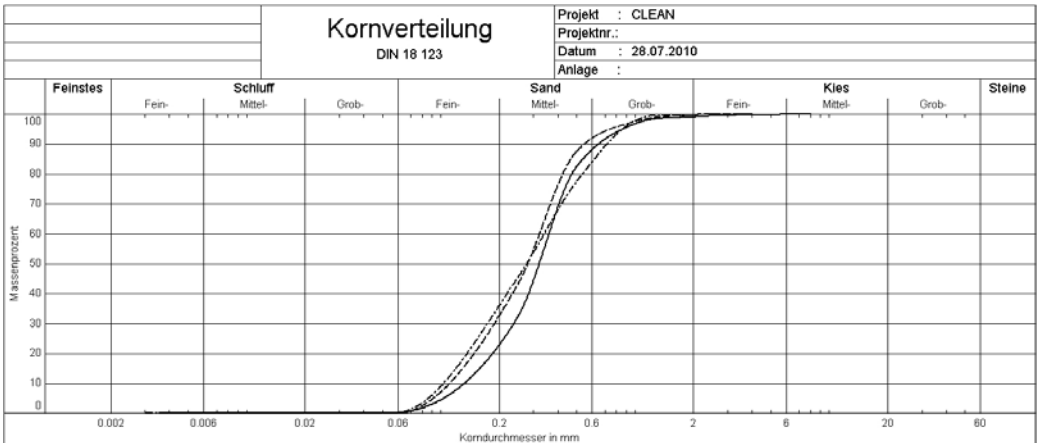
[1] Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

# E.6 Ergebnisse der Festphasenuntersuchungen



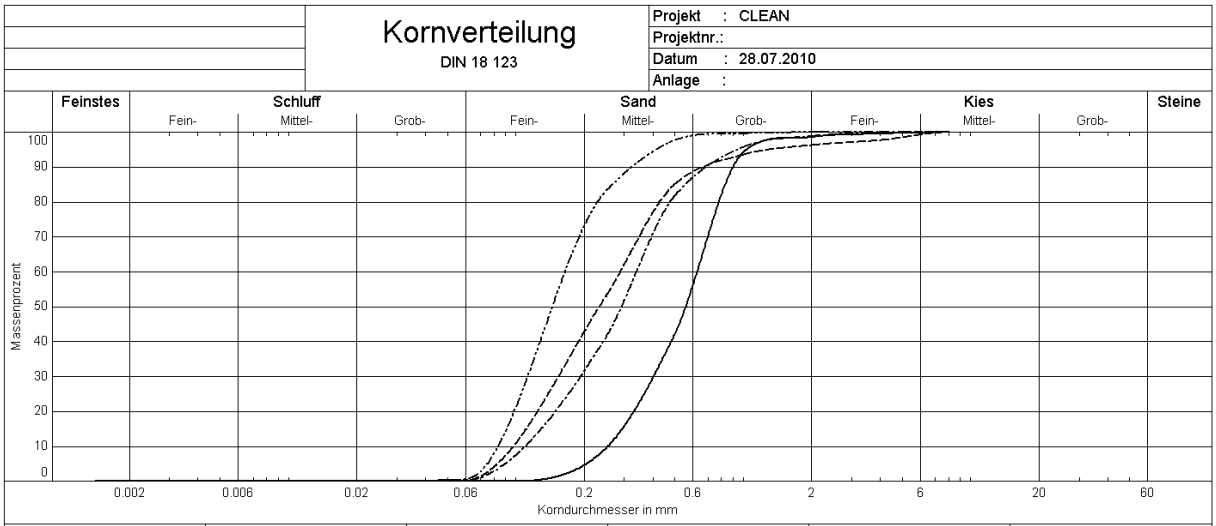

| | | | |
|---|---|---|---|
| Labornummer | Aaz148 10-11m | Aaz148 3-4m | Aaz148 5-6m |
| Entnahmestelle | | | |
| Entnahmetiefe | | | |
| Ungleichförm. U | U = 2.8 | U = 3.2 | U = 3.5 |
| Krümmungszahl Cc | Cc = 1.2 | Cc = 0.9 | Cc = 0.9 |
| Bodenart | mS,fs,gs' | mS,fs,gs' | mS,fs,gs',fg' |
| d10 / d60 | 0.131/0.383 mm | 0.102/0.328 mm | 0.108/0.382 mm |
| kf nach Hazen | 2.0E-004 m/s | 1.2E-004 m/s | 1.4E-004 m/s |
| kf nach Beyer | 2.2E-004 m/s | 1.3E-004 m/s | 1.4E-004 m/s |
| kf nach Kaubisch | - (0.063 <= 10%) | - (0.063 <= 10%) | - (0.063 <= 10%) |
| kf nach Seiler | - | - | - |
| d20 | 0.183 mm | 0.136 mm | 0.147 mm |
| d30 | 0.235 mm | 0.173 mm | 0.192 mm |
| d40 | 0.283 mm | 0.218 mm | 0.249 mm |
| d50 | 0.322 mm | 0.273 mm | 0.312 mm |
| d70 | 0.411 mm | 0.394 mm | 0.490 mm |

**Abbildung 1: Kornverteilungen der Sedimentproben B08 10-11m, B08 3-4m und B08 5-6m.**




| | | | |
|---|---|---|---|
| Labornummer | Aaz149 11-12m | Aaz149 16-17m | Aaz149 21-22m |
| Entnahmestelle | | | |
| Entnahmetiefe | | | |
| Ungleichförm. U | U = 2.7 | U = 2.9 | U = 3.3 |
| Krümmungszahl Cc | Cc = 1.2 | Cc = 1.0 | Cc = 0.9 |
| Bodenart | mS,fs,gs' | mS,fs,gs' | mS,fs,gs' |
| d10 / d60 | 0.131/0.380 mm | 0.111/0.322 mm | 0.103/0.340 mm |
| kf nach Hazen | 2.0E-004 m/s | 1.4E-004 m/s | 1.2E-004 m/s |
| kf nach Beyer | 2.2E-004 m/s | 1.5E-004 m/s | 1.3E-004 m/s |
| kf nach Kaubisch | - (0.063 <= 10%) | - (0.063 <= 10%) | - (0.063 <= 10%) |
| kf nach Seiler | - | - | - |
| d20 | 0.184 mm | 0.149 mm | 0.136 mm |
| d30 | 0.237 mm | 0.188 mm | 0.173 mm |
| d40 | 0.283 mm | 0.233 mm | 0.219 mm |
| d50 | 0.321 mm | 0.280 mm | 0.277 mm |
| d70 | 0.406 mm | 0.367 mm | 0.417 mm |

**Abbildung 2: Kornverteilungen der Sedimentproben B08 11-12m, B08 16-17m und B08 21-22m.**




| Labornummer | Aaz144 12-14m | Aaz144 2-4m | Aaz144 4-6m | Aaz144 8-10m | |
|---|---|---|---|---|---|
| Entnahmestelle | | | | | |
| Entnahmetiefe | | | | | |
| Ungleichförm. U | U = 2.5 | U = 3.0 | U = 3.1 | U = 2.0 | |
| Krümmungszahl Cc | Cc = 1.0 | Cc = 0.8 | Cc = 1.0 | Cc = 0.9 | |
| Bodenart | mS,$\overline{gs}$ | mS+fS,gs' | mS,$\overline{fs}$,gs' | fS,ms | |
| d10 / d60 | 0.253/0.627 mm | 0.097/0.288 mm | 0.110/0.339 mm | 0.084/0.165 mm | |
| kf nach Hazen | 7.4E-004 m/s | 1.1E-004 m/s | 1.4E-004 m/s | 8.1E-005 m/s | |
| kf nach Beyer | 8.2E-004 m/s | 1.2E-004 m/s | 1.5E-004 m/s | 9.1E-005 m/s | |
| kf nach Kaubisch | - (0.063 <= 10%) | - (0.063 <= 10%) | - (0.063 <= 10%) | - (0.063 <= 10%) | |
| kf nach Seiler | - | - | - | - | |
| d20 | 0.330 mm | 0.124 mm | 0.149 mm | 0.098 mm | |
| d30 | 0.403 mm | 0.154 mm | 0.192 mm | 0.113 mm | |
| d40 | 0.482 mm | 0.188 mm | 0.241 mm | 0.128 mm | |
| d50 | 0.559 mm | 0.232 mm | 0.291 mm | 0.145 mm | |
| d70 | 0.698 mm | 0.348 mm | 0.395 mm | 0.190 mm | |

**Abbildung 3: Kornverteilungen der Sedimentproben B11 12-14m, B11 2-4m, B11 4-6m und B11 8-10m.**

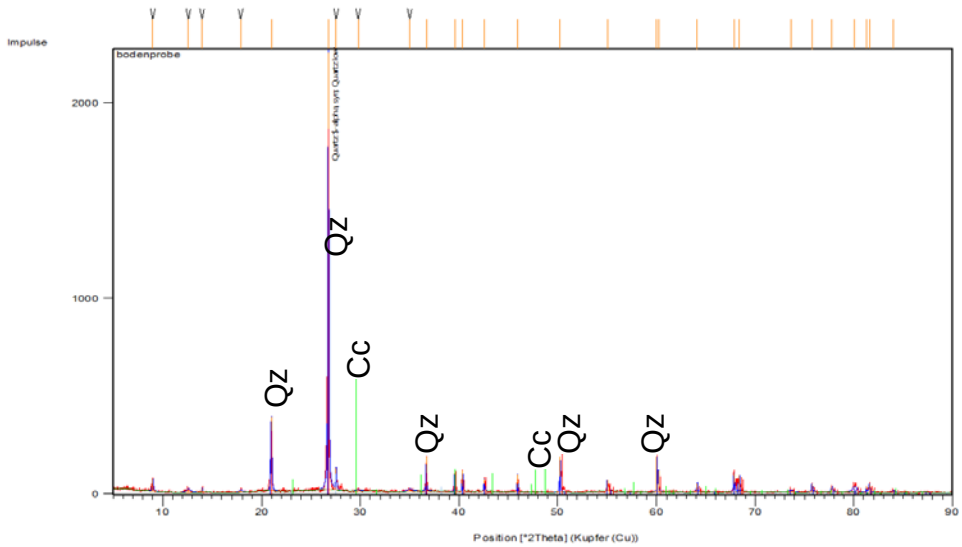



**Abbildung 4: Röntgendiffraktogramm einer Probe aus sandigen Schichten.**

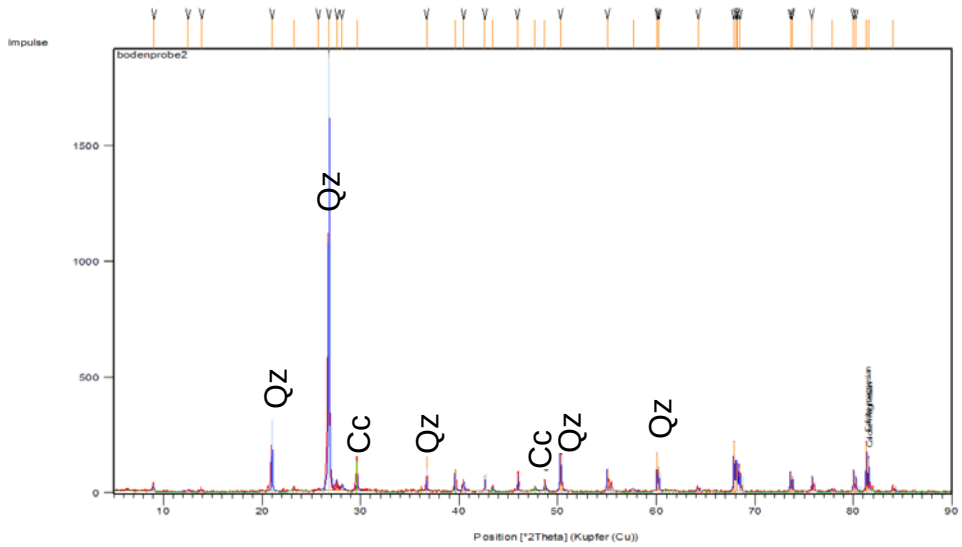



**Abbildung 5: Röntgendiffraktogramm einer Probe aus dem Geschiebemergel.**

**Tabelle 1: Spurenelement- und Schwermetallkonzentrationen von Sedimentproben der Kernbohrungen B8 und B11.**

| Position | Tiefe | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | As | Rb | Sr | Mo | Cd | Sn | Sb | Ba | Tl | Pb | U |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [m u GOK] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] | [µg/kg] |
| **B8** | **3-4** | 42,81 | 40,82 | 6,62 | 18,07 | 10,85 | 37,24 | 4,98 | 76,11 | 100,53 | 0,28 | 0,17 | 1,14 | 0,29 | 344,27 | 0,46 | 14,33 | 1,26 |
| **B8** | **5-6** | 34,38 | 32,16 | 6,46 | 15,87 | 9,13 | 34,64 | 4,65 | 57,04 | 131,99 | 0,52 | 0,16 | 0,93 | 0,24 | 255,28 | 0,35 | 11,42 | 1,15 |
| **B8** | **10-11** | 10,68 | 14,77 | 2,08 | 4,71 | 3,19 | 12,89 | 2,27 | 27,52 | 34,42 | 0,29 | 0,08 | 0,36 | 0,14 | 204,53 | 0,17 | 5,63 | 0,45 |
| **B8** | **11-12** | 7,39 | 12,58 | 1,49 | 3,36 | 2,28 | 9,50 | < 2 | 22,52 | 24,23 | 0,30 | 0,08 | 0,28 | 0,13 | 167,88 | 0,14 | 4,15 | 0,34 |
| **B8** | **21-22** | 6,15 | 13,50 | 0,85 | 2,44 | 1,44 | 6,04 | 2,49 | 19,22 | 23,16 | 0,16 | 0,08 | 0,25 | 0,17 | 139,24 | 0,12 | 3,73 | 0,77 |
| **B11** | **2-4** | 16,55 | 18,62 | 1,74 | 3,54 | 2,11 | 9,42 | 3,88 | 30,06 | 39,56 | 0,34 | 0,10 | 0,43 | 0,18 | 199,60 | 0,18 | 6,52 | 0,76 |
| **B11** | **4-6** | 36,29 | 34,69 | 4,39 | 10,83 | 5,07 | 22,09 | 6,69 | 43,66 | 49,14 | 0,63 | 0,13 | 0,77 | 0,26 | 209,47 | 0,24 | 8,50 | 1,22 |
| **B11** | **8-10** | 17,46 | 25,64 | 2,17 | 6,36 | 2,79 | 13,00 | 4,60 | 32,05 | 46,84 | 0,51 | 0,10 | 0,46 | 0,22 | 216,97 | 0,19 | 5,99 | 0,94 |
| **B11** | **19-20** | 7,01 | 14,01 | 0,95 | 2,94 | 1,45 | 6,04 | < 2 | 17,88 | 25,36 | 0,31 | 0,08 | 0,23 | 0,13 | 134,33 | 0,12 | 3,59 | 0,46 |
| **B11** | **25-26** | < 5 | 13,28 | 0,81 | 2,44 | 1,73 | 4,98 | < 2 | 14,01 | 19,90 | 0,56 | 0,07 | 0,21 | 0,15 | 110,26 | 0,09 | 2,86 | 0,35 |
| **B11** | **33-34** | < 5 | 12,80 | 0,28 | 1,75 | 1,26 | 2,73 | < 2 | 10,82 | 12,98 | 0,51 | 0,06 | < 0.2 | 0,16 | 106,91 | 0,07 | 2,22 | 0,20 |
| **B11** | **39-40** | < 5 | 14,21 | 0,34 | 3,17 | 1,90 | 3,05 | 2,75 | 17,78 | 17,62 | 3,13 | 0,07 | < 0.2 | 0,13 | 142,27 | 0,27 | 3,22 | 0,34 |
| **B11** | **45-46** | 8,43 | 16,26 | 0,75 | 3,95 | 1,78 | 6,58 | 2,26 | 22,36 | 23,47 | 0,37 | 0,07 | 0,29 | 0,18 | 168,57 | 0,14 | 4,21 | 0,45 |

# E.7 Konzeption des Grundwassermonitorings

GICON®
Großmann Ingenieur Consult GmbH

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

# CLEAN

# $CO_2$ Enhanced Gas Recovery Altmark

# Themenverbund IV – $CO_2$-MONITOR

## Projekt Mo 3:

**Hydrogeochemisches Monitoring und feldmaßstäblicher $CO_2$-Injektionsversuch im flachen GWL**

## Teilprojekt Mo 3.1:

**Erkundung, Monitoring und Bewertung hydrogeologischer und hydrogeochemischer Parameter**

## - Konzeption zum Grundwassermonitoring der flachen Aquifere -

**Bearbeiter:** Dipl. Ing. Lars Tischer (GICON)
Dr. Ralf Köber (CAU)

**Bearbeitungsstand:** 11.01.2010

# ZIELSETZUNG/AUFGABENSTELLUNG DES ARBEITSPAKETES

Zielsetzung im Arbeitspaket ist die hydrogeologische und geochemische Charakterisierung der oberflächennahen Grundwasserleiter (flache Aquifere) auf einer Fläche, die möglicherweise bei einem $CO_2$-Austritt aus dem Reservoir beeinflusst werden könnte.

Da aber nicht zu erwarten ist, dass während und auch nach der Injektionsphase eine $CO_2$-Immission in den flachen Aquifer auftritt, dienen die für das Monitoring geplanten Messstellen hauptsächlich der Erfassung der natürlichen hydrogeologische und hydrogeochemischen Schwankungen im gewählten Modellgebiet und der Ableitung von Indikatorwerte im Falle eines späteren $CO_2$-Eintrages.

Zielstellungen des zu konzipierenden Grundwassermonitorings der flachen Aquifere sind die Beschreibung von Zustandsänderungen der Stoffverteilung im „potentiellen“ $CO_2$-Austrittsbereich auf der Grundlage der Zustandserfassung der Grundwasserdynamik und der Grundwasserbeschaffenheit sowie die Erfassung der Ausbreitung des geochemisch veränderten Wassers im Grundwasserabstrom.

# KONZEPTION GRUNDWASSERMONITORING

Hinsichtlich der abzuleitenden Monitoringmaßnahmen ist zwischen den Standmessungen und den Qualitätsmessungen zu unterscheiden. Bezüglich der Messzeiträume ist zwischen Messaufgaben und Monitoringaufgaben zu unterscheiden. Messaufgaben bestehen zur Klärung vorhandener Kenntnisdefizite zur Grundwassersituation bzw. zur Klärung von Widersprüchen. Es sind somit einmalige Aufgaben, wobei sich im Ergebnis der Messungen der Bedarf der Übernahme der Messaufgabe in das Monitoring ergeben kann. Monitoringaufgaben dienen demgegenüber der langfristigen Erfassung der Parameter im Rahmen der Gefahrenüberwachung oder zur Erfassung von Zeitreihen zur Trendermittlung bzw. für die Modellierung.

Für die beiden Aufgabenbereiche ergeben sich somit folgende Grundleistungen:

<u>Standmessungen</u>

- Monitoring zur Kontrolle/Überwachung der grundwasserleiterbezogenen Grundwasserdynamik und Grundwasserflurabstände einschließlich des Einflusses von ggf. vorhandenen Wasserhaltungsmaßnahmen im Untersuchungsraum (Zweck der Nutzung: Beregnungsbrunnen für Landwirtschaft bzw. Wassernutzung für Tierproduktion)
- Messungen zur Klärung von Kenntnisdefiziten (Zustandserfassung und Grundwasserabstromüberwachung)

Qualitätsmessungen

- Monitoring zur Ermittlung der natürlichen hydrogeologischen und hydrogeochemischen Schwankungen im Grundwasserleiterbereich, zur Gefahrenüberwachung bei einer $CO_2$-Immission in den flachen Aquifer, einschließlich Überwachung hinsichtlich Fahnenausbreitung des geochemisch veränderten Wassers
- Messungen zur Klärung von Kenntnisdefiziten (Zustandserfassung und Grundwasserabstromüberwachung)

Für die folgenden Punkte soll der prinzipielle Maßnahmeumfang dargestellt werden:

1. Untersuchungsturnus für das Monitoring 2010/2011
2. Umfang des Messnetzes für das Monitoring 2010/2011
3. Untersuchungsumfang des Analytikprogramms

Gemäß den vorgenannten Monitoringmaßnahmen Standmessungen und Qualitätsmessungen wird in Kap. 2.2 das Grundwassermonitoring 2010/2011 dargestellt.

## Notwendigkeit der Errichtung von GWMS

Im Rahmen der durchzuführenden Wasserstands- und Qualitätsmessungen wird eine Errichtung von GWMS für die o.g. Zielstellungen als erforderlich erachtet.

Entsprechend des derzeitigen Planungsstandes gehen wir für eine flächendeckende Zustandsbeschreibung von einer Errichtung von 12 Messstellen im Bereich des Modellgebietes aus. Ggf. ergeben sich hier noch Änderungen hinsichtlich der Anzahl der Messstellen bei der Realisierung der Bohrarbeiten. In der Anlage 1 sind die geplanten Messstellenstandorte für den Modellraum dargestellt. Die Erforderlichkeit der Messstellen begründet sich vor allem aus der geringen Messstellendichte im Modellgebiet/an den Modellrändern bzw. aufgrund der geringen Tiefenlagen vorhandener GWMS des LHW (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft) und des Landratsamtes Altmarkkreises Salzwedel.

Im Rahmen des Monitoringkonzeptes wurden basierend auf dem geologischen Strukturmodell, möglichen Pfaden auf denen $CO_2$ entweichen kann, dem Gefährdungspotential für Rezeptoren und vorhandenen Beobachtungspegeln mögliche Messstellenstandorte ausgewählt.

Im Bereich des Modellgebietes befinden sich bestehende Sondenplätze der GDF SUEZ (mit tiefen Altbohrungen) zu denen über die GDF SUEZ ein direkter Zugang besteht. Für andere Bereiche (B1 bis B5) im Modellraum war die Zugänglichkeit zu klären und die Erlaubnis bei den jeweiligen Eigentümern einzuholen. Hierzu laufen derzeit noch letzte Abstimmungen.

Zunächst wurden die Positionen der neuen GWMS einigermaßen gleichmäßig im Modellgebiet verteilt und hierbei soweit wie möglich die Bereiche der vorhandenen Sondenplätze der GDF SUEZ (mit den Tiefbohrungen Aaz140, Aaz144, Aaz145, Aaz147, Aaz149)) aufgrund der gegebenen Zugänglichkeit genutzt (B6 bis B12).

Für weitere im Modellraum erforderliche Stützstellen wurden 5 potentielle Bereiche (B1 bis B5) für neue GWMS ausgewiesen. Mit der Position B1 besteht die Möglichkeit, die natürlichen Gegebenheiten für den Bereich zu untersuchen, unter dem sich das $CO_2$ im Reservoirbereich in Richtung der Förderbohrung Aaz147 bewegt. Die Bereiche B2, B3 und B4 befinden sich im Grundwasserabstrom des Reservoirbereiches zwischen Aaz144 und Aaz147 für den Leckage-Szenarien simuliert werden sollen. Ohne GWMS in diesem Bereich bestünden keine Stützstellen für Geochemie und Grundwasserstände im Bereich sich ausbildender Leckagefahnen, woraus sich große Unsicherheiten bei den Simulationen ergeben würden. Der Bereich B5 wurde gewählt, um die hier vorhandene Lücke im Modellgebiet zu schließen. Im Nahbereich der Injektionsbohrung Aaz144 haben wir drei GWMS vorgesehen, um diesen Bereich mit höherem Gefährdungspotential räumlich besser auflösen zu können. Das Baseline-Monitoring müsste sich somit in diesem prioritären Bereich nicht nur auf eine Einzelmessstelle beschränken und Schwankungsbreiten wären besser abgesichert. Auch für den Fall einer Leckage im Injektionsbereich würde sich die Detektionssicherheit deutlich erhöhen.

## Standmessungen

Gegenstand der Betrachtungen sind die im Rahmen des Monitorings durchzuführenden Stichtagsmessungen der Wasserstände.

Untersuchungsturnus für das Monitoring 2010/2011

Eine großräumige Stichtagsmessung zur Erfassung der hydrologischen Systemzustände (Frühjahr – gefüllter Grundwasserkörper; Herbst - entleerter Grundwasserkörper) sollte zweimal pro Jahr durchgeführt werden. Die Stichtagsmessungen sollten Ende April/Anfang Mai und im Oktober 2010 durchgeführt werden. Hierzu sind Messungen an den im Modellgebiet vorhandener GWMS des LHW (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft), des Altmarkkreises Salzwedel und den neu zu errichtenden Messstellen durchzuführen. Hinsichtlich der Optimierung bzw. Verringerung des Messaufwandes kann ggf. eine zeitliche Überschneidung für die im Rahmen des Projektes durchzuführenden Messungen mit den Messungen des LHW erreicht werden. Weiterhin liegen dem LHW Langzeitdatenreihen zu den Wasserständen vor, auf die bei Erfordernis zurückgegriffen werden kann.

Parallel zu den geplanten Qualitäts- bzw. Beschaffenheitsmessungen (6 Probenahmen) in den neuen GWMS sollten die Wasserstände zur Aufzeichnung der aktuellen hydraulischen Situation ermittelt werden.

Umfang des Messnetzes für das Monitoring 2010/2011

Ziel des Wasserstandsmonitorings ist die Kontrolle und Überwachung der Grundwasserdynamik sowie der Grundwasserflurabstände vor dem Hintergrund ggf. vorhandener Wasserhaltungsmaßnahmen im Untersuchungsraum, was letztlich nur durch ein weitestgehend flächendeckendes Messstellennetz erreicht werden kann. Im Rahmen der großräumigen Stichtagsmessung im Frühjahr und Herbst soll ein Messumfang an ca. 40 GWMS durchgeführt werden, der überwiegend im Modellgebiet aber auch außerhalb liegende Messstellen beinhaltet.

Tab 1.: Ausgewählte GWMS für die Stichtagsmessungen im Frühjahr und Herbst 2010

| **Ausgewählte Grundwassermessstellen für Stichtagsmessung** | | | |
|---|---|---|---|
| B1 | B11 | LRA 330 | LRA 358 |
| B2 | B12 | LRA 129 | LRA 359 |
| B3 | LRA 232 | LRA 130 | LRA 234 |
| B4 | LRA 233 | LRA 131 | LRA 235 |
| B5 | LRA 263 | LRA 271 | LRA 45 |
| B6 | LRA 264 | LRA 272 | LRA 46 |
| B7 | LRA 265 | LRA 331 | 32330026 |
| B8 | LRA 269 | LRA 273 | 32330012 |
| B9 | LRA 270 | LRA 274 | BerBr24 |
| B10 | LRA 329 | LRA 266 | BerBr45 |

Zu den geplanten Qualitäts- bzw. Beschaffenheitsmessungen (6 Probenahmen) an den 12 neuen Messstellen sollen parallel die Stichtagsmessungen durchgeführt werden. Eine Einbeziehung von Wasserstandsmessungen des LHW ist vorgesehen.

# Qualitätsmessungen

Gegenstand der Betrachtungen sind die im Rahmen des Monitorings durchzuführenden Beschaffenheitsmessungen zur Beschreibung von Zustandsänderungen hinsichtlich der Stoffverteilung im „potentiellen“ $CO_2$-Austrittsbereich und ggf. die Erfassung der Ausbreitung des geochemisch veränderten Wassers im Grundwasserabstrom.

In der Konzeption zum Monitoring wurden nachfolgende Daten berücksichtigt:

- Daten seitens der GDF SUEZ zu den Sondenplätzen und zu den durch die GDF SUEZ unterhaltenen Messstellen im Modellraum,

- Daten seitens des LHW Sachsen-Anhalts zu dem unterhaltenen Messstellen im Modellraum,
- Daten seitens des Landratsamtes Altmarkkreises Salzwedel zu dem unterhaltenen Messstellen im Modellraum.

Wie bereits in Kap. 2.1 erwähnt, wurde nach Auswertung der Datenlage zu den existierenden GWMS festgestellt, dass diese zu den o.g. Zielsetzungen für das Grundwassermonitoring der flache Aquifere hinsichtlich der Qualitätsmessungen bzw. zur Beschaffenheit als nicht geeignet bewertet wurden.

Untersuchungsturnus und Umfang des Messnetzes für das Monitoring 2010/2011

Das Messnetz für das Monitoring zur Messung der Beschaffenheit wurde entsprechend Kap. 2.1 abgeleitet und beinhaltet nach derzeitigem Planungsstand 12 Messstellen. Eine ggf. mögliche Einbeziehung von zwei im Modellgebiet liegende tiefen Brunnen für Beregnungszwecke (Landwirtschaft) bzw. für die Tierproduktion ins Monitoring befindet sich noch aktuell in der Abstimmung.

Es ist vorgesehen das Monitoring an 6 Terminen (siehe unten) in den 12 Messstellen in 2010/2011 durchzuführen. Somit ist vorgesehen, in jedem Quartal beginnend mit dem 1.Quartal 2010 bis zum 2. Quartal 2011 je ein Monitoring durchzuführen.

Eine ggf. weitere erforderliche Präzisierung des Messstellenumfangs erfolgt anhand der gewonnenen Daten im Rahmen des Grundwassermonitorings 2010.

Somit ergibt sich zusammenfassend für die Untersuchungszyklen des Monitorings 2010/2011 folgender Vorschlag. Mit dem derzeitigen Kenntnisstand wird folgender Untersuchungsturnus und Beprobungsumfang abgeschätzt:

- 1. Monitoring im 1. Quartal 2010: Probenahme an 12 GWMS
- 2. Monitoring im 2. Quartal 2010: Probenahme an 12 GWMS
- 3. Monitoring im 3. Quartal 2010: Probenahme an 12 GWMS
- 4. Monitoring im 4. Quartal 2010: Probenahme an 12 GWMS
- 5. Monitoring im 1. Quartal 2011: Probenahme an 12 GWMS
- 6. Monitoring im 2. Quartal 2011: Probenahme an 12 GWMS

Damit sind für 2010 insgesamt ca. 48 Probenahmen und für 2011 ca. 24 Probenahmen im Rahmen des Grundwassermonitorings einzuplanen.

Untersuchungsumfang des Analytikprogramms

Sollte $CO_2$ aus einer Lagerstätte entweichen und in Kontakt mit oberflächennahem Grundwasser kommen, so werden hierdurch verschiedene Reaktionen innerhalb des Grundwassers und in Wechselwirkung mit der Gesteinsfestphase erfolgen. Diese Reaktionen führen zu einer Veränderung des Grundwasserchemismus, die über die Messung verschiedener Parameter im Rahmen des Grundwassermonitorings festgestellt werden kann. Eine detaillierte Darstellung der ablaufenden Reaktionen bzw. komplexen Wechselwirkungen bei einem $CO_2$-Eintrag kann der Zusammenstellung der CAU vom Juni 2009 entnommen werden.

Nachfolgend werden die gewählten Parameter zur Feststellung von $CO_2$-Einträgen ins oberflächennahe Grundwasser aufgeführt:

*Vor-Ort-Parameter:*

- pH-Wert,
- Sauerstoff,
- Redoxpotential,
- Elektrische Leitfähigkeit,
- Temperatur

*Weitere Parameter:*

- TIC “total inorganic carbon”
- Alkalität
- Magnesium, Kalzium, Eisen, Mangan, Natrium, Kalium (Standardkationen)
- Sulfat, Chlorid, Nitrat (Standardanionen)
- wenn am Standort auch andere Kat- und Anionen (wie z.B. Ammonium, Phosphat, Hydrogensulfid) in quantitativ relevanten Konzentrationen auftreten, sollten auch diese analysiert werden
- $CO_2$-Messung im Grundwasser (hierzu laufen derzeit noch Abstimmungen)
- Schwermetalle (hierzu laufen derzeit noch Abstimmungen)
- $^{13}C$- und $^{14}C$-Signaturen (hierzu laufen derzeit noch Abstimmungen)

# Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Übersichtslageplan vorhandene GWMS/Bohrungen im Untersuchungsgebiet mit Ansatzpunkten für neue GWMS für das GW-Monitoring der flachen Aquifere

# E.8 Probenahmeplanung

## Auswertung der Ausbaudokumente der Grundwassermessstellen GDF Salzwedel

| GWMS | GOK [m NN] | ROK [m ü GOK] | GWSp. [m u ROK] | FKUK [m u GOK] | FKOK [m u GOK] | Aktive FKOK [m u GOK] | Aktive Filterlänge [m] | Ø-Bohrloch [m] | V-Abpump [l] | Q-Pumpe [l/min] | kf-Wert [m/s] | F-Faktor [-] | L-Filter [m] | s - ber. [m] | PN-Zeit [min] | Tag 1 | Tag 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B9 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | 33,0 | 18,00 | 18,00 | 15,00 | 0,146 | 380 | 10 | 1,00E-04 | 0,1 | 9,00 | 0,56 | 38 | 1 | |
| B10 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | 50,0 | 8,00 | 8,00 | 42,00 | 0,146 | 1060 | 20 | 5,00E-05 | 0,1 | 40,00 | 0,50 | 53 | 1 | |
| B12 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 60,0 | 41,00 | 41,00 | 19,00 | 0,146 | 480 | 10 | 5,00E-05 | 0,1 | 16,00 | 0,63 | 48 | 1 | |
| B11 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 45,0 | 22,50 | 22,50 | 22,50 | 0,146 | 570 | 10 | 5,00E-05 | 0,1 | 20,00 | 0,50 | 57 | 1 | |
| B7 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 50,0 | 28,00 | 28,00 | 22,00 | 0,146 | 560 | 10 | 5,00E-05 | 0,1 | 7,00 | 1,43 | 56 | | 1 |
| B6 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 37,0 | 21,00 | 21,00 | 16,00 | 0,146 | 410 | 10 | 5,00E-05 | 0,1 | 14,00 | 0,71 | 41 | | 1 |
| B8 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 50,0 | 30,00 | 30,00 | 20,00 | 0,146 | 510 | 10 | 5,00E-05 | 0,1 | 11,00 | 0,91 | 51 | | 1 |
| B1 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 50,0 | 13,00 | 13,00 | 37,00 | 0,146 | 930 | 20 | 5,00E-05 | 0,1 | 17,00 | 1,18 | 47 | 1 | |
| B2 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 50,0 | 29,00 | 29,00 | 21,00 | 0,146 | 530 | 10 | 5,00E-05 | 0,1 | 9,00 | 1,11 | 53 | | 1 |
| B3 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 50,0 | 19,00 | 19,00 | 31,00 | 0,146 | 780 | 20 | 5,00E-05 | 0,1 | 15,00 | 1,33 | 39 | | 1 |
| B4 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 50,0 | 15,00 | 15,00 | 35,00 | 0,146 | 880 | 20 | 5,00E-05 | 0,1 | 19,00 | 1,05 | 44 | 1 | |
| ~~B5~~ *) | ~~0,0~~ | ~~0,00~~ | ~~0,0~~ | ~~50,0~~ | ~~15,00~~ | ~~15,00~~ | ~~35,00~~ | ~~0,146~~ | ~~880~~ | ~~2~~ | ~~5,00E-05~~ | ~~0,1~~ | ~~18,00~~ | ~~0,08~~ | ~~587~~ | | ~~1~~ |
| | | | | | | | | | | | | | | | Anzahl | 6 | 6 |
| | | | | | | | | | | | | | | | Dauer (min) | 287 | 240 |

| GWMS | Rechtswert | Hochwert | FRUK [m u GOK] | FROK [m u GOK] | Endteufe [m u GOK] | FRUK [m u ROK] | FROK [m u ROK] | Endteufe [m u ROK] | Einbautiefe [m u ROK] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B9 | | | 32,00 | 23,00 | 33,00 | 32,00 | 23,00 | 33,00 | 22 |
| B10 | | | 50,00 | 10,00 | 50,00 | 50,00 | 10,00 | 50,00 | 9 |
| B12 | | | 58,00 | 42,00 | 58,00 | 58,00 | 42,00 | 58,00 | 41 |
| B11 | | | 45,00 | 25,00 | 50,00 | 45,00 | 25,00 | 50,00 | 24 |
| B7 | | | 37,00 | 30,00 | 40,00 | 37,00 | 30,00 | 40,00 | 29 |
| B6 | | | 36,00 | 22,00 | 40,00 | 36,00 | 22,00 | 40,00 | 21 |
| B8 | | | 43,00 | 32,00 | 45,00 | 43,00 | 32,00 | 45,00 | 31 |
| B1 | | | 32,00 | 15,00 | 34,00 | 32,00 | 15,00 | 34,00 | 14 |
| B2 | | | 40,00 | 31,00 | 42,00 | 40,00 | 31,00 | 42,00 | 30 |
| B3 | | | 36,00 | 21,00 | 40,00 | 36,00 | 21,00 | 40,00 | 20 |
| B4 | | | 36,00 | 17,00 | 40,00 | 36,00 | 17,00 | 40,00 | 16 |
| B5 *) | | | 35,00 | 17,00 | 37,00 | 35,00 | 17,00 | 37,00 | 16 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Dauer (min) | 180 | 180 | auf/abbau/pn | | |
| Dauer (min) | 60 | 60 | TP | | |
| Dauer (min) | 90 | 90 | Fahrzeiten | | |
| Dauer (min) | 10,28 | 9,5 | Zeit komplett in h | | |
| Dauer (min) | 3 | 3 | Anreise/Abreise h | | |

**Bezugspunkt:** **Geländeoberkante (GOK) bzw. Rohroberkante (ROK)**

| | | | |
|---|---|---|---|
| FKUK | Filterkiesunterkante | FRUK | Filterrohroberkante |
| FKOK | Filterkiesoberkante | FROK | Filterrohrunterkante |
| Aktive FKOK | mit Grundwasser erfüllte Filterkiesmächtigkeit | | |

*) nach Erkenntnissen der 1. Beprobung 3x abzupumpen

# E.10 Ergebnisse des Grundwassermonitorings

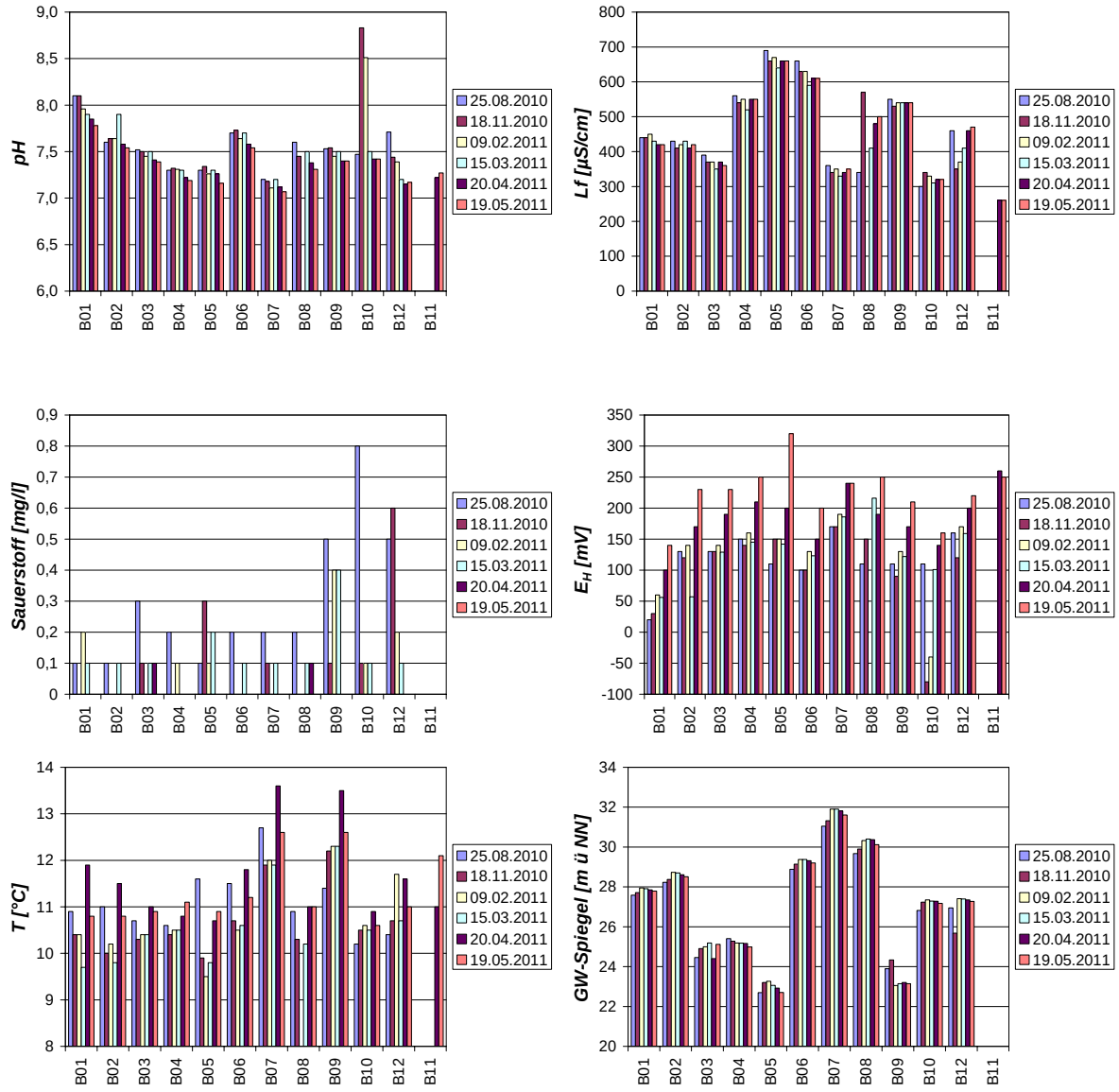



**Abbildung 1: Ergebnisse der Vorort gemessenen Parameter pH, elektrische Leitfähigkeit (Lf), Sauerstoff, Redoxpotential ($E_H$), Temperatur (T) und Grundwasserspiegel.**

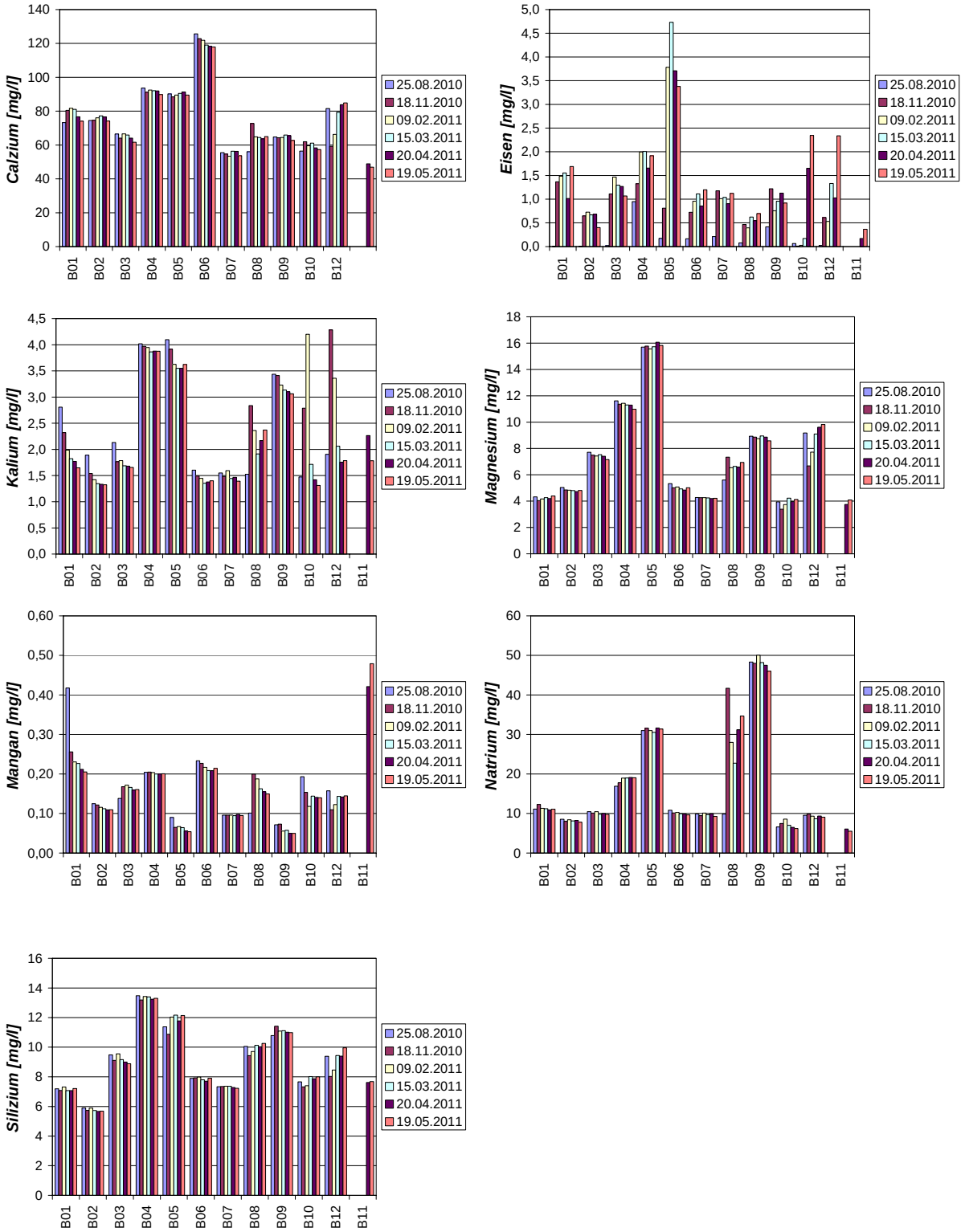



**Abbildung 2: Konzentrationen der Hauptkationen Calzium, Eisen, Kalium, Magnesium, Mangan, Natrium und Silizium.**

**Abbildung 3: Konzentrationen von anorganischem Kohlenstoff (TIC) und organischem Kohlenstoff (TOC), Alkalität, Chlorid und Sulfat.**

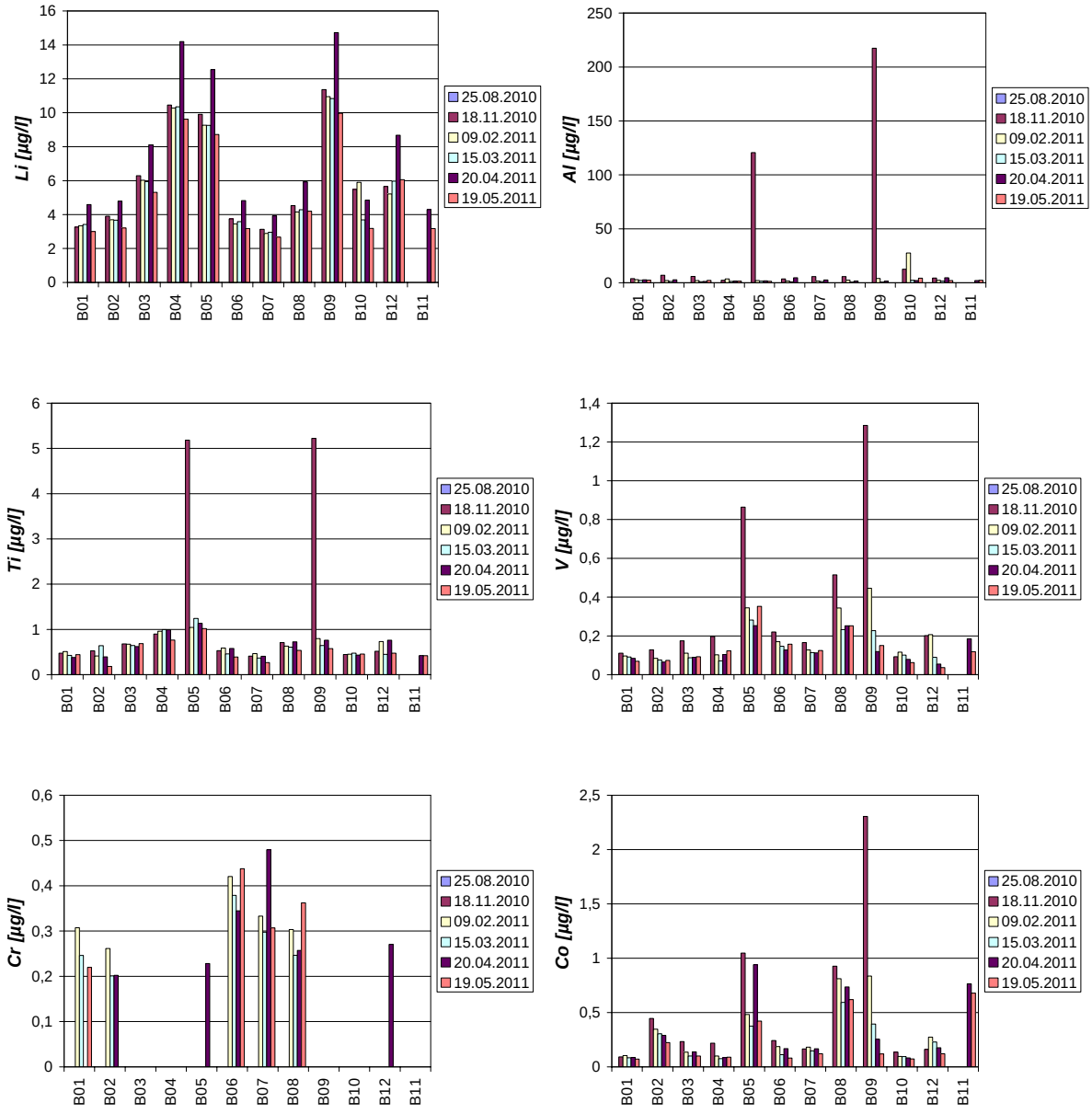



**Abbildung 4: Konzentrationen der Spurenelemente und Schwermetalle Lithium (Li), Aluminium (Al), Titan (Ti), Vanadium (V), Chrom (Cr) und Kobalt (Co).**

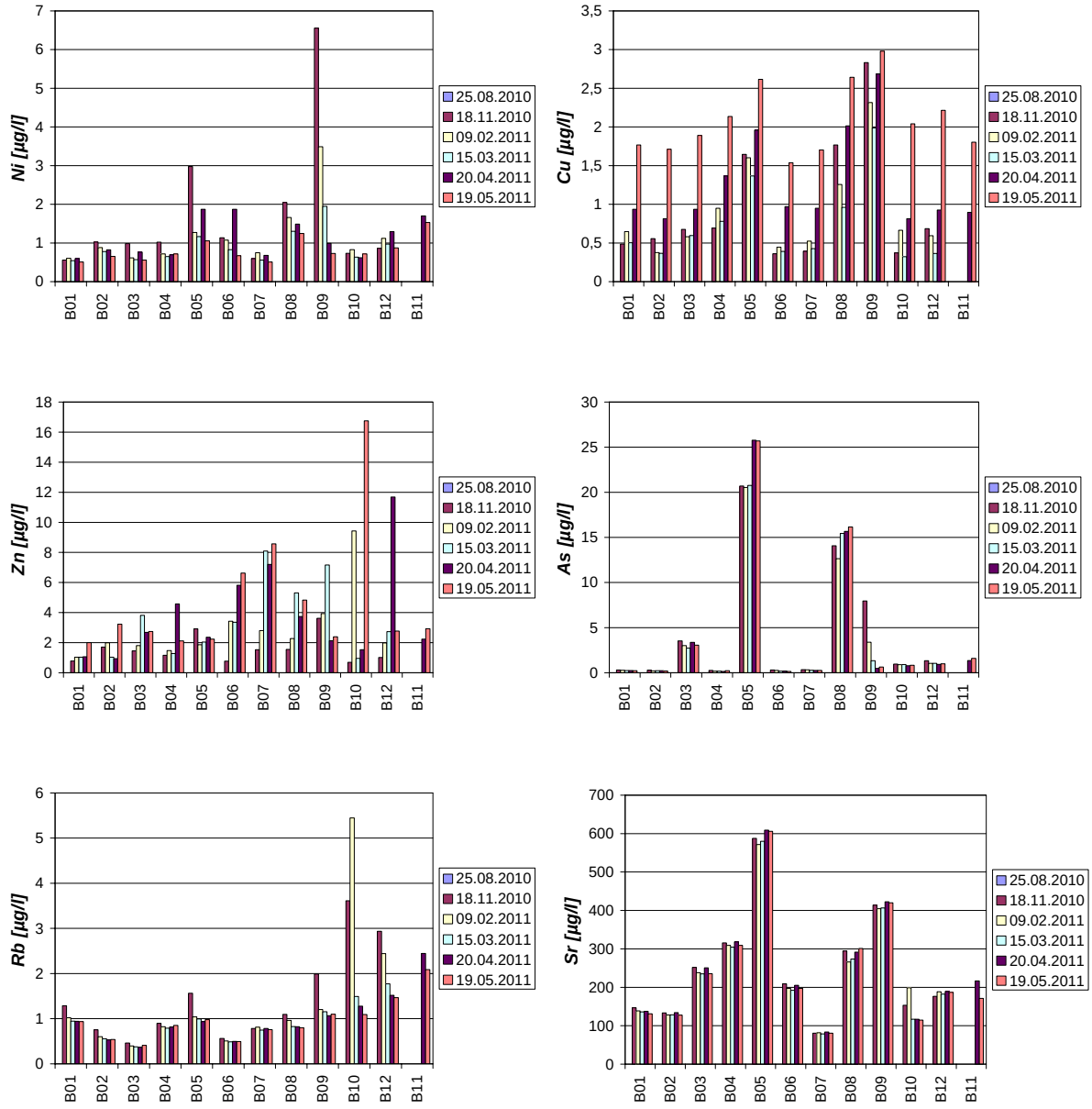



**Abbildung 5: Konzentrationen der Spurenelemente und Schwermetalle Nickel (Ni), Kupfer (Cu), Zink, (Zn), Arsen(As), Rubidium (Rb) und Strontium (Sr).**

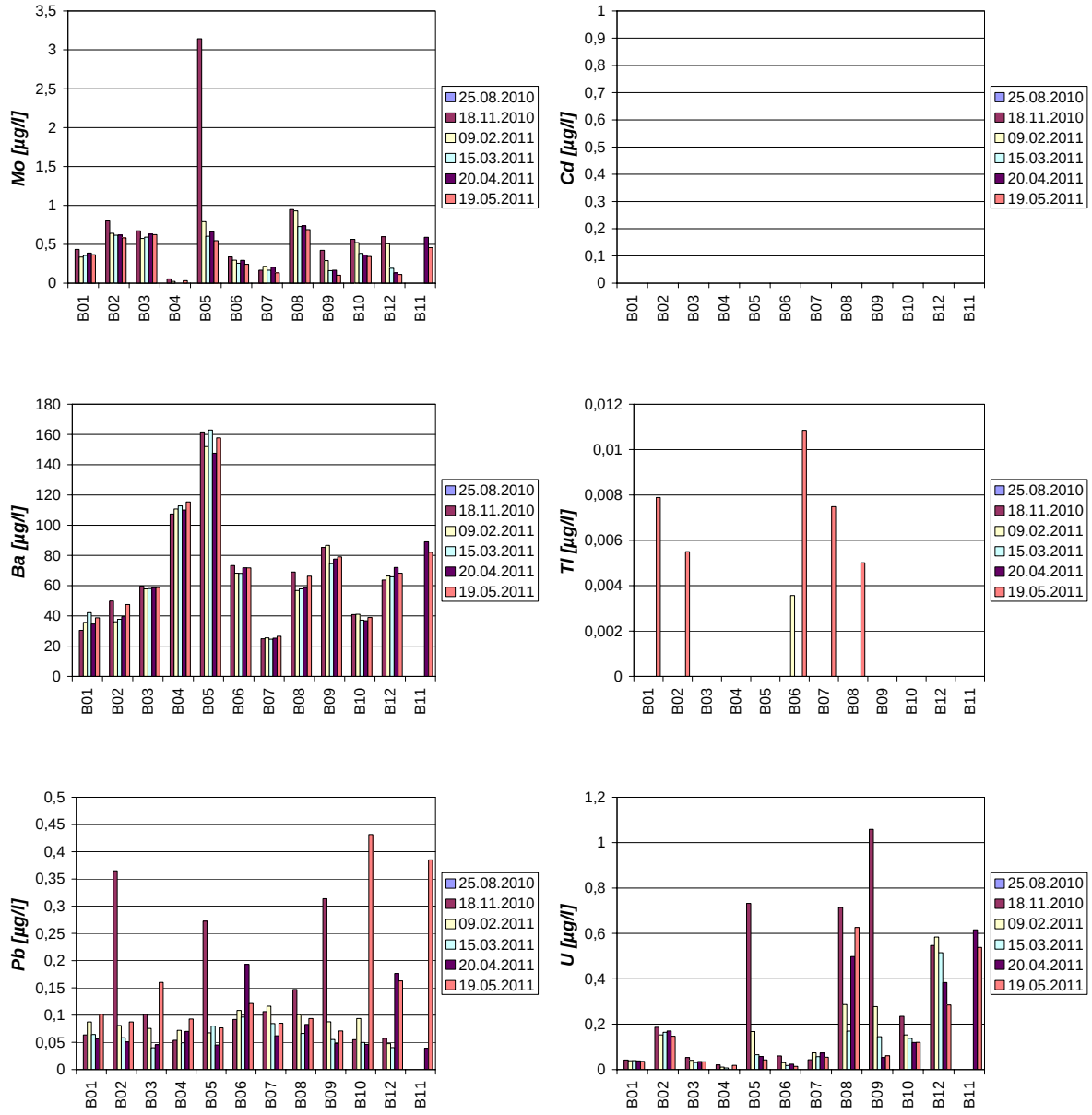



**Abbildung 6: Konzentrationen der Spurenelemente und Schwermetalle Molybdän (Mo), Kadmium (Cd), Barium (Ba), Thallium (Tl), Blei (Pb) und Uran (U).**

# E.10 Bericht Geoelektrik-Messungen

**Geoelektrik-Messungen in Salzwedel**

*Forschungsprojekt CLEAN in der Altmark*

Arbeitsbericht von:

Ali Ismaeil
Sebastian Siebrands
Thorsteinn Gudjonsson
Said Attia al Hagrey

Email: sattia@geophysik.uni-kiel.de
http://www.geophysik.uni-kiel.de

Abteilung der Geophysik
Institut für Geowissenschaften
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Feldmessungen:

Michael Gräber

Email: Geoserve-kiel@t-online.de
GeoServe, Kiel (www. Geoserve-kiel.de)

## 1- Einleitung und Ziele

Die Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojektes CLEAN in der Altmark (Sachsen-Anhalt). Im Rahmen von CLEAN soll im Erdgasfeld „Altmark“ südlich der Stadt Salzwedel in ca. 3000 Metern Tiefe die unterirdische Speicherung von etwa 100000 Tonnen $CO_2$ in einem Pilotprojekt erprobt werden, das aus der von Vattenfall am Kraftwerk „Schwarze Pumpe“ betriebenen CCS Oxyfuel- Pilotanlage geliefert werden soll (Abb. 1). Gleichzeitig soll das Vorhaben die Forderung des dort vorhandenen konventionell nicht förderbaren Resterdgases durch das Einpressen von $CO_2$ (sogenannte EGR, „enhanced gas recovery“) erforscht werden.
Diese Arbeit konzentriert sich auf die geoelektrische Untersuchung des oberflächennahen Untergrundes. Das Ziel ist die Kartierung und Charakterisierung der obersten 50 Meter des Untergrunds.
Die vorhandene (spärliche), oberflächennahe Information zeigt eine Wechsellagerung mit der Existenz von dünnen Zwischenschichten (1-5 m mächtig) in einer Tiefe von bis zu mehr als 10 m. Daher werden wir die Gleichstrom-Geoelektrik-Kartierung mit Hilfe von Oberflächen- und Bohrloch-Messungen durchführen, wobei konventionelle und nicht-konventionelle Elektrodenanordnungen verwendet werden. Vor der Felderkundung haben wir zunächst synthetische Modellrechnungen zur Optimierung und Erprobung der Messverfahren im Feld durchgeführt.

