

---

**FELD-KALIBRIERUNG  
GEOPHYSIKALISCHER DATEN  
AUF KONTAMINIERTEN FLÄCHEN  
MIT HILFE DES GIS-GESTÜTZTEN  
VISUALISIERUNGSWERKZEUGS GSI3D**

---

INAUGURAL-DISSERTATION  
ZUR  
ERLANGUNG DES DOKTORGRADES  
DER MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT  
DER UNIVERSITÄT ZU KÖLN

VORGELEGT VON  
**MARKUS PERK**  
AUS BOCHUM

KÖLN 2007

Berichterstatter:

Prof. Dr. B. Tezkan

Prof. Dr. em. W. Boenigk

Tag der mündlichen Prüfung: 2. März 2007

---

## Kurzzusammenfassung

---

Der Einsatz geophysikalischer Verfahren zur Untersuchung von Altlasten hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Durch Kombination verschiedener Verfahren einerseits und verschiedener Geo-Wissenschaften andererseits können solche Untersuchungen in ihrer Effizienz jedoch deutlich erhöht und Kosten drastisch reduziert werden. Zu diesem Zwecke wurde das EU-Altlastprojekt NORISC ('Network Oriented Risc assessment with In-situ Screening of Contaminated sites') ins Leben gerufen.

In den Jahren 2001 bis 2003 wurde unter der Federführung der Stadt Köln (Europabüro und Umweltamt) ein mehrteiliges Software-Paket entwickelt, welches sowohl Gutachtern im Feld als auch Umweltämtern und Ingenieurbüros zu Gute kommen soll. Dieses Paket enthält u.a. ein Werkzeug zur optimalen Methodenauswahl (DSS 'Decision Support System') und ein 3D-Visualisierungswerkzeug ('GSI3D') zur Darstellung aller gemessenen Parameter im Feld.

Dieses Visualisierungswerkzeug wurde im Rahmen dieser Arbeit mit der Möglichkeit zur digitalen Bearbeitung geophysikalischer Daten (Inversion, Darstellung von Modellen und Rohdaten, Erstellung von Startmodellen) innerhalb des GIS Programms versehen, welches während der Projektphase noch nicht möglich war. So können nun geoelektrische und radio-magnetotellurische Daten mit geologischen und chemischen Informationen kalibriert werden, um dadurch ein genaueres Untergrundbild vor Ort zu erhalten. Weiterhin wurden Routinen zur Darstellung von 1D-, 2D- und 3D-Datensätzen implementiert, welche die Möglichkeiten der Visualisierung und Kalibration geophysikalischer Daten erweitern.

Die während des Projekts gesammelten Daten wurden nach Abschluss der Erweiterung des GIS-Programms neu bearbeitet, um die Effizienz der eingebauten Module zu testen und zu verifizieren.



---

## Abstract

---

The usage of geophysics for waste site investigations has drastically increased during the last recent years. By combining different geophysical methods on the one hand and different geosciences on the other, a large increase in efficiency and a reduction of costs is possible. For this reason, the EU waste site project NORISC ('Network Oriented Risc assessment with In-situ Screening of Contaminated sites') was planned.

In the years 2001 to 2003, several software modules have been developed under the lead of the Office of European Affairs and the Environmental Office of the City of Cologne. These modules are sought to be used by consultants as well as by environmental offices, containing tools for getting an optimal mix of methods (DSS: Decision Support System) and a 3D visualisation tool ('GSI3D') for displaying all measured data in the field.

This visualisation tool was extended with the possibility to edit geophysical data digitally within the GIS program (i.e. executing inversions, displaying models and raw data, creation of starting models) because during the project only images / pictures could be used. Now, resistivity and radiomagnetotelluric data can be directly calibrated with geological and chemical information to get a more accurate subsurface image of the underground in the field. Further, routines for displaying 1D-, 2D- and 3D-data were implemented to extend the possibilities of visualisation and calibration.

To test and to verify the newly integrated modules, the NORISC data was reinterpreted and is presented in this thesis.



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Altlasten . . . . .	2
1.1.1	Altlastproblematik . . . . .	2
1.1.2	Gefährdungspotential durch Altlasten . . . . .	4
1.1.3	Geophysikalische Erkundung von Altlasten . . . . .	5
1.1.4	Ziele des NORISC-Projektes . . . . .	6
1.2	Ziele der Arbeit . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Geoelektrik und der Radiomagnetotellurik</b>	<b>9</b>
2.1	Einführung in die Geoelektrik . . . . .	10
2.1.1	Multielektroden-Geoelektrik und Pseudosektionen . . . . .	15
2.1.2	Geometriefaktoren und Abschätzungen für die Eindringtiefe . . . . .	17
2.2	Grundlagen der Radiomagnetotellurik . . . . .	18
2.2.1	Ableitung der Differentialgleichungen für die Elektromagnetik . . . . .	19
2.2.2	Scheinbarer Widerstand, Phase und Impedanztensor . . . . .	22
2.3	Inversionsverfahren . . . . .	23
2.3.1	Das Gauß-Newton Verfahren und nicht-lineare, konjugierte Gradienten	24
2.3.2	Das nicht-lineare konjugierte Gradienten Verfahren . . . . .	26
2.3.3	Regularisierungsparameter und Glättung . . . . .	27

2.4	Auflösungsvermögen der Radiomagnetotellurik und Geoelektrik . . . . .	29
2.4.1	Abschätzungen für die Eindringtiefe . . . . .	30
2.4.2	Erkundungstiefenindex . . . . .	31
2.4.3	Sensitivitäten und Überdeckung . . . . .	32
2.4.4	Auflösungsmatrix . . . . .	33
2.4.5	Gitter-Diskretisierung . . . . .	34
2.4.6	Übersicht über die Widerstandsverteilungen im Boden . . . . .	35
2.5	Kohlenwasserstoff-Problematik in der Geophysik . . . . .	36
2.6	Kurze Erläuterungen zu den Verfahren EM61, EM31, EM34 und zu magnetischen Messungen . . . . .	40
2.6.1	EM61 (Metalldetektor) . . . . .	41
2.6.2	EM31 und EM34 . . . . .	42
2.6.3	Kurze Einführung in die Magnetik . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Das EU-Altlastenprojekt NORISC</b>	<b>47</b>
3.1	Was ist NORISC . . . . .	47
3.2	DSS: Decision Support System . . . . .	51
3.3	Kontaminationsprofile . . . . .	52
3.4	Untersuchungsmethoden . . . . .	53
3.5	Funktionen der DSS . . . . .	55
3.6	GSI3D . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Testflächen</b>	<b>61</b>
4.1	NORISC-Testflächen . . . . .	61
4.2	Testfläche Köln . . . . .	64
4.2.1	Geologie des Messgebietes . . . . .	64
4.2.2	Ehemalige Nutzung . . . . .	65
4.2.3	DSS-Ergebnis . . . . .	66
4.2.4	Widerstands-Geoelektrik . . . . .	71
4.2.5	Fazit . . . . .	78
4.3	Testfläche Massa . . . . .	80
4.3.1	Geologie und Hydrogeologie des Messgebietes . . . . .	80

---

4.3.2	Ehemalige Nutzung . . . . .	82
4.3.3	DSS-Ergebnis . . . . .	82
4.3.4	Synthetische Modellierungen . . . . .	84
4.3.5	Widerstands-Geoelektrik . . . . .	87
4.3.6	Schwermetalle . . . . .	93
4.3.7	Fazit Testfläche Italien . . . . .	96
4.4	Testfläche Ungarn . . . . .	97
4.4.1	Geologie des Messgebietes . . . . .	97
4.4.2	Ehemalige Nutzung . . . . .	98
4.4.3	DSS-Ergebnis . . . . .	99
4.4.4	Widerstands-Geoelektrik . . . . .	102
4.4.5	RMT . . . . .	108
4.4.6	Vergleich Direct-Push , RMT und Widerstandsgeoelektrik . . . . .	110
4.4.7	Fazit Testfläche Ungarn . . . . .	111
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>117</b>
5.1	Ausblick . . . . .	120
<b>A</b>	<b>Ergebnisse der Testfläche Köln</b>	<b>129</b>
<b>B</b>	<b>Ergebnisse der Testfläche Massa / Italien</b>	<b>135</b>
<b>C</b>	<b>Ergebnisse der Testfläche Balassagyarmat/Ungarn</b>	<b>141</b>
	<b>Geophysikalische Module im GSI3D</b>	<b>161</b>
<b>D</b>	<b>Das DSS-Modul</b>	<b>213</b>
	<b>Liste der Symbole</b>	<b>219</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>221</b>
	<b>Erklärung</b>	<b>223</b>



---

## Abbildungsverzeichnis

---

2.1	Potentialverteilung im Untergrund . . . . .	14
2.2	Vierpunkt-Anordnung in der Geoelektrik . . . . .	15
2.3	Messung mit einer Multielektroden-Geoelektrik nach <i>Knödel et al.</i> [1997]. Jeder Messung wird ein Mittelpunkt und eine Tiefe zugeordnet, sodass eine sogenannte Pseudosektion entsteht. . . . .	16
2.4	Beispiel für eine Pseudosektion aus dem Programm von <i>Günther</i> [2004]. Der gemessene scheinbare Widerstand ist in Abhängigkeit von $x$ und der jeweiligen Elektroden-Konfiguration dargestellt. Beispiel: 'sl2-8': 'sl': Schlumberger-Konfiguration; 2: doppelter Potentialelektrodenabstand (entspricht 'a' in Abb. 2.5c); 8: Abstand zwischen Strom- und Potentialelektrode (entspricht 'n' in Abb.2.5c). Umgerechnet auf den einfachen Elektrodenabstand beträgt der Abstand zwischen Strom- und Potentialelektrode hier $n*a = 8*2 = 16$ . Bereiche ohne Daten sind weiß. . . . .	16
2.5	Verschiedene Elektrodenkonfigurationen; A, B: Stromelektroden; M, N: Potentialelektroden. Die Konfigurationen a) - c) sind für Multielektrodenmessungen gebräuchlich. . . . .	17
2.6	Schematische Darstellung einer einfachen zweidimensionalen Problemstellung für die RMT nach <i>Recher</i> [1998]. . . . .	20
2.7	Beziehung zwischen Datennorm und Modellnorm für einen synthetischen RMT-Datensatz. In diesem Fall stellt $\lambda \approx 5$ in etwa den optimalen Regularisierungsparameter dar. . . . .	29
2.8	Schematische Darstellung a) der Sensitivität und b) der Überdeckung für eine Vierpunkt-Auslage, wie sie das Programm <i>DC2DInvRes</i> von <i>Günther</i> [2004] verwendet. . . . .	32

2.9	LNAPL- und DNAPL-Verteilung im Untergrund . . . . .	38
3.1	Aktion und Fortschritt in NORISC . . . . .	49
3.2	Hierarchie einer NORISC-Untersuchung . . . . .	50
3.3	DSS-Modul: geologisch-geophysikalische Flächencharakterisierung . . . . .	57
3.4	GSI3D: Bildschirmfoto des GSI3D . . . . .	59
4.1	Synthetische Bohrung als Legendenvorgabe . . . . .	63
4.2	Foto der Kölner Testfläche . . . . .	65
4.3	Schematische Übersicht der geophysikalischen Profile . . . . .	68
4.4	GSI3D Köln: 2D- und 3D-Ansicht für Widerstands- und EM61-Ergebnisse . . . . .	69
4.5	1D-Widerstandsmodell an der Bohrung D18 . . . . .	70
4.6	Testfläche Köln: Profile nor05 (a), nor10 (b) und nor32 (c) mit darauf projizierten Bohrungen. . . . .	72
4.7	Testfläche Köln: Vergleich Bohrungen - 1D-Widerstandsverteilungen Profil nor05. . . . .	73
4.8	Testfläche Köln: Startmodell Profil nor05 . . . . .	74
4.9	Testfläche Köln: Endmodell Profile nor05, nor10 und nor32 . . . . .	75
4.10	Testfläche Köln: horizontal verteilte Widerstände für Profil nor10 . . . . .	76
4.11	Testfläche Köln: Rohdaten des Profils nor10 . . . . .	77
4.12	Testfläche Köln: horizontal verteilte Widerstände für Profil nor10 . . . . .	78
4.13	Testfläche Massa: Tiefbohrung P4 . . . . .	81
4.14	Testfläche Massa: Foto . . . . .	83
4.15	Testfläche Massa: geophysikalisches Raster . . . . .	85
4.16	Testfläche Massa: Vergleich EM31 und Widerstandsgeoelektrik . . . . .	86
4.17	Testfläche Massa: Vergleich Profil 1 - synthetische Modellierung . . . . .	87
4.18	Testfläche Massa: Profil 1 mit darauf projizierten Bohrungen . . . . .	88
4.19	Testfläche Massa: Vergleich zwischen Bohrung B1 und 1D-Widerstandsergebnissen . . . . .	89
4.20	Testfläche Massa: Aus 1D-Inversionsergebnissen erstelltes Widerstandsmodell für das Profil P1 . . . . .	90
4.21	Testfläche Massa: Ergebnis nach Startmodell . . . . .	91
4.22	Testfläche Massa: Einfluss des Metallrohres auf Rohdaten . . . . .	92
4.23	Testfläche Massa: Inversionsergebnis nach Datenreduzierung . . . . .	93

4.24	Testfläche Massa: Vergleich von Oberflächenwiderständen mit Arsen-Konzentrationen	95
4.25	Testfläche Ungarn: drei Tiefbohrungen . . . . .	98
4.26	Testfläche Ungarn: Übersicht des Kernuntersuchungsgeländes . . . . .	99
4.27	Testfläche Ungarn: schematische Ansicht der geophysikalischen Messraster .	101
4.28	Testfläche Ungarn: Georeferenzierte Ansicht einiger Widerstandsprofile der ungarischen Testfläche . . . . .	103
4.29	Testfläche Ungarn: Scattering-Effekt aufgrund von schlechter Elektrodenan- kopplung . . . . .	104
4.30	Testfläche Ungarn: Profil I04 nach der Datenreduzierung . . . . .	105
4.31	Testfläche Ungarn: Profil O10 nach der Datenreduzierung . . . . .	107
4.32	Testfläche Ungarn: 3D-Ansicht aller reinterpretierten Geoelektrik-Profile . . .	108
4.33	Testfläche Ungarn: RMT-Rohdaten-Ansicht im GSI3D . . . . .	113
4.34	Testfläche Ungarn: Inversionsergebnis RMT-Profil 1 . . . . .	114
4.35	Testfläche Ungarn: Inversionsergebnis RMT-Profil 1 . . . . .	114
4.36	Testfläche Ungarn: Positionen aller Profile, Bohrungen und Sondierungen . .	115
4.37	Testfläche Ungarn: Projektion von Profil RMT1 auf Geoelektrik-Profil I04 . .	116
4.38	Testfläche Ungarn: Vergleich von Direct-Push-Messung DP220 mit entsprechen- den Sektionen der Geoelektrik-Profile I07 und O06 und der RMT-Profile RMT4 und RMT6. . . . .	116
A.1	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nor00 . . . . .	131
A.2	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nor05 . . . . .	131
A.3	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nor10 . . . . .	131
A.4	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nor20 . . . . .	132
A.5	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nor32 . . . . .	132
A.6	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nor43 . . . . .	132
A.7	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nor50 . . . . .	133
A.8	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nor60 . . . . .	133
A.9	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nor70 . . . . .	133
A.10	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nq30 . . . . .	134
A.11	Testfläche Köln: Finales Widerstandsmodell nq70 . . . . .	134
A.12	Testfläche Köln: Referenzprofil nott0 . . . . .	134

B.1	Testfläche Massa: Widerstandsprofil P1 . . . . .	137
B.2	Testfläche Massa: Widerstandsprofil P2 . . . . .	137
B.3	Testfläche Massa: Widerstandsprofil P3 . . . . .	138
B.4	Testfläche Massa: Widerstandsprofil P4 . . . . .	138
B.5	Testfläche Massa: Widerstandsprofil P5 . . . . .	139
C.1	Testfläche Ungarn: Lage aller Profile, Sondierungen und Bohrungen . . . . .	141
C.2	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil I03 . . . . .	142
C.3	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil I04 . . . . .	143
C.4	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil I05 . . . . .	143
C.5	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil I07 . . . . .	143
C.6	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil I08 . . . . .	144
C.7	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil I11 . . . . .	144
C.8	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil O02 . . . . .	144
C.9	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil O03 . . . . .	145
C.10	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil O06 . . . . .	145
C.11	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil O07 . . . . .	146
C.12	Testfläche Ungarn: Geoelektrik-Profil O10 . . . . .	146
C.13	Testfläche Ungarn: RMT-Profil RMT1 . . . . .	148
C.14	Testfläche Ungarn: RMT-Profil RMT2 . . . . .	148
C.15	Testfläche Ungarn: RMT-Profil RMT3 . . . . .	149
C.16	Testfläche Ungarn: RMT-Profil RMT4 . . . . .	149
C.17	Testfläche Ungarn: RMT-Profil RMT5 . . . . .	150
C.18	Testfläche Ungarn: RMT-Profil RMT6 . . . . .	150
C.19	Testfläche Ungarn: Synthetische Modellierung 1 . . . . .	151
C.20	Testfläche Ungarn: Synthetische Modellierung 2 . . . . .	152
C.21	Testfläche Ungarn: Synthetische Modellierung 3 . . . . .	152
C.22	Testfläche Ungarn: Synthetische Modellierung 4 . . . . .	153
C.23	Testfläche Ungarn: Synthetische Modellierung 5 . . . . .	153
C.24	Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 216 . . . . .	155
C.25	Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 217 . . . . .	155

C.26 Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 218 . . . . .	156
C.27 Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 219 . . . . .	156
C.28 Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 220 . . . . .	157
C.29 Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 222 . . . . .	157
C.30 Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 226 . . . . .	158
C.31 Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 228 . . . . .	158
C.32 Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 230 . . . . .	159
C.33 Testfläche Ungarn: Direct-Push-Sondierung 232 . . . . .	159
C.34 GSI3D: Anzeige der Module . . . . .	162
C.35 Res2DInvDialog . . . . .	164
C.36 Colorbox . . . . .	167
C.37 Bohrlochprofil-Layout-Einstellungen . . . . .	167
C.38 DC2DInvRes-Dialog . . . . .	168
C.39 RMT-Dialog . . . . .	170
C.40 SEG-Y-Dialogfenster . . . . .	173
C.41 RMT-Rohdaten-Dialog: Scheinbarer Widerstand . . . . .	176
C.42 RMT-Rohdaten-Dialog: Phase . . . . .	176
C.43 RMT-Rohdaten-Dialog: $\rho^* - z^*$ . . . . .	177
C.44 RMT-Rohdaten-Dialog: Pseudosektion . . . . .	177
C.45 DC-Rohdaten-Dialog: $Rho_a$ vs $AB/2$ . . . . .	178
C.46 1D-Widerstände aus Datenbank einlesen . . . . .	181
C.47 1D-Widerstände in horizontaler Ansicht und im Bohrprofilfenster . . . . .	181
C.48 Eigenschafts-Dialog für 1D-Widerstände . . . . .	182
C.49 2D-Widerstände aus Datenbank einlesen . . . . .	184
C.50 RMT - Profil aus Datenbank einlesen . . . . .	186
C.51 DC3DInvRes-Dialog . . . . .	188
C.52 DC2DInvRes-Startmodell-Dialog . . . . .	190
C.53 RMT-Startmodell-Dialog . . . . .	192
C.54 DC2DInvRes-Inversion-Dialog . . . . .	194
C.55 RMT-Inversion-Dialog . . . . .	197
C.56 Emuplus-Modul 'Input-Sektion' . . . . .	200

---

C.57 Emuplus-Modul: 'EarthModel-Sektion' . . . . .	201
C.58 Emuplus-Modul: 'Inversionsalgorithmus' . . . . .	201
C.59 Emuplus-Modul: Marquardt-Inversionsparameter . . . . .	202
C.60 Emuplus-Modul: Marquardt-Inversionsparameter . . . . .	204
C.61 Emuplus-Modul: Marquardt-Inversionsstatistik . . . . .	204
C.62 Emuplus-Modul: Transmitterangaben . . . . .	206
C.63 Emuplus-Modul: Optionen für den Kalibrationsfaktor . . . . .	207
C.64 Emuplus-Modul: Optionen für den Kalibrationsfaktor . . . . .	208
C.65 Erstellen von Schnitten . . . . .	209
C.66 Dialog-Fenster für vertikale Schnitte . . . . .	210
C.67 Dialog-Fenster für horizontale Schnitte . . . . .	211
C.68 Einlesen von Schnitten aus Datenbank . . . . .	211
D.1 Übersicht über das NORISC-Software-Paket . . . . .	213
D.2 DSS-Modul: allgemeine Angaben . . . . .	214
D.3 DSS-Modul: geochemische Flächencharakterisierung . . . . .	215
D.4 DSS-Modul: geologisch-geophysikalische Flächencharakterisierung . . . . .	216
D.5 DSS-Modul: Einschränkungen für Untersuchungsmethoden . . . . .	216
D.6 DSS-Modul: Ausschnitt aus einem DSS-Ergebnis; Übersicht über die optimalen chemischen und nicht-chemischen Methodenkombination, inkl. Zeit- und Kostenabschätzung . . . . .	217

---

## Tabellenverzeichnis

---

2.1	Geometriefaktoren und Abschätzung der Eindringtiefe für die verwendeten Auslagen nach <i>Knödel et al.</i> [1997]. . . . .	18
2.2	Spezifischen Widerstände für einige Lockersedimente, organogene und anthropogene Ablagerungen, Festgestein und Wasser nach <i>Knödel et al.</i> [1997].	35
2.3	Übersicht über die 10 häufigsten organischen chemischen Kontaminanten ( <i>Plumb and Pitchford</i> [1985]). Die spezifische Schwere ist in $g/cm^3$ angegeben, <i>sol</i> ist die wässrige Löslichkeit in Gewichtsprozent, <i>vap</i> ist der Dampfdruck in kiloPascal, $\epsilon_r$ ist die dielektrische Permittivität relativ zum leeren Raum und $\log R$ ist der 10-er Logarithmus des elektrischen Widerstandes. . .	37
2.4	Erfahrungswerte für Messungen von metallischen Objekten und Störkörpern nach <i>Illich</i> [1997]. . . . .	41
2.5	Leistungsübersicht der Geräte EM31 und EM34 nach <i>Kolodziey</i> [1997]. . . .	42
2.6	Wertebereich der magnetischen Suszeptibilität $\kappa$ für einige Gesteine und Depositionsmaterial (nach <i>Schön</i> [1983] und <i>Jäger</i> [1994]). Einheit in $10^{-6}$ SI. . . .	45
3.1	Auszug aus den chemischen Kontaminationsprofilen. . . . .	52
3.2	Auszug aus dem chemischen Ranking im DSS. A: am besten geeignet, D: überhaupt nicht geeignet. . . . .	54
3.3	Auszug aus dem (hydro-)geologischen-geophysikalischen Ranking im DSS. A: am besten geeignet, D: überhaupt nicht geeignet . . . . .	55
3.4	Auszug aus den Einschränkungen für (hydro-)geologische und geophysikalische Methoden. Dabei bedeutet A den geringsten Einfluss und D den größten Einfluss auf eine Messmethode. . . . .	56

---

4.1	Übersicht der in NORISC untersuchten Testflächen . . . . .	62
4.2	Gemittelte Schichtenabfolge im Bereich der Kölner NORISC-Testfläche. . . . .	65
4.3	Historie der Kölner Testfläche. . . . .	66
4.4	Übersicht über die von der DSS vorgeschlagenen Methoden für die Kölner Testfläche. . . . .	66
4.5	Historie der Testfläche Massa. . . . .	82
4.6	Übersicht über die von der DSS vorgeschlagenen Methoden für die italienische Testfläche. . . . .	83
4.7	Maximale Schwermetall-Konzentrationen auf der Testfläche in Italien. . . . .	94
4.8	Laut Beobachtungsbrunnen gemittelte Schichtenabfolge im Umfeld der ungarischen NORISC-Testfläche. . . . .	98
4.9	Übersicht über die von der DSS vorgeschlagenen Methoden für die ungarische Testfläche. . . . .	100
C.1	Entfernung der Geoelektrik- und RMT-Profile zu Direct-Push-Sondierungen . . . . .	154

---

## EINLEITUNG

---

Der Einsatz geophysikalischer Methoden zur Untersuchung von Altlasten hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Durch die gestiegenen Ansprüche bzgl. effizienter Erkundungs- und Untersuchungsmethoden für kontaminierte Böden wurden große Anstrengungen in der Angewandten Geophysik unternommen, Methoden, Algorithmen und Geräte für eine schnelle und effiziente Untersuchung des Untergrundes zu entwickeln. Die Notwendigkeit solcher Forschungen wird durch die Vielzahl von geförderten Forschungsprojekten und Aktionsprogrammen verdeutlicht (z.B. *US EPA* [1993], *Woll et al.* [2003]).

Die vorliegende Arbeit stellt das EU-Altlastprojekt NORISC ('Network Oriented Risc assessment with In-situ Screening of Contaminated sites') und eines seiner Softwaremodule, das Visualisierungswerkzeug GIS3D ('Geological Surveying and Investigation in 3D'), (*Nerber* [2005]) vor. Das Interesse dieses Altlastprojektes an einer interdisziplinären Zusammenarbeit bei Altlastuntersuchungen, dessen Motivation und Ziele und zwei der verwendeten geophysikalischen Methoden (die RMT-Methode und die Gleichstrom-Geoelektrik) werden auf den nachfolgenden Seiten erläutert.

Die RMT-Methode und die Gleichstrom-Geoelektrik haben sich in den Forschungsarbeiten am Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität Köln als erfolgreiche Verfahren im Bereich der Umwelt- und Ingenieur-Geophysik etabliert (z.B. *Recher* [1998], *Mackendanz* [2005]). Bei den bisherigen Arbeiten wurden jedoch die Auswertungen dieser Verfahren meist separat und nicht in einem interdisziplinärem Hintergrund durchgeführt, wie es in dieser Arbeit geschieht.

Nach einer einführenden Betrachtung der theoretischen Grundlagen für die RMT-Methode und Gleichstrom-Geoelektrik in Kapitel 2, wird in Kapitel 3 das NORISC-Projekt und zwei seiner Softwaremodule erläutert. Zum einen sind dies ein sogenanntes Entscheidungshilfe-Werkzeug ('Decision Support Software', DSS) und zum anderen das Visualisierungswerk-

zeug *GSI3D*.

Die Reinterpretationen der Testflächen des NORISC-Projektes mit Hilfe des Visualisierungswerkzeugs *GSI3D* werden im Kapitel 4 beschrieben. Dort werden unter Zuhilfenahme von Bodenproben Einflüsse von Geologie und chemischen Kontaminanten durch Kalibration der Widerstandsmodelle untersucht und im Rahmen der Reinterpretation Modellierungen durchgeführt.

Die Arbeit endet mit Kapitel 5 in einer Zusammenfassung der Ergebnisse und gibt einen Ausblick über sinnvolle Erweiterungen geophysikalischer Module innerhalb des Programms *GSI3D*.

## 1.1 Altlasten

### 1.1.1 Altlastproblematik

Während vieler Jahre hat sich die Gesellschaft wenig Gedanken über die Güter des täglichen Lebens und deren Entsorgung gemacht. Technische Neuerungen sind schnell veraltet. Sie werden schnell konsumiert ('Fast Food Gesellschaft') und werden daher auch schnell wieder weggeworfen und in den Müll entsorgt, welcher dann auf Deponien wie Kies- und Sandgruben endgelagert wird.

Während bei Mülldeponien meist einfach nur durch Hinzufügen einer Abdeckschicht und einer Wiederbegrünung ein Gefühl der Sicherheit erzeugt wurde, lagen Industriegelände bei zu hohen Sanierungskosten einfach brach. Die Konsequenzen solchen Verhaltens waren, dass so mögliche Schadstoffe in den Untergrund und in das Grundwasser eindringen und letztendlich so über den Nährstoffkreislauf in den Menschen gelangen konnten.

Ein erster Schritt zur Bekämpfung dieser Folgen war die Einführung des Bundesabfallbeseitigungsgesetzes im Jahr 1972, mit Reglementierungen zur Abfall- und Entsorgungsproblematik (Eberle [1989]). Anfang der 80'er Jahre erkennt die Gesellschaft, dass man sich auch mit den Hinterlassenschaften früherer Generationen beschäftigen muss. Durch diese Auseinandersetzung mit diesem Thema wandelt sich auch der Begriff der 'Altlasten'. Während Ende der 70'er Jahre unter einer Altlast noch eine umweltgefährdende Fläche verstanden wurde, so erweitert sich der Begriff auch auf die Altstandorte.

Trotz der bis heute nicht ganz einheitlichen Terminologie der Begriffe Altstandorte, Altablagerungen und Altlasten, kann man diese wie folgt definieren:

1. **Altablagerungen:** Altablagerungen werden nach der Informationsschrift der Landerarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA [1983]) als 'verlassene oder stillgelegte Ablagerungsplätze kommunaler oder gewerblicher Abfälle, Verfüllungen mit Bauschutt oder Produktionsrückständen sowie wilde Ablagerungen jeglicher Art' bezeichnet.
2. **Altstandorte:** Zu Altstandorten zählt man stillgelegte Industrieanlagen, in denen umweltgefährdende Stoffe gelagert, verarbeitet oder produziert worden sind. Beispiele

dafür sind die chemische Industrie, der Bergbau oder Metallhütten. Eine nach Branchen unterteilte Liste finden sich beispielsweise bei Mayer [1989].

3. **Altlasten:** Die Altlast wird bei Eberle [1989] einem kontaminierten Standort gleichgesetzt, wobei das Vorhandensein umweltgefährdender Stoffe ausreicht. Eine Unterscheidung zwischen Deponien oder Werksgeländen gibt es dabei aber nicht. Der *Rat der Sachverständigen für Umweltfragen* [1989] definiert diesen Begriff wie folgt: 'Altlasten sind Altablagerungen und Altstandorte, sofern von ihnen Gefährdungen für die Umwelt, insbesondere für die menschliche Gesundheit, ausgehen oder zu erwarten sind.'

Die Untersuchung von Altlastverdachtsflächen unterliegt den einzelnen Bundesländern, wodurch es keine bundeseinheitliche Regelung in der Vorgehensweise der Altlasterkundung gibt. Eberle [1989] zeigt eine nach Bundesländern geordnete Zusammenstellung bzgl. des Erfassungsstandes von Altlasten und Altlastverdachtsflächen.

Gefährdungspotentiale für das Bundesland Nordrheinwestfalen bilden insbesondere Areale des Bergbaus und der ehemaligen Stahlindustrie. Im Umwelt-Bericht 2000 (*Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen* [2000]) wird die Vorgehensweise bei Altlasterkundungen dokumentiert. Durch katasterhafte Erfassung aller altlastverdächtigen Flächen soll eine Ermittlung von Lage und räumlicher Ausdehnung der Verdachtsflächen auf Grundlage von Archivunterlagen, Besichtigungen und das Sammeln von relevanten Informationen vollzogen werden. In diesem Stadium werden aber noch keine weitergehenden Untersuchungen in Form von Bohrungen, Sondierungen oder physio-chemischen Untersuchungen durchgeführt. Diese sind erst in der Gefährdungsabschätzung und in der Sanierungsplanung vorgesehen. Auf Grundlage dieser Daten wird dann entschieden, ob zum Beispiel sofortige Maßnahmen ergriffen werden oder weiter gehende Untersuchungen notwendig sind. In der anschließenden Orientierungs- und Detailphase wird dann der aktuelle Sachverhalt festgestellt und einer eventuellen Sanierungsmaßnahme können ergänzende Standortuntersuchungen angeschlossen werden.

Da erst in der Sanierungsphase mögliche zusätzliche physikalische Messungen vorgesehen sind, werden diese dann meist aus Kostengründen nicht durchgeführt. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Unkenntnis über die Wirkungsweise geophysikalischer Methoden und die allgemeine Akzeptanz gegenüber Geophysik. Anfängliche Misserfolge geophysikalischer Messmethoden führten zur Ablehnung dieser Verfahren für weitere Standortuntersuchungen bei denjenigen, die heute in Schlüsselpositionen von z.B. Umweltämtern, Behörden oder Investoren sitzen. Dies erschwert den erneuten Einsatz der Geophysik bei Altlastuntersuchungen. Daher muss diese einerseits bestrebt sein, ihre Glaubwürdigkeit wiederzuerlangen und andererseits ihre Präsenz in der Öffentlichkeit deutlich zu erhöhen.

Durch kontinuierliche gerätetechnische Weiterentwicklungen konnten geophysikalische Messgeräte in ihrer Effizienz und Effektivität beständig gesteigert werden. Als Beispiel sei hier nur der Einsatz der Geolektrik vom manuellen Versetzen der Elektroden hin zu einer Multi-elektroden-Auslage genannt. Einige Behörden und Ämter haben erkannt, dass der Einsatz geophysikalischer Verfahren im Bereich der Erstbewertung von Altstandorten diesen Schritt erheblich verbessern kann, und zwar im Sinne einer Zeit- und Kostenreduzierung bei mindestens gleichbleibender Qualität. Dieses Ergebnis benutzt das EU-Altlastprojekt NORISC als Arbeitsgrundlage. Durch Einsatz von Standardverfahren und innovativen in-situ - Messme-

thoden sollen durch ein koordiniertes Zusammenspiel der unterschiedlichen Geo-Disziplinen Altstandorte höchst effizient untersucht werden. Von geophysikalischer Seite war u.a. das Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln daran beteiligt (*Hördt and Tezkan [2001]*).

### 1.1.2 Gefährdungspotential durch Altlasten

Abgesehen von der eigentlichen Lagerung gefährlicher Produkte auf Altlasten liegt eine große Gefahr in deren möglichen Auslaugung in die Umwelt. Inhaltsstoffe aus den Deckschichten können durch Regen herausgelöst, im Sickerwasser abtransportiert werden und so ins Grundwasser gelangen. Durch den Grundwasserabstrom gelangen die Stoffe in angrenzende Gebiete und können schlimmstenfalls in den Nahrungskreislauf von Mensch und Tier gelangen. Aus diesem Grunde versucht die Deponietechnik eine solche Auslaugung von Inhaltsstoffen aus Deponien heraus zu vermeiden. Deren Bemühungen können z.B. in den Fachzeitschriften *Müll und Abfall* und *Altlasten Spektrum* des Erich Schmidt Verlags in Berlin nachgelesen werden. In den ehemaligen Ländern des Ostblocks ist die Situation besonders offensichtlich. Dort fehlt für viele solcher Flächen das Geld oder das Verständnis, sich um diese Gefahrenherde zu kümmern, bis meist schwerwiegende Folgen für den Menschen offensichtlich werden.

Im Falle von Auslaugungen sind aber nicht nur die primär eingelagerten Stoffe zu berücksichtigen, sondern auch mittel- und langfristig wirksame Sekundärstoffe, welche sich durch biologische, chemische oder physikalische Prozesse aus dem Ausgangsmaterial bilden. Von daher ist eine Deponie als eine Art chemischer Reaktor ansehen (*Fachgruppe Wasserchemie in der GDCh [1996]*), dessen Prozesse vor Allem durch von außen einfließendes Wasser bestimmt werden.

Je höher die Wasserlöslichkeit von Schadstoffe ist, desto gefährlicher werden diese eingestuft. Daher wird eine Beurteilung des Gefahrenpotentials eines Altstandortes durch Messung ausgelaugter Schadstoffe im Grundwasser beurteilt. Arbeiten über die Untersuchung von branchenspezifischen Altablagerungen und Altstandorten, aus denen sich eine Liste für typische Hauptkontaminanten ableiten lassen, sind in *Fachgruppe Wasserchemie in der GDCh [1996]* nachzulesen.

NORISC greift dieses als Basis für chemische Untersuchungen auf. Um eine Übersicht über das chemische und toxologische Gefährdungspotential bei Altlasten und alten Industrieflächen unterschiedlicher industriellen Branchen zu bekommen, wurden für die spätere Entscheidungsmatrix DSS (siehe Kapitel 3.3) eine Liste aus mehreren internationalen Beständen durch Befragung von internationalen Behörden, Ämtern und Firmen erstellt. Auf Grundlage dieser Befragung wurde eine brachen-spezifische Zuordnung der dort am häufigsten anzutreffenden Komtaminanten erstellt. Auf diese Weise kann eine Vorab-Einschätzung der Untersuchungsfläche erfolgen.

### 1.1.3 Geophysikalische Erkundung von Altlasten

Aufgaben der Geophysik bei Altlastuntersuchungen sind primär strukturelle Erkundungen der Verdachtsfläche, die Erkundung des Grundwassers und durch Lokalisierung von Anomalien im Grundwasser eine mögliche Bestimmung von Kontaminationsfahnen (z.B. *Tezkan and Georgescu* [2000]). Dabei ist zu beachten, dass eine durch Schadstoffe verursachte Anomalie nur dann erkannt werden kann, wenn die physikalischen Parameter der Kontaminanten sich deutlich von einer unbeeinträchtigten Umgebung unterscheiden.

Ende der 80'er Jahre ließ die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg acht Modellstandorte von Altlasten in Baden-Württemberg hinsichtlich der Effizienz geophysikalischer Methoden beim Einsatz auf Altstandorten untersuchen (*Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg* [1990]). Neben Geochemie, Biologie, Hydrogeologie, Bohrungen und Schürfen wurden knapp 60 geophysikalische Untersuchungen durchgeführt, wobei vorwiegend erprobte Methoden angewendet wurden. Ziel war außer der Lokalisierung von verdeckten Altlasten die Eingrenzung der Schadstoffverbreitung innerhalb und außerhalb der Altlasten. Von 12 Messverfahren bewährten sich insbesondere die Geomagnetik und die Geoelektrik bzw. die Elektromagnetik.

Die Refraktionsseismik war erfolgreich bei der Bestimmung der Mächtigkeiten von lockeren Ablagerungen. Für die hochauflösende Reflexionsseismik zeichnete sich dagegen ab, dass ihre Anpassung an geringe Tiefen noch nicht abgeschlossen ist. Demgegenüber reichte die Eindringtiefe des gleichfalls hochauflösenden Bodenradars nicht immer aus.

Die Methoden der Induzierten Polarisation, des Eigenpotentials, der Gravimetrie und der Geothermik konnten bei speziellen Fragestellungen eingesetzt werden. Die Bohrlochmeßverfahren wurden möglichst in jeder Bohrung gefahren, um die physikalischen Eigenschaften des Mülls oder des Umfeldes festzulegen.

Nicht nur innerhalb von Europa wurde der Nutzen der Geophysik bei solchen Vorhaben untersucht. Die amerikanische Umweltbehörde EPA ('Environmental Protection Agency', *US EPA* [1993]) hat sich ebenfalls ausführlich mit dieser Fragestellung beschäftigt, ebenso wie das amerikanische Militär (*U.S. Army Corps of Engineers Department of the Army* [1993]), welches ähnliche Ergebnisse vorwies.

Insgesamt hat der Einsatz der zerstörungsfreien Geophysik an Altlasten die Erkundungskosten erheblich gesenkt, wobei sich aber gezeigt hat, dass weitere Forschungen und Entwicklungen erforderlich sind, um die geophysikalische Erkundung von Altlasten und ihrer Schadstoffverteilung zu verbessern (*Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg* [1990]).

Wie zu erwarten beantworten die verschiedenen Methoden die gestellten Fragestellungen unterschiedlich gut. Daher liegt es nahe, diese Ergebnisse miteinander zu verknüpfen. *Greenhouse and Slaine* [1983], *Green et al.* [1999] und *Iaco et al.* [2000] zeigen, dass durch Kombination geophysikalischer Methoden ein besseres Gesamtergebnis erzielt werden kann.

Eine Vielzahl an Publikationen in den 90ern belegen die zunehmende Relevanz der Geophysik in der Altlasterkundung. *Vogelsang* [1991; 1995] gibt einen Leitfaden für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Juristen mit Tabellen und Übersichten zu verschiedenen Verfahren,

die als Entscheidungshilfe zur Methodenauswahl dienen sollen. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften hat eine mehrteilige Serie von Bänden zum Thema 'Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten' herausgegeben. Der Band 3 (Geophysik) von *Knödel et al.* [1997] erläutert die Theorie und gibt in vielen praktischen Beispielen eine Übersicht über die Anwendbarkeit unterschiedlicher Verfahren bei Fragestellungen in der Altlastuntersuchung. *Ward* [1990] stellt in dem SEG-Band (Society of Explorational Geophysicists) viele Beiträge zu den verschiedensten geophysikalischen Untersuchungen auf Altstandorten zusammen.

#### 1.1.4 Ziele des NORISC-Projektes

Einige Städte, Kommunen und deren administrative Entscheidungsträger haben erkannt, dass durch eine bessere Zusammenarbeit der Geo-Disziplinen die Untersuchung von Altlasten erheblich effizienter gestaltet werden kann. Durch eine solche Effizienzsteigerung werden alte Industriestandorte in städtischen Gebieten wieder für Investoren interessant, da die Untersuchungskosten erheblich niedriger als bisher ausfallen. Die Neu-Nutzung einer solchen Fläche hätte für Städte große ökonomische Vorteile und würde außerdem zur Verringerung des Grünflächenverbrauchs beitragen.

Der Kernansatz des NORISC-Projektes liegt im Zusammenspiel der verschiedenen Disziplinen im Feld. Für die Geophysik bedeutet dies, dass durch Einbeziehung zusätzlicher Datenbestände in Form von geologischen Bohrlochinformationen oder chemischer Proben während einer Felduntersuchung geophysikalische Daten vor Ort kalibriert werden können, wodurch genauere Untergrundmodelle erstellt werden. Diese unterstützen dann die (Hydro-) Geologie und Geochemie, welche zwar genaue Punktaussagen treffen können, jedoch keine verlässlichen Aussagen über das Ausbreitungsverhalten von Schadstoffen an sich machen können. Durch diesen zusätzlichen Einsatz der Geophysik reduziert man somit das Restrisiko für Unsicherheiten von Altlastuntersuchungen, welches sonst bei der rasterhaften Vorgehensweise existiert.

Anhand der oben beschriebenen Punkte setzte sich das NORISC-Projekt folgende Aufgaben

1. Integration und Kombination von neuen und existierenden Methoden, besonders innovative in-situ und on-site Techniken;
2. Erstellung eines Standardratgebers für die Charakterisierung einer Fläche in Form einer Entscheidungshilfe-Software (Decision Dupport System DSS; siehe Kapitel 3.4) für Gutachter, Kommunen und Ingenieurbüros;
3. Demonstration der Effektivität dieses Untersuchungsansatzes und des Entscheidungshilfe-Systems durch Feldtests;
4. Integration von Flächenuntersuchungen mit einem umfassenden Flächen-Management, welches Daten-Management, Risiko-Auswertung, Sanierungsvorschläge und eine Entwicklung einer Revitalisierungsstrategie enthält;

woraus sich folgende Ziele ableiten lassen:

1. Verbesserung der Qualität und Beschleunigung der Sammlung von Risiko-Faktoren und der Beschreibung von Altlasten;
2. Minimierung von Zeit- und Kostenaufwand bei Altlastenuntersuchungen und Sanierungen;
3. Möglichkeit des Flächenrecyclings in städtischen Verdichtungsräumen;
4. Reduktion des Grünflächenverbrauchs;
5. Erstellung eines integrierten Visualisierungswerkzeugs für Felduntersuchungen und Städteplaner (siehe Kapitel 3.6);
6. stärkere Integration der Geophysik in Altlastuntersuchungen durch Bereitstellung flächenhafter Untergundaussagen und dadurch generelle Reduzierung des Restrisikos bei Altlastuntersuchungen.

## 1.2 Ziele der Arbeit

Durch die Implementierung von geophysikalischen Modulen zur Bearbeitung und Inversion geoelektrischer und radiomagnetotellurischer Daten wird das geologische GIS-Programm *GSI3D* in seiner Funktionalität derart erweitert, dass die Effizienz von Altlastuntersuchung gesteigert und die Interaktion der daran beteiligten Disziplinen erhöht wird.

Durch die Möglichkeit der Darstellung verschiedener Datensätze der (Hydro-)Geologie, Geochemie und Geophysik in einem gemeinsamen Kontext kann durch on-site Kalibrierung geophysikalischer Daten, z.B. anhand von Bohrlochinformationen, der Untergrund besser angepasst werden, ohne die Daten zwischen verschiedenen Rechnern zu kopieren und den Weg ins Büro suchen zu müssen. So werden Kommunikationswege auf ein Minimum reduziert und eine flexible, der jeweiligen Testfläche angepasste Arbeitsweise, ermöglicht, da unmittelbar neu gewonnene Datensätze sofort mit in die weitere Interpretation von vorhandenen Daten mit einbezogen werden können. Zu diesem Zweck werden drei der vier untersuchten NORISC-Testflächen mittels der neuen Module bearbeitet und reinterpretiert.



---

## GRUNDLAGEN DER GEOELEKTRIK UND DER RADIOMAGNETOTELLURIK

---

In diesem Kapitel werden die theoretischen Hintergründe der Gleichstrom-Geoelektrik und der Radiomagnetotellurik erläutert. Diese beinhalten neben der Beschreibung der beiden Methoden an sich auch eine kurze Beschreibung der in in dieser Arbeit verwendeten Inversionsverfahren.

Die Gleichstrom-Geoelektrik beruht auf der Einspeisung von Strömen in den Untergrund, wobei Elektroden eine Potential-Differenzen messen und daraus Widerstandsmodellen erstellt werden. Ende der 20er Jahre wurde dies von Schlumberger zum ersten Mal durchgeführt (*Schlumberger and Schlumberger* [1930]). Anfangs war nur die Erstellung von 1D-Modelle aus Widerstandskurven möglich, seitdem wurde diese Technik verfeinert und durch Einsatz von Computern sind heutzutage 2D- und 3D-Modellen Standard. Durch die Einführung der Multielektroden-Geoelektrik, an der entlang eines Kabels in fixen Abständen Elektroden-Positionen computergesteuert durchgeschaltet werden können, hat sich die Effizienz der Geoelektrik drastisch erhöht. Nach anfänglicher Nutzung für Explorationszwecke gewann die Geoelektrik ab den 80'ern zunehmend auch im Ingenieur- und Umweltbereich (z.B. *Barker* [1990]) an Bedeutung. Grundlegende oder methodische Untersuchungen wurden am Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln im Rahmen von Diplom- oder Doktorarbeiten (*Rühlow et al.* [1999], *Kemna* [2000], *Taban* [2005], *Mackedanz* [2005]) durchgeführt. Für eine ausführlichere Behandlung der Theorie der Geoelektrik sei auf *Keller and Frischknecht* [1966] und *Telford et al.* [1990] verwiesen.

Eine weitere Methode, die am Institut für Geophysik häufig für Umweltfragen eingesetzt wird, ist die Radio-Magnetotellurik. Diese ist eine Weiterentwicklung des VLF-R-Verfahrens ('Very-Long-Frequency-Resistivity') in einen anderen Frequenzbereich. Während VLF-R - Verfahren Frequenzen von 10 - 30 kHz benutzt (hauptsächlich militärische Sender), liegen

bei der Radiomagnetotellurik (kurz 'RMT' genannt) die Frequenzen im Bereich von 12 kHz bis 1 MHz (zivile Sender, Langwellenbereich).

Das elektromagnetische Signal der Sender dringt in den Untergrund ein und erzeugt durch Induktion elektrische Untergrundströme. Diese führen wiederum zu einem sekundären magnetischen Feld, das sich mit dem primären Feld überlagert. An der Erdoberfläche wird analog über einen geerdeten elektrischen Dipol das elektrische Feld und mittels einer Spule das magnetische Feld gemessen. Aus dem Verhältnis der Feldkomponenten erhält man die elektrische Impedanz, welche sich in einen scheinbaren Widerstand und eine Phase übertragen lässt (s. Kapitel 2).

Aufgrund der unkomplizierten Handhabung des Gerätes kann selbst eine Person allein Messungen entlang von Profilen durchführen, wodurch sich einerseits laterale Grenzen und andererseits vertikale Verteilungen des spezifischen Widerstandes aufdecken lassen. Je nach vorhandenen Untergrundwiderständen sind so Sondierungen zwischen 3 bis 70 m möglich.

Die ersten MT-Messungen im Radiofrequenzbereich datieren nach *Dupis et al.* [1995] ins Jahr 1973, wobei die Methode erst 1986 den Namen RMT (*Lagabrielle* [1986]) bekam. Weitere Anwendungen der RMT werden von *Dupis et al.* [1995] im Bereich der Erkundung von Mauer- und Grundresten, hydrogeologische Arbeiten und archäologische und glaziologische Projekte beschrieben. Geotechnische Fragestellungen werden beispielsweise von *Beyaert et al.* [1987] behandelt, aber auch der Einsatz auf kontaminierten Industrieflächen findet immer häufiger eine Anwendung (*Recher* [1998], *Recher* [2002], *Tezkan et al.* [2005]).

Beide oben erwähnten Methoden wurden als Inversionsmodule in das Programm GSI3D implementiert, um so eine effizientere Kalibration entsprechender geophysikalischer Daten mit Hilfe geologischer und chemischer Informationen im Feld durchzuführen. Durch die Verzahnung verschiedener Geo-Disziplinen innerhalb eines Programms soll der Zeit- und Arbeitsaufwand einer Altlastuntersuchung drastisch reduziert werden.

## 2.1 Einführung in die Geoelektrik

Bei der Untersuchung des Untergrundes mit elektrischen Methoden ist die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  eine der wichtigsten physikalische Eigenschaften. Für ein isotrop leitendes Material beschreibt das *Ohmsche Gesetz* den Zusammenhang zwischen angelegter Stromdichte  $\mathbf{j}$  und resultierender elektrischer Feldstärke  $\mathbf{E}$ :

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.1)$$

mit  $\mathbf{j}$  als Stromdichte in Ampere pro Quadratmeter ( $A/m^2$ ),  $\mathbf{E}$  als elektrischem Feld in Volt pro Meter (V/m) und der Leitfähigkeit  $\sigma$  in Siemens pro Meter (S/m). Aufgrund des zugrundeliegenden Mechanismus können zunächst drei Arten von Leitfähigkeiten unterschieden werden (nachzulesen z.B. bei *Telford et al.* [1990] oder *Knödel et al.* [1997]).

### 1. Elektronische (metallische) Leitfähigkeit

Freie Elektronen, wie sie vor allem in Metallen vorzufinden sind, sind für diese Art der Leitfähigkeit verantwortlich. Da gesteinsbildende Mineralien eine sehr geringe elektronische Leitfähigkeit aufweisen ( $10^{-14}$  bis  $10^{-10}$  S/m), liegt ein beachtenswerter Anteil für diese Leitfähigkeit lediglich bei Gesteinen mit hohem Erzmineral- oder Graphitanteil vor.

### 2. Elektrolytische Leitfähigkeit

Bei der elektrolytischen Leitfähigkeit sind die Ionen der in der Lösungsflüssigkeit gelösten Salze für den Stromfluss verantwortlich. Zwar weisen die meisten Gesteine und gesteinsbildende Mineralien eine geringe elektronische Leitfähigkeit auf, können aber durch Fluide in Porenräumen und Klüften ihre Leitfähigkeit deutlich erhöhen.

### 3. Dielektrische Leitfähigkeit

Die dielektrische Leitfähigkeit zeigt sich bei schlechten Leitern unter Einfluss eines äußeren elektrischen Wechselfeldes, welches die atomaren Elektronen leicht gegenüber ihrer Gleichgewichtslage zum Atomkern auslenkt. Hieraus resultiert eine dielektrische Polarisation die für den sogenannten Verschiebungsstrom verantwortlich ist. Für den vorliegenden Fall der Untersuchung des Untergrundes mittels geoelektrischer Sondierungen ist diese Art der Leitfähigkeit zu vernachlässigen, sondern wird erst bei hochfrequenten Erkundungsverfahren (z.B. dem Bodenradar) berücksichtigt.

Für die Untersuchungen mittels der Geoelektrik sind also die elektrolytische Leitfähigkeit von großem Interesse. Diese wird für gesättigte und teilgesättigte tonfreie Sedimente empirisch durch Formel von Archie [1942] beschrieben:

$$\sigma_0 = \frac{1}{\rho_0} = \frac{\Phi^m}{a} \cdot \sigma_w \cdot S^n \quad (2.2)$$

Hierbei ist  $\sigma_0$  die elektrische Leitfähigkeit, bzw.  $\rho_0$  der elektrische Widerstand.  $\sigma_w$  kennzeichnet die elektrolytische Leitfähigkeit des Porenwassers,  $\Phi$  ist die effektive Porosität,  $m$  der Zementationsexponent,  $a$  ein Proportionalitätsfaktor,  $S$  der Sättigungsgrad und  $n$  der Sättigungsexponent.  $m$  und  $n$  sind empirische Größen und abhängig vom Gesteinstyp. Sie liegen zwischen  $1,3 < m < 2,4$  und  $0,5 < n < 1$  (s. z.B. Knödel et al. [1997]), wobei  $m$  mit dem Verfestigungsgrad der Gesteine zunimmt.  $S$  nimmt mit zunehmender Wassersättigung ab und erreicht bei vollständiger Sättigung den Wert 1. Für  $n$  wird in der Praxis häufig ein Wert von 2 genommen.

Bei Anwesenheit von nicht tonfreien Sedimenten ist die Formel zu modifizieren, da es durch eine Wechselwirkung der Porenflüssigkeit mit der Gesteinsmatrix zur Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht an der Grenzfläche zwischen den beiden Komponenten kommen kann. Daraus resultiert ein Stromfluss an der Oberfläche der Gesteinsmatrix. Die Gleichung 2.2 wird Hinzufügen der Grenzflächenleitfähigkeit  $\sigma_{q0}$  entsprechend modifiziert:

$$\sigma_0 = \frac{\Phi^m}{a} \cdot \sigma_w \cdot S^n + \sigma_{q0}. \quad (2.3)$$

Die Leitfähigkeit des Untergrundes hängt also maßgeblich von der Porosität des Gesteins, der Leitfähigkeit der Porenflüssigkeit und ihrem Volumenanteil im Porenraum ab.

Zum Verständnis der Geoelektrik und der RMT wird in den kommenden Abschnitten die nötige Theorie erläutert. Ausgangsbasis für beide Methoden sind die Maxwell-Gleichungen (nachzulesen z.B. in *Jackson* [1975])

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.5)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = q. \quad (2.7)$$

Unter Verwendung des Ohmschen Gesetztes ergeben sich die Material-Gleichungen

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}; \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r; \quad \mu = \mu_0 \mu_r. \quad (2.8)$$

$\mathbf{E}$  steht für die elektrische Feldstärke,  $\mathbf{B}$  für die magnetischen Flussdichte,  $\mathbf{D}$  für die elektrische Flussdichte und  $\mathbf{H}$  für die magnetische Feldstärke.  $\mathbf{j}$  ist die Stromdichte,  $q$  die Ladung,  $\varepsilon_r$  die relative Dielektrizitätszahl,  $\varepsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante des Vakuums,  $\mu$  die magnetische Permeabilität und  $\mu_0$  die Induktionskonstante des Vakuums.

Bei der Gleichstrom-Geoelektrik sind die Feldgrößen zeitunabhängig, das elektrische Feld wird zu einem Potentialfeld

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0. \quad (2.9)$$

Mit  $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$  und  $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$  ( $\varphi$ : skalares Potential) gilt außerhalb der Quellen

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0, \quad (2.10)$$

da der Vorgang stationär ist. Daraus folgt für homogen leitfähige Medien

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = \nabla \sigma \cdot \nabla \varphi + \sigma \nabla^2 \varphi = 0 \quad (2.11)$$

$$\Delta \varphi = 0 \text{ für } \sigma = \text{const} \quad (2.12)$$

Das Potential des elektrischen Feldes genügt der Laplace-Gleichung. Bei Vorhandensein von einer Stromquelle der Stärke  $I$  im Punkt  $\mathbf{r}_0$  ist die räumliche Stromverteilung gegeben durch

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = I\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \neq 0. \quad (2.13)$$

Daraus folgt die *Gleichstrom-Grundgleichung*

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = -I\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0), \quad (2.14)$$

welche für beliebige Verteilungen von  $\sigma$  nur numerisch lösbar ist. Liegt  $\mathbf{r}_0$  an der Oberfläche eines homogenen Halbraums, so hat 2.14 die Lösung

$$\varphi(r) = \frac{I}{2\pi\sigma|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} = \frac{\rho I}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}. \quad (2.15)$$

Betrachtet man den Fall einer Stromeinspeisung über eine einzelne Elektrode lässt sich auf Grundlage von Gleichung 2.14 das Potential in einer Entfernung  $r$  von der Punktelektrode und aus Symmetriegründen unter Verwendung von Zylinderkoordinaten einfach berechnen. Das Potential wird eine Funktion von  $r = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$ . Die *Laplace-Gleichung* vereinfacht sich für diesen Fall zu

$$\Delta\varphi = \frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = 0. \quad (2.16)$$

Die Integration liefert

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{C_1}{r^2} = 0, \quad (2.17)$$

welches schließlich zur Lösung

$$\varphi = -\frac{C_1}{r} + C_2 \quad (2.18)$$

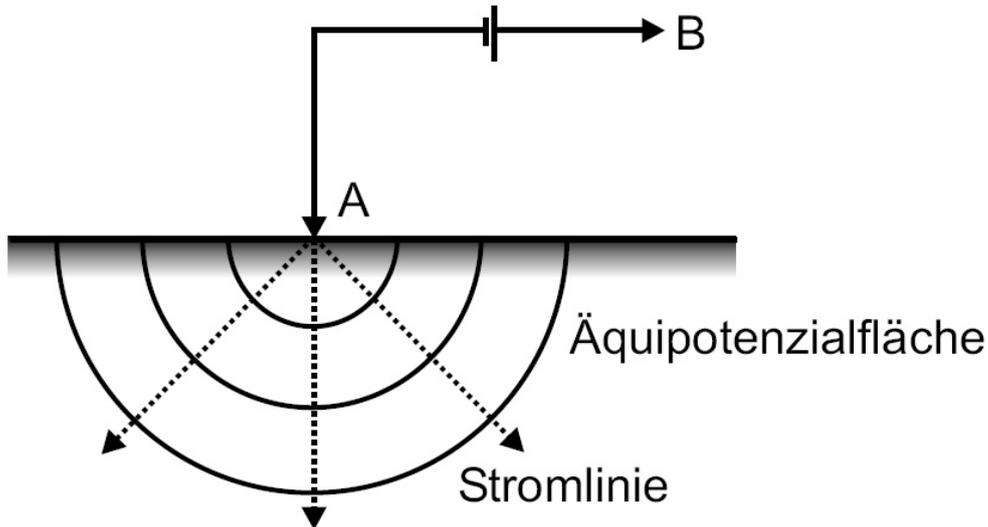
führt. Da das Potential für  $r \rightarrow \infty$  gegen 0 geht, folgt  $C_2 = 0$ . Berücksichtigt man, dass der Gesamtstrom  $I$  eine Kugelfläche mit der Oberfläche  $A = 4\pi r^2$  durchströmt, lässt sich mit der Stromdichte  $j$  schreiben:

$$I = 4\pi r^2 j = -4\pi r^2 \sigma \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi \sigma C_1. \quad (2.19)$$

Damit ist auch  $C_1$  bestimmt und man erhält

$$\varphi = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (2.20)$$

als Potential einer Punktelektrode in einem homogenem Vollraum des spezifischen elektrischen Widerstandes. Wird die Stromelektrode an der Oberfläche eines homogenen isotropen Halbraums angebracht (siehe Abbildung 2.1), fließt der gesamte Strom im unteren Halbraum.



**Abbildung 2.1:** Potentialverteilung in einem homogenen Medium für eine Stromelektrode an der Oberfläche. A und B sind Stromelektroden, wobei B im Unendlichen angenommen wird.

Hier ist das Verhalten des elektrischen Feldes auf der Oberfläche des Halbraums von Bedeutung. Wegen der zu vernachlässigbaren Leitfähigkeit der Luft  $\sigma_{Luft} \approx 0$  wird für  $E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} = 0$  gefordert, welches durch

$$\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( -\frac{C_1}{r} \right) = -\frac{d C_1}{dr} \frac{\partial r}{\partial z} = C_1 \frac{z}{r^3} = 0 \text{ für } z = 0. \quad (2.21)$$

erfüllt wird. Der Strom fließt durch eine Halbkugeloberfläche und man erhält

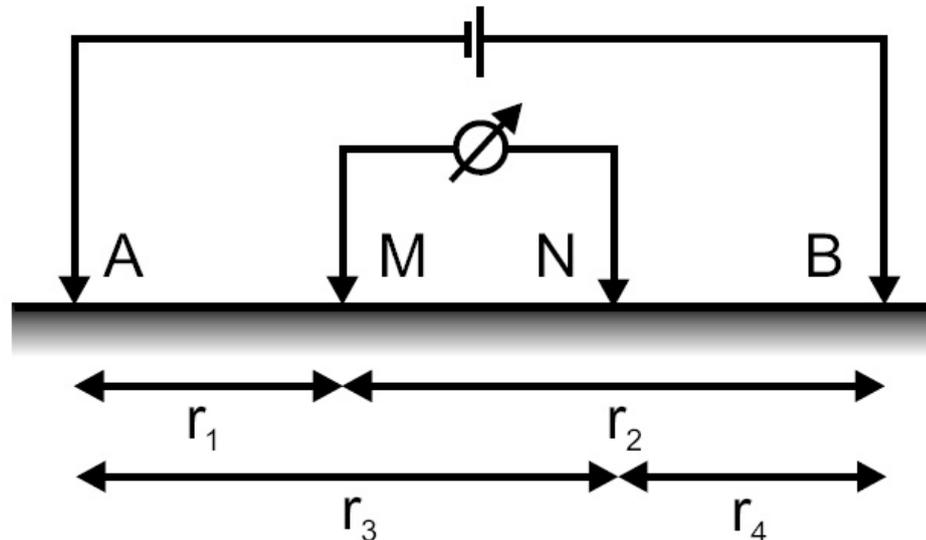
$$\varphi = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.22)$$

für das Potential an der Oberfläche eines homogenen Halbraums mit dem spezifischen Widerstand  $\rho$ .

Bei einem endlichen Abstand der Einspeisungspunkte  $\mathbf{r}_1$  und  $\mathbf{r}_2$  wird das Potential von beiden Stromelektroden beeinflusst. Berücksichtigt man die Polarität der Stromspeisung und überlagert die berechneten Potentiale der jeweiligen Stromelektrode (*Superposition*), kann das Potential in  $\mathbf{r}$  nach

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{\mathbf{r} - \mathbf{r}_1} - \frac{1}{\mathbf{r} - \mathbf{r}_2} \right) \quad (2.23)$$

berechnet werden. Elektrische Potentiale lassen sich messtechnisch nur gegen ein Bezugspotential erfassen. So gelangt man zur elektrischen Potentialdifferenz oder Spannung. Durch weitere Einbeziehung zweier Potentialelektroden bzw. Sonden (Abbildung 2.2) wird die obige Beziehung erweitert.



**Abbildung 2.2:** Schematischer Aufbau einer Vierpunkt-Anordnung in der Geoelektrik. Die Stromelektroden sind als A und B gekennzeichnet, M bzw. N entsprechen den Potentialelektroden.

Aus der Berechnung der Potentiale für die Vierpunktanordnung (Stromelektroden A und B, Spannungssonden M und N) sowie unter Beachtung des Vorzeichens erhält man

$$U = \Delta\varphi = \varphi_M - \varphi_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right). \quad (2.24)$$

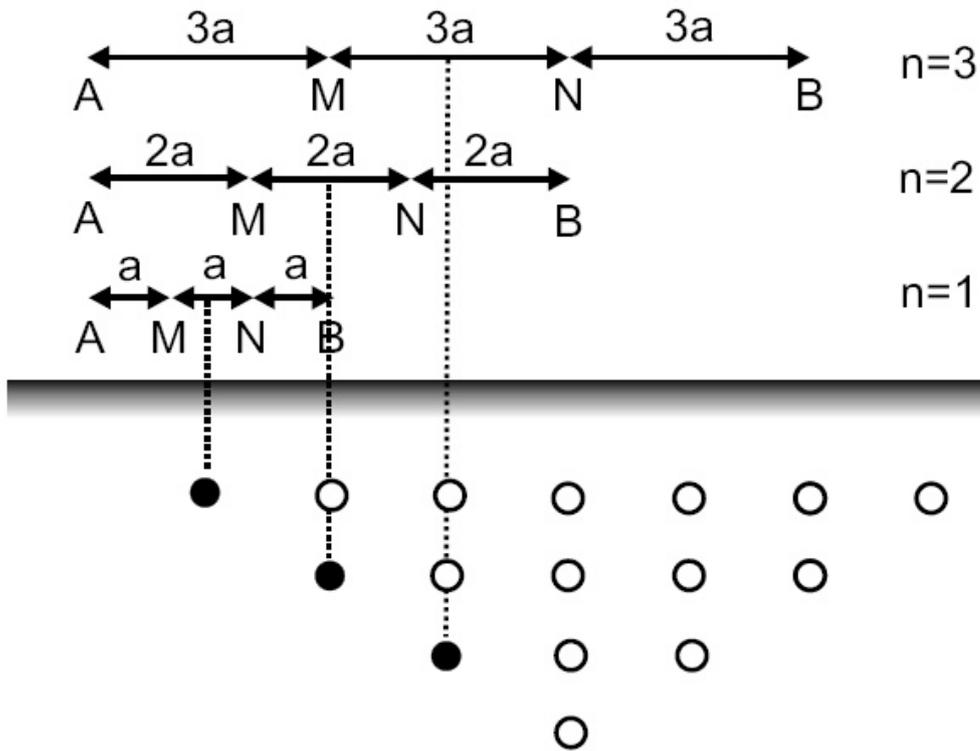
Über einem homogenen Halbraum liefert die Messung von  $U$  und  $I$  bei bekannten Abständen den spezifischen elektrischen Widerstand

$$\rho = \frac{U}{I} \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} = k \cdot \frac{U}{I}, \quad (2.25)$$

wobei  $k$  der Geometrie- oder Konfigurationsfaktor ist. Dies ist die sogenannte *Neumannsche Formel*. Sie liefert im Falle eines inhomogenen Untergrundes den scheinbaren (engl.: 'apparent') spezifischen Widerstand  $\rho_a$ .

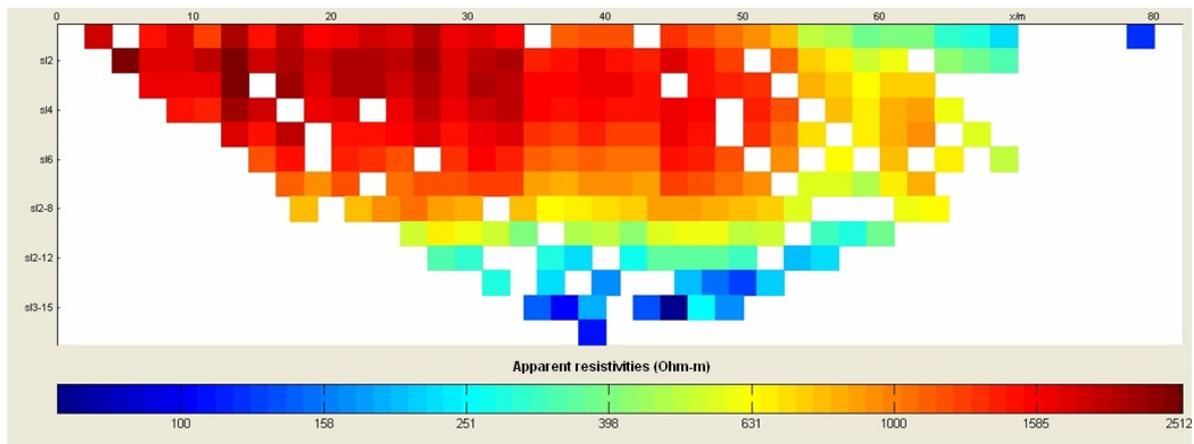
### 2.1.1 Multielektroden-Geoelektrik und Pseudosektionen

Heutzutage werden Multielektroden-Apparaturen standardmäßig eingesetzt. Daher können eine Vielzahl von Messpunkten entlang von vorgegebenen Profilen mit festen Elektrodenabständen in relativ geringer Zeit automatisch erfasst werden. Dies begünstigt die Anwendungen sogenannter Sondierungskartierungen (also eine Kombination aus Sondierung und



**Abbildung 2.3:** Messung mit einer Multi-Elektroden-Geoelektrik nach Knödel et al. [1997]. Jeder Messung wird ein Mittelpunkt und eine Tiefe zugeordnet, sodass eine sogenannte Pseudosektion entsteht.

Kartierung). Die einzelnen Messkonfigurationen werden von einem Computer durchgeschaltet, wobei Auslagenlänge (Sondierung) und Mittelpunkt (Kartierung) variiert werden.

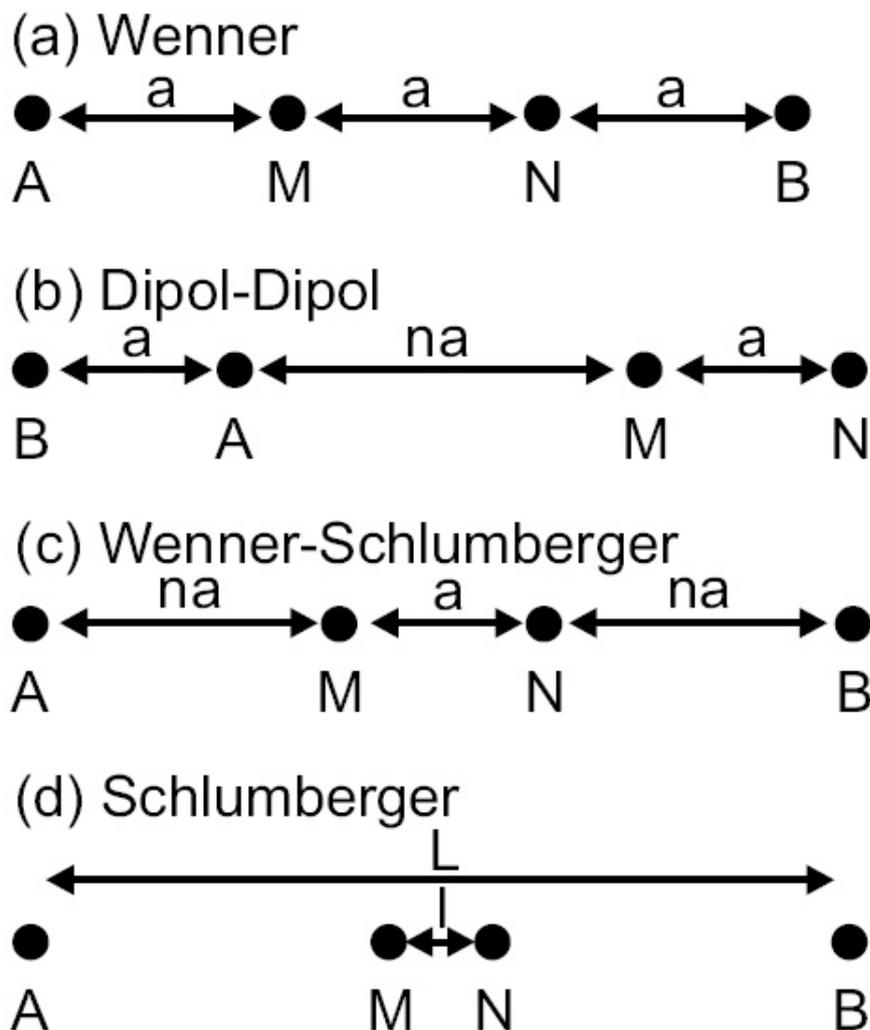


**Abbildung 2.4:** Beispiel für eine Pseudosektion aus dem Programm von Günther [2004]. Der gemessene scheinbare Widerstand ist in Abhängigkeit von  $x$  und der jeweiligen Elektroden-Konfiguration dargestellt. Beispiel: 'sl2-8': 'sl': Schlumberger-Konfiguration; 2: doppelter Potentialelektrodenabstand (entspricht 'a' in Abb. 2.5c); 8: Abstand zwischen Strom- und Potentialelektrode (entspricht 'n' in Abb.2.5c). Umgerechnet auf den einfachen Elektrodenabstand beträgt der Abstand zwischen Strom- und Potentialelektrode hier  $n*a = 8*2 = 16$ . Bereiche ohne Daten sind weiß.

Eine erste Darstellung der Daten findet meist als Pseudosektion statt. Schematisch ist dies in Abbildung 2.3 für eine Wenner-Konfiguration zu sehen. Für einen fixen Elektrodenabstand a

und einen fixen Faktor  $n$  ergibt sich eine Kartierung, bei Vergrößerung des  $n$ -Faktors, also der Vergrößerung der gesamten Elektroden-Auslage, gelangt der Strom in eine größere Tiefe. Auf diese Weise sind auch Sondierungen möglich. Jedem  $\rho_a$  Wert wird ein  $x$ -Wert zugewiesen. Auf der  $z$ -Achse wird entweder der Faktor  $n$ , die Auslagenlänge  $L = \overline{AB}$  oder die Eindringtiefe  $z_{med}$  aufgetragen (vergl. Abbildung 2.4). Die unregelmäßig verteilten Widerstandswerte werden auf ein regelmäßiges Gitter projiziert und farblich dargestellt. Diese Darstellung hat den Vorteil, dass sie eine erste Abschätzung über die Widerstandsverteilung im Untergrund und somit eine qualitative Interpretation ermöglicht.

### 2.1.2 Geometriefaktoren und Abschätzungen für die Eindringtiefe



**Abbildung 2.5:** Verschiedene Elektrodenkonfigurationen; A, B: Stromelektroden; M, N: Potentialelektroden. Die Konfigurationen a) - c) sind für Multielektrodenmessungen gebräuchlich.

In Abbildung 2.5 sind die gebräuchlichsten Auslagen für eine Geoelektrik-Messung in einer Skizze dargestellt. Größere Eindringtiefen erreicht man durch Vergrößerung des Abstandes zwischen Strom- und Potentialelektroden. Abhängig von verschiedenen Faktoren wie der Widerstandsverteilung im Messgebiet und den räumlichen Bedingungen kommen unterschiedli-

Auslage	Geometriefaktor	Eindringtiefe
Wenner	$2\pi a$	$0,17 \cdot \overline{AB}$
Wenner – Schlumberger	$\pi n(n+1)a$	$0,19 \cdot \overline{AB}$
Dipol – Dipol	$\pi n(n+1)(n+2)a$	$0,25 \cdot \overline{BN}$
Pol – Dipol	$2\pi a$	$0,19 \cdot \overline{AB}$

**Tabelle 2.1:** Geometriefaktoren und Abschätzung der Eindringtiefe für die verwendeten Auslagen nach Knödel et al. [1997].

che Messgeometrien zum Einsatz. Für Multielektroden-Messungen sind die Wenner-Auslage, die Dipol-Dipol-Auslage oder die Wenner-Schlumberger-Auslage, eine abgewandelte Form der Schlumberger-Auslage, gebräuchlich. Eine Beschreibung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Auslagen finden sich bei *Loke and Barker* [1996b] sowie *Dahlin and Zhou* [2004]. *Knödel et al.* [1997] gibt eine tabellarische Übersicht der verschiedenen Messkonfigurationen bzgl. dem Verhalten gegenüber Störkörpern, horizontaler und lateraler Auflösung und Eindringtiefen.

Bei der Wenner-Auslage ist der Abstand zwischen allen vier Elektroden identisch. Für die Dipol-Dipol Auslage läßt man die Länge der Strom- und Potentialdipole konstant und vergrößert sukzessive den Abstand zwischen den beiden Dipolen. Bei der Schlumberger-Auslage hält man den Abstand zwischen den Potentialelektroden konstant und vergrößert den Abstand zu den äußeren Stromelektroden bis der Rauschanteil an der gemessenen Spannung zu groß wird. Die klassische Schlumberger Auslage setzt voraus, dass der Abstand zwischen den Potentialelektroden deutlich kleiner ist als der Abstand zwischen den Stromelektroden ( $l \ll L$ ). Da man den Abstand zwischen den Potentialelektroden bei Multielektroden-Messungen nicht wie bei der klassischen Schlumberger-Auslage beliebig verkleinern möchte, verwendet man für kleine Auslagenlängen die Wenner-Auslage ( $n = 1$ ). Für größere Entfernungen zwischen Strom- und Potentialelektroden geht die Auslage in die Schlumberger Auslage über.

Setzt man die in Abbildung 2.5 angegebenen Entfernungen in die Gleichung für den Geometriefaktor ein (vergl. Gleichung 2.25), erhält man die in Tabelle 2.1 angegebenen Werte für den Geometriefaktor. Für die Rechnungen sei auf die entsprechenden Arbeiten verwiesen (*Keller and Frischknecht* [1966]; *Telford et al.* [1990]). Die Abschätzungen der Eindringtiefe (z. B. nach *Knödel et al.* [1997]) können verwendet werden, um eine erste Vorstellung von der Tiefe eines Störkörpers oder einer Schichtgrenze zu gewinnen. Eine genauere Abschätzung liefert das sogenannte 'Depth of Investigation'-Verfahren (*Oldenburg and Li* [1999]) in Kapitel 2.4.2, wofür jedoch ein Rechner benötigt wird.

## 2.2 Grundlagen der Radiomagnetotellurik

Seit Mitte des vorigen Jahrhunderts werden magnetotellurische Messungen für Untersuchungen geologischer, thermaler und hydrologischer Fragen sowie zur Erkundung im Bergbau eingesetzt (*Tikhonov* [1950], *Cagniard* [1953]). Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Varianten der MT in der Verwendung der Quellen und deren Frequenzbereichen. Diese wie-

derum bestimmen über den elektromagnetischen Skin-Effekt die Eindringtiefe eines Verfahrens. Eine Übersicht zu die Magnetotellurik und ihre Anwendungen gibt *Vozoff* [1987].

1. MT (auch Helio-MT) - die klassische 'Magnetotellurik' (MT), die natürliche Stromsysteme in der Ionosphäre und Magnetosphäre im Periodenbereich von etwa 1 s bis  $10^5$  s als Quelle nutzt.
2. Audio-MT - die 'Audiomagnetotellurik', die vor allem auf Abstrahlungen und Reflexionen von atmosphärischen Gewitterereignissen im Periodenbereich von etwa  $10^{-4}$  s bis 1 s basiert.
3. Controlled Source Audio-MT - die Methode verwendet den gleichen Frequenzbereich wie Audio-MT, allerdings unter Verwendung künstlicher Sender.
4. Radio-MT (RMT) - Verwendung von militärischen Sendern im „Very Low Frequency“-Bereich sowie Rundfunkstationen als Quelle (Frequenzen zwischen 10 kHz und 1 MHz).

Aufgrund der Messung der elektrischen und magnetischen Felder kann die RMT scheinbare Widerstände und Phasenverschiebungen zwischen Primär- und Sekundärfeld gewinnen. Da niederfrequente elektromagnetische Wellen auf Grund des Skin-Effektes tiefer in den Boden eindringen als hochfrequente, kann so eine Sondierung an einer bestimmten Position vorgenommen werden. Auf diese Weise erhält man Informationen über die Widerstands-Tiefen-Verteilung (s. Abbildung 2.6). Werden diese Messungen entlang eines Profils vorgenommen, kann eine 2D-Auswertung der Daten durchgeführt werden (*Mackie et al.* [1997]).

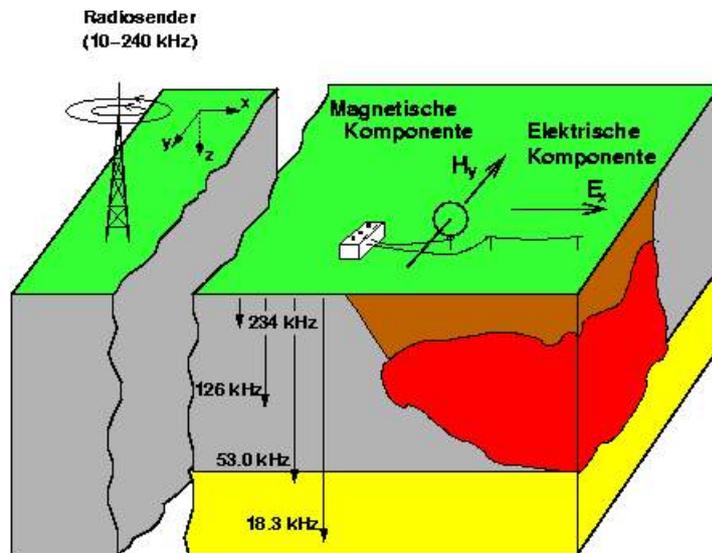
Methodische Grundlagenforschung der RMT werden seit einigen Jahren am Institut für Geophysik der Universität zu Köln durchgeführt (*Tezkan et al.* [1996], *Zacher et al.* [1996], *Veeser* [1997], *Recher* [1998], *Tezkan* [1999], *Tezkan and Georgescu* [2000], *Recher* [2002]). Die RMT eignet sich auf Grund ihrer verglichen mit der MT geringen Erkundungstiefe und im Gegensatz zur Widerstandsgeoelektrik mit ihrer Empfindlichkeit gegenüber guten Leitern sehr gut für die Untersuchung von Grundwasserproblemen (*Dupis et al.* [1995], *Turberg and Barker* [1996]).

### 2.2.1 Ableitung der Differentialgleichungen für die Elektromagnetik

Wieder ausgehend von den Maxwell- und Material-Gleichungen in 2.4 - 2.8 kann man im Falle der Nichtexistenz freier Ladungsträger die sogenannten Telegraphengleichung ableiten (z.B. nachzulesen bei *Ward and Hohmann* [1988]):

$$\Delta \begin{Bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{Bmatrix} - \underbrace{\mu \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2}}_1 \begin{Bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{Bmatrix} - \underbrace{\mu \sigma \frac{\partial}{\partial t}}_2 \begin{Bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{Bmatrix} = 0. \quad (2.26)$$

Teil 1 der Gleichung 2.26 stellt die Verschiebungsströme dar, Teil 2 die Leitungsströme. Dabei steht  $\mu$  für die magnetische Permeabilität und  $\varepsilon$  für die Permittivität,  $\sigma$  entspricht der Leitfähigkeit des Materials.



**Abbildung 2.6:** Schematische Darstellung einer einfachen zweidimensionalen Problemstellung für die RMT nach Recher [1998].

Bei Verwendung eines kartesischen Koordinatensystem ( $x$  zeigt vom Sender weg,  $y$  steht senkrecht dazu, die  $x$ - $y$ -Ebene stellt die Erdoberfläche dar,  $z$  verläuft nach unten positiv) besteht die magnetische Komponente des primären Sendersfeldes nur als einer  $y$ -Komponente. Wenn sich die Welle in  $z$ -Richtung ausbreitet, lautet eine allgemeine Lösung für das magnetische Feld in Gleichung 2.26

$$H_y = (a_1 e^{-ikz} + a_2 e^{ikz}). \quad (2.27)$$

$a_1$  und  $a_2$  beschreiben die Amplituden des einfallenden Primärfeldes und des reflektierten Anteils.

Unter Annahme einer harmonischen Welle ( $e^{i\omega t}$ ) erhält man aus dem Amperschen Gesetz (s. Gleichung 2.6) für den Frequenzbereich aus dem magnetischen das elektrische Feld

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\sigma + i\omega\epsilon} \nabla \times \mathbf{H}. \quad (2.28)$$

Mit Gleichung 2.27 für die  $y$ -Komponente des magnetischen Feldes ergibt sich für die  $x$ -Komponente des elektrischen Feldes

$$E_x = -\frac{1}{\sigma + i\omega\epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z}. \quad (2.29)$$

Durch Anwendung der Fourier-Transformation für harmonische Felder erhält man die Helmholtz-Gleichung im Frequenzbereich

$$\Delta \begin{Bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{Bmatrix} = k^2 \begin{Bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{Bmatrix}. \quad (2.30)$$

Sie beschreibt den Eindringvorgang elektromagnetischer Wellen in den Untergrund.  $k$  steht für die komplexe Wellenzahl:

$$k^2 = \mu \varepsilon \omega^2 - i \mu \sigma \omega. \quad (2.31)$$

Dabei entspricht  $\omega = 2\pi f$  der Kreisfrequenz. Der erste Teil auf der rechten Seite gibt die Verschiebungsströme, der zweite Teil die Leitungsströme wieder. Sind die Verschiebungsströme deutlich kleiner als die Leitungsströme, gilt die sogenannte 'MT-Näherung' bzw. 'Quasistationäre Näherung'  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \gg 1$ .

Die typischen Widerstandsverteilungen auf der ungarischen Testfläche liegen zwischen 5 - 140  $\Omega\text{-m}$  ( $0,007 \frac{\text{S}}{\text{m}} \leq \sigma \leq 0,2 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ ). Für  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$  und einer relativen Dielektrizitätszahl  $\varepsilon_r$  für die meisten Bodenarten zwischen 4 - 8 gilt für  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \leq 2 \cdot 10^{-11} \text{ As/Vm}$ . Das verwendete RMT-Gerät benutzt Frequenzen zwischen 12 - 250 kHz mit einer resultierenden Kreisfrequenz zwischen  $7,5 \cdot 10^4 \text{ 1/s} \leq \omega \leq 1,5 \cdot 10^6 \text{ 1/s}$ . Daraus folgt  $222 < \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} < 132626 \gg 1$ .

Unter Voraussetzung der oben gemachten Näherung vereinfacht sich die Wellenzahl zu

$$k^2 = -i \mu_0 \omega \sigma. \quad (2.32)$$

Durch Verwendung von Gleichung 2.32 wird die Helmholtz-Gleichung (Gl. 2.30) gleich der Diffusionsgleichung. Für eine weitere Beschreibung der Lösung der Diffusionsgleichung sei auf *Kaufman and Keller* [1981], *Ward and Hohmann* [1988] und *Müller* [1995] verwiesen. Eine Lösung für den Fall, dass die Welle nur in  $z$  fortschreitet, ist,

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} e^+ \\ h^+ \end{Bmatrix} \exp[-i(kz - \omega t)] + \begin{Bmatrix} e^- \\ h^- \end{Bmatrix} \exp[i(kz + \omega t)]. \quad (2.33)$$

Die Konstanten  $e^{+/-}$  bzw.  $h^{+/-}$  beschreiben die Amplituden des einfallenden bzw. des reflektierten Feldes. Falls Leitungsströme über Verschiebungsströme dominieren, ist

$$k = (1 - i) \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}. \quad (2.34)$$

Der Realteil von  $\exp(-ikz)$  beschreibt die exponentielle Abnahme mit der Tiefe. Daher kann man den reellen Parameter

$$\delta = \text{Re} \left( \frac{1}{k} \right) = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (2.35)$$

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.36)$$

als Skintiefe  $\delta$  definieren (*Ward and Hohmann* [1988]). Die Skintiefe ist genau die Tiefe, in

der die elektromagnetischen Felder auf  $1/e$  abgeklungen sind. In Gleichung 2.36 steht  $\delta$  für die Skintiefe in m,  $\rho$  für den spezifischen Widerstand in  $\Omega\text{-m}$  und  $f$  für die Frequenz in Hertz.

## 2.2.2 Scheinbarer Widerstand, Phase und Impedanztensor

In der Magnetotellurik verwendet man den sogenannten Impedanztensor zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen magnetischem und elektrischem Feld (Vozoff [1991]).

$$\begin{pmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx}(\omega) & Z_{xy}(\omega) \\ Z_{yx}(\omega) & Z_{yy}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{pmatrix}. \quad (2.37)$$

Mit dem verwendeten RMT-Gerät von I. Müller (siehe Zacher *et al.* [1996]) wird für eine feste Frequenz das Verhältnis zwischen elektrischem und magnetischem Feld bestimmt. Man erhält den entsprechenden Tensoreintrag, der nach Tikhonov [1950] und Cagniard [1953] folgendermaßen definiert ist:

$$\rho_a^{xy} = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_{xy}(\omega)|^2 \quad (2.38)$$

$$\varphi^{xy} = \arctan \left( \frac{\text{Im}(Z_{xy}(\omega))}{\text{Re}(Z_{xy}(\omega))} \right). \quad (2.39)$$

Abhängig von der räumlichen Verteilung des Widerstandes im Untergrund hat der Impedanztensor unterschiedliche Eigenschaften .

Für den eindimensionalen Fall sind die zwei Einträge auf der Nebendiagonale des Impedanztensors bis auf ihr Vorzeichen identisch und die zwei Einträge auf der Hauptdiagonalen Null, da senkrecht zum einfallenden Magnetfeld kein elektrisches Feld erzeugt wird.

Für den zweidimensionalen Fall ist die Leitfähigkeit  $\sigma$  konstant parallel zur Streichrichtung  $y$  und variiert nur mit der Tiefe  $z$  und der Position auf dem Profil  $x$  (s. Abbildung 2.6). In diesem Fall entkoppeln sich die Maxwell- Gleichungen aufgrund von  $\frac{\partial}{\partial x} = 0$  in zwei Gleichungssysteme (Losecke and Knödel [1985]). Hierbei unterscheidet man die sogenannte Tangential Elektrische Mode (TE, E-Polarisation; Primärwelle und induziertes elektrisches Feld verlaufen parallel zur Struktur), bei der keine  $E_z$ -Komponente auftritt und die Tangential Magnetische Mode (TM, B-Polarisation; Primärwelle und induziertes elektrisches Feld stoßen unter rechtem Winkel auf die Struktur), bei der keine  $B_z$ -Komponente auftritt. Die Komponenten des Impedanztensors auf der Hauptdiagonalen sind 0.

$$\begin{array}{l} \text{TE-Mode} \\ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x \quad (2.40) \end{array}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_y \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu_0 H_z \quad (2.42)$$

$$\begin{array}{l} \text{TM-Mode} \\ \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} = i\omega\mu_0 \sigma H_x \quad (2.43) \end{array}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = \sigma E_y \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial y} = -\sigma E_z \quad (2.45)$$

Wenn der anregende Sender nicht orthogonal (d.h. weder parallel noch senkrecht) zum Streichen der Struktur steht, kann trotz einer reinen 2D-Verteilung des Widerstands ein voll besetzter Impedanztensor entstehen. In diesem Fall wird der Impedanztensor in Streichrichtung der 2D-Struktur gedreht (*Swift* [1971]) und die Hauptdiagonaleinträge werden im Idealfall zu 0.

Für den dreidimensionalen Fall unterscheiden sich alle vier besetzten Einträge des Impedanztensors.

Mit dem verwendeten Messgerät können nur die Nebendiagonalelemente  $Z_{xy}$  und  $Z_{yx}$  gemessen werden. Eine Aussage über die Größe der Hauptdiagonalelemente ( $Z_{xx}$ ,  $Z_{yy}$ ) und damit über die Gültigkeit der zweidimensionalen Näherung ist nicht möglich.

## 2.3 Inversionsverfahren

Durch die Anwendung von sogenannten Inversionsprogrammen werden gemessene Daten computergestützt so bearbeitet, dass die aus den Daten erzeugten Modelle (d.h. eine vereinfachte Darstellungen der Realität) möglichst genau die Bedingungen des Untergrundes wiedergeben bzw. reproduzieren sollen.

Dabei unterscheiden sich grundsätzlich zwei unterschiedliche Arten zur Erstellung von Modellen:

1. 'Trial and Error' Vorwärtsmodellierung: Auf Grund von Vorinformationen oder durch reines Ausprobieren (z.B. Monte-Carlo-Methode; s. *Scholl* [2005]) wird versucht ein Modell abzuleiten, welches möglichst gut mit den gemessenen Daten übereinstimmt.
2. Automatische Inversion: Mit Hilfe iterativer Verfahren wird ein Modell gesucht, welches die Messwerte unter Berücksichtigung bestimmter Nebenbedingungen so genau wie möglich reproduziert.

Zur Lösung des automatisierten Inversionsproblems für den zweidimensionalen Fall existieren verschiedene Ansätze. Die Occam-Methode versucht, die Messdaten mit Hilfe möglichst glatter Modelle zu erklären (*Constable et al.* [1987], *de Groot-Hedlin and Constable* [1990]). Neuere Inversionsprogramme lassen scharfe Schichtgrenzen innerhalb der Erdmodelle zu (*Auken and Christiansen* [2004], *de Groot-Hedlin and Constable* [2004]). Weit verbreitet sind Inversionen basierend auf dem Gauß-Newton-Verfahren (*Günther* [2004]), der Methode der nicht-linearen, konjugierten Gradienten (*Mackie et al.* [1997], *Newman and Alumbaugh* [2000], *Rodi and Mackie* [2001]) oder dem Quasi-Newton Verfahren (*Loke and Barker* [1996b], *GeotomoSoftware* [2001]).

Das Hauptproblem aller Inversionsverfahren besteht darin, dass eine große Anzahl von Modellen existieren, die die Messdaten gleich gut innerhalb ihrer Fehler erklären. Die Messdaten lassen sich also nicht eindeutig auf ein einziges Modell zurückführen. Aufgabe der Inversionsverfahren ist es, ein Modell zu bestimmen, welches möglichst gut mit der Realität übereinstimmt und dabei den Messfehler soweit wie möglich reduziert.

### 2.3.1 Das Gauß-Newton Verfahren und nicht-lineare, konjugierte Gradienten

Zur Bestimmung eines Modells, das die Daten optimal erklärt, sind zwei unterschiedliche Ansätze aufgrund der unterschiedlich verwendeten Programme ausgewählt worden. In dem für Geoelektrik verwendeten Inversionsprogramm *DC2DInvRes* von Günther [2004] wird das Gauß-Newton Verfahren verwendet. Für die Auswertung der Radiomagnetotellurik-Daten kam das Inversionsprogramm *rund2inv\_nlcg2\_fast* (Rodi and Mackie [2001]) zum Einsatz, welches die Methode der nicht-linearen, konjugierten Gradienten (NLCG) verwendet. Beide Verfahren werden im Folgenden erläutert.

Nach Durchführung einer Messung liegt ein Messdaten-Vektor  $\mathbf{d}$  vor. Um diese Daten zu interpretieren wird versucht, ein geophysikalisches Modell  $\mathbf{m}$  derart abzuleiten, das die Modellantwort die Daten gut erklärt. Die Modellantwort wird mit Hilfe einer Vorwärtsrechnung  $\mathbf{F}$  aus dem aktuellen Modell abgeleitet. Wäre das aktuelle Modell  $\mathbf{m}$  korrekt, entspräche die mit Hilfe einer Vorwärtsrechnung  $\mathbf{F}(\mathbf{m})$  abgeleitete Modellantwort im Idealfall den Messwerten  $\mathbf{d}$  an der Oberfläche. Diese Aussage lässt sich in eine mathematische Formel (s. z.B. Menke [1984])

$$\mathbf{d} = \mathbf{F}(\mathbf{m}). \quad (2.46)$$

zusammenfassen. Mögliche Abweichungen entstehen, weil bei Messungen immer ein Rauschanteil vorhanden ist, der in die Daten mit einfließt. Die Abweichung zwischen Modellantwort und Messdaten wird durch das Fehler-Residuum  $\mathbf{e}$  angegeben:

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}) \quad (2.47)$$

Das Matrixprodukt  $\mathbf{e}^T \mathbf{e}$  liefert eine Abschätzung darüber, wie gut das Modell die Daten erklärt.  $\mathbf{e}^T$  entspricht der transponierten Vektor  $\mathbf{e}$ . Zur Fehlerabschätzung wird der sogenannte RMS-Fehler verwendet. Der *RMS* (englisch: 'Root Mean Square') ist die mittlere quadratische Abweichung des Modells von den gemessenen Datenpunkten.

$$RMS = \sqrt{\frac{\mathbf{e}^T \mathbf{e}}{N}} \quad (2.48)$$

$N$  ist die Anzahl der Datenpunkte. Da die gemessenen Daten mit unterschiedlich großen Messfehlern  $\sigma_i$  behaftet sind, wird die Wichtungsmatrix  $\mathbf{W}$  eingeführt. Die Datennorm

$$\Phi_d = \mathbf{e}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{e} \quad \text{mit} \quad \mathbf{W} = \text{diag} \left( \frac{1}{\sigma_i} \right) \quad (2.49)$$

stellt ein Maß für die gewichtete Abweichung des Modells von den gemessenen Daten dar. Bekannter ist aber der Ausdruck  $\chi^2 = \Phi_d$ . Das Funktional  $\Phi_d$  stellt ein quantitatives Kriterium zur Beurteilung des Modells dar.

Die Schritte zur Ableitung eines optimalen Modells aus der Datennorm werden im Folgenden erklärt. Zum Beginn der Inversion ist es nötig, ein Startmodell  $\mathbf{m}_0$  anzunehmen, welches aber stark von einem optimalen Modell abweichen kann. Nach jedem Iterationsschritt wird jedoch das Modell soweit verändert, bis eine möglichst große Übereinstimmung zwischen den Daten und der Modellantwort erreicht ist.

$$\mathbf{m}_{k+1} = \Delta\mathbf{m}_k + \mathbf{m}_k. \quad (2.50)$$

Dabei ist  $\mathbf{m}_k$  das Modell nach Iterationsschritt  $k$  und  $\Delta\mathbf{m}_k$  ist die Änderung der Modellparameter, die zu einer Abnahme der Datennorm führt.

Gesucht wird nun das Minimum der Datennorm. Eine notwendige Bedingung ist:

$$\frac{\partial\Phi_d(\mathbf{m}_k + \Delta\mathbf{m}_k)}{\partial\Delta\mathbf{m}_k} = 0. \quad (2.51)$$

Man sucht also eine Korrektur für das aktuelle Modell, die dafür sorgt, dass die Datennorm minimal wird. Da das hier untersuchte geophysikalische Problem nicht linear ist, entwickelt man  $F$  in eine Taylor-Reihe um  $m_k$ :

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}_k + \Delta\mathbf{m}_k) \approx \mathbf{F}(\mathbf{m}_k) + \underbrace{\frac{\partial\mathbf{F}(\mathbf{m}_k)}{\partial\mathbf{m}}}_{\mathbf{J}} \Delta\mathbf{m}_k. \quad (2.52)$$

Hier steht  $\mathbf{J}$  (auch manchmal  $\mathbf{S}$  [‘Sensitivity’] bezeichnet) für die Jacobi- oder Sensitivitätsmatrix, in deren Spalten die Ableitungen der Modellantwort in Bezug auf die Modellparameter stehen. Einsetzen in die Datennorm und Minimierung liefert

$$\frac{\partial}{\partial\Delta\mathbf{m}_k} \underbrace{(\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_k) + \mathbf{J}\Delta\mathbf{m}_k)}_{\mathbf{e}})^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \underbrace{(\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_k) + \mathbf{J}\Delta\mathbf{m}_k)}_{\mathbf{e}} = 0 \quad (2.53)$$

Daraus ergeben sich die grundlegenden Gleichungen

$$\mathbf{J}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{J} \Delta\mathbf{m}_k = \mathbf{J}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{e} \quad (2.54)$$

$$\Delta\mathbf{m}_k = (\mathbf{J}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{e}. \quad (2.55)$$

Dies ist die sogenannte Gauß-Newton Lösung (*Jupp and Vozoff* [1975], *Meju* [1994]) mit deren Hilfe man eine Vorschrift zur iterativen Bestimmung des Minimums erhält. Das Gauß-Newton Verfahren erfordert eine explizite Berechnung der Jakobi-Matrix  $\mathbf{J}$ . Zur effizienten Anwendung dieser Methode muss eine schnellen Berechnung der Jakobi-Matrix durchgeführt werden.

### 2.3.2 Das nicht-lineare konjugierte Gradienten Verfahren

Eine weitere bei der RMT verwendbare Inversionsmethode ist das sogenannte nicht-lineare konjugierte Gradienten ('non-linear conjugate gradients', NLCG) Verfahren. Anstatt durch Berechnung der Jakobi-Matrix wird versucht durch Berechnung der Gradienten der Daten-norm ein Minimum der Datennorm zu finden. Zum Verständnis des NLCG Verfahrens soll zunächst das verwandte 'steepest descent' Verfahren erklärt werden. Das gesuchte Minimum der Datennorm muß in Richtung des negativen Gradienten liegen. Daher erfolgt die Veränderung in Richtung des negativen Gradienten mit einer Schrittweite  $\tau$ .

$$\mathbf{r}_k = \frac{\partial}{\partial \mathbf{m}_k} \Phi_d(\mathbf{m}_k) = -2 \underbrace{\mathbf{J}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W}}_{\text{Gradient}} [\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_k)] \quad (2.56)$$

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k + \tau_k \mathbf{r}_k. \quad (2.57)$$

Die Schrittweite kann über eine iterative Suche festgelegt werden, wobei aber das Konvergenzverhalten des Verfahrens sehr schlecht (*Scales et al.* [1997]) ist. Günstiger erweist sich die Optimierung nicht in Richtung des Residuums, sondern in Richtung vorgegebener Suchvektoren  $\mathbf{p}_k$ , die im Idealfall orthogonal zu einander stehen ('konjugierte Richtungen'). Hierbei macht man sich zu Nutze, dass der Gradient in Gleichung 2.56 ohne explizite Berechnung der Jakobi Matrix bestimmt werden kann (*Rodi and Mackie* [2001]). Das Modell wird wie beim Gauß-Newton Verfahren wieder iterativ verbessert

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k, \quad (2.58)$$

wobei die Schrittweite  $\alpha_k$  durch Suche eines Minimums der Datennorm

$$\Phi_d(\mathbf{m}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k) \quad (2.59)$$

festgelegt wird. Im ersten Schritt folgt man bei der Festlegung der Suchrichtung  $\mathbf{p}_0$  der Methode des größten Gradienten.

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{r}_0. \quad (2.60)$$

Hier steht  $\mathbf{r}$  für das Residuum (vergleiche Formel 2.56). Später wird die Suchrichtung  $\mathbf{p}_k$  nach einer Technik von Polak-Ribière (*Press et al.* [1992]) festgelegt, indem das neue Residuum  $\mathbf{r}_{k+1}$  nach Formel 2.56 und die neue Suchrichtung  $\mathbf{p}_{k+1}$  festgelegt wird:

$$\beta_{k+1} = \frac{\mathbf{r}_{k+1}^T \mathbf{r}_{k+1}}{\mathbf{r}_k^T \mathbf{r}_k} \quad (2.61)$$

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{r}_{k+1} + \beta_{k+1} \mathbf{p}_k. \quad (2.62)$$

Eine Wiederholung wird so lange durchgeführt, bis die Verbesserung der Datennorm kleiner als ein bestimmter Betrag ist, oder der Anpassungsfehler unter ein bestimmtes Niveau sinkt.

Für eine genaue Beschreibung der Implementierung des NLCG-Verfahrens sei auf *Rodi and Mackie* [2001] verwiesen.

### 2.3.3 Regularisierungsparameter und Glättung

Bei 2D-Inversionen teilt man den Untergrund in viele kleine Quader mit einer unendlicher Ausdehnung senkrecht zum Profil, wobei die Schnittebene mit dem Profil ein Messgitter ergibt, dann existieren oft mehr freie Parameter als Datenwerte, welches als 'unterbestimmtes Problem' bezeichnet wird. Die Verwendung der oben beschriebenen Inversionsschemata würde wahrscheinlich zu Leitfähigkeitsmodellen mit stark oszillierenden Parametern führen. Um das Problem der Unterbestimmung zu lösen, erweitert man das Funktional zur Beurteilung des Modells.

$$\Phi = \Phi_d + \Phi_m. \quad (2.63)$$

$\Phi$  setzt sich aus der Modellnorm  $\Phi_m$ , die die Abweichungen zwischen einzelnen Modellzellen steuert, und der Datennorm  $\Phi_d$  zusammen. Die vollständige Funktional hat folgende Form (*Mackie et al.* [1997], *Rodi and Mackie* [2001], *Recher* [2002]):

$$\Phi = \underbrace{[\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m})]^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} [\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m})]}_{\Phi_d} + \underbrace{\lambda \|\mathbf{L}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2}_{\Phi_m}. \quad (2.64)$$

Dabei ist  $\lambda$  der sogenannte Regularisierungsparameter, der den Einfluss der Modellnorm auf die Kostenfunktion kontrolliert.  $\mathbf{L}$  ist ein linearer Operator. Dabei gilt allgemein:

$$\|\mathbf{x}\|_p = \left( \sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p} \quad (2.65)$$

Für den zweidimensionalen Fall schliesst man Variationen in x-Richtung aus und es gilt:

$$\|\mathbf{L}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2 = \int_{\text{Flaeche}} [\mathbf{L}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)]^2 dy dz \quad (2.66)$$

Die Modellnorm wird in Form einer linearen Regularisierung implementiert (*Press et al.* [1992]), welche die Rauigkeit des Modells beschreibt. Verschiedene Autoren verwenden hier unterschiedlichen Verfahren. *Oldenburg and Li* [1999] berücksichtigen bei der Definition der Rauigkeit das Startmodell. Die Integrale der Modellnorm  $\Phi_m(\mathbf{m})$

$$\begin{aligned} \Phi_m(\mathbf{m}) &= \lambda_s \int_{\text{Flaeche}} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^2 dx dz \\ &+ \lambda_x \int_{\text{Flaeche}} \left( \frac{d(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)}{dx} \right)^2 dx dz \\ &+ \lambda_z \int_{\text{Flaeche}} \left( \frac{d(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)}{dz} \right)^2 dx dz \end{aligned} \quad (2.67)$$

werden diskretisiert nach

$$\tilde{R}_0 = \|(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2 + \|(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2 \quad (2.68)$$

$$\tilde{R}_1 = \|\partial_y(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2 + \|\partial_z(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2 \quad (2.69)$$

$$\tilde{R}_2 = \|\partial_y^2(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2 + \|\partial_z^2(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2 \quad (2.70)$$

Dabei sind  $\mathbf{m}_0$  das Startmodell und  $\mathbf{m}$  der Logarithmus der Leitfähigkeiten. Daraus folgt dann für  $\Phi_m(m)$ :

$$\Phi_m(m) = \lambda_s \tilde{R}_0 + \lambda_y \tilde{R}_1^y + \lambda_z \tilde{R}_1^z. \quad (2.71)$$

Sie verwenden also eine gemischte Nebenbedingung. Der erste Term in der Modellnorm minimiert die reinen Abweichungen von einem Startmodell. Der zweite und dritte Term entsprechen der Rauheitsdefinition  $\tilde{R}_1$ , falls  $\lambda_y = \lambda_z$ . *Mackie et al.* [1997] definieren den linearen Operator  $\mathbf{L}$  als Laplace Operator. Diese Definiten entspricht der Rauheitsdefinition  $\tilde{R}_2$ .

Für den zweidimensionalen Fall schließen *de Groot-Hedlin and Constable* [1990] Variationen in x-Richtung aus und schlagen zwei Möglichkeiten für die Definition der Rauheitsmatrix eines Modells vor:

$$R_1 = \|\partial_y \mathbf{m}\|^2 + \|\partial_z \mathbf{m}\|^2 \quad (2.72)$$

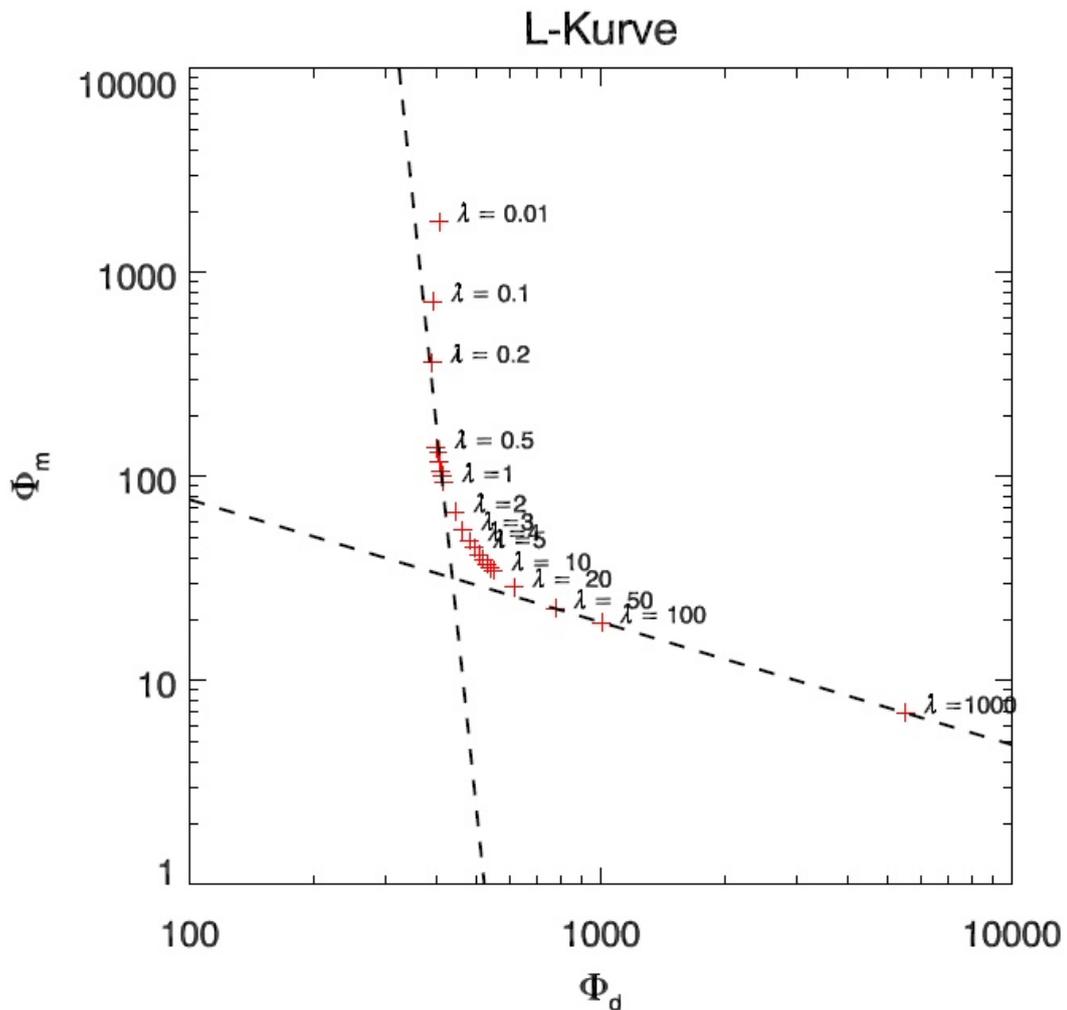
$$R_2 = \|\partial_y^2 \mathbf{m}\|^2 + \|\partial_z^2 \mathbf{m}\|^2 \quad (2.73)$$

Hier steht  $\partial_y$  oder  $\partial_z$  für eine Rauheitsmatrix, die den Unterschied zwischen horizontal oder vertikal benachbarten Zellen bildet.