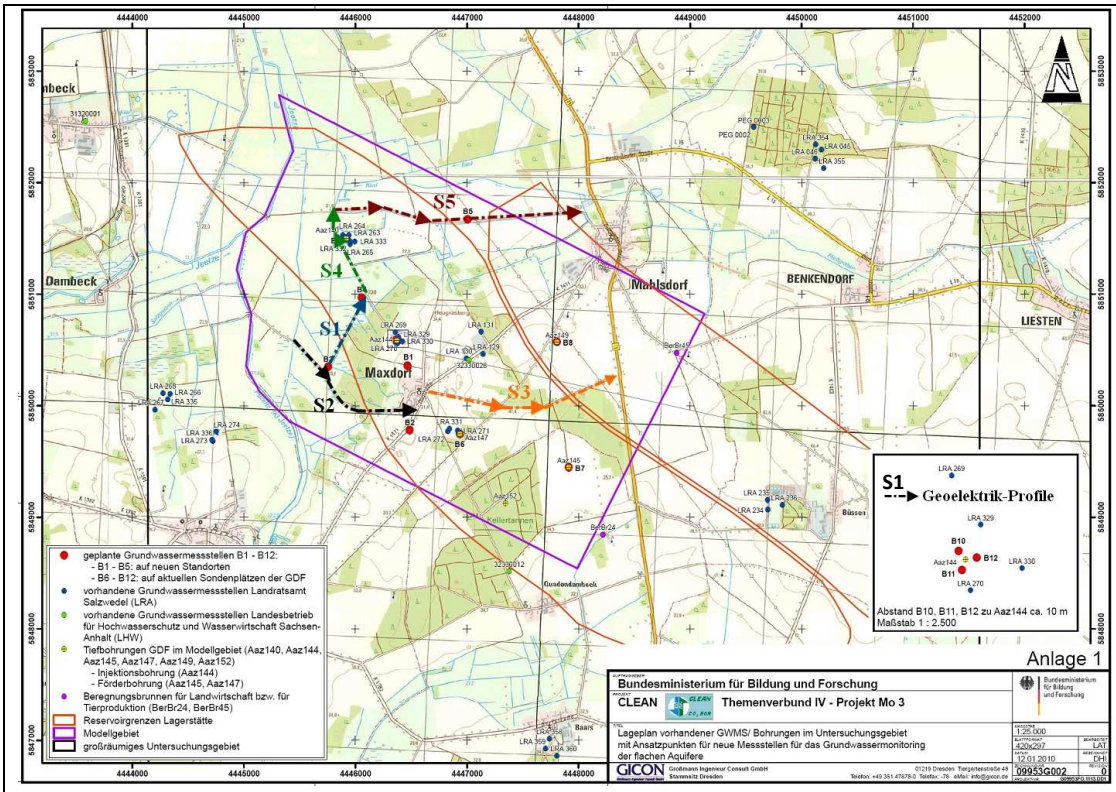


Abbildung 1: Lageplan des Untersuchungsgebietes im Kreis Salzwedel, Altmark, Ostdeutschland mit den Geoelektrikprofilen an der Oberfläche (S1 – S5) und zwischen Oberfläche und Bohrlöchern (B3 und B5).

## 2 Prinzip der Geoelektrik

Das Grundprinzip der Geoelektrik ist in vielen Textbüchern und Artikeln beschrieben (z.B. Keller & Frischknecht, 1966; Koeffoed, 1979; Reynolds, 1997). Geoelektrische Widerstandserkundungen benutzen normalerweise 4-Elektrodenmessungen. In einer Messung wird über zwei Elektroden ($C_1$, $C_2$) ein Gleichstrom (I) in den Boden eingespeist (Abb. 2). Dadurch wird ein Potentialfeld aufgebaut und über weitere zwei Elektroden ($P_1$, $P_2$) wird die Potenzialdifferenz (U), die von den Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund bestimmt wird, gemessen. Mit dem Strom und der Spannung lässt sich der spezifische elektrische Widerstand des Bodens (ρ) wie folgt berechnen:

$\rho = k.U/I$
mit: k = Geometriefaktor

Im homogenen Untergrund entspricht der gemessene Widerstand dem wahren Widerstand (ρ). Im inhomogenen Untergrund kann nur ein scheinbarer spezifischer Widerstand ($\rho_s$) des Untergrundes bestimmt werden.

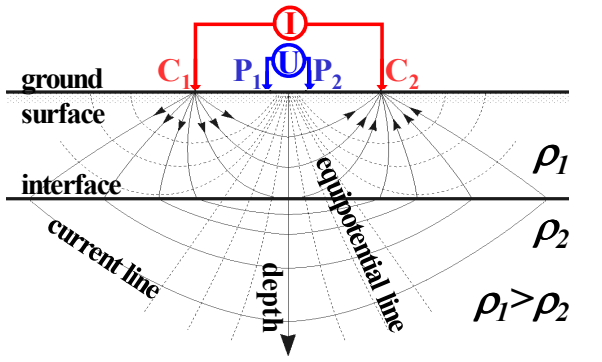



Abb. 2: 4-Punktanordnung Verlauf von Strom- und Äquipotenzlinienial in 2-Schichtmodel mit Widerstände $\rho_1$ und $\rho_2$. I = Stromintensität, U = Spannung, C, P = Strom- bzw. Potentialelektrode (Hagrey, 2007).

Bei geoelektrischen Messungen werden neben Oberflächenelektroden zusätzlich Elektroden in Bohrlöchern verwendet, um die Messungen innerhalb des Bohrlochs sowie zwischen diesem und der Oberfläche zu erweitern. Vorteil davon ist eine wesentlich bessere Auflösung in der Tiefe.

### 2.1 Elektrodenanordnung und Widerstandspseudosektion

Geoelektrische Messungen von der Erdoberfläche und in Bohrlöchern werden mit Hilfe moderner Multielektroden- und Multikanal-Systeme gesammelt. Die Messungen werden mit verschiedenen Elektrodenkonfigurationen durchgeführt, die von dem Erkundungsziel, der bestrebten Auflösung der Ergebnisse, der Untersuchungstiefe, usw. abhängig sind. Generell können geoelektrische Messungen in der Tripotential-Konfigurationen von α (CPPC), β (CCPP) und γ (CPCP) durchgeführt werden (Carpenter & Habberjam 1956). Die meist verwendeten konventionellen Konfigurationen sind Wenner, Schlumberger und Dipol-Dipol (Abb. 3a). Wenner- und Schlumberger-Konfigurationen gehören zu α-Messungen, wobei die Dipol-Dipol Konfiguration zu β-Messungen gehört. Eine gute Auflösung erreicht man für die Wenner- und Schlumberger-Anordnungen nur in der vertikalen Richtung, für die einfache Dipol-Dipol ($a$=1-4, n = 1-6) nur in der lateralen Richtung und für Dipol-Dipol mit Multiplen $a$-Werten ($a$=1-4, n = 1-6) in den beiden horizontalen und vertikalen Richtungen. Daher sollte die letzte Anordnung im Feld für Oberflächenmessungen verwendet werden.
Abbildung 3b zeigt ein Beispiel von einer möglichen Sequenz der so genannten "Pseudosektion" von 2D $\rho_a$-Messungen entlang einer Linie vom Multielektrodenarray mit Hilfe der Wenner-Anordnung.

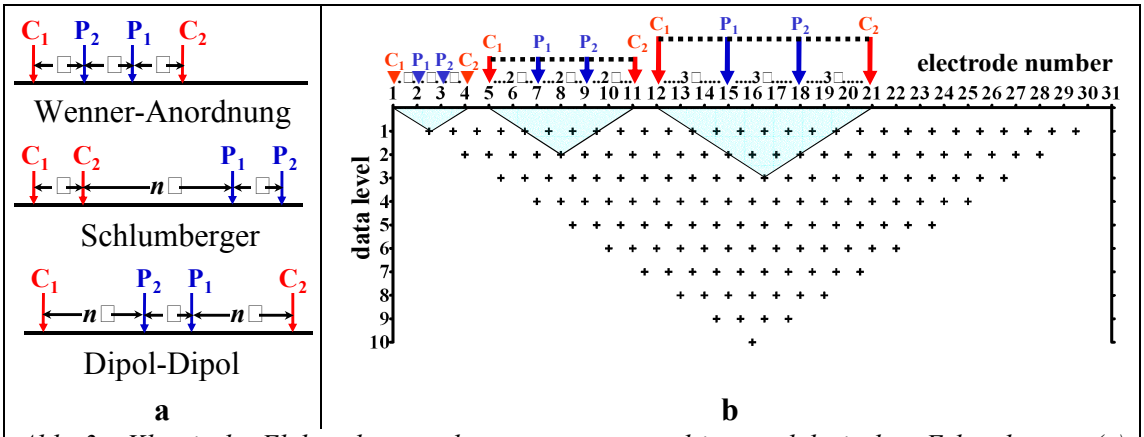



*Abb. 3: Klassische Elektrodenanordnungen angewand in geoelektrischen Erkundungen (a) und Datenakquisition von scheinbarer 2D Widerstands-Pseudosektion mit Hilfe von Wenneranordnung ($C_1P_1$ $P_2C_2$) (b). C/P= Strom-/Potentialelektrode, $a$= Elektrodenabstand, n=a-Multiplier.*

## 2.3 Modellierung und Inversionen

Die gemessenen 2D-Verteilungen (Pseudosektionen) scheinbarer Widerstände werden mit Hilfe eines Inversionscodes, der hier auf der Arbeit von Loke und Barker (1995) basiert, in wahre Widerstände umgerechnet. Das Ergebnis ist eine Widerstands-Verteilung als Funktion der Tiefe. Das Inversionsproblem ist nicht-linear und die Lösung ist nicht eindeutig. Daher wird das Problem mittels regulierter Optimierungsstrategie gelöst. Dies beinhaltet: (1) Eine Vorwärtsproblemlösung zur Berechnung von $\rho_a$ für ein gegebenes Untergrundmodel (mit wahrer $\rho$ Verteilung) und einer bestimmten Elektrodenanordnung (e.g. Dey & Morrison, 1979) und, (2) eine Inversionsproblemlösung zur Berechnung vom $\rho$-Model, das die $\rho_a$-Verteilung befriedigt. Für den Inversionsalgorithmus wird ein Optimierungsverfahren nach einer Methode der kleinsten Quadrate verwendet (Loke & Barker (1996)). Dieser Code ist für alle konventionellen sowie nicht-konventionellen Messanordnungen geeignet. Dieses Optimierungsverfahren versucht, die Differenz zwischen berechneten und gemessenen scheinbaren spezifischen Widerständen durch Veränderung des Modells zu minimieren („root-mean-square error“, RMSE). Im allgemein ist die bestmögliche Annäherung bereits erreicht, wenn sich der RMSE-Wert nicht signifikant ändert. Diese Nichtlinearität und Mehrdeutigkeit der Inversionsmethode kann aber dazu führen, dass das Modell mit dem kleinstmöglichen RMSE unrealistisch ist. Daher ist es notwendig, dass die Messungen unter der Berücksichtigung von a-priori Untergrundinformationen (z.B. aus Bohrungen) invertiert werden, um eine realistischere Lösung zu erreichen.

## 3 Ergebnisse synthetischer Modellrechnung

Die zunächst ausgeführte Modellrechnung für das Untersuchungsgebiet ermöglicht eine Auswahl geeigneter Feldmethoden und ihre Auflösbarkeit von dünnen Zwischenschichten im Untergrund. Aufgrund von vorhandenen Bohrdaten (Materialabsprache) wurden Untergrundmodelle (Eingangsmodelle) an Bohrungen B3

und B5 geoelektrisch simuliert (Abb. 4, siehe auch Abb. 1). Beide Modelle bestehen aus einer sandigen Schicht (35 m mächtig) mit einer tonigen Zwischenschicht (sie ist 4 m mächtig und 15 m tief in B3 und 2 m mächtig und 13 m tief in B5) und einer tonigen Basisschicht. Für den elektrischen Widerstand wurde 70 Ωm für Sand und 40 Ωm für Ton angenommenen. Die Erkundungen wurden mit Hilfe von mehreren Elektrodenarrays an der Oberfläche sowie in Bohrlöcher durchgeführt. Hier zeigen wir die Dipol-Dipol-Anordnung für die Oberflächenmessungen und zwei nicht-konventionelle Elektrodenanordnungen (αβcs und Multigradient, siehe Abbildung 5 für mehr Erklärung) für Oberflächen-Bohrloch-Messungen. Für diese Erkundung haben wir ein Oberflächenarray von 36 Elektroden (Elektrodenabstand = 2 m) und ein Bohrlocharray von 16 Elektroden (Tiefe 21-36 m, Abstand = 1 m) für Bohrung B3 und 19 Elektroden (Tiefe = 17-35 m, Abstand = 1 m) für Bohrung B5 verwendet.

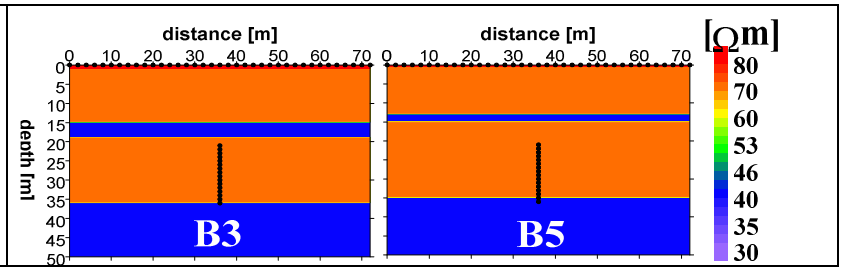



Abb. 4: Geoelektrische Simulationsmodel unter Bohrungen B3 und B5 mit den Elektrodenarrays (●)

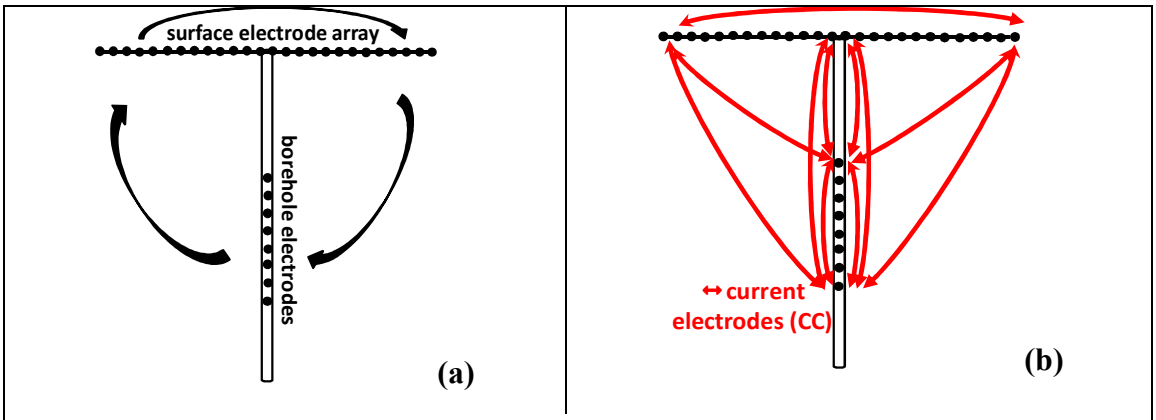



Abb. 5: Elektrodenanordnungen αβcs (a) und Multigradient (b) der kombinierten Oberflächen-Bohrlochmessungen. Bei der αβcs-Anordnung werden alle möglichen 4-Polmessungen jeweils für die α- (CPPC) und β- (CCPP) Konfiguration mit dem zirkulierenden (c) und symmetrischen (s) Mode durchgeführt. Bei der Multigradient-Anordnung werden für jede der 11 verschiedenen Stromelektrodenpaare (Orientierung) Potentialdifferenzen zwischen jedem anderen Elektrodenpaar gemessen.

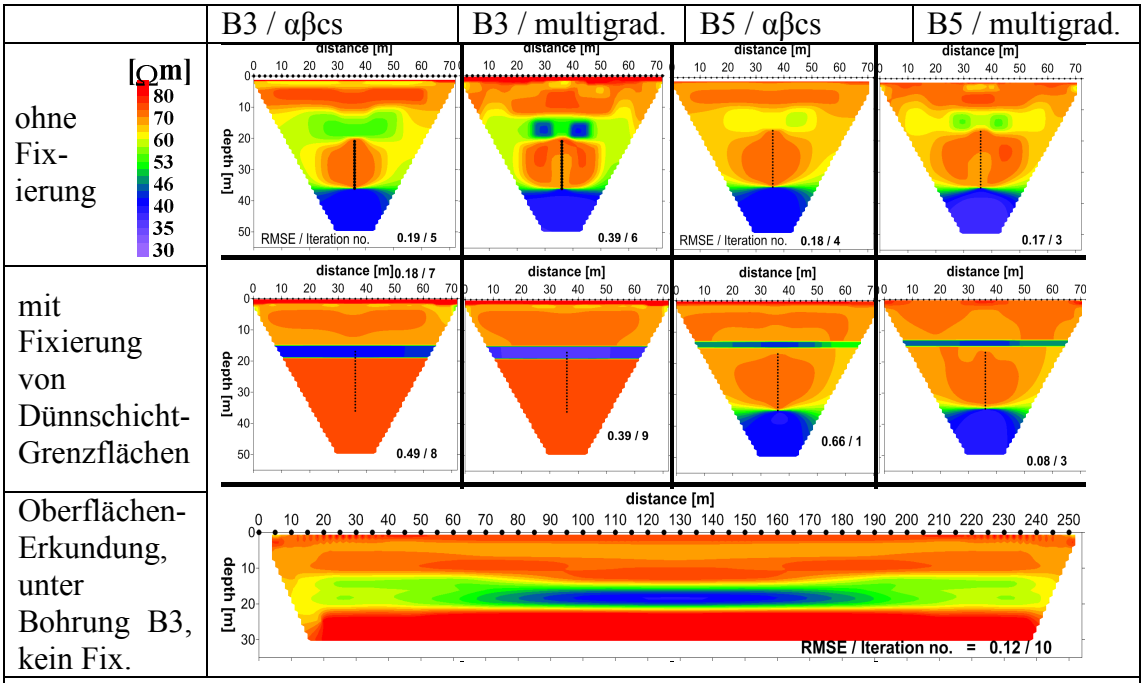



Abb. 6: Ergebnisse synthetischer Modellierungen mit den rekonstruierten Untermodellen (Vergleich mit dem Startmodell von Abb. 4).

Wir starteten mit dem synthetischen Untergrundmodell bzw. Eingangsmodell (mit der wahren elektrischen Widerstandsverteilung in den Schichtungen), rechneten vorwärts zur Bestimmung der synthetischen Daten für die verschiedenen Elektrodenkonfigurationen und invertierten anschließend diese Daten, um das Anfangsmodell zu rekonstruieren. Ein Vergleich des Eingangs- und Rekonstruktions- bzw. Ausgangsmodells (Abb. 4 und 6) zeigt, dass die verschiedenen Methoden das Untergrundmodell mit unterschiedlichem „Verschmieren“ auflösen kann. Die Auflösung dünner Zwischenschichten ist besser bei B3 (4 m mächtig) als bei B4 (2 m mächtig). Die Auflösung wird unter der a-priori-Fixierung der Grenzflächen der tonigen Zwischenschicht (die aus der der Bohrsäulenansprache bekannt ist) in der Inversion erheblich verbessert. Die Multigradient-Anordnung resultiert in einer besseren Modellauflösung als die αβcs-Konfiguration und wird daher für die Feldmessungen eingesetzt.

## 5- Feldlayout und Datenakquisition

Die Feldmessungen wurden von Fa. GeoServe, Kiel in einer engen Zusammenarbeit mit uns durchgeführt. Mit Hilfe der Multielektrodenapparatur (RESECS) wurden insgesamt sieben scheinbare Widerstandspseudosektionen gemessen. Fünf davon entlang der Elektodenarrays an der Oberfläche und zwei zwischen zwei Arrays an der Oberfläche und jeweils in Bohrloch B3 und B4. Aufgrund begrenzter Zugänglichkeit des Geländes folgten diese Profile befestigten und geknickten (nichtlinearen) Laufwegen. Die Oberflächenprofile haben eine Länge zwischen 800 m und 2240 m und eine Elektrodenanzahl von 160 bis 448 in einem Abstand von 5 m. Aufgrund eines gut-leitenden Oberflächenmaterials (d.h. höhere Energiedämpfung) wurden die Oberflächen-Messungen in der Wenner-Anordnung statt Dipol-Dipol durchgeführt. Im Gegensatz zu der Dipol-Dipol-Anordnung (vorher geplant für die Feldmessungen)

hat die Wenner-Anordnung ein höheres Messsignal. Dies ergibt eine stärkere Signalamplitude als die des Hintergrundrauschens und somit Daten mit geringeren Fehlern. Für die Oberflächen-Bohrloch-Messungen wurde ein Oberflächenarray von 62 m Länge (32 Elektroden je 2 m Abstand) und Bohrlocharray von 7 m (8 Elektroden je 1 m Abstand, Tiefe=22-29) in B3 und 8 m (9 Elektroden je 1 m Abstand, Tiefe= 18-25 m) in B4 verwendet.

## 6- Auswertung der Felmessungen

Die Datensätze wurden zunächst von extremen Werten mit Spannungs- und Strommängeln gefiltert und ihre Werte der Geometriefaktoren für nichtlineare Profillinien in einer co-linearen Linie korrigiert. Jeder Datensatz wurde mit unterschiedlichen Inversionsparametern (hauptsächlich Regulierung) mehrfach invertiert und daraus das beste Modell (mit der kleinsten RMSE- und, Iterationszahl) für die weitere Auswertung und Interpretation hier dargestellt. Abbildungen 7-8 zeigen die Übersicht und einzelne Sektionen der Oberflächenmessungen. Da die Sedimentsäule in den Bohrlöchern B3 und B4 bekannt sind, wurden ihre Messungen ohne und mit der Fixierung der Grenzflächen der dünnen Zwischenschicht invertiert (Abb. 9).
Eine genaue Betrachtung dieser resultierenden Untergrundmodelle angewandter elektrischer Widerstandstomographiemethode (ERT) von der Oberfläche und den Bohrlöchern zeigen:

- Der Untergrund zeigt eine heterogene Wechsellagerung mit dünnen Zwischenschichten und besteht generell aus drei Hauptschichten.
- Dieser heterogene Untergrund ist teilweise durch industrielle und anthropogene Infrastruktur gestört, insbesondere bei der Sektion S3, die ein dichtes Pipeline-Netzes überquert.
- Der spezifische elektrische Widerstand des Untergrundes nimmt generell von Süd nach Nord (mit einem Faktor von ca. 4) ab.
- Im südlichen Teil des Messgebietes erreichen die höchsten Widerstandswerte >800 Ωm an der Oberfläche und nehmen generell mit zunehmender Tiefe ab.
- In westlichen und nördlichen Teilen des Messgebietes erreichen die niedrigsten Widerstandswerte <20 Ωm in der mittleren Schicht, die von hochohmigen Schichten umgeben ist. Diese Schicht zeigt eine laterale Variabilität der Mächtigkeit.
- Basierend auf der Sedimentsequenz aus der Bohrsäule kann diese geringohmige Mittelschicht als eine tonige Abdichtungsschicht gegen aufwärtssteigendes Gas/$CO_2$ betrachtet werden.

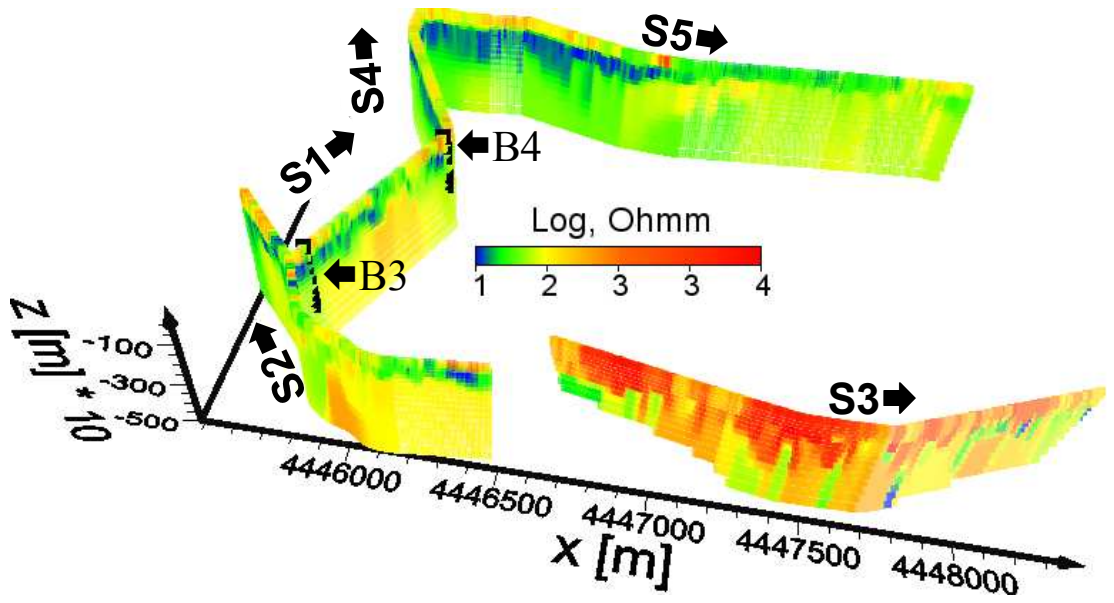



Abb. 7: Überblick geoelektrischer Untergrundmodelle aus allen Messungen. Man kann erkennen, dass der Widerstand in der Richtung Süd-Nord generell abnimmt, d.h. die südliche Sektion S3 erhöhte Widerstände (ca. 4-fach) als alle anderen Sektionen aufweist. S1➡- S5➡: Oberflächenprofile, B3-B4: Bohrlöcher

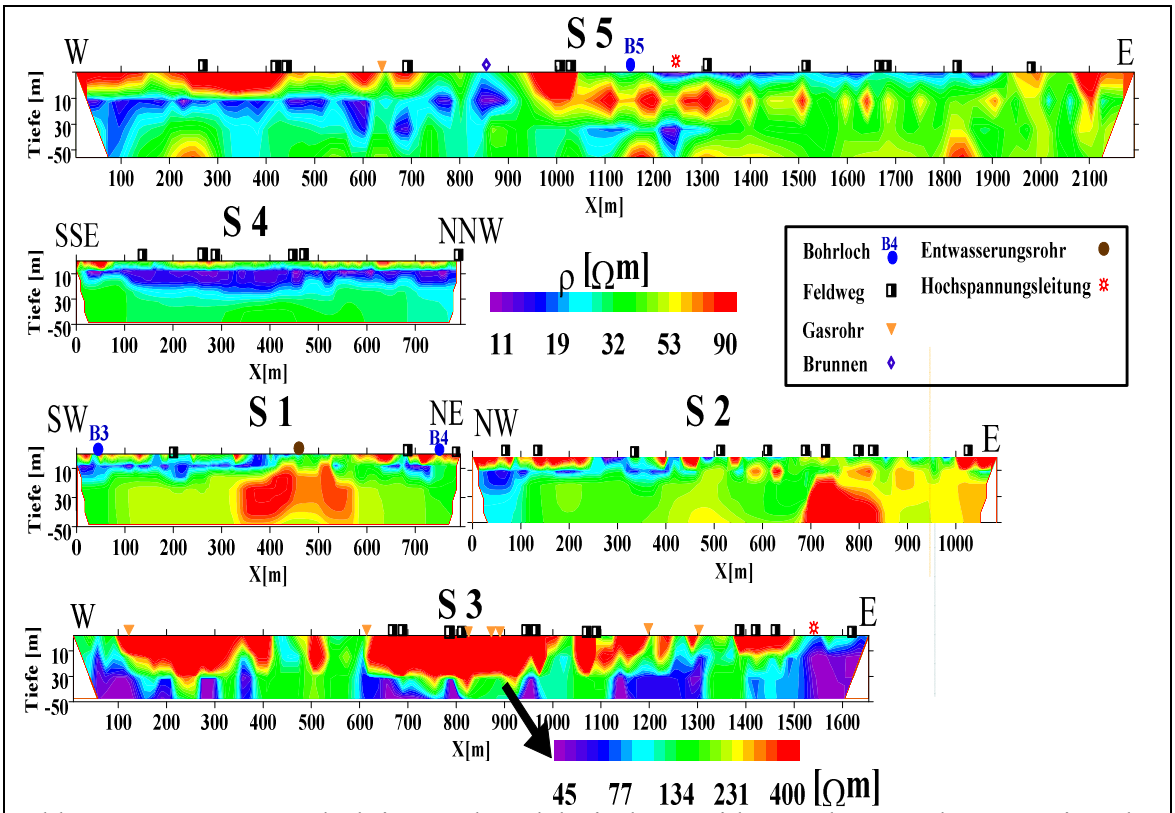



Abb. 8: 2D-Untergrundsektionen des elektrischen Widerstandes aus der Inversion der Feldmessungen entlang der Oberflächenprofile (S1 - S5, sehe Abb. ?)

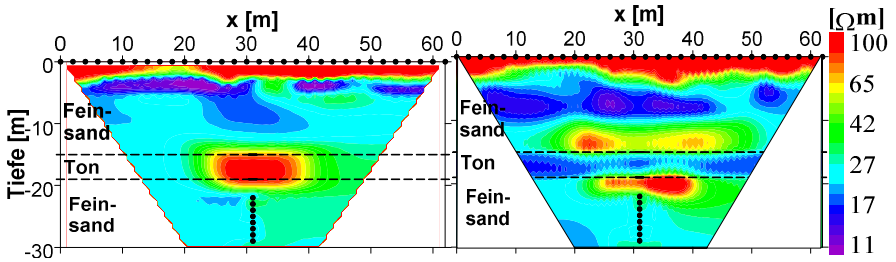
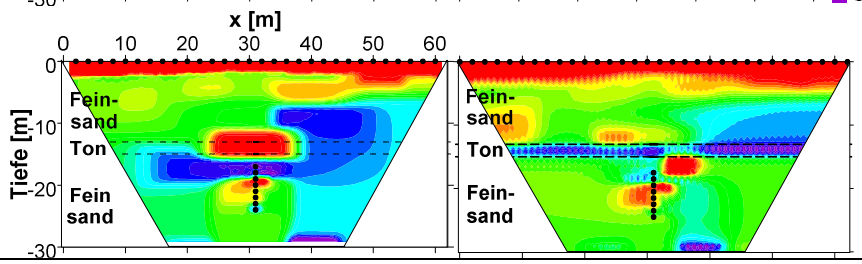
| Bohrloch | ohne Fixierung | mit Fixierung |
|---|---|---|
| B3 |  | |
| B4 |  | |



Abb. 9: 2D Untergrundsektionen des elektrischen Widerstandes aus der Inversion der Feldmessungen entlang Oberflächen-Bohrloch-Elektrodenarrays (siehe Abb. ?)

## 7- Summary and conclusion

In the scope of the research project CLEAN we have carried out geoelectrical studies for the near surface zone in the abandoned hydrocarbon gas field of the Altmark area, Germany. The surface and subsurface of this gas field is crossed by many industrial infrastructures (metallic pipe lines and boreholes, cables, power lines, etc.). A synthetic modelling study preceded the field survey which was conducted by GeoServe, Kiel (in collaboration with us). This modelling study is based on the sparse a-priori information from boreholes to find out the more suitable field layout and electrode configurations for the surface and borehole (of limited depth accessibility) surveys. This study aims at mapping of the underground, particularly intercalated (thin) clay layers which may act as a seal to prevent any possible gas leakage to reach the ground surface. An investigation of the resulting 2D models of resistivity tomography (Fig. 1) reflects the following:

1) The subsurface is heterogeneous with intercalated thin layers
2) The resistivity generally decreases (by a factor of 4) from south to north within the study area
3) In the southern part, the resistivity is highest within the surface layer and generally decreases with increasing depth
4) The western and northern parts show a low resistivity layer (<20 Ωm, clay?) of variable thicknesses (1 - >5 m) which is sandwiched between 2 resistive layers

Since the area shows high heterogeneity as well as anthropogenic noises particularly in the near surface zone, it is advisable to fix the location of the electrode lines for monitoring far away from these noises. If it is difficult to get the exact maps of the industrial and municipal infrastructures, we recommend a quick survey of the area using mobile multisensor-platform of electromagnetic induction and reflection (radar) techniques to map these disturbances. Any available subsurface information from previous investigations and boreholes (e.g. logs) are indispensible for a more reliable hydrogeologic interpretation of geoelectric models. Considering these recommendations, the constrained inversion of the monitoring data using the

subsurface knowledge a-priori will result in more realistic underground models and their time-lapses will give the changes in the physical properties of the sediments (including pore fillers) with time in a more accurate manner. Results of this ground survey may be used to constraint the inversion results of the aeroelectromagnetic data conducted by SkyTem (www.skytem.dk) for the study area.

**Literatur:**

Carpenter, E.W. & Habberjam, G.M., 1956, A tripotential method for resistivity prospecting. Geophysics. 21, 455-469.
Dey, A., Morrison, H.F., 1979. Resistivity modelling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. Geophysics 44, 753–780.
Hagrey, S.A. al, 2007, Geophysical imaging of root zone, trunk and moisture heterogeneity: Journal of Experimental Botany, 58, 839-854.
Koefoed, O.,1979, Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurements. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company.
Reynolds, J.M., 1997, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics: Wiley & Sons.
Keller, G.V. & Frischknecht, F.C., 1966, Electrical methods in geophysical prospecting. Oxford: Pergamon Press.
Loke, M.H & Barker, R.D., 1995, Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosection: GEOPHYSICS, 60, 1682-1690.
Loke, M.H. & Barker, R.D., 1996, Rapid least square inversion of apparent resistivity pseudosections using quasi-Newton method. Geophysical Prospecting 48,131–152.

**Anhang**

**Beschreibung geoelektrischer Feldsektionen**

**Sektion S1:** Im Widerstandsmodell von Profil S1 ist eine horizontale Struktur mit niedrigem Widerstand bei der Tiefe zwischen 9 und 13 m erkennbar, diese Struktur ist ca. 400 m lang und taucht zur Hälfte der Sektion an der Oberfläche auf. Zwischen 350 und 600 m ist deutlich eine massive Struktur mit hohem elektrischem Widerstand zu erkennen. Diese Anomalie befindet sich in einer Tiefe von 15 m bis 50 m.

Ab x= 650m sieht man noch Spuren von der horizontalen Struktur. Diese ist im Bereich von B3 gut erkennbar, im Untergrund von B4 erscheint sie jedoch nicht in den Sektionsdaten von S1.

**Sektion S2:** Erkennbar ist eine Schicht mit niedrigem Widerstand, die an manchen Stellen nicht mehr horizontal ist. Vermutlich liegt hier die gleiche Struktur vor, wie in Profil S1. Eine Anomalie ist deutlich erkennbar, besitzt einen hohen elektrischen Widerstand und liegt zwischen ca. x= 700 m und x= 850 m. Ab 800 m werden die Widerstände höher als am Anfang des Profils. Diese Zunahme der Widerstände zum östlichen Sektionsende stimmt mit dem Trend der Sky-TEM-Daten (Tiefe 30-40m) überein.

**Sektion S3:** Die Widerstandsverteilung im Profil S3 ist sehr heterogen, da sich das Profil auf Rohrgasen befindet. Das Messprofil läuft entlang einer asphaltierten Straße und überquert dabei ein Netzwerk von Pipelines. Dieser Zustand führt zu Störungen und einer sehr heterogenen Widerstandsverteilung. In den Sky-TEM-Daten ist dies für die oberen Zehnermeter erkennbar.

**Sektion S4:** In diesem Profil ist eine horizontale Struktur mit niedrigen Widerständen in einer Tiefe zwischen 10 und 18 m erkennbar. Der Widerstand liegt zwischen 10 und 20 Ωm und bleibt bei diesem Wert entlang der Struktur. Im direkten Vergleich zu den benachbarten Sektionen zeigt sich hier eine sehr homogene Widerstandverteilung im Untergrund. Eine horizontale Struktur niedrigen Widerstands von etwa 10 bis 20 Ωm verläuft beinahe kontinuierlich, ab einer Tiefe von 10 m, entlang der Sektion. Der Großteil des Umgebungswiderstands beträgt ca. 40 Ωm. Anhand von Bohrung Aaz 140, welche ca. bei x=525 m liegt, könnte es sich bei der leitfähigen Struktur um eine tonhaltige Schicht handeln, die wiederum von Feinsand umgeben ist. Das Fehlen hoher elektrischer Widerstände entlang der Sektion S4 wird auch durch die Sky-TEM-Daten bestätigt.

**Sektion S5**: Die Sektion des Profils S5 zeigt eine Struktur zwischen 0 m und 450 m mit einem hohen Widerstand > 85 Ωm. Diese Struktur verläuft von der Erdoberfläche bis zu einer Tiefe von ca. 10 m. Zwischen x= 950 und 1030 m taucht diese Anomalie wieder auf. Ab 1030 m erstreckt sich diese Struktur in größere Tiefen (zwischen 9 und 15 m Tiefe) und verläuft horizontal aber nichtkontinuierlich bis zum Ende des Profils. In der gleichen Tiefe wie diese Anomalie ist eine horizontale Struktur mit niedrigem Widerstand erkennbar, die vom Anfang des Profils bis ca. 900 m verläuft. Diese Struktur fängt kontinuierlich bei ca. 400 m an und danach verläuft sie nichtkontinuierlich bis 900 m. Diese niedrigen Widerstände sind vermutlich durch Feuchtigkeit erklärbar. Diese Struktur fängt am Sektionsbeginn als zusammenhängende Schicht (10 - 20 Ωm) an und verläuft ab ca. x= 400 m gestückelt bis ca. x= 900 m. Danach lässt sich in etwa gleicher Tiefe eine Schicht vermuten, die mit deutlich höherem elektrischen Widerstand (> 85 Ωm) zum Ende hin in den Umgebungswiderstand (ca. 40 Ωm) ausläuft. In den Sky-TEM-Daten (Tiefe 10 – 20 m) ist für S5 bei ca. x= 800 m ein Übergang des elektrischen Widerstands zu erkennen. Westlich dieses Punktes dominieren niedrige Widerstände, östlich davon entsprechend höhere. Dieser Übergangsbereich zeigte sich möglicherweise auch in der näheren Umgebung des Messprofils. Zum Zeitpunkt der Messung war, ab ca. x=800 m bis zum Profilende, rötlicher Sand auf umgepflügten Ackerflächen zu sehen, der im vorderen Bereich zuvor fehlte.

Im Bereich des artesischen Brunnens (ca. x= 915 m) verläuft eine niederohmige Struktur nahezu vertikal in die Tiefe. Diese Erscheinung könnte durch einen erhöhten Wassergehalt um den Brunnen herum bedingt sein. Die Informationen aus der Bohrung von B5 über die Tiefe und Mächtigkeit einer geringohmigen Tonschicht, ab ca. 35 m Tiefe, deuten in der Sektion S5 auf einen Widerstandsübergang in dieser Tiefe hin, der durch den Wechsel von sandigem zu tonigem Material zu vertreten wäre.

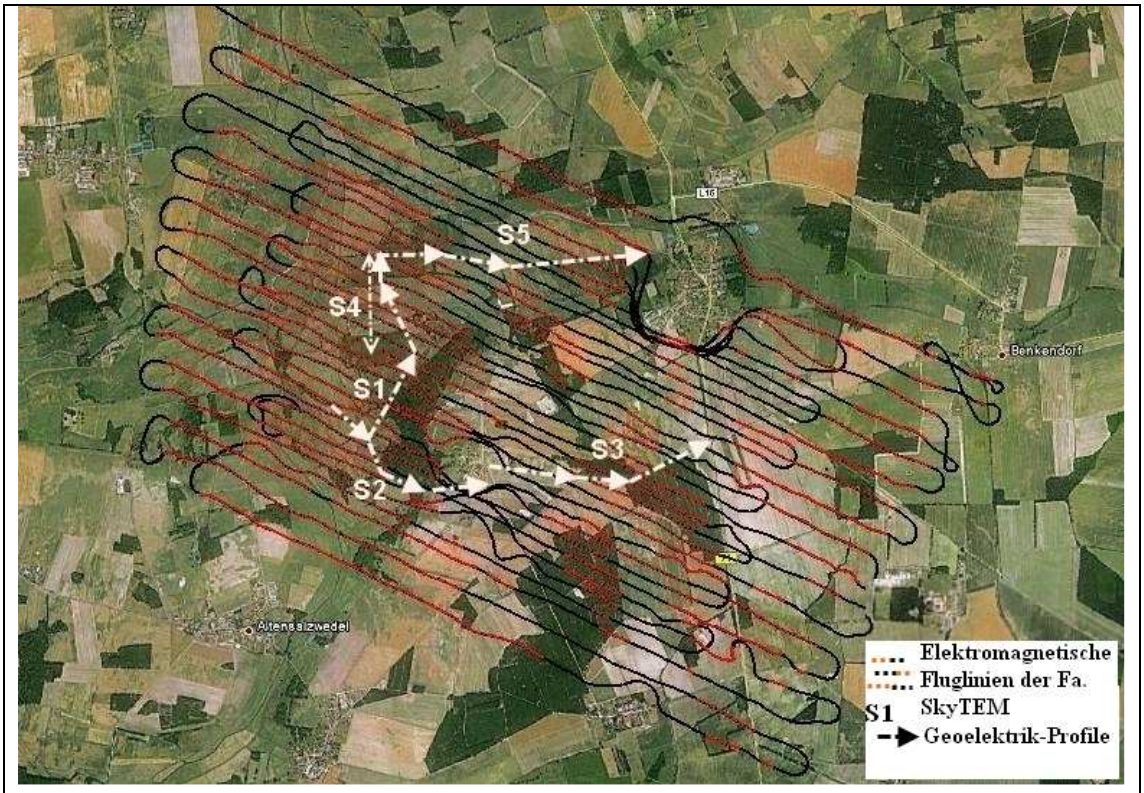



Abbildung: Lageplan des Untersuchungsgebietes im Kreis Salzwedel, Altmark, Ostdeutschland mit der Übersichtskizze für die Geoelektrikprofile an der Oberfläche (S1 – S5) und aeroelektromagnetische Fluglinien.

# E.11 Bericht SkyTEM-Messungen

SkyTEM Survey Maxdorf 2011 - HydroGeophysics Group - Aarhus University

# SkyTEM Survey Maxdorf 2011

Report number 2011-04-01, July 2011

HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

# Table of Contents

**1. Project Summary ..... 3**

**2. Introduction ..... 4**

**3. Data Collection ..... 5**

3.1 The survey area ..... 5

3.2 Overview of the SkyTEM system ..... 6

Instrument ..... 7

Measurement procedure ..... 7

Penetration depth ..... 7

3.3 SkyTEM – technical specifications ..... 8

3.4 Calibration of the SkyTEM system ..... 11

3.5 High altitude test ..... 11

3.6 Repeatability and altitude tests during production flight ..... 11

**4. Processing of the SkyTEM data ..... 12**

4.1 Positioning ..... 12

4.2 Roll and pitch data ..... 13

4.3 Altitude data ..... 13

4.4 Voltage data ..... 13

4.5 Processing - Technical specifications ..... 16

**5. Inversion of the SkyTEM data ..... 17**

5.1 Spatially constrained inversion ..... 17

5.2 Depth of Investigation (DOI) ..... 19

DOI – technical description ..... 19

5.3 Inversion - Technical specifications ..... 22

**6. Thematic maps and cross sections ..... 23**

6.1 Mean resistivity maps ..... 23

6.2 Cross sections ..... 25

6.3 Location map, QC-maps ..... 25

Model location and flight lines ..... 25
Moment indication ..... 25
Flight altitude ..... 25
Data residual ..... 25
Depth of investigation (DOI) ..... 26

**7. Conclusion ..... 27**

**8. References ..... 28**

**Appendix I: Location maps, QC maps ..... 30**

**Appendix II: Cross sections ..... 31**

**Appendix III: Mean Resistivity maps ..... 32**

**Appendix IV: Digital deliveries ..... 33**

Directories of the digital deliveries ..... 33

# 1. PROJECT SUMMARY

In March 2011 SkyTEM Survey ApS carried out a comprehensive SkyTEM survey on behalf of Universität Kiel. Aarhus University subsequently undertook the task to process and invert the dataset using in-house developed algorithms. Preliminary maps and cross sections were delivered to Universität Kiel in May 2011.

The collected SkyTEM data were carefully processed to remove couplings and noise. After processing and preliminary inversions the data have been inverted using a spatially constrained inversion (SCI) approach. In general the data quality is good, yielding a resolution of the geology from the survey to a depth of approximately 250 m.

The SkyTEM survey reveals a new and comprehensive three-dimensional picture of the subsurface of the area.

| **SkyTEM survey, Maxdorf** | |
|---|---|
| Client | Universität Kiel, Institut für Geowissenschaften |
| Contact person | Esben Auken, Aarhus University |
| Locality | Maxdorf, Germany |
| Field Period | The 14th to the 20th March 2011 |
| Line km planned | 150 km |
| Line km acquired | 154 km |
| Line separation | 100 or 200 m* |
| Average flight speed | ~19 m/s |
| Average flight altitude (frame height) | 40 m above the ground |

*Table 1. Project summary. *100 m in the center region, 200 m in the outer region.*

# 2. INTRODUCTION

SkyTEM Survey ApS has carried out a geophysical mapping with the airborne transient electromagnetic method (SkyTEM) in Maxdorf, southeast of Salzwedel in Germany. The data were subsequently processed and inverted using in-house developed processing and inversion algorithms by the HydroGeoPhysics Group, University of Arhus.

This report presents the results and documents the processing and the inversion of the data. Chapters 3 - 5 describe the data collection, processing and inversion. Chapter 6 describes the geophysical maps and cross sections found in Appendix I: - III. Chapter 7 concludes the report.

Upon request, the Aarhus Workbench Workspace that holds the inversion result can be delivered.

Project management: Associate professor, PhD Esben Auken. Data processing and reporting: M.Sc. Nikolaj Foged, M.Sc. Bjarke Roth and M.Sc. Peter Mikkelsen.

# 3. DATA COLLECTION

## 3.1 The survey area

The Maxdorf survey was carried out by SkyTEM Survey ApS in the period March 14 - 20, 2011. The survey area is located around Maxdorf, southeast of Salzwedel in Germany (Figure 1). The survey holds approximately 154 line km of data. The line spacing is 100 m in the center region and 200 m in the outer region. Every second line from the center region was extended to increase the regional coverage (this is most clearly visible on the left side of Figure 1). The average flight speed was approximately 19 m/s with an average flight altitude of 40 m (frame height).

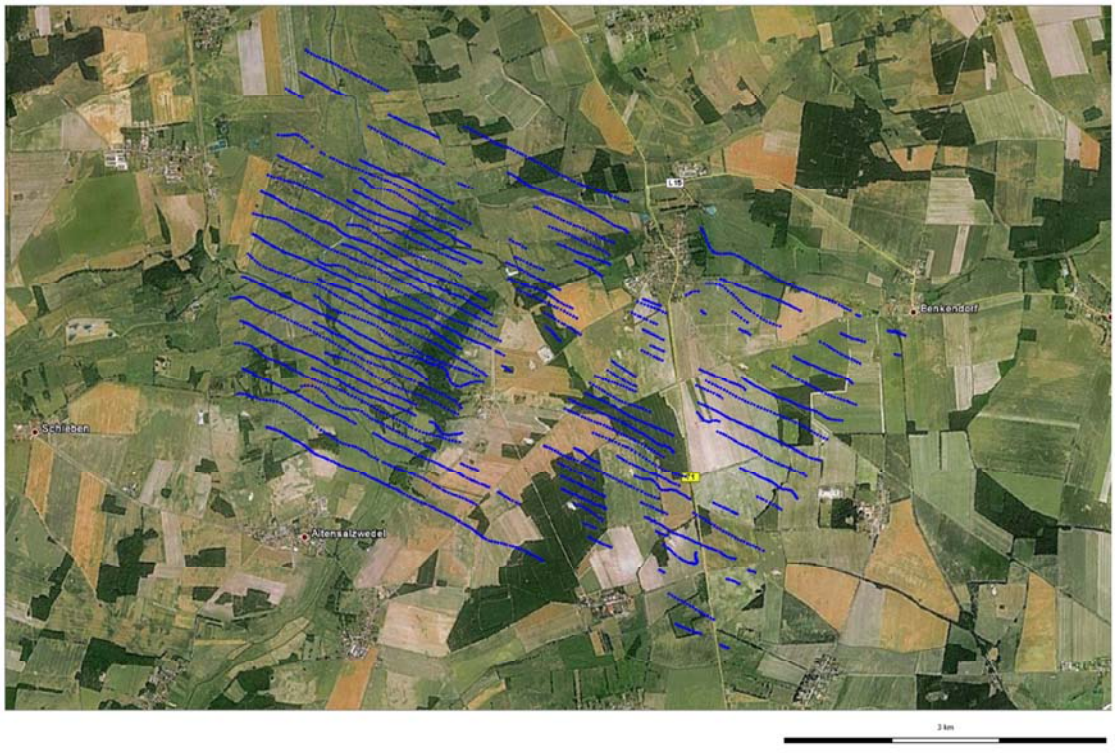



*Figure 1. Survey area, with flight lines in blue.*

## 3.2 Overview of the SkyTEM system

SkyTEM is a time-domain helicopter electromagnetic system designed for hydrogeophysical, environmental and mineral investigations. The following contains a general introduction to the SkyTEM system. A more thorough description of the SkyTEM method is found in (Sørensen and Auken, 2004). A description of the TEM method in general can be found in (Jørgensen et al.,2003) and (Nabighian and Macnae, 1991).

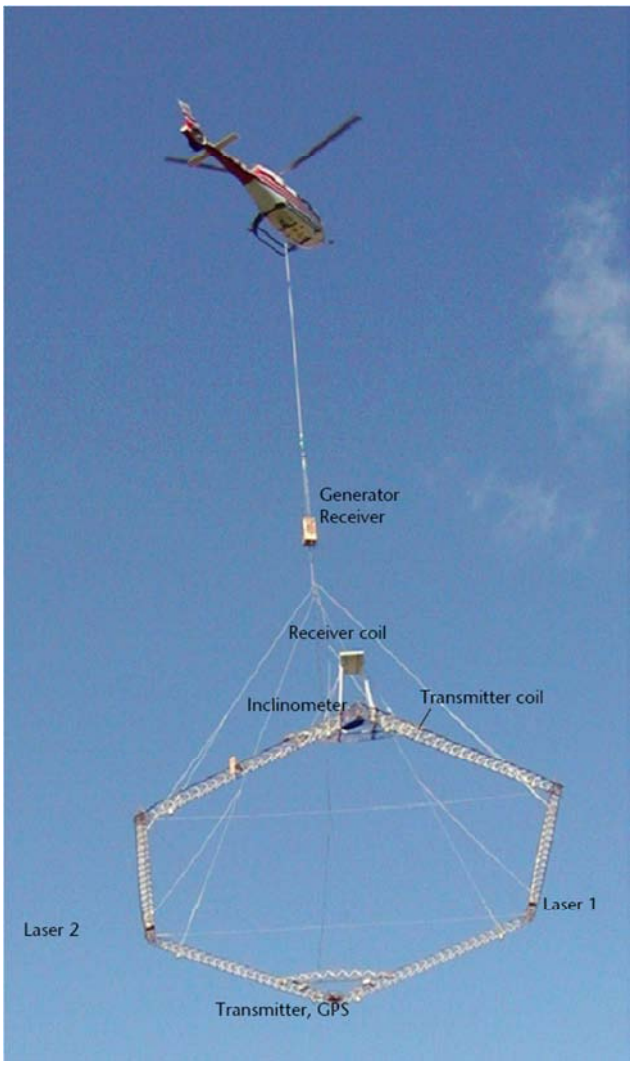



*Figure 2. The airborne SkyTEM system. The transmitter frame holds inclinometers, altitmeters (lasers), receiver coil and instrumentation. For a detailed instrument setup see Figure 3.*

**Instrument**
Figure 2 shows a picture of the SkyTEM system with the hexagonal frame below the helicopter. The lengths of the frame sides are approximately 11 m. The transmitter loop is mounted on the frame in an octagonal polygon configuration. The receiver loop is placed approximately 2 m above the frame in what is roughly a central loop configuration with a vertical offset. Two lasers placed on the frame measure the distance to terrain continuously while flying, and two inclinometers measure the tilt of the frame. Power is supplied by a generator placed between the helicopter and the frame. The positions of the different devices on the frame are shown in Figure 3.

**Measurement procedure**
The configuration of the system is customized for each survey. Measurements are carried out with one or two transmitter moments, depending on the target geology. The standard configuration uses a low and a high transmitter moment applied sequentially. Each sequence has between 100 and 200 individual transient measurements. Background noise is measured for each 20 sec.