Die Glättungsbedingung  $R_1$  betont große Strukturen, wohingegen sich die Glättungsbedingung  $R_2$  eher für die Betonung kleinräumiger Anomalien eignet.

Der Regularisierungsparameter  $\lambda$  muss im Fall einer Inversion vorher bestimmt werden. Hierbei besteht eine Wechselwirkung zwischen der Modellnorm und der Datennorm („trade-off“). Sehr glatte Modelle erklären die Daten meist nur unzureichend und sind mit einem großen Anpassungsfehler behaftet. Umgekehrt zeigen Modelle, die die Daten sehr gut erklären, starke Abweichungen zwischen benachbarten Zellen. Trägt man die Modellnorm gegen die Datennorm für verschiedene  $\lambda$  doppelt-logarithmisch auf, zeigt die Kurve im Idealfall einen L-förmigen Verlauf (s. Abbildung 2.7).

Das Geoelektrik-Programm von *Günther* [2004] beinhaltet die Möglichkeit, für jede Iteration automatisch den Punkt zu suchen, der bei möglichst großer Glattheit einen möglichst kleinen Fehler hat. Das ist genau der Punkt maximaler Krümmung der L-Kurve. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den Regularisierungsparameter explizit zu setzen und während der Inversion fix zu halten. Diese Möglichkeit der automatisierten Bestimmung besteht bei dem RMT-Programm von *Mackie et al.* [1997] nicht. Hier werden jeweils viele vollständige Inversionen durchgeführt und am Ende der Punkt der größten Krümmung der L-Kurve bestimmt



**Abbildung 2.7:** Beziehung zwischen Datennorm und Modellnorm für einen synthetischen RMT-Datensatz. In diesem Fall stellt  $\lambda \approx 5$  in etwa den optimalen Regularisierungsparameter dar.

und aufgetragen. Im Beispiel von Abbildung 2.7 entspricht dies einem Regularisierungsparameter  $\lambda \approx 5$ .

## 2.4 Auflösungsvermögen der Radiomagnetotellurik und Geoelektrik

Aufgrund des elektromagnetischen Skineffektes und durch Verwendung mehrerer Frequenzen werden Aussagen über verschiedene Tiefenabschnitte möglich (Frequenzsondierung). Die Tiefe, aus welcher die aufgenommenen Signale stammen oder ab welcher ein Störkörper ein detektierbares Signal hervorruft, kann auf verschiedene Weisen abgeschätzt werden. Mögliche Verfahren für die RMT und die Geoelektrik hierzu sind:

1. die 1,5-fache Skintiefe nach *Spies* [1989] und die zweifache Schwerpunkstiefe  $2z^*$  (*Schmucker and Weidelt* [1975]). Beide werden in Abschnitt 2.4.1 beschrieben;

2. für die Geoelektrik wird im Abschnitt 2.4.2 der Erkundungstiefenindex DoI (Depth of Investigation) nach *Oldenburg and Li* [1999] vorgestellt.
3. im Abschnitt 2.4.3 wird der Sensitivitätsbegriff erläutert;

### 2.4.1 Abschätzungen für die Eindringtiefe

Das  $\rho^*$ - $z^*$ -Verfahrens nach *Schmucker and Weidelt* [1975] ermöglicht für die RMT eine erste, grobe Interpretation der Widerstandsverteilung im Untergrund. Dafür wird aus den gemessenen Werten  $\rho_a$  und  $\varphi$  zuerst die Schwerpunkstiefe  $z^*$  bestimmt:

$$z^* = \sqrt{\frac{\rho_a}{\omega \mu_0}} \sin \varphi \quad (2.74)$$

mit  $f$  als Frequenz in Hertz [Hz]. Abhängig von der Größe der Phase wird ein modifizierten Widerstand nach

$$\rho^* = \rho_a \frac{1}{2 \sin^2 \varphi} \quad \text{für} \quad 0^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ \quad (2.75)$$

$$\rho^* = \rho_a 2 \cos^2 \varphi \quad \text{für} \quad 45^\circ < \varphi \leq 90^\circ. \quad (2.76)$$

berechnet. Das  $z^*$ -Verfahren liefert Informationen über die Eindringtiefen der verwendeten Frequenzen. Dies ist wichtig, wenn die Frequenzen nicht gleichmäßig verteilt sind und Senderlücken existieren (*Bastani and Pedersen* [2001]). Unter Verwendung der Phasen- und Widerstandswerte für die tiefste Frequenz liefert  $2z^*$  eine erste Abschätzung für die maximale Eindringtiefe (*Veeser* [1997], *Recher* [2002]).

*Spies* [1989] schlägt zur Berechnung der maximalen Eindringtiefe die Verwendung der 1,5-fachen Skintiefe vor, wobei ein homogener Halbraum verwendet werden muss, welches in dieser Arbeit so angewendet wird. Bei geschichteten Modellen wird das Verfahren erweitert und eine mittlere Leitfähigkeit verwendet. Dazu wird die integrierte Leitfähigkeit  $S$  und die mittlere Leitfähigkeit  $\bar{\sigma}$  berechnet:

$$S(z) = \int_0^z \sigma(z) dz \quad (2.77)$$

$$\bar{\sigma}(z) = S(z)/z. \quad (2.78)$$

Anschließend werden die Werte für die scheinbare maximale Eindringtiefe  $z_a^{max}$  berechnet, indem  $\bar{\sigma}$  in die Gleichung für die 1,5-fache Skintiefe (vergl. Formel 2.35) eingesetzt wird.

$$z_a^{max} = 1,5\delta \approx 750 \sqrt{1/\bar{\sigma}(z) f_{min}}. \quad (2.79)$$

Der Wert, für den  $z = z_a^{max}$  ist, liefert dann die Abschätzung für die Eindringtiefe.

## 2.4.2 Erkundungstiefenindex

*Oldenburg and Li* [1999] schlagen ein Verfahren vor, um die Erkundungstiefe (DOI - „depth of investigation“) von Geoelektrik-Messungen aus den Messdaten abzuschätzen. Durch Annahme verschiedener Startmodelle legen sie eine Tiefe fest, in der das Modell durch die Daten nicht mehr eingeschränkt werden kann, in der sich also die Glättungsbedingung durchsetzt. Mit Hilfe von zwei oder vier zusätzlichen Inversionen liefert das Verfahren eine von physikalischen Annahmen unabhängige Abschätzung der Eindringtiefe. In dem Programm von *Günther* [2004] ist diese Möglichkeit zur Abschätzung der Erkundungstiefe implementiert. Zur späteren Verwendung wird hier das Verfahren erläutert.

Basierend auf der Gleichung 2.71 (für  $\lambda_s > 0$  und  $\mathbf{m}_0 = \text{konstant}$ ) schlagen die Autoren eine erste Methode zur Berechnung des DOI-Indexes vor. Sie beginnen mit der Annahme zweier Startmodelle  $m_{1r}$  und  $m_{2r}$ , eines ist um einen Faktor 10 größer als der Hintergrundwiderstand, eines um einen Faktor 10 kleiner als der Hintergrundwiderstand. Der Hintergrundwiderstand wird aus dem mittleren scheinbaren Widerstand abgeleitet. Über

$$R(x, z) = \frac{m_1(x, z) - m_2(x, z)}{m_{2r} - m_{1r}} \quad (2.80)$$

bestimmen die Autoren einen Index  $R$  und normieren ihn, so das gilt:  $0 \leq R \leq 1$ . Sie legen 0,2 als die Grenze fest, ab der die Daten das Modell nicht mehr beschränken. Alle Modellzellen mit einem DOI-Index  $R$  größer als 0,2 sind schlecht aufgelöst.

Einige Inversionsverfahren setzten  $\lambda_s = 0$ . Unter dieser Bedingung kann das obige Verfahren so nicht angewendet werden, da das Endmodell unanhängig von jeglichem Startmodell ist. Daher schlagen die Autoren für  $\lambda_s = 0$  eine weitere Methode zur Bestimmung der Erkundungstiefe vor, wobei die zwei Startmodelle folgendermaßen bestimmt werden:

$$m_{01} = c_0 + \gamma z \quad \text{und} \quad m_{02} = c_0 - \gamma z \quad \text{mit} \quad \gamma = 0,01. \quad (2.81)$$

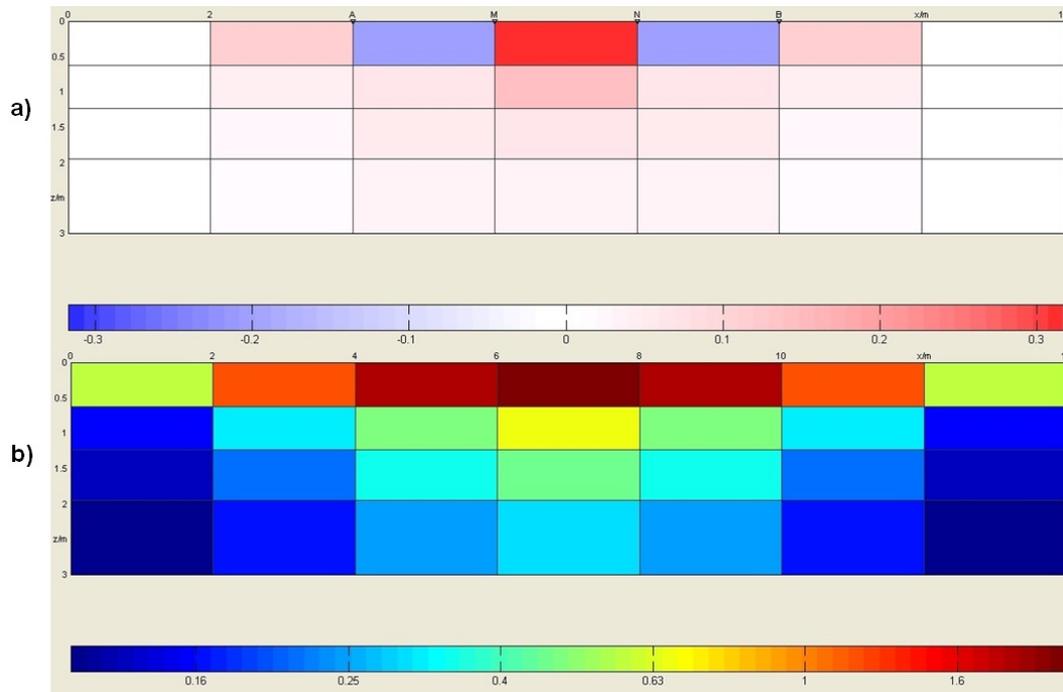
Hier steht  $c_0$  für den Hintergrundwiderstand. Mit diesen Startmodellen werden zwei Inversionen durchgeführt. Über die Bildung der Kreuzkorrelation  $C$  der beiden Modelle in einem  $5 \times 3$  Zellen großen Ausschnitt des Gitters wird ein Index  $R$  definiert, der darüber Aufschluss gibt, ob die Modellzellen gut aufgelöst sind.

$$C = \frac{\sum_i^n (m_{1i} - \bar{m}_1)(m_{2i} - \bar{m}_2)}{\left( \sum_i^n (m_{1i} - \bar{m}_1)^2 \sum_i^n (m_{2i} - \bar{m}_2)^2 \right)^{1/2}} \quad (2.82)$$

$$R = \frac{1 - C}{2} \quad (2.83)$$

Eine Zelle mit einem Erkundungstiefenindex  $R \leq 0,2$  wird als gut aufgelöst betrachtet. *Oldenburg and Li* [1999] stellen ihr Verfahren für Gleichstrom-Geoelektrik-Daten und Messwerte der Induzierten Polarisation vor. *Seher* [2005] verwendet das Verfahren auch zur Abschätzung der Eindringtiefe bei RMT-Daten. Das Programm von *Günther* [2004] verwendet das erste der beiden möglichen Verfahren.

### 2.4.3 Sensitivitäten und Überdeckung



**Abbildung 2.8:** Schematische Darstellung a) der Sensitivität und b) der Überdeckung für eine Vierpunkt-Auslage, wie sie das Programm *DC2DInvRes* von Günther [2004] verwendet.

Der Sensitivitätsbegriff ist von grundlegender Bedeutung für geophysikalische Messungen, da er eine quantitative Erfassung der Empfindlichkeit eines Messverfahrens für Untergrundstrukturen ermöglicht. In dieser Untersuchung beschreibt die Sensitivität die Empfindlichkeit eines gemessenen Wertes für eine Leitfähigkeitsänderung im Untergrund. Konkret entsprechen die Sensitivitäten den partiellen Ableitungen der gemessenen Werte nach den einzelnen Modellparametern, also den Einträgen der Jacobi-Matrix (s. Gleichung 2.52):

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i(m)}{\partial m_j}. \quad (2.84)$$

Für eine einzelne Geoelektrik-Messung ist die Sensitivität über einem homogenen, diskretisierten Untergrund in Abbildung 2.8(a) dargestellt. Eine positive Sensitivität ist zwischen den Potentialelektroden *M* und *N* erkennbar, sowie eine negative Sensitivität zwischen den Strom- und Potentialelektroden *A* und *M* bzw. *N* und *B*. Dies gibt Aufschluss darüber, wie sich eine Veränderung des Widerstandes auf den Messwert an der Erdoberfläche auswirken würde. Ist der Wert von  $J_{ij}$  positiv, so führt eine Vergrößerung des Modellparameters für Zelle *j* zu einer Vergrößerung der Modellantwort  $F_i$ . Für große Datenmengen ist es entgegen einem eindimensionalen Fall nicht möglich, die komplette Sensitivitätsmatrix für alle Kombinationen von Modellparametern und Messwerten darzustellen. Stattdessen wird die Überdeckung („Coverage“,) verwendet, die abhängig vom Programm unterschiedlich definiert ist:

$$\text{Günther [2004]: } cov_j = \sum_{i=1}^N |J_{ij}| \quad (2.85)$$

$$\text{Mackie et al. [1997]: } cov_j^{RMT} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{J_{ij}}{\tilde{\sigma}_i} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (2.86)$$

Hier steht  $\tilde{\sigma}_i$  für den gedachten Messfehler mit konstantem Betrag 1. Dargestellt wird der integrative Effekt, den die Änderung des Widerstandes einer Modellzelle auf alle Messwerte hat. Eine Zelle mit niedriger Überdeckung hat nur einen geringen Einfluss auf die Messwerte. Sowohl für RMT als auch Geoelektrik wird der Wert logarithmisch dargestellt. Das Geoelektrik-Inversionsprogramm von *Günther* [2004] berechnet automatisch die Überdeckung. Für das Inversionsprogramm von *Rodi and Mackie* [2001] besteht die Möglichkeit, nachträglich die Überdeckung auszurechnen, da hier die Jacobi-Matrix für die Inversion nicht explizit ausgerechnet wird. *Recher* [2002] schlägt vor, die Überdeckung in Gleichung 2.86 nachträglich noch mit der Fläche der einzelnen Gitterzellen zu normieren. Diese Normierung ist nur nötig, wenn Überdeckungen auf verschiedenen Gittern oder von verschiedenen Messverfahren miteinander verglichen werden sollen.

#### 2.4.4 Auflösungsmatrix

Ein wichtiges Werkzeug, um die Vertrauenswürdigkeit eines Modells gegenüber der Wirklichkeit abschätzen zu können, ist die Auflösungsmatrix und die in ihr enthaltenen sogenannten 'Importances'. Diese zeigen, wie gut die Inversionsparameter aufgelöst sind. Für eine ausführlichere Darstellung wird auf *Menke* [1984] und *Meju* [1994] verwiesen.

Ausgehend von der Gauss-Newton Lösung aus Gleichung 2.55 schreiben wir in der allgemeinen Form

$$\mathbf{m}_{est} = \mathbf{F}^{-g} \mathbf{d}, \quad (2.87)$$

wobei  $\mathbf{F}^{-g}$  die generalisierte Inverse bezeichnet, mit welcher wir die Auflösung des geschätzten Modells untersuchen können. Weiteres Umformen von  $\mathbf{d}$  liefert:

$$\mathbf{m}_{est} = \mathbf{F}^{-g} \mathbf{F} \mathbf{m} = \mathbf{R} \mathbf{m}. \quad (2.88)$$

mit  $\mathbf{R} = \mathbf{F}^{-g} \mathbf{F}$  als Parameter-Auflösungsmatrix. Diese Matrix bestimmt, nach Multiplikation mit dem Modell-Vektor, die Linearkombination der Schichtparameter, die aufgelöst werden können. Die Diagonalelemente werden 'Importances' ('Wichtigkeiten') der entsprechenden invertierten Schichtparameter genannt. Wenn die Auflösungsmatrix der Einheitsmatrix entspricht, ist das Modell eindeutig aufgelöst, welches aber in der Praxis aufgrund der Messfehler nicht vorkommt. Daher ist es dann wünschenswert, wenn  $\mathbf{R}$  durch die Hauptdiagonaleinträge dominiert wird.

### 2.4.5 Gitter-Diskretisierung

Für die beiden verwendeten Methoden werden für eine optimale Auflösung der Daten unterschiedliche Gitter-Diskretisierungen verwendet. Aufgrund der heutzutage üblichen Multi-Elektrodenmessgeräte orientieren sich die Gitter für die Geoelektrik an den Abständen der Elektroden, bei der RMT sind die Gitterbreiten von den verwendeten Frequenzen abhängig.

In der Geoelektrik ist es üblich die Erde in ein rechteckiges Gitter zu unterteilen. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- das Gitter besteht aus zwei-dimensionalen rechteckigen Zellen;
- die Quellen und die Messstationen (d.h. die Elektroden) müssen auf den Knotenpunkten liegen;
- das Gitter muss über das Messgebiet hinaus erweitert werden, sodass die Randwerte auf den Ecken des Messgebietes graduell auf 0 reduziert werden können;
- das Randwertproblem wird (meist) über finite Differenzen gelöst;
- die Lösung gibt die Potentiale an den Knotenpunkten zurück;
- es wird das gleiche Gitter für Vorwärts- und Inversionsrechnungen benutzt.

Unterhalb des Profils wird das Gitter in  $2 \cdot a + 10$  laterale Zellen (mit  $\Delta x = a$  oder  $a/2$  bei guter Datenqualität) und  $2 \cdot n + 8$  vertikale Zellen (mit  $\Delta z = a/2$  oder  $a/4$  bei guter Datenqualität) unterteilt, wobei  $a$  die Anzahl der Stationen / Elektroden und  $n$  die Anzahl der Potentialmessungen (s. Abb. 2.3) ist (*Oldenburg and Li [1999]*). Die zusätzlichen Rand-Zellen werden dabei nicht-linear erweitert.

Für das RMT-Gitter werden die Regeln nach *Wannamaker et al. [1987]* bzw. *Smith and Booker [1991]* verwendet.

- Berechnung der minimalen und maximalen Skintiefe  $\delta_{min}$  und  $\delta_{max}$ , basierend auf den minimal und maximal gemessenen Werten für  $\rho_a$ .
- Division des Stationsabstandes durch zwei, bis der Wert kleiner als die minimale Skintiefe ist. Dieser Wert wird als Zellenbreite verwendet. Dies ergibt eine horizontale Zellenlänge zwischen  $\delta_{min}$  und  $\delta_{min}/2$ .
- Einfügen horizontaler Randzellen, bis für die Entfernung zum untersuchten Gebiet gilt:  $\Delta x \geq 8 \cdot \delta_{max}$ . Die Zellenbreite nimmt exponentiell zu.
- Erzeugung eines vertikalen Gitters, beginnend mit  $\delta_{min}/20$ . Die Höhe der Zellen nimmt exponentiell zu, bis gilt:  $z \geq 8 \cdot \delta_{max}$ . Der Stützstellenabstand wurde wie folgt gewählt:

$$\exp(0,2 \cdot i) \quad \text{mit} \quad i = 1 - N$$

Zwischen  $\exp(0)$  und  $\exp(1)$  liegen hier also fünf Stützstellen.

*Smith and Booker* [1991] verwenden für ein vertikales Gitter folgende Kriterien:

- $z_0$  sei 1/5 bis 1/10 der Skintiefe des niedrigsten Widerstandes für die höchste Frequenz (d.h. die kleinste Skintiefe).
- Ein konstanter Faktor von 1.05 bis 1.2 wird verwendet, um den Knotenpunkt-Abstand bis auf 3 Skintiefen der längsten Periode bzgl. des durchschnittlichen Widerstandes dieser Schicht (d.h.  $\delta_{max}(f_{min}(\rho_{Durchschnitt}))$ ) zu erweitern.

### 2.4.6 Übersicht über die Widerstandsverteilungen im Boden

Die im Rahmen des NORISC-Projektes durchgeführten Messungen erlaubten keine detaillierten Untersuchungen bzgl. der in-situ Verteilung von Widerständen oder eine Analyse der Porosität und Leitfähigkeit von Bodenproben (*Archie* [1942]). Um dennoch einen Überblick über mögliche Widerstandsverhältnisse im Boden zu bekommen, zeigt die Tabelle 2.2 die spezifischen Widerstände für einige Lockersedimente, organogene und anthropogene Ablagerungen, Gesteine und Wässer nach *Knödel et al.* [1997] auf.

Im Gegensatz zu natürlich vorkommenden Widerständen haben Erdöle einerseits sehr hohe Widerstände, andererseits können Haus- und Industriemüll sehr niedrige Widerstände haben und über 4 Skalenbereich hinweg reichen. Daher ist es für Kalibrierungszwecke wichtig, Referenzprofile außerhalb kontaminierter Gebiete zu haben, um so durch Vergleich der Modelle Hinweise auf die Verbreitung möglicher Kontaminanten zu bekommen.

Material	Minimum (Ohm-m)	Maximum (Ohm-m)
Kies	50 (wassergesättigt)	$> 10^4$ (trocken)
Sand	50 (wassergesättigt)	$> 10^4$ (trocken)
Schluff	20	50
Geschiebemergel	30	70
Lößlehm	30	100
Lehm (als Ziegel)	500	5000
Ton (erdfeucht)	3	30
Ton (trocken)		$> 1000$
Torf, Humus, Schlick	15	25
Erdöl	$10^9$	$10^{12}$
Haus- u. Industriemüll	$< 1$	$\geq 10^4$ (Plastik)
Sandstein	$< 50$ (klüftig, feucht)	$\geq 10^4$ (kompakt)
natürliche Wässer	10	300
Salzlaugen	$< 0,1$	

**Tabelle 2.2:** Spezifischen Widerstände für einige Lockersedimente, organogene und anthropogene Ablagerungen, Festgestein und Wässer nach *Knödel et al.* [1997].

## 2.5 Kohlenwasserstoff-Problematik in der Geophysik

Auf drei der vier Testflächen (s. Tabelle 4.1) waren Kohlenwasserstoffe Ursache der Kontamination und werden deshalb bzgl. ihrer physikalischen Eigenschaften hinsichtlich elektrischer Widerstandsmessungen näher betrachtet.

Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Kohlenwasserstoffen und deren Produkten geschehen durch Unfälle oder unsachgemäße Benutzung Kontaminationen des Bodens und des Grundwassers, z.B. durch Schäden an einer Pipeline, defekte Lagerbehälter, nachlässige Handhabung, etc.. Das Ziel bei der Anwendung geophysikalischer Methoden bei einer Kontamination ist es hierbei mit möglichst nicht-invasiven Techniken Aussagen über Existenz, Quellen, Lage und Ausbreitung der Kontamination zu treffen.

Da häufig ein geringer Level des geophysikalischen Kontrastes zwischen Kontaminanten und Hintergrund des Bodens bzw. Gesteins vorliegt und der Level der Konzentrationen, ab denen diese unter behördliche Angelegenheiten fallen, niedrig liegt, ist eine eindeutige Detektion von Kohlenwasserstoffen und organischer Kontamination eine der schwierigsten Aufgaben der nicht-invasiven geophysikalischen Methoden. Widerstands- und EM-Methoden können solche Kontaminationen lokalisieren, die wichtige Frage dabei ist jedoch, welche Kontaminations-Grade verlässlich lokalisiert werden können. Daher ist es wichtig, die Interaktion zwischen den chemisch-kontaminierten und Matrix-Materialien zu kennen. Die auffälligsten Kontaminanten sind solche, die in Wasser unlöslich sind oder chemisch mit Tonmineralen reagieren. Solche Beispiel sind Toluene und Tetra-Chlorethene. Beide sind gering löslich in Wasser, haben einen hohen elektrischen Widerstand und eine geringe dielektrische Permittivität, welche für Bodenradar-Untersuchungen von Bedeutung ist.

Um Kontaminanten mit geophysikalischen Methoden zu lokalisieren, müssen diese eine physikalische Eigenschaft aufweisen, die sich gegen den Hintergrund abhebt. Tabelle 2.3 gibt eine Übersicht einiger der am häufigsten vorkommenden organischen chemischen Kontaminanten des Superfund-Projektes (Feldstudien) der amerikanischen Umweltbehörde US EPA (*Plumb and Pitchford* [1985]) und deren elektrische Widerstände.

Aufgrund des hohen elektrischen Widerstandes können Kohlenwasserstoffe auch durch Widerstandsmessungen lokalisiert werden, wenn die Kontaminanten den porösen Boden vollständig durchnässen. Ohne diese Durchnässung bleibt ein dünner Wasserfilm als ein kontinuierlicher Strompfad bestehen, daher wäre eine Änderung in der Leitfähigkeit, auch mit signifikanten Mengen an Kontaminanten, eher gering.

Im Laufe der Jahre wurden eine Reihe von elektrischen- und elektromagnetischen Methoden angewandt (*Benson et al.* [1997]; *Benson and Mustoe* [1997]; *Vanhala* [1997]; *Rühlow et al.* [1999]; *Atekwana et al.* [2000]; *Werkema et al.* [2002]; *Modin et al.* [1997]; *Mackedanz* [2005]). Neben diesen Feldmessungen wurden auch eine Reihe von Laboruntersuchungen zur Klärung der Frage, welche Auswirkungen Kohlenwasserstoffe auf die Leitfähigkeit des Untergrundes haben, durchgeführt (*Vanhala* [1997]; *Gajdos and Kral* [1995]; *Atekwana et al.* [2001]).

Die Anwesenheit einer auf dem Grundwasser schwimmenden Kohlenwasserstoff-Schicht kann eine Art Schattenzone produzieren (*Mazic et al.* [1990]), den elektrischen Widerstand

Chemische Komponente	spez. Schwere	sol	vap	$\epsilon_r$	logR
1. Trichlorethen (TCE)	1,46	0,11	8	3,42	6
2. Dichlormethan	1,32	1,5	50	9	8
3. Tetrachlorethen (PCE)	1,62	0,01	2	2,3	7
4. Toluen	0,87	0,05	4	2,4	7
5. 1,1-Dichlorethan	1,17	0,5	10	?	7
6. Bis(2-ethylhexyl)Phthalate	0,98	$4 * 10^{-5}$	$10^{-8}$	5	?
7. Benzen	0,88	0,17	10	2,28	9
8. trans-1,2-Dichlorethen	1,25	0,6	40	2,1	?
9. 1,1,1 - Trichlorethan	1,33	0,2	14	7,5	6
10. Cloroform	1,49	0,8	4,8	20	8

**Tabelle 2.3:** Übersicht über die 10 häufigsten organischen chemischen Kontaminanten (Plumb and Pitchford [1985]). Die spezifische Schwere ist in  $g/cm^3$  angegeben, sol ist die wässrige Löslichkeit in Gewichtsprozent, vap ist der Dampf-Druck in kiloPascal,  $\epsilon_r$  ist die dielektrische Permittivität relativ zum leeren Raum und logR ist der 10-er Logarithmus des elektrischen Widerstandes.

erhöhen (Yang and You [1999], Tezkan et al. [2005]) oder erniedrigen, entweder z.B. durch Herunterspülen eines Salz-Lauge von der Oberfläche oder durch sogenannte Biodegradation.

Atekwana et al. [2001] zeigen in ihrem Laborversuch, dass durch mikrobiologischen Abbau von Kohlenwasserstoffen Säuren gebildet werden, die die chemische Verwitterung des Gesteins erhöhen und durch eine Erhöhung der sogenannten Total Dissolved Solids (TDS) im Porenwasser eine Erhöhung der Leitfähigkeit bewirken. Ein wichtiger Faktor bei diesem Prozess ist die Zeit und das Vorhandensein von Nutriden für Bakterien, weiterhin ob die Reaktion unter aeroben unter anaeroben Bedingungen stattfindet. Modin et al. [1997] führen die von ihnen beobachtete Erhöhung der Leitfähigkeit ebenfalls auf den Einfluss von Bakterien zurück, welche die Kohlenwasserstoffe zersetzen und in Säuren umwandeln. Diese wiederum lösen zusätzliche Ionen aus dem umgebenden Gestein und erhöhen somit die Anzahl der freien Ladungsträger. Informationen über den Wechsel der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften auf Grund von Biodegradation in oberflächennahen Bedingungen sind in Bailey et al. [1973], Modin et al. [1997] und Sauck [1998] veröffentlicht.

Gajdos and Kral [1995] untersuchten im Labor die Leitfähigkeit von Sanden in Abhängigkeit des prozentualen Anteils an Ölen und Benzin im Porenraum. Sie beschreiben eine Leitfähigkeitserhöhung bis zu einem Volumenanteil von 10% und einer Leitfähigkeitserniedrigung oberhalb dieses Anteils am Gesamtvolumen. Zurückzuführen sei dies auf eine anfängliche Verdrängung des Porenwassers durch die Verunreinigungen von den Porenwänden in die Mitte des Porenraumes, worauf es zunächst zu einer erhöhten elektrolytischen Leitfähigkeit durch die Bildung von Ionenpfaden kommt. Dieser Prozess endet, wenn bei steigendem Volumenanteil der Verunreinigung die Ionenpfade unterbrochen werden.

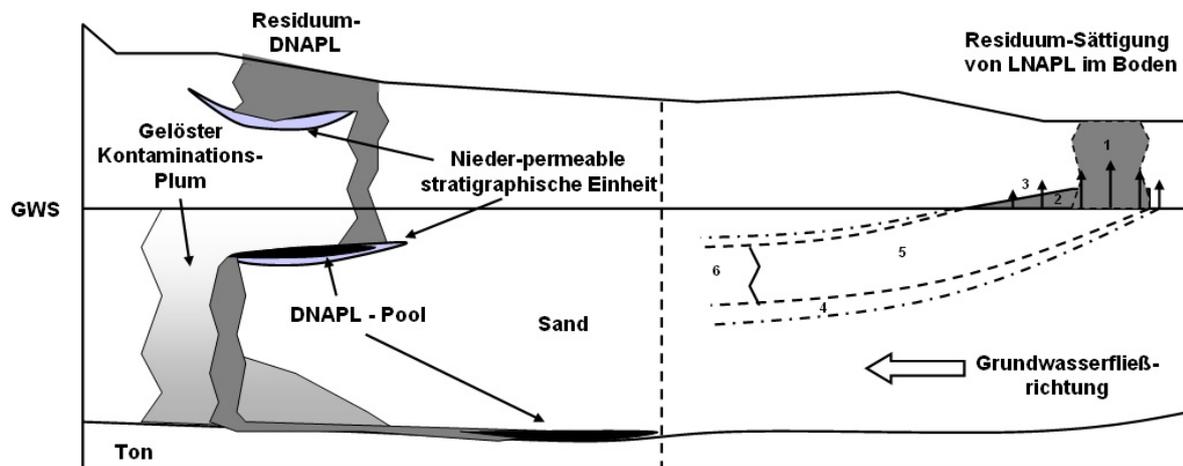
Bei Vanhala [1997] führte die Laboruntersuchung von Sanden und glazialen Sedimenten zu dem Ergebnis, dass bei fast allen Proben nach Verunreinigung durch neues oder gebrauchtes Motoröl eine Leitfähigkeitserhöhung zu beobachten war. Diese blieb bis zu einem Volumenanteil der Verunreinigung von 10 % bestehen und war kurz nach der Verunreinigung am

stärksten ausgeprägt, und schwächte sich im Verlauf der Zeit etwas ab. Er erklärt die erhöhte Leitfähigkeit durch einen Anstieg der Anzahl an Ionen in der Porenflüssigkeit, die durch das Öl von den Porenwänden gelöst worden sind.

*Benson and Mustoe* [1997] grenzen eine Grundwasserkontamination durch Benzin in Nord-Arizona (USA) aufgrund ihrer erhöhten Leitfähigkeit gegenüber der ungestörten Umgebung ein. Bei der Untersuchung von *Benson et al.* [1997] in Utah (USA) hingegen konnte eine Benzinkontamination des Grundwassers durch eine erniedrigte Leitfähigkeit lokalisiert werden.

*Rühlow et al.* [1999], *Atekwana et al.* [2000], *Sauck* [2000], *Kvapil and Mares* [2003] und *Mackedanz* [2005] geben weitere Feldbeispiele für die Eingrenzung eines durch Kohlenwasserstoffe kontaminierten Gebietes aufgrund seiner erhöhten Leitfähigkeit gegenüber der ungestörten Umgebung.

Der Formationsprozess einer Kohlenwasserstoff-kontaminierten Fläche ist an die chemischen Reaktionen und Variationen der physikalischen Charakteristiken des Mediums gebunden (*Sauck* [1998; 2000], *Atekwana et al.* [2001]). Nach *Sauck* [1998] wird eine anomale Leitfähigkeitserhöhung durch einen Anstieg in den gelösten Feststoffen (Total Dissolved Solids, TDS) in der Säure-Umgebung durch bakteriologische Einwirkung im inneren Teil der vadosen Zone oder unterhalb des Grundwasserspiegels verursacht. *Atekwana et al.* [2003] zeigen, dass Widerstände in kontaminierten Böden eine schlechte Korrelation mit den Porenwasser-Widerständen haben, dieses konnte aber durch Labor-IP-Messungen erklärt werden. Die Änderungen der Bodenwiderstände erzeugten einen Anstieg der oberflächlichen Widerstände und weniger in einem Anstieg der elektrolytischen Widerstände (*AbdelAal et al.* [2004]).



**Abbildung 2.9:** Skizze von LNAPL (nach *Sauck* [2000])- und DNAPL-Kontaminationen (nach *Be-dient et al.* [1999]) im Untergrund. Während LNAPL's sich erst auf dem Grundwasserspiegel (GWS) in dessen Fließrichtung ausbreiten und dann langsam absinken, sickern DNAPL's direkt solange ab, bis sie auf eine nieder-permeable Barriere (z.B. Ton) stoßen.

In Abhängigkeit der Dichte lassen sich Kohlenwasserstoffe, sogenannte NAPL's (Non Aqueous Phase Liquids) in zwei Kategorien unterscheiden, solche mit einer geringeren Dichte als Wasser (LNAPL: Light Non Aqueous Phase Liquids) und einer größeren Dichte (DNAPL: Dense Non Aqueous Phase Liquids) (s. Tabelle 2.3). Diejenigen mit einer geringen Dichte sickern

durch den Boden und breiten sich auf dem Grundwasserspiegel aus, während diejenigen mit größeren Dichten weiter durch das Grundwasser in den Untergrund sickern und sich in niederpermeablen Mulden sammeln. Daher sind DNAPL's mit nicht-invasiven Methoden schwerer zu lokalisieren als LNAPL's. Die Abbildung 2.9 nach *Bedient et al.* [1999] und *Sauck* [2000] veranschaulicht dieses Verhalten. *Sauck* [2000] hat basierend auf den bisherigen Labor- und Feldversuchen ein geoelektrische Widerstandmodell entwickelt, das in Abhängigkeit von Lithologie und Ausbreitungsgeschichte die unterschiedlichen Effekte des Einflusses von Kohlenwasserstoffen auf die Leitfähigkeit des Untergrundes erklären kann. Dieses Modell wird in seinen Grundzügen im folgenden vorgestellt.

Abbildung 2.9 (LNAPL-Sektion) zeigt einen Schnitt durch einen durch Kohlenwasserstoffe kontaminierten Bereich, der im Modell in sechs Zonen eingeteilt ist:

1. *Zone 1: Vadose Zone direkt unter der Kontamination*

Als Vadose Zone wird der nicht wassergesättigte Bereich oberhalb des Grundwasserspiegels bezeichnet. Man unterscheidet zwischen Punktquellen mit einem lokal begrenzten Eintrag und Flächenquellen, bei der der Eintrag über eine weite Fläche erfolgt. Zusätzlich ist die Dauer des Eintrages zu beachten. Bei einer Punktquelle mit kurzem Eintrag wird die Auswirkung auf die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund gering und ein Nachweis der Änderung mit geophysikalischen Methoden aufgrund der räumlichen Begrenzung nicht möglich sein. Bei einer Flächenquelle kann in der Vadosen Zone zunächst eine Erniedrigung der Leitfähigkeit auftreten, weil die mit Luft gefüllten Porenräume des Gesteins mit schlecht leitenden Kontaminanten gefüllt werden und so die Oberflächenleitfähigkeit der Teilchen herabgesenkt wird. Die zeitlich folgende Entwicklung der Leitfähigkeit hängt dann von einer Reihe von Faktoren ab: Setzt eine bakterielle Umwandlung der Kohlenwasserstoffe in Säuren ein, so kann durch die Loslösung von zusätzlichen Ionen vom Gestein die Leitfähigkeit erhöht werden. In welchem Umfang dieser Vorgang einsetzt, hängt hierbei von klimatischen Bedingungen, Niederschlag und der 'Angriffsfläche' und 'Angriffsdauer' der Säuren im Porenraum ab. Inwieweit die Leitfähigkeitsänderung sich von der Hintergrundleitfähigkeit des ungestörten Gesteins abhebt, wird von dessen Anteil an gelösten Ionen abhängen. Umso höher bereits hier der Anteil an gelösten Ionen ist, umso geringer wird der Kontrast ausfallen und um so schlechter wird er bei einer Messung aufgefunden werden können.

2. *Zone 2: Bereich des Freien- und Restproduktes*

Die zweite Zone befindet sich direkt oberhalb des Grundwasserspiegels, auf dem sich eine Schicht des freien Kontaminationsproduktes mit einer Mächtigkeit von mehreren Metern ansammeln und durch Schwankungen des Grundwasserspiegels stark vertikal verschmieren kann. Unter Einfluss von sauerstoffhaltigem Regenwasser, Grundwasser und einem maximalen Sättigungsgrad des Porenraumes durch die Kontamination, zeigt dieser Bereich optimale Voraussetzungen für mikrobiologische Reaktionen und somit für die Bildung von Säuren und zusätzlichen freien Ionen. Steigt die Porensättigung durch die Kontamination über einen gewissen Grad an, so kann es aber auch zu einer Unterbrechung der 'Leitungsbahnen' kommen, so dass die elektrolytische Leitung eingeschränkt wird. Die Kontamination kann in dieser Zone also sowohl zu einer

Erhöhung als auch zu einer Erniedrigung der Leitfähigkeit führen, je nachdem inwieweit in den gefüllten Gesteinsporen noch eine elektrolytische Leitung möglich ist.

3. *Zone 3: Vadose Zone direkt über dem Bereich des freien und gelösten Produktes*

Dieser Bereich oberhalb des freien Kontaminationsproduktes wird vor allem durch dessen Ausgasungen beeinflusst. Hierdurch kann es zu einer geringfügigen Reduktion der Leitfähigkeit der Vadosen Zone kommen, die im allgemeinen aber einen hohen Widerstand aufweist, sodass dieser Effekt nicht messbar sein dürfte.

4. *Zone 4: Übergangszone*

Die Übergangszone zwischen den Bereichen in denen die Reaktionen unter Einbeziehung, bzw. unter Ausschluss von Sauerstoff stattfinden, sind zwar aus geochemischer Sicht sehr wichtig, aufgrund ihrer geringen Ausdehnung aber für geophysikalische Untersuchungen zu vernachlässigen.

5. *Zone 5: Anaerober Kern des gelösten Produktes*

Da die Wasserlöslichkeit von Kohlenwasserstoffprodukten sehr gering ist, sind deren Anteile in dieser Zone zu gering um messbare Auswirkungen auf die Leitfähigkeit zur Folge zu haben.

6. *Zone 6: Entferntes Ende des gelösten Produktes*

Diese Zone liegt in Grundwasserfließrichtung in einiger Entfernung zur Quelle der Kontamination. Hier kann es im Extremfall durch eine Mineralablagerungen bzw. Ionenanreicherung aus den Zonen 1, 2, 4 und 5 zu einer Erniedrigung bzw. Erhöhung der Leitfähigkeit kommen.

Gerade auf Flächen mit unbekanntem oder zu erwartenden geringen Konzentrationen von Schadstoffen sind nicht-kontaminierte Referenzprofile wichtig und notwendig, um mögliche gemessene Anomalien im eigentlichen Untersuchungsgebiet korrekt interpretieren zu können. Denn das Problem in der Lokalisierung von Kohlenwasserstoffen durch Widerstands- kontraste besteht darin, dass elektrische Leitfähigkeiten in Abhängigkeit der Fläche sich erhöhen, erniedrigen oder nahezu gleichbleibend sein können. Weiterhin kann der durch Kohlenwasserstoffe bedingte Wechsel der Leitfähigkeiten vernachlässigbar klein im Vergleich zu anderen geologisch bedingten Leitfähigkeitsänderungen (z.B. durch wechselnde Höhe des Grundwasserspiegels; *Olhoef* [1986]) sein.

## **2.6 Kurze Erläuterungen zu den Verfahren EM61, EM31, EM34 und zu magnetischen Messungen**

Im Laufe der Untersuchung einer Testfläche sind mehr als nur eine Untersuchungsmethode angewandt worden, um eine optimale Abdeckung der Untersuchungsziele zu erreichen. Zu diesem Zweck werden die in Kapitel 4 aufgeführten Methoden, wenn sie zur Beschreibung der Testfläche dienen, hier kurz erläutert.

### 2.6.1 EM61 (Metalldetektor)

Der Metalldetektor EM61 benutzt das Prinzip der Transientelektromagnetik. Diese erfasst den Abklingvorgang eines von einer Sendevorrichtung an der Oberfläche erzeugten Magnetfeldes nach Abschalten des Sendestromes. Während vor dem Abschalten nur das Primärfeld des Senders vorhanden ist, werden nach dem Abschalten Ströme in den Untergrund induziert. Diese geben durch ihr zeitliches Verhalten Aufschluss über die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund. TEM-Geräte erfassen je nach Gerät und Erkundungsziel das Abklingen über einen Zeitraum zwischen ein paar  $\mu\text{s}$  und einigen hundert ms. Für eine weitergehende Einführung wird auf *Strack* [1992] oder *Scholl* [2005] verwiesen.

TEM-Verfahren vermeiden durch eine zeitliche Trennung von Senden und Empfangen eine Überlagerung von Primär- und Sekundärfeld. Die Quelle entspricht einer runden oder quadratischen Spule zwischen kleiner ( $m^2$ -Bereich) bis sehr großer (100 m Kantenlänge) überdeckter Fläche. Ein Strom  $I$  wird einer vorgegeben Zeit so schnell wie technisch möglich abgeschaltet, wobei  $\Delta I / \Delta t = \text{const.}$  sein soll ('Rampenfunktion'). Durch den Abschaltvorgang wird im leitfähigen Untergrund ein kreisförmiges Stromsystem induziert, welches sich mit der Tiefe und von der Spule weg ausbreitet und wegen der ohmschen Verluste abklingt ('Rauchringe'). Der spezifische elektrische Widerstand des Bodens bestimmt dabei die Geschwindigkeit der Ausbreitung und die Dämpfung der Feldstärke.

Das EM61 verwendet Spulen von  $1 m^2$ , die direkt aufeinander ('coincident loop') fest montiert angeordnet und bzgl. ihrer Größe für einen Tiefenbereich bis zu 6 m ausgelegt sind. Dabei wird das transiente Signal nicht über den gesamten zeitlichen Verlauf, sondern nur in einem bestimmten Zeitfenster gemessen. Eine geringe Bodenleitfähigkeit bewirkt wegen der ohmschen Verluste das schnelle Abklingen des induzierten Wirbelstroms, während das Signal des Metalls in einem bestimmten Zeitfenster mit größerer Amplitude als die des Bodens vorhanden ist. Es ist möglich eine zweite Empfangsspule 40 cm oberhalb der ersten zu montieren, um so eine Tiefenabschätzung von detektierten Objekten und einen Nachweis oberflächennahe störender Metallteile zu ermöglichen.

Die Tabelle 2.4 gibt eine Übersicht über zu erwartende Messwerte (Spannungen) für Metall-Objekte und einige Störobjekte.

<i>Objekt</i>	<i>Messwert</i>
200 l Metallfaß in ca. 2 m Tiefe	50 mV
Eisenrohr, 10 cm Durchmesser in ca. 1 m Tiefe	150 mV
Gasleitung DN 500 in ca. 2 m Tiefe	500 mV
Stahlbetonfundament, ca. 50 cm überdeckt	2000 mV
Eisenbahnschiene, ca. 50 cm überdeckt	6000 mV
Kanaldeckel an der Oberfläche	3000 mV
PKW in 1 m Abstand	100 mV
LKW in 1 m Abstand	1000 mV

**Tabelle 2.4:** Erfahrungswerte für Messungen von metallischen Objekten und Störkörpern nach *Illich* [1997].

## 2.6.2 EM31 und EM34

Dieser Abschnitt gibt eine kurze Einführung zu den Geräten EM31 und EM34. Für einen größeren Überblick über die Theorie sei auf *Telford et al.* [1990], *Frischknecht et al.* [1991], *Kolodziej et al.* [1997] oder *Knödel et al.* [1997] verwiesen.

Die Messgeräte EM31 und EM34 gehören zu den sogenannten elektromagnetischen Zweispulen-Systemen und benutzen aktive transportable Sender zur Erzeugung elektromagnetischer Wellen. Wegen der Arbeit mit sinusförmigen Wechselstrom im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 60 kHz sind auch die Bezeichnungen 'Niederfrequenzmethoden', 'Wechselstromverfahren' oder 'Frequenzbereichs-Elektromagnetik' gebräuchlich. Durch Induktionswirkung des Magnetfeldes eines in einer Sendespule fließenden Wechselstroms entsteht im leitfähigen Untergrund ein Wirbelstromsystem. Dieses erzeugt ein sekundäres Magnetfeld, welches sich mit dem primären Magnetfeld der Sendespule an der Oberfläche überlagert. An der Empfängerspule wird dann mit einer Luft- oder Ferritkernspule eine magnetische Komponente des Gesamtfeldes registriert.

Durch die induktive Ankopplung können solche Messgeräte auch dort zur Bestimmung der Leitfähigkeitsverteilung verwendet werden, die für Gleichstrom-Geräte nur erschwert oder unmöglich ist. Das betrifft Bereiche, die mit Beton oder Asphalt versiegelt oder mit einer abschirmenden hochomigen Überdeckung versehen sind. Ein weiterer Vorteil sind die geringen Abmessungen in Bezug auf die Eindringtiefe.

Elektromagnetische Zweispulen-Systeme werden zur Kartierung und zur Sondierung eingesetzt. Bei einer Kartierung bewegt man die beiden Spulen in einem festen Abstand durch das Messgelände, für eine Sondierung kann man entweder die Spulenabstände oder die Frequenz ändern, wobei Frequenzen und Spulenabstände aufeinander abgestimmt sein müssen. Die Geräte EM31 bzw. EM34-3 erreichen Erkundungstiefen in Abhängigkeit der Spulenanordnung von bis zu 2 bzw. 50 m. Die Tabelle 2.5 gibt nach *Kolodziej* [1997] eine Übersicht über die von den Geräten verwendeten Konfigurationen, Frequenzen und den maximalen Tiefenbereich.

Gerät	Frequenz [kHz]	Spulenanordnung	Spulenabstand (in m)	max. Aussagetiefenbereich (in m)
EM 31	9,8	vertikal	3,66	2 – 3
EM 31	9,8	horizontal	3,66	4,5 – 6
EM 34-3	6,4	vertikal	10	6 – 7,5
EM 34-3	6,4	horizontal	10	12,5 – 15
EM 34-3	1,6	vertikal	20	12 – 15
EM 34-3	1,6	horizontal	20	25 – 30
EM 34-3	0,4	vertikal	40	24 – 30
EM 34-3	0,4	horizontal	40	50 – 60

**Tabelle 2.5:** Leistungsübersicht der Geräte EM31 und EM34 nach *Kolodziej* [1997].

Für die Berechnung von Modellkurven kann der Untergrund vereinfacht durch eine Leiter-

schleife ersetzt werden. Die daraus abgeleitete Übertragungsfunktion beinhaltet den dimensionslosen Response-Parameter  $Q$ , auch Induktionszahl genannt, welcher die Parameter Sendefrequenz und Spulenabstand mit der Leitfähigkeit verknüpft. Es gilt:

$$Q = \mu \sigma \omega l^2 \stackrel{2.35}{=} r \sqrt{\frac{\sigma \mu \omega}{2}} \quad (2.89)$$

mit  $\mu$  als magnetischer Permeabilität,  $\sigma$  als Leitfähigkeit (in Siemens),  $\omega$  als Kreisfrequenz (in Hz),  $r$  als Spulenabstand in Metern und  $l^2$  als Längendimension, die den Induktionsvorgang bestimmt. Diese entspricht, in Abhängigkeit vom Modell, entweder dem Spulenabstand oder einer geometrischen Dimension des Leiters. Dabei muss jedoch hingewiesen werden, dass die Bedingung für eine Ermittlung der Skintiefe nach Gleichung 2.35 streng nur für ebene Wellen im Fernfeld (d. h. Spulenabstand  $> 5 \delta$  (Skintiefe)) des Sendedipols zutrifft. Daher ist die effektive Eindringtiefe meist geringer.

Die komplexe elektromagnetische Antwort des leitfähigen Untergrundes wird durch die Übertragungsfunktion beschrieben und lautet:

$$f(Q) = \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2} \quad (2.90)$$

Für Werte  $Q < 1$  überwiegt dann der Imaginäranteil, für  $Q > 1$  der Realanteil. Wenn der Response-Parameter  $Q \ll 1$  ist, wird der Inphase-Anteil des Messsignal vernachlässigbar klein und die gesamte Information der Leitfähigkeitsverteilung befindet sich im Imaginärteil und fällt unter das Stichwort 'Leitfähigkeitsmessung bei kleinen Induktionszahlen', was bei der Benutzung von EM31 und EM34 durch eine bestimmte feste Kombination von Spulenabstand und Arbeitsfrequenz erreicht wird.

Nach *Frischknecht et al.* [1991] ergibt sich sowohl für einen vertikalen als auch einen horizontalen magnetischen Dipol die scheinbare Leitfähigkeit

$$\sigma_a = \frac{4}{\mu_0 \omega r^2} \left( \frac{H}{H_p} \right)_{Im} \quad (2.91)$$

mit  $\mu_0$  als Induktionskonstante des Vakuums,  $H$  als gemessene vertikale bzw. tangentielle Komponente (je nach Spulenordnung) des magnetischen Feldes und  $H_p$  als Komponente des primären Magnetfeldes.

Diese Form der Leitfähigkeitsverteilung versagt jedoch, wenn durch metallische Einlagerungen mit extrem hohen Leitfähigkeiten die Induktionszahl  $Q$  einen größeren Wert aufweist und die Inphase-Komponente (d.h. der Realteil des Signals) dominiert. Für den Nachweis metallischer Einlagerungen ist es dann vorteilhafter, die Inphase-Werte direkt zu messen.

### 2.6.3 Kurze Einführung in die Magnetik

Das auf der Erde zu messende Magnetfeld setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen, einem nur sehr langsam (Jahre bis Jahrzehnte) veränderlichen Hauptfeld  $\mathbf{F}_0(t, x, y, h)$  welches aus dem Erdinneren stammt und einem sich schnell (Sekunden bis Tage) veränderlichem Feldanteil  $\mathbf{F}_v(t)$ , der seinen Ursprung außerhalb des Erdkörpers (Außenfeld, Variationsfeld) hat. Zu diesen globalen Anteilen kommt ein nahezu zeitlich konstantes Anomaliefeld  $\delta\mathbf{F}(x, y, h)$ , das die unterschiedliche Magnetisierung des Materials in der oberen Erdkruste widerspiegelt. Als Ursachen dafür sind nicht nur geologische sondern auch anthropogene Anteile (z.B. Abfall, Bauschutt mit Armierungsresten, etc.) in Deponien und Altablagerungen zu sehen.

Als Beträge der magnetischen Flußdichte  $\mathbf{B}$  sind in Europa für das Hauptfeld etwa 40 000 bis 52 000 nT (nano Tesla), für das Variationsfeld 0,1 bis einige 100 nT und für das Anomaliefeld bis zu einigen 1000 nT zu erwarten.

Die Anwendungen der Magnetik liegen z.B. im Auffinden und Abgrenzen von verdeckten Altablagerungen mit magnetisch wirksamen Inhaltsstoffen oder in der lithologischen Gliederung des Untergrundes bei Deponien und Anlage in Gebieten mit kristallinen (magmatischen und metamorphen) Gesteinen.

Als Messgröße wird die magnetische Flußdichte  $\mathbf{B}$  verwendet. In Luft gilt in guter Näherung die Beziehung zwischen Flußdichte und magnetischer Feldstärke  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{B} \approx \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.92)$$

mit  $\mu_0$  als Induktionskonstante des Vakuums.

Das magnetische Anomaliefeld hat seine Ursache in lokalen und regionalen Unterschieden in der Magnetisierung der Gesteine und anderer magnetisch wirksamer Materialien. Man unterscheidet zwischen induzierter ( $\mathbf{i}$ ) und remanenter ( $\mathbf{r}$ ) Magnetisierung, wobei sich diese vektoriell mittels  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_r$  addieren.

Für die induzierte Magnetisierung gilt:

$$\mathbf{M}_i = \kappa \mathbf{H} = \frac{\kappa \mathbf{B}}{\mu_0} \quad (2.93)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} = \mu_0 (1 + \kappa) \mathbf{H} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}_i) \quad (2.94)$$

Eine Übersicht der magnetischen Suszeptibilität  $\kappa$  gibt die Tabelle 2.6.

Nach *Breiner* [1973] liegt die Suszeptibilität für die meisten Eisen- und Stahlobjekte zwischen 10 - 130 SI-Einheiten. Rostfreier Stahl ist praktisch unmagnetisch.