The flight altitude is depending on flight speed, topography, etc. A typical nominal flight altitude is 30-50 m. Over forested areas, the altitude is increased to maintain a necessary safety distance to the treetops. The operating speed is customized to the survey area and target. A typical nominal flight speed is 45-90 km/h, depending on the target.

Apart from GPS-, altitude- and TEM data, a number of instrument parameters are monitored and stored digitally in order to be used for quality control when the data are processed.

**Penetration depth**
The penetration depth for the SkyTEM system depends on the moment, the geological conditions, the level of the background noise and the speed and altitude of the frame. The influence of the latter is important, and in order to achieve good data, the altitude should normally be less than 50 m. A penetration depth of approximately 200-250 m can normally be achieved in sedimentary geology. During the inversion a depth of investigation is estimated for each resistivity model (see section 5.2).

### 3.3 SkyTEM – technical specifications

The SkyTEM system was configured in a standard two-moment setup (super low moment, SLM and high moment, HM), to obtain a full db/dt decay curve (sounding curve). Both the z- and the x-component of the electromagnetic field were measured. This report does however not consider the x-component.

The system instrument setup is shown in Figure 3. The positioning of the instruments and the corners of the octagon described by the transmitter coil are found in Table 2. The origin is defined as the center of the transmitter coil.

The parameters for the two measured moments are summarized in Table 3. The receiver coil and the receiver instrument are modeled using first order low-pass filters with the values shown in Table 4.

Gate and receiver specifications are summarized in Table 5 -Table 6.

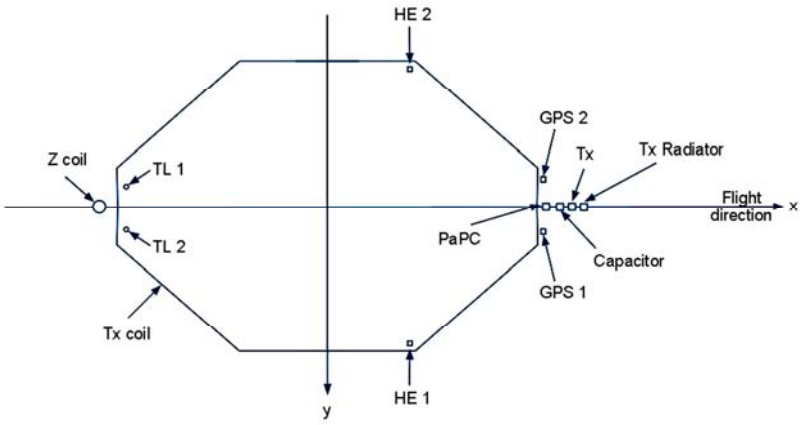



*Figure 3. Instrument setup for the SkyTEM system used. HE 1 and 2 is laser altimeters, TL 1 and 2 inclinometer, GPS 1 and 2 GPS sensors, Tx the transmitter, PaPC the Parameter PC.*

| Unit | X (m) | Y (m) | Z(m) |
|---|---|---|---|
| GP1 (GPS) | 15.50 | 0.81 | -0.22 |
| GP2 (GPS) | 15.38 | -0.97 | -0.22 |
| HE1 (Altimeter) | 6.65 | 9.84 | -0.12 |
| HE2 (Altimeter) | 6.66 | -9.84 | -0.12 |
| TL1 (inclinometer) | -15.41 | -0.50 | -0.35 |
| TL2 (inclinometer) | -15.41 | 0.50 | -0.35 |
| Rx (Receiver Coil) | -16.17 | 0.00 | -2.11 |
| Tx (Transmitter Coil) | 16.47 | 0.00 | 0.00 |
| Loop corner 1 | -15.34 | -2.03 | 0.00 |
| Loop corner 2 | -7.13 | -10.26 | 0.00 |
| Loop corner 3 | 7.13 | -10.26 | 0.00 |
| Loop corner 4 | 15.34 | -2.03 | 0.00 |
| Loop corner 5 | 15.34 | 2.03 | 0.00 |
| Loop corner 6 | 7.13 | 10.26 | 0.00 |
| Loop corner 7 | -7.13 | 10.26 | 0.00 |
| Loop corner 8 | -15.34 | 2.03 | 0.00 |

*Table 2. Summary of equipment and transmitter coil corner positioning. The origin is defined as the center of the transmitter coil. Z is negative towards the helicopter.*

| Parameter | SLM | HM |
|---|---|---|
| No. of turns | 1 | 4 |
| Area | 494.4 $m^2$ | 494.4 $m^2$ |
| Current | ~ 10 A | ~ 100 A |
| Tx Moment | ~ 4940 $Am^2$ | ~ 197600 $Am^2$ |
| Repetition frequency | 200 Hz | 25 Hz |
| Period | 2.50E-3 s | 20.0E-3 s |
| Tx-on-time | 1.00E-3 s | 10.0E-3 s |
| Tx-off-time | 1.50E-3 s | 10.0E-3 s |
| Waveform | Square | Square |
| Turn-on exp. decay constant | 32000 $s^{-1}$ | 345 $s^{-1}$ |
| Turn-off linear ramp | 3.89E+06 A/s | 1.87E+06 A/s |
| Turn-off current at end of avalanche mode | 1.5 A at 2.9E-6 s | 1.6 A at 55.3E-6 s |
| Turn-off free decay exp. Constant | 1.2E+06 $s^{-1}$ at 2.9E-6 s | 1.0E+06 $s^{-1}$ at 55.3E-6 s |

*Table 3. Summary of SLM and HM specifications.*

| Filters | Frequency (kHz) |
|---|---|
| Receiver Coil | 450 |
| Receiver Instrument | 300 |

*Table 4. Low-pass filters.*

| Gate No. | Gate center time* | Gate start time* | Gate width | SLM | HM |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.195000E-06 s | 3.900000E-07 s | 5.610000E-06 s | | |
| 2 | 7.195000E-06 s | 6.390000E-06 s | 1.610000E-06 s | | |
| 3 | 9.195000E-06 s | 8.390000E-06 s | 1.610000E-06 s | | |
| 4 | 1.119500E-05 s | 1.039000E-05 s | 1.610000E-06 s | | |
| 5 | 1.319500E-05 s | 1.239000E-05 s | 1.610000E-06 s | | |
| 6 | 1.519500E-05 s | 1.439000E-05 s | 1.610000E-06 s | | |
| 7 | 1.719500E-05 s | 1.639000E-05 s | 1.610000E-06 s | | |
| 8 | 2.019500E-05 s | 1.839000E-05 s | 3.610000E-06 s | | |
| 9 | 2.469500E-05 s | 2.239000E-05 s | 4.610000E-06 s | | |
| 10 | 3.069500E-05 s | 2.739000E-05 s | 6.610000E-06 s | | |
| 11 | 3.819500E-05 s | 3.439000E-05 s | 7.610000E-06 s | | |
| 12 | 4.719500E-05 s | 4.239000E-05 s | 9.610000E-06 s | | |
| 13 | 5.869500E-05 s | 5.239000E-05 s | 1.261000E-05 s | | |
| 14 | 7.319500E-05 s | 6.539000E-05 s | 1.561000E-05 s | | |
| 15 | 9.169500E-05 s | 8.139000E-05 s | 2.061000E-05 s | | |
| 16 | 1.151950E-04 s | 1.023900E-04 s | 2.561000E-05 s | | |
| 17 | 1.441950E-04 s | 1.283900E-04 s | 3.161000E-05 s | | |
| 18 | 1.811950E-04 s | 1.603900E-04 s | 4.161000E-05 s | | |
| 19 | 2.276950E-04 s | 2.023900E-04 s | 5.061000E-05 s | | |
| 20 | 2.856950E-04 s | 2.533900E-04 s | 6.461000E-05 s | | |
| 21 | 3.591950E-04 s | 3.183900E-04 s | 8.161000E-05 s | | |
| 22 | 4.516950E-04 s | 4.003900E-04 s | 1.026100E-04 s | | |
| 23 | 5.681950E-04 s | 5.033900E-04 s | 1.296100E-04 s | | |
| 24 | 7.146950E-04 s | 6.333900E-04 s | 1.626100E-04 s | | |
| 25 | 8.991950E-04 s | 7.963900E-04 s | 2.056100E-04 s | | |
| 26 | 1.131695E-03 s | 1.002390E-03 s | 2.586100E-04 s | | |
| 27 | 1.424195E-03 s | 1.261390E-03 s | 3.256100E-04 s | | |
| 28 | 1.792195E-03 s | 1.587390E-03 s | 4.096100E-04 s | | |
| 29 | 2.255695E-03 s | 1.997390E-03 s | 5.166100E-04 s | | |
| 30 | 2.839195E-03 s | 2.514390E-03 s | 6.496100E-04 s | | |
| 31 | 3.573695E-03 s | 3.164390E-03 s | 8.186100E-04 s | | |
| 32 | 4.498695E-03 s | 3.983390E-03 s | 1.030610E-03 s | | |
| 33 | 5.663195E-03 s | 5.014390E-03 s | 1.297610E-03 s | | |
| 34 | 7.128695E-03 s | 6.312390E-03 s | 1.632610E-03 s | | |
| 35 | 8.845195E-03 s | 7.945390E-03 s | 1.799610E-03 s | | |

*Table 5. Gate specifications. The effective gate center and gate start times are the above script times plus the calibration time shift from Table 7. The gates used for the SLM and HM respectively, are shown with grey bars.*

| Parameter | SLM | HM | Noise |
|---|---|---|---|
| Period | 2.50E-3 s | 20.0E-3 s | 20.0E-3 s |
| Front gate time | - | 59.0E+6 s | - |
| Number of shoots per cycle | 120 | 64 | 64 |
| SLM + HM cycles between Noise Cycles | - | - | 18 |
| Gates measured | 1-26 | 1-35 | 1-35 |
| Gates used | 6-26 | 15-35 | 1-35 |

*Table 6. Receiver specifications.*

## 3.4 Calibration of the SkyTEM system

Prior to the survey, the SkyTEM equipment was calibrated by SkyTEM ApS on the Danish national TEM test site near Aarhus, Denmark. The calibration is performed to establish the absolute time shift and data level in order to facilitate precise data modeling. No additional leveling, or drift corrections are applied subsequently.

In order to perform the calibration, all system parameters (transmitter waveform, low pass filers, etc.) must be known to allow modeling of the used SkyTEM configuration.

The calibration constants are determined by comparing a recorded SkyTEM response on the test site with the reference response. The reference response is calculated from the test site reference model for the used SkyTEM configuration. This procedure is repeated for a number of different attitudes.

Documentation of the calibration can be found in the SkyTEM ApS datareport (SkyTEM, 2011). Acceptable calibration was achieved with the calibration constants found in Table 7.

| Moment | Time Shift | Scale Factor |
|---|---|---|
| SLM | -1.4 μs | 0.96 |
| HM | -3.5 μs | 0.97 |

*Table 7. Calibration constants.*

## 3.5 High altitude test

A high altitude test was conducted near the test area to identify the system response. The test is performed by measuring at an altitude where the ground response is negligible. The documentation for the high altitude tests can be found in the SkyTEM ApS datareports (SkyTEM, 2011).

## 3.6 Repeatability and altitude tests during production flight

The production flight includes an altitude tests performed on the way to and from the production lines. Before and after the production flight the helicopter went to 400 m above ground for approximately one minute. The altitude tests are similar to the high-altitude test and serve to identify changes in the system response during the flight. The documentation for this test can be found in the SkyTEM ApS datareports (SkyTEM, 2011).

# 4. PROCESSING OF THE SKYTEM DATA

The software package Aarhus Workbench is used for the processing of the SkyTEM data.

The aim of processing is to prepare data for the geophysical interpretation. The processing primarily includes filtering and averaging of data as well as culling and discarding of distorted or noisy data. The data is stored in a database. The settings for the different processing steps are also stored.

Processing can be divided into four steps:

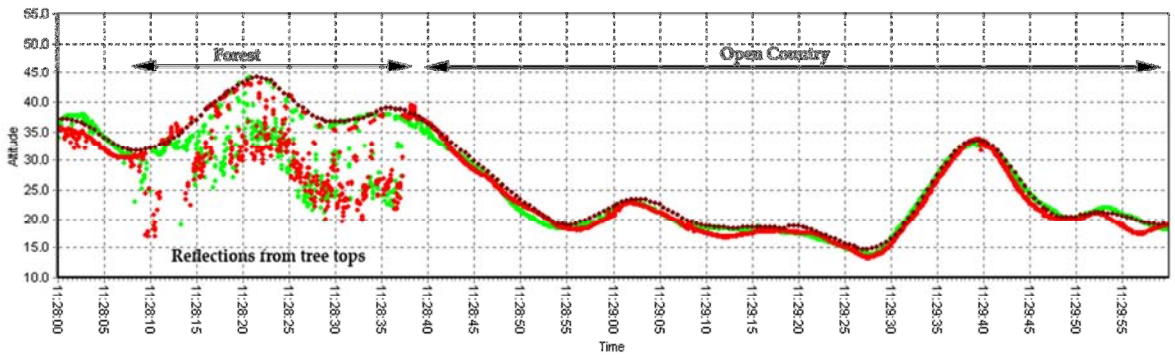
1. Import of raw data into a fixed database structure. The raw data appear in the form of .dat-, .sps- and .geo-files. Dat-files contain the actual transient data from the receiver. Sps-files contain GPS positions, tilts, altitudes, transmitter currents etc. and the geo-file contains system geometry, low-pass filters, calibration parameters, turn-on and turn-off ramps, calibration parameters, etc. For a description of the SkyTEM file formats see (HydroGeophysics Group 2005).
2. Automatic processing: First, an automatic processing of the four data types is used. These are GPS-, altitude-, tilt- and TEM data. This automatic processing is based on a number of criteria adjusted to the survey concerned.
3. Manual processing: Inspection and correction of the results of the automatic processing for the data types in question.
4. Adjustment of the data processing based on preliminary inversion results.

All data is recorded with a common time stamp. This time stamp is used as key when linking data from different data types. The time stamp is given as the GMT time.

In the following a short description of the processing of the different data types is shown. A more thorough description of the SkyTEM processing module of the Aarhus Workbench is found in (HydroGeophysics Group, 2005).

## 4.1 Positioning

The position of the frame is measured with two independent GPS receivers, which record data continuously with an uncertainty of ~3 m.




## 4.2 Roll and pitch data

The roll and the pitch of the frame are measured and used to correct the altitude and voltage data. It is presumed that the frame is rigid so that the tilts of the transmitter and receiver are identical. During the processing, a running mean is calculated for the roll and the pitch.

## 4.3 Altitude data

The distance between the transmitter coil and the ground is measured with two independent lasers. Figure 4 shows an altitude data example over open country and a minor forest area.

The aim of the altitude data processing is to remove reflections that do not come from the ground - typically reflections from treetops. The processing is based on the fact that reflections from tree tops etc. result in an apparently lower altitude. Altitude processing is done using an algorithm that filters out data by repeatedly making a polynomial fit to the data while removing data that are some meters below this polynomial. Thereby reflections from treetops are removed. The automatic filtering is followed by a manual inspection and correction.

*Figure 4. Green and red dots are raw data from the two laser altimeters. Brown dots are the resulting altitude after filtering the data. The time window holds approximate 2 km of data.*

## 4.4 Voltage data

The Voltage data are gathered continuously along the flight lines and alternately with a low and a high moment. The processing of voltage data is done in a two-step system: an automatic and a

manual part. In the former, data are corrected for the transmitter/receiver tilt, and a number of filters designed to cull coupled or noise influenced data are deployed. Furthermore, data are averaged to increase the signal-to-noise ratio using a trapezoidal averaging core, where the averaging width of late-time data is larger than that of early-time data, as seen in Figure 6.The data uncertainty is calculated from the data stack. Furthermore, a small uniform data uncertainty of 3% is assigned to all data. Soundings are typically taken out for every 20-30 m depending on flight speed, SkyTEM-setup and target.

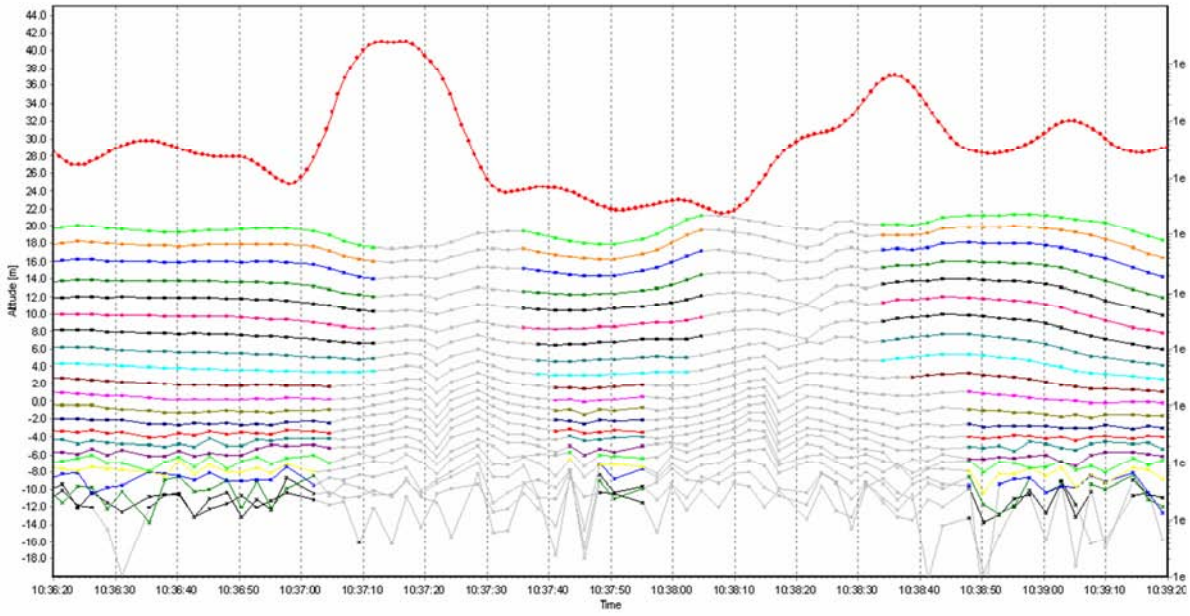



*Figure 5. The section displays 3 minutes (~2.2 km) of data. The upper red curve shows the flight altitude. Each of the lower curves shows raw high-moment data for a given gate time. The green line represents gate 1 of the high moment, the orange line gate 2 etc. The grey lines represent data that have been removed due to couplings. Two couplings can clearly be spotted at 10:37:20 and 10:38:20. Comparing these spots with a map, it is seen that both couplings have been associated with installations along roads. The couplings here particularly affect the late-time signal (the lower curves).*

After the automatic processing, soundings are inspected visually using a number of different data plots. At this stage, it is assessed whether data points should be ascribed a higher uncertainty or removed entirely. The evaluation is done by looking at the decay curves, the distance to potential noise sources and the noise measurements. Survey areas are typically crossed by a number of power lines, roads and railroads. As data near such installations often

couple to the installations, it is necessary to inspect all data and remove coupled data when found, in order to produce geophysical maps without the influence of manmade installations. In some cases it is not possible to identify the source of the coupling even though data clearly show that there must be a source. Figure 5 shows an example of strongly coupled data near two roads. When the couplings have been removed, the data are stacked into soundings. The stacked data are then inspected to exclude the part of the late-time data where the background noise level reaches the level of the earth response.

For a description on noise contamination in electromagnetic data, see (Munkholm and Auken, 1996).

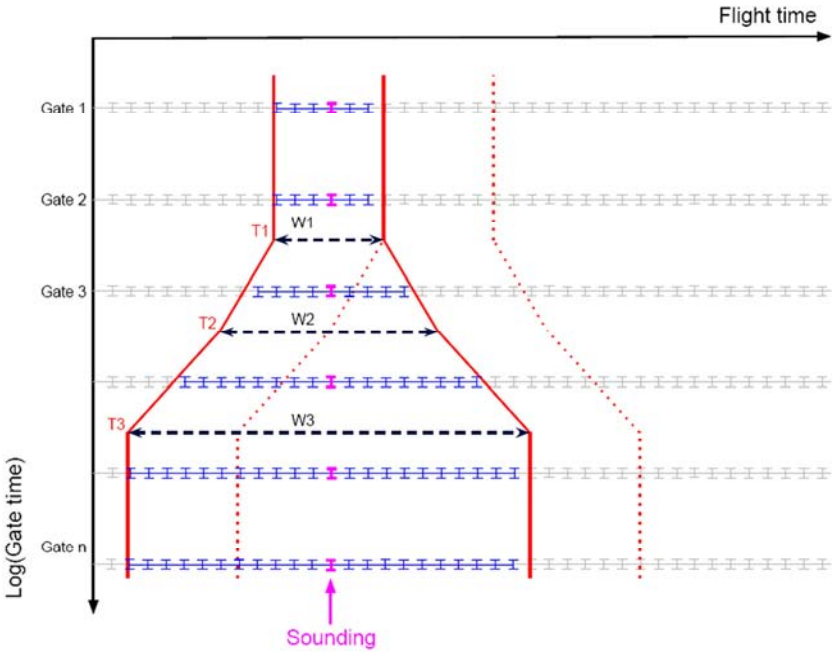



*Figure 6. Trapezoid averaging of TEM-data. The raw data series within the red lines (blue points/error bars) are averaged yielding the sounding marked by green points/error bars. The averaging trapezoid is subsequently moved (red dashed line), and a new sounding is created. The times T1-3 and widths W1-3 define the trapezoid.*

## 4.5 Processing - Technical specifications

Table 8 shows the processing settings used for this survey in the Aarhus Workbench.

| Item | | Value |
|---|---|---|
| Software | Aarhus Workbench Version | 3.3 |
| Noise Processing | Data uncertainty:<br>Uniform data STD | Estimated from data stack<br>3% |
| Trapezoid filter (See Figure 6 for Trapezoid filter description) | Sounding distance<br>SLM, times: T1, T2, T3 [s]<br>SLM, width: W1, W2, W3 [s]<br>HM, times: T1, T2, T3 [s]<br>HM, width: W1, W2, W3 [s] | 1.5 s (~27 m)<br>1e-5, 1e-4, 1e-3<br>3, 6, 12<br>1e-4, 1e-3, 3e-2<br>6, 12, 24 |

*Table 8. Processing settings.*

# 5. INVERSION OF THE SKYTEM DATA

Inversion and evaluation of the inversion result are done using the Aarhus Workbench software package. The underlying inversion code is developed by the HydroGeophysics Group, Aarhus University, Denmark (Christensen et al., 2003).

## 5.1 Spatially constrained inversion

The spatially constrained inversion (SCI) uses constraints between the 1D-models, both along and across the flight lines, as shown in Figure 7. The inversion is a 1D full non-linear damped least-squares solution in which the transfer function of the instrumentation is modeled. The transfer function includes turn-on and turn-off ramps, front gate, low-pass filters, and transmitter and receiver positions. The flight altitude contributes to the inversion scheme as a model parameter with the laser altimeter readings as a constrained prior value.

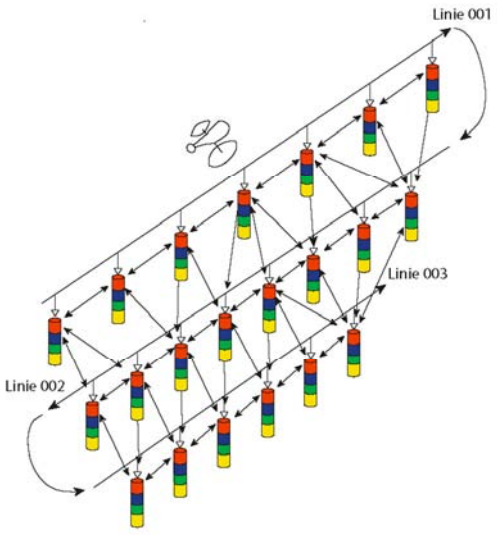



*Figure 7. Schematic presentation of the LCI and SCI concepts. Constraints connect not only soundings located along the flight line, but also those across them.*

In the SCI scheme, the model parameters are tied together with a spatially dependent covariance scaled according to the distance between soundings. The constraints between the soundings are

designed using Delaunay triangles, also called nearest neighbors (see Figure *8*). In this way each sounding is linked to its "best companions". For Airborne EM surveys, Delaunay triangulation always connects a sounding to its two nearest soundings along the flight line and one or more soundings on each of the adjacent flight lines, which is the preliminary condition for breaking down the line orientation in the data.

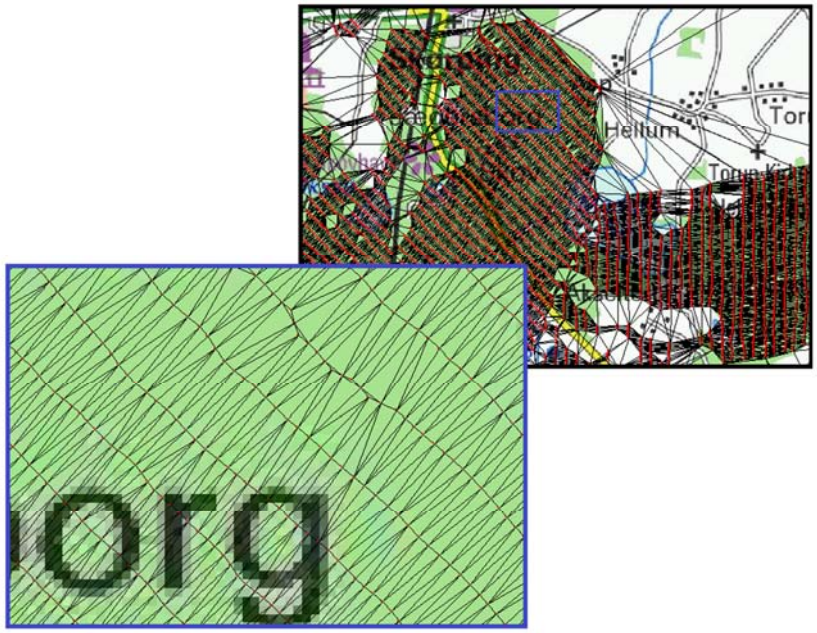



*Figure 8. Example setup of SCI-constraints. The red points are the sounding positions. The black lines show the constraints created with the Delaunay triangles. The line distance in this example is 160 m and the zoomed area is approximately 1.2 x 0.85 km large.*

In addition to constraints on model parameters (resistivites, layer interfaces), there are also lateral constraints on the altitude, however, only along the flight line.

Constraining the parameters enhances the resolution of resistivities and layer interfaces which are not well resolved in an independent inversion of the soundings.

In order to perform the SCI in a CPU efficient manner, a typical data set of thousands of soundings must be divided into smaller subsets. Each subset is then inverted with spatial constraints, as a unit. We produce the cells using the preconstructed Delaunay triangles, normally up to a size of 4000 model parameters. To ensure continuity over the cell boundaries, soundings on the boundaries

are inverted in both cells in the first inversion step. The average of the boundary models from the two cells is used as prior model for the final inversion step.

The SCI inversion scheme is developed for parameterized inversion with normally 4 or 5 layers and smooth inversion with e.g. 20 layers, each having a fixed thickness, but a free resistivity. Vertical constraints are applied to the smooth models to stabilize the inversion. Both schemes have advantages. Layer interfaces and resistivities are best determined from the parameterized inversion. On the other hand, smooth inversion is more independent of the starting model, and gradual transitions in resistivities are more conspicuous facilitating the delineation of complex geological structures. Further details about the SCI-inversion scheme can be found in (GFS, 2008) and (Viezzoli et al., 2008).

The SCI-setup parameters for this survey are listed in section 5.3.

## 5.2 Depth of Investigation (DOI)

A concept of estimating the depth of investigation (DOI) (Christiansen and Auken, 2010) for the individual models has been applied with this survey. The DOI calculation takes into account the SkyTEM system transfer function, the number of data points, and the data uncertainty.

EM fields are diffusive, and there is no specific depth below which there is no information on the resistivity structure. Therefore, we always present two numbers for the DOI – an upper and a lower number. As a guideline the layers above DOI upper are well founded in data. Between DOI upper and DOI lower the model is not as strong in the data, and below DOI lower the model is very weak in the data, and interpreting these parts of the model should be done with caution.

**DOI – technical description**
DOI is a useful tool for evaluation of inversion results and holds useful information when a geological interpretation is made. However, for diffusive methods, such as ground based or airborne EM, there is no specific depth below which there is no information on the resistivity structure. The question is to which depth the model is most reliable.

The DOI-method used by Aarhus Workbench is based on the actual inverted model, and it includes the full system transfer function and system geometry, using all actually measured data and

their uncertainties. The methodology is based on a recalculated sensitivity (Jacobian) matrix of the final model. We do not consider a priori information, model constraints or other information added to the system. Thus, the DOI is purely data driven.

To demonstrate the methodology, we look at a SkyTEM setup with the last gate at 3 ms. Assuming a simple 3-layer model, we can plot the sensitivity function versus depth (left image in Figure 9). The sensitivity function comes directly from the recalculated sensitivity matrix (Jacobian). As expected, the sensitivity to the second layer is low whereas there are high sensitivities to the first and the third layers.

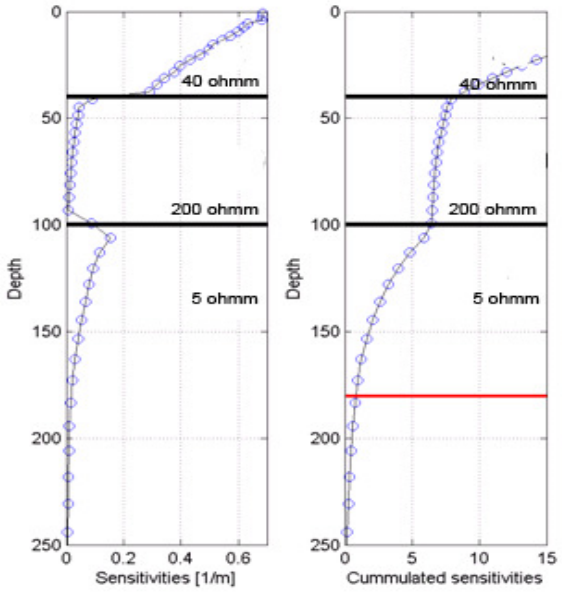



*Figure 9. Sensitivities calculated for a rediscretized version of the model indicated by the black lines; resistivities of layers are written on the plot. The left plot is the sensitivity function itself. The right plot shows the cumulated sensitivities. The red line indicates the DOI given by the global threshold value.*

If we sum the sensitivities from deep to shallow, we get the right side image in Figure 9. This plot shows the total sensitivity in a given depth and downwards. Next, we set a threshold value that indicates the minimum amount of sensitivity needed for indicative information. In the example in Figure 9, we settled on 0.8 as the threshold value giving a DOI of approximately 180 m.

Setting the threshold value is very much a question of tuning based on experience and comparing different models with different methods. The threshold value used here has been tested on many different models and with different systems and produces trustworthy results in all cases.

In this case the model was sub-discretized into many layers to support the visual understanding of the concept. In fact, it is not necessary to sub-discretize a model with few layers into more than 12 - 15 layers to obtain a reasonably precise DOI - e.g. within 3-5 m for the examples in Figure 9.

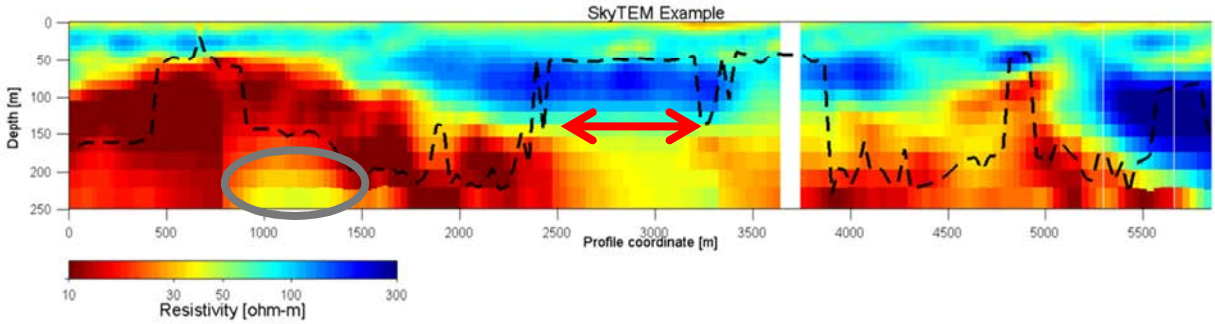



*Figure 10. SkyTEM resistivity section example with DOI shown as a black dashed line.*

The DOI is purely data driven, which means that information above the DOI is data controlled whereas the information below the DOI is mainly controlled by the inversion settings, such as starting model, lateral and vertical constraints. Thus, sometimes the DOI is well above the deepest layers. Figure 10 shows a smooth inversion of SkyTEM data from Denmark; the black dashed line indicates the DOI. In the area marked with the grey circle, the DOI indicates that data have no information on that less conductive structure. The arrows indicate an area where the high-moment data are missing, which means a shallower DOI. The effect of the constraints is clearly seen as the high-resistive layer is nicely pulled through to create a geologically reasonable interpretation. This is exactly one of the main functions of the constraints - they are user defined numbers for the geological homogeneity and thus ensure model smoothness even in areas with limited information from the data themselves.

## 5.3 Inversion - Technical specifications

The inversion settings used for the smooth inversion in the Aarhus Workbench are listed below.

| Item | | Value |
|---|---|---|
| Software | Aarhus Workbench Version | 3.3 |
| SCI cells | Approximate cell size [number of models] | 110 |
| Starting model | Number of layers<br>Starting resistivities [Ωm]<br>Thickness of first layer [m]<br>Depth to last layer [m]<br>Thickness distribution of layers | 25<br>40<br>4.0<br>300.0<br>Log increasing with depth |
| SCI constraint/ Prior constraint | Horizontal constraints on resistivities [factor]<br>Reference distance [m]<br>Constraints distance scaling<br>Vertical constraints on resistivities [factor]<br>Prior, thickness<br>Prior, resistivities<br>Prior on flight altitude [m]<br>Lateral constraints on flight altitude [factor]<br>Minimum number of gates per moment | 1.4<br>30<br>(1/distance)<br>2.0<br>Fixed<br>None<br>+/- 2<br>1.3<br>5 |

*Table 9. Inversion settings, smooth SCI setup*

# 6. THEMATIC MAPS AND CROSS SECTIONS

To visualize the resistivity structures in the mapping area, a number of geophysical maps and cross sections have been created from the smooth inversion results by using the Aarhus Workbench. Furthermore, a location map and a number of maps made for quality control (QC-maps) are found in the appendices.

## 6.1 Mean resistivity maps

The inversion result consists of a large number of 1D-models described by depth intervals (i.e. layers) and resistivities within each model. These are then normally used to calculate mean resistivities to obtain a visualization of the resistivity distribution in the mapping area. Figure 11 shows how the resistivities of the layers in a model influence the calculation of the mean resistivity in a depth interval [A, B]. $d_0$ is the surface, $d_1$, $d_2$ and $d_3$ are the depths to the layer boundaries in the model. $\rho_1$, $\rho_2$, $\rho_3$ and $\rho_4$ are the resistivities of the layers.

The model is subdivided into sub-thicknesses $\Delta t_{1\text{-}3}$. The mean resistivity ($\rho_{vertical}$) is calculated as:

$$\rho_{vertical} = \frac{\rho_1 \cdot \Delta t_1 + \rho_2 \cdot \Delta t_2 + \rho_3 \cdot \Delta t_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 \cdot \Delta t_3}$$

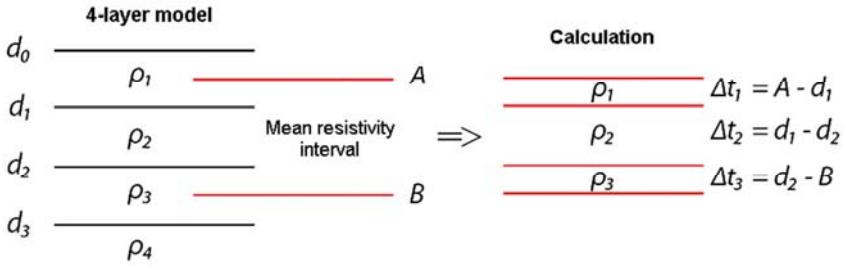



*Figure 11. The figure illustrates how the resistivities of the layers influence the mean resistivities in a depth interval [A:B]*

In the general term the mean resistivities in a depth interval is calculated using the equation below:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \rho_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i}$$

where *i* runs through the interval from 1 to the number of sub-thicknesses. The mean resistivity calculated by the above formula ($\rho_{vertical}$) is named the vertical mean resistivity - equal to the total resistance if a current flows vertically through the interval.

By mapping with the TEM method, the current flows only horizontally in the ground. Therefore, the mean resistivity is calculated as if the current runs horizontally in the interval. This resistance is described as the horizontal mean resistance ($\rho_{horizontal}$) and is the reciprocal of the mean conductivity ($\sigma_{mean}$).

The horizontal mean resistivity is calculated in the following way:

$$\rho_{horizontal} = \frac{1}{\sigma_{mean}} - \left[ \frac{\sum_{1=1}^{n} \left(\frac{1}{\rho_i}\right) \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i} \right]^{-1}$$

Normally, there is no major difference in the maps of mean resistivities calculated in the two different ways. The horizontal mean resistivity weights the low resistivities more than the vertical mean resistivities in exactly the same way as the TEM-method does.

For this mapping, horizontal mean resistivity themes have been generated from the smooth model inversion in three sets. The first set is made in 10 m elevation intervals down to a depth of 250 m below sea level. The second set is made in depth intervals of 5 m from the surface and down to 20 m below the surface. The third set continues in depth intervals of 10 m from 20 m to 50 m below the surface. For this mapping the DOI has been used to blind resistivities of models below the DOI lower.

The generated themes, consisting of mean resistivity values at each sounding position, have been gridded using the Kriging (Pebesma and Wesseling, 1998) method, with a node spacing of 50 m and a search radius of 350 m, to obtain a regular grid of resistivities. Finally, the nodes have been subdivided by a factor of 3 to obtain interpolated resistivity pixels for the bitmaps shown in Appendix III: Model positions have also been plotted as grey points.

## 6.2 Cross sections

Several cross sections along roughly every other flight line is plotted in Appendix II: Each cross section show the 1D-model bars from the smooth inversion result. The colors are faded below the DOI lower. The grey lines show the DOI upper and DOI lower values gridded from models within 150 m.

## 6.3 Location map, QC-maps

The maps described below are included in Appendix I:

**Model location and flight lines**
This map shows the flight line positions overlaid by the model positions. Where no models are present, data has been discarded due to coupling. Line turn intervals are also marked as discarded data. The couplings are mainly associated with major roads and the urban areas, but in some cases it was not possible to identify the source of the coupling from the background maps even though data clearly show that there must be a source. In order to produce geophysical maps without the influence of manmade installations, all coupled data have been removed. Note also that while the used background maps have been georeferenced, they might still be several meters off.

**Moment indication**
This map show the moments (low/high) present in each model. Both moments are in general present for the whole survey. Due to the moment sampling, models with a single moment can be observed after intervals where data has been discarded. In some cases it has been necessary to remove coupled low moment while it was possible to keep the high moment.

**Flight altitude**
This map shows the processed flight altitudes (heights) from the laser altimeters. The flight altitude reflects the necessary safety distance to the treetops or the ground. The mean flight altitude is approximately 40 m.

**Data residual**
This map shows the data residual (the data fit) for the individual models of the smooth model inversion. The data residual is normalized with the data standard deviation, so a data residual below one correspond to a fit within the data standard deviation. In general the data residual is low and well below one.

**Depth of investigation (DOI)**
This map shows the DOI lower (in elevation) from the smooth model inversion (see section 5.2 for a description of the DOI-calculation). The DOI lower varies considerably over the survey area. Typical values are between elevation -275 m and -150 m.

# 7. CONCLUSION

The collected SkyTEM data were carefully processed to remove couplings and noise. After processing and preliminary inversions the data have been inverted using a spatially constrained inversion (SCI) approach.

The SkyTEM survey reveals a new and comprehensive three-dimensional picture of the subsurface of the area. The addition of the depth of investigation (DOI) calculation, have made it possible to estimate the resolved depth of the method. In general the data quality is high. Due to the amount of infrastructure, a large amount of data was culled from the dataset as they were significantly disturbed. The remaining data are undisturbed and reflects the geological layers in the area.

# 8. REFERENCES

**Auken, E., Christiansen, A. V., Jacobsen, B., Foged, N. and Sørensen, K. I., 2005**, Piecewise 1D Laterally Constrained Inversion of resistivity data: Geophysical Prospecting, 53, 497-506.

**Christiansen, A. V. and Auken, E., 2010,** A Global Measure for Depth of Investigation, Proceedings of the EAGE-NS, Zurich.

**Christiansen, A. V., Auken, E., Foged, N., and Sørensen, K. I., 2003,** Em1dinv - User manual. www.hgg.au.dk

**Effersø, F., Auken, E. and Sørensen, K., 1999**, Inversion of band-limited TEM responses. Geophysical Prospecting, 47, 551-564.

**GFS, 2008,** Spatially Constrained Inversion of SkyTEM data, Concept and Examples, www.hgg.geo.au.dk

**HydroGeophysics Group, 2005**, SkyTEM processering, www.hgg.au.dk

**Jørgensen, F., Lykke-Andersen, H., Sandersen, P., Auken, E. and Nørmark, E., 2003**, Geophysical investigations of buried Quaternary valleys in Denmark: An integrated application of transient electromagnetic soundings, reflection seismic surveys and exploratory drillings: Journal of Applied Geophysics, 53, 215-228.

**Jørgensen, F., Sandersen, P. and Auken, E., 2003**, Imaging buried Quaternary valleys using the transient electromagnetic method: Journal of Applied Geophysics, 53, 199-213.

**Munkholm, M.S. and Auken, E., 1996**, Electromagnetic noise contamination on transient electromagnetic soundings in culturally disturbed environments. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, Vol. 1, Issue 2, 119-127.

**Nabighian, M. N. and Macnae, J. C., Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods. In Nabighian, M. N. (editor), 1991**, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 2, Application, Part A, SEG.

**Pebesma, E. J. and Wesseling, C. G., 1998**, Gstat: A Program for geostatistical Modelling, Prediction and Simultation: Computers & Geosciences, 24, 17-31.

**SkyTEM ApS, 2011**, SkyTEM Survey – Maxdorf, Germany, Data acquisition report.

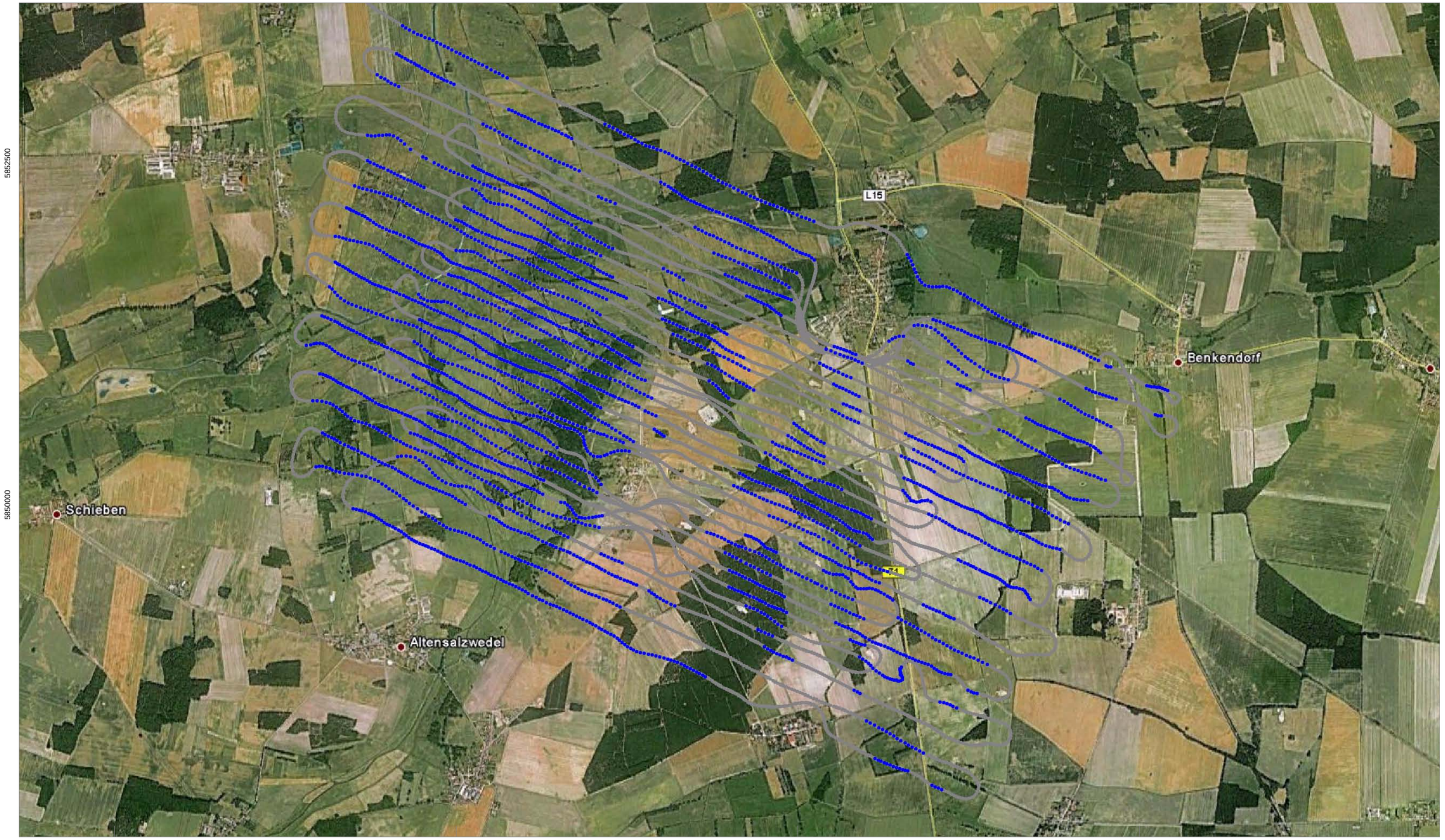
**Sørensen, K. and Auken, E., 2004**, SkyTEM - a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system: Exploration Geophysics, 35, 191-199.

**Viezzoli, A., Christiansen, A. V., Auken, E., and Sørensen, K. I., 2008**, Quasi-3D-modeling of airborne TEM data by Spatially Constrained Inversion: Geophysics, 73, F105-F113.

# APPENDIX I: LOCATION MAPS, QC MAPS

This appendix shows maps of:

- Model location and flight lines
- Moment indication
- Flight altitude
- Data residual
- Depth of investigation




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

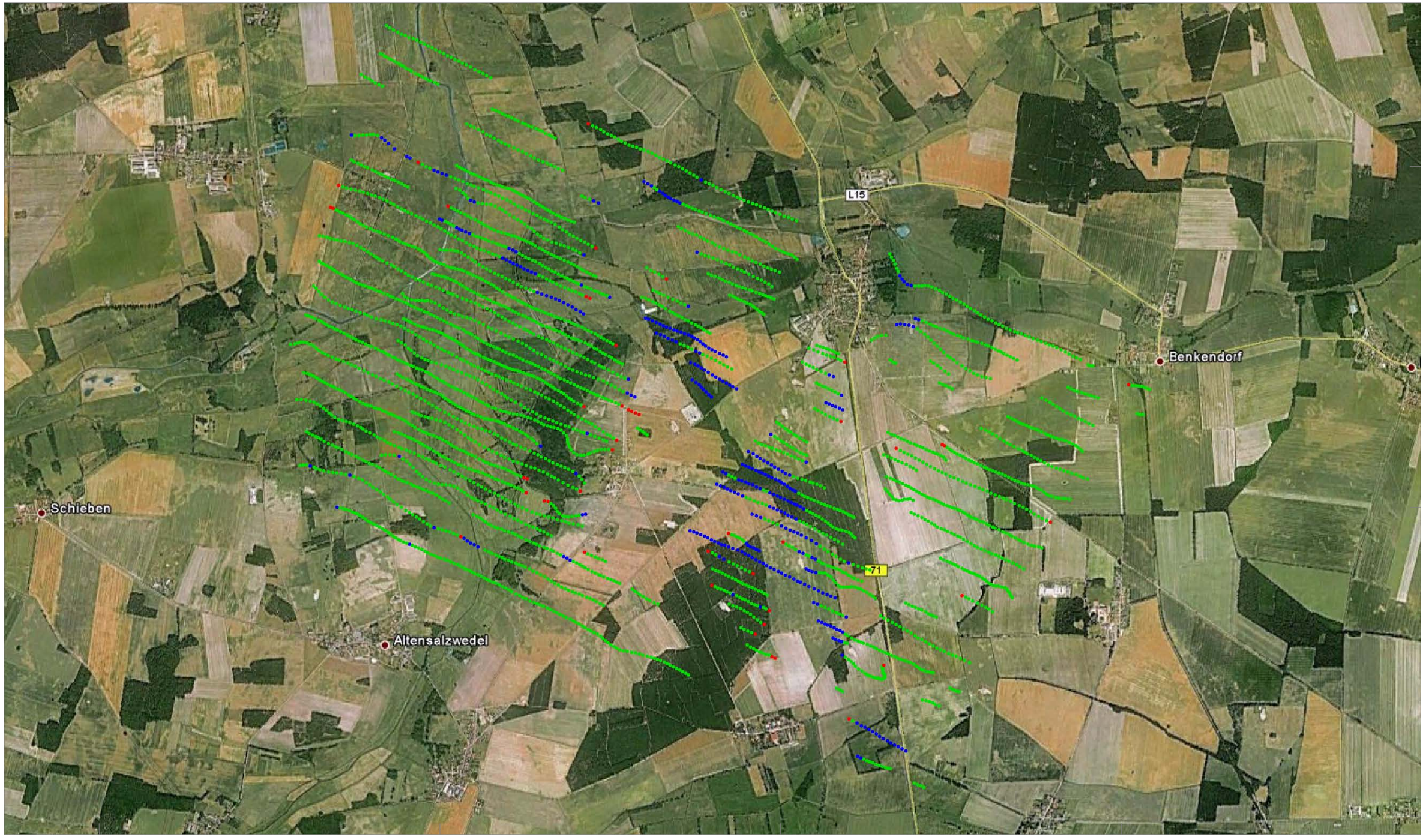
Location of Flight Lines and Models

Discarded data

1D model

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

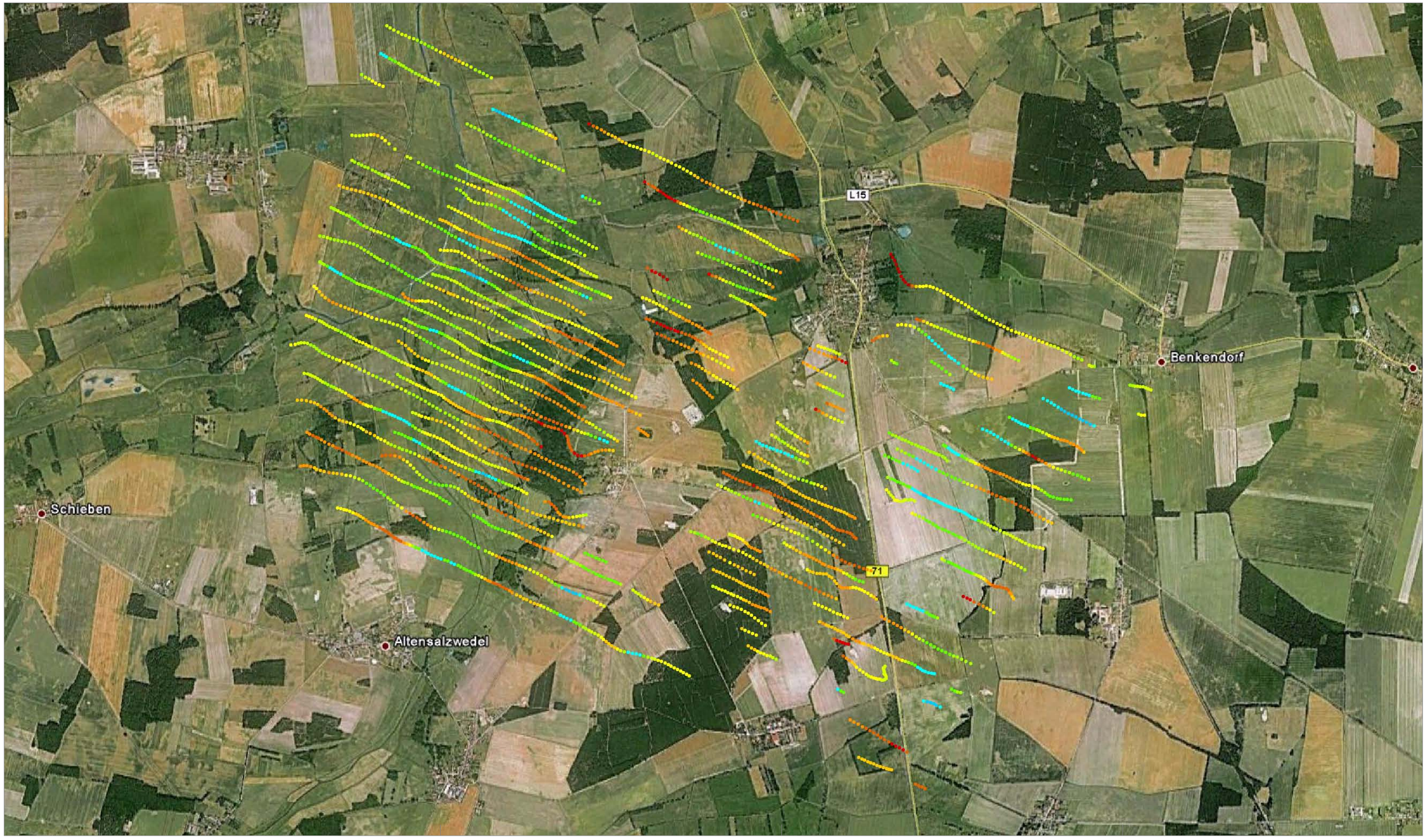
SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

Moment Indications

Models with both low and high moment data
Models with only high moment data
Models with only low moment data

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

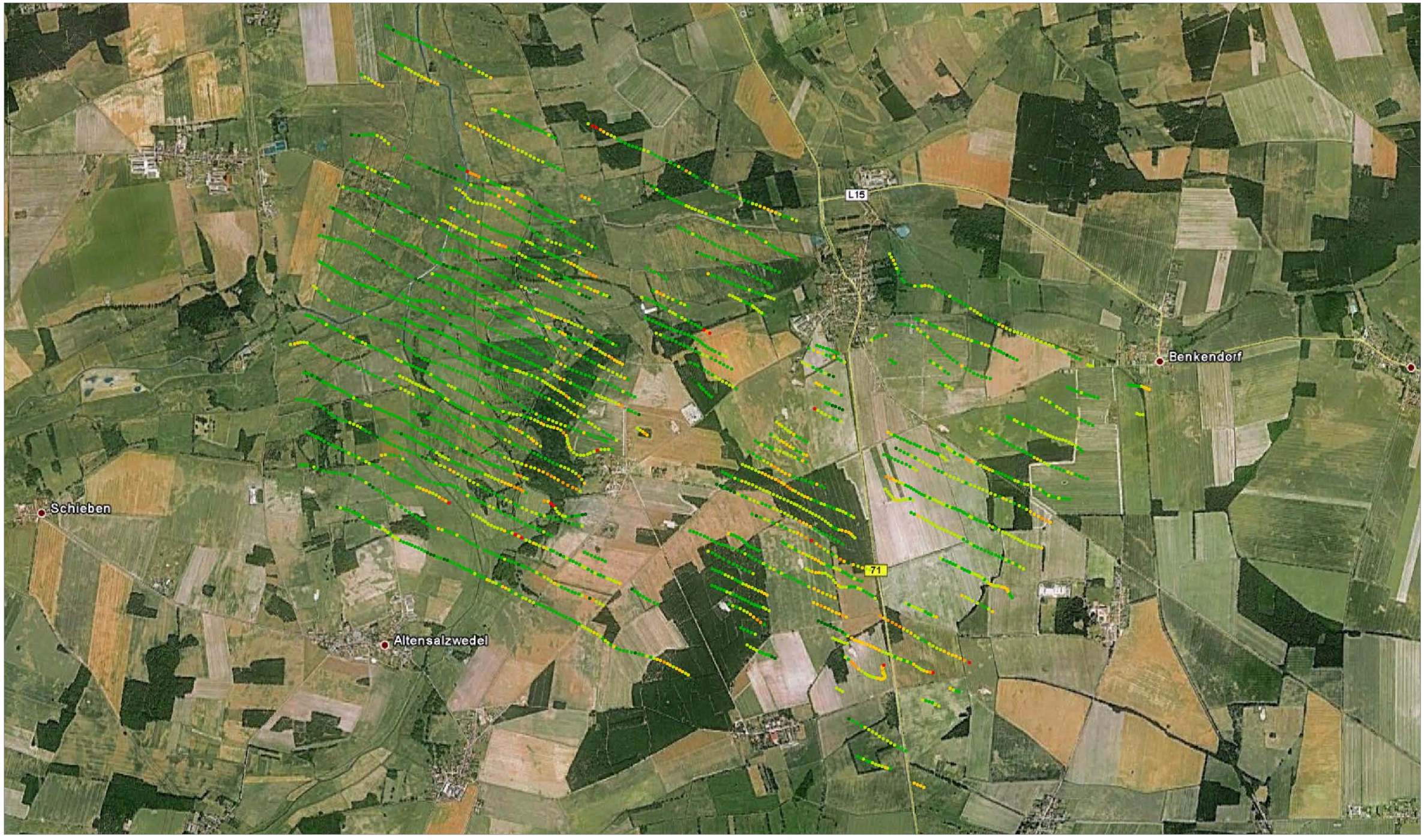
SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

0 10 20 30 40 50 60 70
[m]

Flight Altitude (Height)

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

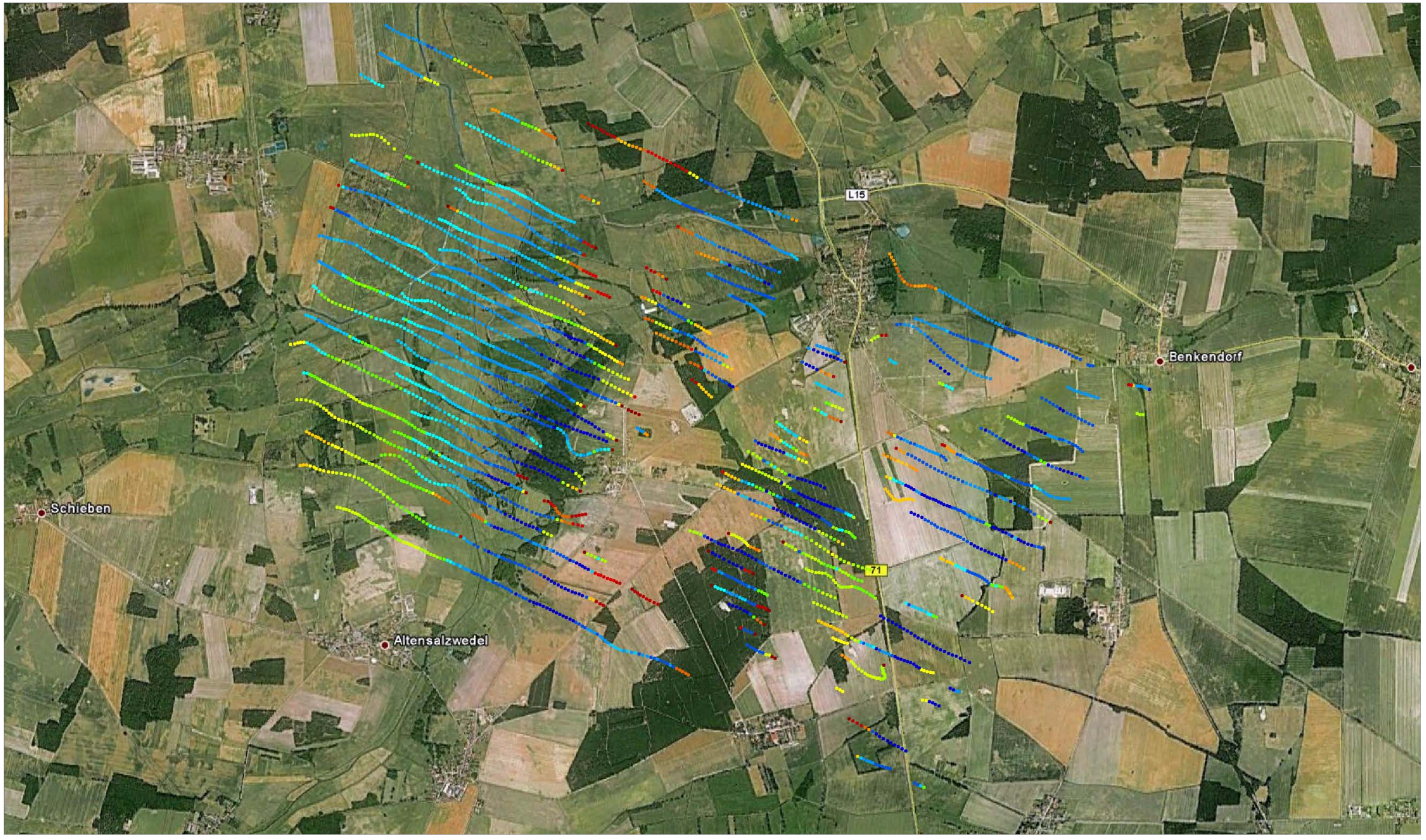
SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2

Data Residual

3 km

UTM Zone 32N WGS84




UTMY

5852500

5850000

645000

647500

650000

652500

UTMY

HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

-250 -200 -150 -100 -50

Elevation [m]

Depth Of Investigation (DOI lower)

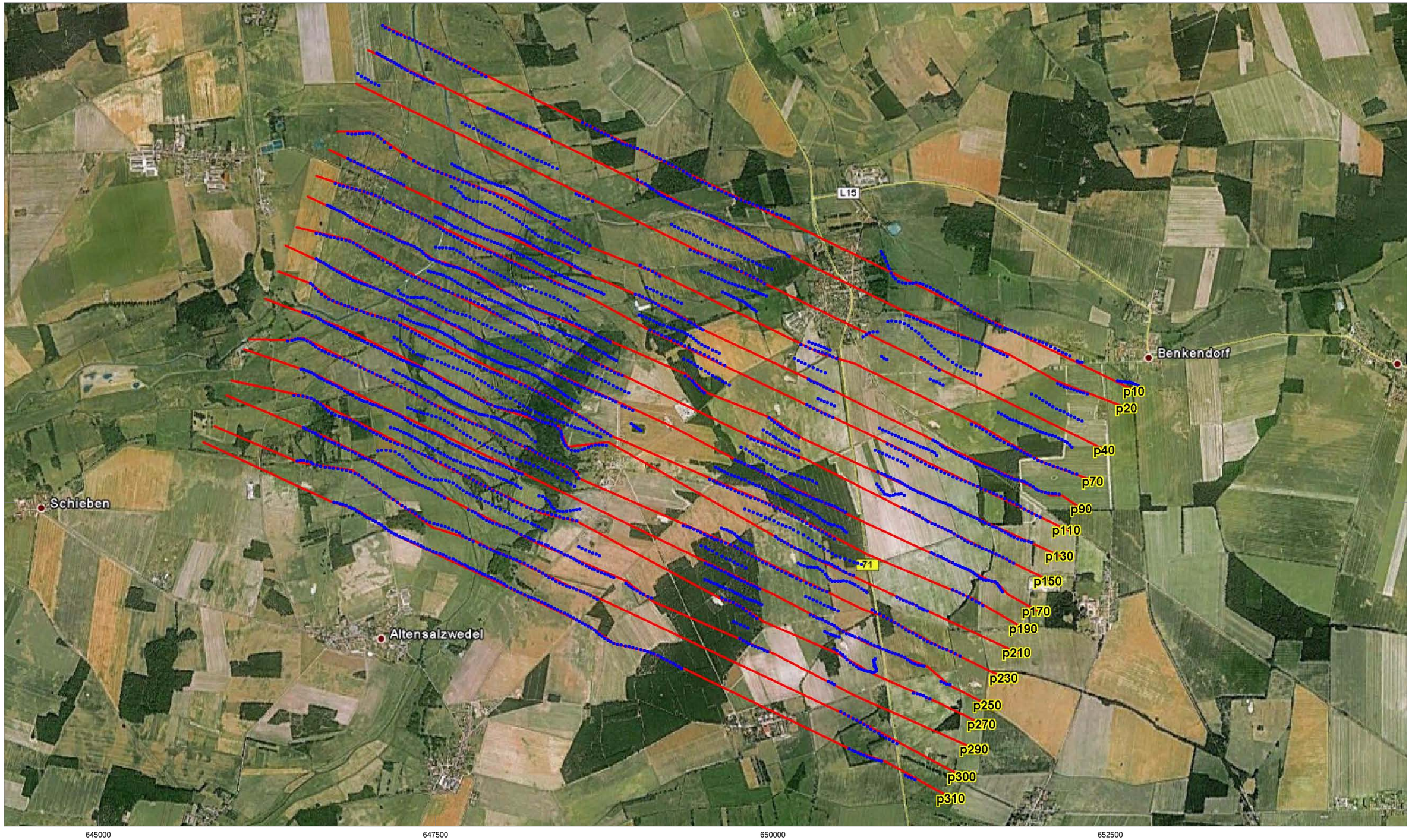
Spatially constrained inversion: Smooth model

3 km

UTM Zone 32N WGS84

# APPENDIX II: CROSS SECTIONS

This appendix shows cross sections along roughly every other flight line. Each cross section shows the 1D-model bars from the smooth inversion result. The colors are faded below the DOI lower. The grey lines show the DOI upper and DOI lower values gridded from models within 150 m.




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

# SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1D model

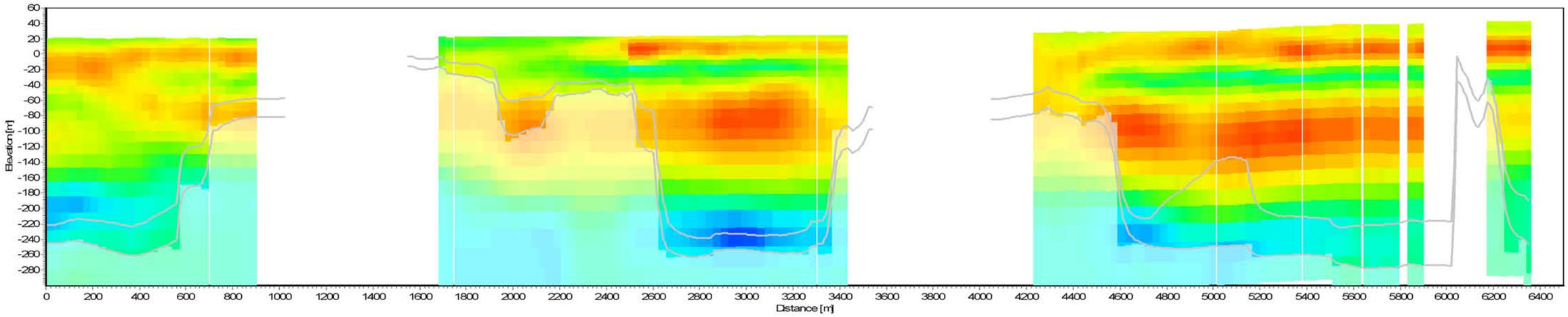
Profiles

## Locations of Cross Sections

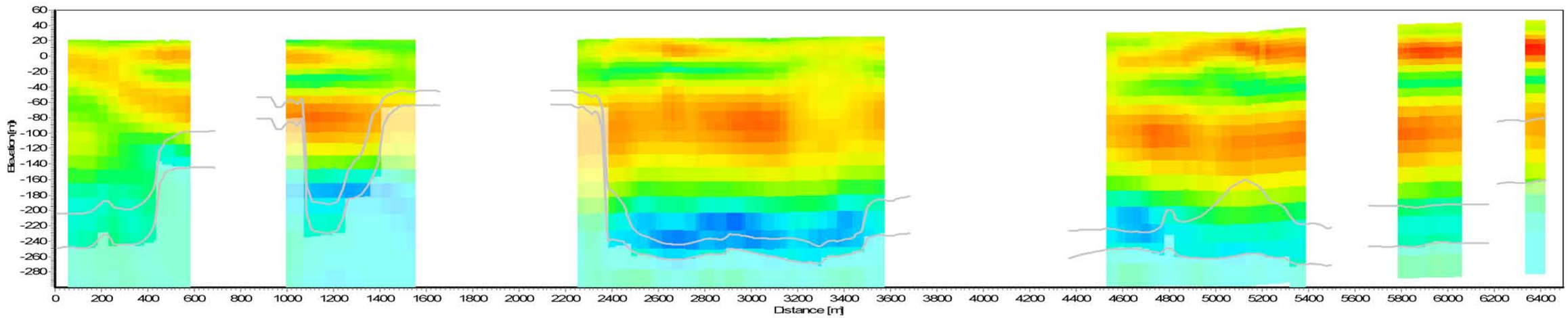
3 km

UTM Zone 32N WGS84

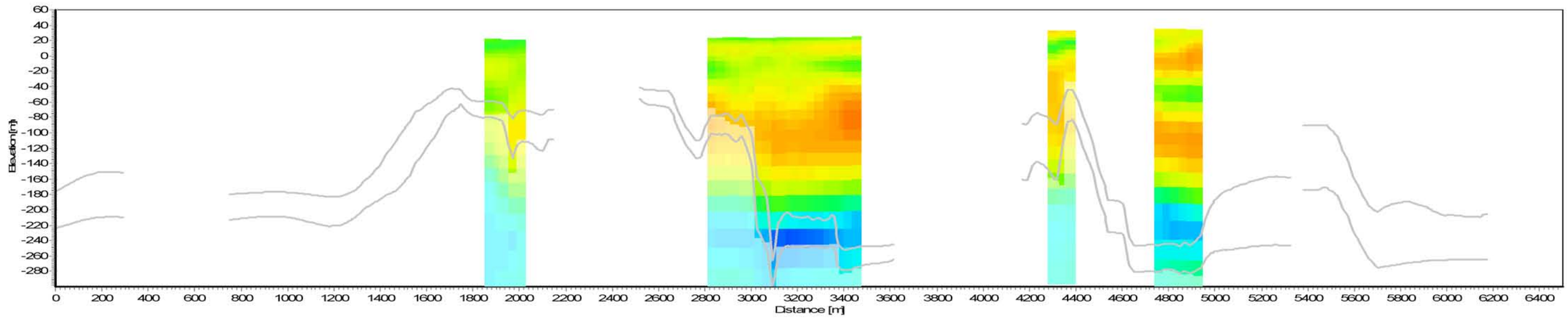
P10




P20

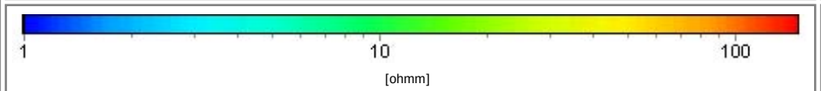



P40




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

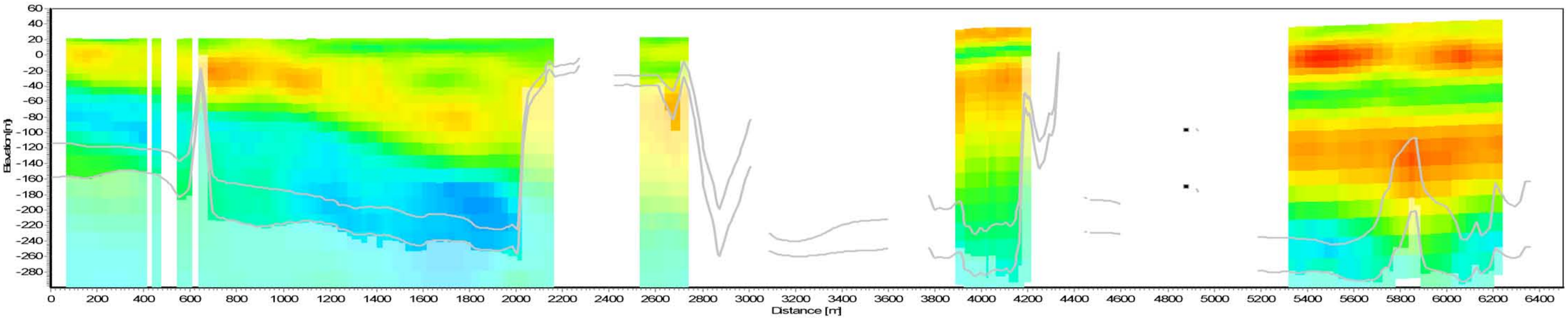
SkyTEM Survey, Maxdorf 2011



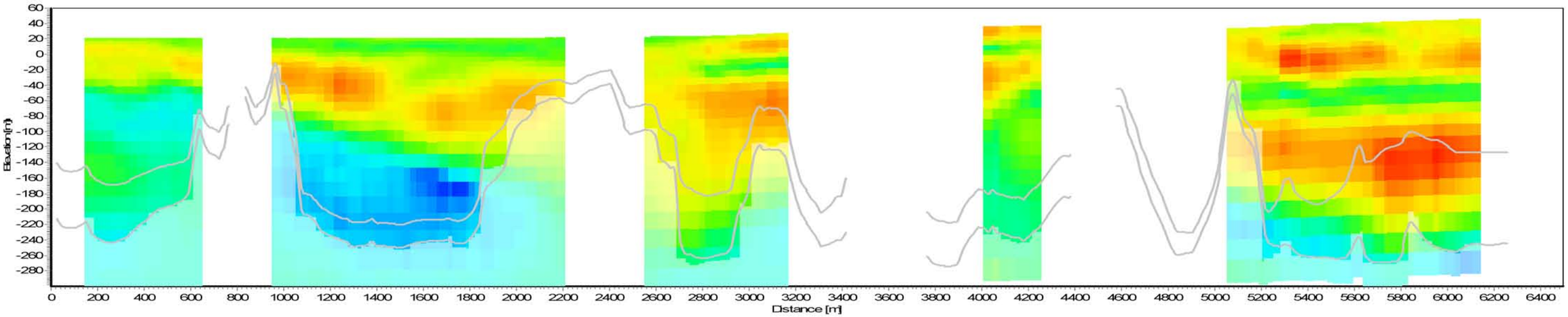

Cross sections with 1D resistivity models

Each cross section show the 1D-model bars from the smooth inversion result.
The colors are faded below the DOI lower.
The grey lines show the DOI upper and DOI lower values gridded from models within 150 m.

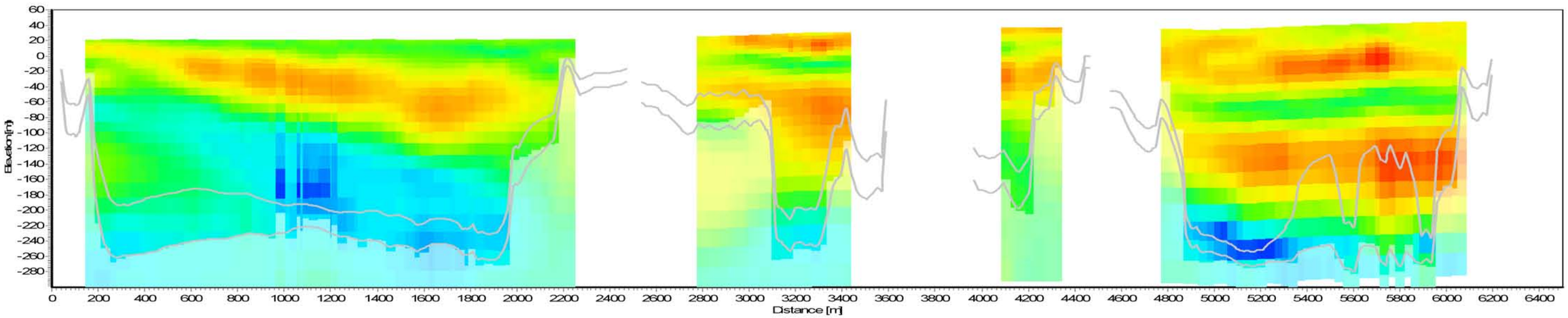
P70




P90




P110




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

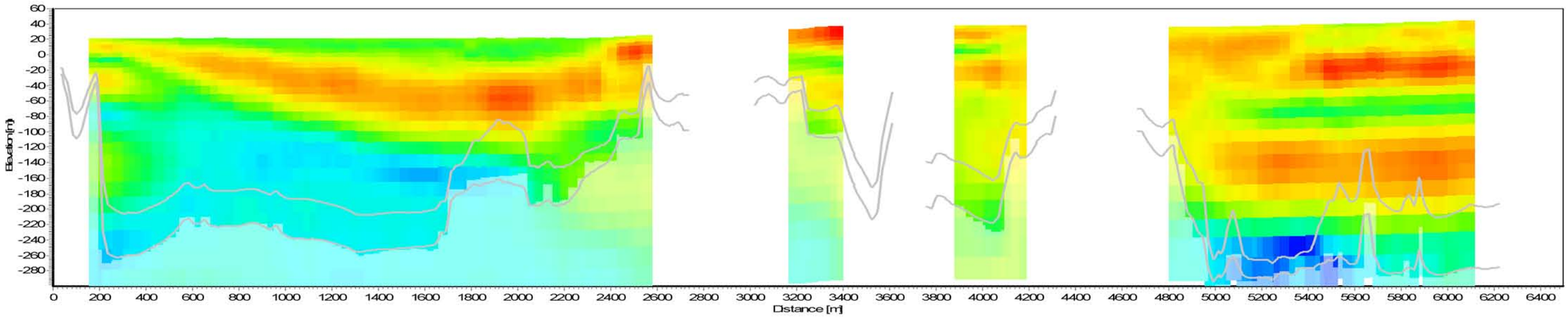
SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

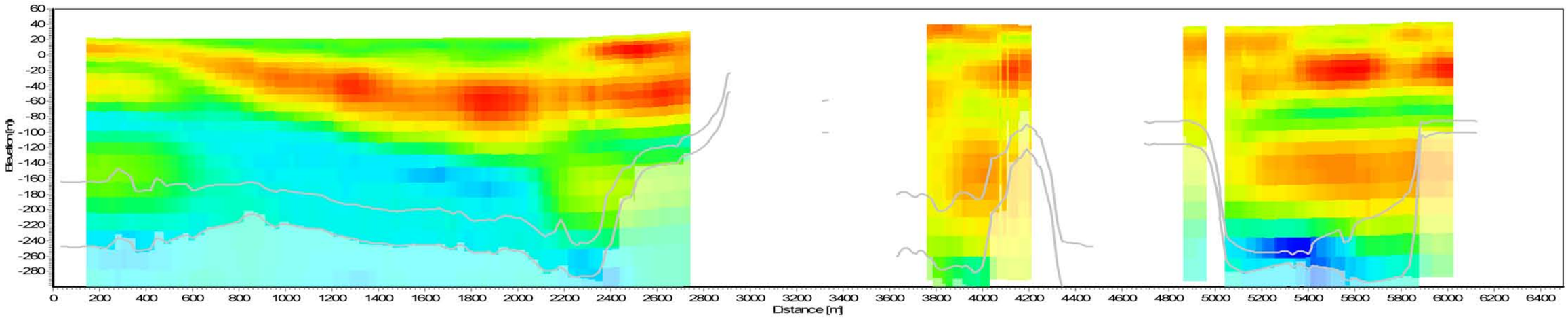
Cross sections with 1D resistivity models

Each cross section show the 1D-model bars from the smooth inversion result.
The colors are faded below the DOI lower.
The grey lines show the DOI upper and DOI lower values gridded from models within 150 m.

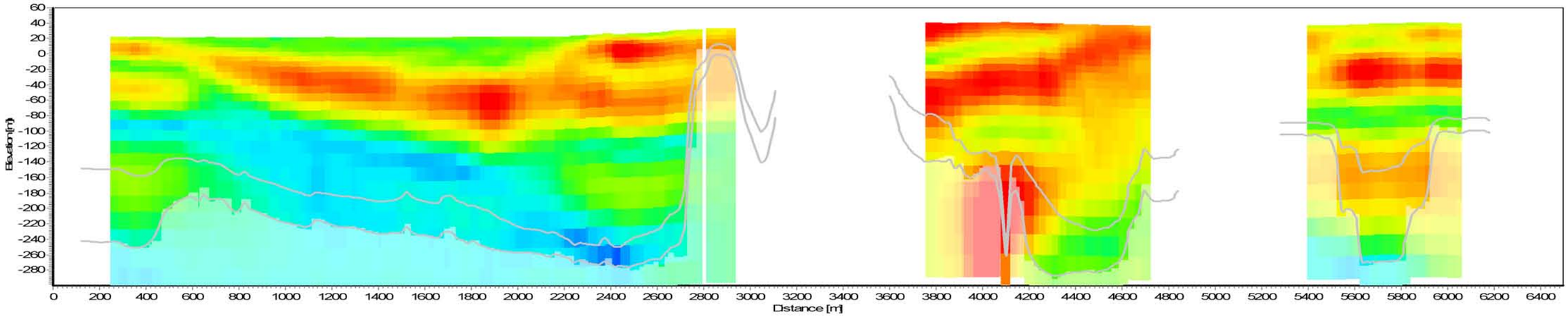
P130




P150




P170




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

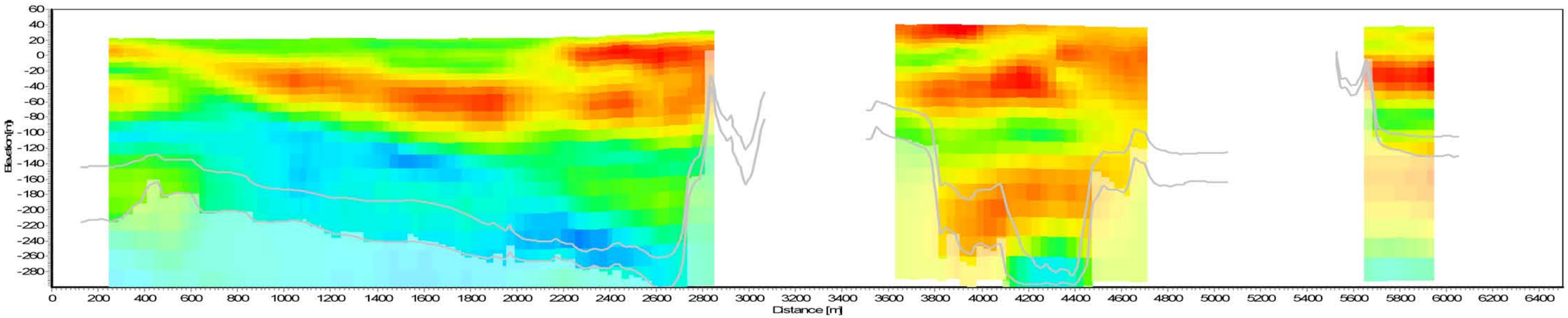
SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

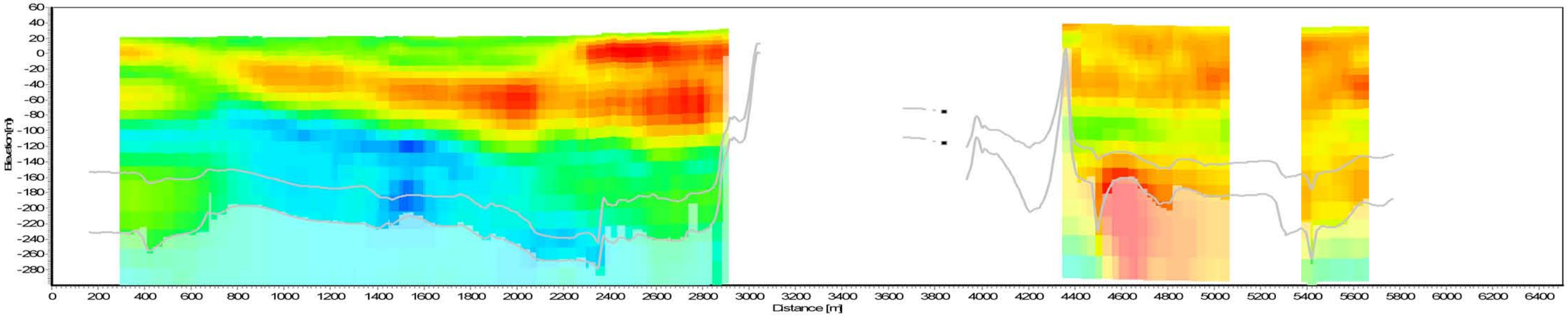
Cross sections with 1D resistivity models

Each cross section show the 1D-model bars from the smooth inversion result.
The colors are faded below the DOI lower.
The grey lines show the DOI upper and DOI lower values gridded from models within 150 m.

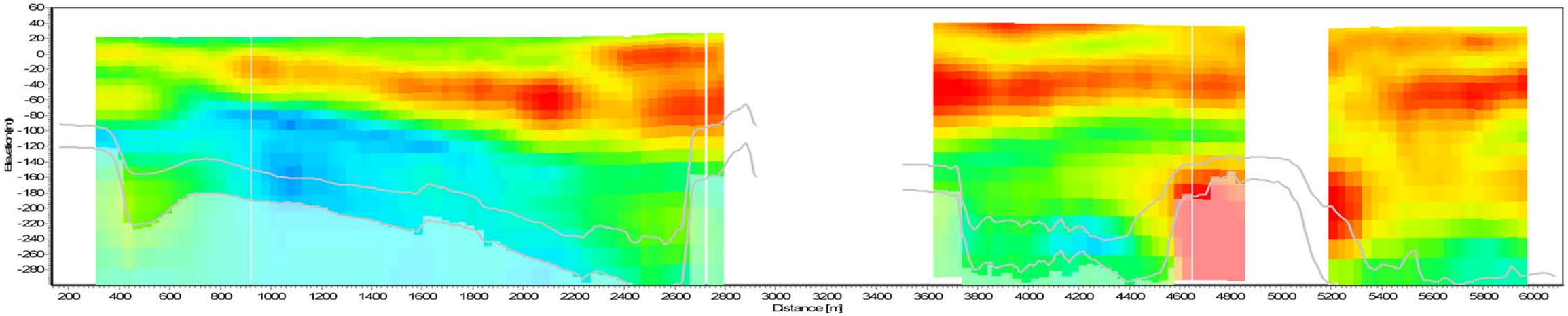
P190




P210

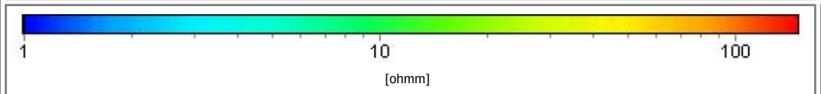



P230




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

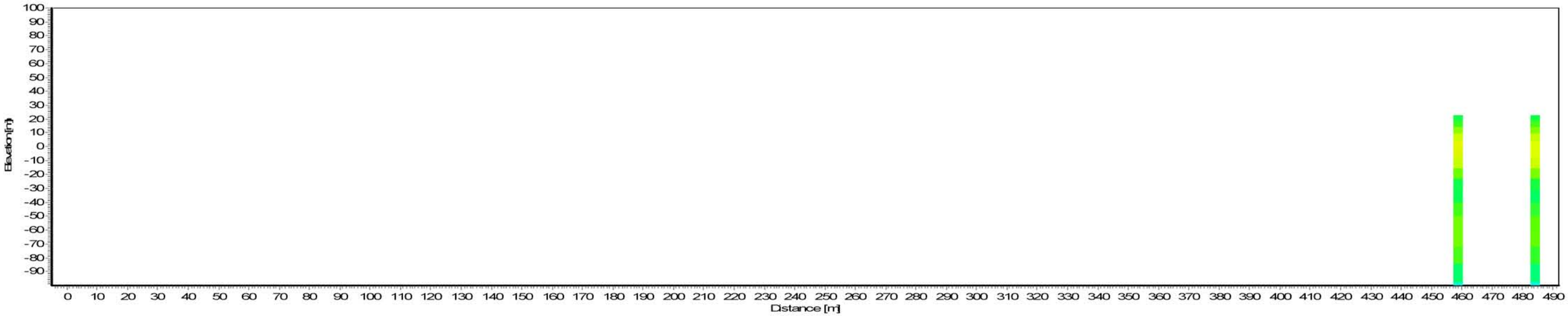
SkyTEM Survey, Maxdorf 2011



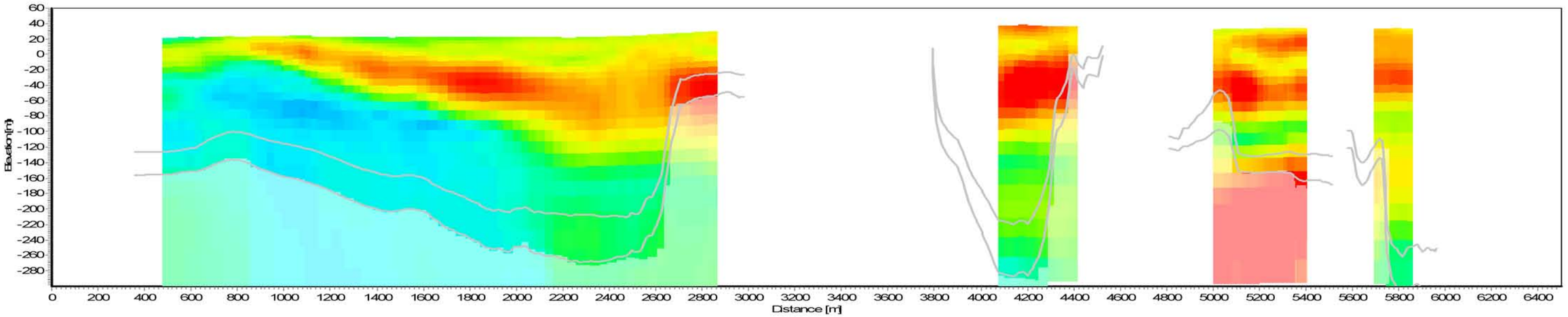

Cross sections with 1D resistivity models

Each cross section show the 1D-model bars from the smooth inversion result.
The colors are faded below the DOI lower.
The grey lines show the DOI upper and DOI lower values gridded from models within 150 m.

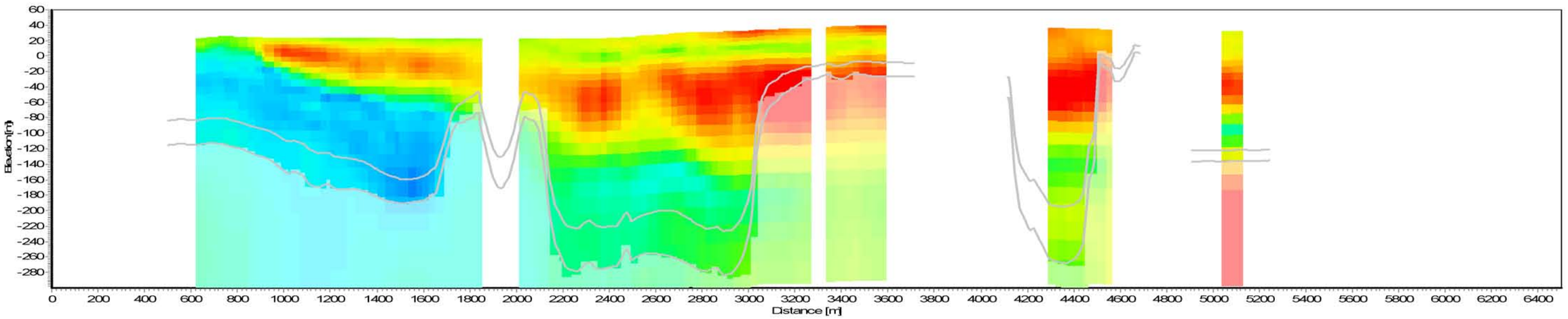
P250




P270




P290




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

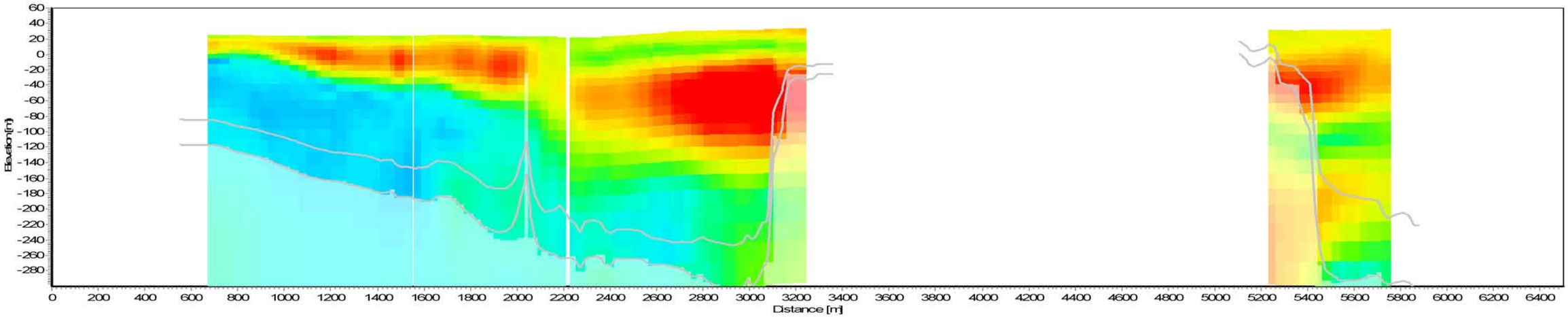
SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

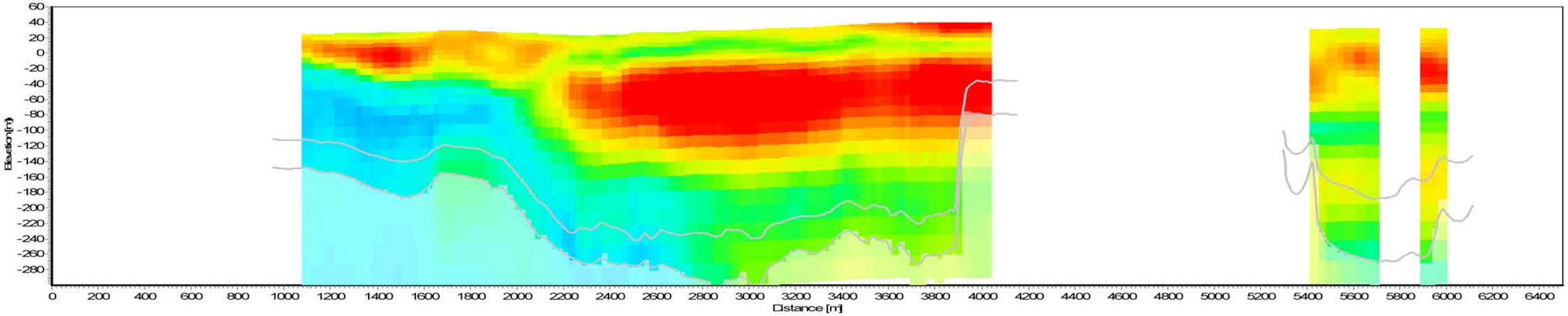
Cross sections with 1D resistivity models

Each cross section show the 1D-model bars from the smooth inversion result.
The colors are faded below the DOI lower.
The grey lines show the DOI upper and DOI lower values gridded from models within 150 m.

P300

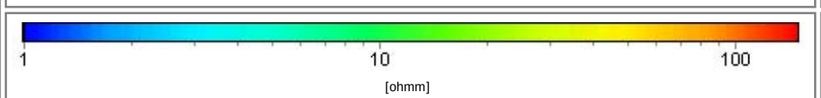



P310




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

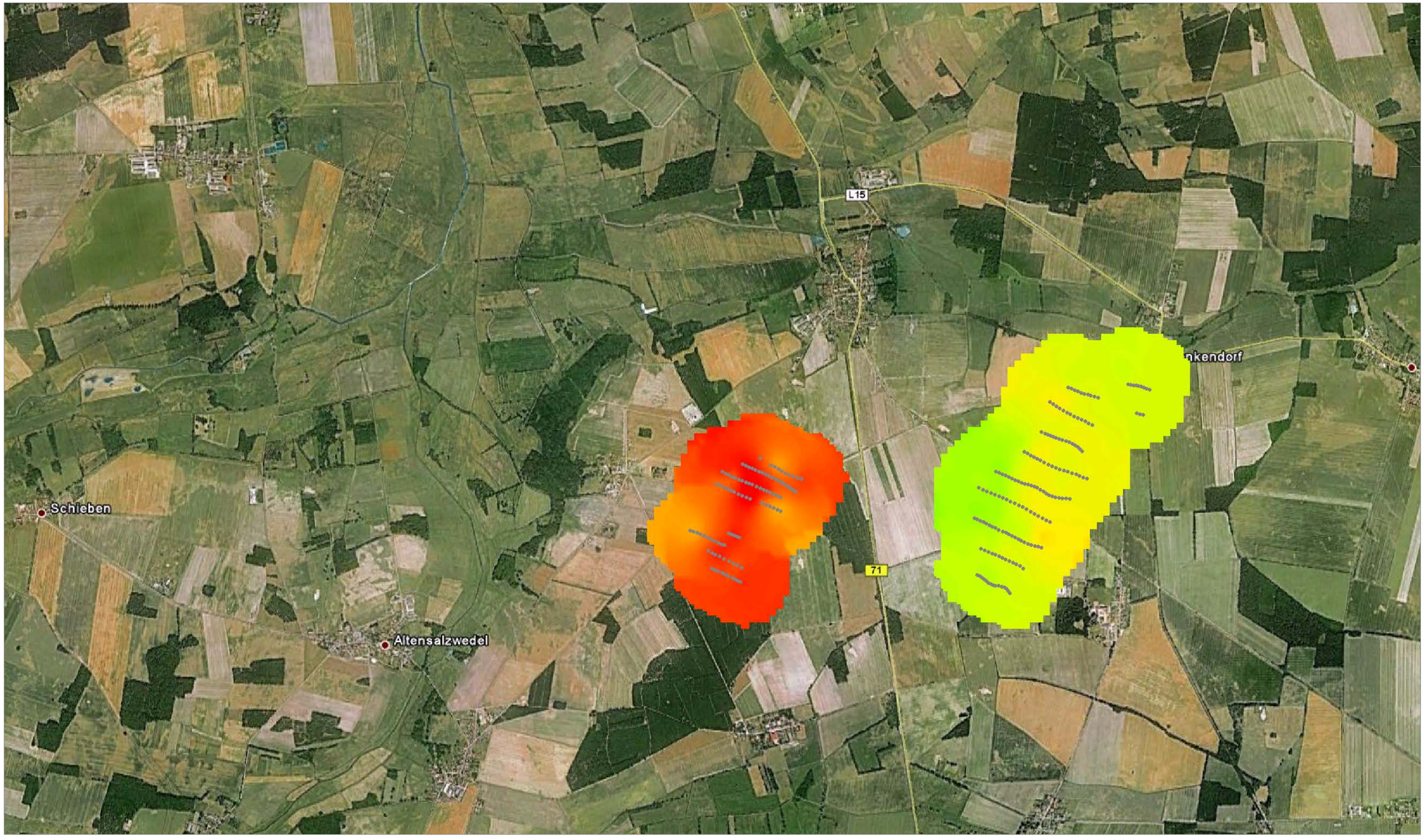



Cross sections with 1D resistivity models

Each cross section show the 1D-model bars from the smooth inversion result.
The colors are faded below the DOI lower.
The grey lines show the DOI upper and DOI lower values gridded from models within 150 m.

# APPENDIX III: MEAN RESISTIVITY MAPS

This appendix shows mean resistivity maps generated from the smooth model inversion result. The mean resistivity maps have been generated in three sets. The first set was made in 10 m elevation intervals down to a depth of 250 m below sea level. The second set was made in depth intervals of 5 m from the surface and down to 20 m below the surface. The third set continues in depth intervals of 10 m from 20 m to 50 m below the surface. Models below the DOI lower have been blinded. The gridding is done using the Kriging method, with a node spacing of 50 m and a search radius of 350 m. The nodes have further been subdivided by a factor of 3 to obtain the interpolated resistivity pixels for the bitmaps that make up the maps.




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

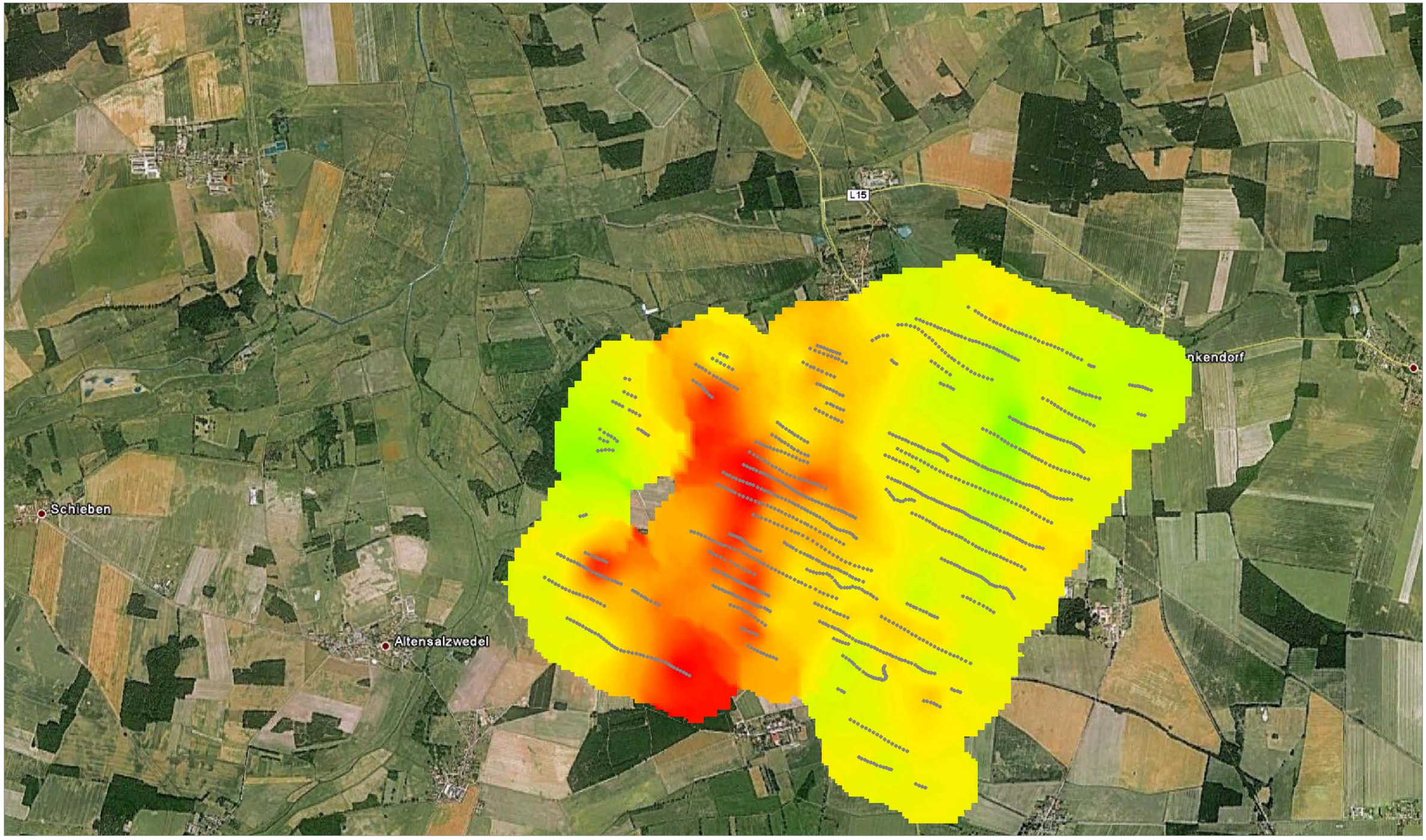
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation 40 m to 50 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation 30 m to 40 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84

HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation 20 m to 30 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84

HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

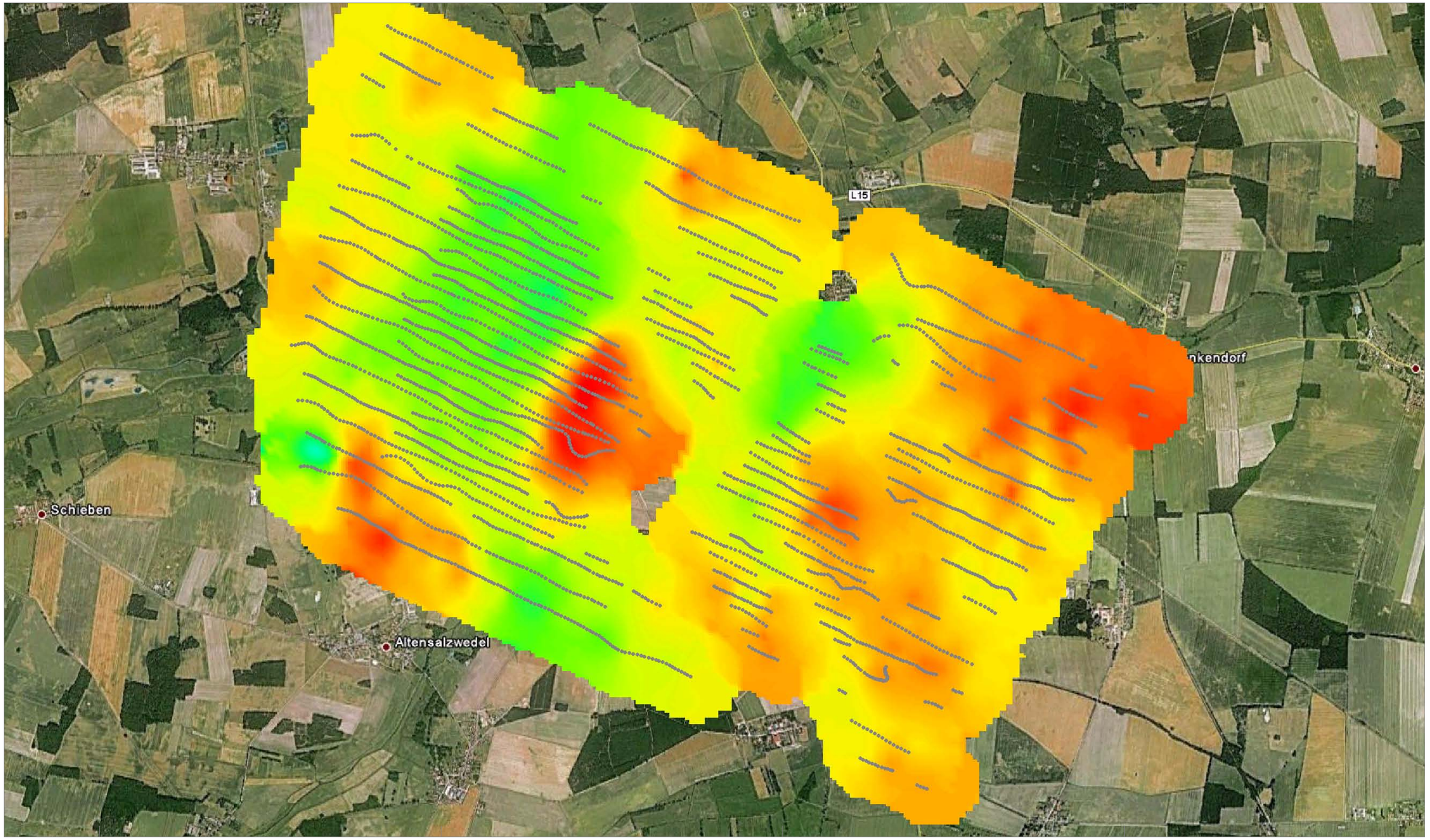
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation 10 m to 20 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

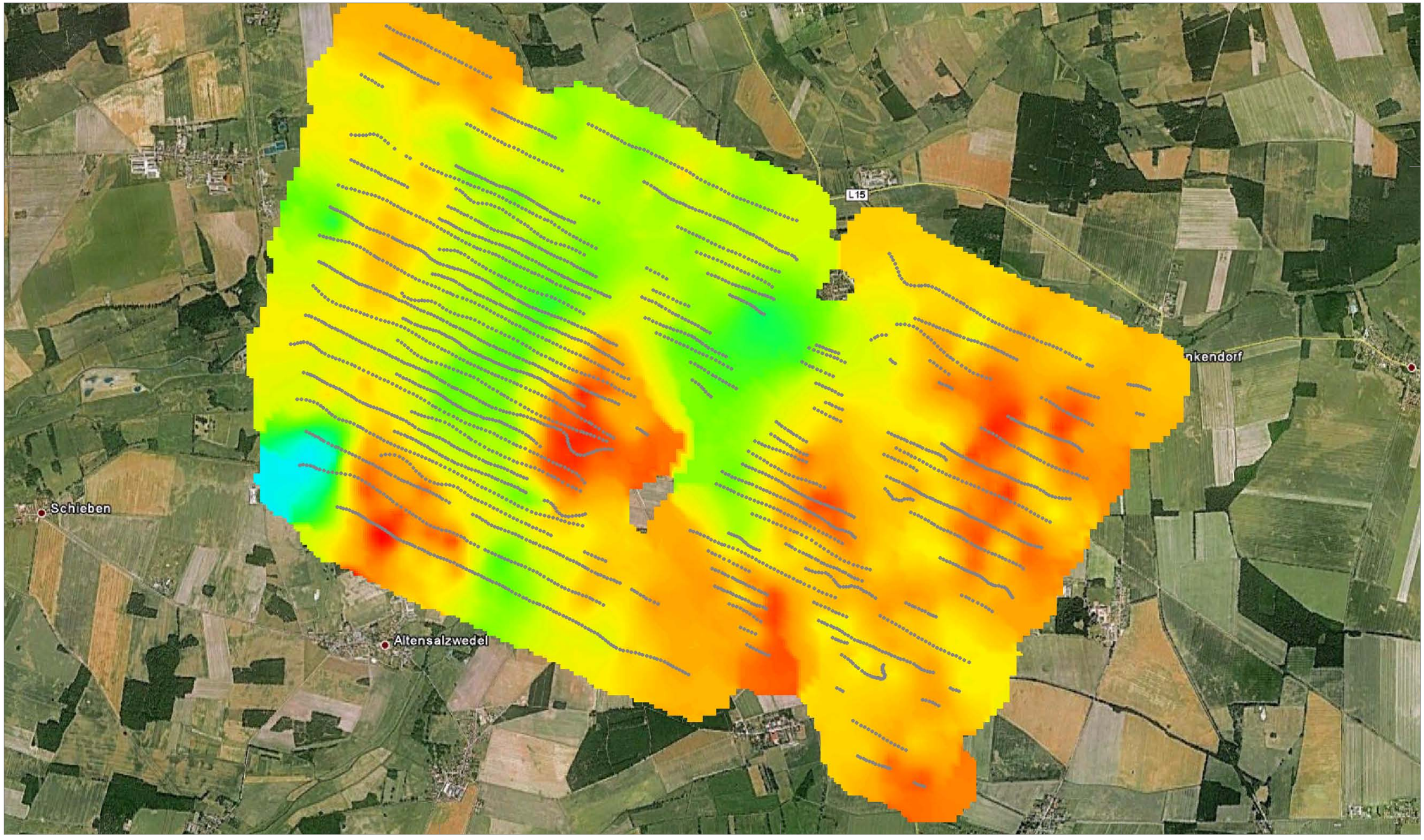
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation 0 m to 10 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -10 m to 0 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84