Bei der Magnetik-Untersuchung wurde für die Ungarn-Messung ein Protonenmagnetometer inkl. Gradientensonden genutzt. Sie basieren auf der Messung der Präzessionsfrequenz der Protonen im Erdmagnetfeld nach Abschalten eines Polarisationsfeldes. Die Präzessionsfrequenz

Gestein	$\kappa_{min}$	$\kappa_{max}$
Granit	0	$10^4$
Gabbro	$3 * 10^2$	$8 * 10^4$
Basalt	$4 * 10^3$	$\geq 10^5$
Sandstein, Sand	0	$4 * 10^1$
Schluff, Ton	$10^1$	$9 * 10^2$
Kraftwerksasche	20.000	25.000
Schrottersatz	40.000	750.000

**Tabelle 2.6:** Wertebereich der magnetischen Suszeptibilität  $\kappa$  für einige Gesteine und Deponiematerial (nach Schön [1983] und Jäger [1994]). Einheit in  $10^{-6}$  SI.

ist proportional zur Feldstärke des Totalfeldes. Dieses Gerät benutzt auch den Overhauser-Effekt (Übertragung der Spinnmomente von Elektronen auf Protonen durch Anregung mit elektromagnetischen Wellen einer bestimmten Frequenz bei bestimmten chemischen Verbindungen), wodurch eine quasi-kontinuierliche Messung (ein Messpunkt pro 0,5 Sekunden) ermöglicht wird. Durch eine Gradientenmessung erhält man den Vertikalgradient des Totalfeldes. Der Abstand der Sonden liegt zwischen 0,5 und 2 m. Nach Breiner muss der Abstand kleiner als  $1/3 - 1/10$  des Abstandes  $r$  der Gradientsonde von den Störkörpern sein, welches bei geologischen Störkörpern fast immer, aber bei Deponien nicht immer erfüllt ist.



---

## DAS EU-ATLASTENPROJEKT NORISC

---

### 3.1 Was ist NORISC

NORISC ('Network Oriented Risc assessment with In-situ Screening of Contaminated sites') ist ein Technologie-Entwicklungsprojekt im 5. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission, welche eine integrierte Flächenuntersuchungsmethodologie mit Schwerpunkten auf in-situ Methoden und on-site Techniken für eine genauere Beschreibung von Kontaminationsprofilen in urbanen Räumen beinhaltet.

Die Revitalisierung von brachliegenden Industrieflächen, welche für wiederzubebauende Flächen in urbanen Gebieten vollzogen werden muss, beinhaltet häufig Investitionsrisiken in Form von kontaminierten Flächen. Die Techniken, die heutzutage für Umweltuntersuchungen angewendet werden, sind häufig zeit- und kostenaufwendig und in ihrer flächenhaften Aussage meist ungenügend.

Damit spricht das Projekt ein generelles und nicht nur ein lokales Problem an. Mit dessen Entwicklung und Anwendung soll die europäische Integration hinsichtlich der Untersuchung von Altstandorten vorangetrieben werden, sodass Investoren auch auf kompetente ausländische Firmen zum Lösen eines Umweltproblems zurückgreifen können.

Ein weiteres Anliegen von NORISC war die Integration aller Beteiligten an dem Findungs- und Lösungsprozess eines Altlastproblems. Diese sind beispielsweise:

1. Städtische Einrichtungen
2. Investoren
3. öffentliche und private Grundstücksbesitzer

4. Forschungszentren
5. Ingenieurbüros und Gutachter

Die Aufgaben von NORISC ergeben sich aus der oben erwähnten Problemstellung, den Zeit- und Kostenumfang im Vergleich zu gängigen Standarduntersuchungen erheblich zu reduzieren. Um dies zu bewerkstelligen, wurden folgenden Aufgabenstellungen erarbeitet:

1. Integration und Kombination von neuen und existierenden Methoden, besonders innovativen in-situ und on-site Techniken;
2. Erstellung eines Standardratgebers für die Charakterisierung einer Fläche in Form einer Entscheidungshilfe-Software (Decision Support System; DSS);
3. Demonstration der Effektivität dieses Untersuchungsansatzes und des Entscheidungshilfe-Systems durch Feldtests;
4. Integration von Flächenuntersuchungen mit einem allgemeinen Flächen-Management, welches Daten-Management, Risiko-Auswertung, Sanierungsvorschläge und eine Entwicklung einer Revitalisierungsstrategie enthält.

Die sich daraus ergebenden Ziele lauten:

1. Verbesserung der Qualität und Beschleunigung von Risk Assessment und der Beschreibung von Altlasten;
2. Minimierung von Zeit- und Kostenaufwand bei Altlastenuntersuchungen und Sanierungen;
3. Zugang und Werkzeug des Flächenrecyclings in städtischen Verdichtungsräumen;
4. Reduktion des Grünflächenverbrauchs;
5. Integriertes Visualisierungswerkzeug für Felduntersuchungen und Städteplaner;

Aus diesen Zielsetzungen entwickelte sich ein 3-phasiges Aktions- und Fortschrittskonzept, welches als schematische Übersicht in Abbildung 3.1 zu sehen ist.

1. **Survey:** Sowohl Inhalte bzgl. Charakteristiken von Flächen mit unterschiedlichen Schadstofftypen und Flächenbedingungen, als auch die Notwendigkeiten der verschiedenen Interessenvertreter, welche in das Schadstoff-Management involviert sind, wurden gesammelt. Zusätzlich wurden aktuelle Untersuchungsstandards und Normen analysiert, existierende und neue Untersuchungs- und Assessmentstechniken und Daten - Prozessierungsschritte begutachtet und ausgewertet.

Zum Aufbau des NORISC-Decision Support Systems wurde ein Register von verschiedenen Geo-Untersuchungsmethoden und Geräten aus den Bereichen Biologie, Geochemie, (Hydro-) Geologie und Geophysik erstellt. Hinsichtlich der Erstellung einer späteren optimalen Kombination von Methoden wurde die jeweiligen Leistungsfähigkeiten der einzelnen Methoden sowohl technisch als auch ökonomisch ausgewertet.

## Aktion und Fortschritt:

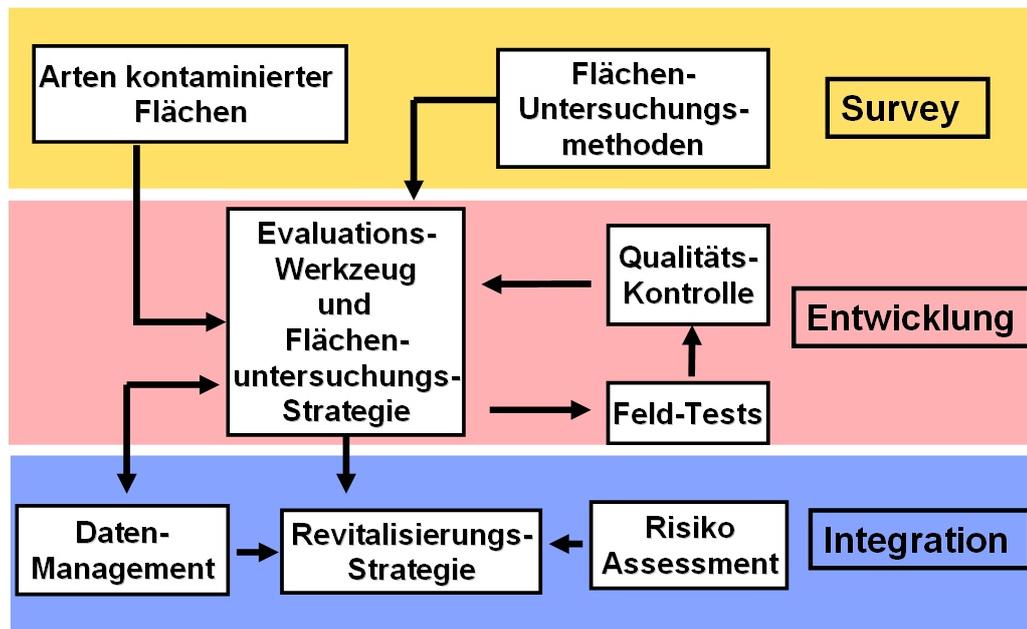


Abbildung 3.1: Schematische Übersicht über den Aktionsablauf und Fortschritt des Projektes.

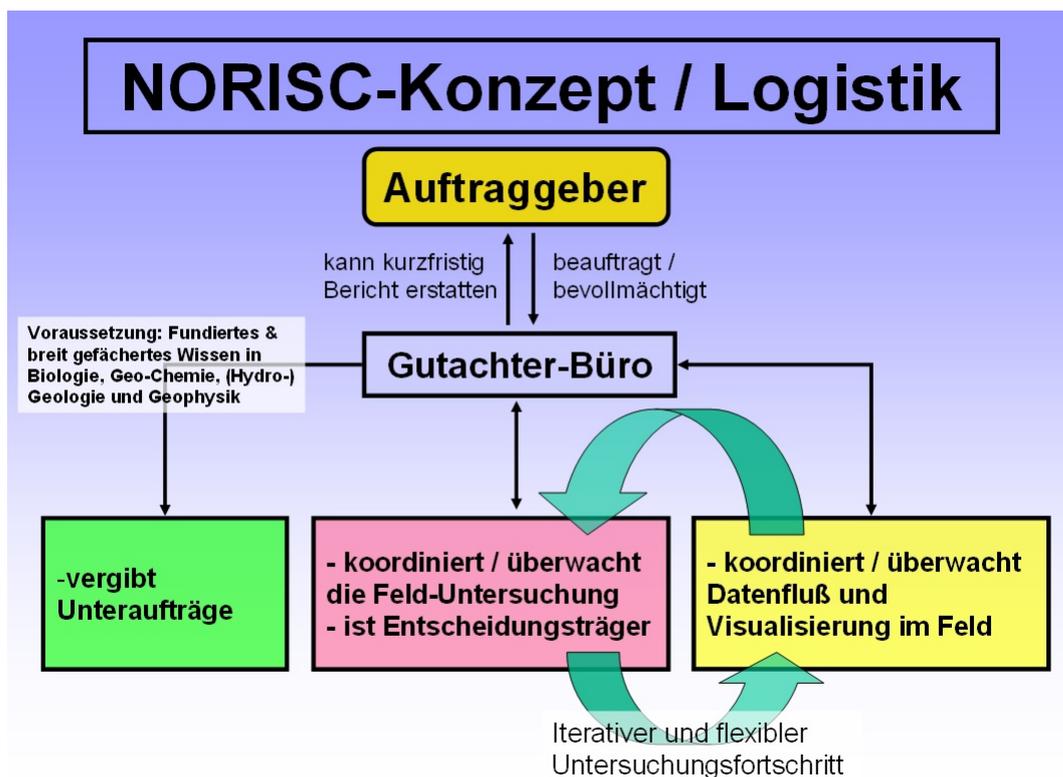
2. **Entwicklung:** Um eine optimale Kombination von Methoden für komplexe Flächenuntersuchungen zu definieren wurde ein Auswahlverfahren in Form einer Entscheidungshilfe - Software (s. Kapitel 3.2) etabliert. Weiterhin wurde eine Flächen - Untersuchungsstrategie (englisch: Site Investigation Strategy; kurz SIS) als Leitfaden für Feld-Aktivitäten entwickelt.

Eine Evaluationsmethodik, welche Kriterien für eine quantitative und qualitative Verifikation der Methoden beinhaltet, wurde definiert, um den neuen, feldorientierten Untersuchungsansatz be- und auswerten zu können. Diese Methodik wurde an ausgesuchten Testflächen (vergleiche Tabelle 4.1) in den Partnerländern ausprobiert, um so die Verlässlichkeit und die Zeit- und Kosteneffektivität im Vergleich zu dem gebräuchlichen 'Bohren-und-ins-Labor-schicken'-Verfahren zu testen.

3. **Integration:** Das NORISC Entscheidungshilfe-System (DSS) wurde zusammengestellt, indem dieses mit Software-Modulen für das Flächen- Management und Real-Zeit - Datenmanagement, welche kompatibel mit den allgemeinen Flächen-Management - Systemen sind, ausgestattet wurden. Auf diese Weise soll ein leichter Austausch an Daten zwischen den unterschiedlichen Ansprechpartnern ermöglicht werden. Diese zusätzlichen Module beinhalten flächenspezifische Risiko-Einschätzungen auf den Menschen sowie Entscheidungen für die Sanierungszielsetzungen für den Boden und das Grundwasser und die Entwicklung einer Revitalisierungs- und Marketing-Strategie, welche ökonomisch die verschiedenen Sanierungsoptionen bzgl. den Anforderungen der Interessenvertreter evaluiert.

Der Punkt 'Entwicklung - Flächen-Untersuchungsstrategie' bedarf hier einer näheren Be-

trachtung und wird in Abbildung 3.2 grafisch veranschaulicht. NORISC geht von einem ganzheitlichen Untersuchungskonzept aus, welches die unterschiedlichen Aspekte und Parteien vernetzt und dafür sorgen soll, dass alle Daten und Ergebnisse zentral verwaltet werden. Diese zentrale Position wird dem ausführendem Gutachter- oder Ingenieurbüro zugewiesen. Nachdem dieses von einem Auftraggeber zu einer Altlast-Untersuchung angewiesen wurde, werden die Untersuchungsparameter in die DSS (s. Kapitel 3.2) eingegeben. Aufgrund der Vielfalt der möglichen Untersuchungsmethoden bzgl. eines Untersuchungszieles muss ein Gutachter-Büro daher umfangreiche Kenntnisse in den Gebieten Biologie, Geochemie, (Hydro-) Geologie und Geophysik aufweisen können, damit die volle Bandbreite der DSS genutzt werden kann. Wurden die Untersuchungsmethoden schließlich festgelegt, werden Unteraufträge für die einzelnen Arbeiten verteilt. Im nächsten Schritt wird die zeitliche Planung und Felduntersuchung vom Gutachter-Büro koordiniert. Dieses fungiert vor Ort als eine Art Manager und hat absolute Entscheidungsbefugnis über die durchzuführenden Arbeiten. Weiterhin werden alle Feld-Daten dem Manager zur Verfügung gestellt, welcher im Gegenzug diese vor Ort und im Kontext mit möglichen anderen Disziplinen visualisieren kann. Auf diese Weise wird eine höchst flexible und zielgerichtete Untersuchung ermöglicht und es kann auch kurzfristig eine Status Quo-/ Rückmeldung an den Auftraggeber erfolgen.



**Abbildung 3.2:** Schematische Übersicht zur Durchführung, Planung, Ausführung und Koordination einer NORISC-Untersuchung.

Im Verlauf des Projektes wurde sich diesem Schema während der Felduntersuchungen (s. Tabelle 4.1) zwar angenähert, jedoch wurde keine optimale Arbeitsweise erreicht. Die beste Verwirklichung dieses Schemas wurden auf der Testfläche in Köln und in Ungarn erreicht, wo auf Grundlage von geophysikalischen Erkundungen zielgerichtet chemischen Proben genommen wurden.

In den USA wurde vor ein paar Jahren das Projekt TRIAD (*Woll et al.* [2003]) auf einer ähnlichen Struktur erbaut, jedoch mit dem Unterschied, dass keine Software in die Entscheidungshilfe mit einbezogen werden soll, sondern ein ausgebildetes Expertenteam dessen Rolle übernimmt. Ausgehend von einer solchen Gruppe sollen dort landesweit Gruppen gebildet und so Altlastuntersuchungen auf einem hohen Niveau durchgeführt werden.

## 3.2 DSS: Decision Support System

Das NORISC Entscheidungshilfe-System führt die Entwicklung einer Methodologie für die Untersuchung und Bewertung einer kontaminierten Fläche, um sowohl insbesondere das Vorhandensein von Schadstoffen im Boden und im Grundwasser als auch die involvierten Risiken und die potentielle Wiederbenutzung zu bestimmen. Bezogen auf umweltfeindliche Schadstoffe, und spezifischer gesehen, auf eine Kontamination des Bodens und des Grundwassers mit gefährlichen Substanzen, wurden Leitfäden und Referenz-Werte für verschiedene Arten von Kontaminationen begutachtet. Diese setzten sich aus den relevanten nationalen Gesetzen der Europäischen Union, einiger angrenzender Staaten und den USA zusammen. Ebenfalls wurden nationale Standards bzgl. der Untersuchung und des Managements von kontaminierten Flächen berücksichtigt. Ein weiterer Punkt war das Feedback von unterschiedlichen Interessenvertretern, um die Erwartungen bzgl. der Verbesserungen der Flächen-Charakterisierung und der Einschätzung (Assessment) zu berücksichtigen.

Um ein Werkzeug zur Auswertung der geeigneten Untersuchungsmethoden zu etablieren wurde ein europäisches Verzeichnis von Kontaminationsprofilen auf der Basis existierender Daten erstellt. Zusätzlich wurde ein Register von unterschiedlichen Untersuchungsmethoden erstellt, welche ihre technischen Beschreibungen und Effizienzbeschreibungen enthält. Folgende Datensätze wurden in die Evaluationsmatrix der DSS integriert:

- Gesetzgebung für Management auf kontaminierten Flächen und Benutzeranforderungen:
  - Anforderungen der Interessenvertreter wurden während der Fallstudien analysiert
  - Kontaminations-Leitfaden und Sammlung von gesetzlichen Grenzwerten
- Charakterisierung von kontaminierten Flächen in einer urbanen Umgebung:
  - Fallstudien in der EU und in den USA
  - Kontaminationsprofile
- Register der Untersuchungsmethoden:
  - Hydro-geologische Flächencharakterisierungsregeln und deren Einschränkung
  - Register der geochemischen Analyse
  - Register der geophysikalischen Untersuchungsmethoden und deren Einschränkung
  - Register der biologischen Untersuchungsmethoden
  - Register der geochemischen und hydro-geologischen Sampling-Methoden

### 3.3 Kontaminationsprofile

Eine repräsentative Auswahl von Kontaminationsprofilen, die als Basis für den chemischen Teil der Entscheidungshilfe-Software dienen, wurde auf europäischer Basis erstellt. Sowohl nationale und regionale öffentliche Entscheidungsträger und städtische Ämter, als auch Flächenbesitzer und Betreiber gaben Auskünfte über typische schadstoffbehaftete Flächen in städtischen Industriegebieten aus ganz Europa.

Jede Aktivität, die Schadstoffe erzeugt, wird mit einem spezifischen Kontaminationsprofil assoziiert, welches die erwarteten Schadstoffelemente und Komponenten auflistet. Dies bedeutet, dass auf der Basis der bekannten früheren Aktivitäten die am wahrscheinlichsten auftretenden Kontaminanten identifiziert werden können, um auf diese Weise die Untersuchungsstrategie und Untersuchungsmethoden festzulegen.

Einen Auszug aus den NORISC-Kontaminationsprofilen zeigt Tabelle 3.1. Chemischen Komponenten, die am wahrscheinlichsten bei entsprechenden industriellen Aktivitäten vorkommen, sind mit einem 'X' markiert.

Schadstoffquelle	Cd	Hg	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn	As
Flughafen		X	X	X	X			
Tierfutterfabrik	X	X						X
Asbestfabrik	X	X		X				
Keramik-, Zement-, Asphalt-Fabrik	X	X	X	X	X	X	X	X
Kosmetik-Herstellung		X					X	
Farben & Lacke	X	X	X	X		X	X	

**Tabelle 3.1:** Auszug aus den chemischem Kontaminationsprofilen.

Zusätzlich wurden die relevantesten hydro-geologischen und geologischen Parameter bestimmt. Diese Parameter sind notwendig, um sowohl die räumliche Verteilung von Schadstoffen im Boden und im Grundwasser als auch die hydro-geologischen Expositionspfade zu charakterisieren.

Die Methoden für die notwendige geologische und hydro-geologische Flächencharakterisierung, inklusive ihrer Einschränkungen, sind in den 'Vorausgehenden Flächenanalyse - Charakterisierungsregeln' ('Preliminary site analysis characterisation rules') aufgeführt, welche ein integraler Bestandteil der entwickelten NORISC - Untersuchungsstrategie ist. Die geologisch-hydrogeologischen Charakteristiken sind zusammengruppiert, um das geologische-hydrogeologische Profil einer Fläche zu formen. Dieses ist in 6 Aspekte gegliedert:

1. Topographie;
2. oberflächennahe Lithologie;
3. geologische Struktur;
4. allgemein Hydro-Geologie;

5. hydrogeologisches Risk-Assessment;
6. Einschränkungen bzgl. Tests;

### 3.4 Untersuchungsmethoden

Ein weiteres Schlüsselement der Evaluationsmatrix zur Auswahl der geeigneten Untersuchungsmethoden war sowohl die Sammlung und Auswertung aller existierenden Sampling-, on-site und labortechnischen, geophysikalischen und biologischen Untersuchungsmethoden als auch die von geostatistischen Auswerteverfahren, die z.T. genutzt oder in der Erprobungsphase sind.

Ein Register aller relevanten Methoden wurde etabliert, wobei die Untersuchungstechniken sowohl technisch als auch ökonomisch ausgewertet wurden. Die für die vorgesehene Art von Untersuchungsflächen vielversprechendsten Methoden wurden entsprechend ihrer praktischen und wissenschaftlichen Relevanz ausgewählt. Da die angestrebten Untersuchungsflächen im Hektar-Bereich liegen sind z.B. luftgestützte Verfahren viel zu teuer und zu aufwendig.

Die Integration der Techniken der verschiedenen Disziplinen und der richtige Einsatz einer Methode waren wichtige Punkte in dieser Phase und wurden von der Universität zu Köln koordiniert und verwaltet. Dabei war zu beachten, dass sich die Methoden bzgl. ihrer Untersuchungsziele ergänzen. Abschließend wurden die verschiedenen Methoden überarbeitet, optimiert und in Hinblick auf den Auswahl-Algorithmus aufeinander abgestimmt.

Die folgende Auflistung zeigt die verschiedenen Methoden-Gruppen und ihre jeweilige Rolle bei der Untersuchung von kontaminierten Flächen.

- **Chemische Analyse:** Fundamentale Untersuchungen, um die Konzentration von Kontaminanten in Boden, Grundwasser, Oberflächenwasser, Luft und Boden-Gase zu bestimmen. On-site Techniken sind dabei ein Schlüsselement des NORISC-Ansatzes.
- **(Hydro-)Geologie:** Bestimmung der geologischen und hydro-geologischen Charakteristiken, welche sich sowohl auf die räumliche Ausbreitung von Schadstoffen als auch auf die Expositionspfade beziehen.
- **Geophysik:** Geophysikalische Methoden untersuchen die physikalischen Eigenschaften des Untergrundes, von strukturellen Diskontinuitäten, Brüchen und Anomalien als auch das Vorhandensein von Kabeln, Rohren, Behältern und Fundamenten. Die Geophysik reduziert die Unsicherheit der Flächencharakterisierung, da sie sowohl die horizontale als auch die vertikale Verbreitung der geologischen Strukturen und Schadstoffquellen angibt.
- **Biologie:** In manchen Fällen wird eine Identifikation der Pathogene benötigt, während andere biologische Methoden toxische Effekte untersuchen. Diese Methoden beziehen sich nicht auf einzelne Kontaminanten, zeigen aber den eigentlichen Effekt der Schadstoffe durch toxische Tests, biologische Indikationen, Monitoring und Bevölkerungs-Assessment.

Zwecks Vorbereitung der Implementierung der geochemischen, (hydro-)geologischen, geophysikalischen und biologischen Methoden in eine Datenbank wurden diese detailliert beschrieben und in einem Excel-Tabellenformat arrangiert. Dieses Register beinhaltet adäquate Untersuchungsmethoden und gibt die benötigten Informationen für das entwickelte Evaluationswerkzeug und erschafft so eine Basis für eine geeignete Kombination von Untersuchungsmethoden.

Die Hauptparameter dabei sind Eignung / Ranking (bzgl. eines Untersuchungszieles), Kosten und Zeit. Einige der verwendeten Parameter für die Zeit- und Kostenberechnung sind Sample-Dichte, Profilabstand, benötigtes Personal, Kosten für Mobilisation/Demobilisation, Mietkosten des Gerätes, umgerechnete Interpretationskosten, gesamte Mannstunden und Gesamtkosten. Diese Faktoren wurde durch Gespräche mit nicht an NORISC beteiligten Firmen und Anbietern, aber auch aus der Literatur entliehen und dienen als Basis für eine Zeit- und Kosten-Effizienzanalyse der von der DSS gelenkten Untersuchungsmethodologie für einen beliebigen Schadstoff bzw. Untersuchungsparameter. Eine gute Übersicht für einzelne geophysikalische Methoden findet sich in *Knödel et al.* [1997].

Das Ranking wird anhand von zwei Beispielen verdeutlicht. Das erste Beispiel in Tabelle 3.2 zeigt das Ranking für chemische Untersuchung an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen inklusive des Detektionslimits. Dabei bedeuten die Abkürzungen: ppm: Teile pro Millionen; ppb: Teile pro Milliarde; LIF: Laser induzierte Fluoreszenz; GC/FID: Gaschromatograph mit Flammen-Ionisationsdetektor; GC/PID: Gaschromatograph mit Photo - Ionisationsdetektor; UV: Ultraviolett. Bzgl. einer möglichen Bodenanalyse sind die beiden Gaschromatograph - Verfahren sehr gut geeignet ('A') und haben die gleichen Detektionsgrenzen. Sollte aber bei einer Wasseranalyse eine möglichst geringe Menge detektierbar sein, wäre die LIF-Methode aufgrund ihrer niedrigeren Grenze die beste Methode, obwohl alle Methoden für Wasser ein 'A' besitzen.

Methode	Eignung			Detektionsgrenze		
	Boden	Wasser	Bodengas	(ppm)	(ppm)	(ppb)
LIF	C	A	D	10 – 100	0.5 – 10	–
GC/FID	A	A	D	0.1 – 1	1 – 50	1 – 50
GC/PID	A	A	D	0.1 – 1	1 – 50	1 – 50
UV Fluoreszenz	C	A	C	0.1 – 1	1 – 50	1 – 50

**Tabelle 3.2:** Auszug aus dem chemischen Ranking im DSS. A: am besten geeignet, D: überhaupt nicht geeignet.

Geophysikalische und (hydro-)geologische Methoden wurden ebenfalls in das Ranking - System integriert, um Parameter wie beispielsweise die Porosität und Aquifermächtigkeit zu integrieren, welche als Hintergrund- und strukturelle Informationen angesehen werden.

Ein Auszug aus dieser geologisch-geophysikalischen Liste wird in Tabelle 3.3 als zweites Beispiel des Ranking-Systems gezeigt.

Ziel / Methode	Magnetik	Geoelektrik	Metalldetektoren	Spektrale IP	RMT	Bohrungen	Bodenproben	Feld-Permeameter-Tests	Tracer-Tests	Pump-Tests
Grundwasserspiegel	D	A	D	B	B	A	A	D	D	A
Wassergehalt	D	C	D	B	B	D	A	D	D	C
Hydraulische Leitfähigkeit	D	C	D	C	D	D	C	B	B	A
Fundamente	A	B	B	C	C	A	D	D	D	D
Pits	B	C	B	D	D	D	D	D	D	D
Kabel, Rohre	D	D	A	D	D	D	D	D	D	D
Fässer, Tanks	D	B	A	D	D	D	D	D	D	D

**Tabelle 3.3:** Auszug aus dem (hydro-)geologischen-geophysikalischen Ranking im DSS. A: am besten geeignet, D: überhaupt nicht geeignet

Gleich dem chemischen Ranking werden die Methoden der Geologie und Geophysik ebenfalls über ein Ranking miteinander verknüpft. Während beispielsweise zur Lokalisierung von Fässern sehr gut Metalldetektoren geeignet sind ('A'), fallen Bohrungen dafür ganz heraus ('D').

Die Anwendung einiger Methoden, insbesondere einiger geophysikalischer Techniken, kann teilweise durch das Vorhandensein von Hindernissen in Form von beispielsweise Rohren (wenn diese nicht das Untersuchungsziel sind) oder elektrischem Rauschen eingeschränkt sein. Um diesen Einschränkungen zu berücksichtigen wurde eine Tabelle mit möglichen Einschränkungen, bezogen auf die jeweilige Methode, erstellt und ist exemplarisch in Tabelle 3.4 dargestellt.

Um die Wirkungsweise der Ranking-Tabelle und der Einschränkungstabelle kurz zu verdeutlichen wird als Beispiel der Metalldetektor hinsichtlich der Lokalisierung von Kabeln und Rohren betrachtet (s. Tabelle 3.3), welcher ein 'A' zugeordnet bekommt. Bei Vorhandensein von Müll / Dreck in Form alter Kabel wirken sich diese dabei höchst störend aus (s. Tabelle 3.4). Daher wird die Methode mit einem 'C' belegt und würde im Gesamt-Ranking von 'A' um zwei Stufen auf 'C' fallen. Da aber in dem Beispiel aus Tabelle 3.3 alle anderen Methoden ein 'D' haben, würde die DSS trotzdem den Metalldetektor als Methode ausgeben.

### 3.5 Funktionen der DSS

Eines der Kernmodule des NORISC-Softwarepaketes ist das Decision Support System (DSS). Durch seine Hilfe sollen Gutachter, Umweltämter und Ingenieurbüros Unterstützung in der Auswahl der Methoden zur Untersuchung einer Altlastfläche erhalten. Aufgrund der Vielfalt

Ziel / Methode	Metall-Pipeline, unbenutzte Kabel (eisenhaltig)	benachbarte Schächte	Gebäude	Beton, Asphalt-Schicht	Büsche u. Sträucher	Topographie	Stromleitungen, Eisenbahn	Straßen, Wege (akustisches Rauschen)	aktive Industrie	Oberflächen-Gewässer
Magnetik	B	B	B	A	B	A	C	A	B	A
Geoelektrik	B	A	B	B	B	A	B	A	B	B
Metalldetektoren	C	A	C	A	B	A	B	A	C	B
Spektrale IP	B	A	B	B	B	A	C	A	B	B
Enviro-MT	C	A	C	B	B	A	B	A	C	B
Bohrungen	B	A	B	A	B	B	A	A	A	B
Penemetrometische Tests	A	D	B	B	B	B	A	A	A	B
Bodenanalyse	A	A	B	A	B	B	A	A	A	B
Infiltrometrische Tests	A	A	B	B	B	B	A	A	A	B
Pump-Tests	A	A	B	A	B	B	A	A	A	B

**Tabelle 3.4:** Auszug aus den Einschränkungen für (hydro-)geologische und geophysikalische Methoden. Dabei bedeutet A den geringsten Einfluss und D den größten Einfluss auf eine Messmethode.

von möglichen Untersuchungsmethoden und der Menge möglicher Untersuchungsziele kann ein Gutachter alleine kaum die Übersicht über eine sinnvolle Methoden-Kombination behalten. Ein weiterer Punkt ist, dass Gutachter oder Ingenieurbüros den Umweltämtern gewisse Methoden empfehlen, es aber möglicherweise effizientere Methoden gibt. Auf diese Weise sind Umweltämter nicht so sehr auf einzelne Personen oder Büros bzgl. der Methodenauswahl angewiesen.

Die im Kapitel 3.4 vorgestellten Rankings wurde zu diesem Zweck in einer gemeinsamen Datenbank zusammengefügt, wobei die Untersuchungsziele als Parameter ausgewählt werden können. Exemplarisch wird hier Eingabe geologisch-geophysikalischer Untersuchungsziele vorgestellt. Eine ausführliche Beschreibung des gesamten Moduls findet sich im Anhang D.

Die Angaben zur Untersuchung möglicher geologischer Untergrundstrukturen und anthropogener Objekte werden im Feld 'andere Flächencharakteristiken' (siehe Abbildung 3.3) in der DSS getätigt. Man hat die Möglichkeit, dass nur eine Disziplin allein (Geologie oder Geophysik) oder beide gemeinsam für die Suche nach der optimalen Methodenkombination

für die markierten Untersuchungsziele berücksichtigt werden. Für eine Vorab-Beschreibung von Messmethoden kann man sich diese aus einer Liste anzeigen lassen. Die Hauptuntersuchungsparameter sind die Erkundung bzw. Lokalisierung des Grundwasserspiegels, der hydraulischen Leitfähigkeit, der effektiven Porosität und der vertikalen und lateralen Ausdehnung der Stratigraphie. Weiterhin besteht die Möglichkeit, sekundäre Parameter, wie beispielsweise das Lokalisieren von unterschiedlichen Bodenarten oder das Vorhandensein von Brüchen, kristallinem Gestein oder Aquiferen, anzugeben.

Abschließend können anthropogene Einflüsse in Form von Untergrundstrukturen oder Objekte ausgewählt werden, welche sich nachteilig auf mögliche Messmethoden auswirken können. Diese werden dann bei der Ermittlung der optimalen Methodenkombination mit berücksichtigt.

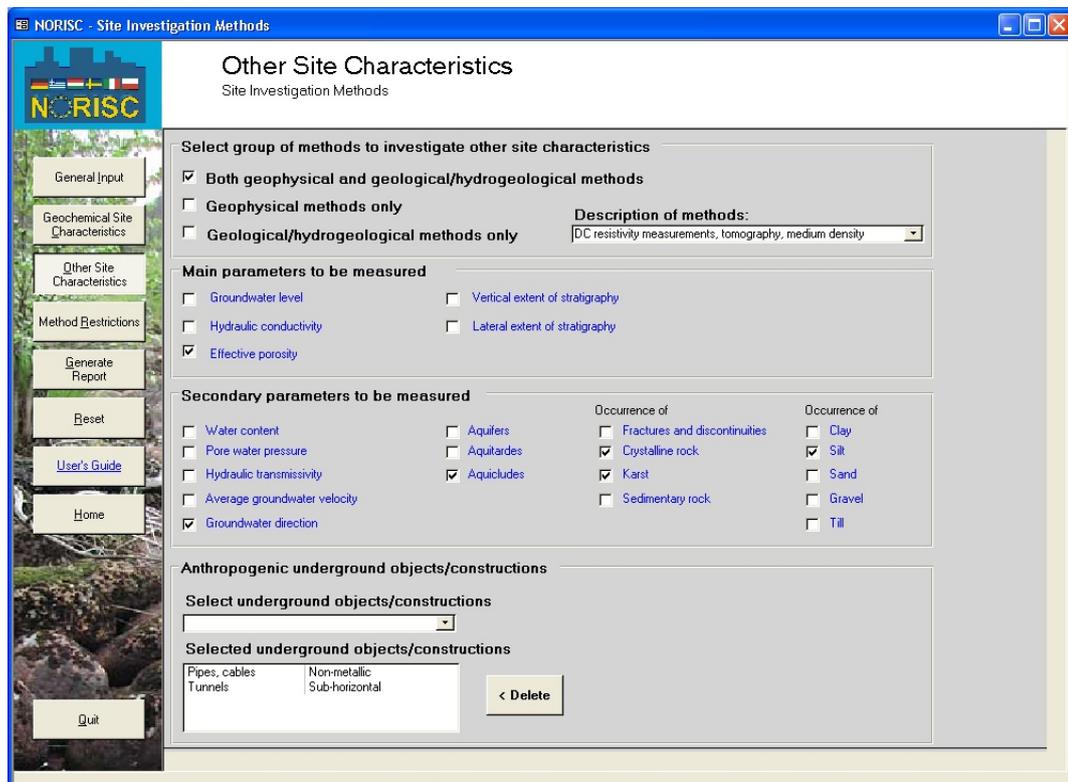


Abbildung 3.3: Eingabe geologisch-geophysikalischer Untersuchungsparameter in der DSS

## 3.6 GSI3D

Das Programm **GSI3D** (*Geological Surveying and Investigation in 3D*) wurde von Herrn Dr. Sobisch (Sobisch [2000]) entwickelt und programmiert. Es ermöglicht eine 2D- und 3D - Untergrunddarstellung der Geologie eines Gebietes auf intuitive und einfache Weise. Dazu werden Bohrlochinformationen georeferenziert und die Bohrlöcher über Profile miteinander vernetzt, um daraus 3D - Strukturen zu erhalten. Das Programm ist in *JAVA* geschrieben und basiert auf einer *XML-Datenstruktur*. Somit ist das Programm systemunabhängig und die *XML-Struktur* ermöglicht es, dass verschiedene Benutzer sich einfach in den Daten-Beständen zurecht finden können. Das Programm wird auch von der Firma *lithosphere* z.B. im Auftrag

des OOWV (Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband) zur Grundwasser-Modellierung in Friesland (rund 3000 km<sup>2</sup>) oder vom British Geological Survey zur Kartierung des Quartärs Englands (rund 7000 km<sup>2</sup>) (*Kessler et al.* [2004]) genutzt.

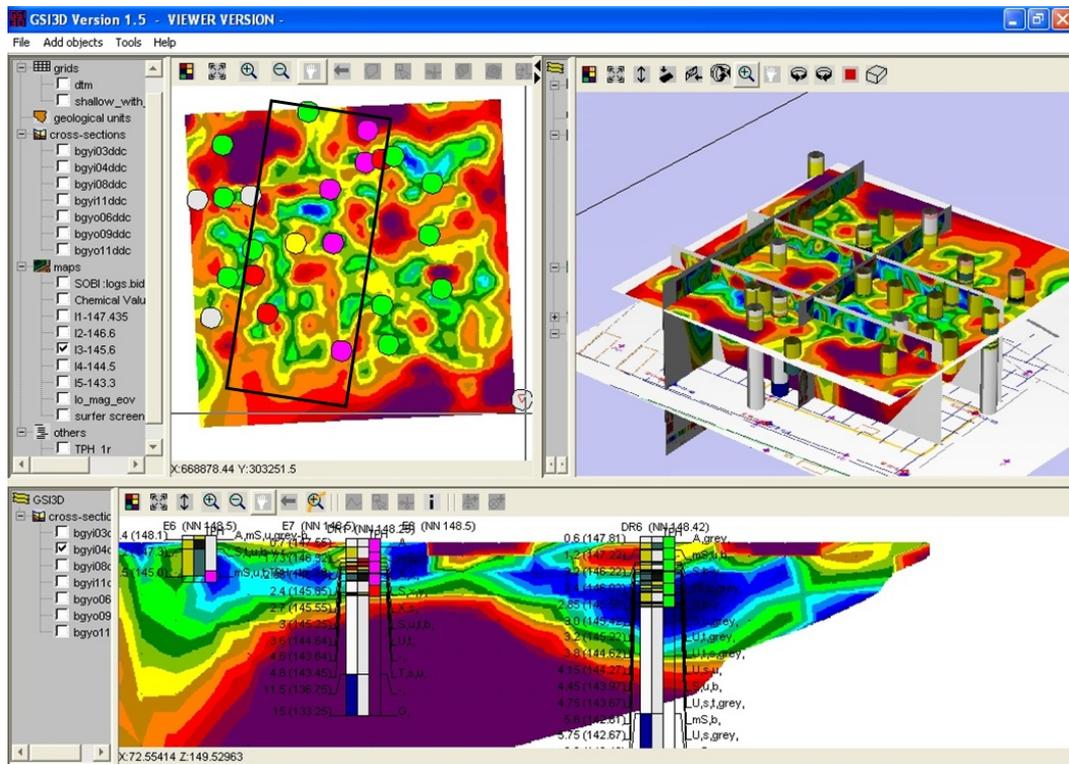
Während des NORISC-Projektes wurde das Programm von Sobisch und Perk (*Perk et al.* [2004]) funktionell erweitert, um es den geforderten Anforderungen anzupassen. Diese waren:

- die Darstellung horizontaler und vertikaler Schnitte als Bilder (\*.jpg oder \*.gif) oder als Raster-Daten; (Surfer-ASCII-Format)
- die Darstellung chemischer Messwerte als 1D-Punkt-Daten und als triangulierte Flächen in 2D- und 3D.

Insbesondere die Implementierung der Schnitte sollte es der Geophysik ermöglichen, ihre Ergebnisse in einfacher Form in das Programm zu implementieren. Abbildung 3.4 zeigt ein Bildschirmfoto mit den drei möglichen Ansichten:

- **Kartierungsansicht** (oben links): in diesem Fenster werden horizontal verteilte Daten betrachtet. In diesem Beispiel ist ein horizontaler Schnitt von elektrischen Widerständen als Ergebnis einer 3D-Inversion des Programms *Res3DInv* von *Loke and Barker* [1996a] dargestellt. Die Farben blau und grün entsprechen niedrigen Widerständen, rot hohen Widerständen. Auf diese Verteilung projiziert sind Ergebnisse einer chemischen Untersuchung des gleichen Tiefenabschnitts. Grün und gelb entsprechen geringen Konzentrationen, rot und lila hohen Konzentrationen, graue Kreise haben für diesen Tiefenabschnitt keine Belegung. Man erkennt, dass entlang eines mittleren Korridors (schwarzes Rechteck) hohe chemische Konzentrationen in Bereichen mit niedrigen elektrischen Widerständen anzutreffen sind. Aufgrund solcher visueller Korrelationen, die sich im Laufe einer Untersuchung ergeben, können dann Maßnahmen für spätere Sanierungsmaßnahmen ergriffen werden.
- **Profil-Ansicht** (unten): Mit Hilfe dieses Fensters können vertikale geologische und geophysikalische Profile dargestellt werden. In diesem Beispiel sind auf ein Geoelektrik-Profil (blau: niedrige Widerstände; rot: hohe Widerstände) Bohrlochinformationen mit den entsprechenden Tiefenangaben projiziert. Auf Grundlage dieser Darstellungsmöglichkeit können geophysikalische Daten mit Bohrlochinformationen verglichen, bzw. kalibriert werden. Die Positionsangabe innerhalb des Profils ist für die x-Position die relative Entfernung von der Startkoordinaten (in Metern) und für die z-Position die absolute Höhe (ebenfalls in Metern).
- **Raum-Ansicht** (oben rechts): In diesem Bereich können ein-, zwei- und drei-dimensionale Daten und Profile mit ihrer räumlichen Verteilung dargestellt werden. Dargestellt sind einige horizontale und vertikale Geoelektrik-Profile und Bohrungen (vertikale Zylinder) mit farblich gekennzeichneten geologischen Einheiten. Erst durch einen räumlichen Vergleich wird die Anordnung von Strukturen deutlich erkennbar, woraus

sich Hinweise für anschließende chemische oder hydro-geologische Untersuchungen ergeben können.



**Abbildung 3.4:** Bildschirmfoto des Programms GSI3D: Ansichten für horizontal verteilte Daten (oben links), vertikale Profile (unten) und eine 3D-Ansicht (oben rechts) können auf einen Blick gezeigt werden. Dabei können die gewünschten Datenbestände einfach per Mausklick ein- bzw. ausgeblendet werden.

Eindimensionalen Daten, wie Bohrlogs oder elektrische 1D-Widerstandsverteilungen, können in einem separaten Fenster betrachtet werden.

Während der Nutzung des Programms in der Testphase hat sich gezeigt, dass die bis dato implementierte Bild - Darstellung unzureichend oder durch Verwendung unterschiedlicher Farbskalen für den gleichen Parameter (z.B. Darstellung des elektrischen Widerstands in horizontalen und vertikalen Schnitten bei unterschiedlichen Wertebereichen aber gleicher Farbpalette) unübersichtlich ist, um eine optimale Arbeitsweise im Feld zu erreichen. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit Routinen zur Darstellung von Widerstandswerten für 1D, 2D und 3D bei jeweils freier Farbvergabe eingearbeitet. Weiterhin wird die Betrachtung von Rohdaten von geoelektrischen und radiomagnetotellurischen Messungen für eine erste quantitative Aussage ermöglicht. Der wichtigster Aspekt ist jedoch, dass die Daten anhand von geologischen Informationen kalibriert werden und aus dem Programm heraus eine (ggfs. erneute) Inversion gestartet werden kann. Auf diese Weise können die Daten der jeweiligen vorherrschenden Geologie angepasst werden.

Für die Ausführung einer 2D-Geoelektrik-Inversion wurde das Programm von Günther [2004] verwendet, für die RMT das Programm von Mackie et al. [1997], welche jeweils über Java-Skripte gestartet werden.

Die entwickelten Module lassen sich in folgenden Kategorien unterteilen:

- **Darstellen von 2D-Profilen:** Mit diesen Modulen werden Modell-Dateien für Geoelektrik und RMT (Radio-Magneto-Tellurik) eingelesen.
- **Rohdaten-Viewer:** Diese Module erlauben es, sich Geoelektrik-Daten im Res2DInv-Format und RMT-Daten, wie sie das Programm von Mackie und Rodi (*Mackie et al.* [1997]) verwendet, darzustellen.
- **Einlesen von Daten aus einer GXML-Datei:** Nach dem Erzeugen von einzelnen 2D - Widerstandsmodellen werden diese beim Abspeichern eines Projektes als *\*.gxml-Datei* angelegt und können aus der Projektdatei auf einmal in das System eingelesen werden. Eine Ausnahme bilden die 1D-Widerstandsdateien. Diese haben keinen eigenen Dialog zur Georeferenzierung und müssen per Hand in die *\*.gxml-Datei* eingetragen werden. Abschließend werden sie aus der Projektdatei eingelesen. In diesem Punkt gleichen sie den geologischen Bohrlochdaten, die auch außerhalb des Programms erzeugt werden müssen.
- **Erstellen von Startmodellen für die Programme DC2DInvRes (Geoelektrik) und Mackie (RMT):** Mit Hilfe dieser Module können Startmodelle für die Inversion von geoelektrischen Widerstandsdaten und RMT - Daten erzeugt werden.
- **Inversionmodule für die Programme DC2DInvRes (Geoelektrik), Mackie (RMT) und Emuplus (TEM):** Diese Dialoge werden zur Erzeugung von Inversion-Skripten und deren Ausführung benutzt.
- **Einlesen von 3D-Daten:** Neben dem Programm *DC2DInvRes* (*Günther* [2004]) existiert auch eine Version für eine 3D - Inversion (*DC3DInvRes*). Auf der Grundlage der von diesem Programm verwendeten Daten-Struktur wurde eine Routine zum Einlesen von 3D - Datenbeständen erstellt. Geoelektrik und RMT-Profilen können als georeferenzierte 3D - Strukturen exportiert und im Block direkt in der 3D - Ansicht dargestellt werden. Dabei können vertikale und horizontale Schnittebenen für die Kartierungs- oder Profil-Ansicht angegeben werden.

Die Beschreibungen jedes dieser Module finden sich im Anhang C.

Durch die Einbeziehung geophysikalischer Methoden in das Programm GSI3D können nun erstmals zwischen zwei Bohrprofilen existierende Strukturen verlässlicher wiedergegeben werden, als wenn diese nur über die Bohrlochinformation alleine abzuleiten wären.

---

## TESTFLÄCHEN

---

### 4.1 NORISC-Testflächen

Während des NORISC-Projektes wurden vier Testflächen ausgewählt, um das NORISC-Untersuchungskonzept und die Verlässlichkeit der DSS-Software zu testen. Diese Flächen waren entweder im Besitz einer der Projektpartner oder sind schon von diesen schon untersucht worden, sodass eine gute Datengrundlage für Evaluationszwecke vorliegt. Grundsätzlich wurden nur die notwendigsten Vorab-Informationen an die ausführenden Untersuchungsfirmen weitergegeben, um einen direkten Vergleich zwischen einer Standard- und einer NORISC-Untersuchung zu gewährleisten. Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht über die Testflächen.

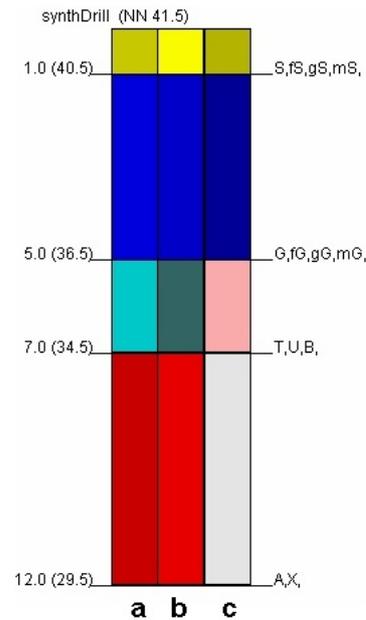
- Testfläche Köln: die Fläche wurde im April 2002 untersucht. Das untersuchte Gelände mit einer Fläche von rund 0,5 ha wurde früher als Betankungsstation für LKW einer Raffinerie genutzt. Die hauptsächlichen Schadstoffen sind BTEX, Kohlenwasserstoffe, Phenole und Schwermetalle.
- Testfläche Schweden: die ehemalige Fabrik für Öl-Produkte und Asphalt-Herstellung wurde im September 2002 untersucht. Die Größe der untersuchten Fläche beträgt 1 ha, wobei die vorhandenen Schadstoffe polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, TPH, BTEX, Schwermetalle und Phenole sind. Aufgrund des geringen geophysikalischen Anteils (ein Seismik-Profil) wird diese Fläche nicht im Rahmen dieser Arbeit reinterpretiert.
- Testfläche Italien: im März 2003 wurde eine ehemalige Pestizid- und Herbizid-Fabrik mit einer Größe von 2 ha untersucht. Die untersuchten Schadstoffe waren Aldrin, DDT, Schwermetalle und Perchlor-Ethylene.

- Testfläche Ungarn: die letzte Testfläche mit einer Gesamtgröße von 20 ha wurde kurz vor offiziellem Abschluss des Projektes im September 2003 untersucht, auf welcher sich ein ehemaliges Benzinlager von rund 1 ha Größe befand. Diese wurde hauptsächlich mit geophysikalischen Methoden untersucht. Die zu erwartenden Schadstoffe waren TPH, BTEX, Schwermetalle und Perchlor-Ethylene.

Ort	Köln Deutschland	Lyftkranen Schweden	Massa Italien	Balassagyarmat Ungarn
Zeit	April 2002	September 2002	März 2003	September 2003
Vorherige Nutzung	Raffinerie, Betankungsstation	Chemische Fabrik für Öl-Produkte und Asphalt	Herbizid- u. Pestizid- Fabrik	Benzin- Lager Elektro-Fabrik
Größe	0,5 ha	1 ha	2 ha	1ha
Schadstoffe	BTEX, TPH, Phenole Schwermetalle	PAH, BTEX, TPH Schwermetalle, Phenole	Aldrin, DDT, Schwermetalle, Perchlor-Ethylene	TPH, BTEX, Schwermetalle,
Untersuchte Medien	Boden, Bodengas	Boden Grundwasser	Boden, Grundwasser	Boden, Grundwasser

**Tabelle 4.1:** Übersicht der in NORISC untersuchten Testflächen

Zur besseren Übersicht der in den nächsten Abschnitten verwendeten Bohrinformationen wird in Abbildung 4.1 eine synthetische Bohrung mit allen wichtigen lithologischen Einheiten gezeigt. Die Farbgebung bleibt in allen Abschnitten gleich, sodass eine schnelle visuelle Zuordnung möglich ist.



**Abbildung 4.1:** Eine gedachte Bohrung, die alle gängigen stratigraphischen Einheiten enthält und deren Legende für die folgenden Testflächen verwendet wird. Der Hauptgemengeanteil (a; prozentual größter vorkommender Volumenanteil) ist immer in der linken Säule der Bohrung, nachfolgend ggfs. weitere Nebengemengeanteile (b, c). Die Tiefenangaben auf der linken Seite der Bohrung erfolgen in Metern unter Geländeoberkante (GOK) und in Höhe über NN (jeweils in Klammern), die stratigraphischen Bezeichnungen stehen auf der rechten Seite.

Dabei entsprechen die Abkürzungen:

- S (Sande; beige-gelb)
- G (Kiese; blau)
- T (Tone; türkis)
- U (Schluffe; oliv-grün)
- B (Böden; rosa)
- A, X (Auffüllung, Steine/Betonreste; rot)
- keine (farbliche) Zuordnung (grau)
- mögliche Präfixe: f: fein; m: mittel; g: grob

Während der Messkampagnen kam es vor, dass die Nebengemengeanteile z.T. nicht durchgängig erfasst und daher mit grauer Farbe belegt wurden. Die geologischen Beschreibungen der einzelnen Testflächen wurden den internen NORISC-Berichten entnommen.

## 4.2 Testfläche Köln

Als erste zu untersuchende Fläche wurde ein Gebiet in Köln-Niehl auf einem ehemaligen Esso-Gelände ausgewählt. Aufgrund des frühen Untersuchungszeitpunkts im Projekt war die DSS-Software noch nicht in der Lage, vollständig automatisiert eine optimale Methodenkombination zu erstellen. Daher wurde die endgültige Auswahl vom NORISC-Konsortium durchgeführt.

### 4.2.1 Geologie des Messgebietes

Das Stadtgebiet um Köln gehört tektonisch gesehen zur Kölner Scholle als Teil der Niederrheinischen Bucht, welche sich im Miozän (spätes Tertiär) absenkte. Schon zum Ausgang des Tertiärs sammelten sich große Mengen an Ablagerungen in der Niederrheinischen Bucht. Durch wechselnde Warm- und Kaltzeiten mit den Inlandvereisungen bis zum Rand der Niederrheinischen Bucht folgten starke Sedimentationen von Schotter, Kies und Sand und entlang der Flusstäler setzte die Bildung von Terrassen an den Hängen ein. In der Unterteilung des Rhein unterscheidet man die Haupt-, Mittel- und Niederterrasse.

Mit dem Absinken der Niederrheinischen Bucht ab dem Miozän bildeten sich teilweise Moorflächen, wodurch sich im Laufe der Zeit bis über 200m mächtige Torfschichten entwickeln konnten. Mit fortschreitender Sedimentation erhöht sich der Formationsdruck durch Auflast, wobei nach Entwässerung und Inkohlung bis zu 100 m mächtige Braunkohleflöze entstehen, welche heute im südlichen Teil der Niederrheinischen Bucht im Tagebau (z.B. Garzweiler) abgebaut werden.

Im Gebiet der Testfläche im nördlichen Teil von Köln bestimmen Sedimente des Tertiärs und Sande und Tone mit Kohleeinschlüssen die Stratigraphie (Kölner und Ville-Schichten). Diese Ablagerungen beinhalten häufig Braunkohleflöze von geringer Mächtigkeit, welche nach Süd bis Südwest einfallen. Darüber lagern diskordante Kiese und Sande der Niederterrasse im 10'er Meterbereich, welche von Auelehme von 1-2 Meter Mächtigkeit überlagert werden.

Auf Grundlage von existierenden Datenbeständen aus Bohrungen und geologischen Querschnitten der Ingenieurgeologischen Karte Köln (*Geolegisches Landesamt NRW* [1992]) und den Kölner Geolog. Schriften (*Brunotte et al.* [1994]) kann ein gemitteltes Schichtenverzeichnis in Tabelle 4.2 aufgestellt werden.

Die Hauptfließrichtung des Grundwassers ist im Bereich des Altstandortes lokal nach Süddosten gerichtet (Beobachtungsbrunnen), wobei die generelle Richtung in Richtung Nordosten liegt. Im Falle von Hochwasser kann sich vorübergehend die Strömungsrichtung leicht ändern. Nahe der Untersuchungsfläche befanden sich abströmig Grundwassermessstellen, die den Grundwasserspiegel auf ca 4,5 - 4.8 m unter GOK anzeigten.

Tiefe (m)	Stratigraphie
1-2	Mutterboden, Schluff (Auenlehm)
1-18	Kies, Sand (Niederterrasse Rhein)
18-40	Sand, Ton, Braunkohle ('Kölner Schichten')

**Tabelle 4.2:** Gemittelte Schichtenabfolge im Bereich der Kölner NORISC-Testfläche.

### 4.2.2 Ehemalige Nutzung

Die Tabelle 4.3 gibt eine zeitliche Übersicht der Nutzung der NORISC-Testfläche wieder. Zwischen 1952 und 1953 wurde das Gebiet als LKW Betankungsstation genutzt, wobei die petrochemischen Produktionsanlagen ebenfalls auf dem Gelände lagen. Seit 1953 liegt die Fläche brach. Aufgrund der Nutzung des Geländes ergab sich eine Kontaminierung des Grundwassers, hauptsächlich verursacht durch Öl-Produkte. Innerhalb des umzäunten Gebietes (s. Abbildung 4.2) wurde im Jahr 1989 im Zuge einer Sanierungsmaßnahme ein 'Pump and Treat'-System installiert und ein Bodenaustausch durchgeführt. Daher besteht ein Großteil des umzäunten Bodens aus Auffüllungen. Bei 'Pump and Treat'-Maßnahmen wird durch die Entnahme von Grundwasser (Absenken des Grundwasserspiegels) aus einem oder mehreren Brunnen das Strömungsbild des Grundwassers so beeinflusst, dass die im Grundwasser enthaltenen Schadstoffe dem Brunnen zufließen. Das verunreinigte Grundwasser wird zutage gefördert und durch eine entsprechende Behandlung gereinigt.



**Abbildung 4.2:** Foto der Kölner Testfläche. Die Blickrichtung ist Norden. Der umzäunte Bereich begrenzt die Sanierungsinstallation aus dem Jahr 1989.

Vor 1951	Ackerfläche
1952	Bau der LKW-Betankungsstation
1953	Zerstörung der Anlage; Brachfläche
1986	Untersuchung der Fläche
1989	Sanierung von oberflächennahen Kontaminanten; Installation einer Grundwasser-Sanierungsanlage ('pump and treat')
1998	Abbau der Fabrik
2001	erneute Untersuchung und neues Sanierungskonzept
2002/2003	letzte Boden-Schadstoffe sollen ausgegraben werden; nur noch Grundwasserkontrolle

**Tabelle 4.3:** *Historie der Kölner Testfläche.*

### 4.2.3 DSS-Ergebnis

Die Aufgaben der Geophysik bestanden in der Lokalisierung von möglichen Untergrundobjekten und Strukturen, Sand/Kies-Erscheinungen und der Lokalisierung des Grundwasserspiegels. Da die DSS zu diesem Zeitpunkt nur als Beta-Version vorlag, wurde die entgeltliche Methodenauswahl manuell vorgenommen, nachdem die Vorauswahl innerhalb der DSS geschah. Aufgrund der eingegebenen Untersuchungsziele und möglichen Einschränkungen wurden drei Methoden ausgewählt. Die Tabelle 4.4 gibt die Ergebnisse der DSS an, inklusive der Untersuchungsparameter. Das Bodenradar wird zur Suche nach unbekanntem Objekten (d.h. Fässer und Rohre) und Untergrundstrukturen ausgegeben und soll die Widerstandsgeoelektrik dahingehend ergänzen. Der Metalldetektor wird im Vorfeld der chemischen Untersuchung zur Lokalisierung metallischer Gegenstände eingesetzt, damit bei möglichen Bohrungen keine Objekte, sei es das Bohrgerät selbst oder vergrabene Gegenstände, beschädigt werden. Für eine allgemeine Untergrunduntersuchung mit dem Hauptaugenmerk auf Sand/Kies-Lokationen und der Bestimmung des Grundwasserspiegels wird die Geoelektrik ausgewählt.

Methode	Messart	Profilabstand (m)	Aufgabe
Bodenradar	Quasi-kontinuierlich	3	Unbekannte Objekte, Untergrundstruktur
Metalldetektor (EM61)	Quasi-kontinuierlich	3/1	Lokalisierung metallischer Gegenstände
Widerstands-Geoelektrik	4m Elektroden-Abstand	10	Widerstandsverteilung des Untergrundes, Lokalisierung von Sanden/Kiesen, Grundwasserspiegel

**Tabelle 4.4:** *Übersicht über die von der DSS vorgeschlagenen Methoden für die Kölner Testfläche.*

Nach Diskussion der Ergebnisse mit der ausführenden Geophysik-Firma geo-Fact GmbH wurde einige Parameter geändert:

- zur Erhöhung der oberflächennahen Auflösung der Geoelektrik wurde der Elektrodenabstand auf 2 m gesetzt;
- die Profilstände der Metalldetektor-Messungen wurde für Evaluationszwecke auf 1 m reduziert.

Wie in Abschnitt 4.2.3 erwähnt, wurden drei geophysikalische Methoden auf der Fläche wie folgt angewendet:

- **Widerstands-Geoelektrik:** 12 Multielektroden-Profile mit je 82 m Länge, davon 9 mit einem Abstand von rund 10 m, 2 Kreuz-Profilen und einem Referenzprofil außerhalb des Messgebietes. Als Konfiguration wurde eine Schlumberger-Konfiguration mit einem Elektrodenabstand von 2 m gewählt. Die Lage der Profile sind in Abbildung 4.3 durch sind durch '+' gekennzeichnet. Es wurden 3 Tage für die Messungen veranschlagt.
- **Metalldetektor und Bodenradar:** Ein Gebiet von rund 6300 m<sup>2</sup> wurde mit einem Profilstand von 1 m untersucht (orange gekennzeichnetes Gebiet). Wie die Widerstandsmessungen wurden die Bodenradar-Messungen auf 3 Tage angesetzt, die EM61-Messung mit einem Tag.

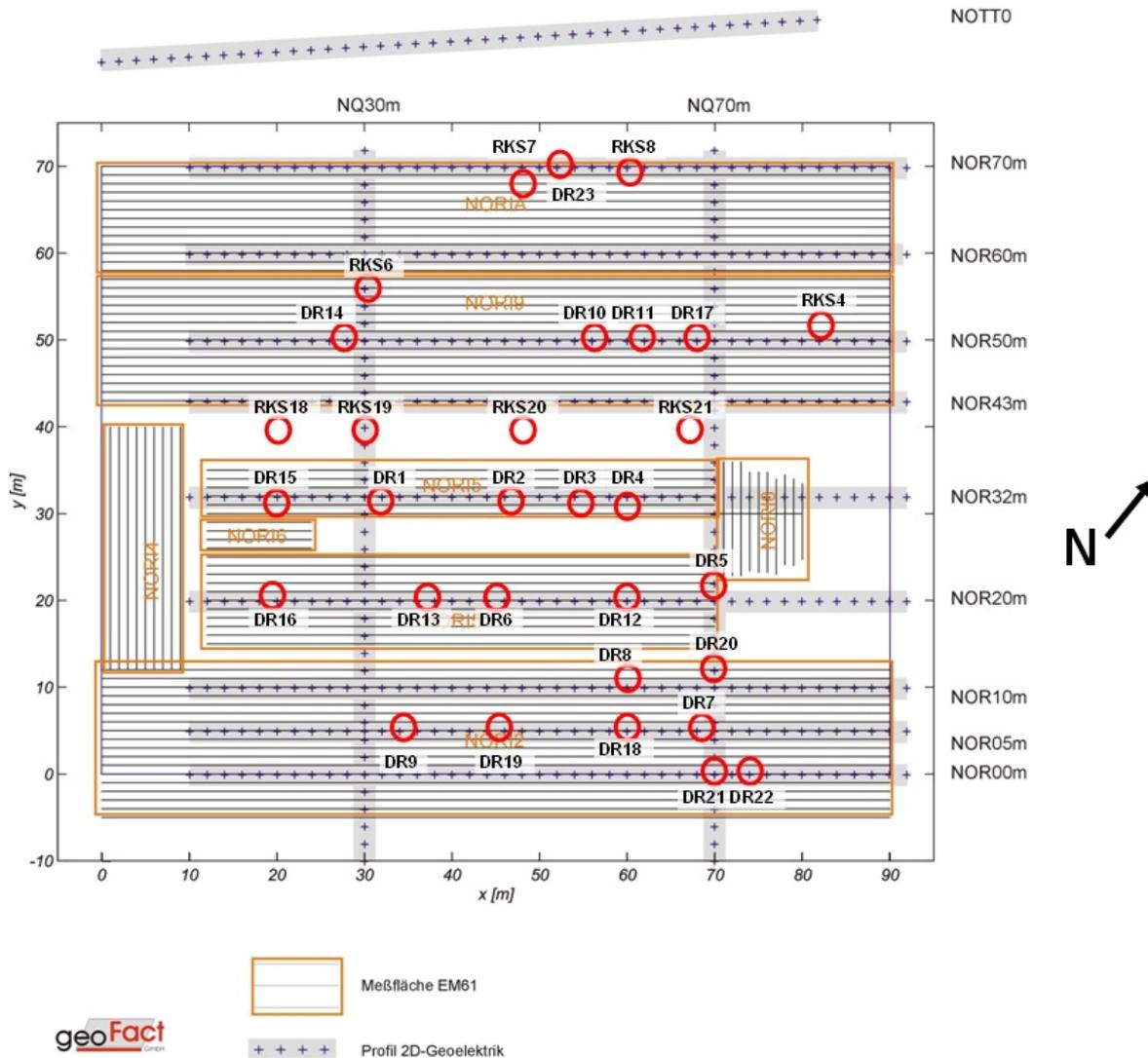
Die Ergebnisse der geophysikalischen Untersuchungen wurden zusammen mit NORISC-Vertretern und der Feld-Analytik-Firma diskutiert und 23 Vorschläge für Bohrungen / Bodenproben erarbeitet. Dadurch sollte überprüft werden, ob geophysikalische Anomalien mit möglichen kontaminierten Gebieten korrelieren.

Eine schematische Übersicht der Anwendung geophysikalischer Methoden im Testgebiet wird in Abbildung 4.3 gezeigt.

Das Referenzprofil nott0 (s. Appendix A, Abbildung A.12), welches in einem nicht - kontaminierten Gebiet liegen sollte, befindet sich nord-westlich der Untersuchungsfläche, zeigt aber genau die gleichen Charakteristika wie z.B. die Profile in Abbildung 4.6 a) und b). Daher ist davon auszugehen, dass dieses Profil ebenfalls kontaminiert ist und daher nicht als ungestörtes Vergleichsgebiet zur Lokalisierung von Kohlenwasserstoff-kontaminierten Zonen verwendet werden kann. Zudem liegen auch keine chemischen Proben von diesem Profil vor.

Aufgrund der Ergebnisse der Widerstands-Geoelektrik und des Metalldetektors wurden nach Absprache mit der Universität zu Köln und der Geophysik-Firma 23 Bohrvorschläge an die Feld-Analytik-Firma weiter gereicht. Die Vorschläge beruhten auf Anomalien, welche in den Widerstandsprofilen auffällig waren. Die Abbildung 4.4 zeigt ein Bildschirmfoto des GSI3D-Programms mit ausgewählten horizontalen und vertikalen Widerstands-Profilen und dem EM61-Ergebnis.

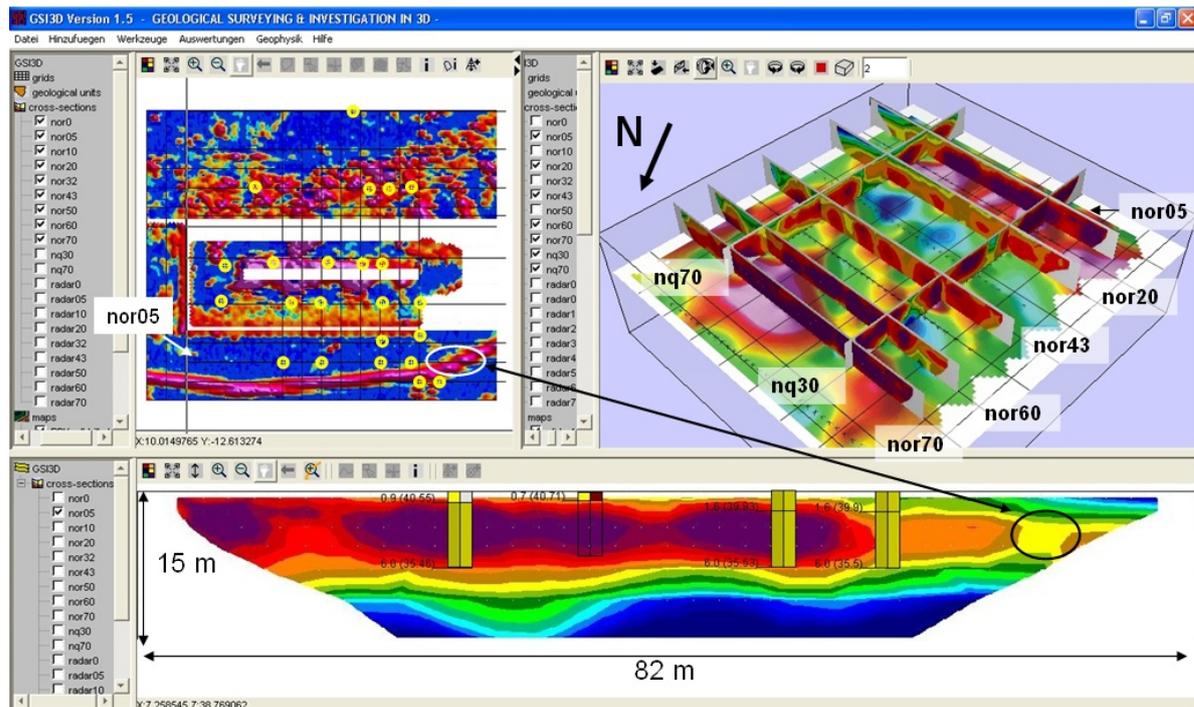
Im oberen linken Fenster ist die Kartierungsansicht zu sehen. Darin abgebildet ist das EM61-Ergebnis und die Lokationen der Bohrungen als gelbe Kreise. Aufgrund der gemessenen Spannungen (lila: hohe Spannung, 200 mV; blau: negative Spannung, -20 mV) zeigt sich,



**Abbildung 4.3:** Schematische Übersicht über die geophysikalischen Profile der Firma geoFact GmbH, inkl. der Bohrlokationen. Zur späteren Erstellung von 1D-Widerstandsprofilen wurden auch Bohrungen aus der Untersuchungskampagne aus dem Jahr 2001 verwendet, die nahe der Widerstandsprofile liegen. Die Bohrungen aus der NORISC-Untersuchung heißen 'DR' (Drill), alte Bohrungen aus dem Jahr 2001 'RKS' (Rammkernsondierungen).

dass im unteren Teil des Gebietes eine dem Messteam vorher nicht bekannte Pipeline entlang der Widerstandsprofile nor00 und nor05 (Lage: vergleiche Abbildung 4.3) verläuft. Die Umzäunung der Sanierungsanlage ist im Ergebnis als sehr metallisch zu sehen, wohingegen weiße Bereiche im Verlauf der Umzäunung nicht gemessen wurden. Im oberen Teil ist eine metallhaltige bogenförmige Struktur zu erkennen. Vergleiche mit alten Bauplänen zeigen, dass der Bogen genau der Grenze der ehemaligen Einpark-Möglichkeiten der LKW entspricht.

Der untere Bereich des Bildschirmfotos zeigt die Vertikal-Ansicht des Profils nor05 mit den darauf projizierten Bohrungen. Die Lage des Cursors innerhalb des Profils wird unterhalb der Ansicht angezeigt. Der Widerstandsbereich geht von  $40 \Omega\text{-m}$  (blau) bis ca.  $3000 \Omega\text{-m}$  (dunkelrot). Wie schon erwähnt wird bei einer solchen Art der Darstellung der Nachteil



**Abbildung 4.4:** Bildschirmfoto der 2D- und 3D-Ansicht der Widerstands- und EM61-Ergebnisse: horizontale Ansicht: EM61 und Bohrungen; vertikale Ansicht: Profil nor05 und darauf projizierte Bohrungen; 3D-Ansicht: räumliche Darstellung einiger vertikaler und horizontaler Widerstandsprofile. Nachteilig wirken sich die nicht in die Bilder integrierte Skalen für den Vergleich zwischen diesen aus.

klar ersichtlich, dass es für Bilder ohne dargestellten Skalenbereich (weil dieser z.B. aus Platzgründen nicht in das Bild integriert werden kann) schwierig ist, die Übersicht über den Wertebereich zu behalten, insbesondere, wenn eine kombinierte Darstellung aus horizontalen und vertikalen Schnitten bei Verwendung unterschiedlicher Skalen in der 3D-Ansicht vorgenommen wird.

Die Widerstandsverteilung zeigt eine generell schlecht-leitende Struktur ( $2000+ \Omega\text{-m}$ ; rot - dunkel-rot) in den ersten 5 m, unterbrochen auf der rechten Seite durch eine besser leitenden Struktur (schwarzer Kreis, ca.  $150 - 800 \Omega\text{-m}$ ; grün-gelb). Durch einen Vergleich mit dem EM61-Ergebnis wird ersichtlich, dass dies durch die das Profil kreuzende Pipeline verursacht wird. Der Übergang in den vom Grundwasser gesättigten Bereich ab ca. 5 m Tiefe resultiert in Widerständen mit Werten zwischen 60 bis  $400 \Omega\text{-m}$  (blau-grün).

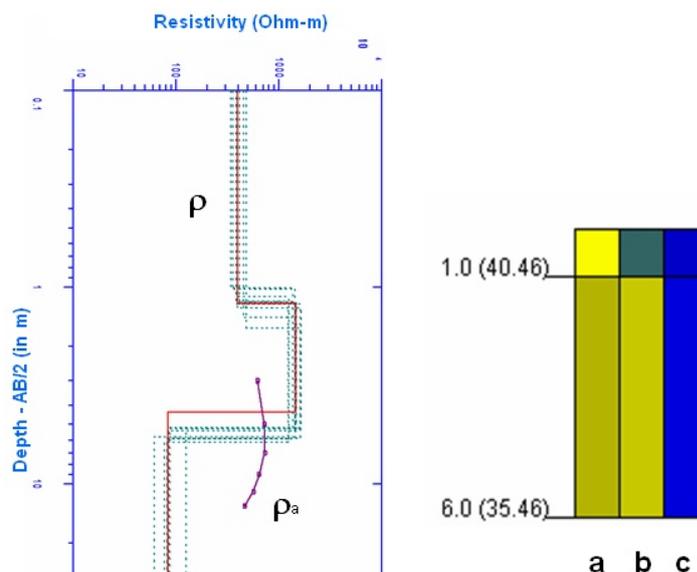
Die Ergebnisse der Bohrungen entsprechen im Vergleich den Tiefenangaben in Tabelle 4.2. Leider liegen auf der Testfläche selbst keine Bohrungen mit einer größeren Tiefe als 6 m vor, da dies im Rahmen der Untersuchung nicht vorgesehen war und nur Aufschlussbohrungen bis in das Grundwasser vorgenommen wurden.

Der obere rechte Bereich des Bildschirmfotos zeigt eine räumliche Darstellung einiger vertikaler Widerstandsprofile. Die gezeigte horizontale Darstellung der Widerstände für den Bereich um 4.3 m Tiefe ist ein Ergebnis einer 3D-Inversion des Programms *Res3DInv* von *Loke and Barker* [1996a], welche ebenfalls von der Firma geoFact durchgeführt wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich der Widerstandsbereich für die inneren Profile (hier dargestellte

Profile: nor20 und nor43) von den äußeren Profilen (hier dargestellte Profile: nor05, nor60 und nor 70) im oberflächennahen Bereich unterscheidet. Dies spiegelt sich auch in der horizontalen Verteilung wieder: während der zentrale Bereiche niedrigere Widerstände aufweist (Farbverteilung vertikal: blau (40  $\Omega$ -m) bis dunkelrot (ca. 3000  $\Omega$ -m); horizontal: blau (100  $\Omega$ -m) bis lila (3000  $\Omega$ -m), zeigen die äußeren Bereiche (Profile nor00 bis nor10, nor60 bis nor70) im oberflächennahen Bereich sehr hohe Widerstände. Daraus lässt sich ableiten, dass der zentrale Bereich der Untersuchungsfläche im Gegensatz zum äußeren Bereich anthropogen verändert worden ist. Diese Aussage wurde vom Umweltamt gestützt.

Anhand der in Abbildung 4.4 gezeigten Widerstandsverteilung in der Vertikalansicht ist der Grundwasserspiegel bei nachgemessenen 4,5 - 4,8 m nicht klar erkennbar, da der 2D - Inversionsalgorithmus die Modelle zu glätten versucht, was dann zu einem 'Verschmieren' der Schichten führt. Um die Tiefe des gemessenen Grundwasserspiegels genauer durch die Widerstands-Geoelektrik zu verifizieren, wurden an einigen Positionen 1D-Interpretationen von Daten, die mit Bohrpositionen übereinstimmen, mit dem Programm *RESIXIP* der Firma Interpex durchgeführt. Das Programm verwendet für die Anpassung der berechneten Modell-daten an die Messdaten das von *Inman* [1975] vorgestellte Ridge-Regression-Verfahren.

Das Ergebnis eines solchen 1D-Widerstandsmodells ist in Abbildung 4.5 für das Profil nor00 an der Position der Bohrung DR22 (s. Lageplan Abbildung 4.3) dargestellt.



**Abbildung 4.5:** 1D-Widerstandsmodell mit Rohdaten und Äquivalenz-Modellen an der Bohrung D22 mit Haupt- und Nebengemengeanteilen auf dem Profil nor00 als Ergebnis einer 1D-Inversion mit dem Programm *Resix*. Der RMS-Fehler beträgt 3%. Die Rohdaten als kleine Rechtecke über AB/2 (in m) dargestellt. Der Hauptgemengeanteil der Bohrung ist mit 'a' gekennzeichnet und besteht aus Feinsanden und Grobsanden, die Nebengemengeanteile mit 'b' (Tone und Sande) und 'c' (Kiese).

Der Widerstandsverlauf zeigt die Anpassung der Daten mit einem 3-Schichtfall und einem RMS-Fehler von 3%. Die Deckschicht, bestehend aus Feinsanden (Hauptgemengeanteil, 'a') und Tonen und Kiesen (Nebengemengeanteile 'b', 'c') mit einer Mächtigkeit von 1 m, zeigt

einen Widerstandswert von rund 400  $\Omega$ -m. Daran schließt sich eine hochohmige Schicht von knapp 1500  $\Omega$ -m mit Grobsanden mit sandigen und kiesigen Anteilen an, welche bis in eine Tiefe von 4,4 m reicht und dort auf 90  $\Omega$ -m abfällt (Grundwasser). Die Äquivalenzmodelle zeigen allgemein relativ geringe Abweichungen. Die Streuung für die Widerstände des ersten Meters liegen bei ca.  $\pm 70$   $\Omega$ -m. Der Übergang in den hochohmigen Bereich liegt zwischen 1 und 1,7 m mit zugehörigen Widerständen zwischen 1200 bis 1700  $\Omega$ -m. Der abschließende Halbraum beginnt mit 5 - 6,2 m tiefer als das Endmodell, wobei die Widerstände von 60 bis 120  $\Omega$ -m reichen.

Diese Auswertungen wurde zum Zeitpunkt des Messkampgne nur dazu durchgeführt, um den Grundwasserspiegel besser durch die Geoelektrik zu lokalisieren.

#### 4.2.4 Widerstands-Geoelektrik

Nach der Implementierung der Geoelektrik-Module wurden die Daten entsprechend dem Exportformat des Programms *DC2DInvRes* von Günther [2004] als rechteckiges Gitter dargestellt. Diskussionen mit Geologen und anderen Vertretern des NORISC-Projektes haben ergeben, dass ihnen diese Art der diskreten Widerstandsdarstellung in vielen Fällen viel angenehmer ist als farblich interpolierte Flächen.

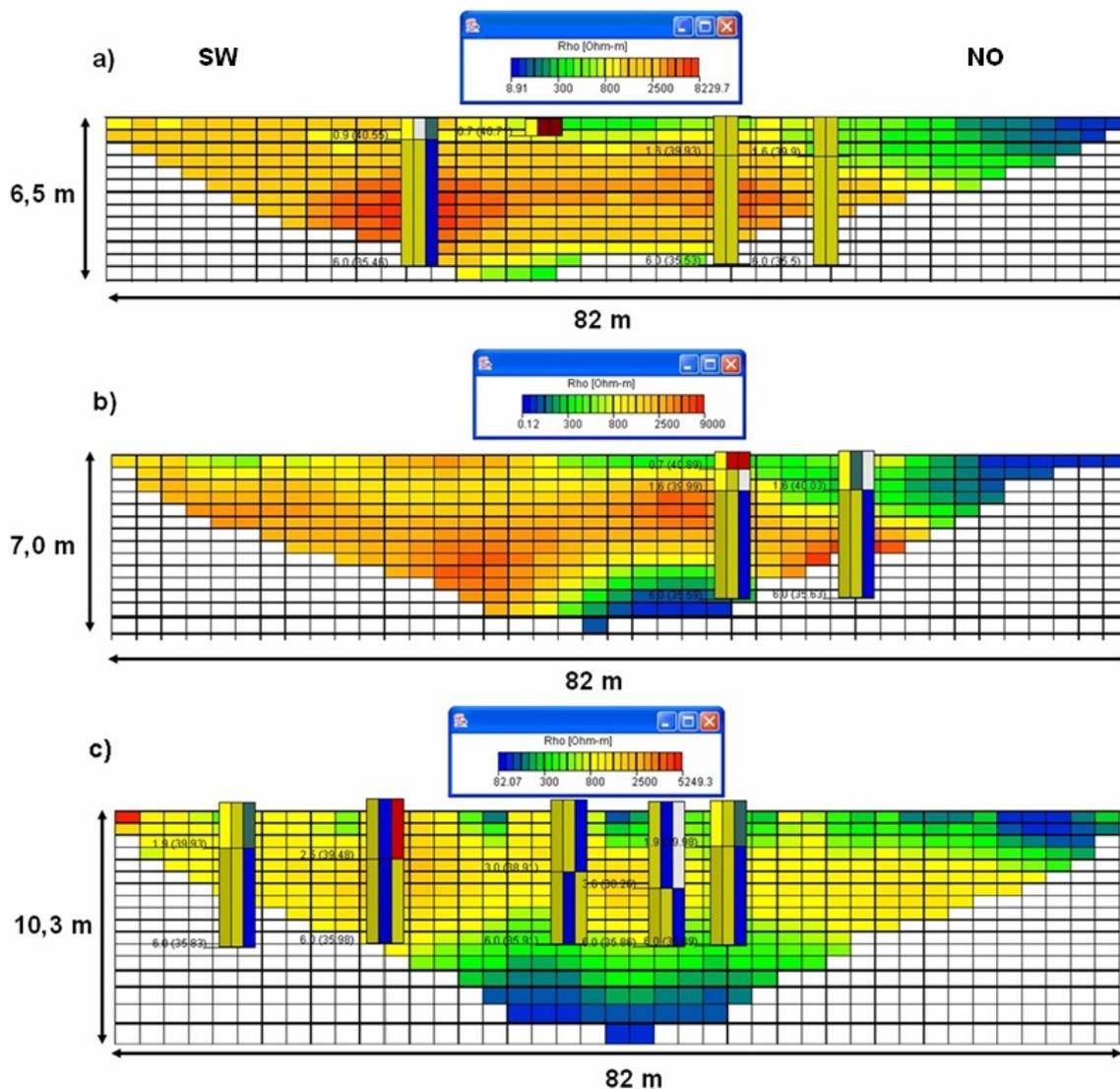
In Abbildung 4.6 sind die Profile nor05, nor10 und nor32 (vergl. Lageplan Abbildung 4.3) mit einer Zellenbreite von  $x = 2$  m und eine Zellentiefe von  $z = 0,5$  m als Bildschirmfotos des Programms GSI3D dargestellt. Das Gitter wurde aufgrund von synthetischen Modellierungen mit Hilfe der geologischen Bohrinformationen durchgeführt, um eine möglichst optimale Auflösung zu erhalten. Es werden nur Zellen mit einer Überdeckung  $\geq 0.3$  wiedergegeben. Werte mit einer geringeren Überdeckung werden als weiße Flächen dargestellt. Um eine bessere Übersicht zu gewährleisten, wird das Gitter unterhalb der tiefsten dargestellten Zelle abgeschnitten. Die RMS-Fehler für die Profile betragen 6,0%, und zweimal 6,3%, die Eindringtiefe wurde mittels des DoI-Index (Depth of Investigation; Oldenburg and Li [1999]) auf rund 7 - 10 m (profilabhängig) bestimmt, der Regularisierungsparameter  $\lambda$  wurde mit 53 bestimmt.

Auf die Widerstandswerte von Profil nor05, nor10 und nor32 projiziert sind die auf dem jeweiligen Profil abgeteufte Bohrungen mit ihren entsprechenden Tiefenabschnitten (unter GOK und in Klammern über NN). Die Farbgebung der Bohrungen ist: beige (Sand), dunkelbeige (Grobsand), gelb (Feinsand), braun (Auffüllung), rot (Stein, Betonreste), dunkel-grün (Ton). Die drei Spalten einer Bohrungen repräsentieren den Hauptgemengeanteil (links), den 1. Nebengemengeanteil (mitte) und den 2. Nebengemengeanteil (rechts). Die Bohrungen geben größtenteils eine sandige - grobsandige Lithologie wieder, welche teilweise ab ca. 1 m Tiefe kiesige Anteile im Nebengemengeanteil enthält und an der Oberfläche Auffüllungen und Betonreste enthalten kann. Die Widerstandsverteilung für die nicht sanierten Profile nor05 und nor10 zeigt einen 3-Schichtfall mit folgender Widerstandsverteilung:

1. obere Schicht (bis ca. 2 m): links - mitte: schlechter Leiter (900 - 2500  $\Omega$ -m); rechts: guter Leiter (ca. 20 - 300  $\Omega$ -m), welcher mittig direkt an der Oberfläche beginnt und sich nach rechts auch in die Tiefe bis ca. 3 m ausbreitet;

2. mittlere Schicht (ca. 2 - 5 m): eine sehr hoch-ohmige Schicht mit Werten bis 8000  $\Omega$ -m nahe des Grundwasserspiegels (bei ca. 4,5 m);
3. grundwasser-gesättigter Bereich (ab ca. 5,5 m): Widerstände bis ca. 400  $\Omega$ -m; dieser Bereich wird aufgrund der gewählten Überdeckung nur ansatzweise dargestellt;

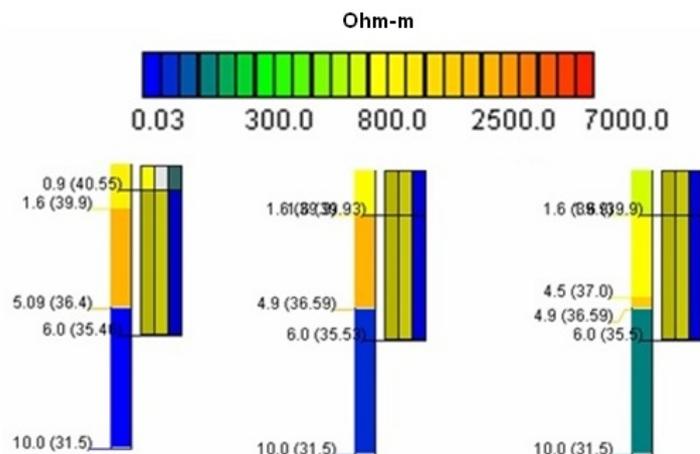
Auffällig ist der gute oberflächennahe Leiter im rechten Bereich der beiden Profile. Während die rechte Bohrung von Profil nor05 keine direkten Hinweise darauf gibt zeigt aber das Profil nor10, dass tonige Anteile in diesem Abschnitt vorhanden sind. Einen weiteren Hinweis auf diese erhöhte Leitfähigkeit gibt Abbildung 4.2. Am rechten Bildrand neben dem Zaun sind einige Bäume erkennbar, welche möglicherweise mit ihrem Wurzelwerk Wasser an der Oberfläche speichern. Jedoch wurde dieser Bereich nicht näher untersucht, da er nicht im Grundwasserabstrombereich der Testfläche liegt.



**Abbildung 4.6:** Profile a) nor05, b) nor10 und c) nor32 mit darauf projizierten Bohrungen. Die rechte Bohrung in nor10 (b) zeigt neben den sandigen auch einen tonigen Anteil im oberflächennahen gut-leitenden Bereich. Das Profil nor32 liegt in der teilsanierten Zone und besitzt im Vergleich zu den beiden anderen Profilen eine deutlich geringere Widerstandswerte im Bereich des 3. bis 5. Meters.

Um den Unterschied zur Widerstandsverteilung im teilsanierten Bereich zu verdeutlichen, wird das Profil nor32 in Abbildung 4.6 c) gezeigt. Hier liegen die maximalen Widerstände von rund 2500  $\Omega$ -m im 3. bis 5. Meter und sind deutlich geringer als in den Profilen nor05 und nor10. Der Widerstand um 5000  $\Omega$ -m am linken Profilrand geht auf die Glättung des Inversionsalgorithmus und nicht auf Messdaten zurück. Die geologische Anteile der Bohrungen auf diesem Profil entsprechen denen der beiden anderen Profile (Sande und Grobsande mit kiesigen Anteilen), wobei jedoch auch tonige Anteile im linken und mittleren Bereich des Profils auftreten. Dies ist vermutlich auf den Bodenaustausch zurückzuführen, da keine Tonanteile außerhalb der eigentlichen Sanierungszone (d.h. in den Profilen nor00, nor05, nor10, nor60 und nor70) in diesen Bereichen zu finden sind. Im rechten Bereich des Profils sind auch wie in den beiden anderen Profilen wieder oberflächennahe gut leitende Strukturen erkennbar.

Der nächste Schritt in der Bearbeitung der Daten besteht in der Erstellung von 1D- Widerstandsmodellen durch Kalibrierung an geologischen Bohrungen. Dazu wurden die Widerstandswerte an Bohrungspositionen ein-dimensional invertiert und mit der Lithologie der Bohrungen verglichen. Die ein-dimensionale Invertierung erfolgte wieder mit dem Programm **RESIXIP**. Abbildung 4.7 zeigt einen Vergleich zwischen den Bohrungen des Profils nor05 und den entsprechenden Ergebnissen der 1D-Inversion in der Vertikalansicht des GSI3D. Die Widerstandsmodelle haben einen Fehler zwischen 3 bis 4.8 %. Dieser Vorgang wurde für alle 11 Profile durchgeführt.

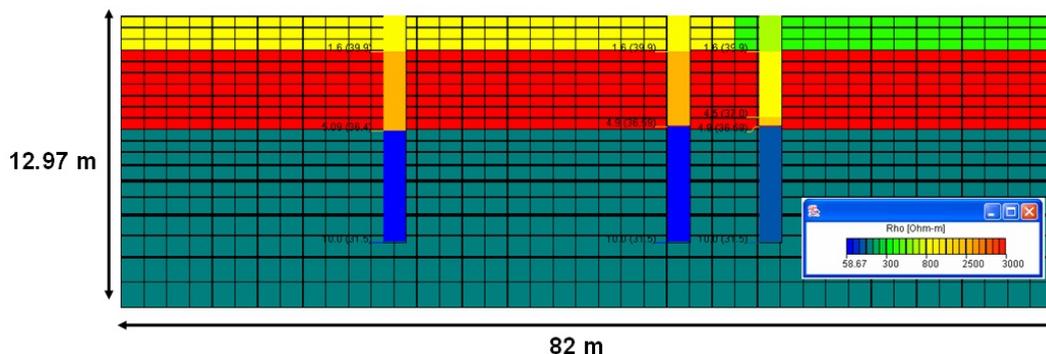


**Abbildung 4.7:** Erstelltes '1D-Profil' entlang des Profils nor05 im Programm GSI3D in der Vertikalansicht, bestehend aus 1D-Inversionsergebnissen (jeweils links) und den entsprechenden Bohrungen mit den geologischen Informationen (jeweils rechts).

Ein Vergleich der der Stratigraphie zugeordneten Widerstandsbereichen mit den Widerständen aus Tabelle 2.2 zeigt, dass die Widerstände der Sande für die nicht teilsanierte Zone teilweise im oberen Grenzbereich liegen, per se aber nicht anormal hoch sind.

Die 1D-Ergebnisse zeigen, vergleichbar wie in Abbildung 4.6 a) und b), einen 3-Schichtfall für die Widerstandsverteilung, obwohl prinzipiell kein Unterschied in der Schichtabfolge in den Bohrungen vorliegt. Die erste Schicht mit einer Mächtigkeit von rund 1,6 m zeigt Werte von ca. 900  $\Omega$ -m für das linke und mittlere 1D-Inversionsergebnis, wohingegen das rechte Ergebnis einen niedrigeren Wert mit ca. 700  $\Omega$ -m besitzt. Die zweite Schicht mit einer Tiefe bis zu 5 m zeigt, wie im Fall des Ergebnisses einer 2D-Invertierung mit einem homogenen

Startmodell, Werte bis 3000  $\Omega$ -m, wohingegen die Werte im rechten 1D-Profil etwas niedriger sind. Der anschließende homogene Halbraum zeigt Werte zwischen 100 bis 200  $\Omega$ -m. Auf Grundlage dieser Verteilung wird ein Startmodell erstellt, welches in Abbildung 4.8 mit den 1D-Widerstandsergebnissen aus Abbildung 4.7 dargestellt ist. Die gewählten Widerstandswerte für dieses Modell betragen für die erste Schicht 1000  $\Omega$ -m auf der linken und 400  $\Omega$ -m auf der rechten Seite, 3000  $\Omega$ -m für die zweite Schicht und 200  $\Omega$ -m für den Halbraum. Die Auflösungen / Importances der 1D-Ergebnisse liegen für die Schichtmächtigkeiten zwischen 0,8 - 0,98, die der Widerstände zwischen 0,75 - 0,97, die Auflösung für den Widerstand des Halbraums liegt nur bei 0,6 - 0,75.



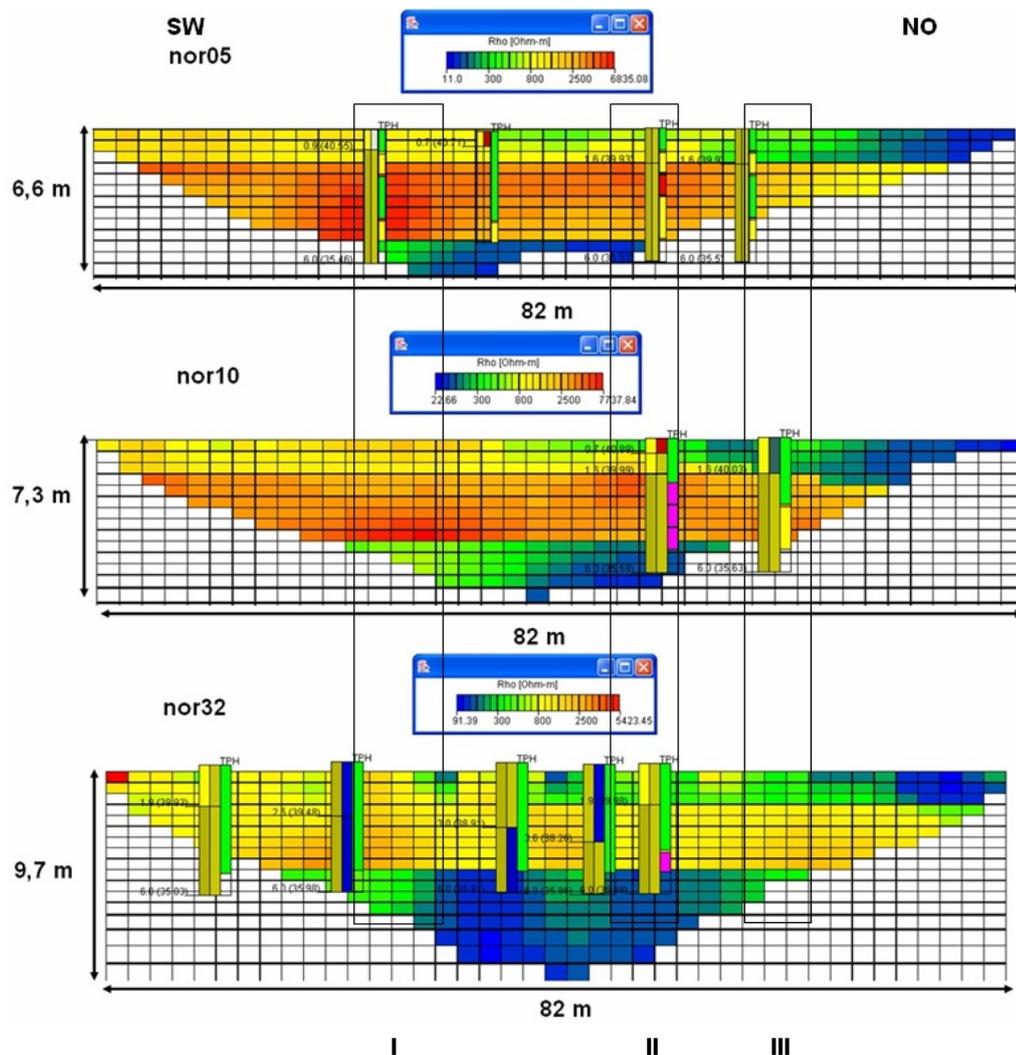
**Abbildung 4.8:** Startmodell für das Profil nor05. Diese wurde aus den Ergebnissen der 1D-Inversionen, die auf das Startmodell projiziert sind, erstellt.

Anhand der 1D-Widerstandsmodelle wurden Startmodelle für alle Profile erstellt und eine erneute Inversion aus dem Programm GSI3D heraus gestartet. Das Ergebnis für die Profile nor05, nor10 und nor32 ist in Abbildung 4.9 zu sehen. Die RMS-Fehler betragen 6,0%, 7,2% und 6,2%. Die Widerstände zeigen für die Profile nor05 und nor10 an der Oberfläche im linken und mittleren Profilbereich Werte um die 1000  $\Omega$ -m, einen kleinräumigen mittig gelegenen besser leitenden Bereich von ca. 500-600  $\Omega$ -m, welcher sich nach rechts fortsetzt und niedrigere Widerstände bis ca. 40  $\Omega$ -m annimmt. Die zweite Schicht erweist sich als sehr schlechtleitend, mit Werten bis knapp 7700  $\Omega$ -m.

Die dritte Schicht, die aufgrund der Überdeckungsoption nur teilweise dargestellt ist, zeigt im Gegensatz zu den angenommenen Werten des Startmodells von 200  $\Omega$ -m Widerstände um ca. 400  $\Omega$ -m im linken Teil des Profils, welches entweder auf einen Einfluss der Kohlenwasserstoffe oder auf eine veränderte Lithologie (z.B. ein Altarm des Rheins) in diesem Bereich hinweist (vergl. Abbildung 4.4; Vertikalansicht des Geoelektrikprofils nor05 im linken unteren Bereich). Diese Möglichkeiten lassen sich aber nicht mehr ohne umfangreiche geologische Geländeuntersuchungen unterscheiden bzw. verifizieren.

Das Profil nor32 in 4.9 besitzt deutlich niedrigere elektrische Widerstände als die Profile nor05 und nor10 im Bereich von 3 bis 5 m. Diese liegen dort bei höchstens 3000  $\Omega$ -m. An der Oberfläche finden sich teilweise gut-leitende Bereiche, die durch den Bodenaustausch entstanden sind.

Auf das Profil projiziert sind wieder Bohrungen, diesmal zusätzlich mit dem gemessenen Kohlenwasserstoffkonzentrationen in der jeweils rechten Säule einer Bohrung. Die Anteile liegen zwischen 0 - 38 mg/kg (grün), 38 - 100 mg/kg (gelb), 100 - 300 mg/kg (rot; gesetzl.



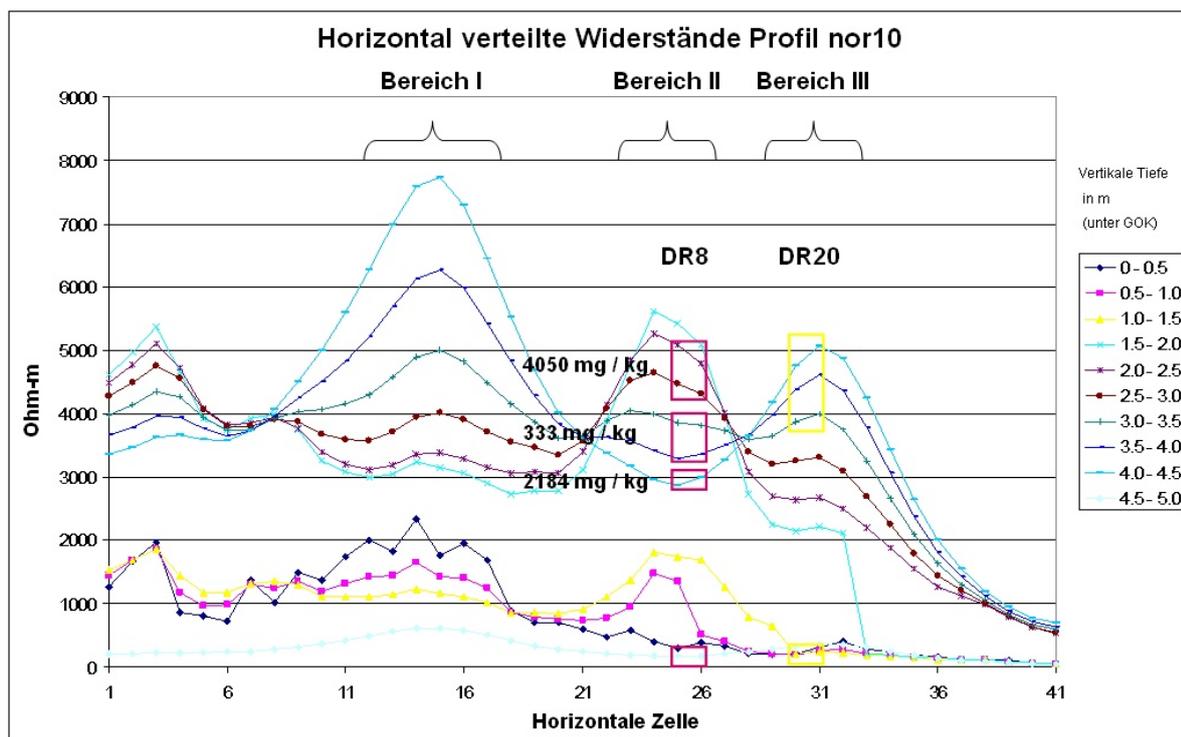
**Abbildung 4.9:** Endmodelle für die Profile nor05, nor10 und nor32. Neben der Widerstandsverteilung sind die Bohrungen einschließlich der gemessenen Kohlenwasserstoff-Konzentration in der jeweils rechten Säule der Bohrung dargestellt. Die Messwerte liegen in Bereichen zwischen 0 - 38 mg/kg (grün), 38 - 100 mg/kg (gelb), 100 - 300 mg/kg (rot) und 300+ mg/kg (lila).

Grenzwert) und 300+ mg/kg (lila). Bei einem visuellen Vergleich zwischen Widerständen und Kohlenwasserstoffen sind drei Bereiche auffällig.

1. **Bereich I:** Dieser Bereich zeigt mit bis zum Grundwasserspiegel zunehmender Tiefe einen Anstieg des elektrischen Widerstandes bis zu 7700  $\Omega$ -m und ist in den Profilen nor05 und nor10 deutlich zu erkennen. Selbst im Profil nor32 ist trotz des Bodenaustausches das gleiche Verhalten erkennbar, mit einem Widerstandsmaximum von nur rund 3300  $\Omega$ -m. Die in diesem Bereich gemessenen chemischen Konzentration des Profils nor05 liegen unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes, im Profil nor32 wurde hier keine Kontamination festgestellt.
2. **Bereich II:** In diesem Bereich wurde die maximale Kohlenwasserstoff-Konzentration im 3. Meter des Profils nor10 mit 4050 mg/kg gemessen. Auffällig ist, dass dies mit einer lokalen Erhöhung des elektrischen Widerstandes im 3. Meter (vadose Zone; s.

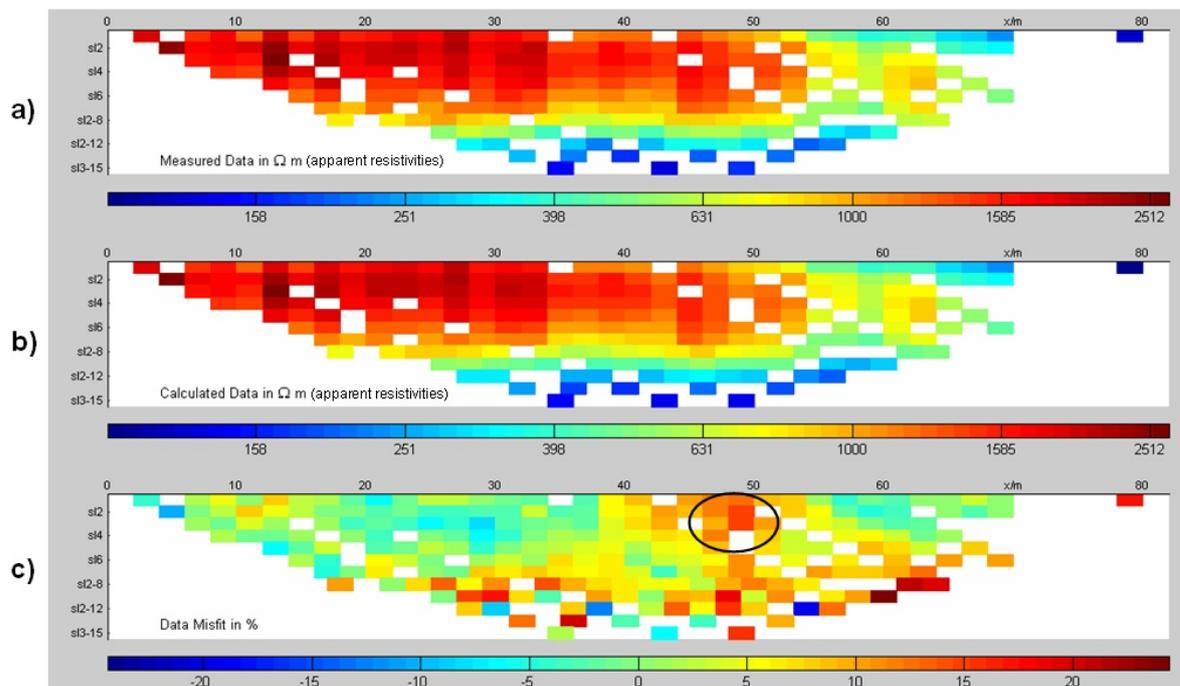
Abbildung 2.9, Modell nach Sauck [2000]) zusammenfällt, welcher sich aber mit zunehmender Tiefe bis zum Grundwasserspiegel wieder erniedrigt. Abbildung 4.10 verdeutlicht dieses Verhalten, in dem die horizontal-verteilten Widerstände dieses Profils gegeneinander aufgetragen werden. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch für das Profil nor05, in dem ebenfalls im gleichen Tiefenabschnitt ein erhöhter Widerstand mit einer erhöhten Kohlenwasserstoff-Konzentration zusammenfällt. Dabei ist zu beachten, dass der Grundwasserabstrom fast senkrecht zu den Profilen in Richtung absteigender Profilvernummern verläuft. Trotz der Sanierungsmaßnahmen im Profil nor32 zeigt sich auch hier nahe des Grundwasserbereichs ebenfalls eine hohe chemische Konzentration, mit zugehörigen Widerständen von rund 1100  $\Omega$ -m. Aufgrund des Bodenaustausches sind die Widerstände allgemein geringer und es hat sich vermutlich eine Restphase auf dem Grundwasserspiegel abgesetzt.

3. *Bereich III*: Ähnlich dem Bereich I zeigen sich auch hier wieder ansteigende Widerstände mit zunehmender Tiefe. Diese sind jedoch aufgrund der Darstellung über die Überdeckungsoption nur ansatzweise zu erkennen, wird aber exemplarisch in Abbildung 4.10 durch horizontal verlaufende Widerstände gut ersichtlich. In diesem Bereich wurden geringe chemische Konzentrationen gemessen.



**Abbildung 4.10:** Darstellung der horizontal verteilten Widerstände für das Profil nor10 mit markierten Kohlenwasserstoff-Messwerten. Gelb: 38 - 100 mg/kg, lila: 300+ mg/kg. An den Positionen der Bohrungen sind diese farblich kodiert aufgetragen. In dem Bereich II fällt das Maximum der Kontamination im 3. Meter mit einem lokalen Widerstandsmaximum von rund 5100  $\Omega$ -m zusammen. Der 4. Meter mit einer Konzentration von 333 mg/kg besitzt Widerstände von maximal 3800  $\Omega$ -m, der 5. Meter mit einer Konzentration von 2184 mg/kg Werte von knapp 2900  $\Omega$ -m. Auffällig sind die gekennzeichneten Bereiche I, II und III, in denen Widerstandsanomalien auftreten.

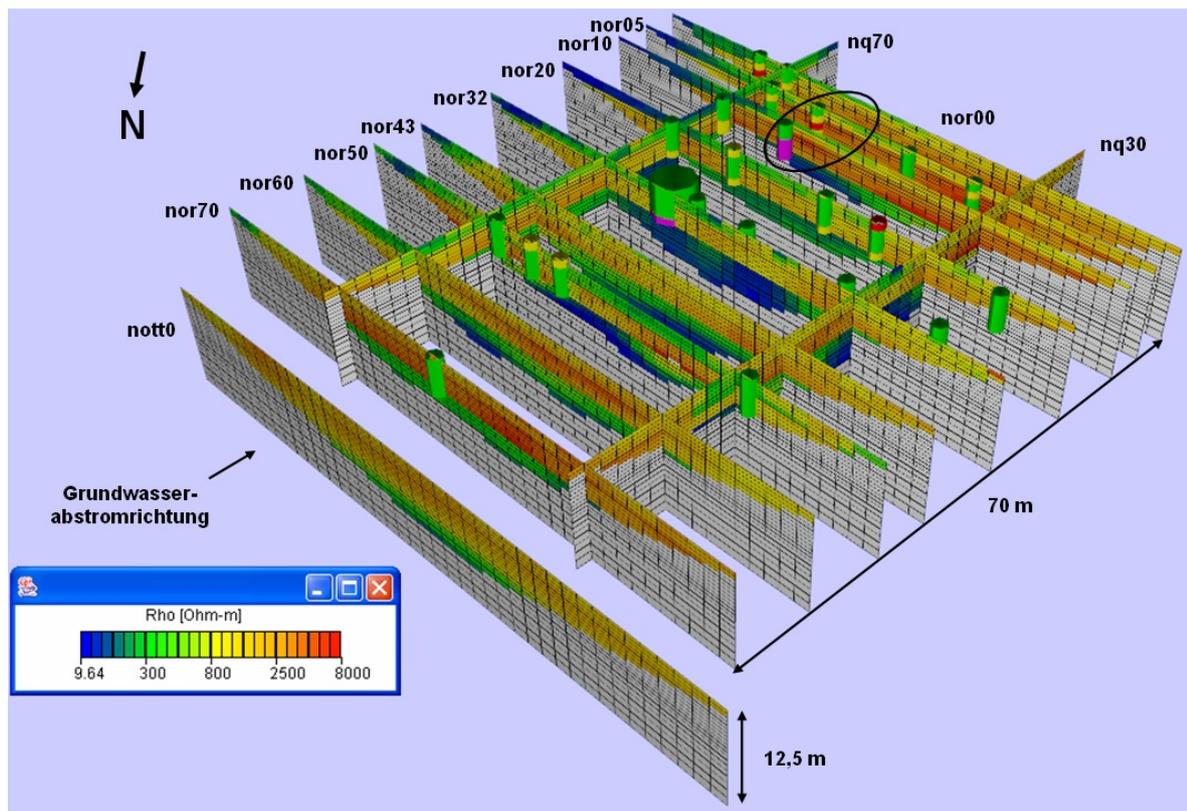
Um zu verifizieren, dass die Widerstände im Bereich II des Profils nor10 auf Messwerte und nicht auf eine Glättung des Inversionsalgorithmus zurückzuführen ist, wurden die Rohdaten des Profils nor10 (siehe Abbildung 4.11) modelliert. Dazu wurde das lokale Maximum von knapp 5500  $\Omega$ -m bei Position  $x = 50$  m in 500  $\Omega$ -m-Schritten verringert und jeweils vorwärts gerechnet. Der Vergleich der beiden Rohdatensätze (hier: a) Messdaten, b) lokales Widerstandsmaximum bei 3000  $\Omega$ -m) zeigt, dass die Verringerung des Modellwiderstandes sich deutlich in den Daten widerspiegelt (10-15% Abweichung), woraus folgt, dass das Widerstandsmaximum durch die Messdaten hervorgerufen wird.