UTMY

5852500

5850000

645000

647500

650000

652500

UTMY

HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100

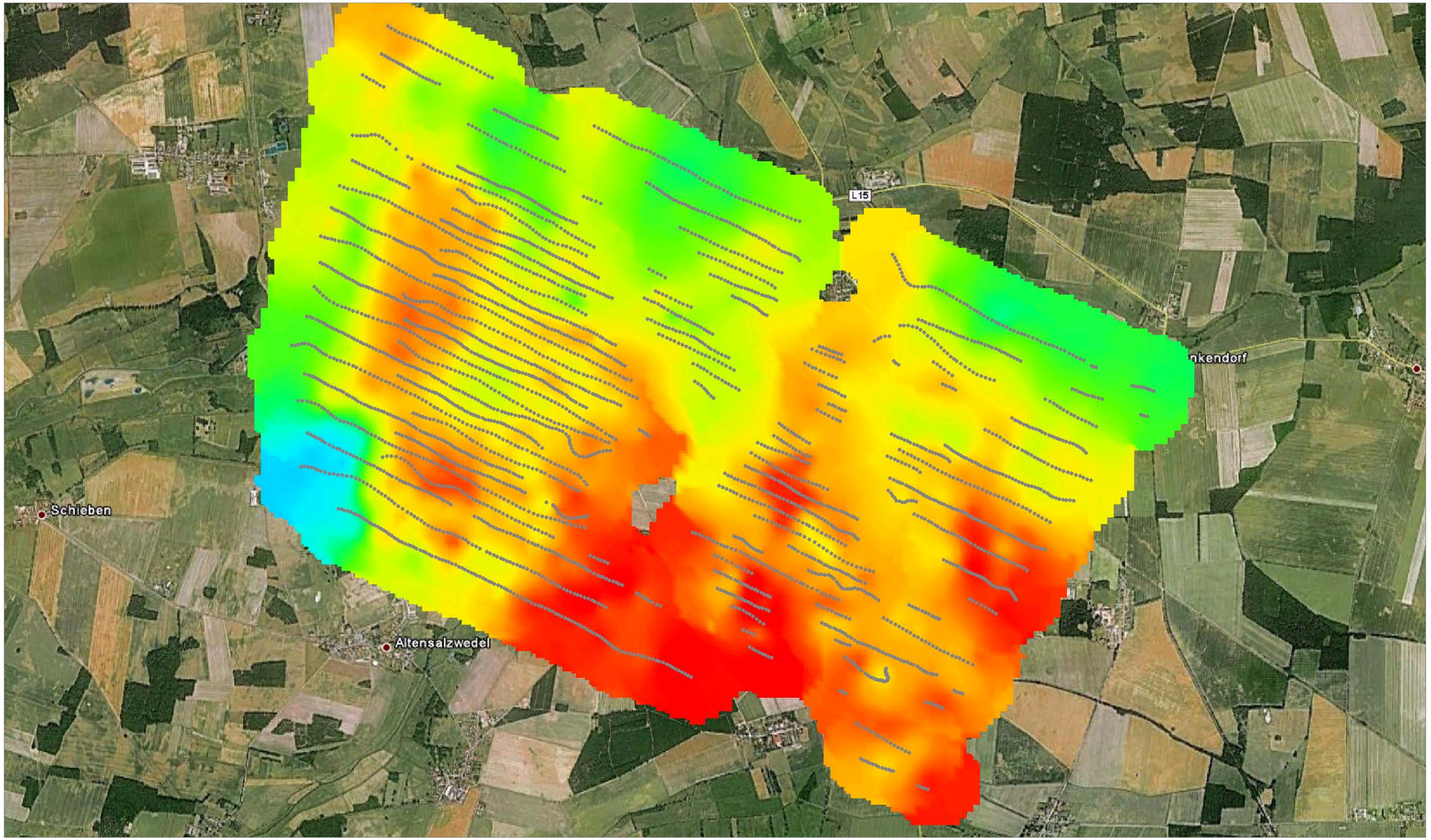
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -20 m to -10 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

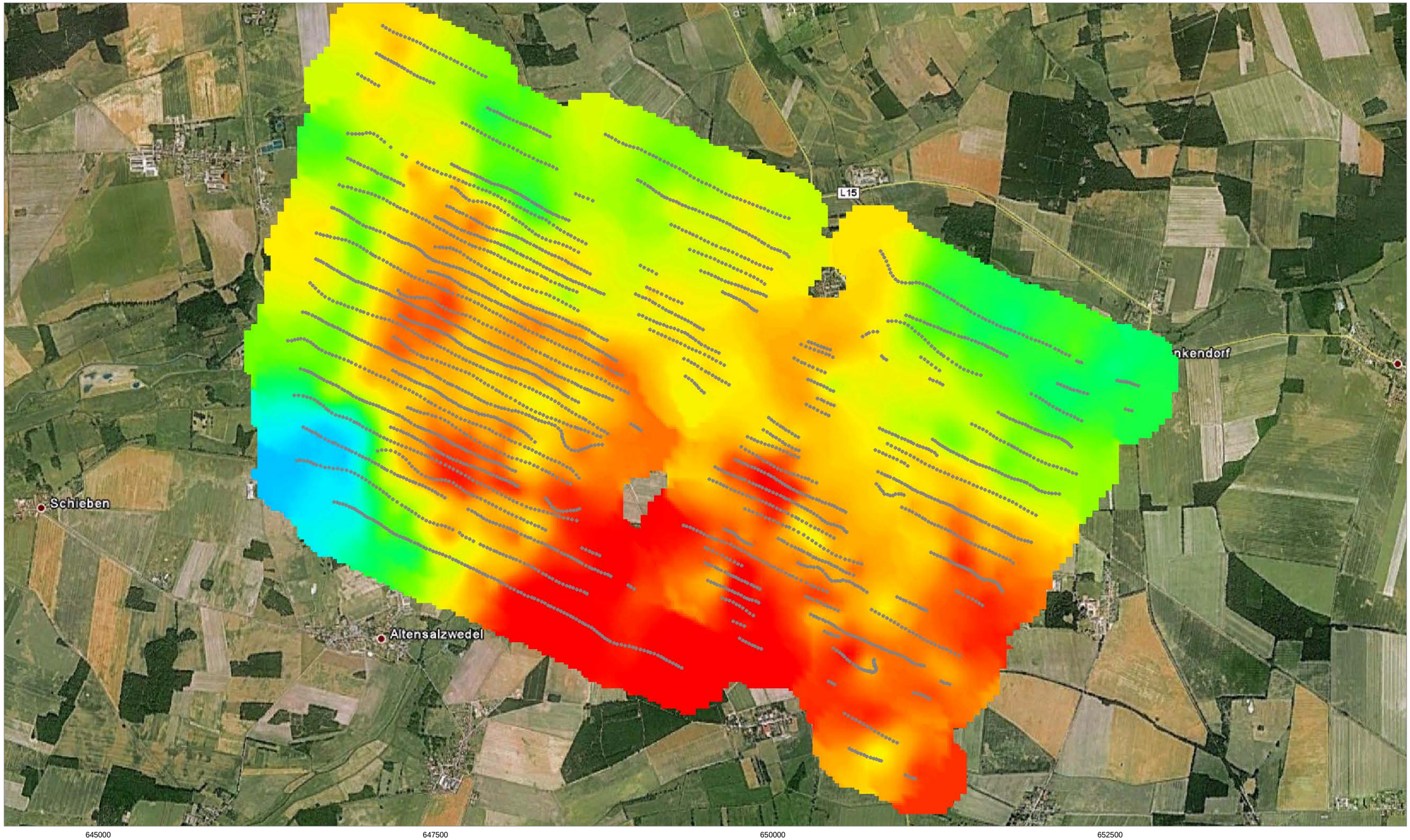
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -30 m to -20 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

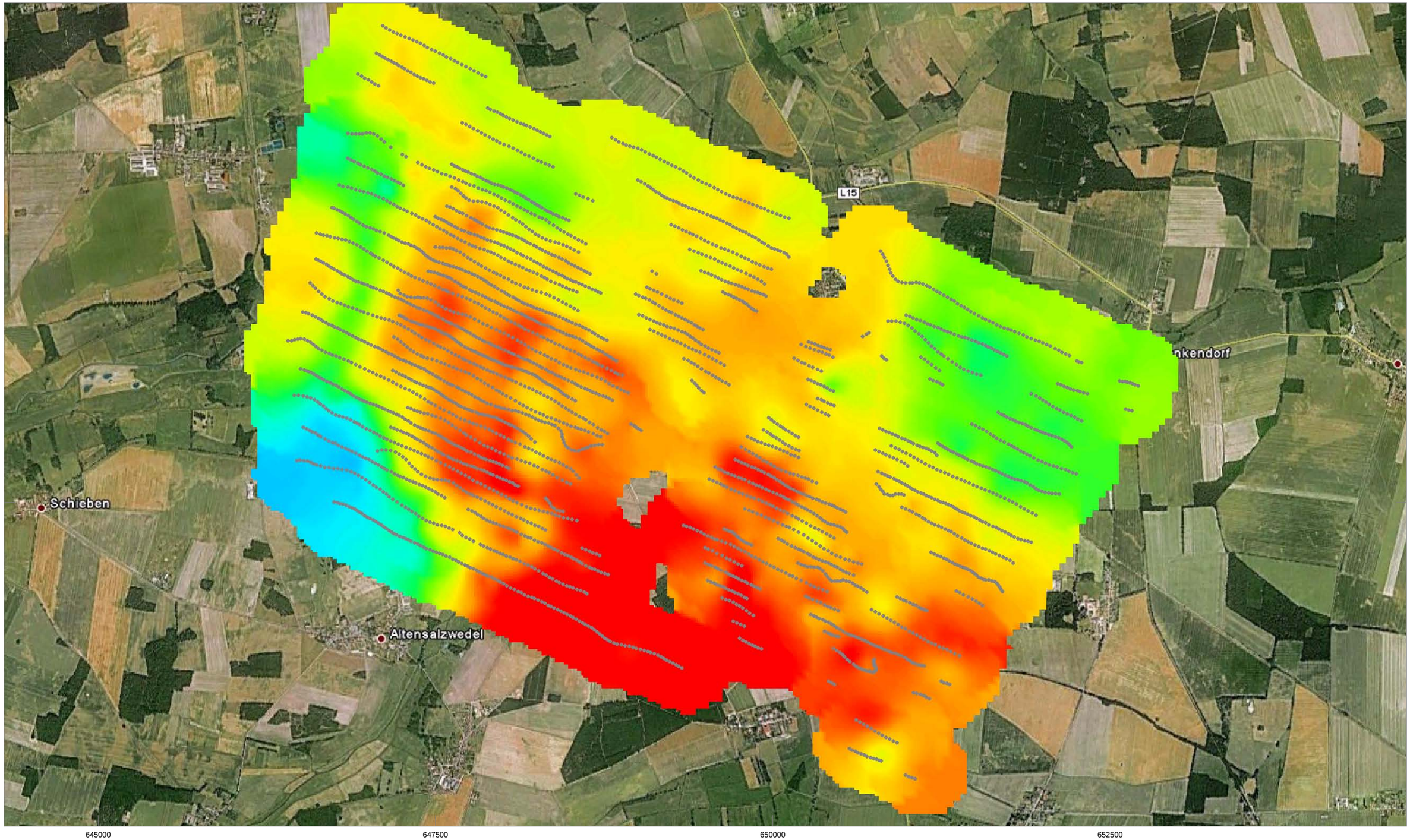
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -40 m to -30 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

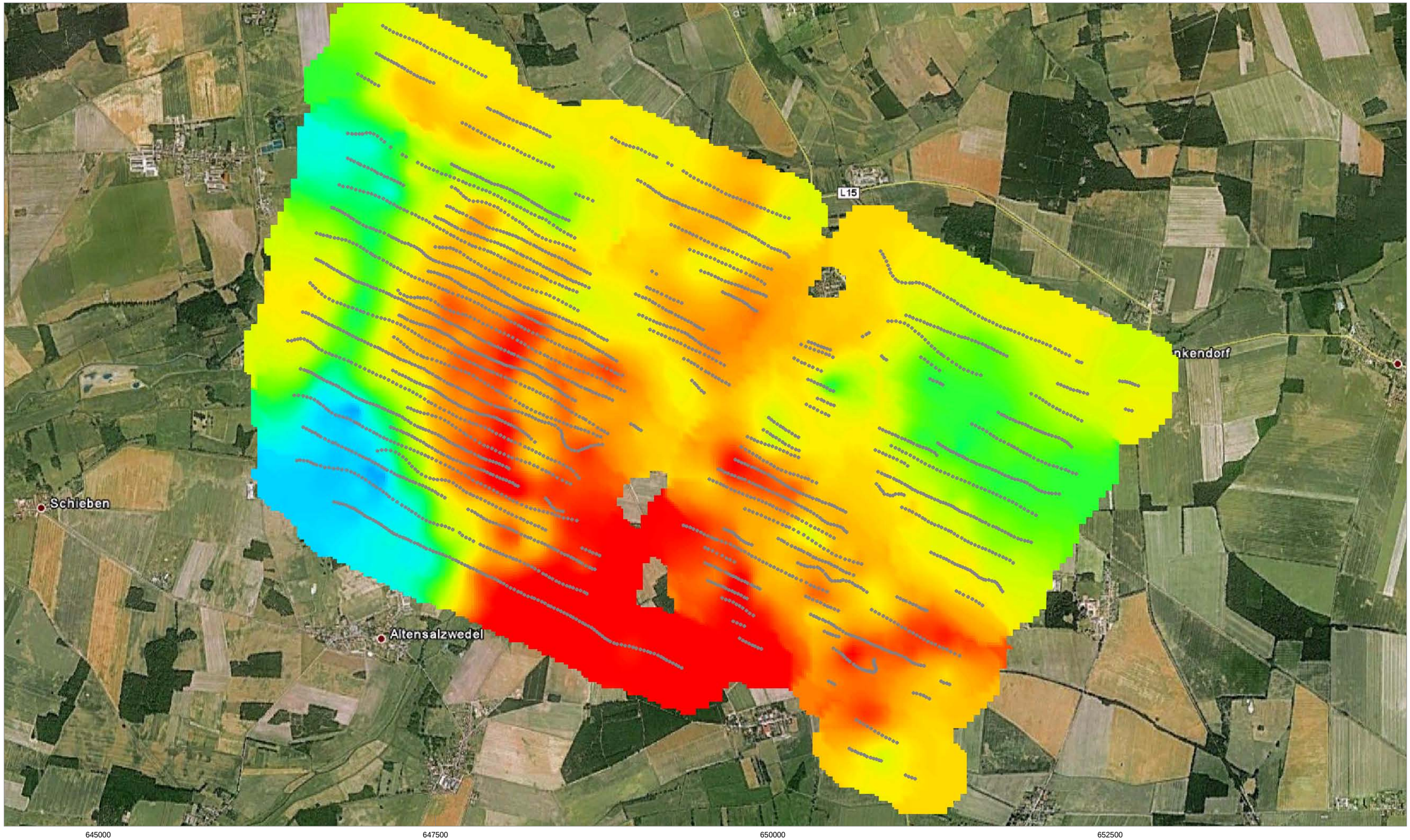
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -50 m to -40 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

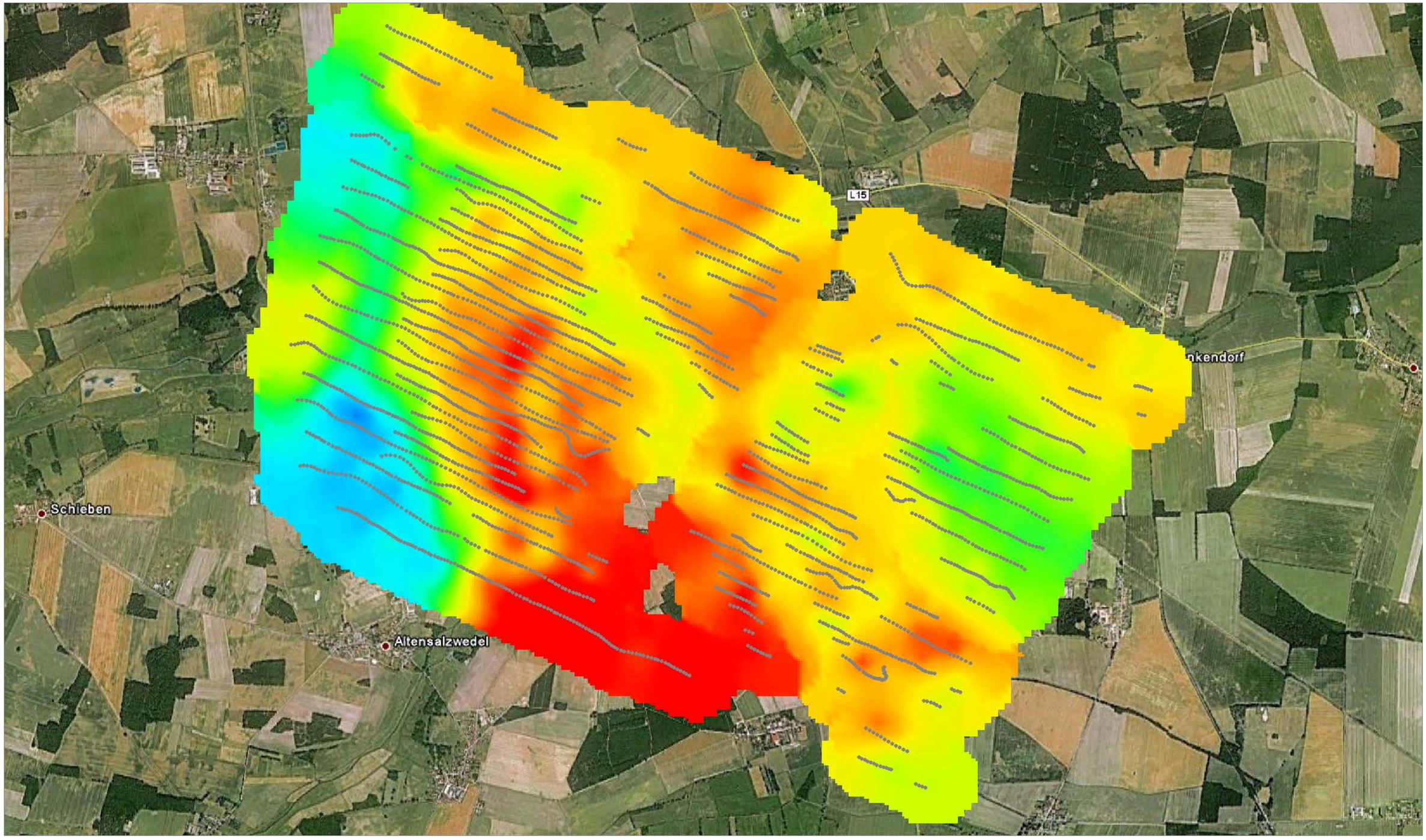
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -60 m to -50 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

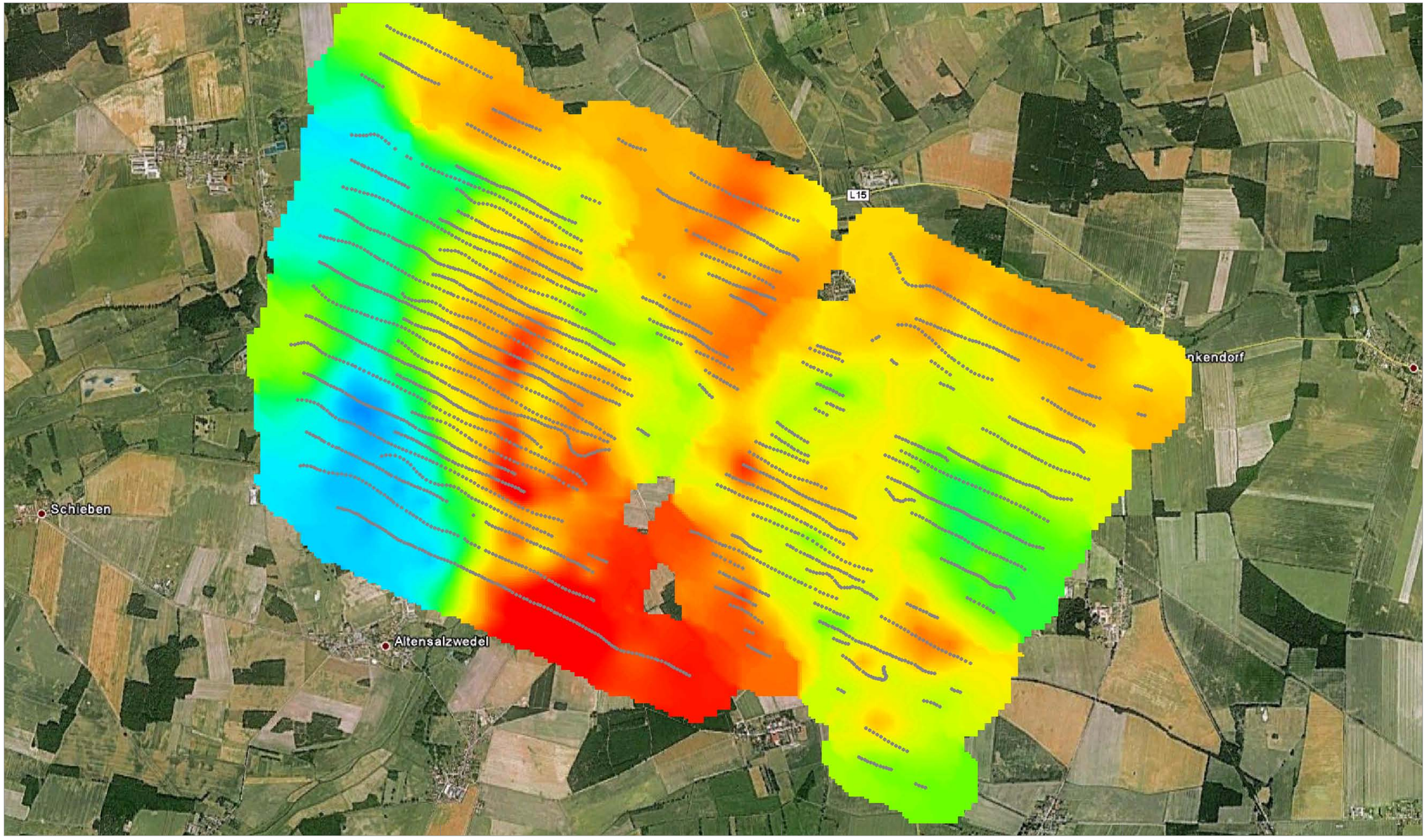
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -70 m to -60 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

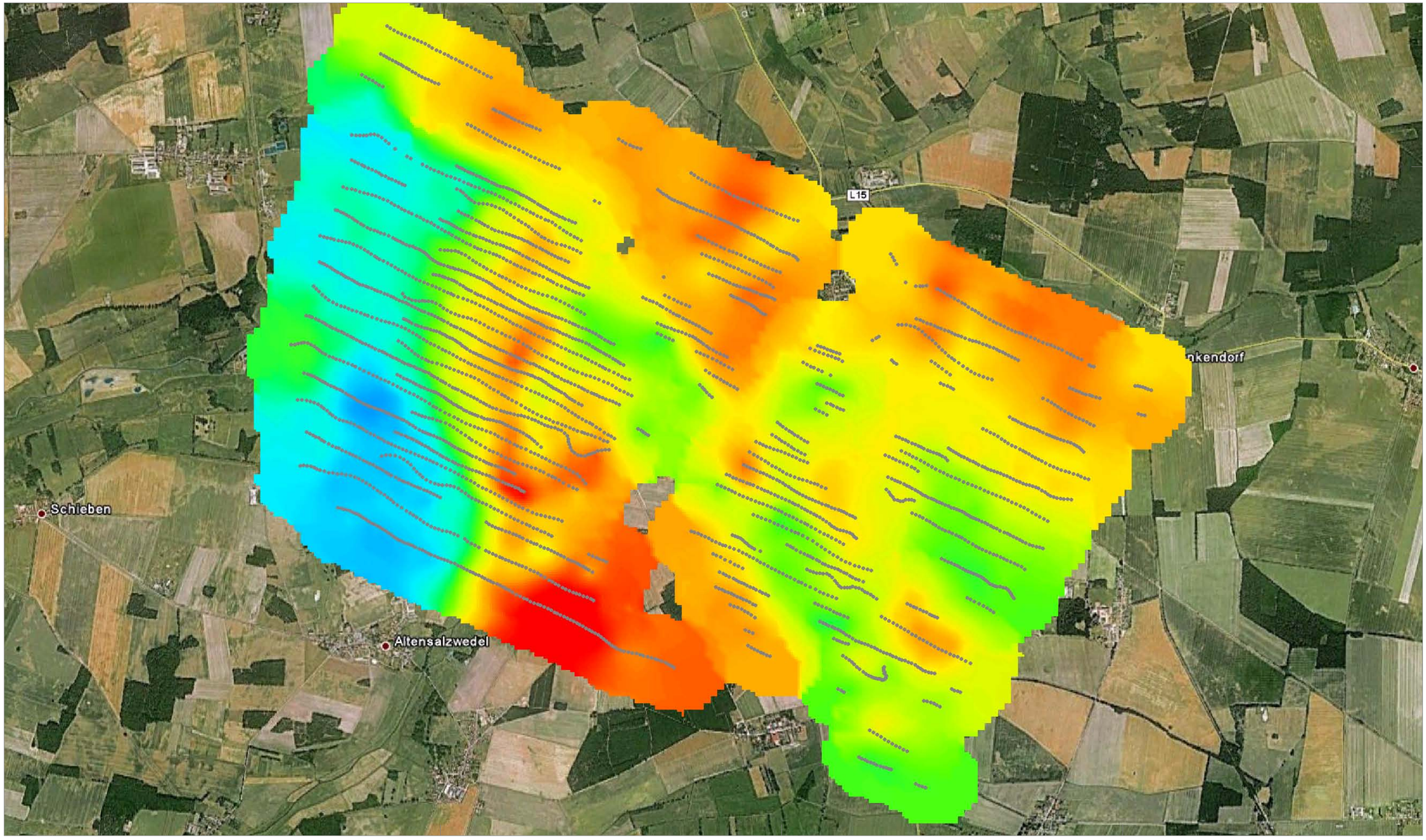
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -80 m to -70 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

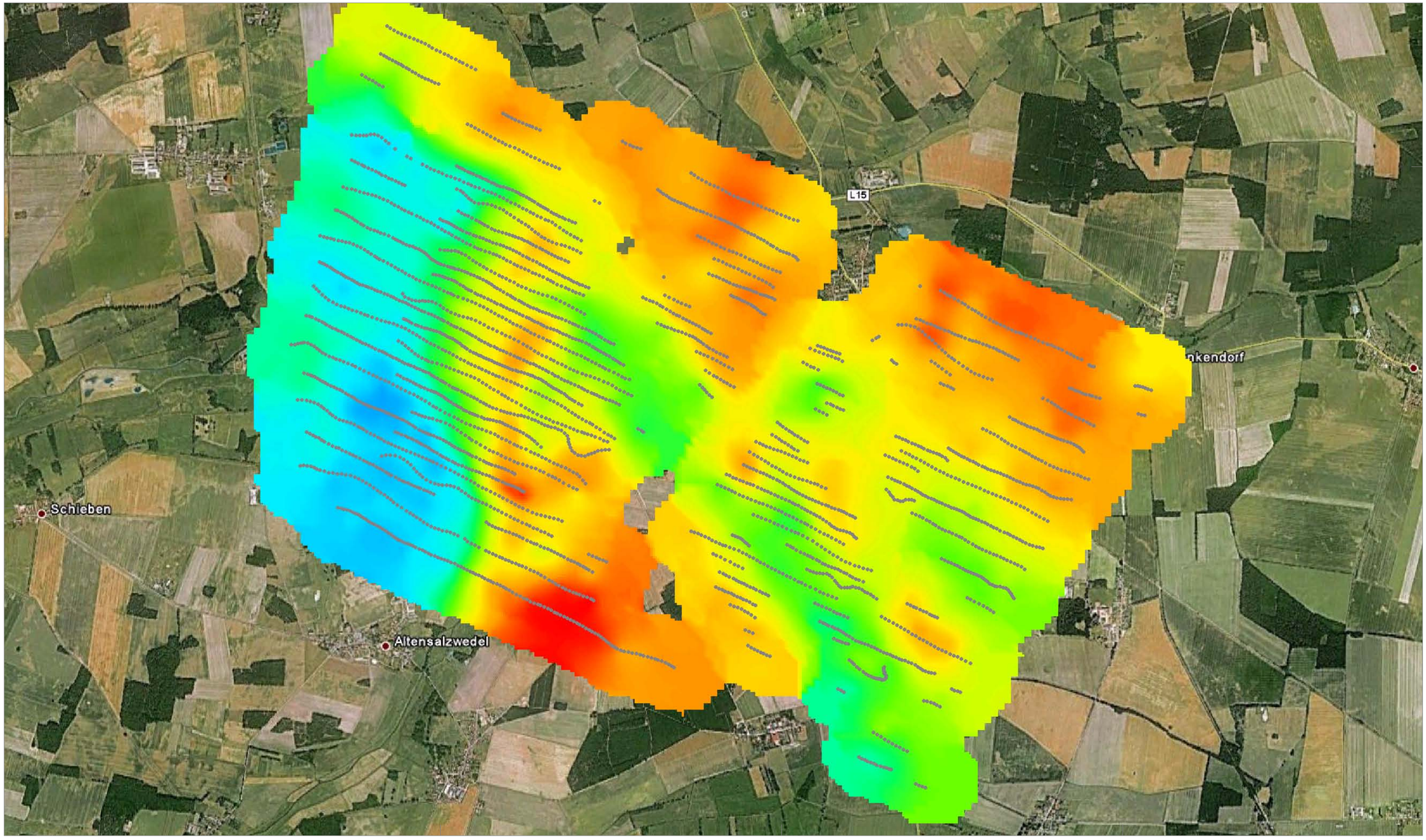
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -90 m to -80 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

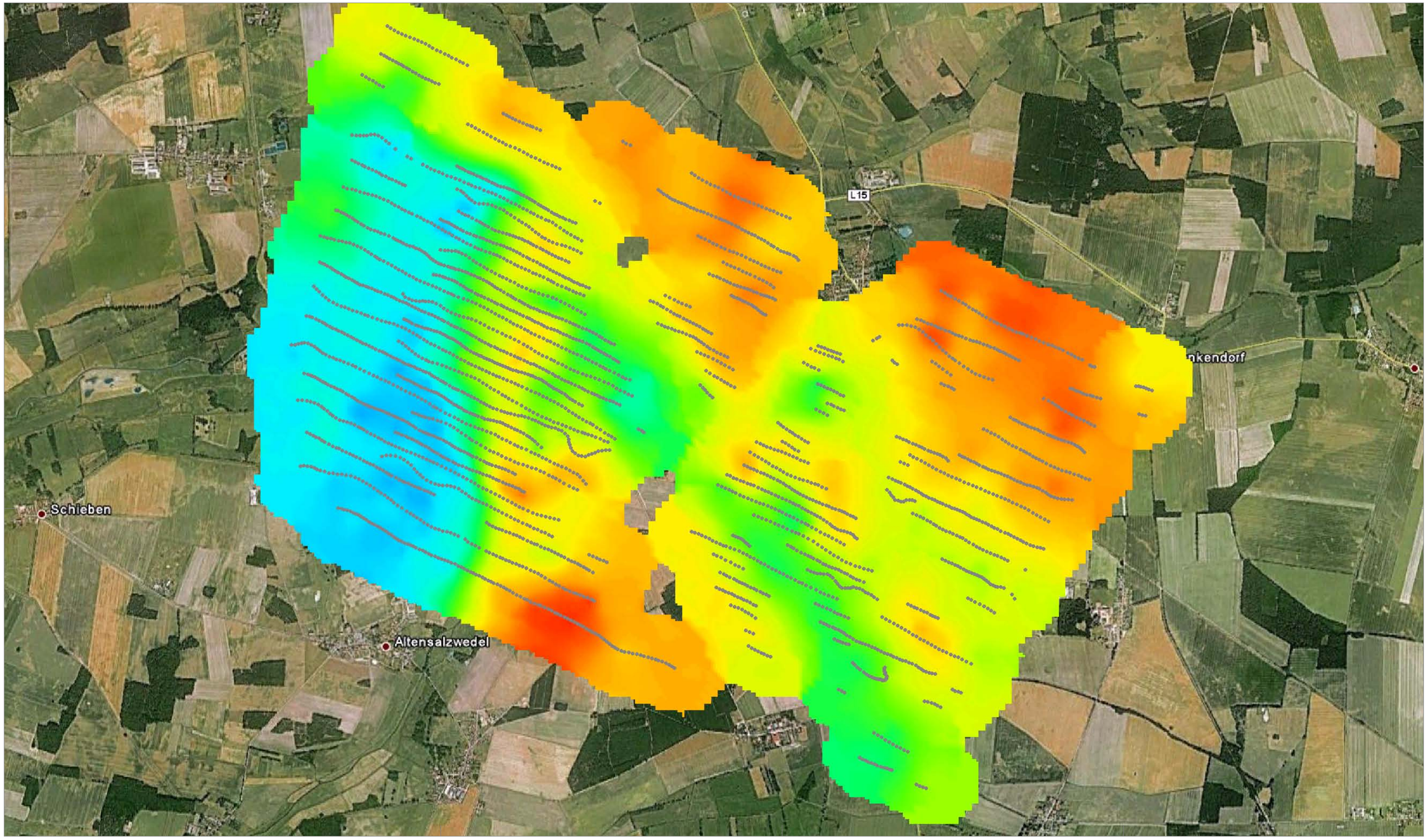
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -100 m to -90 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

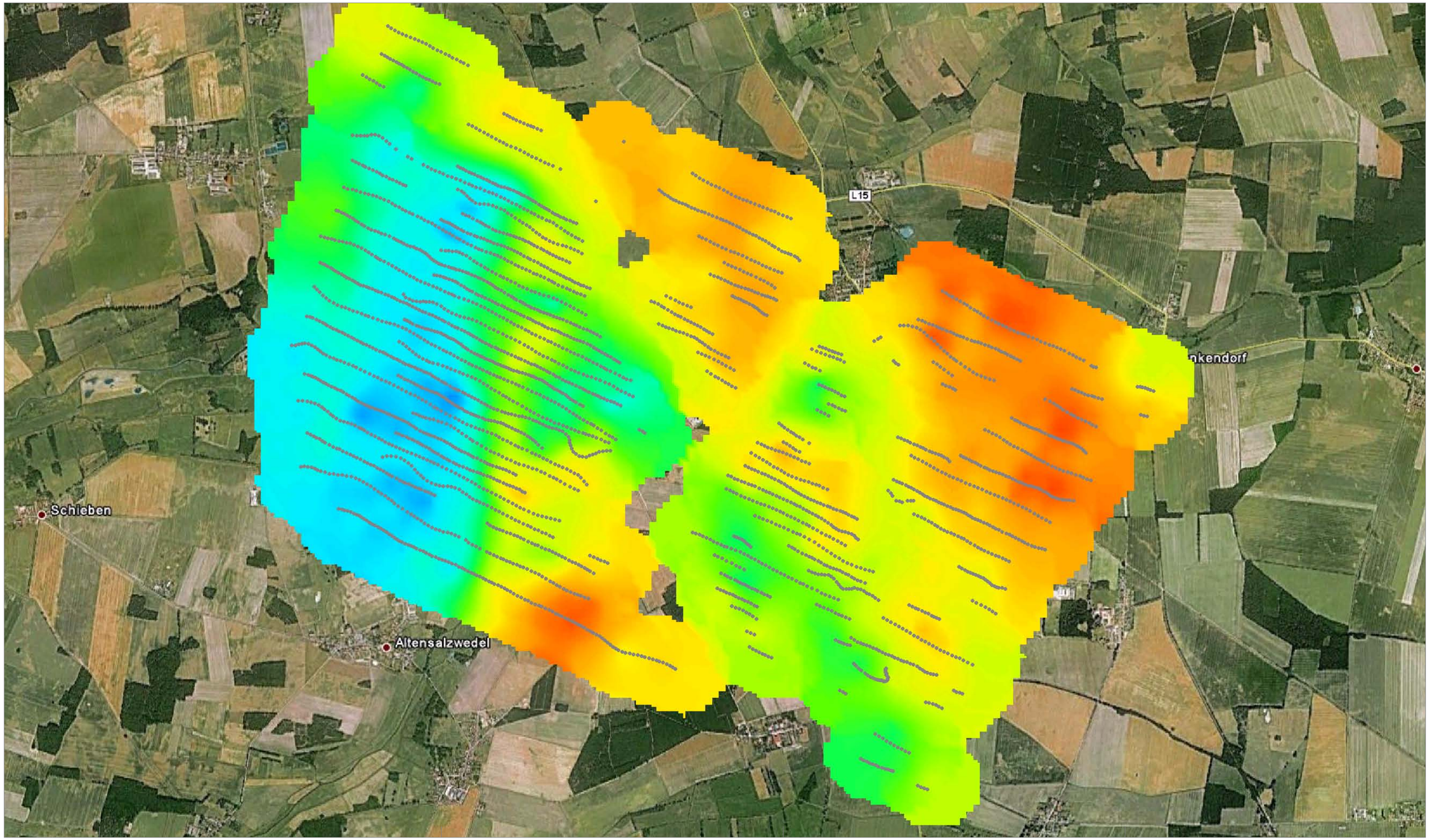
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -110 m to 100 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

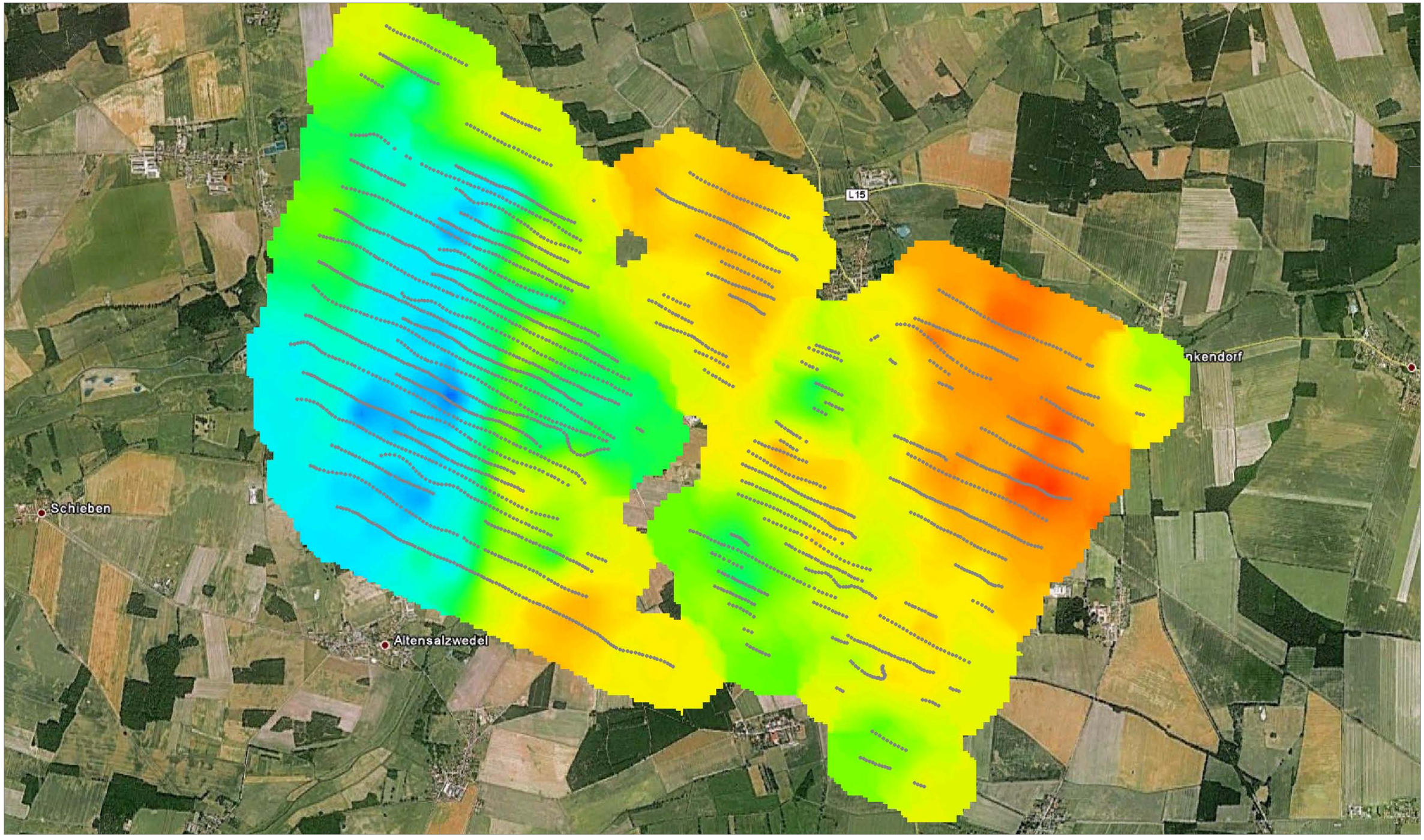
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -120 m to -110 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

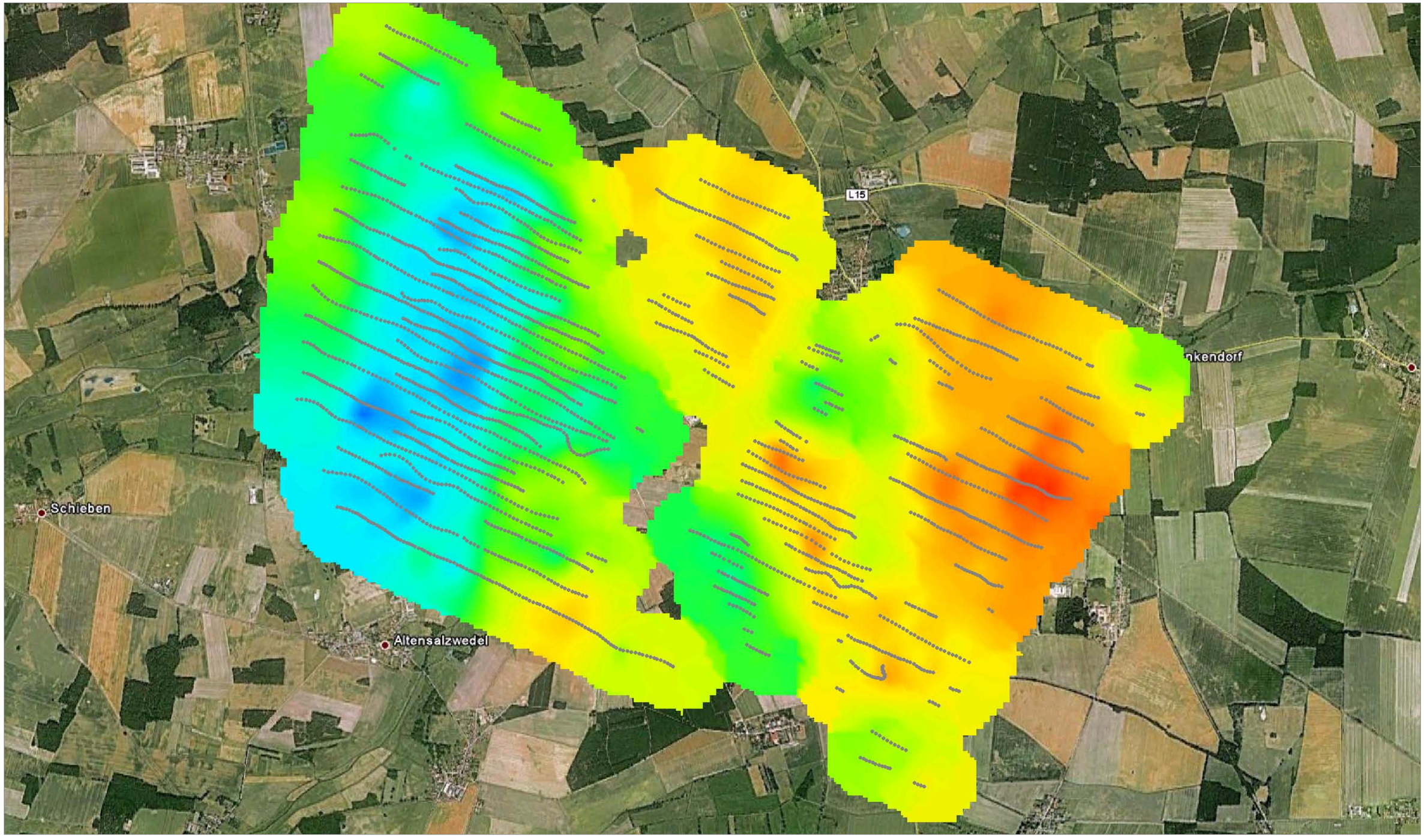
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -130 m to -120 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

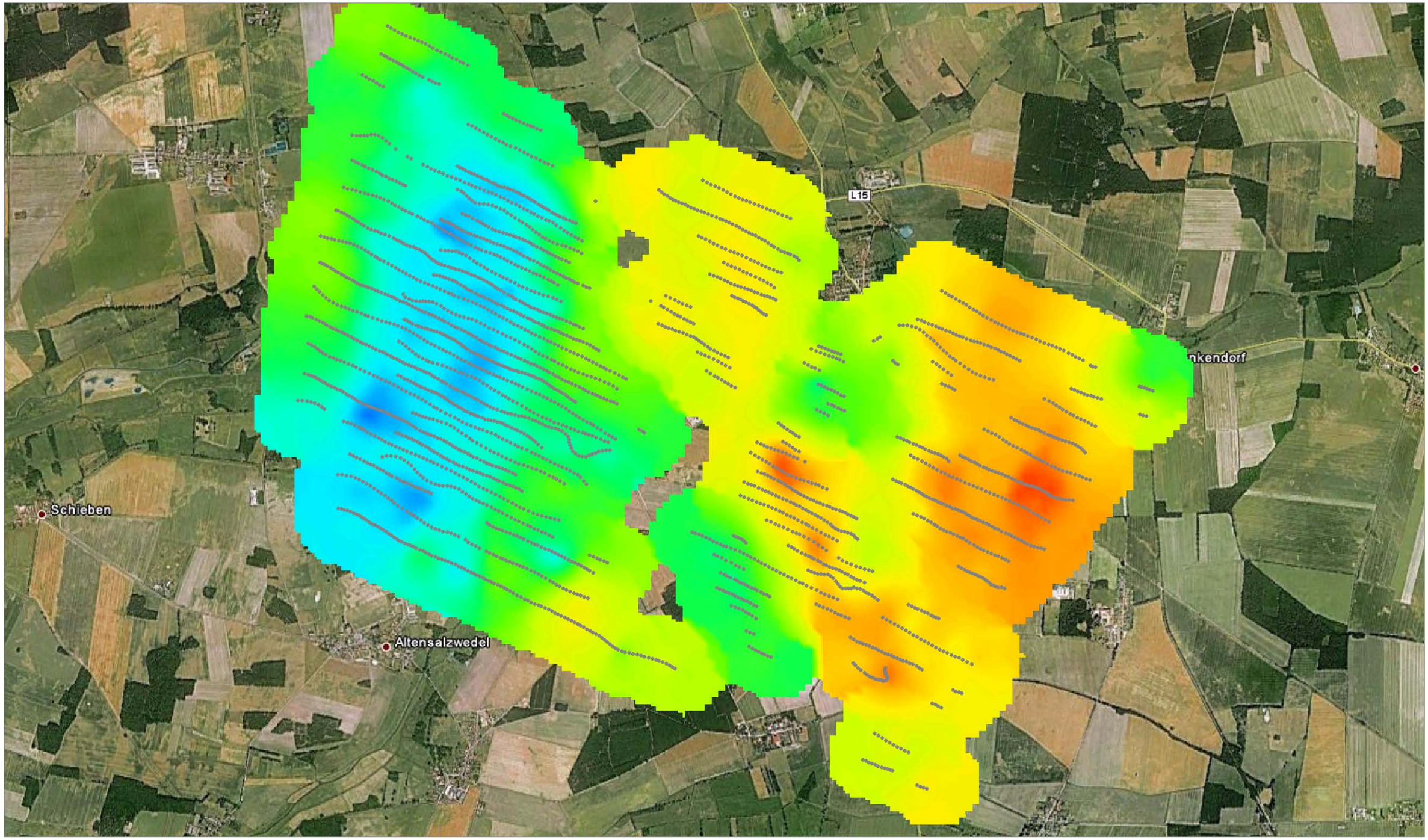
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -140 m to -130 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -150 m to -140 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84

HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

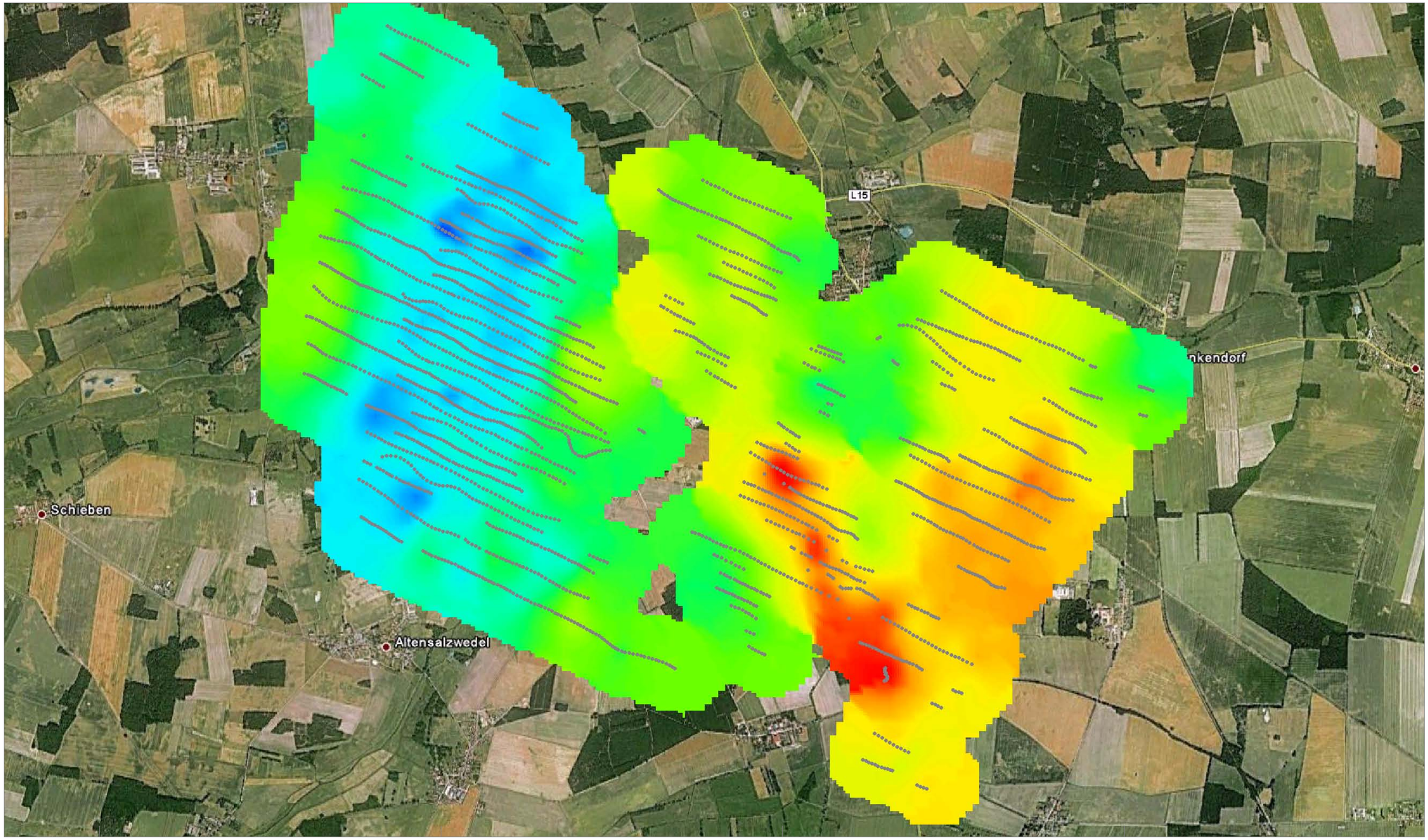
1 10 100
[ohm]

Mean resistivity, elevation -160 m to -150 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

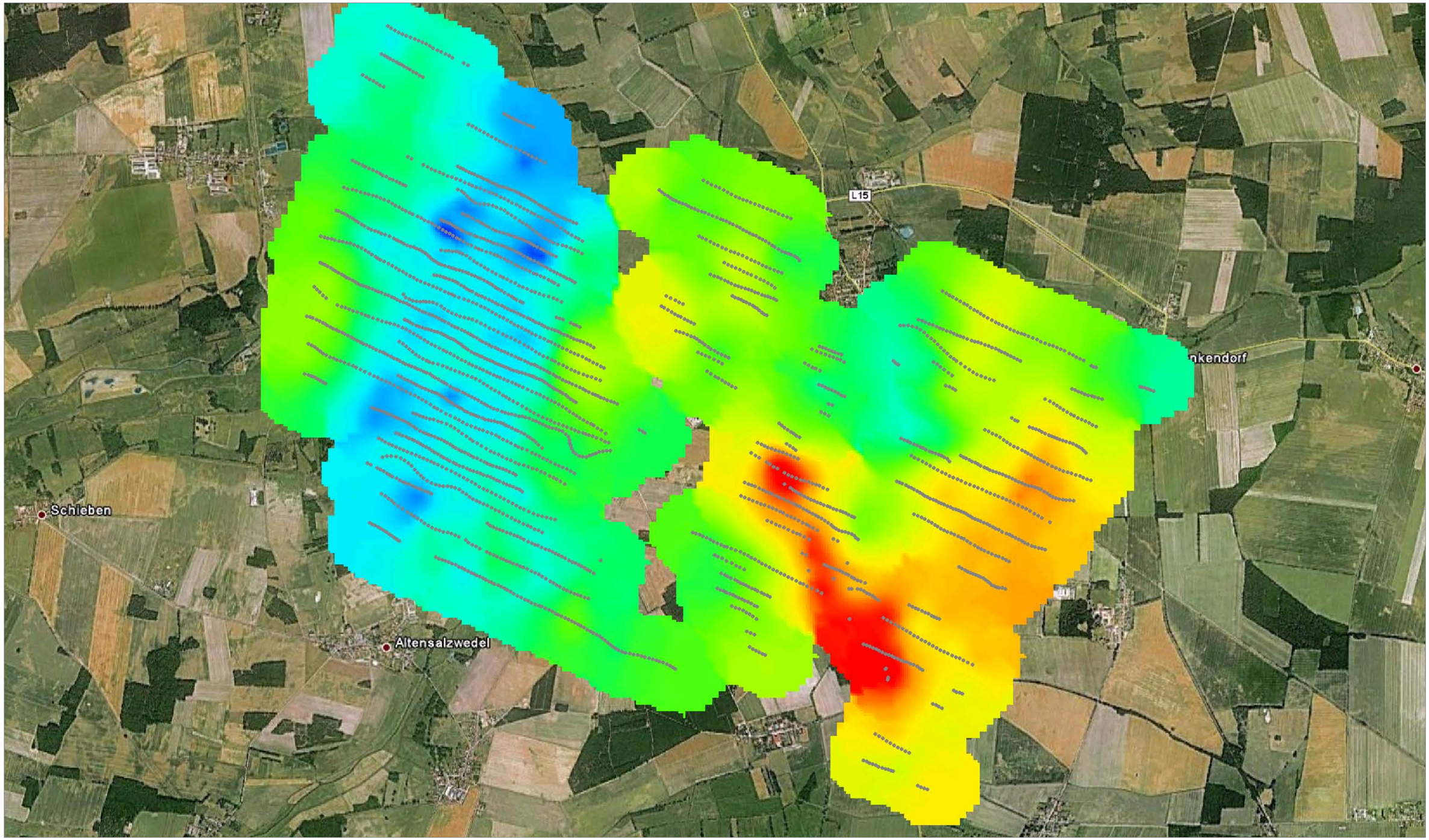
1 10 100
[ohm]

Mean resistivity, elevation -170 m to -160 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