**Abbildung 4.11:** Bildschirmfotos der Rohdaten des Profils nor10 aus dem Programm DC2DInvRes (Günther [2004]) a) als Messdaten, b) als vorwärtsgerechnetes Modell mit einem Maximum von 3000  $\Omega$ -m und c) als prozentuale Differenz pro Messwert. Der markierte Bereich in c) entspricht der Position des lokalen Widerstandsmaximums in 2 - 4 m Tiefe. Die Modellierung ergibt, dass das Modellmaximum an dieser Position durch die Messdaten erzeugt wird und nicht auf eine mögliche Glättung des Inversionsalgorithmus zurückzuführen ist.

Eine Übersicht aller georeferenzierten Widerstandsprofile inklusive des Referenz-Profils zeigt Abbildung 4.12. Zusätzlich eingeblendet sind die gemessenen Kohlenwasserstoff-Konzentrationen. Deutlich erkennbar ist, dass die Profile in dem sanierten Gebiet (Profile nor20, nor32, nor43 und teilweise nor50) deutlich geringere Widerstände als die anderen parallelen Profile aufweisen. Dieses ist auf den Bodenaustausch und die 'pump and treat'-Sanierung zurück zu führen.

Außerhalb des sanierten Gebietes werden Widerstände bis zu 8000  $\Omega$ -m gemessen, wobei diese generell zum Grundwasserspiegel hin in rund 4,5 - 5 m Tiefe zunehmen. Einige Widerstandsmaxima in Grundwasserspiegelnähe erstrecken sich über benachbarte Profile (nor00 - nor10 und nor50 - nor70), korrelieren aber nicht mit erhöhten Kohlenwasserstoff-Konzentrationen. Die Ausnahme bildet das lokale Maximum im Profil nor10 in 2 - 3 m Tiefe (oval gekennzeichnete Bereich, Abbildung 4.11). Einerseits ist es möglich, dass der lokale



**Abbildung 4.12:** Darstellung aller Widerstandsprofile mit eingeblendeten 1D-Kohlenwasserstoff-Konzentrationen. Farbgebung: grün: 0 - 38 mg/kg; gelb: 38 - 100 mg/kg; rot: 100 - 300 mg/kg; lila: 300+ mg/kg.

chemische Eintrag an dieser Position (lila: 300+ mg/kg) durch die jahreszeitlich bedingten Schwankungen des Grundwassers sowohl vertikal als auch horizontal verschmiert wurde und so die erhöhte Konzentration im Profil nor05 im 3. Meter mit 237 mg/kg (markierte Bohrung, rote Sektion, Abbildung 4.12) erklärt, andererseits kann der Eintrag evtl. auch kleinräumig in beiden Profilen erfolgt sein.

Weitere erhöhte chemische Einträge in den Profilen nor20 und nor32 (rote/lila Sektionen der Bohrungen auf diesen Profilen, Abbildung 4.12) weisen auf Restphasen der Kontaminanten hin, die nicht von den Sanierungsmaßnahmen erfasst wurden. Diese zeigen keine auffälligen Widerstandsänderungen im Vergleich zu ihren Nachbarwerten, ebenso wie alle Einträge mit geringen Konzentrationen (gelb; 38 - 100 mg/kg).

#### 4.2.5 Fazit

Die Untersuchung der Testfläche Köln mit geologischen, geochemischen und geophysikalischen Methoden hat gezeigt, dass der erstmalig durchgeführte interdisziplinäre Ansatz im Feld gut ineinander gegriffen hat. Nach Untersuchungen durch die Geophysik wurden Anomalien (Geoelektrik und Metalldetektor) lokalisiert und auf deren Grundlage 23 Vorschläge für Bohrungen an die Analytik-Firma weitergeleitet. Der grundsätzliche Nachteil an dieser Fläche war, dass diese schon einer Teilsanierung unterzogen worden und damit hohe Kohlenwasserstoff-Kontamination nur noch partiell vorhanden war.

Bei der in dieser Arbeit durchgeführten Reinterpretation der Geoelektrik-Daten mit den in das Programm **GS13D** implementierten geophysikalischen Modulen wurden Startmodelle erstellt, die durch Kalibrierung anhand von Bohrlochinformationen (d.h. 1D-Inversion unter Berücksichtigung möglicher Schichtgrenzen) gewonnen wurden. Aufgrund mit der Tiefe abnehmender Sensitivitäten können geologische Schichtgrenzen möglicherweise nicht mehr korrekt erkannt werden, welches durch die erzeugten Startmodelle korrigiert werden soll.

Der anschließende Vergleich zwischen den gemessenen Kohlenwasserstoff-Konzentrationen und der Widerstandsverteilung zeigt einen Hinweis auf eine positive Korrelation, wobei aber nicht eindeutig belegt werden kann, ob seitens der Kohlenwasserstoffe ein Schwellenwert vorhanden ist, ab dem die Kontamination erhöhte Widerstände erzeugt, da nur ein Fall für die Testfläche existiert. Obwohl laut Literatur bei einer längerfristigen Kontamination meist mit erhöhten Leitfähigkeiten aufgrund von Biodegradation zu rechnen ist, konnten diese in diesem Fall nicht nachgewiesen werden.

Während die Ergebnisse der kommerziell durchgeführten Geoelektrik-Untersuchung mittels des Programms **Res2DInv** (Loke and Barker [1996b]) erstellt und die Bilder als Bildschirmfotos dargestellt wurden (vergl. Abbildung 4.4) war es nicht möglich, kleinräumige anomale Bereiche mit auftretenden erhöhten Kohlenwasserstoff-Konzentrationen genauer abzugleichen, sodass eine unpassende Visualisierung der Profile vorlag. Durch die Implementierung der geophysikalischen Module können die Wertebereiche nun frei skaliert und auch Datensätze verschiedener Disziplinen aufeinander abgestimmt werden.

## 4.3 Testfläche Massa

Für die Untersuchung der Testfläche in Italien stand eine arbeitsfähige Version der Entscheidungshilfe - Matrix zur Verfügung. Nach den Erfahrungen der Untersuchungen in Köln und Lyftkranen/Schweden (nicht in dieser Arbeit gezeigt) sollte die interdisziplinäre Arbeitsweise weiter verstärkt und die Kommunikation im Feld besser koordiniert werden. Das Gebiet einer ehemaligen Pestizid- und Herbizid-Fabrik besitzt u.a. hohe Schwermetall-Einträge im Grundwasser und soll wieder einer industriellen Nutzung zugänglich gemacht werden.

### 4.3.1 Geologie und Hydrogeologie des Messgebietes

Die Testfläche liegt in der Apuanischen Ebene, welche zwischen den gebirgigen, metamorphen Reliefs (Apuanische Alpen) und der Küstenzone mit alluvialen und marinen Sedimenten des Oberen Pleistozän angesiedelt ist (*Gargini et al.* [2003]). Generell wird die Apuanische Ebene durch folgende sedimentäre Muster charakterisiert:

- alluviale, durch Kiese geformte Ablagerungen, Sande und Kiese mit Schichten aus Ton und Schluff; diese Sedimente sind in der inneren Zone nahe den Hügeln und formen alluviale Kegel, welche durch den Apuan Fluss genährt werden;
- marine Sande, nur in der äußerem Zone der Apuan Ebene (westwärts), die in küstennähe bis zu 30 m mächtig werden können;
- Tone und Schluffe, lokal Torf, die in einem engen Band nahe der alluvialen Kegel auftreten;

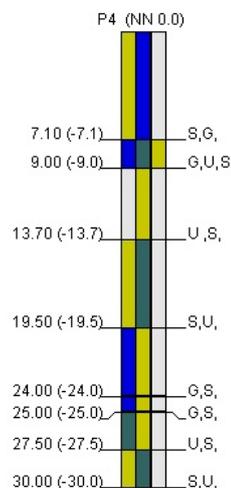
Die Ebene wurde als Folge des kontinuierlichen fluvialen Sedimentation-Abstroms gebildet, die in heterotopischen Kontakt mit der marinen Transgression steht. Die Grenzen zwischen den unterschiedlichen sedimentären Typen sind nicht immer gut definiert, weil sie von der marinen Transgression und der fluvialen Ablagerungen beeinflusst sind. Die Korngrößen der Sedimente ändern sich von Ost nach West. Kieselsteine, Kies und Grobsande mit Schluff-Ton-Einlagerungen sind östlich, schluffige Sande sind westlich anzutreffen.

In dem Messgebiet existieren zwei Aquifere. Der erste ist ein freier Aquifer und aufgrund von dünnen Ton-Schichten lokal halb-offen. Vorangegangene Permeabilitätstests (*Gargini et al.* [2003]) ergeben für die hydraulische Konduktivität Werte um  $10^{-4}$  m/s. Ein piezometrischer Test Anfang 1999 ergab eine Tiefe von 1 bis 1,8 m unter GOK mit einem hydraulischen Gradienten von 0.1 %. Vorausgehende Messungen in den Jahren 1991 und 1993 lassen schließen, dass sich der piezometrische Level im Allgemeinen verringert und auch saisonal starke Abweichungen aufzeigen kann, z.B. für das Industrie-Messgebiet um bis zu 3 m. Die Grundwasser-Fließrichtung ändert sich ebenfalls über das Jahr hinweg. Diesem Aquifer folgen Schichten geringer hydraulischer Konduktivität, wobei sich bei ca. 20 m unter GOK ein weiterer Aquifer befindet. Dieser kann hydraulisch von dem oberen getrennt sein, dies war aber nicht bewiesen.

Die Fabrik liegt ca. 3 m über dem Meeresspiegel und rund 1,5 km von der Küste entfernt. Die Aufschüttungen innerhalb des Industriegebietes sind ca. 1,5 - 2 m mächtig und bestehen aus tonigen Sanden, Sanden, Kiesen, Asphalt, Beton, Abfall, Steinen und pyritischen Aschen.

In den letzten 10 Jahren sind viele Bohrungen auf dem Fabrikgelände durch die Universitäten Florenz und Ferrara durchgeführt worden. Ähnlich wie schon auf der Kölner Testfläche sollten aber möglichst wenig Vorab-Informationen an die Untersuchungsgruppen gegeben werden, damit die Ergebnisse der NORISC-Untersuchung mit denen der älteren Untersuchungen verglichen werden können. Abbildung 4.13 zeigt eine von mehreren Tiefbohrungen bis 30 m, die in diesem Fall am Rande des NORISC-Untersuchungsgebietes liegt. Anhand dieser Bohrungen wurde eine Abschätzung der lokalen Lithologie erstellt und von dem zuständigen Flächen-Manager (Dr. Gargini, Universität Ferrara) an die Untersuchungsfirmen weitergegeben. Die daraus abgeleitete gemittelte Lithologie kann von einzelnen Bohrungen abweichen und lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- eine Auffüllungsschicht variabler Mächtigkeit, ca. 0,5 m im Durchschnitt, bestehend aus feinkörnigem Sand mit Betonresten und diverser Abfall und einer diskontinuierlichen Schluffschicht bis maximal 1 m Mächtigkeit;
- Sande bis in ca. 9 m Tiefe (1. Aquifer), gefolgt von einer schluffigen Schicht, welche die darüberliegenden Sande von den darunterliegenden kiesigen Ablagerungen trennt;
- Kiese des zweiten Aquifers in 20 - 25 m Tiefe;
- sowohl die Sande als auch die Kiese sind Aquifere mit Grundwasserfluss. Die trennende schluffige Schicht in ca. 10m Tiefe ist heterogen und trennt vermutlich daher die beiden Aquifere nicht kontinuierlich;



**Abbildung 4.13:** Tiefbohrung P4 am Rand des Messgebietes. Legende: S: Sand, G: Kies, U: Schluff, T: Ton

### 4.3.2 Ehemalige Nutzung

Die Tabelle 4.5 gibt eine Übersicht über die zeitliche Nutzung der Testfläche. Von 1935/40 bis 1969 produzierte die dortige Firma  $SO_2, SO_3, H_2SO_4$  durch Rösten von Pyriten und arsenischen Pyriten und stellte Chlor-Soda, Ammoniak, Arsenolite, Düngemittel und bleichende Lehme her. Von 1969 bis 1978 wurde dies von citrische Säuren, Pestizide mit Atrizinen ersetzt. Ab 1982 kamen abschließend Phytopharmazeutika, phosphorige und chlorinierte Pestizide, Arsenite und sulphidische Komponenten dazu.

Die Fabrik wurde nach einer Explosion am 12. März 1984 geschlossen, soll aber in absehbarer Zukunft saniert und wieder für industrielle Zwecke nutzbar gemacht werden. Während der letzten 10 Jahren wurde ca. 600 Bodenproben von den Universitäten Florenz und Ferrara genommen. Diese haben gezeigt, dass sowohl der Boden als auch das Grundwasser in höchsten Maße mit Pestiziden und Schwermetallen verschmutzt ist.

1935/40 bis 1969	Produktion von $SO_2, SO_3, H_2SO_4$ sowie Chlor-Soda, Ammoniak, Arsenolite, Düngemittel und bleichende Lehme
1969 bis 1978	Herstellung von citrische Säuren, Pestizide mit Atrizinen
1982 bis 1984	Herstellung von Phytopharmazeutika, phosphorige und chlorinierte Pestizide, Arsenite und sulphidische Komponenten
12.3.1984	Explosion auf dem Gelände

**Tabelle 4.5:** *Historie der Testfläche Massa.*

Die Abbildung 4.14 zeigt ein Foto der Testfläche während der NORISC-Untersuchung. Die Baugrube im Vordergrund liegt am Rande der untersuchten Fläche. Man erkennt im Kantenschnitt der Grube Fundamentreste mit Auffüllungen und eine sandige Matrix mit tonigen und kiesigen Anteilen. Der Grundwasserspiegel liegt hier bei ca. 1,5 m unter GOK. Der Hügel am linken hinteren Bildrand liegt innerhalb der Untersuchungsfläche und wirkte sich auf die Profile der geophysikalischen Untersuchung aus.

### 4.3.3 DSS-Ergebnis

Die Hauptaufgabe der Geophysik bestand in der Beantwortung der Frage, ob die beiden Aquifere auf der  $120 \times 100 \text{ m}^2$  großen Untersuchungsfläche verbunden sind oder nicht. Daraus sollte dann abgeleitet werden können, ob z.B. Pestizide oder Schwermetalle in diesem Bereich in den unteren Aquifer gelangen können. Nach Eingabe der Untersuchungsparameter (Lokalisierung unbekannter Objekte, Kartierung der Lithologie bis zum zweiten Aquifer in 20 m Tiefe) wurden das Bodenradar, EM31 und die Geoelektrik als optimale Methodenkombination von der DSS ausgegeben. Die Tabelle 4.6 zeigt das Ergebnis in einer Übersicht mit den jeweiligen Spezifikationen.

Nach Rücksprache mit den NORISC-Partnern wurden folgende Modifikationen vorgenommen, um einige Gegebenheiten der Fläche zu berücksichtigen:



**Abbildung 4.14:** Foto der italienischen Testfläche während der NORISC-Untersuchung. Die Blickrichtung ist Nord-Nord-Ost. Die Baugrube im Vordergrund liegt am Rande der Testfläche. Der Grundwasserspiegel liegt bei ca. 1,5 m unter GOK. Deutlich erkennbar sind Fundamentreste an der Kante der Grube, Auffüllungen und Schutt an der Oberfläche und darunter eine sandige Matrix mit tonigen und kiesigen Anteilen.

Methode	Messart	Profilabstand (m)	Aufgabe
Bodenradar	Quasi-kontinuierlich	2	Unbekannte Objekte, Eindringtiefe: bis zum 1. Aquifer und nach Möglichkeit tiefer; Antenne: um 100 MHz, höchstens 250 MHz
EM31	Quasi-kontinuierlich	5	elektrische Widerstände des Untergrundes, Bestätigung von Bodenradar-Lokalisierungen
Widerstands-Geoelektrik	4m Elektroden-Abstand	10	Widerstandsverteilung des Untergrundes bis in den 2. Aquifers in ca. 20 m Tiefe;

**Tabelle 4.6:** Übersicht über die von der DSS vorgeschlagenen Methoden für die italienische Testfläche.

- die Bodenradar-Ergebnisse sollten während der Messung auf sinnvolle Ergebnisse überprüft werden. Sollte das Signal aufgrund des hohen Grundwasserspiegels zu gering werden, ist die Messung abzubrechen;
- die EM31-Untersuchung sollte mit einem Profilabstand von 2 anstatt 5 m ausgeführt werden und es sollte zusätzlich die In-Phase-Komponente benutzt werden, um nach unbekanntem metallischen Objekten zu suchen; zusätzlich wurde von der ausführenden Firma *Georisorse Italia* noch eine EM34-Messung durchgeführt, um die Aussagetiefe zu vergrößern.
- um Information bis zur Basis des zweiten Aquifers zu bekommen, sollten die Pro-

fillängen über die eigentliche Testfläche hinausgehen, damit die geforderte Eindringtiefe erreicht werden kann;

Anhand dieser Vorgaben wurde dann die geophysikalischen Messungen mit den folgenden Konfigurationen durchgeführt:

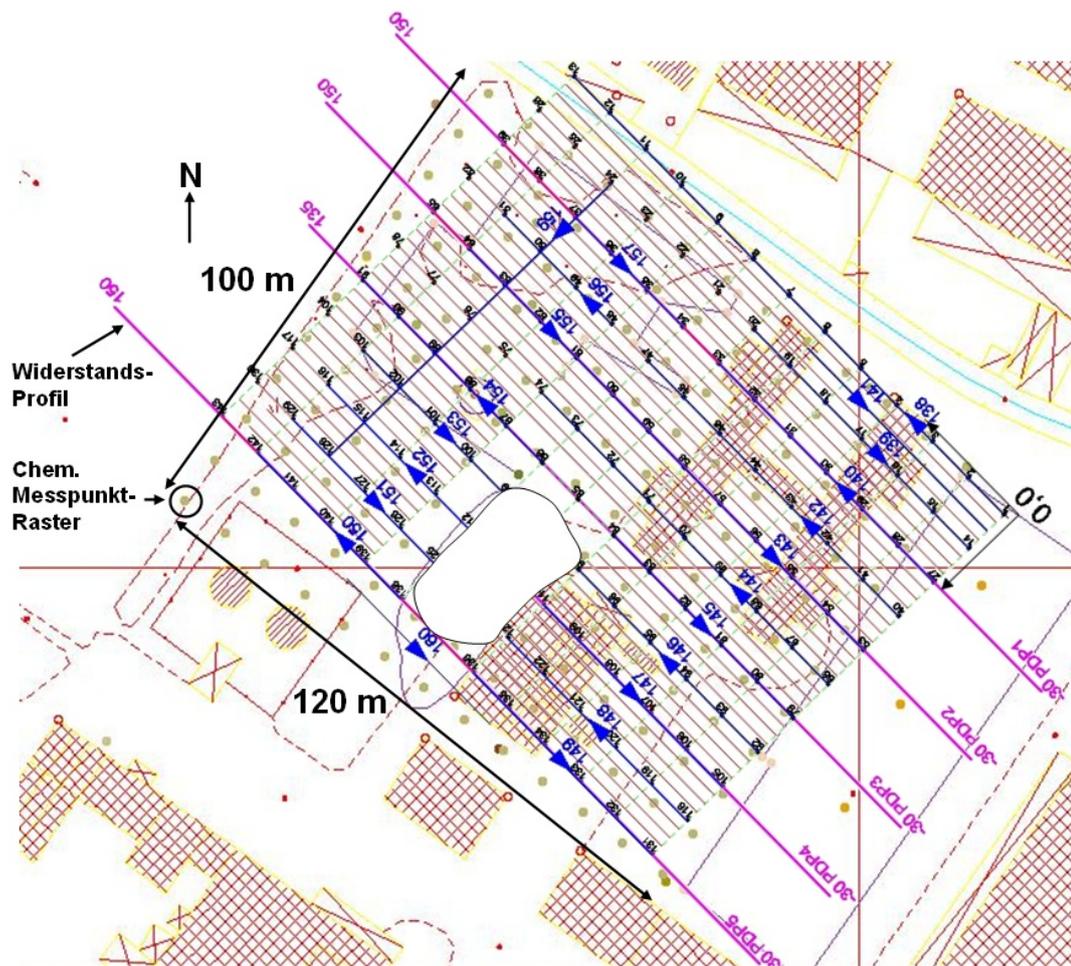
- Geoelektrik: 5 parallele Profile mit einer Pol-Dipol-Konfiguration; Profillänge: 85 bis 180 m und 20 m Profilabstand. Die unterschiedlichen Profillängen resultieren aus einem im Messgebiet gelegenen Hügel, welcher in Abbildung 4.15 als weiße Fläche innerhalb des Testgebietes zu erkennen ist.
- EM-Survey mit EM31 und EM34; EM34-Konfiguration: 5 m Profilabstand mit 5 m Messpunktabstand; die Antennenabstände betragen 10 bzw. 20 m mit einem horizontalen Dipol. Daraus resultiert laut Tabelle 2.5 eine ungefähre Eindringtiefe von 12,5 - 15, bzw. von 25 - 30 m. Insgesamt wurden 928 Punkte gemessen; EM31-Konfiguration: 5 m Profilabstand mit 2 m Messpunktabstand und 1166 Messpunkten.
- Bodenradar: 24 Einzelprofile mit einem Abstand von ca. 10 m. Die Gesamtprofillänge beträgt 1190 m. Aufgrund des oberflächennahen Grundwasserspiegels (zwischen 0,5 und 1,5 m) wurde eine 300 MHz-Antenne verwendet, die Signalstärke war jedoch in größeren Zeitbereichen sehr gering.

Abbildung 4.15 zeigt eine schematische Übersicht über die georeferenzierte Lage der geophysikalischen Profile (EM31 und EM34: graue Linien; Bodenradar-Profile: nummerierte blaue Linien; Geoelektrik-Profile: rosa Linien) zusammen mit dem Punkt-Raster (graue Punkte), welches für die chemische Probennahme verwendet wurde. Die schraffierten Bereiche kennzeichnen ehemalige Gebäude, der Hügel innerhalb des Messgebietes wird als weiße Fläche dargestellt. Die beiden Verläufe der Messraster (d.h. Chemie - Geophysik) laufen nicht parallel bzw. sind nicht deckungsgleich, welches sich für die spätere Kalibrierung der Geoelektrik-Daten anhand der Bohrlochdaten ungünstig auswirkt.

Die geophysikalischen Untersuchungen wurden innerhalb von zwei Wochen abgeschlossen. Die ersten Ergebnisse wurden einen Tag vor Beginn der chemischen und hydro-geologischen Untersuchungen besprochen, das vollständige Endergebnis war aber erst nach Abschluss der NORISC-Untersuchung verfügbar.

#### 4.3.4 Synthetische Modellierungen

Die Ergebnisse der EM31- und EM34-Messungen zeigen einen guten Leiter, welcher quer durch die Widerstandsprofile verläuft. Eine Darstellung der In-Phase-Komponente der EM31-Messung mit den fünf Widerstandsprofile P1 - P5 in der GSI3D - 3D-Ansicht in Abbildung 4.16 zeigt, dass auch in den Widerstandsprofilen ein guter und teilweise großflächiger Leiter von ca. 5 - 30  $\Omega$ -m auftaucht. Der In-Phase-Anteil weist dabei auf einen metallischen Leiter hin (vergl. Kapitel 2.6.2). Der ungefähre Verlauf des Rohres wird durch das schwarze Rechteck gekennzeichnet. Eine detailliertere Beschreibung der Widerstandsverteilung findet sich in Abschnitt 4.3.5.

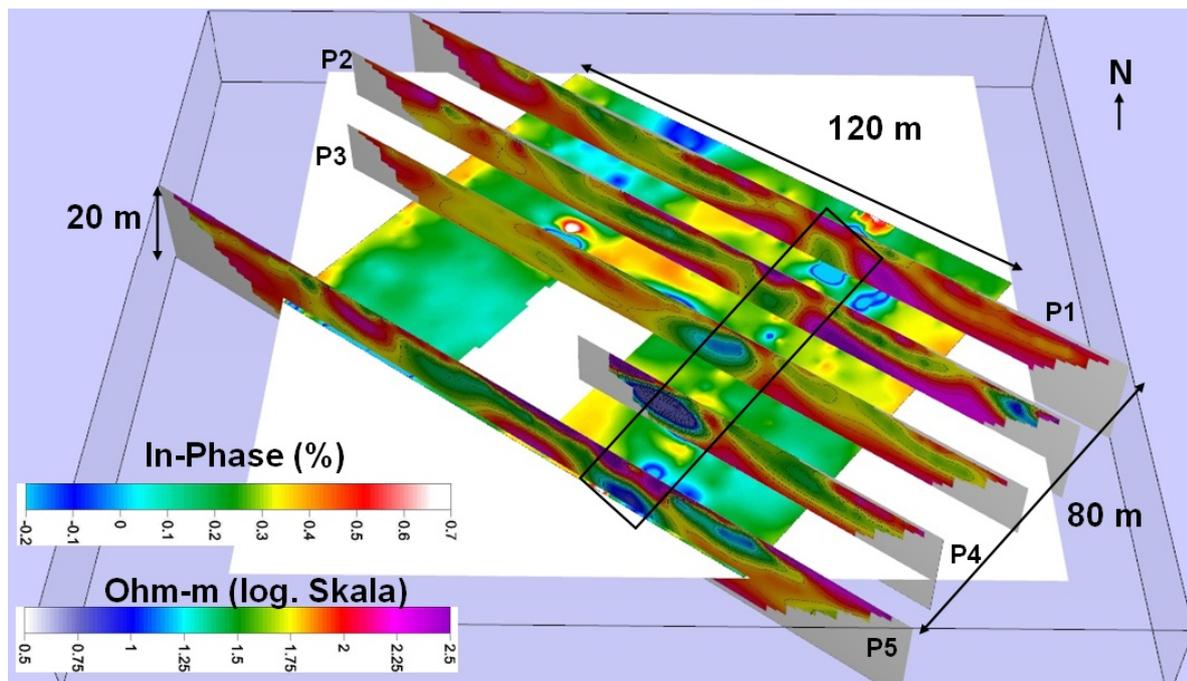


**Abbildung 4.15:** Kartierungsansicht des GSI3D: Darstellung der ehemaligen Bebauung (schraffiert), chemischem Messpunkt-Raster (graue Punkte) und geophysikalischen Profilen (graue, blaue und rote Linien). Die geophysikalischen Profile weichen ca.  $10^\circ$  vom chemischen Messraster ab.

Aufgrund des großen Widerstandscontrastes zwischen Boden (ca.  $5 - 600 \Omega\text{-m}$ ) und Metallrohr (lt. allgemeiner Literatur ca.  $10^{-7} \Omega\text{-m}$ ) stellt sich die Frage, inwieweit das Rohr die Widerstandsdaten beeinflusst und so die Lokalisierung einer möglichen Diskontinuität zwischen den zwei Aquiferen erschwert.

Aufgrund von Berechnungen unter Annahme der in Abschnitt 4.3.1 dargestellten Geologie wird für die Geoelektrik ein Gitter mit  $\Delta x = 2,5 \text{ m}$  und  $\Delta z = 1,25 \text{ m}$  gewählt. Die synthetischen Modellierungen wurden mit dem Programm von Günther [2004] durchgeführt. Das Profil 1 ist in Abbildung 4.17 a) als Ergebnis einer Inversion mit homogenem Startmodell und einem Regularisierungsparameter von  $\lambda=20$  mit einem RMS-Fehler von 5% dargestellt. Für das Profil P1 zeigen sich folgende Widerstandsverteilungen:

- bis 10 m: es existieren zwei gute oberflächennahen Leiter (bis 5 m,  $\leq 50 \Omega\text{-m}$ ) für  $x = 30 - 60$  und  $100 - 145 \text{ m}$ , wobei letzterer bis in 10 - 15 m abtaucht, und weiterhin ein kleinräumig schlechter Leiter an der Oberfläche bei  $x = 65 \text{ m}$  mit Widerständen um  $500 \Omega\text{-m}$ ;
- ab 10 m: zwei gut leitende Bereiche befinden sich zwischen  $x = 50 - 80$  und  $130 -$

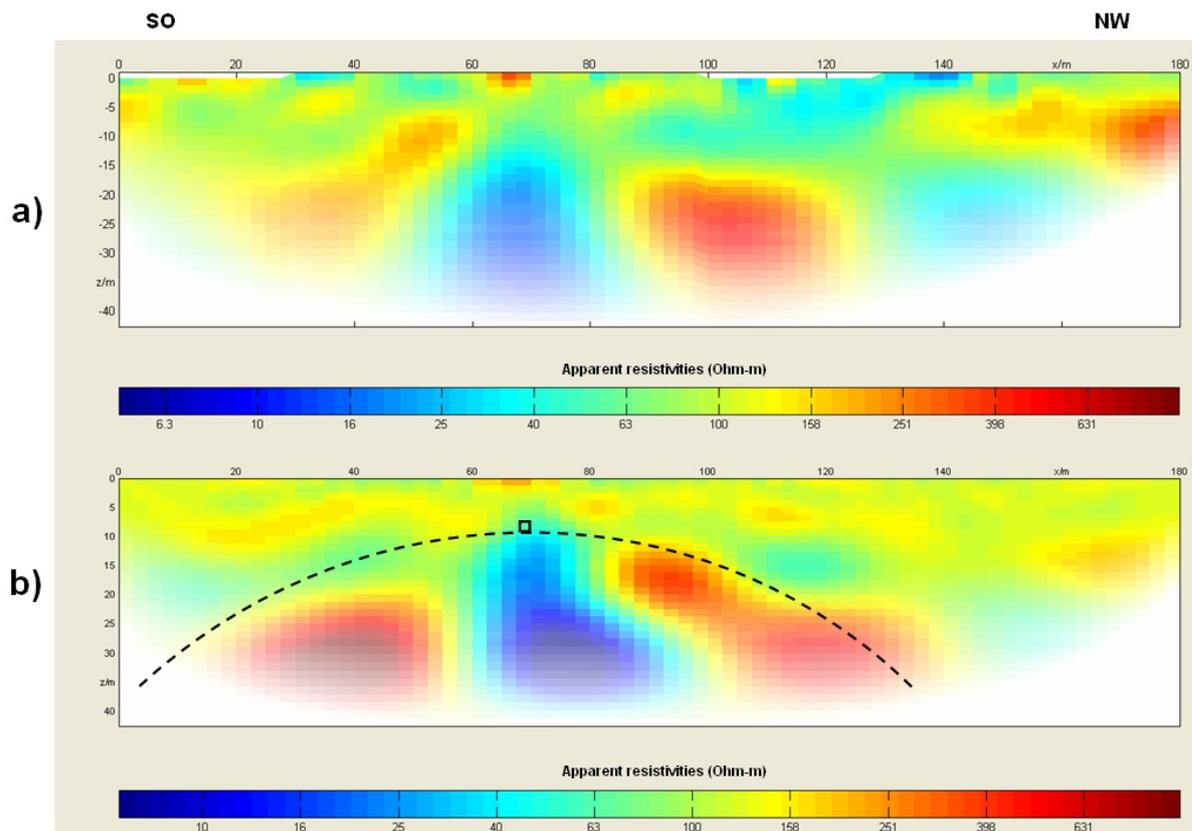


**Abbildung 4.16:** 3D-Ansicht GSI3D: visueller Vergleich zwischen den 5 senkrechten Widerstandsprofilen und dem horizontalen In-Phase-Ergebnis der EM31-Messung. Die Lage des Rohres ist mit einem schwarzen Rechteck gekennzeichnet. Die Widerstandsprofile zeigen an den entsprechenden Schnittpunkten einen guten Leiter in ca. 4 bis 15 m Tiefe. Die Widerstandsskala ist logarithmisch aufgetragen, die In-Phase-Werteskala ist in Prozent des primären magnetischen Feldes angegeben.

170 für  $z \geq 15$  m; diese werden durch einen hochomigen Bereich mit Widerständen um  $600\Omega\text{-m}$  getrennt, ein weiterer schlechter Leiter (ca.  $130 - 220\Omega\text{-m}$ ), beginnend zwischen  $x = 50 - 60$  m und  $z = 7,5$  m fällt nach links bis in eine Tiefe von 30 m ab;

Als Vergleich zu dem Ergebnis der Inversion der Messdaten zeigt Abbildung 4.17 b) das Inversionsergebnis einer synthetischen Modellierung, wobei die gleichen Parameter wie für die Inversion der Messdaten verwendet wurden. Unter der Annahme eines metallischen Rohres mit einer Leitfähigkeit von  $10^{-7}\Omega\text{-m}$ , einem Durchmesser von 0,2 m und einer Tiefe von 10 m wurde das ursprüngliche Gitter um das Rohr herum graduell verfeinert, mit einem  $120\Omega\text{-m}$ -Halbraum vorwärts gerechnet und anschließend mit dem normalen Gitter invertiert. Der RMS-Fehler beträgt bei 3% Rauschen ebenfalls 5%.

Das Ergebnis der synthetischen Modellierung in Abbildung 4.17 b) zeigt ebenfalls für einen Bereich ab 10 m Tiefe zwischen  $x = 20 - 120$  m dem Profil 1 sehr ähnliche Strukturen. Sowohl der gute Leiter für  $x = 50 - 80$  m als auch die zwei flankierenden schlechten Leiter stimmen von ihrer Position als auch von den Modellwerten gut überein. Aus dem Vergleich wird ersichtlich, dass der in Abbildung 4.17 b) gekennzeichnete Bereich unterhalb der Kurve durch das Rohr dominiert wird und nicht zu einer Identifizierung des zweiten Aquifers auf diese Weise herangezogen werden kann. Aber selbst für Bereiche oberhalb der 10 m zeigen eigentlich nur die niederohmige Gebiete mit ca.  $\leq 60\Omega\text{-m}$  deutliche Abgrenzungen vom synthetischen Modell, sodass bei der Interpretation das Widerstandsmodell im Allgemeinen mit Vorsicht zu interpretieren ist. Aus diesem Grund ist ein homogenes Startmodell unter diesen Voraussetzungen nicht geeignet, die der Geoelektrik gestellte Aufgabe zufriedenstellend zu



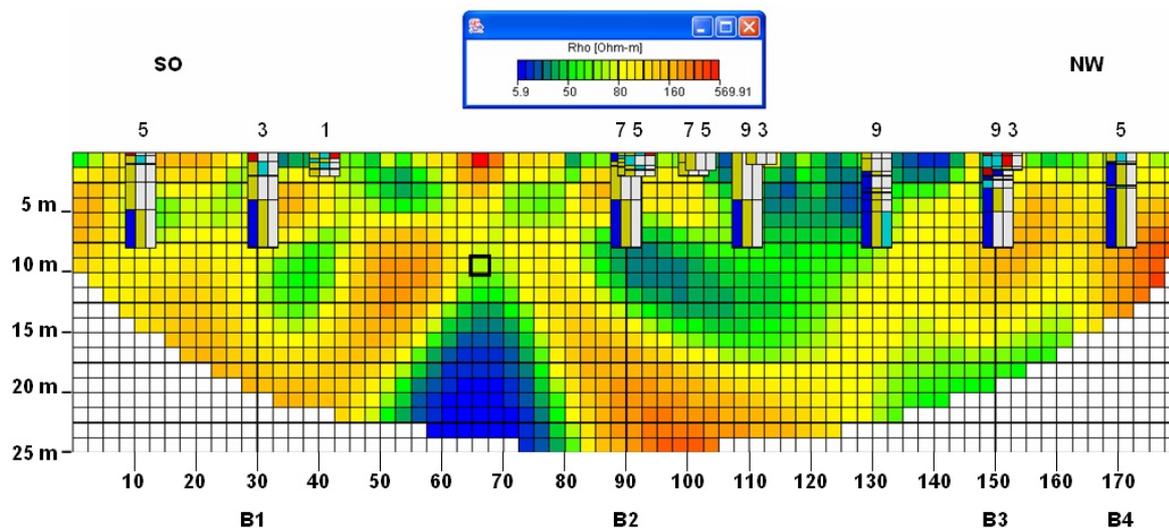
**Abbildung 4.17:** Vergleich zwischen Widerstandsmodellen von a) Profil 1 und b) einer synthetischer Modellierung mit Metallrohr durch das Programm von Günther [2004]. Die RMS-Fehler betragen jeweils 5 %. Die Dominanz des Metallrohres auf die Daten in b) ist unterhalb der eingezeichneten Kurve so groß, dass die Messdaten aus a) keine Aussage über den Verlauf des zweiten Aquifers in diesem Tiefenbereich zulassen. Der kleinen weißen Aussparungen an der Oberfläche in a) geben die Topographie des Messgeländes wieder.

lösen.

### 4.3.5 Widerstands-Geoelektrik

Wie schon in Abschnitt 4.3.3 erläutert, wurde das Untersuchungsgebiet mit fünf Widerstandsprofilen zwischen 85 - 180 m Profillänge und einem Profilabstand von 20 m untersucht, um mögliche Diskontinuitäten zwischen den zwei Aquiferen zu lokalisieren. Abbildung 4.18 zeigt das Profil P1 mit darauf projizierten Bohrungen bis zu einer Entfernung von 9 Metern und einer Überdeckung von 0.2. Die maximal Eindringtiefe wurde mittels des 'Depth of Investigation'-Index auf 20 m bestimmt, die Gitterabstände belaufen sich aufgrund von synthetischen Modellierungen mit Hilfe von geologischen Informationen auf  $\Delta x = 2,5$  m und  $\Delta z = 1,25$  m, als Regularisierungsparameter wurde  $\lambda = 20$  gewählt.

Aufgrund des vorhandenen Bohrgerätes konnten nur Bohrungen bis in eine Tiefe von maximal 8 m abgeteuft werden. Aus diesem Grund konnten die Ergebnisse der Geophysik nicht für den Bereich des zweiten Aquifers verifiziert und die Bohrungen nicht für Kalibrationszwecke genutzt werden. Die Basis des oberen Aquifers (s. Abschnitt 4.3.1) wird nur in wenigen



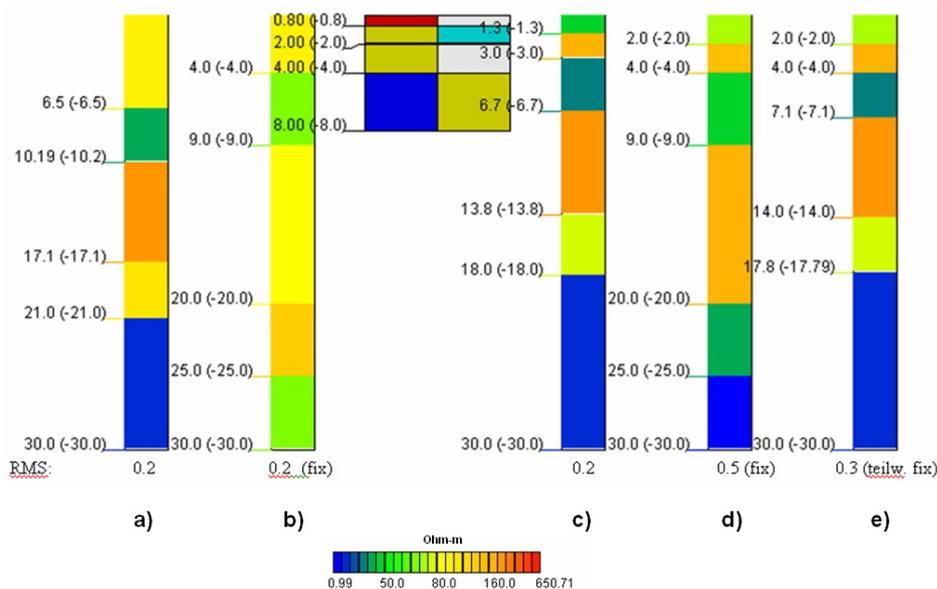
**Abbildung 4.18:** Darstellung des Profils P1 mit darauf projizierten Bohrungen. Die Entfernungen der Bohrungen zum Profil sind in Metern angegeben. Die gezeigte Überdeckung ist  $ge = 0,2$ . Die Lage des Metallrohres bei  $x = 65,0 - 67,5$  m und  $z = 8,75 - 10$  m ist mit einem schwarzen Rechteck gekennzeichnet. Die Bohrungen B1 - B4 werden zur Kalibrierung von 1D-Inversionsergebnissen benutzt. Die Legende für die Bohrbeschreibung findet sich in Abbildung 4.1.

Bohrungen der Profile P3 - P5 (siehe Appendix B) angetroffen, sodass abgesehen von der geologischen Vorinformation nur wenige aktuelle Tiefenangabe für die Aquiferbasis vorliegen.

Da schon im Abschnitt 4.3.4 eine allgemeine Beschreibung des Widerstandsmodells des Profils P1 besprochen wurden, wird hier verstärkt der Vergleich zwischen den Widerständen und der Geologie der Bohrungen durchgeführt. Dieser zeigt, dass bei tonigen Nebengemengenteilen (türkis) in Profilnähe (Bohrlochentfernung  $\leq 3$  m) diese häufig mit Widerständen unter  $70 \Omega\text{-m}$  korrelieren, aber dieses Verhalten nicht kontinuierlich ist. Auffällig ist der gut leitenden Bereich zwischen  $x = 100 - 145$  m bis  $z = 7,5$  m und Widerständen bis  $10 \Omega\text{-m}$ . Diese Werte können aufgrund fehlender Bohrlochinformationen nicht klar zugeordnet werden, da die vorhandenen Bohrungen bei  $x = 102,5$  und  $112,5$  m (5 bzw. 3 m Entfernung) nur Sande im ersten Meter anzeigen. Darüberhinaus liegen für diesen Bereich keine geologischen Angaben vor. Um solche geringen Widerstände zu messen wären dafür massive Toneinträge notwendig, die aber laut Schichtabfolge nicht vorliegen. Bei reinen sandigen und kiesigen Hauptgemengenteilen liegen die Widerstände zwischen  $80 - 500 \Omega\text{-m}$ . Die Sande sind generell bis zu einer Tiefe von 4 m anzutreffen, die Kiese ab 4 m und erstrecken sich dann bis zur Endteufe in 8 m.

Aus dem Ergebnis der synthetischen Modellierung im vorigen Abschnitt folgt, dass ein homogenes Startmodell für den Bereich ab 10 m Tiefe stark von dem Metallrohr beeinflusst wird. Um die Auswirkung des Metallrohres auf die Messdaten möglichst zu reduzieren, werden Startmodelle nach der gleichen Technik wie bei der Kölner Testfläche erstellt. Dazu werden an ausgesuchten Bohrlochpositionen 1D-Inversionen durchgeführt und diese anhand der geologischen Informationen abgeglichen. Die Bohrungen sollen relativ weit von der Position des Metallrohres entfernt sein, damit eine möglichst große ungestörte Tiefenaussage über die Widerstände gemacht werden kann. Für das Profil 1 wurden vier Bohrungen B1

- B4 ausgesucht (vergleiche Abbildung 4.18), wobei exemplarisch für die Bohrung B1 einige 1D-Inversionsergebnissen in Abbildung 4.19 als Bildschirmfoto des GIS-Programms gezeigt werden und als Äquivalenzmodelle für diese Position anzusehen sind.



**Abbildung 4.19:** Vergleich zwischen Bohrung B1 und zugehörigen 1D-Inversionsergebnissen (Äquivalenzmodellen) als 'Vertikalprofil' im GSI3D. Bohrungen a) und b) sind 5-Schichtfalle, die Bohrungen c) - e) 6-Schichtfalle. Die tonigen Anteile zwischen 0,8 und 2,0 m werden als erhöhte Oberflächenleitfähigkeit in den 6-Schicht-Bohrungen angezeigt.

Die Bohrungen a) und b) sind 5-Schichtfalle, die Bohrungen c), d) und e) 6-Schichtfalle. Die Parameter Mächtigkeit und Widerstand wurden entweder nicht fixiert (keine Angabe), die Mächtigkeiten teilweise nach Angaben von *Gargini et al.* [2003] (s. Kapitel 4.3.1) vollständig fix gehalten ('fix') oder im letzten Ergebnis nur für die ersten beiden Mächtigkeiten ('teilw. fix') und besitzen einen RMS-Fehler zwischen 0,2 % und 0,5 %. Während die 5-Schichtfalle für die oberste Widerstandsangaben bis  $z = 4 - 6,5$  m (je nach Ergebnis) einen Widerstand um  $90 \Omega$ -m besitzen, zeigen die 6-Schichtfalle zusätzlich eine erhöhte Leitfähigkeit direkt an der Oberfläche, wie sie auch im Profil P1 zu erkennen ist und den tonigen Anteil widerspiegelt. Die Basis des oberen Aquifers wird laut Vorinformationen bei ca. 9 m angegeben. Während der 5-Schichtfall mit den freien Tiefenparametern diesen Bereich abdeckt, liegen die 6-Schichtfalle mit der Tiefenangabe der Basis zu hoch. An diesen guten Leiter anschließend folgen in allen Ergebnissen zwei Leiter mit ca.  $90 - 300 \Omega$ -m bis zu einer Tiefe von rund 20 m, gefolgt von einem Halbraum mit Werten zwischen  $10 - 50 \Omega$ -m.

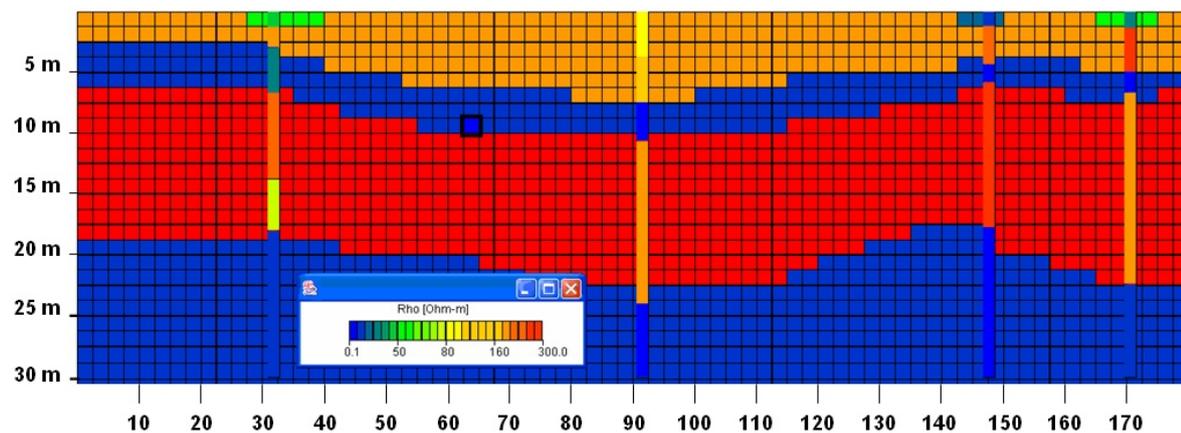
Die Auflösung der Inversionsparameter (Mächtigkeit und Widerstände) waren nur teilweise befriedigend. Während die Mächtigkeiten eine durchschnittliche Auflösung um 0,8 besitzen, werden die Widerstände zwischen 0,2 (Halbraumwiderstand) und 0,95 aufgelöst. Eine Fixierung der Parameter mit einer hohen Auflösung und erneuter Inversion würde zwar für die restlichen Parameter zu einer höheren Auflösung führen, dies ist aber nur durch die Reduzierung der freien Parameter bedingt und bewirkt keine eigentliche Verbesserung.

Aufgrund der Vergleiche zwischen den anderen 1D-Ergebnissen der restlichen Profile hat sich folgende Struktur ergeben, die mit der Schichtabfolge in Abschnitt 4.3.1 übereinstimmt.

men, wobei bei guten Leitern für die oberste Schicht zusätzlich lokale erhöhte Leitfähigkeiten eingebaut wurden:

- 1. Schicht: Sande und Ablagerungen ( $200 \Omega\text{-m}$ ) bis maximal 7,5 m, teilweise mit zusätzlich oberflächennahen guten Leitern (Tone und Schluffe;  $20$  und  $50 \Omega\text{-m}$ )
- 2. Schicht: Schluff-Ton; Basis des oberen Aquifers zwischen  $z = 6,25 - 10$  m ( $15 \Omega\text{-m}$ ) inkl. des Metallrohres ( $0,1 \Omega\text{-m}$ );
- 3. Schicht: kiesigen Ablagerungen ( $300 \Omega\text{-m}$ ) bis maximal 22,5 m;
- 4. Schicht: Basis des unteren Aquifers / Halbraum ( $10 \Omega\text{-m}$ );

Ein solches Startmodell wird in Abbildung 4.20 für das Profil P1 gezeigt. Damit entspricht die Widerstandsabfolge der in Abschnitt 4.3.1 aufgezeigten Geologie mit vier Schichten.

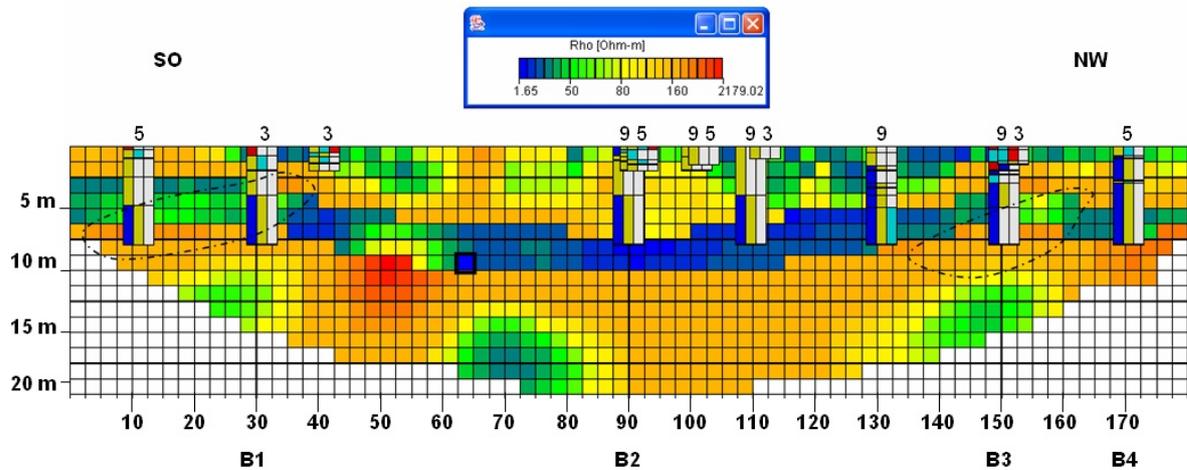


**Abbildung 4.20:** Aus 1D-Inversionsergebnissen erstelltes Startmodell für das Profil P1. Die Position des Metallrohres ist mit einem schwarzen Rechteck gekennzeichnet. Die Widerstandsabfolge ist:  $200(50/20) \Omega\text{-m}$ ,  $15 \Omega\text{-m}$ ,  $300 \Omega\text{-m}$ ,  $10 \Omega\text{-m}$  (Halbraum)

Das Ergebnis der Inversion unter Benutzung des in Abbildung 4.20 gezeigten Startmodells mit einem RMS-Fehler von 4,5% ist in Abbildung 4.21 mit eingeblendeten Bohrungen zu sehen. Für die oberste Schicht (hauptsächlich Sande mit eingelagerten Tonen und Schluffen) gleicht das Ergebnis demjenigen mit homogenem Startmodell in Abbildung 4.18.

Die zweite Schicht (Basis des oberen Aquifers) zeigt in einigen Bereichen ( $x = 10 - 30$  m;  $45 - 60$  m;  $x = 150 - 160$  m) erhöhte Widerstände gegenüber dem Startmodell. Für den Bereich von  $x = 45 - 60$  m ist dies auf die Einwirkung des Metallrohres zurückzuführen. Die beiden anderen Bereiche liegen oberhalb des Rohreinflusses, daher resultiert dieser Bereich des Modells aus den Daten. Für die dritte Schicht (kiesigen Ablagerungen bis 22,5 m) zeigen sich drei nieder-ohmige Bereiche zwischen  $x = 20 - 30$ ,  $65 - 80$ ,  $140 - 150$  m und vier kleinräumige Bereiche erhöhter Widerstände in der ansonsten vom Startmodell dominierten Schicht. Der mittlere gut leitende Bereich resultiert aus dem Einfluss des Metallrohres, der linke gute Leiter liegt im Einflussgrenzbereich des Metallrohres, der rechte gute Leiter liegt außerhalb des Rohreinflusses für diese Tiefe. Bei den erhöhten Widerständen bei  $x = 10 - 30$ ,

105 - 110 und 165 - 180 m an der Grenze zur Basis des oberen Aquifers sind dies Fortsetzungen aus der zweiten Schicht, der schlechte Leiter bei  $x = 50$  m ergibt sich aus dem Einfluss des Metallrohres.



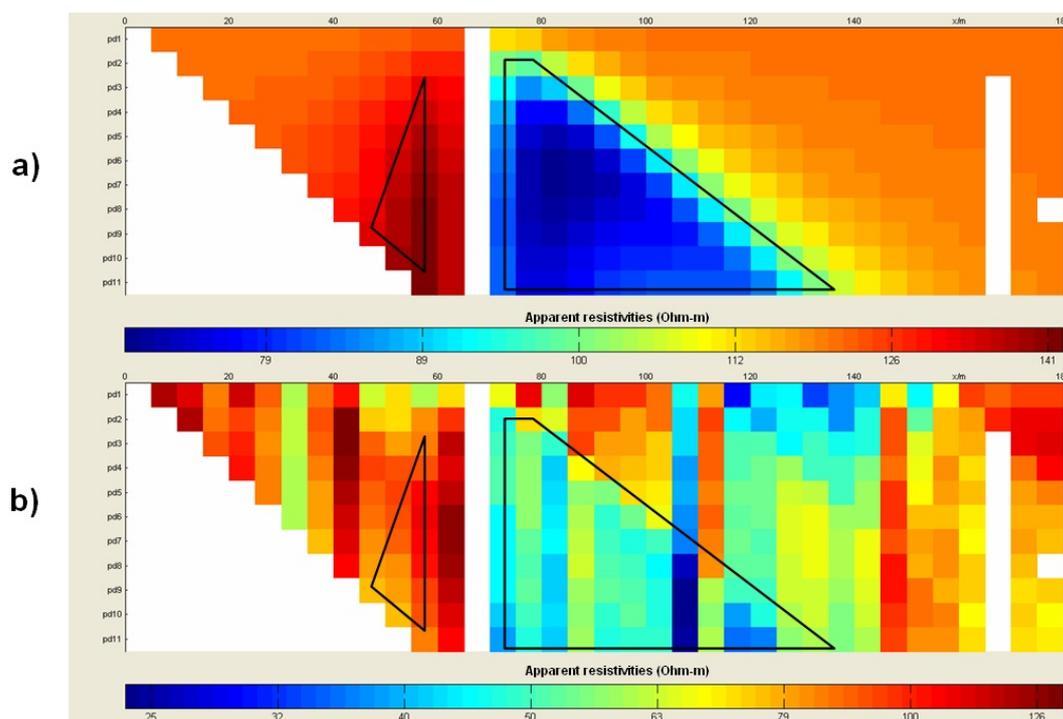
**Abbildung 4.21:** Inversionsergebnis des Profils P1 nach Benutzung des Startmodells mit darauf projizierten Bohrungen und einer gezeigten Überdeckung  $\geq 0.3$ .

Da sich nur die erwähnten Bereiche deutlich von den Hintergrundwerten des Startmodells dieser Schicht unterscheiden, sind die Sensitivitäten der restlichen Zellen anscheinend zu gering, als das die Daten starken Einfluss auf das Startmodell haben. Der Halbraum als Basis des Aquifers wird aufgrund einer geringeren Überdeckung als 0,3 nicht mehr angezeigt.

Ein weitere Möglichkeit der Modellierung besteht darin, die Daten, welche durch das Rohr beeinflusst werden, aus der Inversion herauszunehmen. Abb. 4.22 zeigt einen Vergleich zwischen einer synthetischen Vorwärtsrechnung (a) unter Annahme der in Abschnitt 4.3.4 verwendeten Parameter ( $120\Omega\text{-m}$  Halbraum mit eingebettetem Metallrohr bei  $x = 65,0 - 67,5$  m und  $z = 8,75 - 10$  m) und den Rohdaten des Profils P1 (b).

Die Auswirkungen des Rohres sind deutlich in den synthetischen Daten erkennbar. Sie sorgen sowohl für einen großen Bereich erhöhter Leitfähigkeiten (blau) als auch einen kleinen Bereich erhöhter Widerstände (dunkelrot) links des Rohres. Bereiche, die um mehr als 10% vom Hintergrund abweichen, wurden schwarz umrandet. Um die Widerstandsbereiche deutlicher darzustellen, wurden jeweils unterschiedliche Farbskalen für die Darstellung der Daten verwendet.

Übertragen auf die Rohdaten des Profils P1 zeigt sich auch hier der anomale gut leitende Bereich deutlich, wobei jedoch zwischen  $x = 105 - 110$  sehr geringe scheinbare Widerstände für große Auslagen gemessen werden. Diese gehen vermutlich auch einen Messfehler zurück und werden ebenfalls aus den Daten heraus genommen. Für die erhöhten Widerstände bei  $x = 50 - 60$  m ist nicht ersichtlich, ob der markierte Bereich tatsächlich mit dem aus der synthetischen Vorwärtsrechnung übereinstimmt. Die Widerstände bewegen sich im Bereich zwischen  $80 - 100 \Omega\text{-m}$ , der Wertebereich in a) liegt aber über  $130 \Omega\text{-m}$  (also knapp 10% über dem Startmodell). Dies würde für die Rohdaten mit dem Bereich zwischen  $x = 60 - 65$  m zusammenfallen. Für die Inversionrechnung mit reduzierten Daten wurden dann die markierten Bereiche und zusätzlich der Bereich für  $x = 60 - 65$  m für das Spacing  $n = 3 - 11$



**Abbildung 4.22:** Vergleich zwischen a) synthetischer Vorwärtsrechnung unter Rohreinfluss und b) Rohdaten des Profils P1 unter der Verwendung des Programms von Günther [2004]. Die Messdaten zwischen  $x = 105 - 110$  in b) gehen vermutlich auf einen Messfehler zurück, da sie auffallend durchgängig gering sind und sich nicht an das Gesamtbild einfügen. Die z-Achse gibt das Spacing für die Pol-Dipol ('pd')-Konfiguration an. Für die weißen Bereiche wurden keine Daten gemessen.

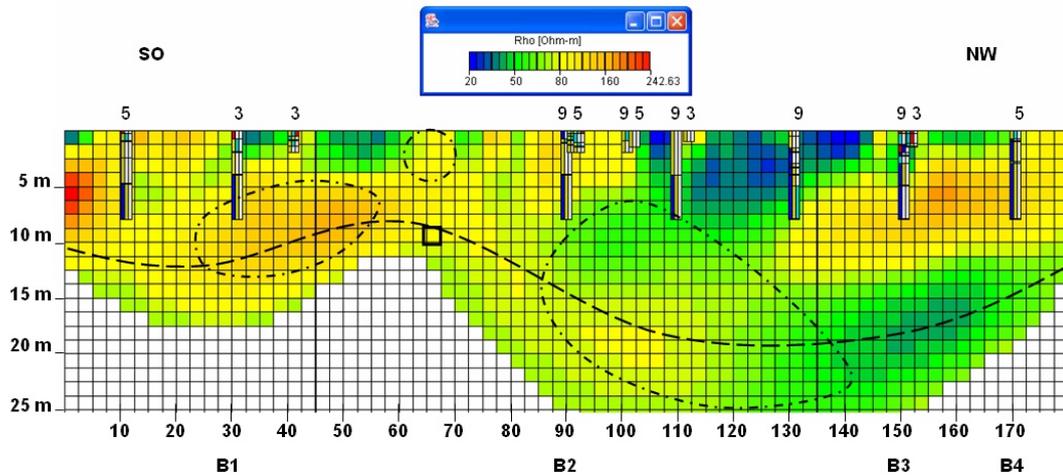
herausgenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.23 mit einer dargestellten Überdeckung von 0.2 zu sehen. Der Vergleich mit dem ursprünglichen Modell in Abbildung 4.18 zeigt, dass bei dem Modell mit reduzierten Daten sich die markierten Bereiche deutlich verändert haben. Die hochomigen Bereiche, sowohl an der Oberfläche über dem Rohr als auch an den seitwärts abfallenden Flanken seitlich des Rohres, sind nicht mehr vorhanden, ebenso wie der gute Leiter zwischen  $x = 90 - 100$  m in 10 m Tiefe. Dieser besaß vorher Widerstände zwischen  $30 - 60 \Omega\text{-m}$ , nun um  $60 - 70 \Omega\text{-m}$ .

Man kann für den Bereich ab  $x = 130$  m sagen, dass die Sandschicht des oberen Aquifers bis ca. 10 - 15 m Tiefe verläuft. Eine separate dünne Tonschicht als Aquiferbasis kann nicht auflöst werden. Die Widerstände zu Beginn des unteren Aquifers liegen bei ungefähr  $50 - 60 \Omega\text{-m}$ , es kann aber keine Aussage über die Basis des unteren Aquifers getroffen werden, da die Sensitivitäten zu gering sind und unterhalb der DOI-Tiefe liegen.

Die Ausläufer des oberflächennahen guten Leiters zwischen  $x = 90 - 125$  m unterbrechen die sandige Schicht des oberen Aquifers und setzen sich bis zur oberen Aquiferbasis fort, direkt darunter deuten sich leicht erhöhte Widerstände an, die aber durch den Inversionsalgorithmus bedingt sein können.

Aufgrund der Datenreduktion lässt sich der Verlauf dieses guten Leiters nicht über das restliche Profil nachvollziehen, womit eine mögliche Diskontinuität zwischen den Aquiferen hier nicht nachzuvollziehen ist. Die Profile P2, P3 und insbesondere P5 in Appendix B deuten hingegen auch unterhalb von 10 m (Grenze oberer Aquifer) Bereiche mit erhöhten Widerständen

an. Bohrungen in diesen Bereich würden dort helfen, ein mögliches Fenster zwischen den beiden Aquiferen zu verifizieren.



**Abbildung 4.23:** Ergebnis der Inversion nach Reduzierung der Daten aufgrund des Rohreinflusses mit einer dargestellten Überdeckung von 0,2. Die markierten ovalen Bereiche zeigen eine veränderte Widerstandsverteilung zu dem Inversionsergebnis mit homogenem Startmodell und nicht reduzierten Daten. Die horizontal gestrichelte Linie kennzeichnet eine Überdeckung  $> 0,3$ .

### 4.3.6 Schwermetalle

Während der NORISC-Untersuchungen hat sich anfänglich herausgestellt, dass die hohen chemischen Konzentrationen sehr stark an die Oberfläche (ersten 20 Zentimeter) gebunden waren, während Mischproben aus dem ersten Meter deutlich geringere Konzentrationen aufwiesen. Aus diesem Grund besteht ein Großteil der Bodenproben aus Oberflächenmaterial und nur ein geringer Teil aus Mischproben aus dem ersten Meter. Zudem wurden die Bodenproben unabhängig von den Ergebnisse der Geoelektrik, sondern nur auf Grundlage des NORISC-Messrasters entnommen. Für einen Vergleich zwischen Schwermetallkonzentrationen und elektrischen Widerständen ergeben sich daraus zwei Probleme:

- Aufgrund der unterschiedlichen Messgitter können nur wenige Bodenproben von ihrer Position her direkt mit elektrischen Widerständen verglichen werden.
- Da die chemischen Bodenproben nur bis maximal 1 m Tiefe reichen, kann nicht nachvollzogen werden, ob elektrisch gut-leitende Bereiche (wie z.B. in Abbildung 4.21 oder 4.23 für  $x = 105 - 145$  und für  $z = 5 - 15$  m) mit hohen chemischen Konzentrationen korrelieren oder aufgrund eines möglichen erhöhten Ton-/Schluffanteils zustande kommen. Gegen einen hohen Tonanteil spricht, dass in den anderen Profilen trotz Tonen im Nebengemengeanteil die entsprechenden Widerstände ( $40 - 70 \Omega\text{-m}$ ) nicht so gering sind wie das Modell diesen Bereich ausweist (ca.  $20 - 40 \Omega\text{-m}$ ).

Um das Ausmaß der Kontamination zu verdeutlichen zeigt Tabelle 4.7 die gemessenen Spitzenwerte der Schwermetalle gegenüber den gesetzlichen Grenzwerten, welche der DSS -

Software entnommen sind. Bei Kupfer wird der Grenzwert dabei um das 580-fache überschritten. Selbst anhand der visuellen Überprüfung der Testfläche war die Kontamination deutlich z.B. als tief-rote Bereiche arsenischen Ursprungs an der Oberfläche oder aber als vertikale Schlieren im oberflächennahen Boden erkennbar.

Schwermetall	max. Wert (mg/kg)	gesetzl. industrieller Grenzwert (mg/kg)
As (Arsen)	18394	50
Cd (Cadmium)	1500	15
Cu (Kupfer)	394854	680
Pb (Blei)	38700	1000
Ni (Nickel)	4608	500
Mn (Mangan)	33997	–
Zn (Zinn)	3370	1500
Cr (Chrom)	36800	800
Hg (Quecksilber)	89.7	5
Co (Kobald)	23590	250

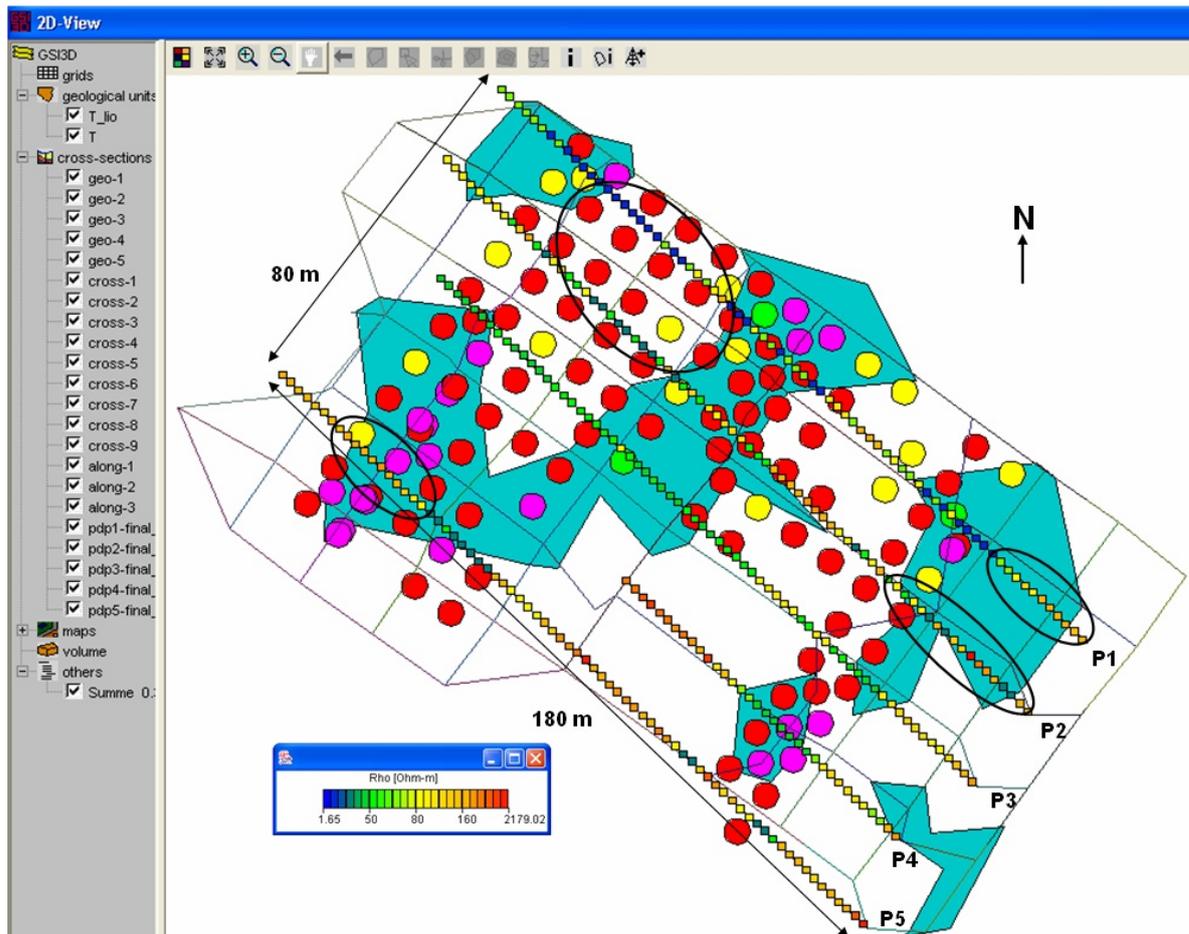
*Tabelle 4.7: Maximale Schwermetall-Konzentrationen auf der Testfläche in Italien.*

Um zu untersuchen, ob eine Korrelation zwischen Schwermetallen und elektrischen Widerständen existiert, wurden die chemischen Werte den Widerständen gegenübergestellt. Die räumliche Verteilung von Arsen und Widerständen (für  $z = 0 - 1,25$  m) wird in Abbildung 4.24 in der Kartierungsansicht des GSI3D gezeigt. Die Arsen-Konzentrationen werden als farbige Kreise dargestellt. Die Farbskala hierzu lautet: grün: 0 - 40 mg/kg; gelb; 40 - 50 mg/kg; rot: 50 - 500 mg/kg; lila: 500+ mg/kg. Zusätzliche wurden 17 geologische Profile (schwarze Linie) miteinander verschnitten, um daraus die räumliche Ausdehnung von oberflächennahen Tonen und Schluffen im Auffüllungsmaterial (türkise Bereiche) zu gewinnen. Die nicht-gekennzeichneten Bereiche bestehen dann aus Sanden und/oder Auffüllungen.

Dabei fallen zwei Dinge ins Auge:

- Die Bodenproben, die über dem 10-fachen Grenzwert liegen (lila Kreise), korrelieren fast immer mit tonigen/schluffigen Bereichen. Dieser Trend ist ebenfalls bei den restlichen Schwermetalle vorhanden.
- Die Widerstände scheinen nur gering von dem tonig-schluffigen Bereich (meist im Nebengemengeanteil vorhanden) beeinflusst zu werden, da in den Geoelektrik-Profilen gut-leitende Bereiche mit nicht-tonigen Gebieten zusammen fallen und hoch-ohmige Bereiche mit Gebieten, die Tone und/oder Schluffe enthalten (jeweils oval gekennzeichnete Bereiche).

Erschwerend kommt für eine Korrelationsbetrachtung hinzu, dass bei den chemischen Proben aus den oberen 20 Zentimetern nur der chemische Messwert, nicht aber die Geologie bestimmt wurde, sodass keine lokalen Änderungen in der Bodenart berücksichtigt werden können. Daher ist man auf die erstellte Verteilung der Tone/Schluffe aus den existierenden



**Abbildung 4.24:** GSI3D-Kartierungsansicht: Vergleich von Oberflächenwiderständen mit Arsenkonzentrationen. Die Farbverteilung für Arsen ist: grün: 0 - 40 mg/kg; gelb: 40 - 50 mg/kg; rot: 50 - 500 mg/kg; lila: 500+ mg/kg. Widerstände, die nicht mit den geologischen Anteilen korrelieren (Tone: geringe Widerstände; Sande, Auffüllungen: hohe Widerstände), wurden mit Ovalen gekennzeichnet.

Bohrungen angewiesen. Die Bindung von Schwermetallen erfolgt fast ausschließlich über die im Boden vorhandenen Feinfraktion, d.h. an Tone oder im Oberboden auch an Humus (metallorganische Komplexe). Der Grund ist die größere Oberfläche der feinen Teilchen, außerdem der höhere Anteil an aktiven Mineralen (*Dixon and Weed* [1989] und *Heim* [1990]). Aus diesem Zusammenhang heraus wird die Verteilung der hohen chemischen Konzentrationen klar ersichtlich.

Durch Schwermetalle erhöhte Leitfähigkeiten kommen normalerweise nur vor, wenn diese als Salzverbindungen vorliegen. Mit dem im Feld vorhandenen Messgeräten wurde dies aber nicht untersucht. Eine Korrelationsrechnung zwischen Schwermetallkonzentrationen und elektrischen Widerständen ergab keine Korrelation. Daher ist davon auszugehen, dass die Schwermetallverbindungen nicht als gut leitfähige Salzverbindungen vorliegen und die Geoelektrik keinen direkten Hinweis auf eine Schwermetall-Kontamination durch einen direkten Vergleich zu den elektrischen Widerständen geben kann.

### 4.3.7 Fazit Testfläche Italien

Der Einsatz geophysikalischer Methoden für die Untersuchung der Testfläche Massa war im Rahmen der NORISC-Untersuchung nur teilweise erfolgreich. Die an die Geoelektrik gestellte Aufgabe, eine mögliche Diskontinuität zwischen zwei existierenden Aquiferen zu lokalisieren, konnte nicht beantwortet werden. Ausschlaggebend dafür war ein Metallrohr, welches quer durch die Profile verlief und nicht korrekt modelliert worden war. Bei der Reinterpretation der Daten innerhalb dieser Arbeit zeigte sich, dass dieses Rohr einen Großteil der Daten ab 10 m Tiefe (Grenze oberer Aquifer) beeinflusst und dadurch keine Aussage über den Verlauf des zweiten Aquifers erlaubt.

Durch Erstellung von 1D-Widerstandsverteilungen und deren Kalibration an nahegelegenen Bohrungen entlang der Widerstandsprofile wurden Startmodelle erzeugt, um den Rohreinfluss auf homogene Startmodelle möglichst auszugleichen. Trotz akzeptabler Auflösung der 1D-Inversionsparameter liegen die Schichtgrenzen im Vergleich zu den geologischen Angaben etwas zu hoch und die Startmodelle haben ab einer gewissen Tiefe einen zu großen Einfluss auf die Daten.

Alternativ wurde der Ansatz einer Datenreduktion unter Benutzung homogener Startmodelle durchgeführt. Die so gewonnen Modelle zeigen für einige Bereiche Übereinstimmungen mit der angegebenen Schichtabfolge, lassen jedoch nur für einen geringen Teil des Profils Aussagen unterhalb von 10 m zu. Betrachtet man alle fünf Profile, zeigen sich in einigen höherohmigen Bereichen an der Grenze der beiden Aquifere, so dass eine Verbindung der beiden Wassersysteme möglich sein kann, jedoch Bohrungen für eine Bestätigung notwendig sind.

Aufgrund der hohen Schwermetallbelastung auf der Testfläche sollten mögliche Korrelationen mit der Geoelektrik berechnet werden. Durch die Benutzung verschiedener Messraster lagen die Bodenproben meistens nicht auf den Widerstandsprofilen und für einen Großteil der oberflächlichen Bodenproben war keine geologische Beschreibung durchgeführt worden. Durch Darstellung der flächenhaft verteilten Tone als Bestandteil des Auffüllungsmaterials zeigt sich, dass die Schwermetalle an die Tone gebunden sind. Eine Korrelationsrechnung zwischen elektrischen Widerständen und Schwermetall-Konzentrationen ergibt keinen Zusammenhang. Daraus folgt, dass die Schwermetalle keine Auswirkungen auf die auftretenden Widerstände haben und daher vermutlich nicht als leitfähige Salz-Verbindungen vorliegen und die Tone/Schluffe, welche die Schwermetalle binden, anteilig zu gering sind, um sich auf die Widerstände auszuwirken.

## 4.4 Testfläche Ungarn

Zum Projektabschluss wurde ein ehemaliges Öllager in Balassagyrmát / Ungarn im September 2003 untersucht. Es sollte ein letztes Mal unter Einsatz der während des Projektes verbesserten DSS-Software und einer verbesserten Visualisierungssoftware geprüft werden, ob die von NORISC angestrebte Methodik erfolgreich umgesetzt werden kann.

In Trinkwassergewinnungsbrunnen war eine Kohlenwasserstoff-Kontamination lokalisiert worden, die trotz Sanierungsmaßnahmen ('pump and treat') nach einiger Zeit wieder auftauchte und deren genaue Quelle noch nicht lokalisiert worden war.

### 4.4.1 Geologie des Messgebietes

Die Testfläche liegt innerhalb eines Wohngebietes der kleinen Stadt Balassagyrmát an der slowakischen Grenze, rund 80 km nördlich von Budapest. Die Stadt liegt am südlichen Flussufer des Ipoly in der Mitte des Nógrád-Beckens, einer flachen Region und war ursprünglich teilweise ein Überflutungsgebiet. Die Basis dieses Gebietes besteht aus paläozoische metamorphen und magmatischen kristallinen Gesteinen mit einer Oberkante bei 500 m. Diese werden von folgenden oligozänen Ablagerungen (von unten nach oben) überdeckt:

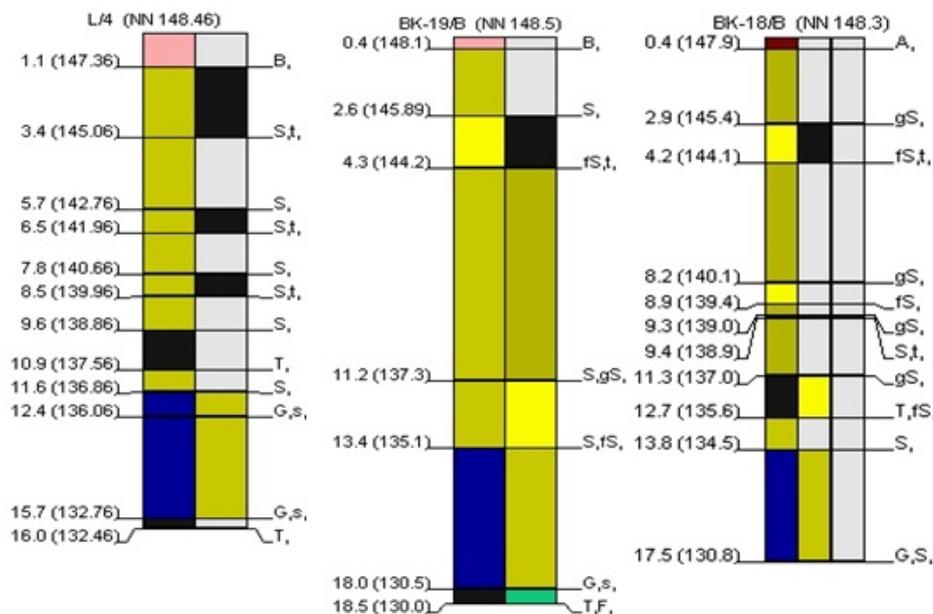
- eine sehr komplexe Schicht aus dem oberen Oligozän, die erodierte und wellig wurde;
- eine 200 - 300 m mächtige Schicht aus Tonmergeln;
- eine 15 m mächtige Schicht aus Sand und feinem Geröll;
- mittel oligozäne Sandsteine mit einer ungefähren Mächtigkeit von 15 m;

Schließlich wird diese Abfolge mit pleistozänen und holozänem Sedimenten bedeckt, die aus einer Mischung aus Tonen, Schluffen, Sanden und Kiesen besteht. Der erste Grundwasserspiegel befindet sich zwischen 4 - 6 m unterhalb der Geländeoberkante und seine Fließrichtung liegt in nord-nord-westliche Richtung. Der Aquifer liegt generell in einer dünnen pleistozänen Schicht, welche nicht-kompakte und poröse Sedimente, hauptsächlich grobe Sande und Kiese mit dünnen Schichten aus Tonen unterschiedlicher Farben und Charakteristik, beinhaltet. Anhand von Bohrloch-Vorinformationen besteht die Möglichkeit, dass zwei getrennte Aquifere existieren: ein flacher (bis 4-8 m unter GOK) und ein tiefer (ca. 13 - 16 m unter GOK), welche durch feinkörnige Schichten (Tone) getrennt sind. Diese Vermutung wurde durch einen Pump-Test und einen Durchschlags-Test (engl.: 'slug-test'; Messung des Unterschieds der hydraulischen Höhen) bekräftigt. Die Lithologie des Messgebietes wurde anhand von Wassergewinnungs- und Beobachtungsbrunnen bestimmt und wird in Tabelle 4.8 wiedergegeben.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 4.25 drei Tiefbohrungen, die während der Sanierungsmaßnahme im Jahr 1988 abgeteuft wurden und an denen eine inhomogene Schichtabfolge zwischen den einzelnen Bohrungen ersichtlich wird.

Tiefe (m)	Lithologie	
0-3	tonige und meist schluffige Sande und tonige Schluffe	Holozän, Pleistozän
3-4	sandige Kiese, Schluffe, Sande	Holozän, Pleistozän
4-15	sandige Schluffe, schluffige und tonige Sande, Sande und sandige Kiese	Oligozän

**Tabelle 4.8:** Laut Beobachtungsbrunnen gemittelte Schichtenabfolge im Umfeld der ungarischen NORISC-Testfläche.



**Abbildung 4.25:** Drei exemplarisch ausgewählte Beobachtungsbrunnen aus der 20 ha großen Testfläche zur Verdeutlichung der Schichtenabfolge. Man erkennt, dass diese zwischen den Bohrungen nicht für alle Bodenarten kontinuierlich ist. A: Auffüllung; B: Boden; S,s: Sande; T, t: Ton; G, g: Kies; F: Sandstein; Präfix f: fein; Präfix g: grob;

#### 4.4.2 Ehemalige Nutzung

Die untersuchte Fläche mit einer Gesamtgröße von 20 ha beinhaltet zwei industrielle Flächen (eine ehemalige Tankstation und eine Fabrik für elektronische Bauteile), eine Bahnstrecke, einen Sportplatz, Straßen und private Gärten. Die eigentliche umzäunte Kernfläche mit einer Größe von rund 1 ha (s. Abbildung 4.26) wurde von der russischen Armee für einige Jahrzehnte als Kraftstofflager und Autoreparaturplatz genutzt, später wurde daraus an gleicher Stelle eine Tankstelle mit einer Autoreparaturwerkstatt. Der Kraftstoff wurde per Bahn angeliefert und in die unterirdischen Lagerbehälter gepumpt.

1988 wurden in privaten Brunnen im Grundwasserabstrom der Testfläche auf dem Wasser schwimmende Kohlenwasserstoffe beobachtet. Daraufhin wurde die Tankstelle abgebaut und ein dortiger Untergrundlagerbehälter entfernt. Erste Sanierungsmaßnahmen in Form einer 'pump and treat'-Aktion wurden entworfen und auf der Fläche durchgeführt. Auch nach längerer Sanierungszeit traten verzögert wieder größere Mengen an TPH's (engl.: Total Petro-

leum Hydrocarbon's; gesamte Kohlenwasserstoffanteile) im Grundwasserbereich auf. Neben der TPH-Kontamination wurden chlorinierte Kohlenwasserstoffe bestimmt, die hauptsächlich durch Perchlorethylene dominiert waren. Diese wurden einem nahegelegenen Fabrikgelände südlich der Kernfläche zugeordnet, auf dem elektronische Bauteile hergestellt und mit PCE behandelt wurden.



**Abbildung 4.26:** Ansicht der ungarischen Kerntestfläche in Balassagyarmat. Das umzäunte Gebiet kennzeichnet das ehemalige Tankstellengelände auf dem noch zur Straße hin ein kleines Bürogebäude steht, im Vordergrund befindet sich der Bahndamm wo die Kraftstoffe angeliefert wurden, hinter der Testfläche liegt ein Sportplatz.

Außer dem Bodenaushub zur Entfernung des Untergrundlagerbehälter und dem Absaugen von Kohlenwasserstoff - verschmutztem Grundwasser waren keine weiteren Sanierungsmaßnahmen durchgeführt worden.

### 4.4.3 DSS-Ergebnis

Für die Geophysik bestand die Aufgabe während der NORISC-Untersuchung das Gebiet der ehemaligen Tankstelle mit einer Größe von rund 1 ha zu untersuchen. Die Untersuchungsziele bestanden in der Lokalisierung von Untergrundobjekten, der Kartierung der Morphologie und dem Nachweis einer möglichen Kontinuität der undurchdringlichen Tonschicht bei ca. 15 m Tiefe, der Kartierung der Sand-Kiese-Grenzfläche mit einer möglichen dünnen Tonschicht in ca. 9 m Tiefe und der Kartierung der allgemeinen Untergrundstruktur. Als optimale Methodenkombination der DSS wurden die Methoden Bodenradar, Magnetik und Widerstandsgoelektrik ausgegeben. Während das Bodenradar unbekannte Objekte und die allgemeine Untergrundstruktur bestimmen soll, wird der Magnetik die Suche nach magnetischen Objekten im Untergrund zugewiesen, damit bei späteren Bohrungen weder das Bohrgerät noch mögliche Rohre o.ä. beschädigt werden. Die Geoelektrik soll den Untergrund kartieren, mit

besonderem Augenmerk auf mögliche Sand-Kies-Übergänge, der Lokalisierung einer möglichen dünnen Tonschicht in 9 m Tiefe und einer Bestimmung der Kontinuität einer undurchdringlichen Tonschicht in 15 m Tiefe.

Nimmt man jedoch die Bohrungen in Abbildung 4.25 als eine geologische Basis für die geophysikalische Untersuchung dann zeigt sich, dass die Tonschicht in 9 m Tiefe nicht immer in den Tiefbohrungen lokalisiert wurde, in der Höhe deutlich variieren kann und die Tonschicht in 15 m unter Berücksichtigung aller bestehenden Tiefbohrungen eher unterhalb von 18 m anzutreffen ist.

Die Untersuchungsparameter und deren Ziele sind in Tabelle 4.9 zusammengefasst.

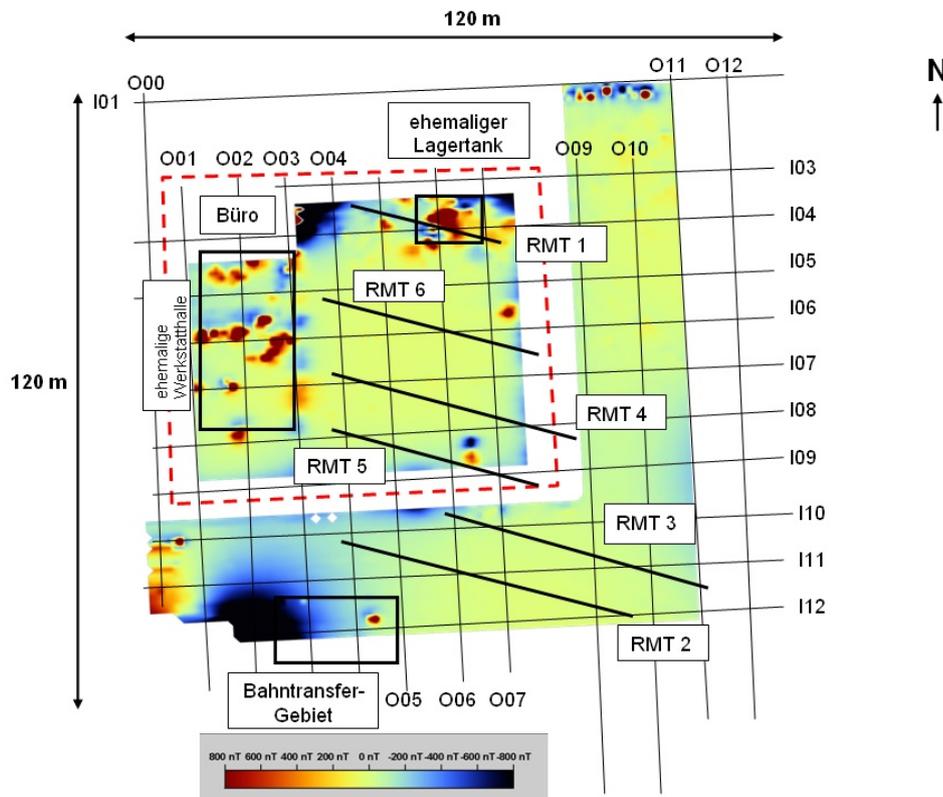
Methoden	Messart	Profilabstand (m)	Aufgabe
Bodenradar	Quasi-kontinuierlich	10	Bestimmung von unbekanntem Objekten und der Untergrundstruktur;
Magnetik	Punkt-Raster	1	Bestimmung von unbekanntem Objekten und Rohren;
Widerstands-Geoelektrik	3m Elektroden-Abstand	9	Kartierung der allgemeinen Untergrundstruktur, des Sand/Kies-Übergangs mit möglicher dünnen Tonschicht in 9 m und der Kontinuität der undurchlässigen Tonschicht bei ca. 15 m

**Tabelle 4.9:** Übersicht über die von der DSS vorgeschlagenen Methoden für die ungarische Testfläche.

Die Abbildung 4.27 gibt eine Übersicht über die Lage der geophysikalischen Profile. Die Methoden sind wie folgt gekennzeichnet:

- **Magnetik** : es wurden sowohl innerhalb als auch außerhalb der Kernfläche Profile mit 1 m Profilabstand und 0,5 m Messpunktabstand gemessen, um mögliche Rohre oder Metallreste zu lokalisieren. Dazu wurden ein Protonenmagnetometer als Basis-Station und ein Overhauser-Gradiometer zur Bestimmung des Vertikal-Gradienten auf der Fläche genutzt.
- **Geoelektrik**: die Daten wurden sowohl mit einer Schlumberger- als auch mit einer Dipol-Dipol-Konfiguration aufgezeichnet. Es wurden 12 Ost-West- und 11 Nord-Süd-Profilen mit 3 m Elektrodenabstand, dreifacher Überdeckung (Dipol-Abstände: 3, 6 und 9 m), 9 m Profilabstand und Profillängen zwischen 90 bis 120 m verwendet. Die Nord-Süd-Profile tragen die Bezeichnung 'O-00' bis 'O-12', die Ost-West-Profile 'I-01' bis 'I-12'.
- **RMT- und Direct-Push-Messungen**: von der Universität zu Köln und der Universität Tübingen wurden zu Evaluationszwecken RMT- und Direct-Push-Messungen (*Dietrich*

[2003]) als Anwendung innovativer Methoden ausgeführt. 'Direct-Push' bezeichnet ein Verfahren, bei dem während einer Bohrung in-situ physikalische oder chemische Parameter, in diesem Fall elektrische Widerstände, in Zentimeterabständen gemessen werden und kann je nach Bodenbeschaffenheit eine Tiefe bis zu 30 m erreichen. Daher ist es für Tiefen im Umwelt- und Ingenieurbereich ein gutes Vergleichsmittel zu geoelektrischen oder radiomagnetotellurischen Messungen. Die 10 Direct-Push-Messungen wurden im Januar 2004 entweder an bestehende Bohr-Lokationen und Kontaminationpunkten oder auf Geoelektrik-Profilen durchgeführt. Weiterhin stand wie bei der Testfläche Köln die Frage an, ob die elektrischen Methoden mögliche Auswirkungen der Kohlenwasserstoffe auf die Widerstände bestimmen können.



**Abbildung 4.27:** Schematische Ansicht der ungarischen Testfläche und der geophysikalischen Messraster. Das umzäunte Kernuntersuchungsgebiet ist rot umrandet. Das Ergebnis der Magnetik-Untersuchung (Vertikalgradienten-Darstellung) zeigt innerhalb des Kerngeländes zwei größere Anomalien (Lagertank, Werkstatthalle), außerhalb zwei durch eine Straße (oben rechts) und einen Zaun (unten links) bedingte Anomalien. Rohre und Kabel wurden nicht gefunden. Die Geoelektrik-Profile verlaufen in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung, die RMT-Profile in 105°.

Die Auftragsmessungen wurden innerhalb von zwei Wochen abgeschlossen und einen Tag vor Beginn der Felduntersuchungen mit den beteiligten Untersuchungstrupps und dem Flächen-Manager besprochen. Dabei stellte sich heraus, dass die Ergebnisse des Bodenradars aufgrund einer nahegelegenen Störquelle (Radiosender) keine brauchbaren Ergebnisse geliefert haben und dass die Geoelektrikergebnisse einen hohen Rauschanteil aufgrund schlechter Elektrodenankopplung beinhalteten. Dabei sollten nach Aussage der geophysikalischen Firma die Dipol-Dipol-Ergebnisse einen geringeren RMS-Fehler als die Schlumberger-Mes-

sungen haben. Die Magnetik konnte Anomalien an der Position des ehemaligen Lagertanks und im Bereich der alten Reparaturhalle (s. Abbildung 4.27) feststellen, jedoch fanden sich keine Hinweise auf alte Kabel oder Rohre innerhalb der Kernfläche. Weitere Anomalien befinden sich jeweils am Rand des Messgebietes oben rechts (Straßenrand) und unten links (Zaun).

#### 4.4.4 Widerstands-Geoelektrik

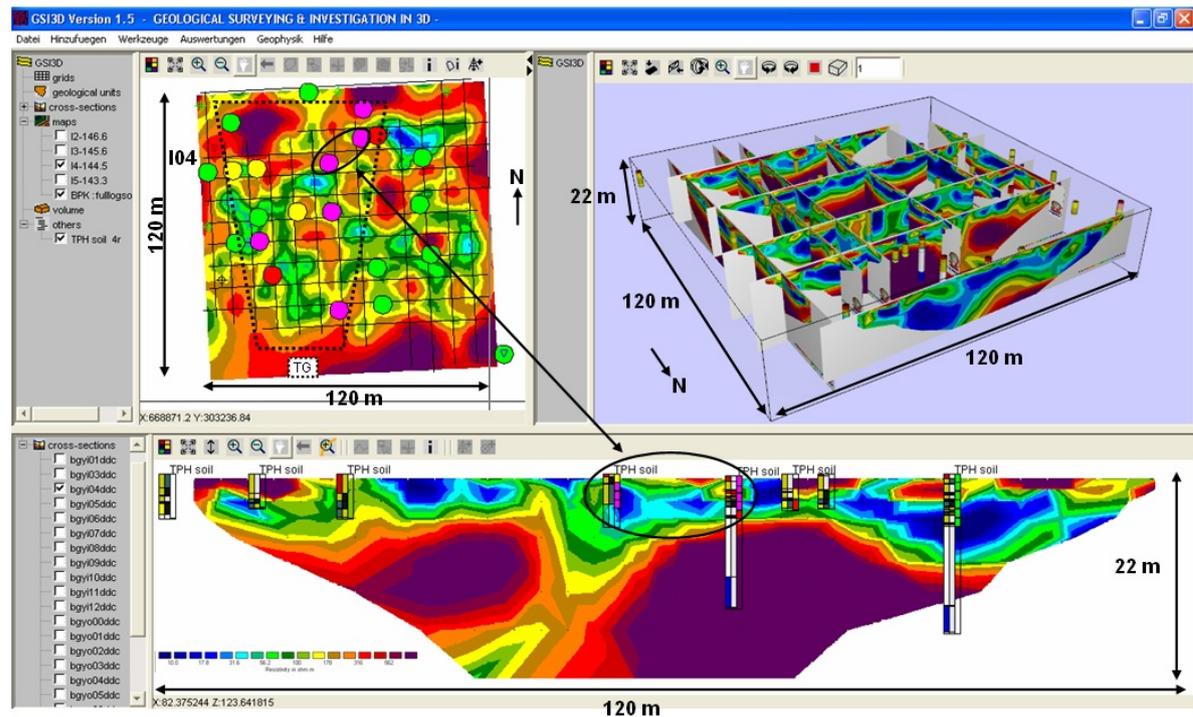
Mittels der Geoelektrik sollte eine Aussage über den Untergrund in der Kernuntersuchungsfläche, über die mögliche Existenz zweier möglicher Tonschichten und über den Sand-Kies-Übergang getroffen werden. Die Ergebnisse lagen als vertikale und horizontale Schnitte in Form von Bildern vor und wurden an dem Tag vor dem NORISC-Feldeinsatz in das GSI3D-Programm eingebunden, um so eine räumliche Verteilung der Widerstände zu erhalten.

Anhand der Abbildung 4.28 wird die Zusammenarbeit zwischen Geophysik und chemischer Felduntersuchung erläutert. Die Vertikalansicht des Programms zeigt das Profil I04 mit Bohrungen und gemessenen Kohlenwasserstoff-Konzentrationen (welche erst später betrachtet werden) im Abstand bis zu 7 m. Die Widerstandsverteilung zeigt linsenförmige oberflächen-nahe gute Leiter  $\leq 40 \Omega\text{-m}$  bis zu einer Tiefe von 10 m. Die Übergänge zu den massiven schlechten Leitern mit Widerständen bis über  $1000 \Omega\text{-m}$  beginnen ab 6 m und setzen sich bis 22 m fort.

Die farblichen Darstellungen des Haupt- und Nebengemengeanteils in den Bohrungen entsprechen denen der beiden anderen Testflächen. Beige-gelb steht für Sande, rot für Auffüllungen, schwarz-oliv für Tone und Schluffe, blau für Kiese. Weiße und graue Abschnitte in den Bohrungen sind nicht beschrieben. Ein Vergleich zwischen den elektrischen Widerständen und der Geologie in den Bohrungen ergibt, dass tonig - schluffige Anteile in den ersten 4 - 5 Metern mit niedrigen Widerständen und rein sandige Anteile oder Auffüllungen mit hohen Widerständen korrelieren, jedoch die Widerstandsverteilung ab ca. 5 m nicht mehr den Vorgaben aus der Geologie in Abschnitt 4.4.1 entspricht.

Durch die räumliche Darstellung einiger Profile in der 3D-Ansicht wird erkennbar, dass die Schluffe-Tone nicht eben verteilt, sondern in einer 3D-Rinnenstruktur vorliegen, welches in der Kartierungsansicht noch deutlicher hervor tritt. Dort wird ein horizontaler Schnitt der Widerstandsverteilung als Ergebnis einer 3D-Inversion mit dem Programm *Res3DInv* von *Loke and Barker* [1996a] in Höhe des Grundwasserspiegels in 4,5 m Tiefe zusammen mit der Lage der Geoelektrik-Profile dargestellt. Anhand der unregelmäßigen Verteilung der guten Leiter (d.h. der Tone und Schluffe) wurden Bohrungen bis zum Grundwasserspiegel abgeteuft, um zu überprüfen, ob Kohlenwasserstoffe eher an Tone und Schluffe (niedrige Widerstände) gebunden sind oder auch in den sandigen Bereichen (hohe Widerstände) angetroffen werden. Aufgrund eines unpassenden Bohrgerätes konnten keine Proben unterhalb einer Tiefe von 5 m entnommen werden.

Die in Abbildung 4.28 gezeigte Kontamination stellt das Ergebnis der NORISC-Untersuchung dar. Die Kohlenwasserstoff-Konzentrationen sind als farbige Kreise dargestellt. Die Farben stehen für: grün: 0-50 mg/kg, gelb: 50 - 100 mg/kg, rot: 100 - 300 mg/kg und lila:  $\geq 300$



**Abbildung 4.28:** Bildschirmfoto des GSI3D mit Ergebnissen der Ungarn-Messung. Die Kohlenwasserstoff-Kontamination liegt in einem räumlich begrenzten Abschnitt vor, hohe Konzentrationen werden fast ausschließlich in der tonig-schluffigen Rinnenstruktur angetroffen.

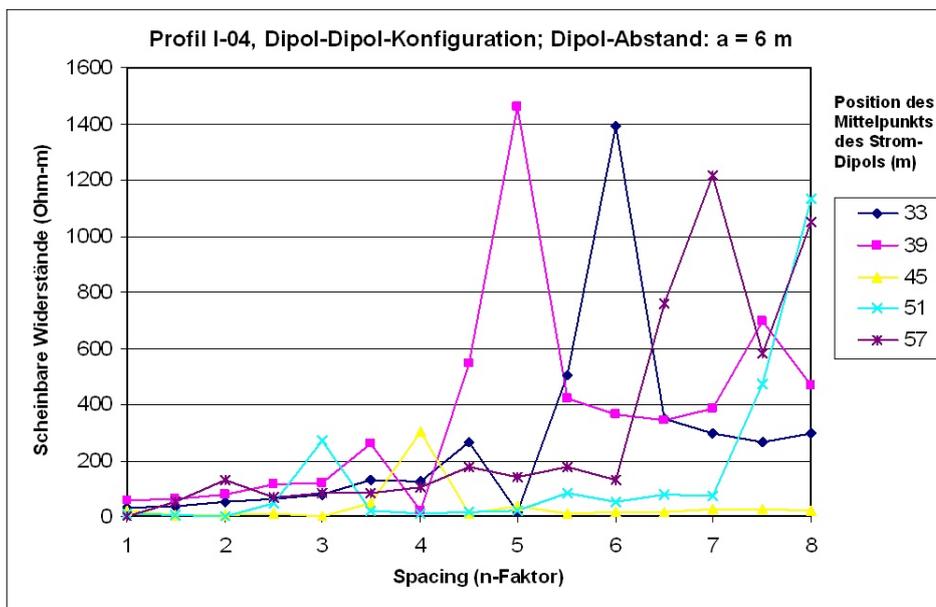
mg/kg. Auffallend ist, dass sich die Kontamination nur in einem trapezförmigen Bereich in fast ausschließlich gut leitenden (d.h. tonigen) Bereichen entlang des Grundwasserabstroms in nördliche Richtung befindet. Ein Blick auf die schematische Skizze in Abbildung 4.27 zeigt, dass sich am südlichen Ende des Verbreitungsbereiches das Transfer-Gebiet ('TG') und in der oberen rechten Ecke der ehemalige Lagertank befinden. Diese beiden Kontaminationsquellen weisen als einzige eine bis zum Grundwasser durchgehende Kontamination auf (für den Lagertank: markierte Bohrungen in der Vertikal- und Kartierungsansicht nahe des Profils I04), während ansonsten diese in anderen Bohrungen nur in Höhe des Grundwassers vorzufinden ist.

Als Ursache der beständigen Kontamination in den Trinkwassergewinnungsbrunnen wurden die in den Schluffen-Tonen gespeicherten Kohlenwasserstoffe angesehen, welche bei größeren Wassermengen von der Oberfläche (z.B. Regen) diese aus den Tonen auswaschen und so in den Untergrund transportieren. Als Sanierungsmaßnahme wurde eine Auskoffnung der Rinnenstruktur vorgeschlagen. Die Frage nach der Existenz der zwei Tonschichten in 9 bzw. 15 m konnte nicht beantwortet werden, da die Ergebnisse der Geoelektrik für Tiefen ab 6 m nicht glaubwürdig waren und seitens der Geologie keine neuen Bohrungen tiefer als 5 m reichten.

Da die Inversionsergebnisse nur als Bilder und nicht als digitale Dateien übergeben wurden, sind eigene Modellierungen durchgeführt worden, um die Profile auf ihre Aussagekraft hin zu überprüfen. Dabei stellte sich raus, dass die RMS-Fehler weit über 70 % (minimaler Wert) liegen, welches vermutlich durch die schlechte Elektrodenankopplung verursacht wurde. Diese hohen Fehler waren nicht von der ausführenden Firma in dem Untersuchungsbericht

aufgeführt worden.

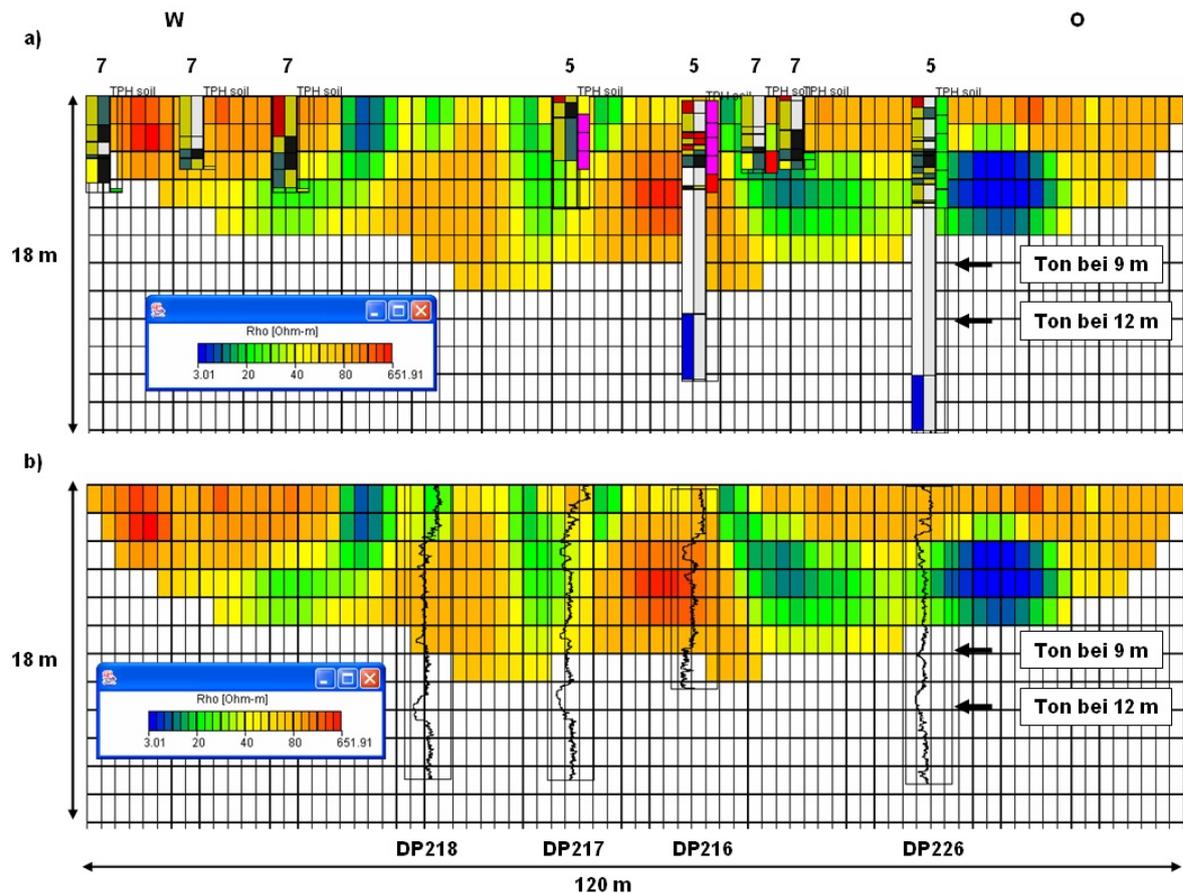
Durch die Darstellung der Rohdaten einer Dipol-Dipol-Messung als Funktion des Strommittelpunkts mit steigendem Potentialelektrodenabstand in Abbildung 4.29 werden große Sprünge für die Stationen 33, 39, 51 und 57 in den Messpunkten ersichtlich, welche teilweise bis zum 20-fachen eines Nachbarwertes betragen. Synthetische Modellierungen mit großen Widerstandscontrasten (zwei benachbarte Körper mit  $1 \Omega\text{-m}$  und  $1000 \Omega\text{-m}$  in einem  $100 \Omega\text{-m}$  Halbraum) zeigen in den Rohdaten nur Sprünge zwischen benachbarten Zellen mit einem Verhältnis von höchstens 1:3 und scheinbaren Widerständen bis höchsten  $170 \Omega\text{-m}$ , während die Messdaten häufig Werte über  $1000 \Omega\text{-m}$  erreichen. Die Spitzenwerte liegen bei knapp  $30000 \Omega\text{-m}$ .



**Abbildung 4.29:** Aufgrund schlechter Elektrodenankopplung ist ein großes Rauschen in den Daten erkennbar. Dieses tritt erkennbar für einen Dipol-Abstand von 6 m ab einem n-Faktor von ca. 3 auf, muss aber für jede Station und jeden Dipol-Abstand einzeln überprüft werden.

Um die Effekte der schlechten Ankopplung zu minimieren und dadurch akzeptable RMS-Fehler zu erhalten wurde eine Datenreduzierung für jede der drei Dipol-Abstände und für jede einzelne Station durchgeführt, nach der nur noch rund ein Fünftel der ursprünglichen Datenmenge pro Profil übrig blieben. Unter Berücksichtigung der bekannten Geologie wurden die optimalen Gitterabstände durch Modellrechnungen mit  $\Delta x = 1,5 \text{ m}$  und  $\Delta z = 1,5 \text{ m}$  bestimmt, der Regularisierungsparameter  $\lambda$  mit 7 und die Eindringtiefe bis ca. 7,5 m. Das Inversionsergebnis von Profil I04 mit naheliegenden Bohrungen und Direct-Push-Ergebnissen und einem RMS-Fehler von 9% zeigt Abbildung 4.30. Die gezeigten Zellen haben eine Überdeckung  $\geq 0,2$ . Da wieder uneinheitliche Messraster der ausführenden Firmen verwendet wurden, sind Bohrungen bis zu einer Entfernung von 7 m aufgetragen worden, um einen Vergleich zwischen Widerständen und Geologie zu ermöglichen.