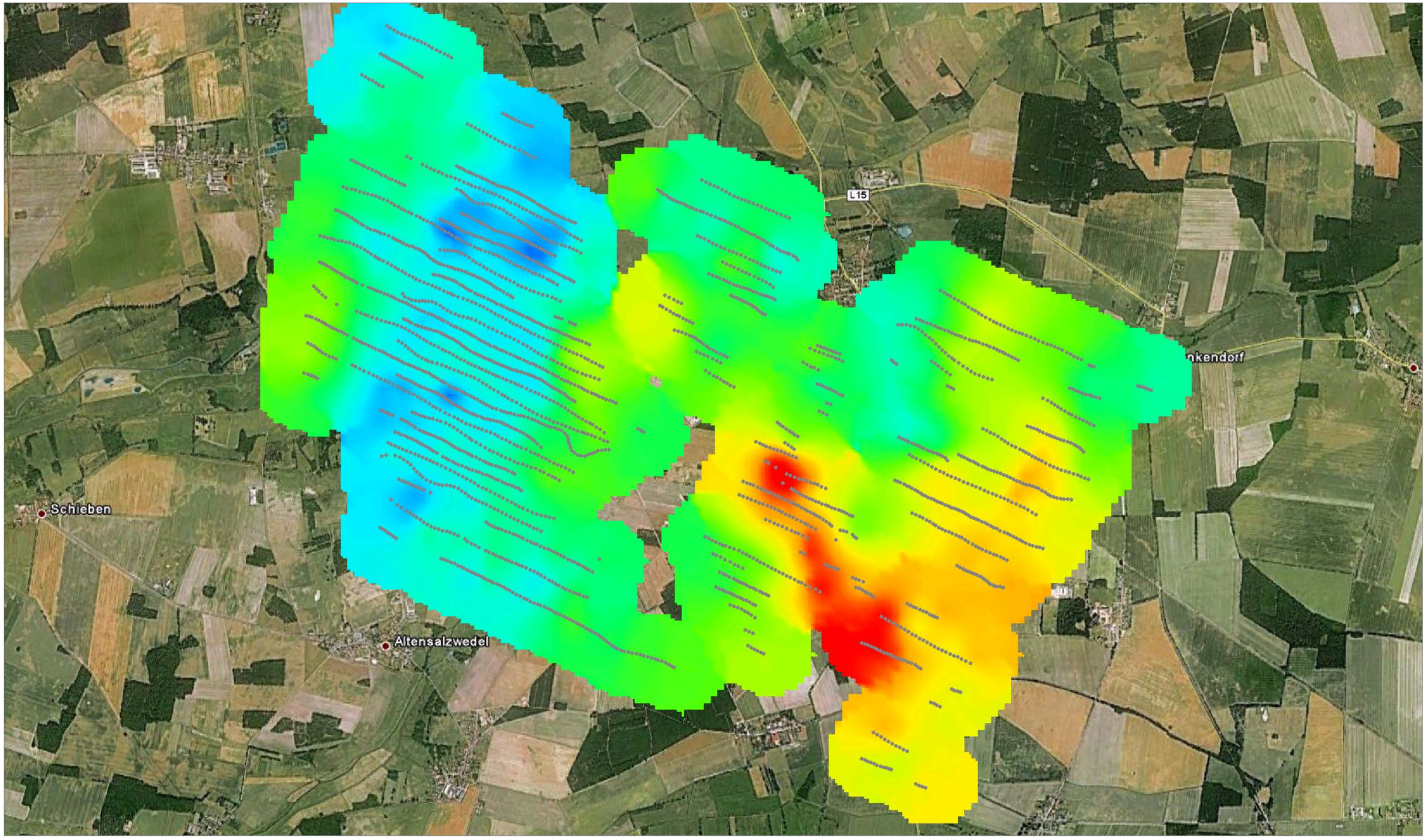
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -180 m to -170 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

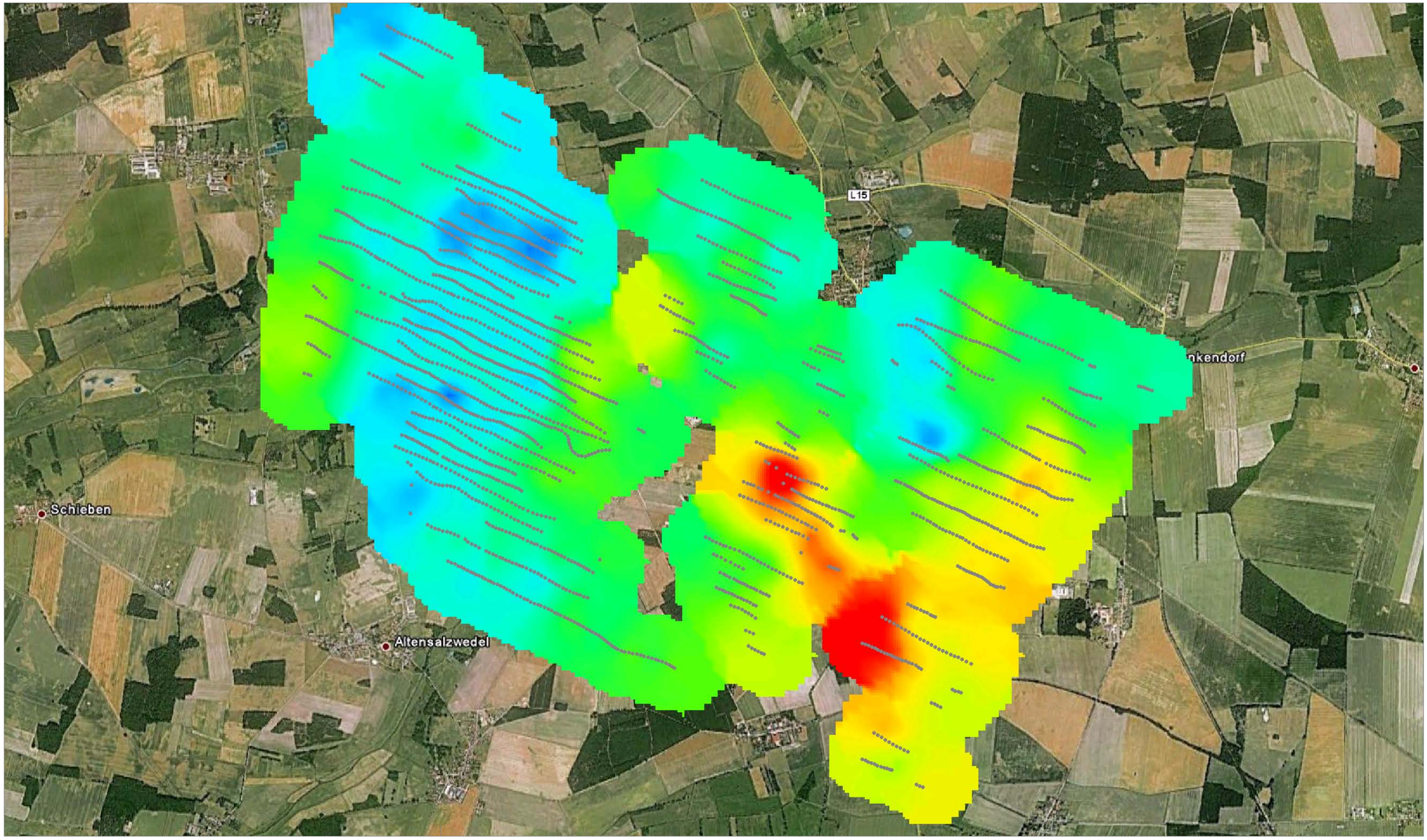
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -190 m to -180 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

## SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

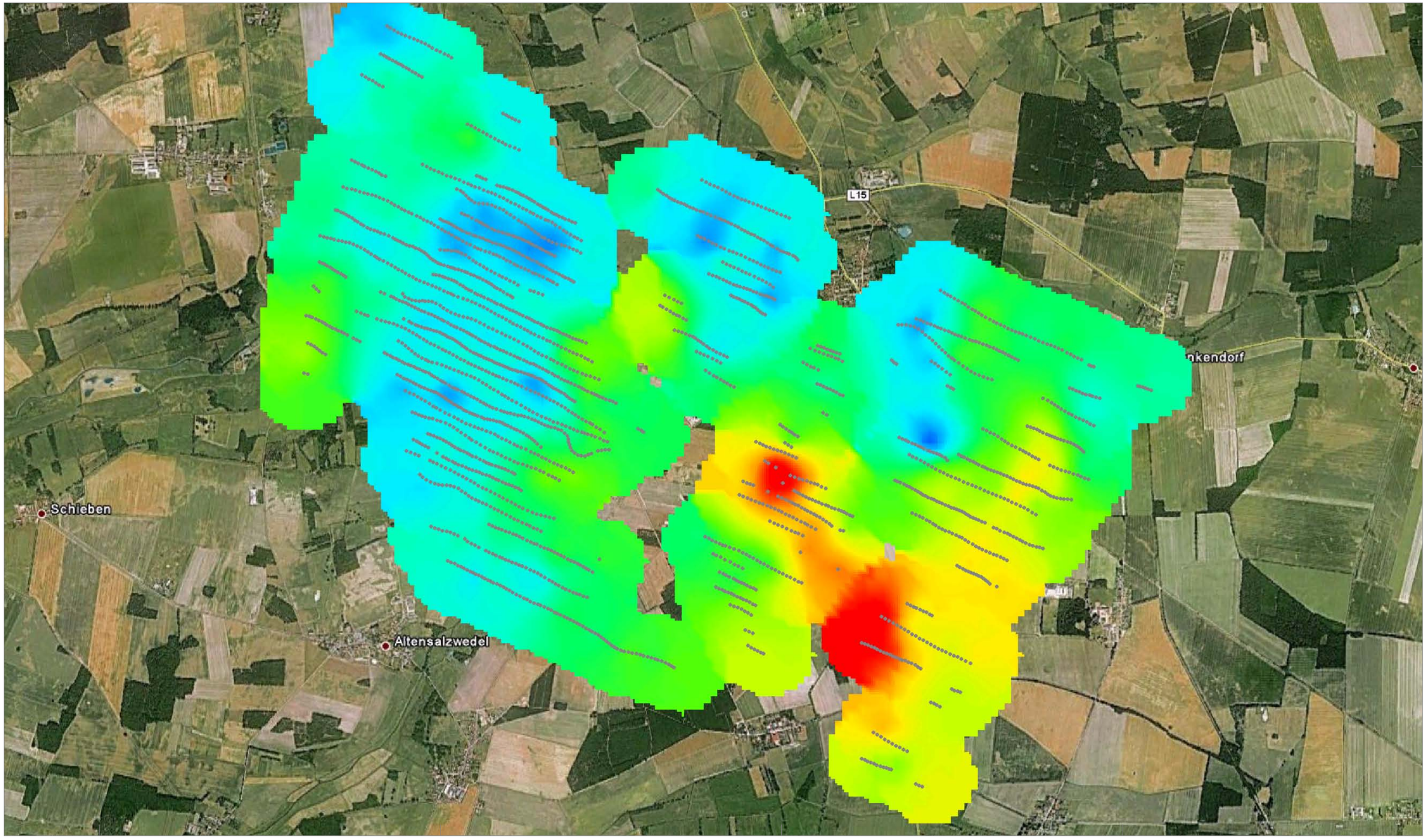
1 10 100
[ohmm]

## Mean resistivity, elevation -200 m to -190 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

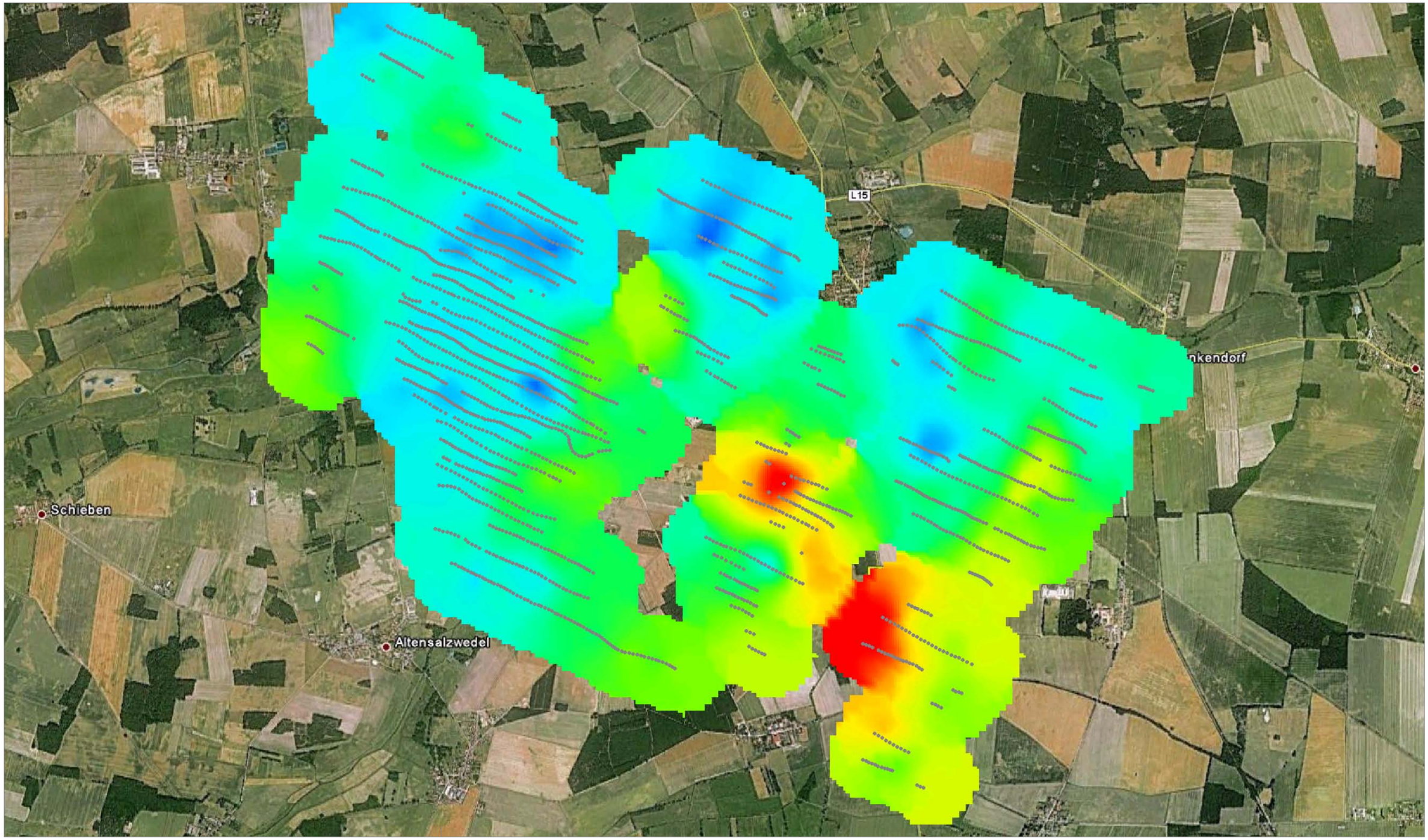
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -210 m to -200 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

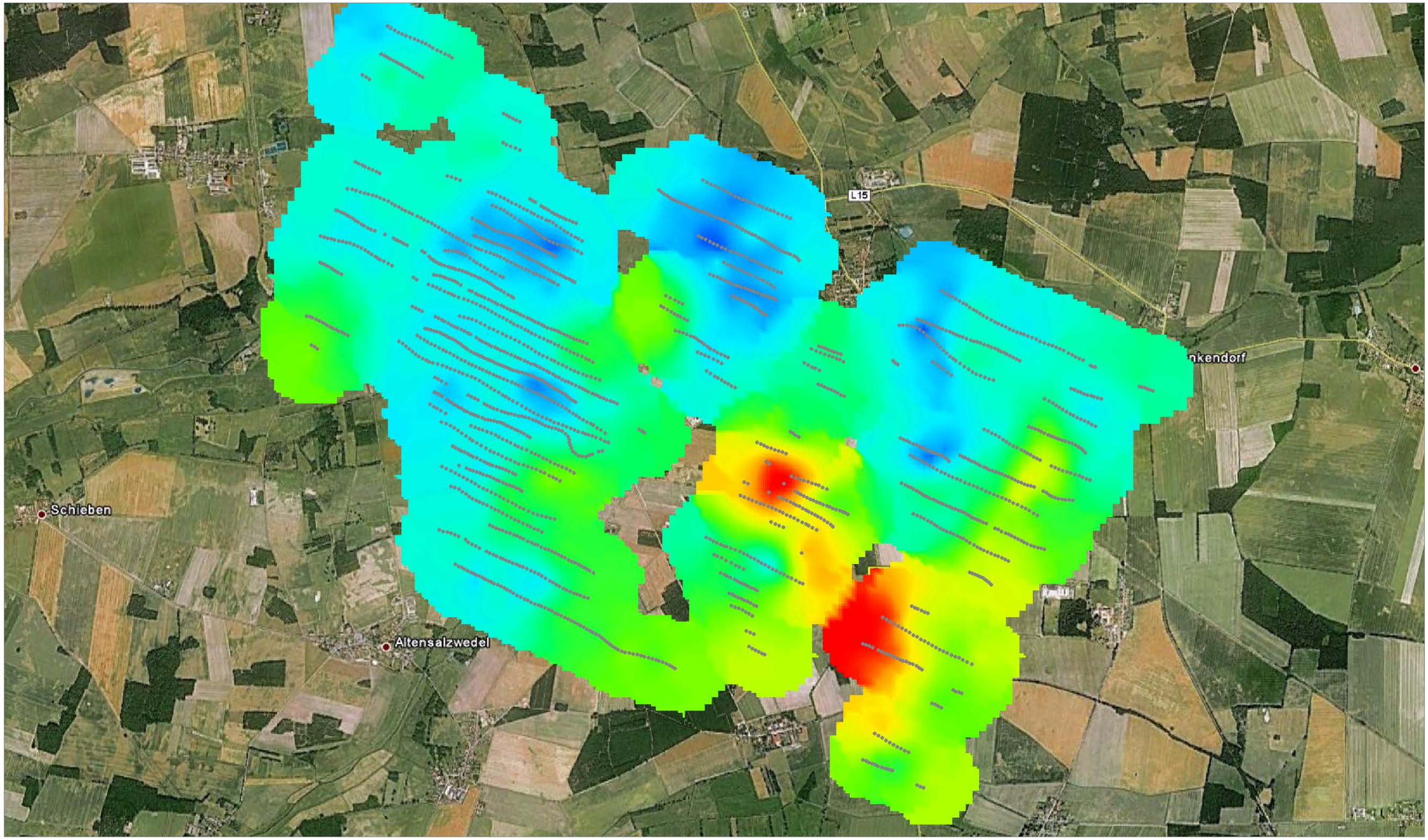
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -220 m to -210 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

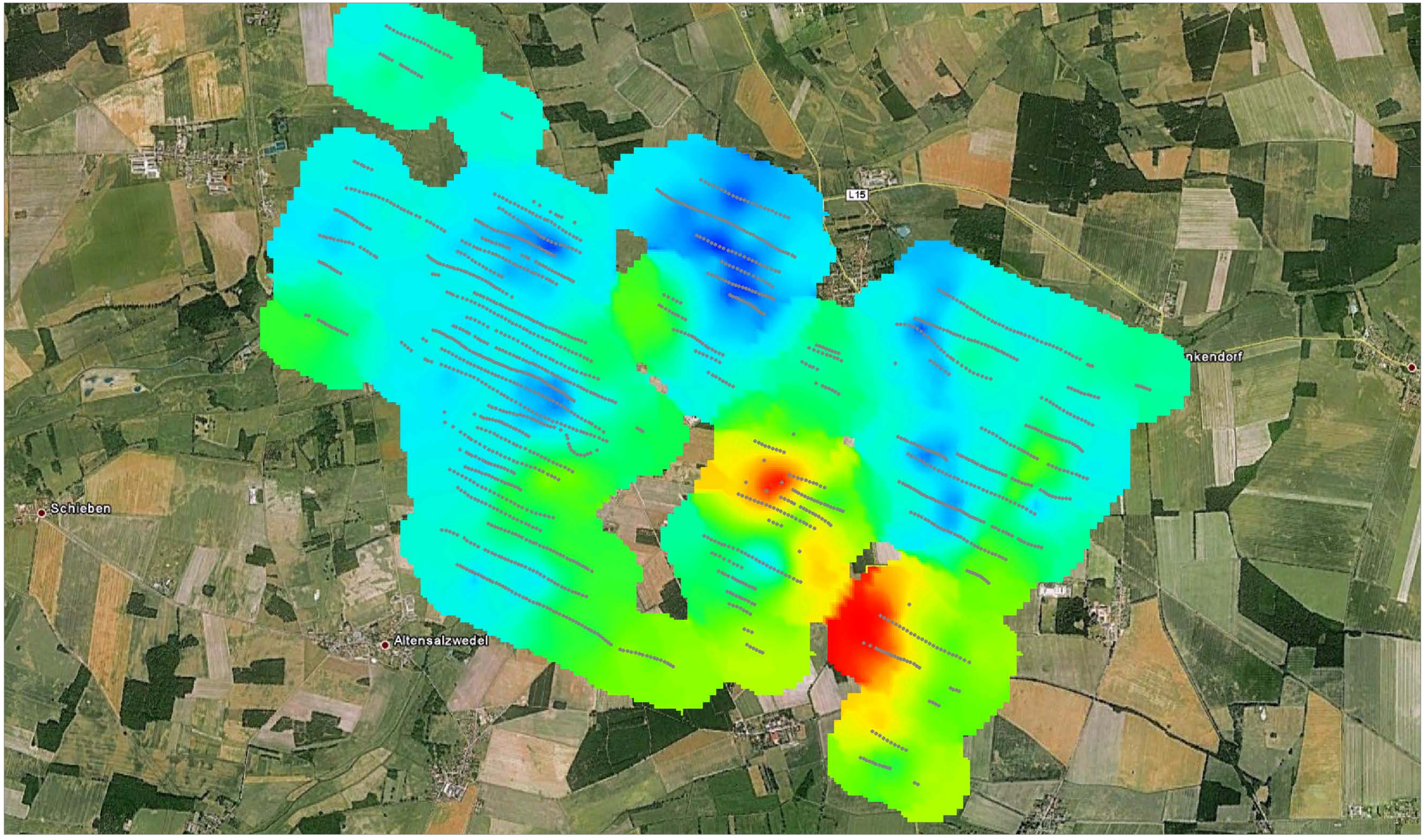
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -230 m to -220 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -240 m to -230 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84

UTMY

5852500

5850000

645000

647500

650000

652500

UTMY

HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100

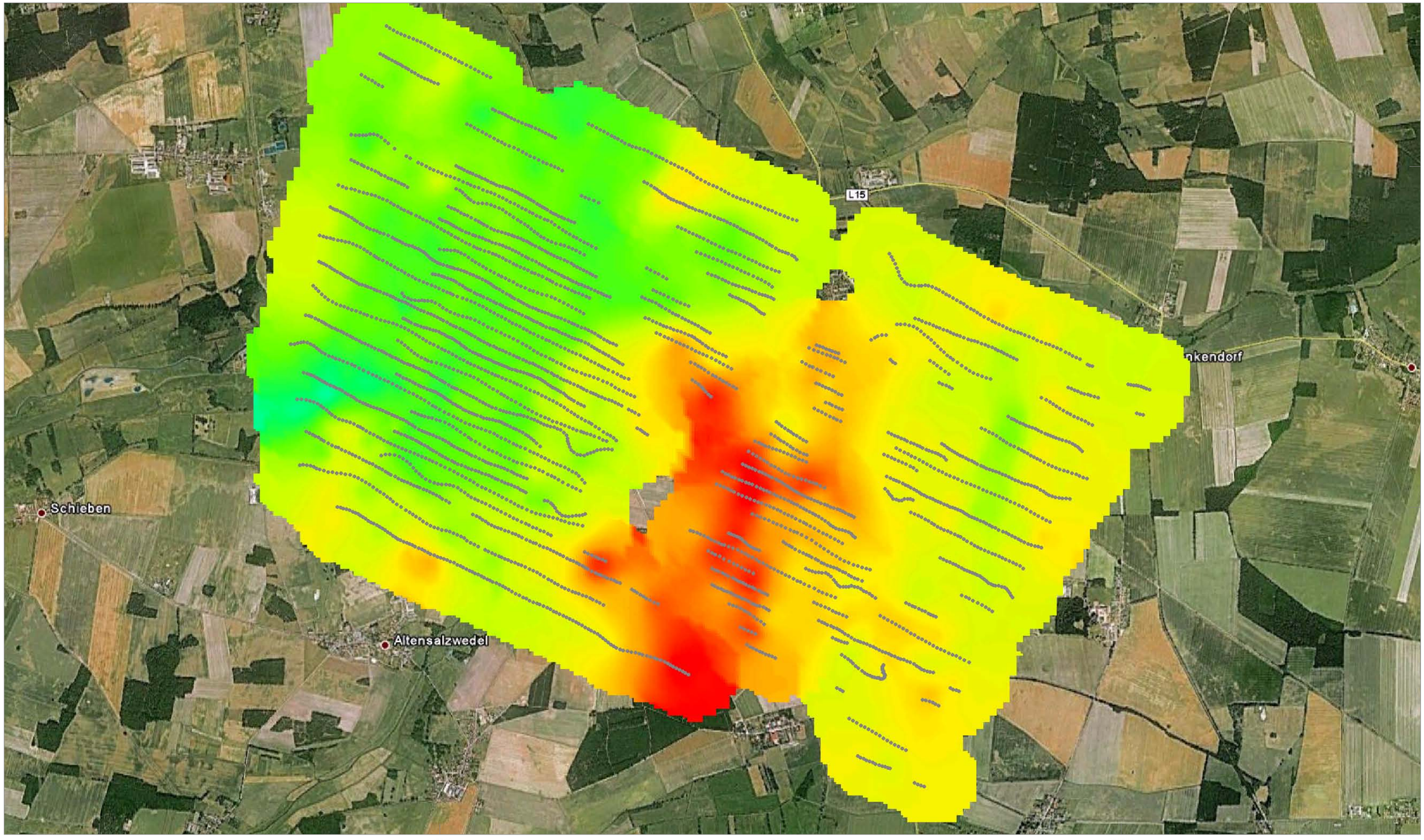
[ohmm]

Mean resistivity, elevation -250 m to -240 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

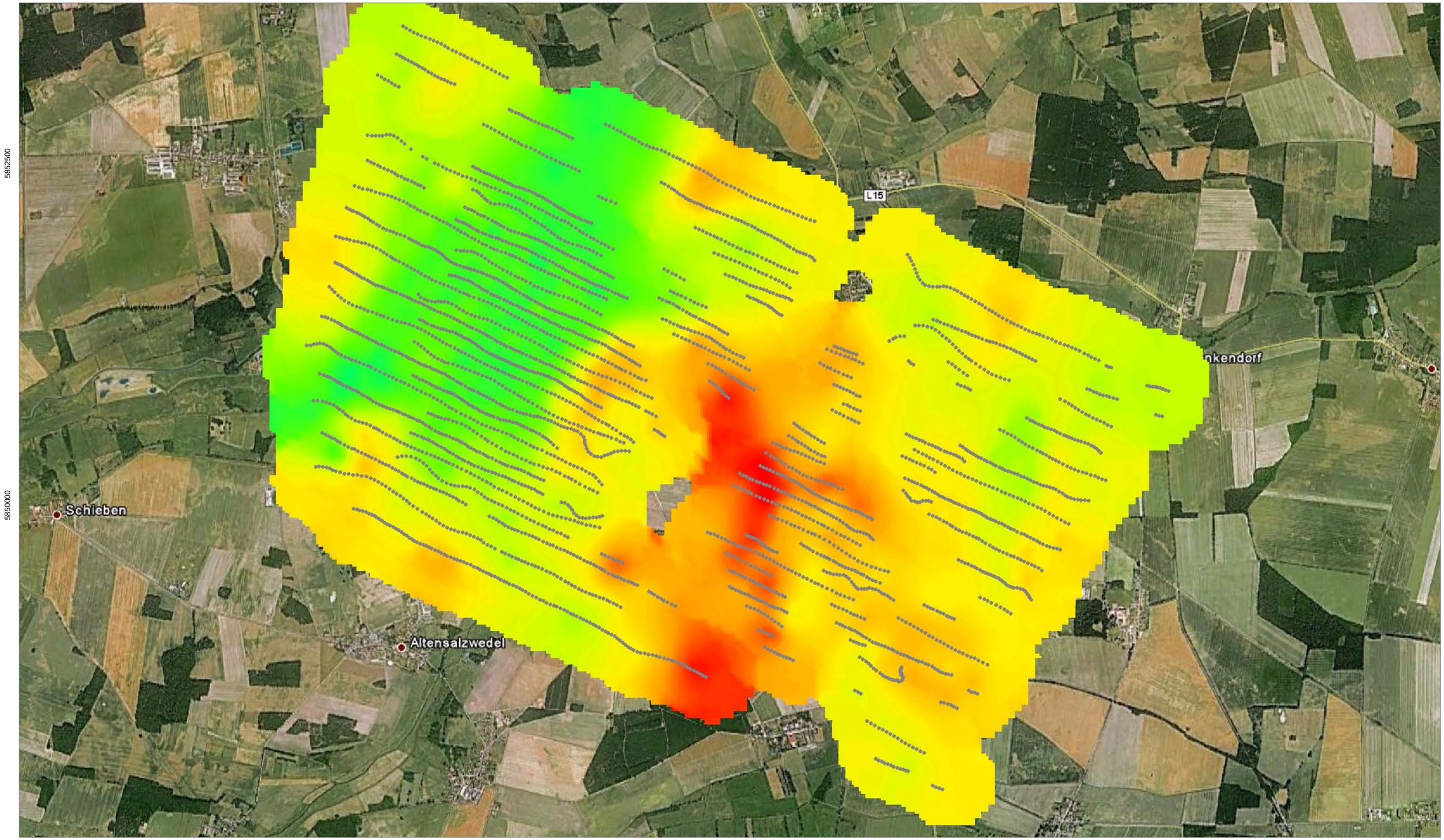
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, depth 0 m to 5 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

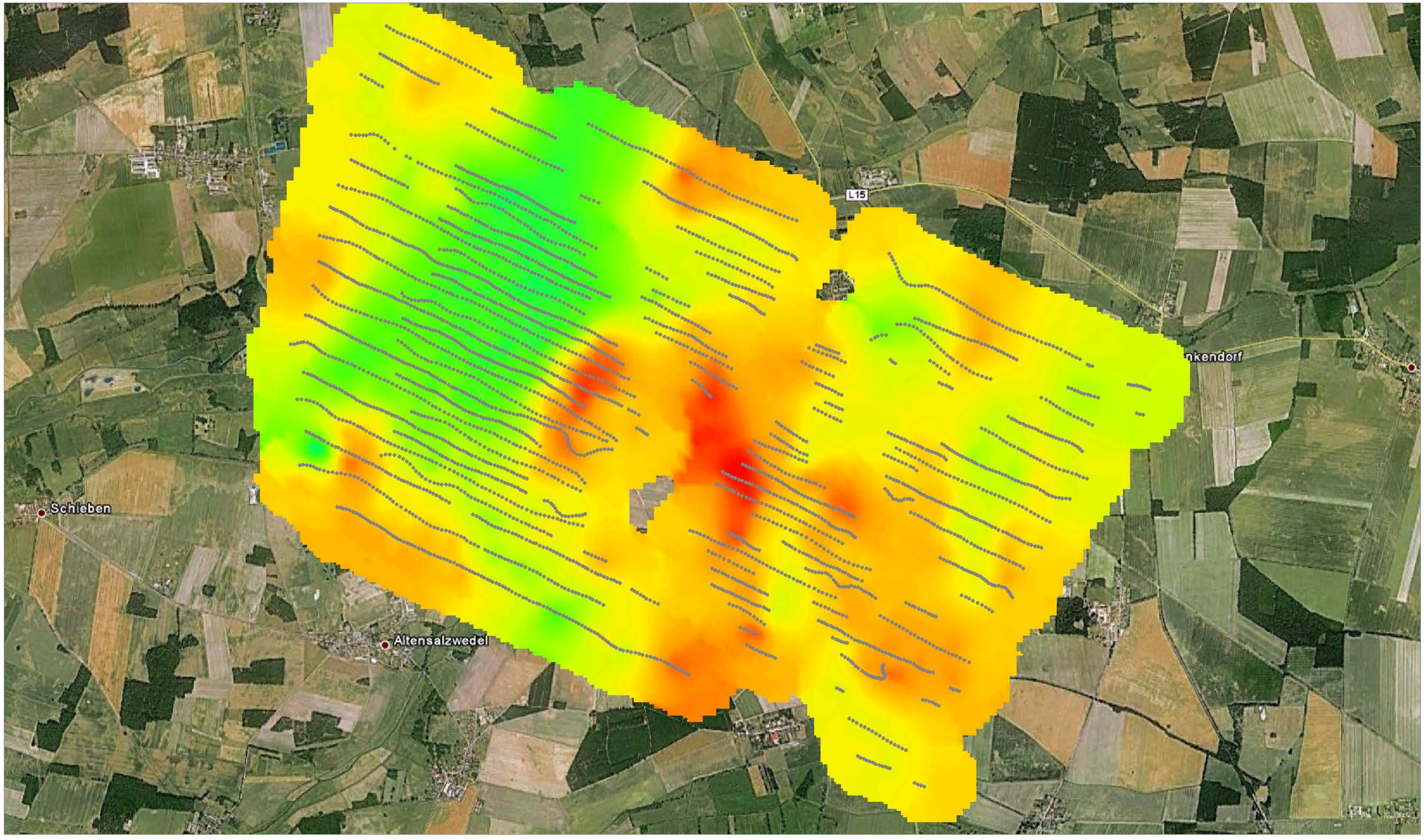
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, depth 5 m to 10 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

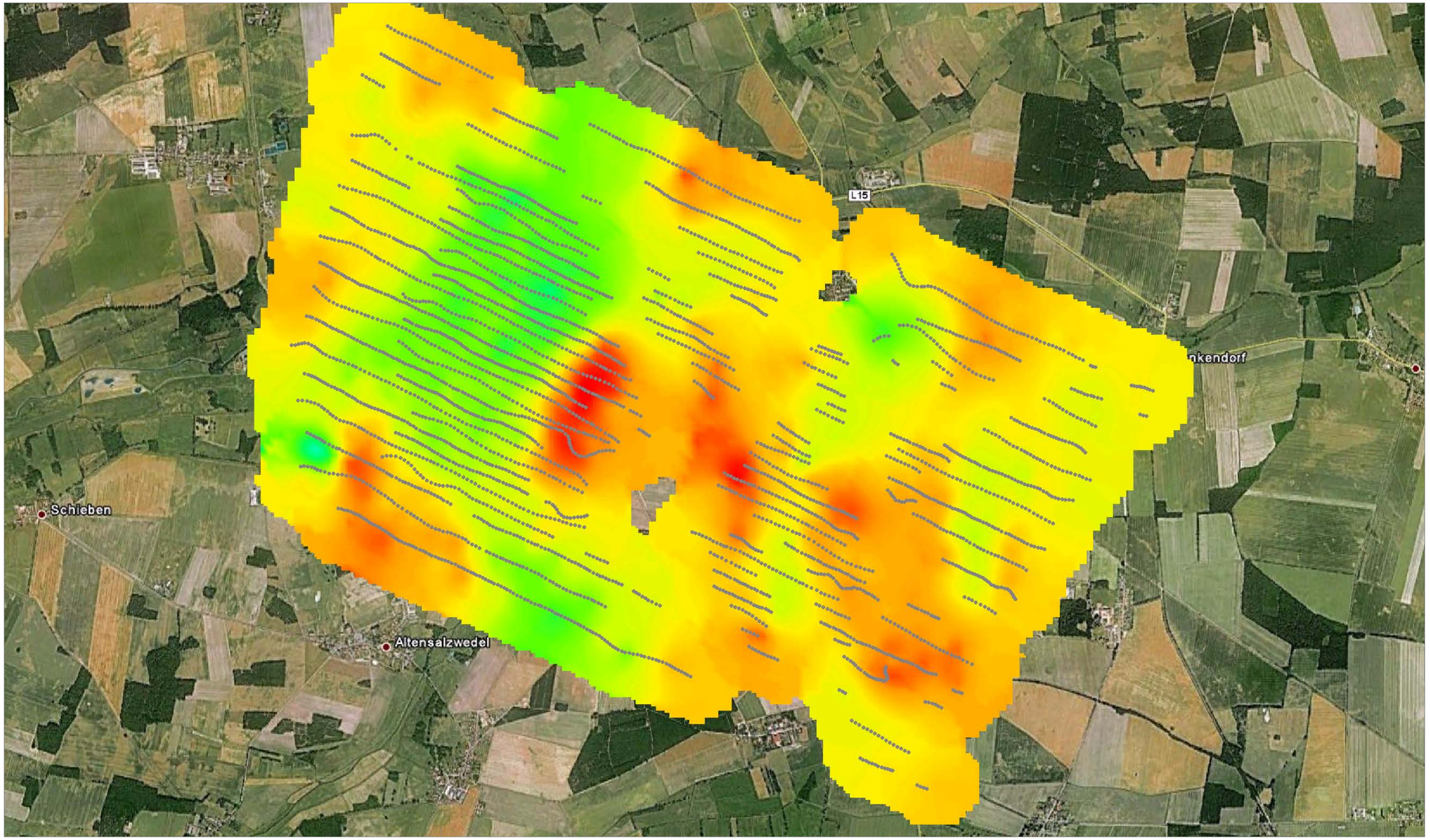
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, depth 10 m to 15 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, depth 15 m to 20 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84

HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

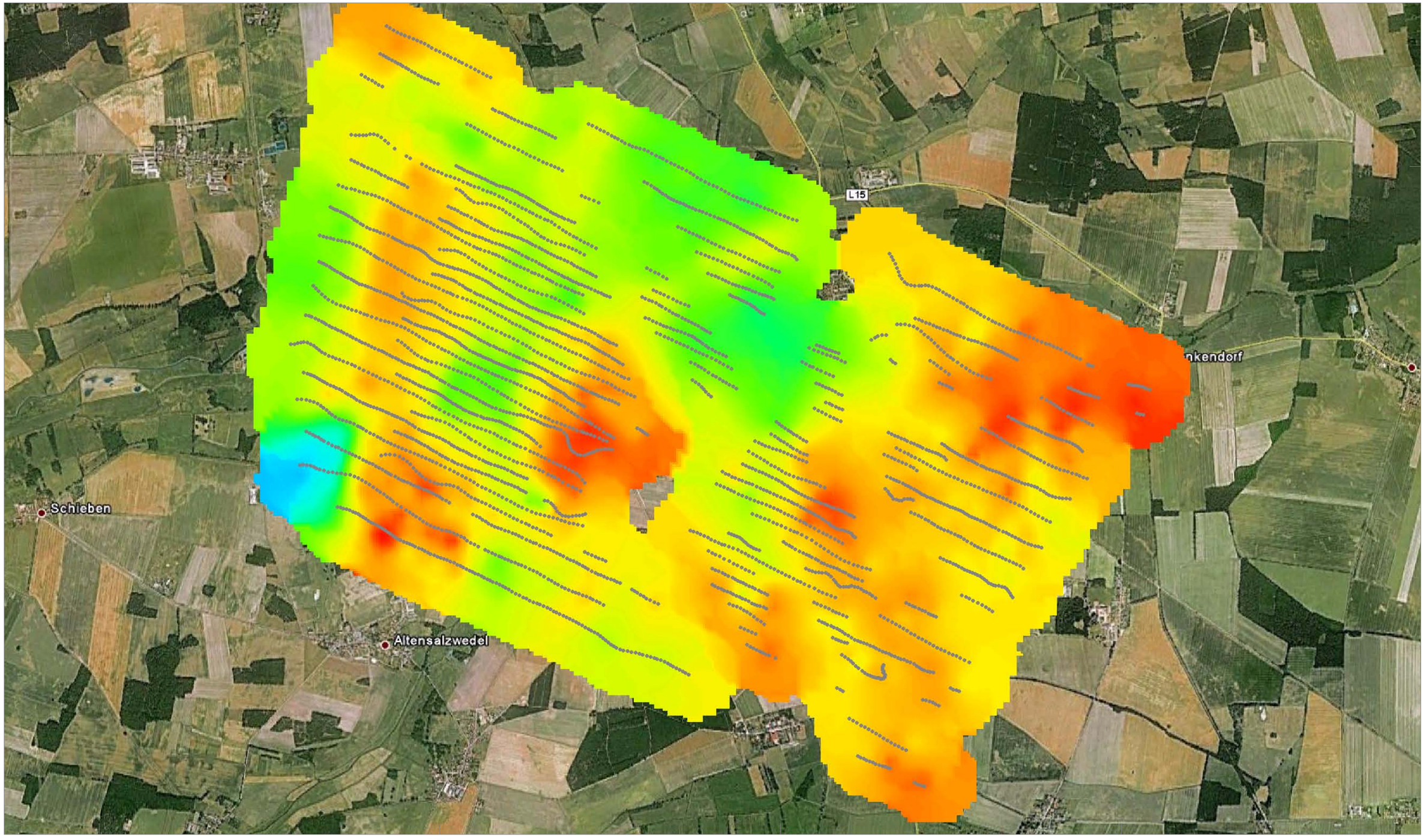
1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, depth 20 m to 30 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84




HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, depth 30 m to 40 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84

HydroGeophysics Group
AARHUS UNIVERSITY

SkyTEM Survey, Maxdorf 2011

1 10 100
[ohmm]

Mean resistivity, depth 40 m to 50 m

Spatially constrained inversion: Smooth model - Grid method: Kriging, search radius 350 m

3 km

UTM Zone 32N WGS84

# APPENDIX IV: DIGITAL DELIVERIES

### Directories of the digital deliveries

\PDF

Report, maps and cross sections in PDF format

\Workspace

Aarhus Workbench Workspace containing SkyTEM data, inversion results, maps, and cross sections.

\XYZ

Geosoft inversion model files with the inversion results.

# E.12 Modellierung

# Szenarienmodellierung zur Ausbreitung von gasförmigem und gelöstem $CO_2$ in oberflächennahen Aquiferen

C. Wiegers, R. Köber, D.Schäfer & A. Dahmke

Lehrstuhl für Angewandte Geologie
Institut für Geowissenschaften
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

*(Anlage E.12 zum Endbericht der Teilprojekte Mo1 und Mo3 im Themenverbund 4 (Monitoring) des F&E-Vorhabens CLEAN – $CO_2$ Enhanced Gas Recovery in the Altmark Natural Gas Field)*

# Inhaltsverzeichnis

**1 EINLEITUNG 2**

**2 GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELL DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS AM CLEAN-STANDORT 4**

**3 AUSBREITUNG VON GASFÖRMIGEN $CO_2$ IN EINEM OBERFLÄCHENNAHEN AQUIFER 10**

***3.1 Einfluss der Leckagerate auf die Ausbreitung des $CO_2$ Gasphasenkörpers 11***

***3.2 Einfluss des hydrostatischen Drucks auf die Größe des $CO_2$ Gasphasenkörpers 14***

***3.3 Einfluss der Grundwasserströmung auf die Ausbreitung von $CO_2$ Gasphasenkörpern 15***

***3.4 Abbhängigkeit der $CO_2$-Gasphasenausbreitung von der Topographie des Aquifers. 18***

**4 ÄNDERUNGEN DER GRUNDWASSERCHEMIE DURCH DIE LECKAGE VON $CO_2$ 21**

***4.1 Gleichgewichtssimulationen zur Untersuchung geochemischer Veränderungen aufgrund eines $CO_2$-Eintritts 21***

***4.2 Untersuchung geochemischer Veränderungen mittels reaktiver Transportmodellierung 24***

**5 KONSERVATIVES TRANSPORTMODELL 28**

**6 FAZIT UND ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERGEBNISSE 30**

**7 LITERATUR: 33**

# 1 Einleitung

Carbon Capture and Storage (CCS) ist eine mögliche Maßnahme um den Anstieg des Treibhausgases $CO_2$ in der Atmosphäre zu reduzieren. Am CLEAN Standort in der Altmark soll Enhanced Gas Recovery (EGR) durchgeführt werden, d. h., es wird $CO_2$ verwendet, um das noch in der Gaslagerstätte verbleibende Erdgas zu verdrängen und somit zu fördern (Koide et al., 2003). Gleichzeitig leistet das verpresste $CO_2$ einen Beitrag zum Klimaschutz. Es besteht jedoch ein Restrisiko, dass $CO_2$ aus der Speicherformation entweicht und in oberflächennahe Kompartimente oder in die Atmosphäre gelangt (Esposito and Benson, 2011; Gurevich et al., 1993). In den oberflächennahen Kompartimenten befinden sich Grundwasserleiter, die teilweise zur Trinkwassergewinnung genutzt werden und ein Schutzgut darstellen. In einem von der EU vorgelegten Gesetzesentwurf, der zurzeit noch nicht von der Bundesrepublik umgesetzt worden ist, wird empfohlen, beim Betreiben von CCS und EGR betroffene Schutzgüter zu überwachen, um eine mögliche Leckage frühzeitig zu erkennen und entsprechend reagieren zu können. Mögliche Leckagepfade aus dem Reservoir heraus sind: (a) Bohrlöcher, (b) Störungssysteme oder (c) diffuse Austritte durch einzelne Schichtsysteme hindurch (Birkholzer et al., 2006; Dobossy et al., 2011; Klusman, 2003a; Wilson et al., 2007; Zhang et al., 2004). Wie viel $CO_2$ aus der Speicherformation entweichen könnte und ein oberflächennahes Kompartiment erreicht, kann zurzeit nur abgeschätzt werden. Als Annäherung können Naturanaloga und Abschätzungen anhand von numerischen Simulationen herangezogen werden (Birkholzer et al., 2006; Dobossy et al., 2011; Klusman, 2003b; Nordbotten et al., 2004; Nordbotten et al., 2009; Wilson et al., 2007; Zhang et al., 2004).

Dringt gasförmiges $CO_2$ in einen Grundwasserleiter ein, wird es im Wasser gelöst, bis das geochemische Gleichgewicht zwischen der Gasphase und dem Wasser hergestellt ist. Die Dissoziation der Kohlensäure führt in der Regel zur Abnahme des pH-Werts und in Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung kommt es zu Reaktionen zwischen den Aquifersedimenten und dem mit $CO_2$ gesättigtem Wasser. Dabei können durch Minerallösung z.B. Schwermetalle mobilisiert werden, die die Trinkwasserqualität verschlechtern könnten (Zheng et al., 2008). Für ein Monitoring ist es wichtig zu wissen, welche geochemischen Änderungen durch eine $CO_2$-Leckage zu erwarten sind und wie signifikant diese Änderungen vor dem Hintergrund der natürlichen Schwankungen sind. Ist der Bereich der durch eine $CO_2$-Leckage beeinflusst wird sehr klein im Verhältnis zu dem zu überwachendem Gebiet, wird es schwer sein, die Leckage zu detektieren. Wird der Bereich, der vom $CO_2$ beeinflusst wird größer, wächst die Wahrscheinlichkeit die Leckage zu detektieren. Die Größe eines von einer $CO_2$-Leckage beeinflussten Bereichs wird neben der Leckagerate auch von der geologischen Struktur und der Hydrogeologie des Aquifers abhängen. Um ein Monitoring effizient gestallten, ist es wichtig, abschätzen zu können, wie Grundwasserleiter durch eine $CO_2$-Leckage beeinflusst werden. Mit diesen Abschätzungen sollte dann ein Monitoringkonzept entwickelt werden, dass gewährleistet, eine $CO_2$-Leckage

in einem angemessenen Zeitraum zu finden, um ggf. Interventionsmaßnahmen zur Schadensbegrenzung einleiten zu können.

Folgende Fragestellungen wurden mithilfe von numerischen Szenariomodellierungen bearbeitet:

1. Wie ist das Ausbreitungsverhalten von gasförmigem und im Wasser gelöstem $CO_2$ in einem oberflächennahen Aquifer?
2. Welche geochemischen Prozesse sind zu erwarten?
3. Welche Parameter sind für eine Detektion einer $CO_2$-Leckage in einen oberflächennahen Aquifer geeignet?
4.

Zur Beantwortung dieser Fragen, wurde zunächst anhand der geologischen Daten des CLEAN-Standortes ein Strömungsmodell erstellt, auf dessen Grundlage ein konservatives Transportmodell aufgebaut wurde, um zu ermitteln, wie sich im Fall einer Leckage das gelöste $CO_2$ am CLEAN-Standort mit der Grundwasserströmung ausbreitet. Die Ergebnisse des Strömungsmodells wurden außerdem herangezogen, um das Ausbreitungsverhalten von $CO_2$-Gasphasenkörpern unter dem Einfluss geologischer Parameter zu untersuchen. Geochemische Gleichgewichtssimulationen sollten klären, welche Änderungen der Wasserzusammensetzung durch eine $CO_2$-Leckage in einem oberflächennahen Grundwasserleiter am Standort auftreten können. Weiterhin wurde mit einem reaktiven Transportmodell das Ausbreitungsverhalten der geochemischen Veränderung des Aquifers durch den reaktiven Transport des gelösten $CO_2$ und dessen Bedeutung für ein Monitoring einer $CO_2$-Leckage durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers untersucht.

# 2 Grundwasserströmungsmodell des Untersuchungsgebiets am CLEAN-Standort

Das Untersuchungsgebiet am Standort CLEAN hat eine Erstreckung von maximal 4402 m in Nordwest-Südost Richtung und maximal 3265 m in Nordost-Südwest Richtung und hat eine Fläche von ca. 14.5km² (Abbildung 1). Der westliche Rand ist der Vorfluter Jeetze, in den vermutlich die betrachteten Grundwasserleiter entwässern. Die maximale Höhe im Relief der Geländeoberkante ist ca. 40 m ü. N. N. und die maximale Teufe, in die das Modellgebiet reicht beträgt - 20 m ü. N. N.

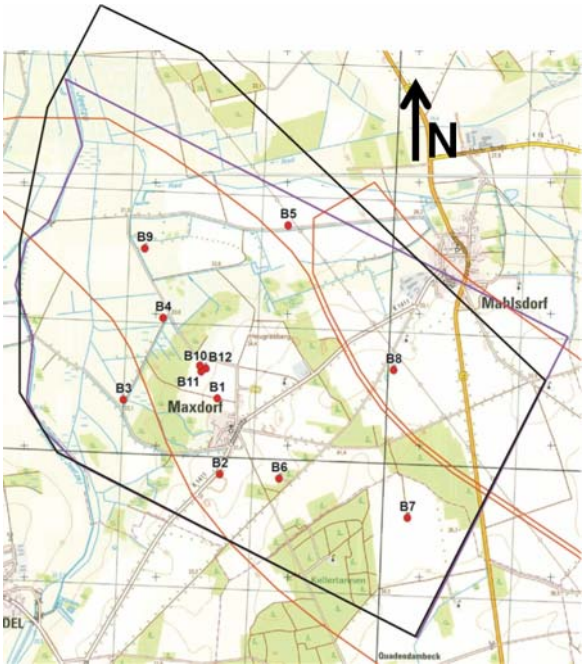



**Abbildung 1: Rand des Untersuchungsgebietes (lila) und der Rand des Strömungsmodellgebietes (schwarz).**

Die Erstellung des Grundwasserströmungsmodells für den CLEAN-Standort beruht auf dem von GICON erstellen Geostrukturmodell, das die Geometrie und Verteilung der geologischen Einheiten beinhaltet (Abbildung 2). Das Untersuchungsgebiet wurde in 4 hydraulische Einheiten, die sich aus den Siebungen der am Standort genommenen Sedimentproben ergeben haben, unterteilt (Anlange 1). Die 4 Einheiten sind: L1 (Aquitard), L2 (Aquifer), L3 (Aquitard) und L4 (Aquifer). Die Oberkante von L1 entspricht der Geländeoberkante. Als Sediment wird für die Aquifere ein Sand ($K_f$~1*10$^{-4}$ m/s) und für die Aquitarde ein Geschiebemergel ($K_f$~1*10$^{-7}$ m/s) verwendet.

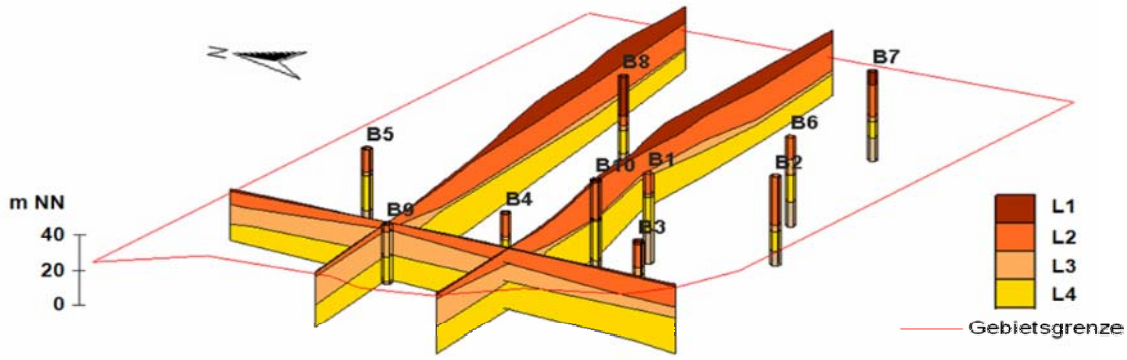



**Abbildung 2: Bohrprofile, Profilschnitte und Gebietsgrenze des CLEAN-Untersuchungsgebiets mit den Schichten L1, L2, L3 und L4.**

In den am Standort installierten Grundwassermessstellen B1-B12 wurden während der Projektlaufzeit an sechs Stichtagsmessungen der Wasserstand gemessen (Abbildung 3). Für die Kalibrierung des hier dargestellten Strömungsmodells wurde die Stichtagsmessung vom 25.08.2010 verwendet. Der Vergleich aller Stichtagsmessungen zeigt im Verlauf der Zeit nur geringe Schwankungen der Wasserstände.

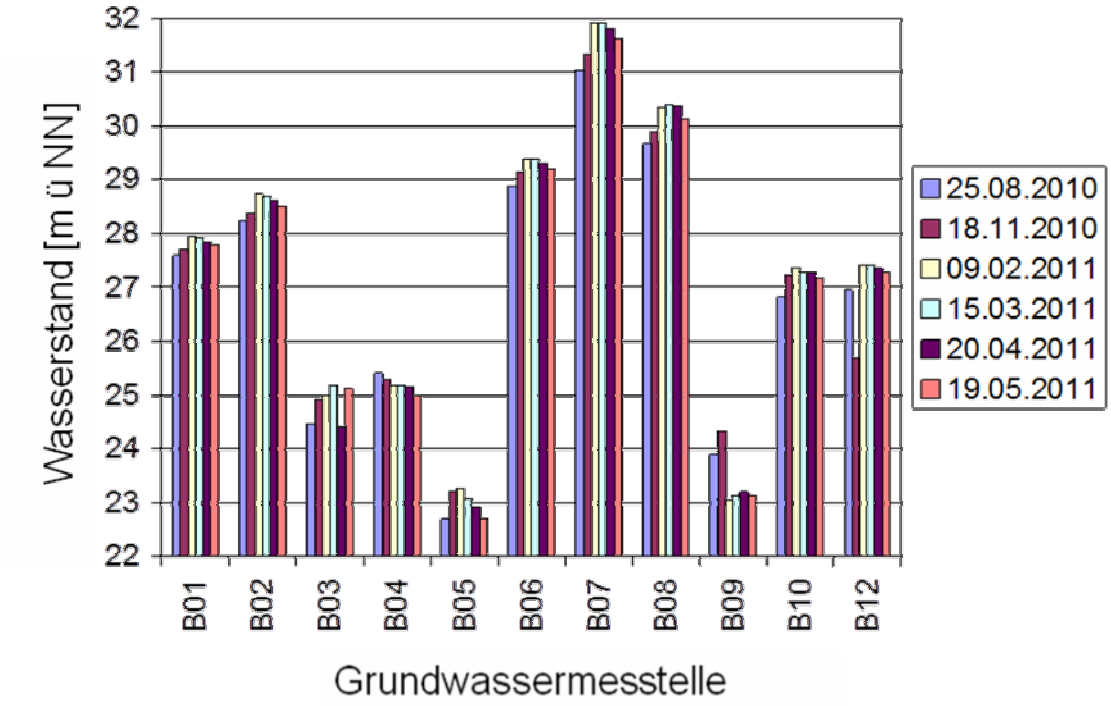



**Abbildung 3: Wasserstände in den Grundwassermessstellen an sechs Stichtagsmessungen.**

Zur Erstellung des Strömungsmodells wurde der Modellcode MODFLOW (VisualMODFLOW) verwendet. Im Westen wurde als Randbedingung die Jeetze gewählt. Der Wasserstand wurde über die Zeit als konstant angenommen und hat von Süden nach

Norden einen Gradienten von 20 cm. Der Wasserstand beträgt im Norden 24.1 m und im Süden 24.3 m (Abbildung 3). Der Rand wird als Dirichlet-Randbedingung (konstante Piezometerhöhe) definiert.

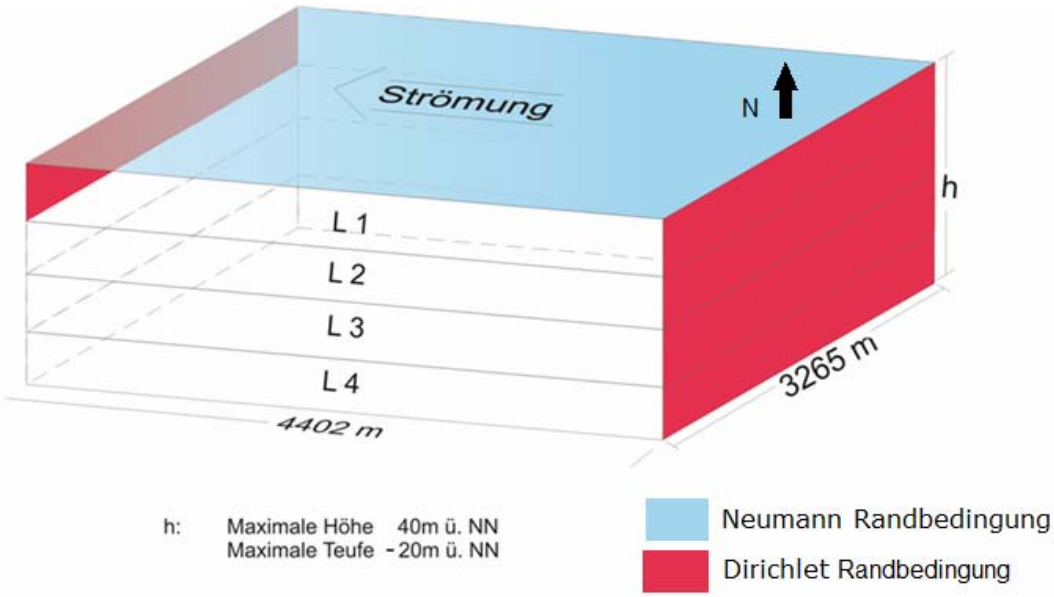



**Abbildung 4: Konzeptionelle Skizze des Strömungsmodells. Mit den Schichten L1 bis L4. Die rot markierten Flächen kennzeichnen Dirichlet–Randbedingungen (feste Piezometerhöhe). Die blaue Fläche markiert eine Neumann–Randbedingung, zur Darstellung der Grundwasserneubildung.**

Da angenommen wird, dass die Grundwasserleiter in den Vorfluter entwässern, befindet sich unterhalb des Flusses eine Wasserscheide. Daher wird für die Schichten L2 bis L4 eine Neumann- Randbedingung angenommen, d. h., es strömt kein Wasser aus dem Modellgebiet hinaus. Der Modellrand im Südosten des Gebietes wird über die gesamte Mächtigkeit als Dirichlet-Randbedingung definiert, für die ein fester Wasserstand von 31 m ü. N. N. aus den gemessenen Wasserständen extrapoliert wird. Über die Oberkante des Modellgebietes kommt es zu einer Grundwasserneubildung. Die Grundwasserneubildung ergibt sich, wenn der Oberflächenabfluss und die Evapotranspiration vom Niederschlag abgezogen werden. Für das Strömungsmodell wurde eine Grundwasserneubildung von 50 mm/a abgeschätzt, was 1/3 des durchschnittlichen Niederschlages entspricht. Alle anderen Randbedingungen entsprechen undurchlässigen Rändern (Neumann-Randbedingung). Der nordöstliche und der südwestliche Rand wurden so gewählt, dass sie parallel zu den vermuteten Bahnlinien verlaufen. Die Ränder des Untersuchungsgebiets stimmen daher nicht exakt mit den Rändern des Strömungsmodells überein (Abbildung 1). Als Anfangsbedingung wurde der Wasserstand im gesamten Modellgebiet auf 32 m über N. N. gewählt.

Das Modellgebiet wurde vertikal in vier Schichten unterteilt, wobei die Mächtigkeit einer geologischen Schicht einer Zelle entspricht. Damit entsprechen die Zellmächtigkeiten den Schichtmächtigkeiten und sind entsprechend dem Relief der einzelnen Schichten variabel.

Horizontal wurde das Modellgebiet in X-Richtung in 100 und Y-Richtung in 50 Zellen diskretisiert.

Unter Verwendung einer homogenen $K_f$-Wertverteilung konnte das Strömungsmodell nicht mit den Eingangsparametern kalibriert werden, da die Wasserstände im Norden des Modellgebietes dabei um ca. 2m überschätzt wurden. Um eine genauere Übereinstimmung der gemessenen und der modellierten Wasserstände zu erreichen, wurde die hydraulische Durchlässigkeit in diesem Teil des Modellgebiets in den Schichten L3 und L4 um eine Größenordnung erhöht. Um eine Übereinstimmung im Dezimeterbereich zu erreichen, musste im Folgenden die Schicht L4 in Teilbereiche untergliedert werden, denen unterschiedliche $K_f$-Wert zugeordnet wurden (Abbildung 5). Im nordwestlichen Teil des Modelgebietes wurde ein Bereich mit einer höheren Durchlässigkeit von $K_f=7*10^{-4}$ m/s und im Südwesten ein Bereich mit einer geringeren Durchlässigkeit von $K_f=1*10^{-5}$ m/s gewählt. Im restlichen Modelgebiet beträgt der $K_f=1*10^{-4}$ m/s.

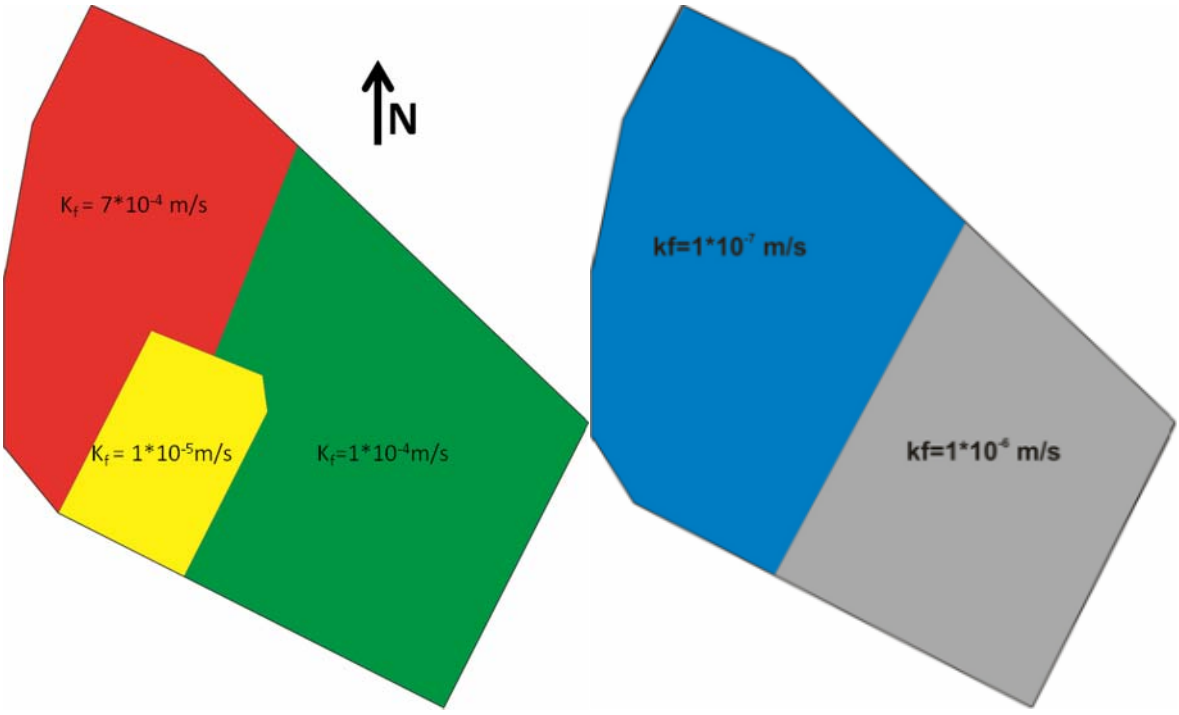



**Abbildung 5: Verteilung der kalibrierten $K_f$-Werte im Grundwasserleiter L4 (links) und im Grundwasserstauer L3 (rechts)**

Für den Grundwasserstauer ergab sich eine von Nordosten nach Südwesten verlaufende Zweiteilung in der Mitte des Modellgebietes(Abbildung 5). Im Westen beträgt der ermittelte $K_f$-Wert $1*10^{-7}$ m/s und im Osten $K_f=1*10^{-6}$ m/s. Der Grundwasserleiter L2 (nicht dargestellt) ist homogen, der $K_f$–Wert beträgt $1*10^{-4}$ m/s. Im Grundwasserstauer L1 ergibt sich ebenfalls eine homogene $K_f$–Wertverteilung von $1*10^{-6}$ m/s. Das Modell wurde für alle Schichten kalibriert, da aber nur der Grundwasserleiter L4 für die folgenden Simulationen, die auf dem Strömungsmodell aufbauen, verwendet wird, werden hier auch nur die Ergebnisse des

Grundwasserleiters L4 dargestellt. Aus den ermittelten Annahmen des Modells ergibt sich im Vergleich zwischen den am Standort gemessenen Wasserständen und den simulierten Wasserstanden eine maximale Abweichung von 1 m (Abbildung 6). Der Ausreißer in Abbildung 6 zeigt eine Abweichung von 2.3 m. Hierbei handelt es sich um die Grundwassermessstelle B5, für die keine bessere Übereinstimmung gefunden werden konnte.

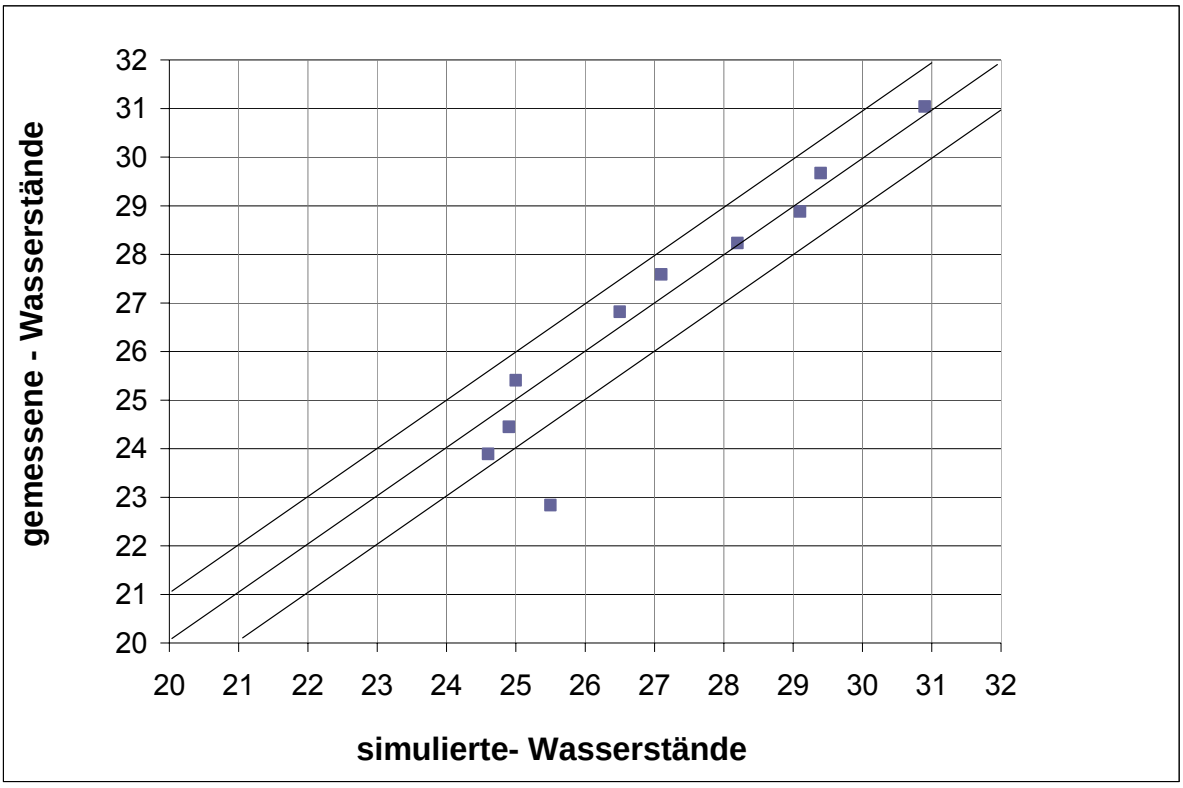



**Abbildung 6: Vergleich zwischen den gemessenen Wasserstände und den simulierten Wasserständen im Grundwasserleiter L4.**

Es ergibt sich das dargestellte Strömungsfeld (Abbildung 7), mit einer maximalen Abstandsgeschwindigkeit von 0.63 m/d und einer minimalen Abstandsgeschwindigkeit von 0.01 m/d (Abbildung 7, rechts). Die mittlere Abstandgeschwindigkeit beträt ca. 0.3 m/d im östlichen Teil des Modellgebiets. Im Norden, nahe der Jeetze liegen die geringeren Strömungsgeschwindigkeiten im Vergleich zu den Strömungsgeschwindigkeiten im Südosten des Modellgebiets. Die Bahnlinien verlaufen im östlichen Teil des Modellgebiets annähernd parallel und knicken im Südwesten nach Süden und im Nordwesten nach Norden ab, da das Grundwasser in die Jeetze strömt.

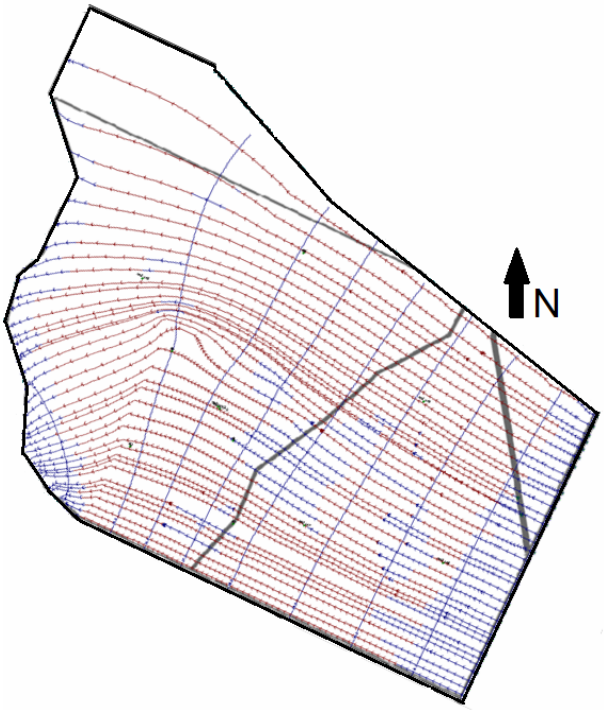



**Abbildung 7: Kalibriertes Strömungsfeld mit Isohypsen und Bahnlinien des CLEAN-Untersuchungsgebiets im Grundwasserleiter L4.**

# 3 Ausbreitung von gasförmigen $CO_2$ in einem oberflächennahen Aquifer

Eine Leckage zu detektieren, ist aufgrund der großen zu überwachenden Fläche über einer Speicherformation eine technische und ökonomische Herausforderung. Zur effektiven Gestaltung eines Monitorringkonzepts ist es notwendig, zu verstehen und vor allem zu quantifizieren, wie sich die gasförmige $CO_2$-Phase und das gelöste $CO_2$ in Grundwasserleitern ausbreiten kann. Es ist davon auszugehen, dass die Leckagegeometrie (Punkt, Linie, Fläche), die Leckagerate, mit der das $CO_2$ in den Aquifer eindringt, die geologischen Struktur des Aquifers, die Permeabilitäten und deren heterogener Verteilung, der hydrostatische Druck und die Grundwasserströmungsrichtung und -geschwindigkeit eine wesentliche Rolle bei der Migration und Verteilung von gasförmigen $CO_2$ im Aquifer spielen können.

Ziel der hier durchgeführten Simulationen war es, mithilfe eines numerischen Mehrphasenströmungsmodells zu quantifizieren, wie sich $CO_2$ in einem Grundwasser ausbreitet und welchen Einfluss die unterschiedlichen Faktoren auf die Ausbreitung und Größe des Gasphasenkörpers am CLEAN-Standort haben. Dabei wurden der Einfluss der Permeabilität und der Leckagegeometrie in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Folgende Fragen sollten beantwortet werden:

1. Welchen Einfluss hat die Leckagerate und die Aquifertiefe, also der hydrostatische Druck, der auf den Phasenkörper einwirkt, auf die Größe des $CO_2$-Gasphasenkörpers?
2. Wie beeinflussen die Grundwasserströmung und das Relief der Aquiferoberkante die Ausbreitung und Migration des $CO_2$-Gasphasenkörpers?

Für die Szenarienmodellierung wurde das Programm TOUGHREACT EOS 2 verwendet, welches für die Berechnung einer $CO_2$-Gasphase in einer wässrigen Phase geeignet ist (Xu et al., 2006). Die unterschiedlichen Modellszenarien wurden an einzelne Fragestellungen angepasst. Szenarien ohne den Einfluss der Grundwasserströmung wurden radialsymmetrisch aufgebaut. Mit diesen Szenarien wurden der Einfluss der Leckagerate und der Einfluss der Aquifertiefe untersucht. Für die Untersuchungen des Einflusses der Grundwasserströmung und des Reliefs der Aquiferoberkante wurde eine dreidimensionale Modellgeometrie verwendet.

Die für die Modelle benötigten Parameter wurden in Anlehnung an den CLEAN-Standort gewählt. Für alle Szenarien wird ein sandiger, gespannter Aquifer mit einem hangenden Grundwasserstauer aus Geschiebemergel angenommen. Die Porosität ($n_e$) beträgt im gesamten Gebiet 20 %. Die Permeabilität (K) beträgt horizontal $4.2*10^{-11}$ m² ($K_f$=$1*10^{-4}$ m/s) und vertikal $4.2*10^{-12}$ m². Der Grundwasserstauer wird im Modell nicht durch Materialparameter, sondern durch einen undurchlässigen Rand an der Aquiferoberkante

definiert. Die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung ($C_p$) und die relativen Permeabilitäten ($K_r$) werden über die van Genuchten Beziehungen (van Genuchten, 1980) berechnet. Die erforderlichen Parameter wurden der Literatur entnommen und wurden für einen Standort ermittelt, dessen Sedimentzusammensetzung dem CLEAN Standort ähnelt (Oldenburg, 2010).

**Tabelle 1: Verwendete Parameter für die Kapillardruck–Sättigungsbeziehungen und die relativen Permeabilitäten.**

| | |
|---|---|
| Kapillardruck | van Genuchten |
| | Lambda λ = 0.627 (van Genuchten Parameter) |
| | Risduale Wassersättigung $S_{lr}$ =0.10 |
| | α = 1,48*10$^{-3}$Pa$^{-1}$ (van Genuchten Parameter) |
| | Maximalsättigung $P_{max}$ = 5*10$^5$ Pa |
| | Wassersättigung $S_{ls}$ = 1 |
| Relative Permeabilität | van Genuchten |
| | Risduale Wassersättigung $S_{lr}$= 0.12 |
| | Risiduale Gassättigung $S_{gr}$ = 0.05 |

Vereinfachend wird für die Simulationen angenommen, dass vor Beginn der Leckage weder gasförmiges noch im Wasser gelöstes $CO_2$ im Aquifer vorhanden ist. Die Leckageart wurde als punktförmig definiert und die Leckageraten entstammen einer Arbeit über geogene Leckageraten (Grandel et al., unveröffentlicht) und liegen zwischen 1,16*10$^{-8}$ kg/s und 1,16*10$^{-2}$ kg/s. Zusammengefasst wird folglich angenommen, dass gasförmiges $CO_2$ über eine punktförmige Leckagequelle in den oberflächennahen Aquifer eindringt.

### 3.1 Einfluss der Leckagerate auf die Ausbreitung des $CO_2$ Gasphasenkörpers

Zur Bestimmung des Einflusses der Leckageraten auf das Ausbreitungsverhalten einer gasförmigen $CO_2$-Phase unterhalb eines Grundwasserstauers wurde folgendes radialsymmetrische Modell erstellt: Der Leckagepunkt (LP), durch den das gasförmige $CO_2$ in den betrachteten Aquifer eindringt, liegt in der Mitte eines zylinderförmigen Aquifers mit einer Mächtigkeit von h= 10 m und einem Radius von r=1000 m (Abbildung 8).

Die Oberkante des Grundwasserleiters liegt in einer Tiefe von 10 m unterhalb der Geländeoberkante. Der hydrostatische Druck an der Aquiferoberkante beträgt 199425 Pa, was einer Wassersäule von 10 m entspricht. Das Modellgebiet ist in Zellen mit R=1.0 m und h=1.0 m diskretisiert und hat eine feinere Diskretisierung von 0.5 m im Bereich des $CO_2$ Gasaufstiegs, bis hin zu einer Diskretisierung von R=2 m im Bereich der obersten 2 m unterhalb des Grundwasserstauers.

Die Oberkante des Grundwasserleiters liegt in einer Tiefe von 10 m unterhalb der Geländeoberkante. Der hydrostatische Druck an der Aquiferoberkante beträgt 199425 Pa, was einer Wassersäule von 10 m entspricht. Das Modellgebiet ist in Zellen mit R=1.0 m und h=1.0 m diskretisiert und hat eine feinere Diskretisierung von 0.5 m im Bereich des $CO_2$ Gasaufstiegs, bis hin zu einer Diskretisierung von R=2 m im Bereich der obersten 2 m unterhalb des Grundwasserstauers.

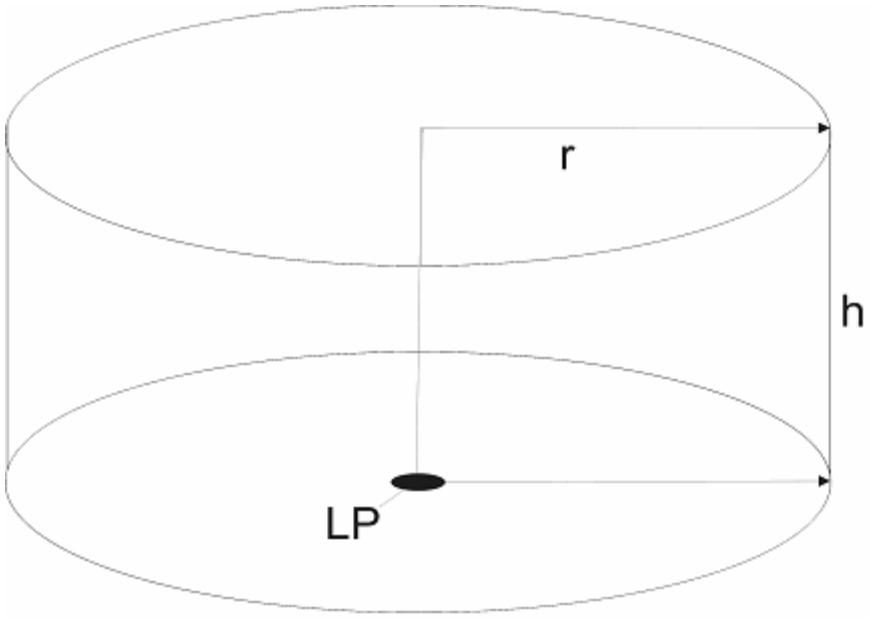



**Abbildung 8: Modellskizze des radialsymmetrischen Modells (überhöht). LP=Leckagepunkt, r=Radius, h=Höhe des radialsymmetrischen Modells.**

Das gasförmige $CO_2$ wird in den Simulationen unterhalb des Grundwasserstauers aufsteigen und sich dort horizontal ausbreiten (Abbildung 9). Um die Ausbreitung des $CO_2$-Gasphasenkörpers zu quantifizieren, wird der Radius des Gaskörpers betrachtet. Als Grenze, des Gasphasenkörpers wird die oberste Zelle im Modellgebiet gewählt, deren rechte Nachbarzelle kein gasförmiges $CO_2$ mehr enthält, (Abbildung 9).

Bei Leckageraten kleiner $1{,}16*10^{-5}$ kg/s wird das gasförmige $CO_2$ im Wasser gelöst, bevor es den Grundwasserstauer erreicht. Es bildet sich somit innerhalb eines betrachteten Zeitraumes von einem Jahr kein gasförmiger Phasenkörper unter der Deckschicht. Leckageraten von $1{,}16*10^{-5}$ kg/s und größer führen zur Bildung eines gasförmigen $CO_2$ Körpers unterhalb des Grundwasserstauers. Der Gasphasenkörper, der sich unterhalb des Grundwasserstauers bildet, ist ein kreisförmiger $CO_2$-Phasenkörper, dessen Mittelpunkt über dem $CO_2$-Aufstiegskanal liegt. Mit fortschreitender Leckagedauer gelangt mehr gasförmiges $CO_2$ in den Aquifer und der Radius nimmt in Abhängigkeit von der Leckagerate zu (Abbildung 10). Bei einer Leckagerate von $1{,}16*10^{-5}$ kg/s beträgt der Radius nach einem Jahr 10 m, bei einer Leckagerate von $1{,}16*10^{-4}$ kg/s 50 m, bei $1{,}16*10^{-3}$ kg/s 180 m und bei

$1{,}16*10^{-2}$ kg/s, der größten Rate im Szenario, sind es 500 m. Soll ein Monitoring z.B. mit Beobachtungspegeln durchgeführt werden, so würden Leckagen mit einer kleinen Rate unter Umständen nie Detektiert werden können, aber mit der größer werdender der Leckage würde auch die Wahrscheinlichkeit steigen die Leckage zu finden.

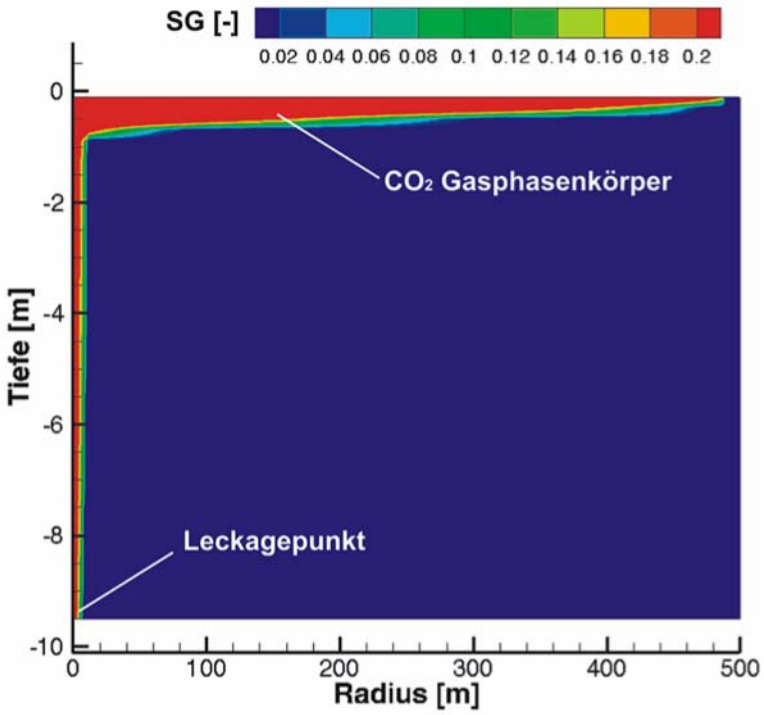



**Abbildung 9: Ausbreitung eines $CO_2$-Gasphasenkörpers unterhalb eines Grundwasserstauers, bei einer Leckagerate von $1{,}16*10^{-2}$kg/s nach einer Leckagezeit von einem Jahr, dargestellt in einem 2D Tiefenprofil.**

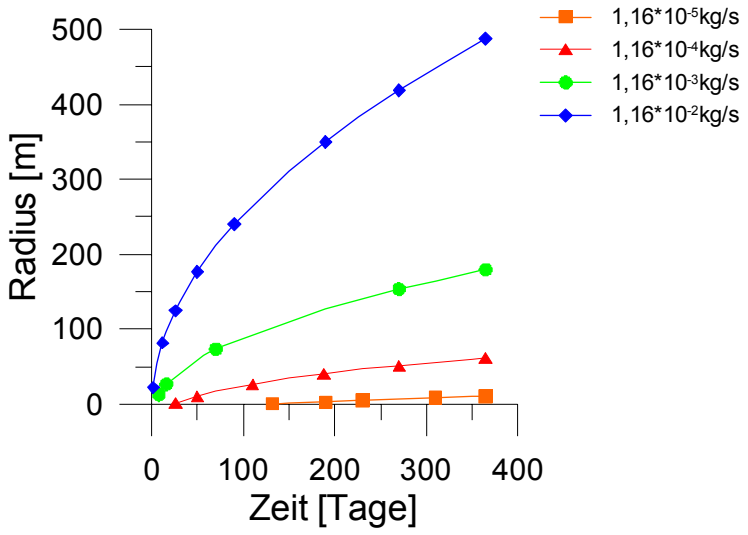



**Abbildung 10: Radien der sich ausbreitenden $CO_2$-Gasphasenkörper unterhalb einer undurchlässigen Deckschicht bei Leckageraten von $1{,}16*10^{-5}$ kg/s bis $1{,}16*10^{-2}$ kg/s.**

### 3.2 Einfluss des hydrostatischen Drucks auf die Größe des $CO_2$ Gasphasenkörpers

Trinkwasser kann, abhängig vom geologischen Untergrund, aus Tiefen bis zu 500 m entnommen werden, deshalb sollten auch tiefer gelegene Aquifere für die Detektion einer $CO_2$-Leckage berücksichtigt werden. Um zu untersuchen, welchen Einfluss der hydrostatische Druck auf die Ausdehnung eines $CO_2$-Gasphasenkörpers hat und um diesen Einfluss zu quantifizieren, wird das in Kapitel 3.1 beschriebene radialsymetrische Modell verwendet. Hier wurde eine Zellendiskretisierung von 1m*1m in r- und z-Richtung vorgenommen. Die Leckagerate ist konstant und beträgt $1{,}16*10^{-4}$ kg/s. Die Aquifertiefe wurde zwischen 0 m und 400 m variiert.

Der Radius des Phasenkörpers nimmt mit zunehmender Tiefe, von 0 m bis 400 m, exponentiell ab (Abbildung 11, links). Nach einem Jahr und einer Aquifertiefe von 0 m beträgt der Radius 97 m, in einer Tiefe von 400 m nur noch 10 m. Der Grund hierfür ist, dass die maximale Löslichkeit von $CO_2$ im Wasser mit zunehmendem Druck zunimmt und sich somit in größerer Tiefe mehr $CO_2$ aus der Gasphase im Wasser löst (DUAN, 2006). Weiterhin nimmt das Gasvolumen mit steigendem Druck ab.

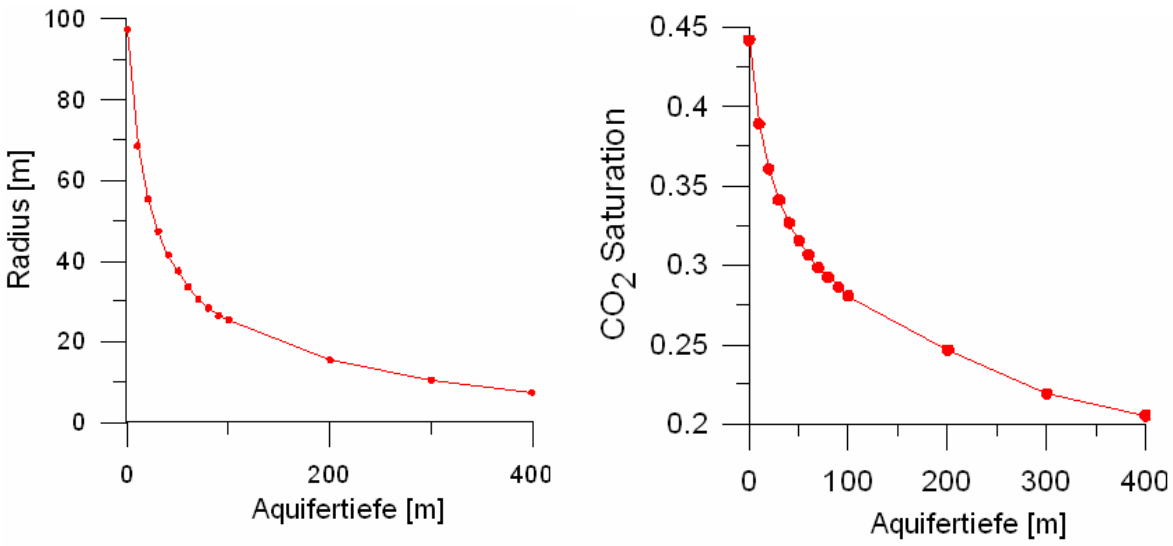



**Abbildung 11: Radien von $CO_2$-Gasphasenkörpern in einem gespannten Aquifer in Abhängigkeit von der Aquifertiefe (links). Maximale $CO_2$-Gassättigung im Aquifer mit der Zunahme der Aquifertiefe nach einem Jahr Simulationszeit (rechts).**

Die maximale Gassättigung, also das Volumen, dass das gasförmige $CO_2$, innerhalb des zur Verfügung stehenden Porenraums einnimmt, wird mit der Tiefe geringer (Abbildung 11, rechts). Bei 0 m Tiefe beträgt die maximale Gassättigung im Modellgebiet 45 % und verringert sich bei einer Tiefe von 400 m auf 20 %. Der Vergleich der Abnahme der maximalen Gassättigung über die Tiefe mit der Verkleinerung des Radius über die Tiefe

lassen vermuten, dass beide Phänomene von der Löslichkeit des $CO_2$ im Wasser und der Abnahme des Gasvolumens mit der Tiefe gesteuert werden. Soll eine $CO_2$-Leckage anhand der Gasphase detektiert werden, so sollte diesbezüglich ein Monitoring in einem möglichst weit oben liegenden Aquifer durchgeführt werden, da mit zunehmender Tiefe die Gasphase kleiner wird. Für ein geochemisches Monitoring bedeutet es, dass ein geochemisches Signal in einem tiefer gelegenen Aquifer durch die erhöhte Lösung des $CO_2$ im Wasser mit zunehmender Tiefe stärker ist.

### 3.3 Einfluss der Grundwasserströmung auf die Ausbreitung von $CO_2$ Gasphasenkörpern

Um den Einfluss der Grundwasserströmung auf die Ausbreitung des gasförmigen und des gelösten $CO_2$ zu untersuchen, wurde mit den Parametern des in Kapitel 3.1 beschriebenen Modells ein dreidimensionales Modell aufgebaut. Der Aquifer hat in x-, y- und z-Richtung jeweils eine Erstreckung von 300 m, 50 m und 4 m. Die Zellen sind in x- und y-Richtung 2 m lang und in z-Richtung 0.5 m. Entlang der oberen 2 m des Modellgebiets und darunter sind die Zellen 1 m mächtig. Als Randbedingungen wurden rechts und links feste Druckrandbedingungen verwendet. Alle anderen Ränder sind undurchlässig. Die Festpotenziale der Drücke wurden so gewählt, dass das Grundwasser von links nach rechts strömt. Die gewählten Abstandgeschwindigkeiten des Grundwassers betragen 0.0 m/s, 0.1 m/s, 0.3 m/s und 0.5 m/s und decken somit die Fließgeschwindigkeiten des Strömungsmodells ab (s. Kapitel 2). Der $CO_2$-Gasphasenkörper breitet sich quer zur Strömungsrichtung symmetrisch um die Leckagequelle aus. Um die Zellenanzahl im Modellgebiet zu verringern wurde daher das Modellgebiet in der Mitte, parallel zu Strömungsrichtung halbiert.

Ohne Grundwasserströmung breiten sich die $CO_2$-Gasphase und die gelöste Phase radialsymmetrisch um die Quelle aus (Abbildung 12). Wenn das gelöste $CO_2$ nicht mit der Grundwasserströmung abtransportiert wird, wird das Wasser mit gelöstem $CO_2$ gesättigt und es kann nur noch wenig $CO_2$ im Wasser nachgelöst werden. Damit entspricht die von der Gasphase eingenommene Fläche unterhalb des Grundwasserstauers annähernd der vom gelösten $CO_2$ eingenommenen Fläche.

Der Radius des Gasphasenkörpers beträgt ohne Einfluss der Grundwasserströmung nach einem Jahr 50 m (Abbildung 12). Durch die Grundwasserströmung wird der Gasphasenkörper jedoch deformiert. Er wird mit der Strömungsrichtung in die Länge gestreckt, während seine Ausbreitung quer zur Strömung abnimmt. Je stärker die Grundwasserströmung ist, desto größer ist auch die Deformation. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0.1 m/d erstreckt sich der Phasenkörper um 25 m entgegen der Strömungsrichtung und 75 m in Strömungsrichtung. Quer zur Strömungsrichtung beträgt die Erstreckung 40 m. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0.2 m/d beträt die Breite des

Körpers 30 m. Die Ausbreitung erstreckt sich um 10 m entgegen der Strömungsrichtung und um ca. 85 m mit der Strömungsrichtung. Hingegen breitet sich der Gasphasenkörper bei v=0.5 m/d nicht mehr gegen die Strömungsrichtung aus und erreicht maximal eine Länge von 40 m in Strömungsrichtung. Quer zur Strömung beträgt die Ausdehnung 10 m.

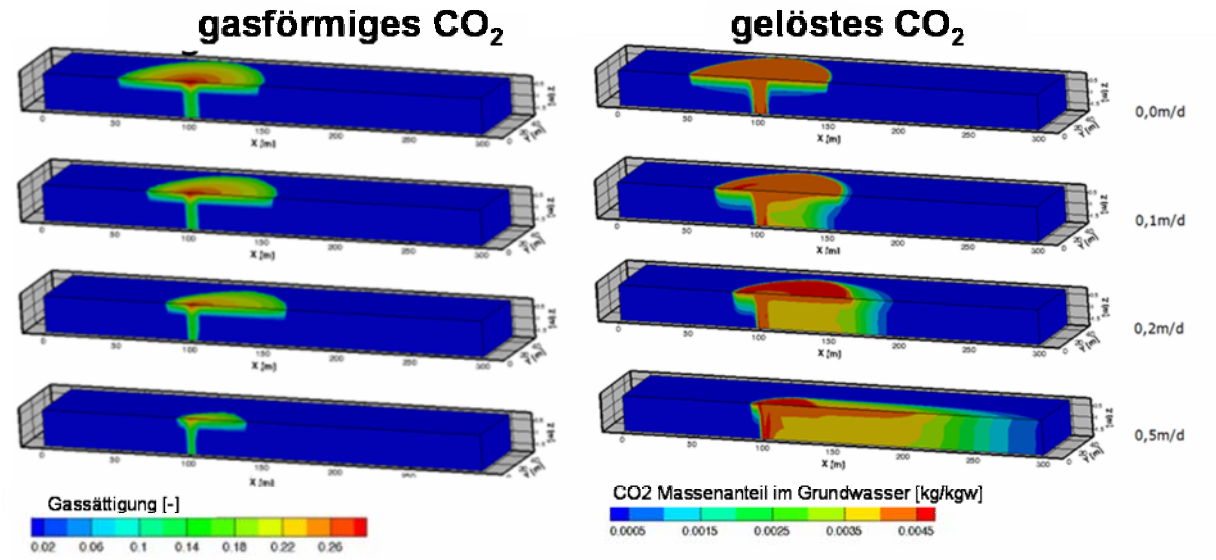



**Abbildung 12: Änderung der Ausbreitung der $CO_2$-Gasphasenkörper (links) und der Fahne des gelösten $CO_2$ mit Änderung der Grundwasserströmung.**

Das gelöste $CO_2$ wird mit der Grundwasserströmung stromabwärts transportiert. Da das nachströmende Wasser kein gelöstes $CO_2$ mehr enthält, kann mehr $CO_2$ im Wasser gelöst werden und der Gasphasenkörper wird kleiner (Abbildung 12). Mit zunehmender Strömung wird die Fahne des gelösten $CO_2$ schmaler und um die Strecke länger, die das gelöste $CO_2$ innerhalb einer definierten Zeit transportiert wird. Die Erstreckung der gelösten $CO_2$-Phase entgegen und quer zur Strömungsrichtung entspricht annähernd der Erstreckung des Gaskörpers. Nach einem Jahr ist die Fläche des gelösten $CO_2$ unterhalb des Grundwasserstauers bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0.1 m/d 60 m, bei v=0.2 m/d 180 m und bei 0.5 m/d 200 m lang. Ein Vergleich der Flächen unterhalb des Grundwasserstauers, die das gelöste $CO_2$ und das gasförmige $CO_2$ einnehmen, zeigt, dass die durch das gasförmige $CO_2$ eingenommene Fläche mit zunehmender Grundwasserströmung kleiner wird. Die Fläche des gelösten $CO_2$ wird hingegen größer (Abbildung 13).

Nimmt die Strömungsgeschwindigkeit in einem Grundwasserleiter zu, verlangsamt sich der Flächenzuwachs des $CO_2$-Gasphasenkörpers, der sich unterhalb des Grundwasserstauers bildet, im Gegensatz dazu nimmt die Fläche der gelösten $CO_2$ Fahne schneller zu. Bei der höchsten dargestellten Strömungsgeschwindigkeit von 0.5 m/d nimmt die Fläche des gasförmigen $CO_2$ zunächst bis zu einer Simulationszeit von ca. 200 Tagen zu, danach bleibt

die Fläche mit 200 m² konstant. Es gelangt somit ab 200 Tagen Leckagezeit die gleiche $CO_2$ Gasmasse in das Aquifersystem, wie auch im Wasser gelöst wird.

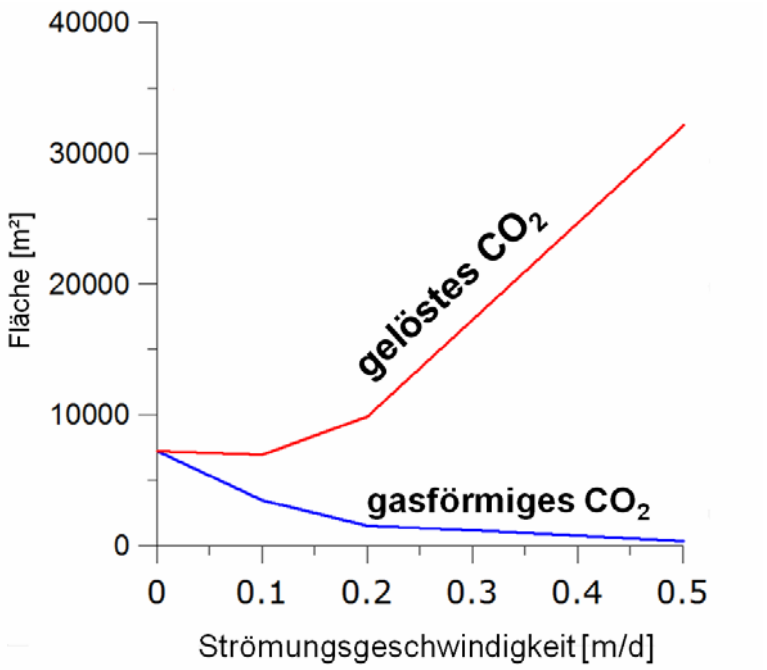



**Abbildung 13: Veränderung der Fläche des gasförmigen $CO_2$-Gaspahsenkörpers und der Fahne des gelösten $CO_2$ unterhalb einer Dechschicht in einem gespannten Aquifer nach einem Jahr Leckagezeit in Abhängigkeit der Grundwasserströmung.**

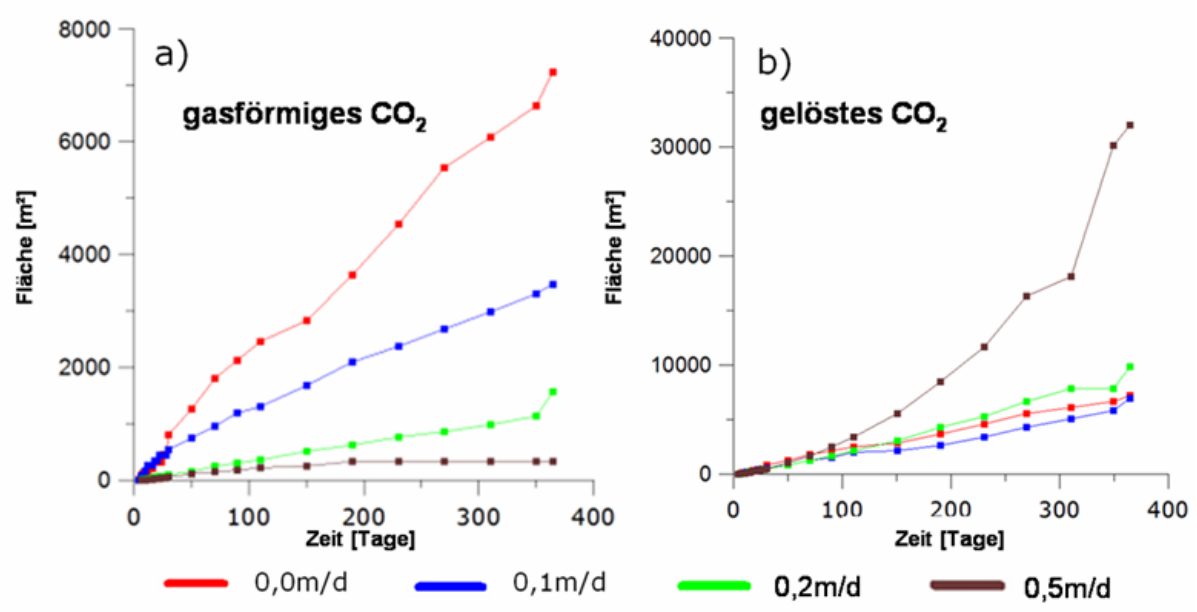



**Abbildung 14: Oberfläche des $CO_2$ Gasphasenkörpers (a) der Fahne des gelösten $CO_2$ (b) über die Leckagezeit in Abhängigkeit der Grundwasserströmungsgeschwindigkeit.**

### 3.4 Abbhängigkeit der $CO_2$-Gasphasenausbreitung von der Topographie des Aquifers.

Für die folgenden Szenarien wurde zur realitätsnäheren Simulation das Relief des Aquifers L4 (Kapitel2) in die Modellgeometrie eingebaut. Anhand dieses Szenarios soll untersucht werden, welchen Einfluss Unterschiede im Relief der Aquiferoberkante auf die horizontale Ausbreitung des gasförmigen $CO_2$ hat.

Für die Szenarien wurde der Grundwasserleiter L4 gewählt. Die restlichen Aquiferparameter entsprechen dabei dem in Kapitel 3.1 beschriebenen konzeptionellen Modell. Die Grundwasserströmung wurde vernachlässigt. Um nachzuvollziehen, wie sich das gasförmige $CO_2$ unter Einfluss des Reliefs der Aquiferoberkante im Modellgebiet verteilt, wurden 4 Szenarien mit unterschiedlichen Positionen der Leckagen, mit einer Leckagerate von $1{,}16*10^{-2}$ kg/s, simuliert (siehe Abbildung 14). Das Relief der Oberkante des betrachteten Grundwasserleiters ist in Abbildung 15 (oben links) dargestellt. Die höchste Erhebung des Grundwasserleiters befindet sich mit 19 m über NN im südlichen Teil des Modellgebietes. Nach Norden, Osten und Westen hin liegt die Oberkante des Aquifers niedriger und die Flächen sind flacher. Zur Quantifizierung der Größen der $CO_2$-Gasphasenkörper wurden die Umreisse der sichtbaren Flächen unterhalb der Aquiferoberkante gemessen. Die Positionen der Leckagequellen sind so gewählt, dass die Leckagen in Bereichen mit unterschiedlich ausgeprägtem Relief der Aquiferoberkante liegen (Abbildung 15). Der Gradient des Reliefs beträgt im Bereich der Leckagen A $1.5*10^{-3}$, B und C maximal $3*10^{-3}$ und D $2*10^{-2}$.

Wenn das gasförmige $CO_2$ in den oberflächennahen Aquifer gelangt und bis an die Aquiferoberkante aufgestiegen ist, breitet sich das gasförmige $CO_2$ unterhalb der Oberkante dem Relief der Aquiferoberkante folgend aus. Dabei migriert das gasförmige $CO_2$ entlang des größten Gradienten des Reliefs aufwärts. Nach einer Leckagezeit von 3 Jahren haben die $CO_2$-Gasphasenkörper eine Fläche von 176 m² (Leckage A), 207 m² Leckage B, 250m²(Leckage C) und 400 m² (Leckage D) unterhalb der Aquiferoberkante gebildet (Abbildung 15, links). Die maximale Gassättigung der $CO_2$-Gasphasenkörper beträgt an den Leckagen A, B und C 30%. Der Partialdruck des gelösten $CO_2$ erreicht einen Wert von $2.5*10^5$ Pa (Abbildung 15, rechts). Der $CO_2$-Leckagekörper D hat eine maximale Gassättigung von 0.77 und der Partialdruck des gelösten $CO_2$ liegt bei $1{,}3*10^5$ Pa.

Nach 10 Jahren Leckagezeit haben sich die $CO_2$-Gasphasenkörper erwartungsgemäß vergrößert. Der Gasphasenkörper der Leckage A hat eine Fläche von 200 m², der von Leckage B=210 m², Leckage C=723 m² und Leckage D=2724 m² (Abbildung 15**,** links). Es ist zu beachten, dass das $CO_2$ des Gasphasenkörpers A das Modellgebiet nach Norden über den Modellrand verlässt und damit die Größe dieses Körpers nicht beurteilbar ist. Dort wo sich die Leckage D befindet, befindet sich eine Fallenstruktur, in der sich das gasförmige $CO_2$ sammelt. Der geringere hydrostatische Druck in diesem Bereich hat zur Folge, dass

sich dort weniger $CO_2$ im Wasser löst und so die $CO_2$-Gassättigung in diesem Bereich höher ist. Entsprechend ist weniger $CO_2$, aufgrund der geringeren $CO_2$-Löslichkeit, im Wasser gelöst als in den Bereichen des Aquifers an denen ein höherer hydrostatischer Druck herrscht. Entsprechend sind die Konzentrationen des gelösten $CO_2$ an den Leckagen A, B und C höher als bei der Leckage D.

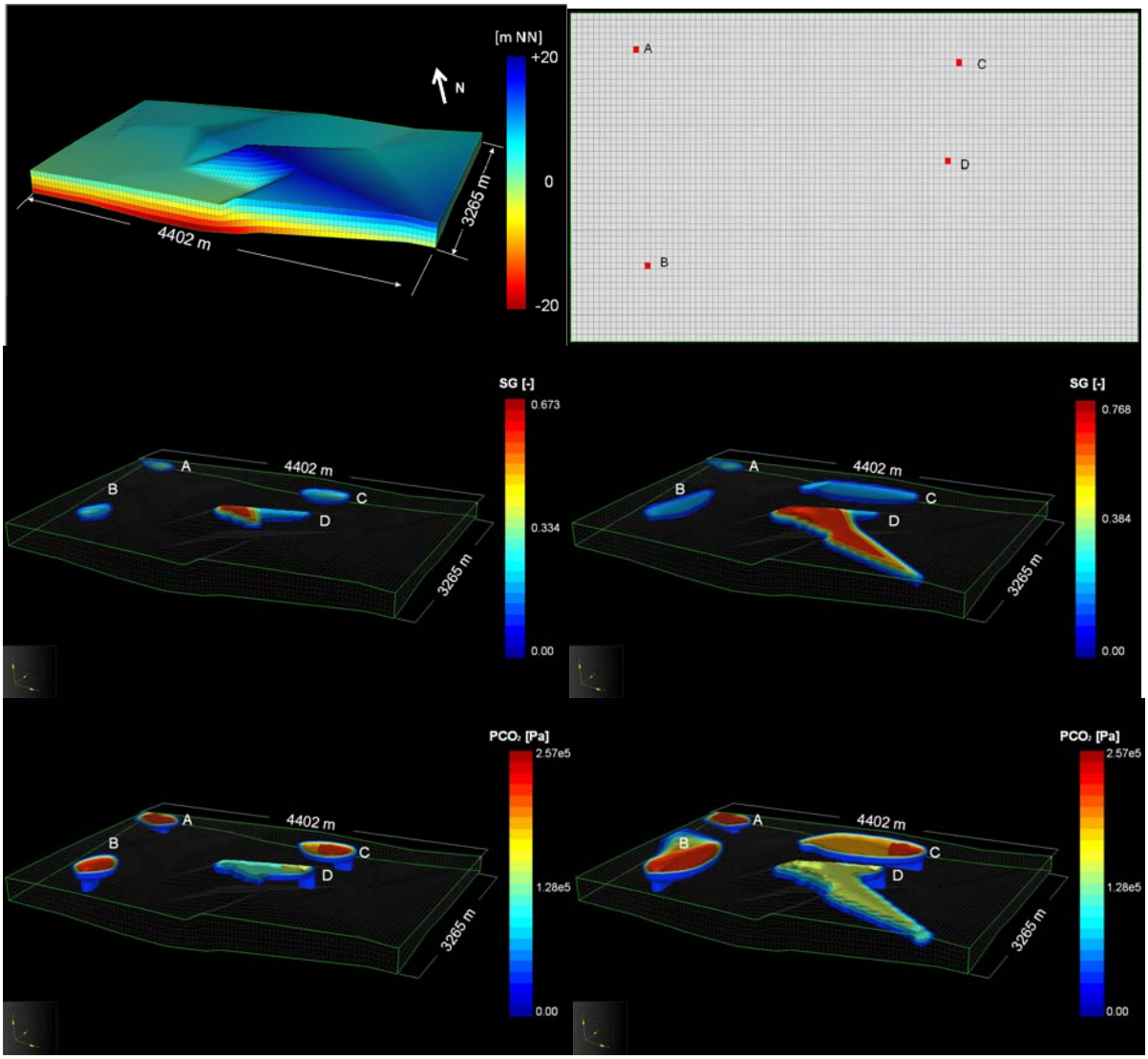



**Abbildung 15: Relief zur Untersuchung des Einflusses der Aquifertopographie auf die Ausbreitung des $CO_2$-Gasphasenkörpers (oben links). Modellgebiet mit den Positionen der gewählten Leckagepunkten (A,B,C,D) (oben rechts). Verteilung des gasförmigen $CO_2$ nach einer Leckagezeit von 3 Jahren (Mitte links) und 10 Jahren (Mitte rechts) Partialdrücke des gelösten $CO_2$ nach 3 Jahren (unten links) und nach 10 Jahren (unten recht) Leckagezeit. Die Leckagerate beträgt in allen Simulationen $1{,}16*10^{-2}$ kg/s, 15-fach überhöht.**

Mithilfe dieser Simulation kann für den Standort gezeigt werden, wohin sich $CO_2$-Leckagen ausbreiten würden und auf Grundlage dieser Informationen ein Monitoringsystem ausgelegt werden. So bietet es sich an, dort wo Fallenstrukturen vermutet werden Beobachtungspegel zu setzen. Vergleicht man die Simulationen mit den radialsymmetrischen Simulationen zur Untersuchung des Einflusses der Leckagerate und der Aquifertiefe (Kapitel 3.1 und 3.2), so

ist zu erkennen, dass der Einfluss der Aquifertiefe in Bezug auf die $CO_2$-Lösung im Wasser und die Ausbildung der $CO_2$-Gassättigung, in einem Aquifer mit einem Relief und damit Unterschiedlichen Höhen der Aquiferoberkante Unterschiede zeigen. In den tiefer gelegenen Bereichen des Aquifers sind die Gassättigungen niedriger und die Konzentrationen des gelösten $CO_2$ höher und in höher gelegenen Bereichen ist es umgekehrt. Was die Flächen des entstehenden Gasphasenkörpers unterhalb eines Grundwasserstauers betrifft, so wird die Größe des Phasenkörpers in den radialsymmetrischen Simulationen deutlich überschätzt. Die Struktur eines Aquiferreliefs führt dazu, dass das gasförmige $CO_2$ entlang präferenzieller Wege migriert und dadurch zu einer Verkleinerung der Oberfläche des $CO_2$-Gasphasenkörpers führt.

# 4 Änderungen der Grundwasserchemie durch die Leckage von $CO_2$

Gelangt $CO_2$ über eine Leckage in einen oberflächennahen Aquifer und löst sich im Grundwasser, kann es zu einer Senkung des pH–Wertes kommen. Durch die Versauerung des Wassers stellt sich ein neues chemisches Gleichgewicht zwischen $CO_2$, Wasser und den Mineralen im Sediment ein. Werden Minerale gelöst, ändert sich die Zusammensetzung des Wassers. Der pH–Wert wird in Abhängigkeit von den anwesenden Mineralphasen gepuffert. Das wichtigste Puffersystem ist hierbei der Karbonatpuffer. Nur geringe Mengen Kalzit in der Aquifermatrix reichen aus, um den pH–Wert zu puffern. Ist Kalzit im Sediment und ist das Wasser mit gelöstem $CO_2$ gesättigt, so wird der pH-Wert auf pH=6 gepuffert. Ist kein Kalzit in der Sedimentmatrix vorhanden, so kann der pH–Wert unter 6 sinken (Birkholzer et al., 2008; Wang et al., 2004; Fahrner et al. 2011). Die Konzentration des gesamten anorganischen Kohlenstoffs (TIC) steigt durch die Lösung von $CO_2$ im Wasser. Ein weiterer Parameter, der sich durch die $CO_2$-Lösung und den daraus folgenden Minerallösungsprozessen ändert, ist die elektrische Leitfähigkeit (Fahrner, 2011, in prep). Weiterhin ändern sich durch die Minerallösung die Konzentrationen der gelösten Wasserinhaltsstoffe.

Auf der Grundlage der am Standort ermittelten geochemischen Daten der Aquifermatrix und der geochemischen Zusammensetzung des Wassers sollten mithilfe von geochemischen Szenarienmodellierungen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Welche Parameter sind für eine Detektion einer $CO_2$-Leckage geeignet?
2. Welche Wasserinhaltsstoffe und Parameter des Grundwassers ändern sich durch eine $CO_2$-Leckage und wie groß ist die zu erwartende Änderung?
3. Welchen Einfluss haben die Minerale der Aquifersedimente auf die Änderung der Wasserzusammensetzung aufgrund einer $CO_2$-Leckage?
4. Wie groß ist die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit und des pH-Wertes durch eine $CO_2$-Leckage in einem oberflächennahen Aquifer und wie würden sich diese Änderungen im Aquifer ausbreiten?
5. Wie könnte eine daraus entwickelte Monitoringstrategie aussehen?

## 4.1 Gleichgewichtssimulationen zur Untersuchung geochemischer Veränderungen aufgrund eines $CO_2$-Eintritts

Die Wasser- und Sedimentzusammensetzungen der am Standort genommenen Proben (Anlage 1) sind die Grundlage der mit PhreeqC im Folgenden simulierten 0D

Gleichgewichtssimulationen. Es wurden die Daten der Grundwasserprobenahme vom 25.08.2010 verwendet. Zuerst wurde für jede der 12 Wasserproben (B1 bis B12) im Modell die Ladungsbilanz ausgeglichen. Im Falle einer negativen Ladungsbilanz der Grundwasseranalyse wurde zum Ausgleich $Na^+$ verwendet. Zum Ausgleich einer negativen Ladungsbilanz wurde $Cl^-$ verwendet. Um eine $CO_2$–Leckage zu simulieren, wurde das Wasser mit $CO_2$ ins Gleichgewicht gebracht, so dass das Wasser an gelöstem $CO_2$ gesättigt ist (Normaldruck und 11 °C Wassertemperatur). Die Minerale der sedimentären Festphase wurden getrennt voneinander in den Modellen betrachtet. Dadurch soll festgestellt werden, welchen Einfluss die einzelnen Mineralphasen des Sediments auf die Änderung der Wasserzusammensetzung während einer $CO_2$-Leckage haben können. Dazu wurden die Mineralphasen Kalifeldspat, Albit, Anorthit und Kalzite getrennt voneinander mit den Wasserproben (B1 – B12) ins Gleichgewicht gebracht. Grundwasserströmung, Ionenaustausch und die die Lösungskinetik der Minerale wurden nicht berücksichtigt.

Bei einer $CO_2$ Leckage im Untersuchungsgebiet am CLEAN-Standort würden die pH-Werte in allen gerechneten Simulationen unter einen Wert von pH = 6,04 sinken. Die niedrigsten pH-Werte (pH = 4,6 bis 5,5) stellen sich ein, wenn keine reaktiven Mineralphasen anwesend sind. Ist nur Kalifeldspat in der Festphase, so wird der pH-Wert zwischen pH = 4,9 bis 5,5 gepuffert. Albit puffert den pH-Wert auf 5,2 bis 5,6 und Anorthit auf pH = 5,5 bis 5,6. Befindet sich Kalzit in der Matrix, liegt der resultierende pH-Wert zwischen pH = 6,01 - 6,04 (Abbildung 13, links oben).

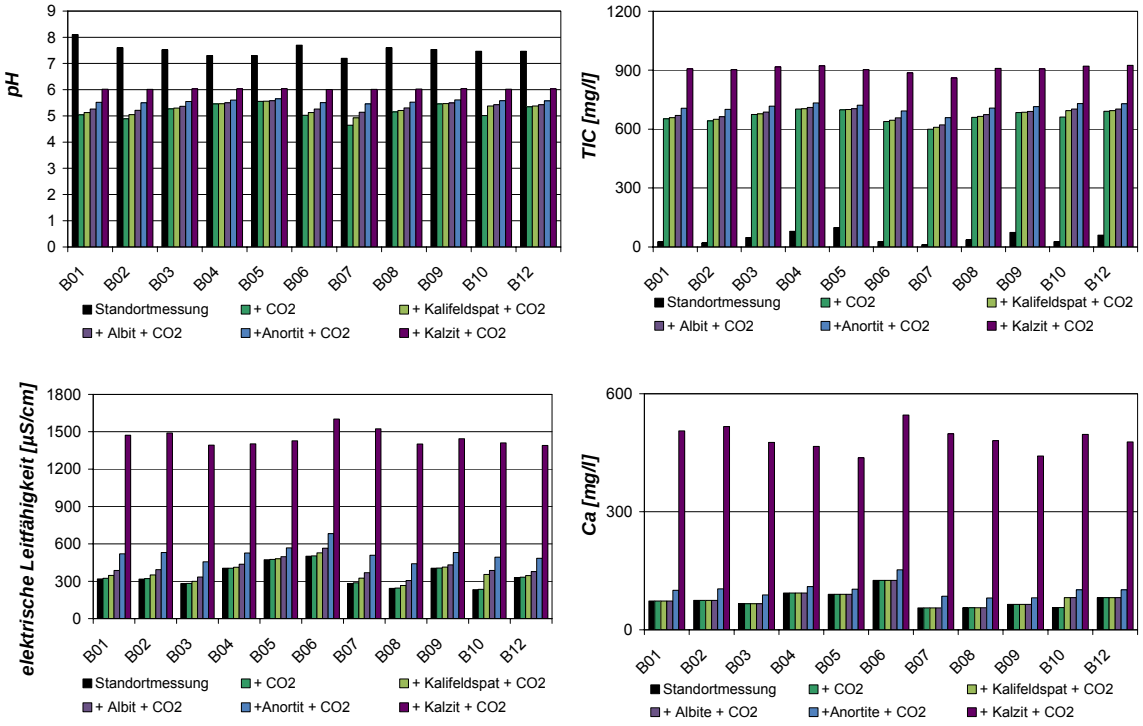



**Abbildung 16: pH–Werte, TIC–Konzentration, elektrische Leitfähigkeit und Kalziumkonzentration der am Standort gemessenen Wasserproben und der simulierten Wässer. Das Grundwasser wurde jeweils mit $CO_2$ (+$CO_2$) oder mit einer Mineralphase (+*Mineralphase*) ins Gleichgewicht gebracht.**

Die gemessenen TIC–Konzentrationen am Standort liegen zwischen 10 und 100 mg/l. Kommt es zu einer $CO_2$–Leckage, steigen die Konzentrationen auf mindestens 600 mg/l an. Werden hierbei keine Mineralphasen berücksichtigt, wird eine maximale TIC–Konzentration von 700 mg/l erreicht. Sind Feldspäte im Sediment enthalten, so steigen die Konzentrationen auf maximal 730 mg/l. Eine Anwesenheit von Kalzit lässt die TIC–Konzentrationen auf Werte zwischen 860 mg/l und 920 mg/l ansteigen (Abbildung 16, rechts oben), weil durch die Lösung von Kalzit im Wasser die Konzentration von $HCO_3^-$ zunimmt. Die elektrische Leitfähigkeit steigt ohne die Berücksichtigung einer Mineralphase nur auf bis zu 10 µS/cm an. Durch die Lösung der Feldspäte steigt die elektrische Leitfähigkeit bis auf maximal 650µS/cm an und bei der Lösung von Kalzit auf über 1400 µS/cm (Abbildung 16, links unten).

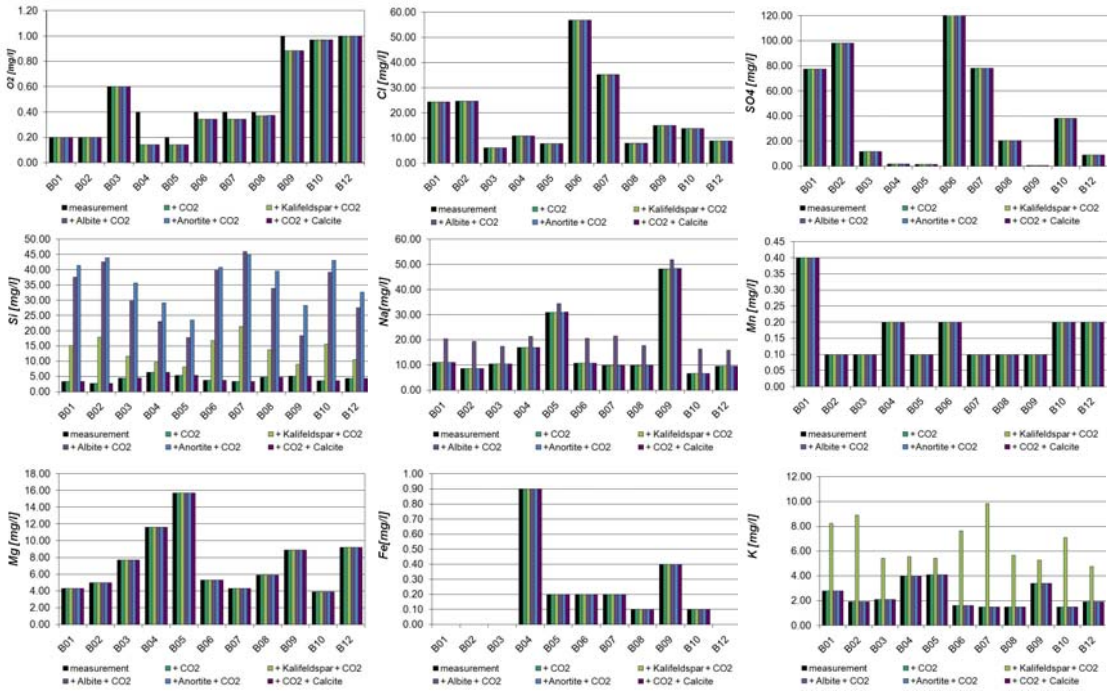



**Abbildung 17: Sauerstoff-, Clorid-, Sulfat-, Silizium-, Natrium-, Mangan-, Magnesium-, Eisen- und Kaliumkonzentration der am Standort gemessenen Wasserproben und der simulierten Wässer. Das Grundwasser wurde jeweils mit $CO_2$ (+$CO_2$) sowie mit einer Mineralphase (+*Mineralphase*) ins Gleichgewicht gebracht.**

Bei den betrachteten Mineralphasen Kalzit, Albit, Anortit und Kalifeldspat zeigt das Vorhandensein von Kalzit in der Sedimentmatrix die signifikantesten Änderungen der Wasserzusammensetzung. Die Kalziumkonzentrationen steigen in den Simulationen von unter 150 mg/l auf mindestens 450 mg/l an (Abbildung 16, recht unten). Die Konzentrationen von Eisen, Magnesium, Mangan, Sulfat, und Chlorid ändern sich in den beschriebenen Simulationen nicht signifikant und sind damit auch nicht als spezielle Monitoringparameter geeignet. Die Silizium-, Kalium-, und die Natriumkonzentrationen steigen durch die Lösung der Silikate an, doch ist die Lösung von Feldspäten unter

Umständen ein sehr langsamer Prozess. Damit wäre ein Konzentrationsanstieg, der durch die Lösung von Feldspäten auftritt, erst nach längerer Zeit zu erwarten. Silizium-, Kalium-, und Natriumkonzentrationen sind daher nicht geeignet, um eine $CO_2$-Leckage in einem kurzfristigen Zeitraum nach Beginn der Leckage zu detektieren.

### 4.2 Untersuchung geochemischer Veränderungen mittels reaktiver Transportmodellierung

Wie bereits in Kap. 4.1 gezeigt, führt die Lösung von $CO_2$ in oberflächennahen Grundwasserleitern zu einer Versauerung und gegebenenfalls zur Lösung von Mineralen, wie z. B. Kalzit. Die durch diese Prozesse verursachte Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers kann zur Detektion einer $CO_2$-Leckage durch geoelektrische oder elektromagnetische Messungen verwendet werden. Die Wahrscheinlichkeit, einen $CO_2$-Eintrag durch diese geophysikalischen Methoden zu entdecken, hängt neben der Stärke der verursachten Erhöhung der Leitfähigkeit auch von ihrer räumlichen und zeitlichen Ausbreitung im Grundwasserleiter ab. Im Folgenden wird anhand beispielhafter Simulationen mithilfe eines reaktiven Transportmodells abgeschätzt, welche Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit am Standort CLEAN im Fall einer $CO_2$-Intrusion in oberflächennahe Grundwasserleiter zu erwarten wäre und wie sich diese Veränderung im Grundwasserleiter ausbreiten würde.

Die Simulationen wurden mit dem Programm OpenGeoSys durchgeführt, das Strömung und Transport mithilfe der Finite-Elemente Technik berechnet. Das Programm PhreeqC wurde verwendet, um geochemische Reaktionen zu simulieren. Die Simulationen basieren auf dem ermittelten geologischen Strukturmodell, dem Strömungsmodell, den geochemischen Untersuchungen des Grundwassers und der Sedimentmatrix am Standort. Als Szenario wurde ein zweidimensionales Vertikalprofil durch den zweiten Grundwasserleiter am Standort mit einer Mächtigkeit von 20 m und einer Länge von 200 m gewählt. Der Aquifer ist gespannt und seine Oberkante befindet sich in einer Tiefe von 30 m u. GOK. Bei einem mittleren Gradienten von 2.9 ‰, einer hydraulischen Durchlässigkeit von $2*10^{-4}$ m/s und einer effektiven Porosität von 20 % stellt sich die für den Standort ermittelte mittlere Abstandsgeschwindigkeit von 0.25 m/d ein. Für die Transportprozesse wurde eine Dispersivität von 1 m in Strömungsrichtung und 0.15 m vertikal zur Strömung angenommen.

Für das $CO_2$-Leckageszenario wird angenommen, dass sich gasförmiges $CO_2$ in einer 50 m langen und 0.5 m mächtigen Schicht unterhalb des oberen Grundwasserstauers akkumuliert hat, dort als residuale Gasphase immobil verweilt, sich langsam in der Grundwasserströmung löst und eine unendliche $CO_2$-Quelle darstellt. Aufgrund der Temperatur von 11°C und des hydrostatischen Drucks von 30 m Wassersäule ergibt sich eine maximale $CO_2$-Löslichkeit von 0.199 mol/$m^3$ (Duan et al., 2006). Die geochemische Zusammensetzung des Grundwassers wurde in Anlehnung an Messungen im

Beobachtungspegel B3 gewählt, wurde jedoch im Modell vereinfacht und idealisiert. Da der Zielparameter elektrische Leitfähigkeit fast ausschließlich von der Anwesenheit von Kalzit abhängt, wurden im Modell außer Kalzit keine anderen Minerale berücksichtigt. Demzufolge wurden auch Spurenstoffe wie z. B. Kalium-, Mangan- und Nitrationen im Modell vernachlässigt und durch eine äquivalente Menge an Natrium- und Chloridionen ersetzt, um die Ionenstärke konstant zu halten. Das resultierende Grundwasser, das bereits annähernd im Gleichgewicht mit Kalzit ist (SI=0.04), wurde ins Gleichgewicht gesetzt. Entsprechend der Messungen am Sediment des Standorts für den $CO_2$-Injektionsversuch wurde für den Sand am CLEAN-Standort eine geringe Kationenaustauschkapazität von 2 meq/100 $g_{Sediment}$ angenommen. Die anfängliche Kationenbelegung steht im Gleichgewicht zum ermittelten Grundwasser.

Die mittleren Kalzitgehalte am Standort sind nicht genau bekannt, scheinen jedoch gering zu sein. Im ersten Szenario wird ein Kalzitgehalt von 1g/$kg_{Sediment}$ angenommen. Der aus der $CO_2$-Gasphase gelöste anorganische Kohlenstoff (TIC) breitet sich in Strömungsrichtung entlang der Aquiferoberkante aus (Abbildung 18). Die verursachte Versauerung des Aquifers wird durch Lösung von Kalzit gepuffert, was eine Freisetzung von $Ca^{2+}$-Ionen und einen weiteren Anstieg des TIC zur Folge hat, der aber aufgrund der bereits hohen Konzentrationen kaum sichtbar ist. Nach 320 Tagen Simulationszeit hat sich im Anstrombereich der $CO_2$-Gasphase bereits ein kalkfreier Bereich gebildet, der sich über die Zeit weiter ausbreiten wird. Eine Lösung im Mischungsbereich der abstromigen TIC-Fahne und des unveränderten Grundwassers ist deutlich an der Konzentrationsverteilung des Kalzits erkennbar. Aufgrund der hohen $Ca^{2+}$- und $H^+$-Konzentrationen wird $Na^+$ von den Austauschplätzen des Ionentauschers verdrängt und akkumuliert im Grundwasser. Im bereits kalzitfreien Aquiferbereich haben die $Ca^{2+}$-Konzentrationen wieder abgenommen und $Na^+$ belegt wiederrum die frei werdenden Austauschplätze, was sich in leicht verringerten $Na^+$-Konzentrationen im Grundwasser widerspiegelt.

Befindet sich im Sediment des simulierten Grundwasserleiters kein Kalzit (Abbildung 19), verursacht die $CO_2$-Lösung deutlich geringere pH-Werte. Eine Kalzitlösung und damit eine pH-Pufferung findet nicht statt. $Ca^{2+}$ wird in diesem Fall wie $Na^+$ nur durch Kationenaustausch freigesetzt. Die Konzentrationen beider Ionen sind deutlich geringer, da sich nur die steigenden $H^+$-Konzentrationen am Ionentauscher anlagern.

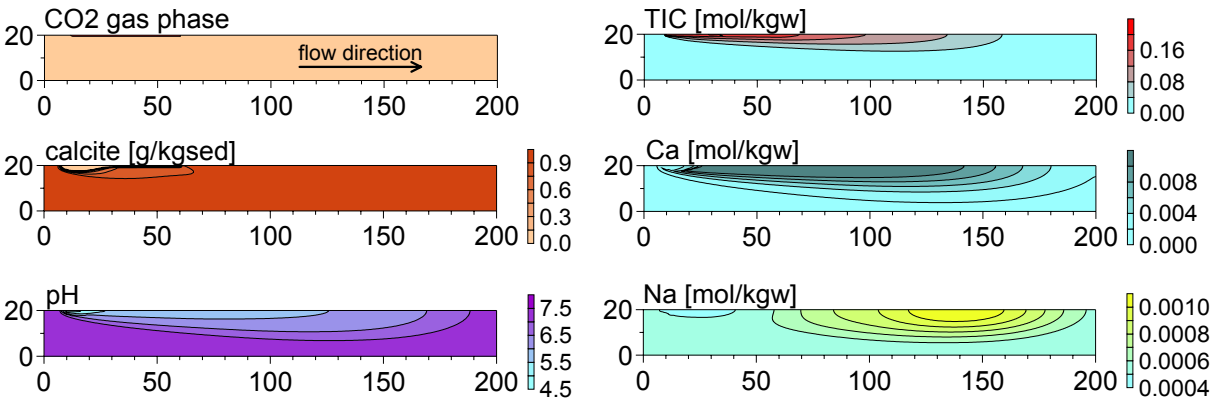



**Abbildung 18: $CO_2$-Eintrag in einen Kalzit-haltigen Aquifer nach 320 Tagen Simulationszeit.**

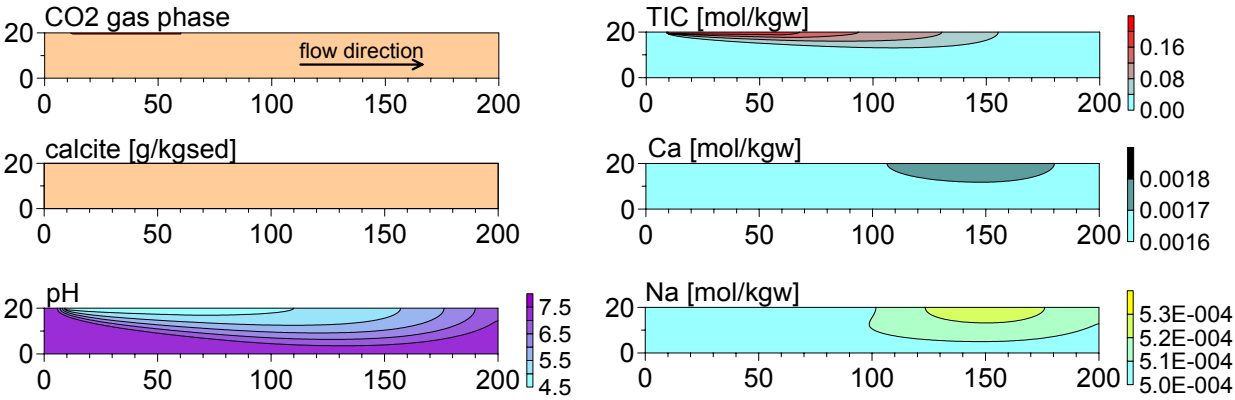



**Abbildung 19: $CO_2$-Eintrag in einen kalzitfreien Aquifer nach 320 Tagen Simulationszeit.**

Die Annahme, dass Kalzit in geringen Konzentrationen vorhanden ist oder nicht, hat weitreichende Folgen für die Nutzung der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwasser als Monitoringparameter (Abbildung 20). Kalzit puffert die Versauerung des Grundwassers auf pH-Werte über 5.7, wodurch mehr als 21 % des TIC in Form des Ions $HCO_3^-$ vorliegt. Gleichzeitig setzt die Kalzitlösung $Ca^{2+}$-Ionen frei. Diese beiden Ionen liefern die wesentlichen Beiträge zu einer deutlichen Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit um fast eine Größenordnung ausgehend vom Ursprungszustand. Ohne Kalzit sinkt der pH-Wert bis auf ca. 4.7, wodurch der TIC zu ca. 98 % in nicht ionisierter Form als $H_2CO_3^*$ vorliegt. Eine leichte Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit wird vorwiegend durch pH-Pufferung aufgrund von Kationenaustausch und durch die resultierende Freisetzung von Kationen verursacht.

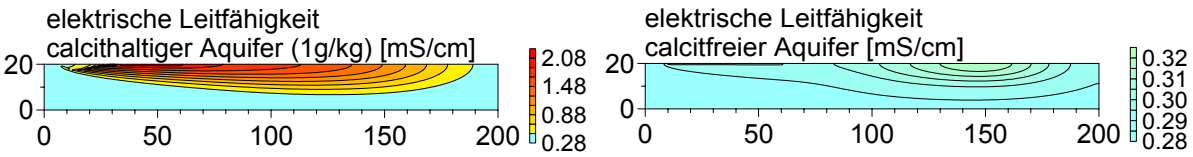



**Abbildung 20: Simulierte elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers nach 320 Tagen**

Ist im Sediment kein Kalzit enthalten, verändert sich die elektrische Leitfähigkeit des Wassers nur unwesentlich und ist eventuell vor dem Hintergrund natürlicher Schwankungen nur schwer oder gar nicht erkennbar. Eventuell erhöht in natürlichen Aquiferen die Lösung anderer Minerale, die nicht im Modell enthalten sind, die elektrische Leitfähigkeit, doch sind viele der Minerallösungskinetiken sehr langsam und haben auf der Zeitskala eines Jahres einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Leitfähigkeit. Auch eine höhere Kationenaustauschkapazität könnte zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit führen.

Unter Anwesenheit von Kalzit ist die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit dagegen deutlich und voraussichtlich sehr gut detektierbar. Die im Sediment enthaltene Kalzitkonzentration hat dabei nur einen geringen Einfluss auf die Detektierbarkeit. Auch wenn der Kalzitgehalt deutlich höher ist als im Modell, bleibt die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit identisch. Nur der Aquiferbereich, in dem Kalzit bereits vollständig gelöst wurde, bildet sich langsamer aus (ohne Abb.). Enthält der Aquifer deutlich weniger Kalzit, z.B. 0.1 $g/kg_{Sediment}$ (1/10 des zuvor angenommenen Werts), bildet sich schnell ein kalzitfreier Aquiferbereich mit geringem pH-Wert aus, in dem der Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit ähnlich gering ist wie im bereits initial kalzitfreien Aquifer. Im noch kalzithaltigen Aquiferbereich bleibt der Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit jedoch deutlich, auch wenn er mit maximal 1.7 mS/cm gegenüber max. 2.1 mS/cm im stärker kalzithaltigen Aquifer etwas geringer ist. Der Bereich mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit ist kleiner als zuvor und nicht mehr in direktem Kontakt zur $CO_2$-Leckage.

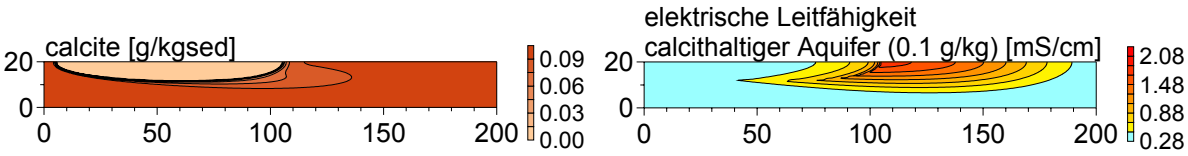



**Abbildung 21: Simulierter Kalzitgehalt im Sediment und elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers nach 320 Tagen in einem sehr gering kalzithaltigen Aquifer.**

Im Modell wurde von einer immobilen $CO_2$-Phase ausgegangen, die sich im Wasser löst. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich der $CO_2$-Phasenkörper über die Zeit ausdehnt, wobei die elektrische Leitfähigkeit eines Aquifervolumens durch die Verdrängung des Grundwassers durch Gas abnehmen wird. Für eine detailliertere Bewertung, ob die elektrische Leitfähigkeit als Monitoringparameter geeignet ist, wäre die gekoppelte Simulation der Gasphasenausbreitung mit den geochemischen Reaktionen erforderlich. Weiterhin wäre zu untersuchen, welche Konsequenzen die hydraulische und geochemische Heterogenität (z. B. Kalzitverteilung) auf die Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit haben kann. Letztendlich sind praktische Feldversuche zur Überprüfung der Modellergebnisse aber unerlässlich.

# 5 Konservatives Transportmodell

Auf das Grundwasserströmungsmodell wurde ein konservatives Transportmodell aufgebaut, um den Transport von im Wasser gelösten $CO_2$ nach einer $CO_2$-Leckage zu simulieren. Zu den bereits beschriebenen Parametern des Strömungsmodells (Kapitel 2) wurde eine Dispersion von 10m nach Beims (1982) angenommen, da in dem betrachteten Zeitraum $CO_2$–Fahnen von ca. 1 km Länge in Strömungsrichtung nach einer ersten Abschätzung des Transportes betrachtet werden. Die Simulationszeit betrug 10 Jahre und ist in 3650 Zeitschritte unterteilt. Für die $CO_2$-Leckageszenarien wurden die in Abbildung 22 dargestellten Positionen der Leckagepositionen willkürlich angenommen. Die Positionen der Leckagequellen sind frei gewählt, ihre jeweilige Ausdehnung ist an die Ergebnisse der Mehrphasensimulationen (Kapitel3.1) angelehnt. Die kleinen Leckagequellen entsprechen Leckageraten von ca. $1{,}16*10^{-4}$kg/s und die große Leckagequelle entspricht einer Rate von ca. $1{,}16*10^{-2}$kg/s.

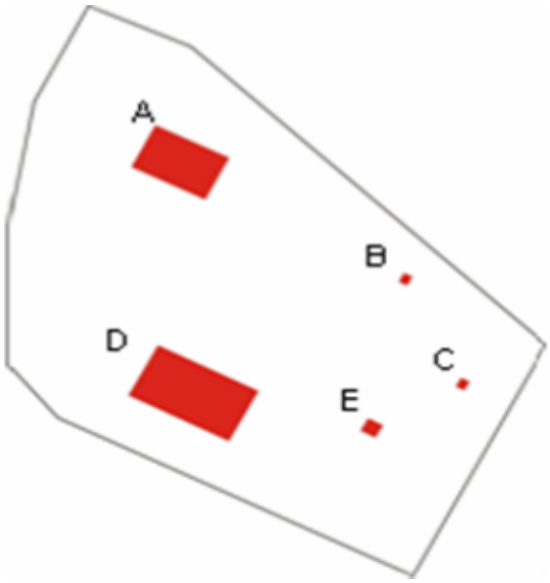



**Abbildung 22: Position der gewählten Leckagen im Grundwasserleiter L4.**

Da die Simulation von Mehrphasenströmung mit dem Programm Modflow/MT3D nicht möglich ist, wird für dieses Szenario angenommen, dass sich in den Bereichen der Leckagen ein $CO_2$-Gasphasenkörper gebildet hat aus dem kontinuierlich $CO_2$ gelöst wird, so dass das Wasser im Bereich der Leckage mit gelöstem $CO_2$ gesättigt ist. Zur Darstellung des Transportes des gelösten $CO_2$ wird ein konservativer Tracer verwendet. Die Konzentration des Tracers wurde auf seine Anfangskonzentration normiert. Damit ergibt sich in der Leckagequelle die $C/C_0$ Konzentration 1.

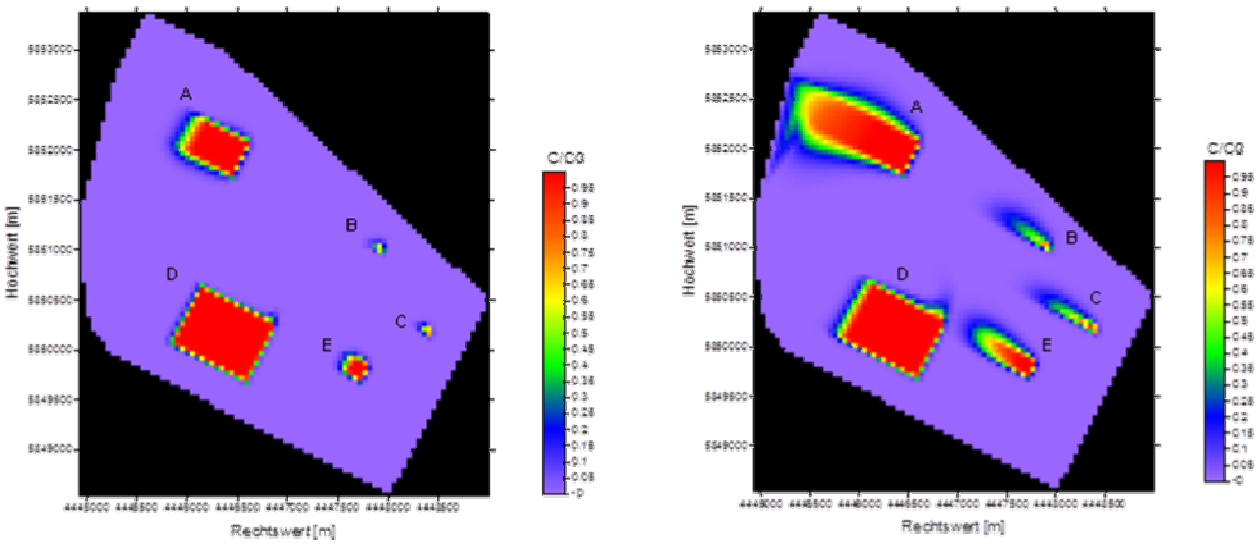



**Abbildung 23: Verteilung des konservativen Tracers nach einem Jahr (links) und nach 10 Jahren (rechts) Simulationszeit mit den $CO_2$-Leckagen A,B,C,D und E.**

Nach einem Jahr bildet sich an den Leckagen eine $CO_2$-Fahne vom maximal 100 m aus. Nach 10 Jahren sind deutlich lokale Unterschiede zu erkennen. Der Tracer aus den drei kleineren Leckagen im Osten des Modellgebietes bildet nach 10 Jahren Transport eine Fahne mit der Länge von ca. 1 km. Aus der Leckage A, im Norden des Modellgebietes, gelangt nach einem Jahr Leckagezeit das $CO_2$ in den Vorfluter Jeetze. Die große, südliche Leckage D bildet nach 10 Jahren lediglich eine $CO_2$-Fahne von nur knapp 100 m, da in diesem Bereich die hydraulische Durchlässigkeit und damit die Abstandsgeschwindigkeit geringer ist als im restlichen Bereich des Aquifers. Die Simulation des konservativen Tracertransportes zeigt verdeutlicht die lokalen Unterschiede in der Grundwasserströmung im Modellgebiet.

Aufgrund der nach unten gerichteten Grundwasserströmung, die sich aus der Grundwasserneubildung ergibt, kann im östlichen Teil des Modells kein $CO_2$ beeinflusstes Wasser spontan in den oberen Grundwasserleiter gelangen. Im Bereich des Vorfluters ist ein Aufstieg des vom $CO_2$ beeinflussten Wasser zu erwarten, da der Grundwasserleiter L4 in die Jeetze entwässert. Dort, wo sich die Bereiche mit einer geringen hydraulischen Durchlässigkeit befinden, zeigt das Wasser allerdings eine nach oben gerichtete Tendenz, die unter Umständen eine Verbreitung des $CO_2$ in den hangenden Schichten zur Folge haben könnte.

Der Vergleich der Ergebnisse der Mehrphasensimulationen zur Ausbreitung der $CO_2$-Gasphasenkörper unter einem Grundwasserstauer mit den Ergebnissen der konservativen Transportsimulationen zeigt, dass die Größe eines $CO_2$-Leckagekörpers (gelöstes $CO_2$ und gasförmiges $CO_2$) sowohl von der Leckagerate, die die Größe der Gasphase bestimmt, als auch vom Grundwassertransport, der die Erstreckung der gelösten $CO_2$-Fahne beeinflusst, abhängt. Befindet sich ein großer $CO_2$-Gasphasenkörper in einem Bereich mit einer

geringen Grundwasserströmung, ist die Gesamtgröße des $CO_2$-Körpers nach 10 Jahren Leckagezeit ca. 700 m² (Abbildung 23, rechts, Leckage D). Die Fläche der Leckage, die sich in einem Bereich mit einer hören Strömungsgeschwindigkeit befindet und zum Start der Simulation kleiner ist als die Leckage D, beträgt nach 10 Jahren Leckagezeit ca. 1500 m². Für einen genauen Vergleich müssen die Veränderlichkeit der Größe der $CO_2$ Gasphase, die Lösung des gasförmigen $CO_2$, sowie geochemische Prozesse, die zu einer Retardation der $CO_2$ Transportes im Wasser führen, berücksichtigt werden.

# 6 Fazit und Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Wird im Rahmen einer EGR-Maßnahme $CO_2$ im Untergrund gespeichert, besteht ein Restrisiko, dass das $CO_2$ aus der Speicherformation entweicht und in einen oberflächennahen Grundwasserleiter gelangt. Oberflächennahe Grundwässer dienen zur Trinkwassergewinnung und sind ein Schutzgut, das mithilfe eines Monitoring überwacht werden muss. Um ein effizientes Monitoring-Konzept entwickeln zu können muss evaluiert werden, wie sich gasförmiges und gelöstes $CO_2$ in einem Grundwasserleiter ausbreitet, welchen Einfluss das $CO_2$ auf die Geochemie des Grundwassers hat und welche geochemischen Parameter für ein Monitoring geeignet sind. Diese Aspekte wurden in der vorliegenden Arbeit anhand von numerischen Szenariosimulationen untersucht.

Für ein Monitoring stehen für unterschiedliche Zielparameter unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Auf der einen Seite gibt es geophysikalische Methoden, die flächendeckend eingesetzt werden können, wie z.B. Widerstandsmessungen des Untergrundes, die durch Hubschrauberüberfliegungen ermittelt werden können. Auf der anderen Seite können Untersuchungen geochemischer Parameter, mit denen die Qualität und Wasserzusammensetzung ermittelt werden können, nur punktuell über Beobachtungsbrunnen durchgeführt werden. Weiterhin sollte bei der Wahl einer Monitoringmethode unterschieden werden, ob die Gasphase oder das gelöste $CO_2$ detektiert werden soll. Um ein effizientes Monitoring für einen Standort entwickeln zu können, müssen die zur Verfügung stehenden Methoden miteinander kombiniert werden.

Mit den am Standort gewonnenen geochemischen Daten (Wasserchemie und Sedimentzusammensetzung) wurden 0D Gleichgewichtsimulationen erstellt. Diese zeigen, dass am CLEAN-Standort die TIC-Konzentration, die $Ca^{2+}$-Konzentration, die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert durch eine $CO_2$-Lösung im Grundwasser auch vor dem Hintergrund der natürlichen Schwankungen eine signifikante Änderung aufweisen. Daher sind diese Parameter für ein Monitoring am besten geeignet. Zu beachten ist, dass eine deutliche und schnelle Änderung der elektrischen Leitfähigkeit und der Kalziumkonzentrationen nur dann auftritt, wenn Kalzit im Aquifersediment vorhanden ist. Enthält das Sediment nur gering reaktive Minerale, also Minerale mit langsamer

Lösungskinetik wie z.B. Quarz oder Feldspäte, eigenen sich als Monitoringparameter am besten die TIC-Konzentration und der pH-Wert.

Die Szenariosimulationen zur Gasausbreitung, wurden auf der Grundlage der am Standort gewonnenen hydraulischen Parameter aufgebaut und modelliert. Gelangt gasförmiges $CO_2$ in einen gespannten, horizontal planaren, oberflächennahen Aquifer, steigt es bis zum hangenden Aquiferstauer auf und breitet sich horizontal darunter aus. Bei Leckageraten von $1{,}16*10^{-2}$ kg/s ergeben sich Gasphasenkörper mit einem Radius von 500 m, bei einer Leckagerate von $1{,}16*10^{-5}$ kg/s erreicht der Radius ca. 10 m. Die Mächtigkeit des $CO_2$-Gasphasenkörpers, der sich unterhalb des Grundwasserstauers bildet, ist dabei geringmächtiger als ein Meter. Mit der Zunahme der Leckagerate oder bei länger andauernden Leckagen nimmt die Größe des Phasenkörpers zu und damit wächst die Wahrscheinlichkeit, den Phasenkörper zu detektieren. Umso größer die Tiefe des Aquifers wird, in dem ein Monitoring durchgeführt wird, desto kleiner wird der gebildete $CO_2$-Gasphasenkörper, wohingegen das geochemische Signal stärker wird. Damit bietet sich unter Umständen ein geochemisches Detektionsverfahren für größere Tiefen an. Allerdings nimmt der technische Aufwand für ein Monitoring mit zunehmender Tiefe zu, da zum einen die Auflösung geophysikalischer Methoden geringer und zum anderen auch eine Beprobung mithilfe von Grundwassermessstellen sehr kostenintensiv und aufwändig wird.

Mithilfe eines Strömungsmodells des Untersuchungsgebiets und Felduntersuchungen am CLEAN-Standort konnten die hydraulischen Parameter ($K_f$-Werte, Strömungsgeschwindigkeiten) ermittelt und für die reaktive Transportmodellierung und die Mehrphasenströmungssimulationen als Eingabeparameter verwendet werden.

Bei den Simulationen, in denen die Mehrphasenströmung mit der Grundwasserströmung gekoppelt wurde, zeigt sich, dass der $CO_2$-Gasphasenkörper in Richtung der Grundwasserströmung gestreckt wird. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0.5m/d ist er nach einem Jahr ca. 200m² groß, die Fahne des gelösten $CO_2$ hat eine Fläche von ca. 30000m². Mit zunehmender Strömung wird zwar der Phasenkörper kleiner, aber die Fläche des gelösten $CO_2$ wächst an, sodass der von der $CO_2$-Leckage beeinflusste Bereich und damit die Wahrscheinlichkeit einer Detektion insgesamt zunimmt.

Um herauszufinden, welchen Einfluss die Grundwasserströmung auf die Größe eines $CO_2$ beeinflussten Bereichs hat, wurde auf Basis des Standort-Strömungsmodells ein konservatives Transportmodell erstellt. Im Vergleich zu den Mehrphasensimulationen hat sich gezeigt, dass die Ausbreitung des $CO_2$-Gasphasenkörpers einen wesentlichen Einfluss auf die Größe des von $CO_2$ beeinflussten Gebiets hat. Hat sich ein großer $CO_2$-Phasenkörper in einem Bereich des Aquifers gebildet, in dem die Grundwasserströmung niedrig ist, so wird der Transport des gelösten $CO_2$ nicht zu einem wesentlich größeren Bereich führen. Im Verhältnis dazu kann es bei ausreichend größerer

Strömungsgeschwindigkeit und einer Leckage mit einer geringen Leckagerate zu einem großen beeinflussten Bereich kommen.

Mit einem reaktiven Transportmodell wurde untersucht, welchen Einfluss der reaktive Transport auf die Ausbreitung und die Signalstärke der elektrischen Leitfähigkeit hat. Ist Kalzit in großen Mengen im Aquifer enthalten, ist eine elektrische Leitfähigkeit von bis zu 2.8 mS/cm zu messen. Sind nur geringe Mengen Kalzit in der Sedimentmatrix, so dass der Kalzit vollständig aufgelöst wird, nimmt in diesem Bereich das Signal der Leitfähigkeit wieder ab. In Bereichen der $CO_2$-Fahne, in denen noch Kalzit vorhanden ist, beträgt die elektrische Leitfähigkeit noch 2.8 mS/cm. Mit fortlaufender Zeit ist das Signal der elektrischen Leitfähigkeit nicht mehr mit der $CO_2$-Leckage verbunden. Im Bereich der Quelle sind dann lediglich die TIC-Konzentration und der pH-Wert als geochemische Monitoring-Parameter nutzbar.

Je tiefer die Lage eines Aquifers im Untergrund ist, desto kleiner wird der Gasphasenkörper. Bei einer Leckagerate von $1{,}16*10^{-4}$kg/s hat der Phasenkörper in einer Tiefe von 0m einen Radius von ca. 100m. In einer Tiefe von 400m beträgt der Radius lediglich 10m. Der Gasphasenkörper wird mit zunehmender Tiefe kleiner, da das $CO_2$ stärker im Wasser gelöst wird und der steigende Druck zu einer Komprimierung der Gasphase führt. Die Fahne des gelösten $CO_2$ wird jedoch größer und damit nimmt auch der vom $CO_2$ beeinflusste Bereich zu. Da mehr $CO_2$ im Wasser gelöst werden kann, nimmt das geochemische Signal des $CO_2$ im Wasser zu und führt in größeren Tiefen zu einer besseren Detektierbarkeit. Allerdings ist zu bedenken, dass mit zunehmender Aquifertiefe der technische Aufwand von Monitoring-Verfahren zunimmt.

Hat die Aquiferoberkante keinen oder nur einen geringen Gradienten, wird sich unter Umständen ein nur sehr geringmächtiger $CO_2$-Gasphasenkörper bilden, der mit geophysikalischen Methoden nur schwer detektierbar ist. Bei der Nutzung von Beobachtungspegeln zum Monitoring des Phasenkörpers sollte daher die Filterstrecke direkt unterhalb eines Grundwasserstauers angebracht werden. Da aber in einem natürlichen Aquifer die Aquiferoberkante nicht oder nur selten planar ist, und schon kleine Unebenheiten im Relief eine Ansammlung von gasförmigen $CO_2$ hervorrufen, sollten Beobachtungspegel möglichst dort installiert werden, wo sich Fallenstrukturen befinden, da dort die Wahrscheinlichkeit einer $CO_2$-Detektion steigt. Um für den CLEAN-Standort herauszufinden, wo sich das gasförmige $CO_2$ bevorzugt ausbreitet, wurde das Relief der Aquiferoberkante in die Geometrie eines 3D Mehrphasenströmungsmodell einbezogen. Dabei zeigt sich zum einen, dass sich $CO_2$Gasphasenkörper im südlichen Teil des Aquifers L4 in einer Fallenstruktur sammeln können und zum anderen, dass sich bei gleicher Leckagerate in den höher liegenden Bereichen des Aquifers größere Phasenkörper ausbilden.

Um in Zukunft genauere Aussagen über die Verteilung von gelöstem und gasförmigen $CO_2$ an einen bestimmten Standort machen zu können, sollten in Modellsimulationen idealerweise der Mehrphasentransport, die Grundwasserströmung, die geochemischen Reaktionen und die Geostruktur miteinander kombiniert werden. Zu diesem Punkt besteht allerdings noch weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Modellprogramme und ihrer Anwendbarkeit. Ein geeignetes Modell wäre für den CLEAN-Standort sehr komplex und bedarf einer hohen Rechenleistung, die ohne leistungsfähige Computer wie z.B. Großrechenanlagen nicht zu bewältigen wäre. Außerdem sollte die Datengrundlage für ein solches Szenario mithilfe weiterführender Untersuchungen im Gelände zusätzlich verbessert werden. So könnte die geologische Struktur des Standortes durch eine eingehende Evaluierung der Daten aus elektromagnetischen Untersuchungen detaillierter ermittelt werden. Ein entsprechend komplexes Modell könnte während einer Monitoringphase durch hinzugewonnene Daten kontinuierlich verbessert werden, um dann über Leckageszenarien eine Risikoabschätzung durchführen zu können. Weiterhin können komplexe Modelle, in denen geochemische Prozesse und die Mehrphasenströmung gekoppelt sind, dazu dienen, Messmethoden und Interventionsmaßnahmen zu testen.

# 7 Literatur:

Duan, Z., Sun, R., Zhu, C. and Chou, I.-M., 2006. An improved model for the calculation of $CO_2$ solubility in aqueous solutions containing $Na^+$, $K^+$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Cl^-$, and $SO_4^{2-}$. Marine Chemistry, 98(2-4): 131-139.

Birkholzer, J., Pruess, K., Lewicki, J., Rutqvist, J., Tsang, C.-F., and Karimjee, A., 2006, Large releases from $CO_2$ storage reservoirs: analogs, scenarios, and modelling needs., 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies: Trondheim, Norway.

Dobossy, M.E., Celia, M.A., and Nordbotten, J.M., 2011, An efficient software framework for performing industrial risk assessment of leakage for geplogical storage of $CO_2$: Energie Procedia, v. 4, p. 4207-4214.

Esposito, A., and Benson, S.M., 2011, Remediaton of possible leakgae from geologic $CO_2$ storage reservoirs into groundwater aquifers: Energy Procedia, v. 4, p. 3216-3223.

Grandel,S., Schäfer, D., Peter, A. Literaturarbeit zur Abschätzung von $CO_2$-Leckageraten anhand von Naturanaloga. Projekt Mopa

Gurevich, A.E., Endres, B.L., Robertson, J.O.J., and Chilingara, G.V., 1993, Gas migration from oil and gas fields and associated hazards: Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 9, p. 223-238.

Klusman, R.W., 2003a, Evaluation of leakage potential from a carbon dioxide EOR/sequestration project: Energy Conversion and Management, v. 44, p. 1921-1940.

Koide, H., Nishimura, S., Satsumi, S., Xue, Z., and Li, X., 2003, Carbon Sequestration in Coal Seams in Japan and Biogeochemical Carbon Cycle in Tertiary Sedimentary

Basins, *in* Gale, J., and Kaya, Y., eds., 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT6): Kyoto, Japan, Pergamon, p. 703-708.

Nordbotten, J.M., Celia, M.A., and Bachu, S., 2004, Analytical solutions for leakage rates through abandoned wells: Water Resources Research, v. 40, p. W04204.

Nordbotten, J.M., Kavetski, D., Celia, M.A., and Bachu, S., 2009, Model for $CO_2$ Leakage Including Multiple Geological Layers and Multiple Leaky Wells: Environmental Science & Technology, v. 43, p. 743-749.

Wilson, E.J., Friedmann, S.J., and Pollak, M.F., 2007, Research for Deployment: Incorporating Risk, Regulation, and Liability for Carbon Capture and Sequestration: Envion. Sci. Technol., v. 41, p. 5945-5952.

Xu, T., Sonnenthal, E., Spycher, N., and Pruess, K., 2006, TOUGHREACT-A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media: Applications to geothermal injectivity and $CO_2$ geological sequestration: Computers & Geosciences v. 32, p. 145-165.

Zhang, Y., Oldenburg, C.M., and Benson, S.M., 2004 Vadose Zone Remediation of Carbon Dioxide Leakage from Geologic Carbon Dioxide Sequestration Sites: Vadose Zone Journal, v. 3, p. 858-866.

Zheng, L., Apps, J.A., Zhang, Y., Xu, T., and Birkholzer, J., 2008, Reactive Transport Simulation to Study Groundwater Quality Changes in Response to $CO_2$ Leakage from Deep Geological Storage: Physics Procedia.

**Anlage 1: $K_f$-Werte sowie aus Vollaufschlüssen ermittelte Elementkonzentrationen und hieraus berechnete Mineralkonzentrationen. Auf Grundlage der in Klammern gesetzten Elemente erfolgte die Berechnung der jeweiligen Mineralkonzentration. (GM: Geschiebemergel, S: Sand, DS:Durchschnitt)**

| | | | | | | | | | | | | Orthoklas | Albit | Eisenhy-droxid | Anorthit | Kalzit | Kalzit |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Posi tion | Tiefe | Geologie | $K_f$-Wert | IC | OC | Ca | Fe | K | Mg | Mn | Na | $KAlSi_3O_8$ | $NaAlSi_3O_8$ | $Fe(OH)_3$ | $CaAl_2Si_2O_8$ | $CaCO_3$ | $CaCO_3$ |
| | | | | | | | | | | | | (K) | (Na) | (Fe) | (Ca) | (Ca) | (C) |
| | [mbs] | | [m/s] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] |
| B8 | 3-4 | GM | 3,4E-07 | 5,33 | 0,74 | 29,4 | 18,4 | 15,5 | 4,05 | 0,26 | 4,47 | 110,4 | 51,0 | 35,2 | 203,9 | 73,4 | 44,5 |
| B8 | 5-6 | GM | 6,9E-07 | 16,9 | 1,33 | 70,4 | 14,7 | 12,0 | 5,14 | 0,33 | 4,07 | 85,2 | 46,4 | 28,2 | 488,1 | 175,7 | 140,6 |
| B8 | 10-11 | GM | *1,0E-04* | 5,99 | 1,01 | 4,22 | 4,36 | 5,87 | 0,77 | 0,08 | 1,96 | 41,7 | 22,3 | 8,3 | 29,3 | 10,5 | 50,0 |
| B8 | 11-12 | S | 1,3E-04 | 0,51 | 0,28 | 1,79 | 2,89 | 4,92 | 0,48 | 0,06 | 1,42 | 35,0 | 16,2 | 5,5 | 12,4 | 4,5 | 4,3 |
| B8 | 16-17 | S | 8,3E-05 | 0,02 | 0,10 | 0,51 | 1,62 | 4,04 | 0,25 | 0,03 | 1,43 | 28,7 | 16,3 | 3,1 | 3,5 | 1,3 | 0,15 |
| B8 | 21-22 | S | 6,4E-05 | 0,02 | 0,43 | 0,53 | 1,67 | 4,24 | 0,20 | 0,03 | 1,56 | 30,2 | 17,8 | 3,2 | 3,6 | 1,3 | 0,13 |
| B11 | 2-4 | S | 5,8E-05 | 0,01 | 1,58 | 1,47 | 7,95 | 6,83 | 0,59 | 0,10 | 2,25 | 48,6 | 25,6 | 15,2 | 10,2 | 3,7 | 0,04 |
| B11 | 4-6 | GM | 1,4E-06 | 0,18 | 4,72 | 4,19 | 15,0 | 8,46 | 1,95 | 0,13 | 2,25 | 60,2 | 25,6 | 28,7 | 29,0 | 10,5 | 1,51 |
| B11 | 8-10 | S | 5,4E-05 | 0,51 | 3,66 | 3,64 | 7,59 | 7,39 | 0,82 | 0,10 | 2,07 | 52,6 | 23,6 | 14,5 | 25,3 | 9,1 | 4,28 |
| B11 | 12-14 | S | 6,5E-04 | 0,01 | 10,4 | 1,20 | 3,04 | 3,13 | 0,23 | 0,02 | 0,91 | 22,3 | 10,3 | 5,8 | 8,3 | 3,0 | 0,06 |
| B11 | 19-20 | S | 6,1E-04 | 0,01 | 1,42 | 0,91 | 3,17 | 4,29 | 0,25 | 0,06 | 1,65 | 30,5 | 18,8 | 6,1 | 6,3 | 2,3 | 0,09 |
| B11 | 25-26 | S | 6,1E-05 | 0,01 | 0,91 | 0,63 | 2,88 | 3,28 | 0,17 | 0,06 | 1,25 | 23,3 | 14,2 | 5,5 | 4,4 | 1,6 | 0,06 |
| B11 | 33-34 | S | 2,2E-04 | 0,01 | 0,35 | 0,00 | 1,41 | 2,60 | 0,10 | 0,01 | 0,17 | 18,5 | 1,9 | 2,7 | 0,0 | 0,0 | 0,06 |
| B11 | 39-40 | S | 1,0E-04 | 0,01 | 9,72 | 0,43 | 1,97 | 4,14 | 0,09 | 0,01 | 0,31 | 29,4 | 3,6 | 3,8 | 3,0 | 1,1 | 0,07 |
| B11 | 45-46 | S | 6,4E-05 | 0,01 | 10,3 | 0,75 | 3,64 | 5,03 | 0,34 | 0,03 | 0,33 | 35,8 | 3,7 | 7,0 | 5,2 | 1,9 | 0,07 |
| | | | | | | | | | | | | Orthoklas | Albit | Eisenhy-droxid | Anorthit | Kalzit | Kalzit |

| Position | Tiefe | Geologie | $K_f$-Wert | IC | OC | Ca | Fe | K | Mg | Mn | Na | $KAlSi_3O_8$ | $NaAlSi_3O_8$ | $Fe(OH)_3$ | $CaAl_2Si_2O_8$ | $CaCO_3$ | $CaCO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | GM (max) | 1,4E-06 | 16,9 | 4,72 | 70,4 | 18,4 | 15,5 | 5,14 | 0,33 | 4,47 | 110,41 | 50,96 | 35,24 | 488,06 | 175,7 | 140,60 |
| | | GM (DS) | 8,1E-07 | 7,09 | 1,95 | 27,1 | 13,1 | 10,5 | 2,98 | 0,20 | 3,19 | 74,39 | 36,31 | 25,10 | 187,57 | 67,51 | 59,14 |
| | | S (min) | 5,4E-05 | 0,01 | 0,10 | 0,00 | 1,41 | 2,60 | 0,09 | 0,01 | 0,17 | 18,49 | 1,91 | 2,70 | 0,00 | 0,00 | 0,04 |
| | | S (max) | 6,5E-04 | 0,51 | 10,4 | 3,64 | 7,95 | 7,39 | 0,82 | 0,10 | 2,25 | 52,56 | 25,64 | 15,22 | 25,25 | 9,09 | 4,30 |
| | | S (DS) | 2,0E-04 | 0,11 | 3,76 | 1,04 | 2,99 | 4,31 | 0,29 | 0,04 | 1,11 | 30,63 | 12,64 | 5,72 | 7,20 | 2,59 | 0,93 |