Die Bereiche, in denen Ton-Schluff-Anteile mit einer Mächtigkeit  $\geq 1 \text{ m}$  vorliegen, korrelieren meist mit Widerständen zwischen  $15 - 30 \Omega\text{-m}$  mit Ausnahme der beiden linken Bohrungen, wobei diese aufgrund ihrer Randlage nur sehr wenige Datenpunkte besitzen. Bereiche mit sandigen Anteilen, Auffüllungen und ggfs. nur geringen Ton-Schluff-Mächtigkeiten (z. B.



**Abbildung 4.30:** Inversionsergebnis des Profils I04 nach der Datenreduzierung a) mit darauf projizierten Bohrungen und b) Direct-Push-Ergebnissen (Abstand in m). Der Wertebereich der Direct-Push-Messungen liegt zwischen 0 und 60  $\Omega$ -m. Der RMS-Fehler beträgt 9%.

die östlichste Bohrung, kleiner Schluffanteil um 1 m Tiefe im Nebengemengeanteil) besitzen höhere Widerständen ab 80  $\Omega$ -m. Dabei muss jedoch immer die 3D-Struktur des Untersuchungsgebietes und die Entfernung der Bohrungen zum Profil berücksichtigt werden, sodass trotz scheinbarer Anwesenheit von Tonen höhere Widerstände oder trotz Sanden geringere Widerstände vorhanden sein können.

Auf dem Profil sind vier Direct-Push-Sondierungen mit einem Wertebereich von 0 - 60  $\Omega$ -m zu sehen. Da nur in den ersten Zentimetern höhere Widerstände auftreten werden diese zwecks besserer Darstellung der Widerstände im Untergrund nicht gezeigt. Weiterhin ist durch die hohe Abtastrate eine Farbdarstellung nicht sinnvoll, da die Intervalle zu klein sind, um sie gut für die hier gezeigten Größenverhältnisse darzustellen. Daher wird hier die Liniendarstellung gewählt.

Die Sondierungen zeigen bzgl. der oberflächennahen Lithologie eine gute Korrelation mit den Bohrungen, für den Vergleich zur Geoelektrik ergeben sich jedoch teilweise größere Unterschiede. Während bei der Direct-Push-Sondierung DP218 die Widerstände von 40 auf 25  $\Omega$ -m graduell ab dem dritten Meter abfallen (Kapillarzone mit Schluffen und Tonen oberhalb des Grundwasserspiegels; vergleiche DP217 mit entsprechender Bohrung/Lithologie), zeigt die Geoelektrik anfangs Widerstände um 30  $\Omega$ -m, die mit zunehmender Tiefe auf rund 80  $\Omega$ -m ansteigen.

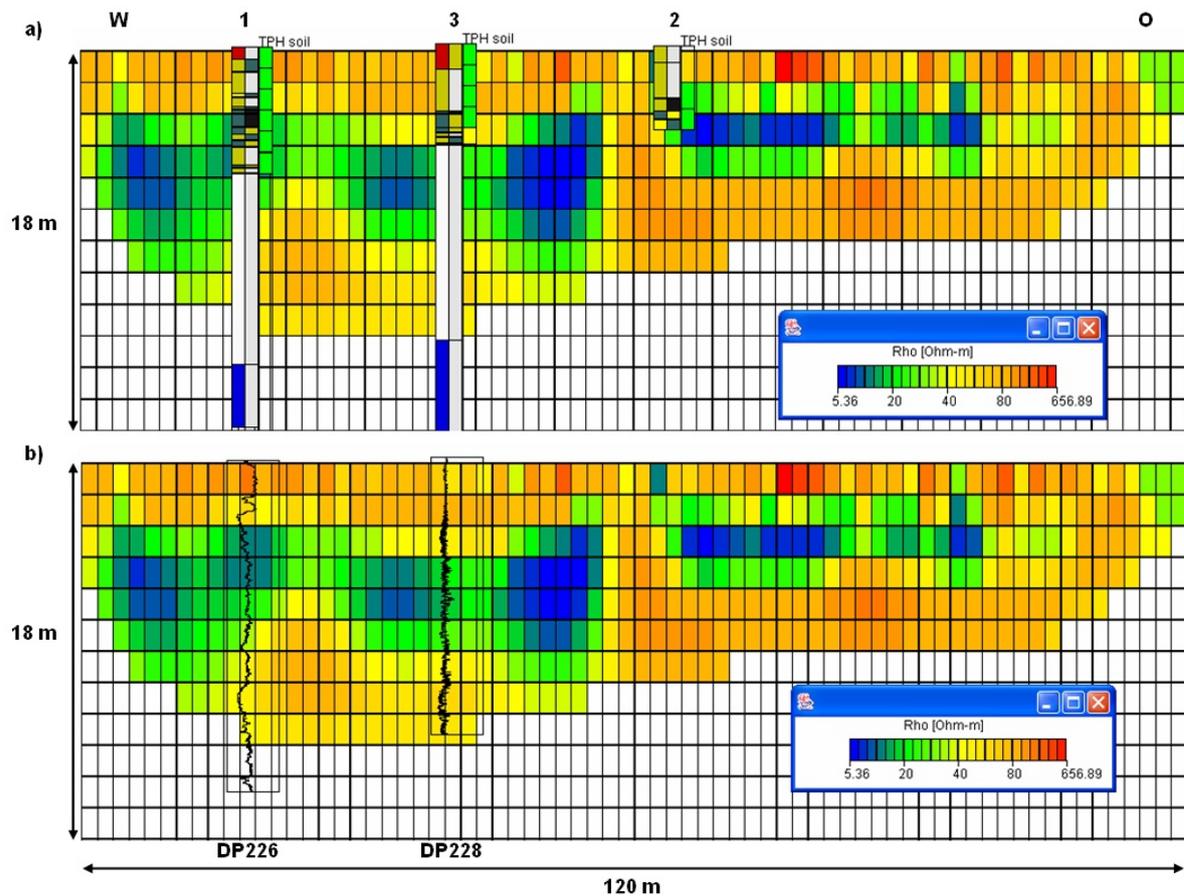
Vergleicht man die vier in-situ-Messungen für sich alleine gesehen, treten oberhalb des Grundwasserspiegels durchschnittlich Widerstände zwischen 30 bis 60  $\Omega$ -m auf. Dabei wirken sich dortige tonige Anteile in den Bohrungen durch einen graduellen Abfall der Widerstandsverteilung aus, wie in der Direct-Push-Sondierung DP217 zu sehen ist. Scharfe Abgrenzungen in der Geologie im Bereich des Grundwasserspiegels spiegeln sich ebenfalls deutlich in den Messwerten wieder (Bohrung bei DP216, 3 - 4 m Tiefe; vergl. Abbildung 4.34). Ab dem Grundwasserspiegel liegen die Widerstände bei 20 - 30  $\Omega$ -m wobei in den Direct-Push-Messungen DP218 und DP217 und DP226 zwei geringmächtige gute Leiter (Ton-Einträge) bei ca. 9 und 12 m vorliegen. Dieses entspricht den Angaben aus Kapitel 4.4.1, welche aber weder von der Geoelektrik aufgrund des hohen Rauschanteils noch von der RMT (s. Kapitel 4.4.5) aufgrund der geringen Mächtigkeiten aufgelöst werden. Daher kann die Aussage zweier getrennter Aquifere nicht von den Direct-Push-Messungen bestätigt werden, welches als die verlässlichste Quelle für die Auflösung der Schichten angesehen werden kann.

Die Beprobung der Kohlenwasserstoffe fand entweder in 1 Meter-Intervallen oder in Höhe des Grundwasserspiegels statt und zeigt in den Bohrungen bei DP217 und DP216 durchgehende Einträge, was auf eine Kontamination von der Oberfläche hindeutet. Wie in Abbildung 4.27 zu sehen, befindet sich in diesem Bereich der ehemalige Lagertank, wodurch die Durchsetzung des Bodens bis zum Grundwasser erklärt wird. Ein weiterer solcher Eintragungspunkt befindet sich im Bahn-Transfergebiet. Ansonsten ist die Kontamination nur in Höhe des Grundwasserspiegels, wie in der Bohrung östlich von DP216 zu sehen, anzutreffen. Die maximal gemessene Konzentration auf der Testfläche beträgt 1340 mg/kg. Korrelationsrechnungen zwischen Geoelektrik und Kohlenwasserstoffen geben keine eindeutigen Tendenzen, was aber aufgrund der Güte der Daten nicht verwunderlich ist. Die Direct-Push-Sondierungen zeigen auch nur Einflüsse seitens der Geologie und nicht aufgrund der Kontamination.

Als Referenzprofil dient das Profil O10 in Abbildung 4.31 mit einem RMS-Fehler von 7,1% und einer gezeigte Überdeckung von 0,2. Es liegt nur in der mittleren Bohrung eine geringfügige Kontamination vor, und der geringe Abstand der Sondierungen und Bohrungen ermöglicht einen guten Vergleich zwischen Lithologie und Widerständen.

An der Position der Bohrung/Direct-Push-Sondierung 226 zeigen sich für die ersten drei Meter Widerstände zwischen 120 - 60  $\Omega$ -m, wobei wie schon beim Profil I04 erwähnt, geringmächtige tonige/schluffige Einträge nicht von den Widerständen angezeigt werden. Die im vierten und fünften Meter vorhandenen Schluff- und Ton-Anteile im Haupt- und Nebengeanteile bewirken eine Erniedrigung der Widerstände bis 7,5 m und steigen anschließend mit zunehmender Tiefe wieder an. Die Direct-Push-Werte stimmen auffallenderweise nicht mit den Schluff-Einträgen in den ersten zwei Metern überein, wobei der oberste Eintrag gar nicht von den Widerständen gesehen wird und der zweite um rund 20 cm zum Schluff-Eintrag versetzt ist. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die geologische Analyse von verschiedenen Studenten durchgeführt wurde, die im Rahmen eines Praktikums die Untersuchungen durchführten und dadurch eine unterschiedliche Beschreibung der Lithologie erfolgte. Im vierten bis sechsten Meter korrelieren Tone, Geoelektrik und Direct-Push sehr gut, darunter werden von der Sondierung die Tonschichten in 9 und 12 m Tiefen angezeigt, die von der Geoelektrik nicht aufgelöst werden.

Die Bohrung bei Sondierung 228 zeigt in den ersten drei Metern Sande und Auffüllungen



**Abbildung 4.31:** Inversionsergebnis des Profils O10 nach der Datenreduzierung a) mit darauf projizierten Bohrungen und b) Direct-Push-Ergebnissen (Abstand in m). Der Wertebereich der Direct-Push-Messungen liegt zwischen 0 und 60  $\Omega$ -m. Der RMS-Fehler beträgt 7,1%. In diesem Abschnitt des Messgebietes trat keine Kontamination auf.

und Widerstände um 80 - 120  $\Omega$ -m, darunter Schluffe und Sande bis 4,5 m, die mit absteigenden Widerständen zusammenfallen. Die Direct-Push-Messung an dieser Position besitzt kein verwertbares Ergebnis, da nur ein konstanter Verlauf um 15  $\Omega$ -m zu sehen ist.

Trotz vorhandener Sande im Hauptgemengeanteil der dritten Bohrung zeigt das Geoelektrik-Profil in der obersten Zelle eine gute Leitfähigkeit, die vermutlich aufgrund der Datenreduzierung zu erklären ist und als Artefakt bezeichnet werden kann. Ab dem dritten Meter vorhandene tonige und schluffige Anteile korrelieren mit geringeren Widerständen, wobei in der rechten Hälfte des Profils die horizontal gelagerten guten Leiter (5 - 15  $\Omega$ -m) bzgl. ihrer Mächtigkeit vermutlich nicht korrekt auf Grund der Datenreduzierung dargestellt sind.

Nach Abschluss der Bearbeitung der Profile sind diese in der 3D-Ansicht in Abbildung 4.32 des *GSI3D* mit RMS-Fehlern zwischen 6 - 9 % zu sehen. Wie schon nach der Ansicht der Profile während der NORISC-Untersuchung zeigen sich die rinnenartigen Strukturen in Höhe des Grundwasserspiegels (ca. 4,5 m) durch eingelagerte Tone und Schluffe. Zwischendurch auftretende hohe Widerstände (einige hundert  $\Omega$ -m; rote Bereiche) unterhalb des Grundwasserspiegels können nicht durch die vorhandenen Geologie erklärt werden und sind durch die schlechte Datenqualität zu erklären. Die Schnittstellen der Profile stimmen vom Wertebereich her einigermaßen gut überein, wobei an einigen Positionen auch teilweise größere Abwei-

chungen auftreten können.

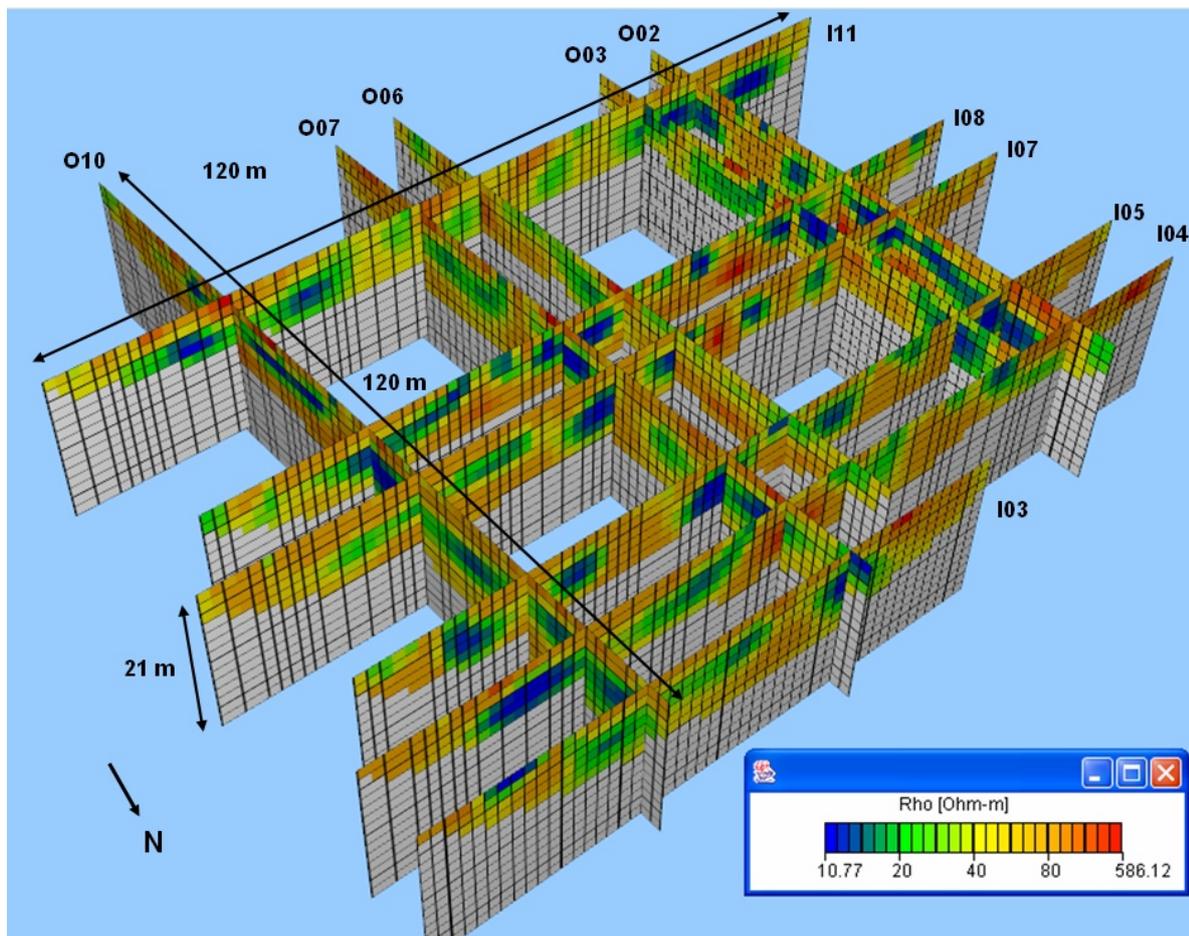


Abbildung 4.32: 3D-Ansicht aller reinterpretierten Geoelektrik-Profile.

#### 4.4.5 RMT

Die von der Universität zu Köln durchgeführten RMT-Messungen dienten dem Zweck, Vergleiche zu den geoelektrischen Messungen anzustellen und zu schauen, ob die an die Geoelektrik gestellten Aufgaben auch von der RMT bewältigt werden können. Zu diesem Zweck wurden 6 Profile gemessen, deren Lage in Abbildung 4.27 gekennzeichnet ist. Die Profilängen betragen zwischen 25 und 60 m mit einem Messpunktabstand von 5 m, die Senderrichtung liegt in  $105^\circ$ , gemessen wurde mit den Frequenzen 12.6 kHz, 59.9 kHz, 128.8 kHz und 207 kHz. Anhand der Lage der terrassenförmigen Struktur und der entsprechenden Topographie wird sich die tonige Rinnenstruktur eher entlang der Nord-Süd-Achse ausgebreitet haben. Daraus folgt, dass die TM-Mode (Primärwelle und induziertes elektrische Feld stoßen senkrecht auf die Struktur) angewendet wird. Da auf der westlichen Seite der Kernfläche noch Fundamentreste der ehemaligen Werkstatthalle im Boden vorhanden waren, begannen die Messungen ab der Hälfte des Kerngeländes und wurden nach Osten fortgesetzt. Durch die Zeitgleichheit der RMT-Messungen mit der NORISC-Felduntersuchung konnte die Lage der Profile nicht auf die Bohrungen abgestimmt werden. Um die Ankopplung der Messelektroden an den trockenen sandigen Untergrund zu verbessern, wurden diese mit einer salzhaltigen

Lösung angegossen.

Eine erste Beurteilung der Daten kann anhand der Rohdaten erfolgen, die in Abbildung 4.33 als Verteilung der scheinbaren Widerstände, als Phase und als  $\rho^* - z^*$ -Verteilung pro Messstation zu sehen ist. In dem RMT-Rohdatenmodul wird die aktuelle Position des Cursors in der entsprechenden Einheit angegeben. Die Darstellung als Pseudosektion (Angabe der Widerstände mittels Farbvergabe in Abhängigkeit der Frequenz) wird hier nicht gezeigt. Die scheinbaren Widerstände zeigen für die Stationen 2 und 5 Minima um 15 - 20  $\Omega$ -m, für die Stationen 3 und 6 Maxima zwischen 30 - 50  $\Omega$ -m. Dabei steigen generell die Widerstände mit abnehmender Frequenz. Die Phasenverteilung liegt für alle Frequenzen zwischen  $42^\circ$  und  $53^\circ$  und steigt dabei leicht mit fortschreitender Stationsnummer.

Bei der Betrachtung der  $\rho^* - z^*$ -Verteilung kann man drei verschiedene Verhalten beobachten. Während die Stationen 3 und 4 einen Abfall der Widerstände mit zunehmender Schwerpunkttiefe zeigen, sind diese für die Stationen 2 und 5 in einem engen Widerstandsbereich, der aber nicht kontinuierlich abfällt, sondern hin und her springt. Schließlich zeigen die Stationen 1 und 6 hohe Widerstände für eine geringe Tiefe und steigen nach einem ausgeprägten Widerstandsminimum zum Schluss wieder deutlich an. Die Schwerpunkttiefe der kleinsten Frequenz variiert für das Profil zwischen 10 - 15 m, was eine maximale Aussagetiefe (d.h.  $2z^*$ ) zwischen 20 - 30 m bedeutet. Aufgrund der vorhandenen Tiefbohrungen mit einer Tiefe bis 18 m kann die RMT von daher den Erkundungsbereich abdecken.

Das Ergebnis der Inversion mit homogenem Startmodell, Bohrungen und den Direct-Push-Sondierungen DP218 - DP216 zeigt Abbildung 4.34. Als Glättungsparameter wurde  $\tau = 1$  bestimmt. Das Gitter wurde unter Anwendung der Gitterregeln in Kapitel 2.4.5 nach *Wannamaker et al.* [1987] benutzt und ist bis zu einer Tiefe von 25 m dargestellt, welches der maximalen Erkundungstiefe  $2z^*$  und gleichzeitig einem DoI-Index  $\leq 0,3$  entspricht. Der RMS-Fehler beträgt 1%. Die Messstationen sind durch Dreiecke gekennzeichnet, die Bohrungen und Direct-Push-Ergebnisse sind 7 m bzw. 9 m entfernt, wobei die linke Bohrung grundwasserabstrommäßig vor dem Profil liegt, die rechte Bohrung hinter dem Profil. Aufgrund der Dichte der Messpunkte des Direct-Push-Gerätes wurde eine Linien-Darstellung mit einem Wertebereich zwischen 0 bis 60  $\Omega$ -mgewählt.

Während sich im linken und zentralen (Station 4 und 5) Bereich des Profils Abschnitte geringer Widerstände zwischen 10 - 30  $\Omega$ -m bzw. um 30  $\Omega$ -m direkt an der Oberfläche befinden zeigt der rechte Rand höhere Widerstände zwischen 80 - 120  $\Omega$ -m. Der Vergleich mit der dort befindlichen Bohrung zeigt seitens der Geologie (Sande und Auffüllungen in den ersten drei Metern des Haupt- und Nebengemengeanteils) eine gute Übereinstimmung, was den Übergang in den schluffig-tonigen Bereich der Bohrung ab 4 m Tiefe und in den Grundwasserbereich angeht. Durch Vergleich mit den restlichen Profilen in Appendix C zeigen sich generell für sandige Bereiche ohne Ton- und Schluffanteile oberhalb des Grundwasserspiegels Widerstände zwischen 80 - 130  $\Omega$ -m. Von daher sind für den Bereich zwischen Station 4 und 5 tonige Anteile anzunehmen, welche ja auch in der zentralen Bohrung im Nebengemengeanteil vorkommen, und so in Widerständen um 30  $\Omega$ -m resultieren.

Der Tiefenbereich zwischen 4,6 und 12,7 m wird von einem sehr guten Leiter mit Widerständen zwischen 10 - 18  $\Omega$ -m zwischen Station 3 und 4 und einem benachbarten kleinräum-

ig guten Leiter bei Station 6 um 5 m charakterisiert. Die Lithologie zeigt hierfür Schluff im Hauptgemengeanteil mit Sand im Nebengementanteil. Ab 12,7 m steigen die Widerstände auf 50 - 70  $\Omega$ -m an, wobei in der Profilbasis zwischen den Stationen 3 und 4 nochmals Widerstände um 35  $\Omega$ -m vorkommen.

Während die Lithologie bis 5 m Tiefe recht gut mit den Widerständen korreliert, fallen gerade für größere Tiefen Diskrepanzen zu den Direct-Push-Ergebnissen auf. Dabei muss man jedoch berücksichtigen, dass aufgrund der Entfernung der Sondierungen zu den Profilen geringe Unterschiede in den Bodenarten (und daraus folgenden Widerstandsunterschieden) vorhanden sein können, welche von dem Direct-Push-Gerät detektiert werden. Weiterhin kann die RMT die dünnen Tonschichten in ca. 4, 9 und 12 m wegen ihrer geringen Mächtigkeit nicht separat auflösen, sondern es kommt zu einem Verschmieren der Schichtgrenzen (vergl. synthetische Berechnungen, Appendix C). Daher folgt für den zentralen guten Leiter zwischen 4,5 und 12 m, dass ein lateral eng begrenzter mittlerer bis hoher Toneintrag (angenommener Schichtwiderstand: ca. 3  $\Omega$ -m) um 4,5 m vorliegt, gefolgt von ein bis zwei Tonschichten in 9 und evtl. 12 m mit mittlerem bis hohem Tonanteil. Anhand der Vergleiche zu den Modellierungen ergibt sich, dass die Bereiche westlich und östlich davon leicht höhere Schichtwiderstände (um ca. 15  $\Omega$ -m) besitzen.

Die 3D-Ansicht der RMT-Profile in Abbildung 4.35 zeigt, dass in den nördlichen Profilen (RMT1, RMT4, RMT5, RMT6) eher kleinräumige oberflächennahe gute Leiter anwesend sind, welche mit der angenommenen rinnenförmigen Struktur der Tone korrelieren. Dabei können, wie eben erwähnt, die geringmächtigen untereinanderliegende Ton- bzw. Schluff-Schichten nicht einzeln aufgelöst werden. Bei den zwei südlichen Profilen RMT2 und RMT3 sind weiterhin gute Leiter bis ca. 25 m vorhanden. Hierfür zeigen die synthetischen Berechnungen, dass Tone bzw. Schluffe ab ca. 18 m aber nicht mehr von den Daten aufgelöst werden und somit diese Strukturen auf Glättungsbedingungen des Inversionsalgorithmus zurückzuführen sind.

Hinsichtlich der Kontamination sind wie bei der Geoelektrik keine Tendenzen in den Korrelationsrechnungen ersichtlich.

#### 4.4.6 Vergleich Direct-Push , RMT und Widerstandsgeoelektrik

Zu Beginn der Reinterpretation der Testfläche war ein Vergleich aller Widerstandsmodelle vorgesehen. Diese sollte durch Vergleiche von Geoelektrik und RMT als auch durch die lokale Betrachtungen an Positionen mit Direct-Push-Sondierungen erfolgen. Durch die notwendige Datenreduzierung bei den Geoelektrik-Profilen sind nur noch oberflächliche Vergleiche mit der RMT möglich, obwohl der volle Tiefenbereich aus Darstellungsgründen bei den 1D-Sondierungsansichten verwendet wird.

Abbildung 4.36 gibt eine Übersicht die Lage aller Profile und Sondierungen. Modellierete Geoelektrik-Profile tragen die Bezeichnung 'Oxy' oder 'Ixy', Direct-Push-Sondierungen 'DPxyz', die RMT-Profile 'RMTx', alle anderen Bezeichnungen stehen für Bohrungen. Die sich kreuzenden Geoelektrik- und RMT-Profile werden nicht in der 3D-Ansicht, sondern als untereinander gestellte Projektionen aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abbildung 4.37

gezeigt.

Stellvertretend für die anderen Profile werden hier die Profile I04 und RMT1 in Abbildung 4.37 gezeigt. Durch die Projektionen des RMT-Profiles in die Ebene des Geoelektrik-Profiles scheint die Lage der Bohrungen und Direct-Push-Sondierungen nicht korrekt, was aber nur durch die verschiedenen Ausrichtungen der Profile zustande kommt.

Sowohl der gut leitende Bereich am oberen linken Rand als auch der schlecht leitende Bereich am oberen rechten Rand des RMT-Profiles werden nicht in ihrer Ausprägung im Geoelektrik-Profil wiedergegeben, ebensowenig wie die massive Linse niederohmigen Materials, im zentralen Teil des RMT-Profiles. Ein Grund dafür ist, dass aufgrund der Datenreduzierung die Aussagetiefe der Geoelektrik nur bis knapp 9 m geht und darunter der Halbraum beginnt, wodurch die wahre Mächtigkeit dieser Struktur nicht ersichtlich ist. Eine weitere Auffälligkeit ist der Übergang in den grundwassergesättigten Bereich wie er bei der RMT um 5 m Tiefe gesehen wird (50 (gelb)  $\rightarrow$  30 (grün)  $\Omega$ -m), während bei der Geoelektrik sich wegen der geringen Datenmenge dieser Übergang nicht eindeutig nachvollziehen lässt.

Betrachtet man einzelne Spuren von Widerständen für die Direct-Push-Sondierungen und den entsprechenden Geoelektrik- und RMT-Sektionen in Abbildung 4.38, zeigt sich, dass die RMT die Auswirkungen der zwei von den Sondierungen detektierten Tonschichten in 9 und 12 m durchaus erkennen bzw. andeuten kann. In den meisten Fällen ist die generelle Übereinstimmung zwischen Direct-Push und RMT gut, wohingegen die Geoelektrik (bei Betrachtung des nicht-reduzierten Datensatzes) nur in den ersten Metern vergleichbare Widerstände erkennen lässt.

#### 4.4.7 Fazit Testfläche Ungarn

Die geophysikalische Untersuchung eines ehemaligen militärischen Öldepots und einer nachfolgenden Betreuung durch eine Tankstelle sollten Aussagen über die allgemeine Untergrundstruktur und im Speziellen über zwei mögliche getrennte Aquiferen im Untergrund ergeben. Die in Grundwassergewinnungsbrunnen aufgetretene Kohlenwasserstoff - Kontamination konnte durch eine erste Sanierungsmaßnahme nicht beseitigt werden und sollte nun in ihrem Ursprung lokalisiert werden.

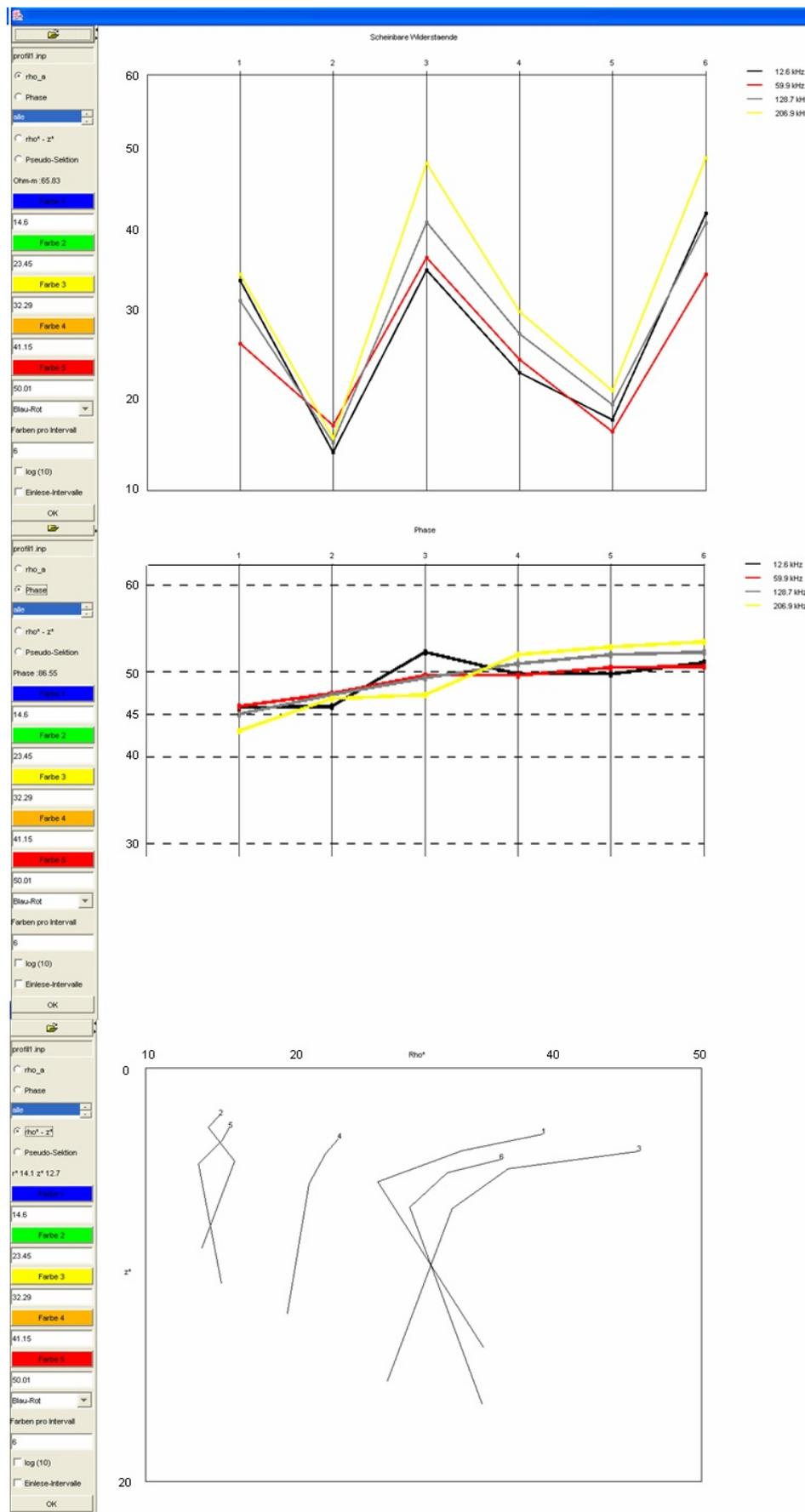
Die eingesetzten geophysikalischen Methoden waren teilweise erfolgreich. Während die Magnetik die Lage eines ehemaligen Untergrundtanks und alte Fundamentreste lokalisieren konnte, wurden die Bodenradar-Messungen durch einen nahegelegenen Radiosender dermaßen gestört, dass die Messdaten nicht verwendet werden konnten. Die Qualität der Geoelektrik-Daten war aufgrund von Ankopplungsproblemen im sandigen und trockenen Boden stark herabgesetzt, sodass für die Nachinterpretation im Rahmen dieser Arbeit eine Datenreduzierung im großen Umfang durchgeführt werden musste, um akzeptable RMS-Fehler zu erhalten. Durch diese Reduzierung verringerte sich die Erkundungstiefe von ca 21 m auf 6 - 9 m, wodurch die ursprüngliche Aufgabenstellung bzgl. des Nachweises zweier Tonschichten in 9 und 12 m und einem möglicherweise daraus resultierendem 2-Aquifer-System nicht beantwortet werden kann. Die NORISC-Untersuchung im Bereich des Grundwasserspiegels bei rund 4,5 m ergab, dass anstatt eines lateralen Schichtaufbaus ein Rinnen-System vorliegt, in

dem erhöhte Kohlenwasserstoff-Konzentrationen an Tone und Schluffe als Speichermedien gekoppelt sind.

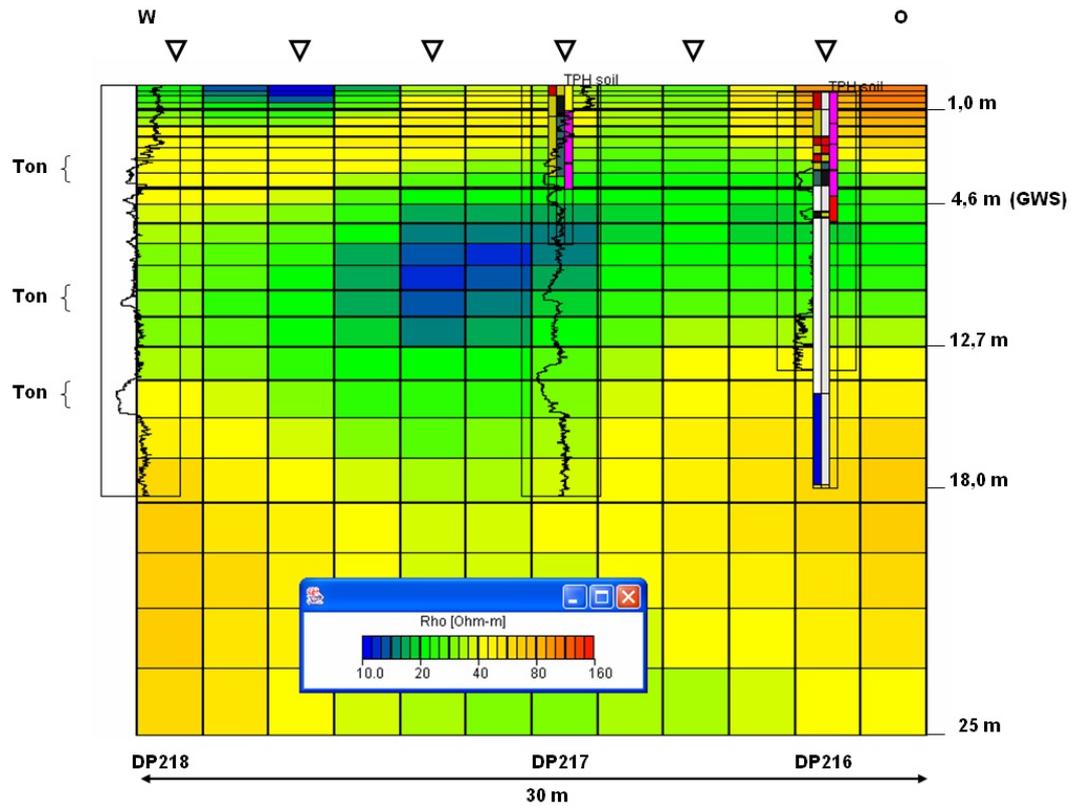
Zusätzlich durchgeführte RMT- und Direct-Push-Messungen sollten überprüfen, inwieweit diese als von NORISC innovativ eingestuften Methoden die Geoelektrik ergänzen können. Während die Direct-Push-Sondierungen im Zentimeter-Intervall den Untergrund abtasten konnten, gaben diese detaillierte Informationen über die Widerstandsverteilung im Untergrund, wobei auch die aus Vorinformationen bekannten Tonschichten in 9 und 12 m erkannt wurden. Wie schon von der Geoelektrik angedeutet wurde aber auch hier keine laterale einheitliche Schichtung nachgewiesen, wodurch das 2-Aquifer-System letztendlich nicht bestätigt werden konnte.

Die Ergebnisse der RMT zeigen für den Untergrund den Übergang in das Grundwasser und einige recht massive gute Leiter in Höhe des Grundwassers und in Tiefen bis zu 18 m an, die vermutlich aus Ton- und Schlufflinsen resultieren. Leider konnten diese nicht durch Bohrungen verifiziert werden, da durch Wahl eines unpassenden Bohrgerätes die entsprechende Tiefe nicht erreicht werden konnte. Naheliegende Direct-Push-Sondierungen zeigen zwar geringmächtige erhöhte Leitfähigkeiten, aber bei Weitem nicht in dem Maßstab, wie es die RMT tut. Durch die Anzahl von nur vier Frequenzen kann der Erkundungsraum nicht optimal abgedeckt werden, wodurch eine starke Glättung des Modells entsteht.

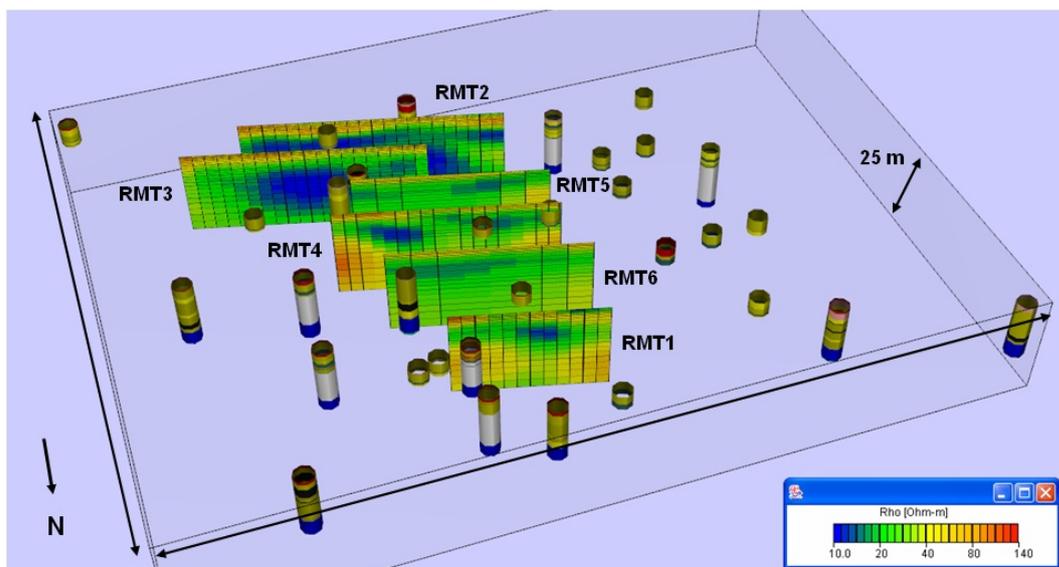
Korrelationsberechnungen zwischen Kohlenwasserstoffen und der Geoelektrik bzw. der RMT ergeben kein nachweisbares Trendverhalten. Daher wird der schon während der NORISC-Untersuchung vermutete Verdacht bestätigt, dass das Ton-Schluff-Rinnensystem die Kohlenwasserstoffe speichert und diese durch Eintrag größerer Wassermengen von der Oberfläche (z.B. Regen) wieder in den Untergrund abgibt.



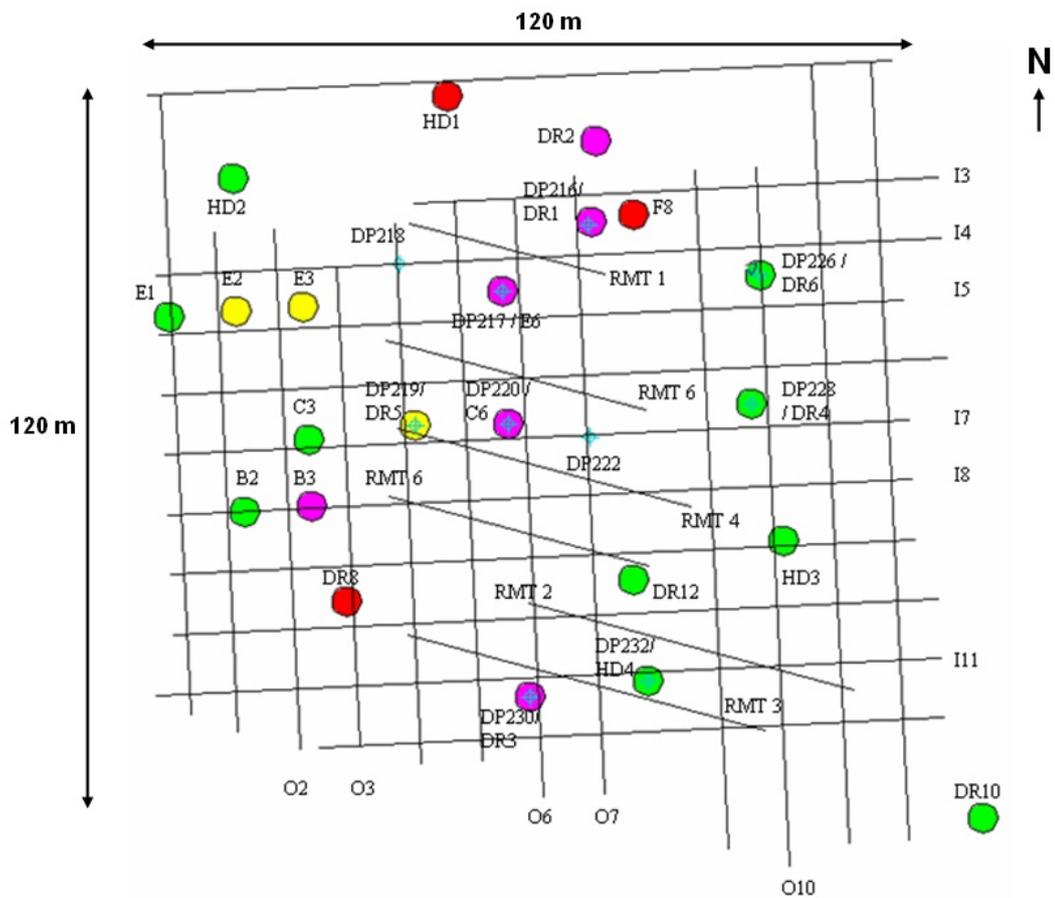
**Abbildung 4.33:** Ansicht der RMT-Daten des Profils 1 im Rohdaten-Viewer des GSI3D. Dargestellt sind die scheinbaren Widerstände (oben), die Phase (mitte) und die  $\rho^* - z^*$ -Verteilung (unten). Die jeweiligen Stationen in der  $\rho^* - z^*$ -Darstellung sind mit Zahlen gekennzeichnet. Die Cursor-Position zeigt die jeweiligen Werte links in der Optionsmaske an (Ohm-m, Phase,  $r^*-z^*$ ).



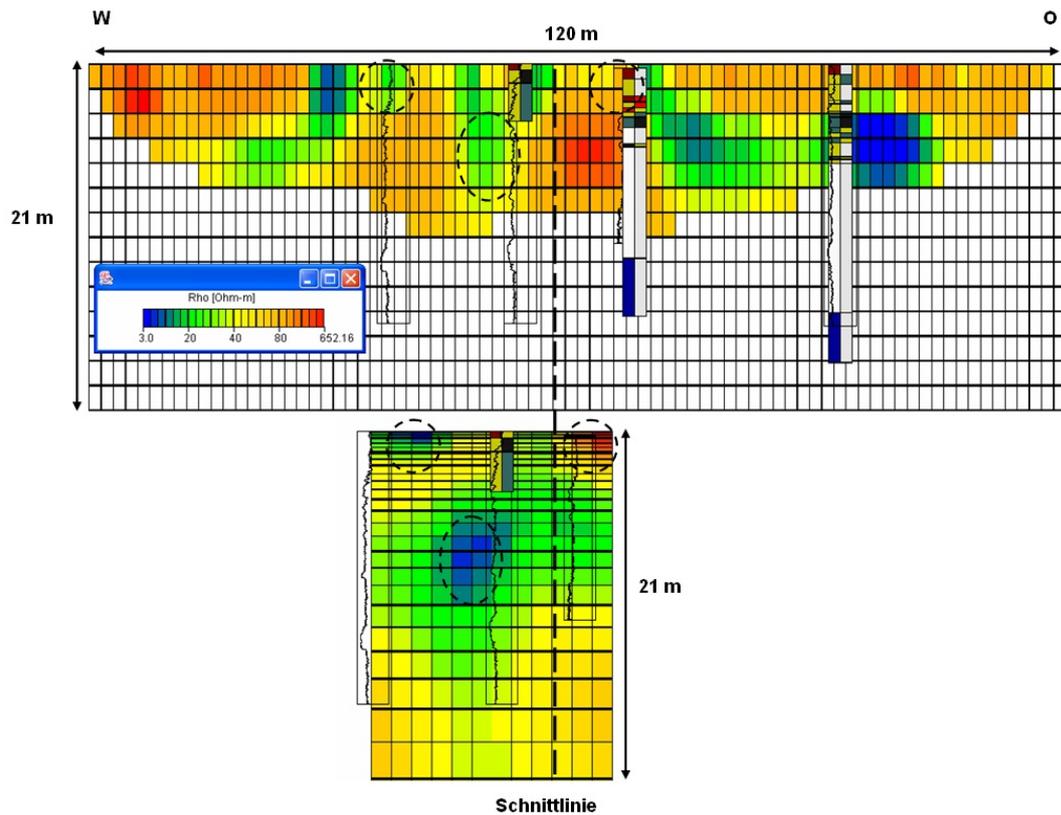
**Abbildung 4.34:** Ergebnis der Inversion des RMT-Profiles 1. Die Bohrungen sind 7 (links, mitte) und 9 m (rechts) vom Profil entfernt, wobei die rechte Bohrung grundwasserabströmungsmäßig hinter dem Profil liegt, die anderen vor dem Profil. Der Direct-Push-Wertebereich liegt zwischen 0 - 60  $\Omega$ -m.



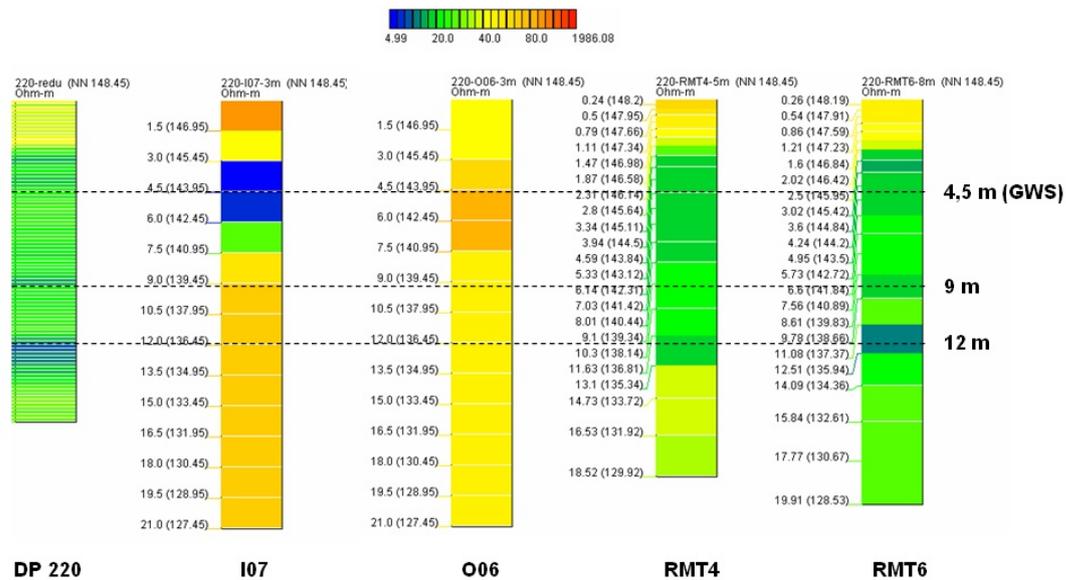
**Abbildung 4.35:** 3D-Ansicht der RMT-Profile mit georeferenzierten Bohrungen mit dargestellten Hauptgemengeanteil. Während die nördlichen Profile (RMT1, RMT4, RMT5, RMT6) eher oberflächliche linsenartige Strukturen zeigen, sind bei den Profilen RMT 2 und RMT3 massive gute Leiter sichtbar.



**Abbildung 4.36:** Position aller bearbeiteten Profile, Bohrungen und Sondierungen. Doppelbelegungen durch Bohrungen und Direct-Push-Messungen haben die jeweilige Kennzeichnung der Einzelbelegungen.



**Abbildung 4.37:** Projektion des Profils RMT1 (unten) auf das Geoelektrikprofil I04 (oben). Das Profil I04 verwendet eine Überdeckung  $\geq 0,2$ . Es wird eine einheitliche Farbskala verwendet. Die gestrichelte Linie markiert die Schnittebene.



**Abbildung 4.38:** Direkter Vergleich Direct-Push-Sondierung 220 mit den entsprechenden Zellen von Geoelektrik- und RMT-Profilen. Die Maßeinheiten stehen direkt über den Säulen. Während die Geoelektrik (Profile I07 und O06; reduzierte Datensätze) durch den hohen Rauschanteil so gut wie keine Korrelation mit der Sondierung aufweist, zeigen die RMT-Profile (RMT4 und RMT6) recht gute Übereinstimmungen, auch was die möglichen Tonschichten und 9 und 12 m betrifft.

---

# ZUSAMMENFASSUNG

---

In den Jahren 2001 bis 2003 sollte das EU Projekt NORISC ('Network Oriented Risc assessment with In-situ Screening of Contaminated sites') Untersuchungsstrategien und Software-Werkzeuge erschaffen, um Altlastuntersuchungen in einem starken interdisziplinären Rahmen durchzuführen und schon im Feld weitestgehend auszuwerten. Dadurch können Untersuchungen gezielt schwerpunkt-orientiert durchgeführt und im Vergleich zu Standarduntersuchungen eine erhebliche Zeit- und Kostenreduzierung erreicht werden.

Diese Ziele sollten mittels einer neuartigen Untersuchungsmethodik für Altlastuntersuchungen erschaffen werden. Diese Methodik, die innerhalb dieser Arbeit mit entwickelt, verbessert und angewendet wurde, basiert auf einer starken Kooperation der verschiedenen (Geo-) Disziplinen Biologie, Geochemie, Geologie und Geophysik, wie sie vorher auf dem Altlastsektor in dieser Art noch nicht praktiziert wurde.

Ausgangspunkt der Methodik ist die Planung der anzuwendenden Methoden auf einer Altlastfläche. Um die Effizienz gegenüber Standarduntersuchungen zu steigern wurden Software-Module erschaffen, die es den Anwendern (d.h. Gutachtern, Umweltämtern und Auftraggebern) erleichtern sollen, eine Übersicht über die geeignetsten Methoden für die jeweiligen Untersuchungsziele zu bekommen und so eine optimale Methodenkombination ausgeben zu lassen. Dieses wurde mittels eines Entscheidungshilfegeräts DSS ('Decision Support System') bewerkstelligt, welche für den geophysikalischen Teil unter Mithilfe des Authors erstellt wurde. Basierend auf einem Methoden-Target-Ranking, bei dem seitens der Geophysik auch Untergrundstrukturen und Einschränkungen der Messmethoden bzgl. möglicher Messhindernisse berücksichtigt wurden, werden Kombinationen aus sich optimal ergänzender Methoden inklusive Zeit- und Kostenabschätzungen ermittelt.

Im Anschluss in die planerische Phase folgt im nächsten Schritt der Methodik die Anwendung der ausgewählten Methoden im Feld. Dabei liegt hier das Augenmerk auf der inte-

grierten Interpretation der Methoden und deren Visualisierung im Feld. Zu diesem Zweck wurde das Programm *GSI3D* (*'Geological Surveying and Investigation in 3D*), welches ursprünglich für eine geologische 3D-Untergrunddarstellung benutzt wird, vom Autoren mit erweitert, um es den Notwendigkeiten von NORISC anzupassen. Dies beinhaltet sowohl die Darstellung horizontaler und vertikaler Schnitte in Form von Rasterdaten oder Bildern, wie sie von der Geophysik häufig als Ergebnisse erbracht werden, als auch die Implementierung chemischer Punktdatenbestände und deren Visualisierung. Mit Hilfe dieser Modifikationen konnten nun chemische, geologische und geophysikalische Ergebnisse vor Ort per Mausklick innerhalb eines Programms miteinander verglichen werden, welches erst eine effiziente interdisziplinäre Vor-Ort-Interpretation ermöglicht. Da die Geophysik aufgrund ihres zeitlichen Rahmens meist im Vorfeld zu den geologischen und chemischen Untersuchungen angesetzt wurde, wurden deren flächenhafte Ergebnisse als Basis für eine gezielte geologische und chemische Beprobung genutzt.

Um die Einfüsse chemischer und geologischer Parameter besser in der Vor-Ort-Interpretation zu berücksichtigen, wurden vom Autoren geophysikalische Module für die Bearbeitung geoelektrischer und radiomagnetotellurischer Daten in das Programm *GSI3D* implementiert, *Raimundo* [2005] hat dies für die Auswertung transientelektromagnetischer Daten getan. Der Zweck dieser Erweiterung besteht darin, dass nun geophysikalische Daten direkt aus dem GIS-Programm heraus kalibriert werden können, während dies bei einer bildhaften Darstellung nicht möglich ist. Diese Kalibrierung ist deswegen sinnvoll und notwendig, da die von der Geologie erbrachten Informationen für die Erstellung von Startmodellen für die Geophysik verwendet werden können und so eine besser an die Geologie angepasste Untergrundstruktur seitens der Geophysik erreicht wird. Daraus folgt weiterhin, dass auf diese Weise detektierte Anomalien auf nicht-geologische Ursachen hindeuten und daher gezielt von der Chemie beprobt werden können (Restrisikominimierung). Die geophysikalischen Module beinhalten die Möglichkeit zur Visualisierung von Rohdaten zwecks erster Analyse der Messdaten direkt nach der Messung, der Erstellung von Startmodellen mittels eines graphischen Interfaces, der graphischen Ansteuerung von Inversionsalgorithmen und die einfache Darstellung von 1D-, 2D- und 3D-Datensätzen als georeferenzierte Objekte.

Während des Projektes wurden vier Testflächen ausgesucht, um den Fortschritt der DSS - Entwicklung zu testen und, wenn nötig, Korrekturen vorzunehmen. Die Untersuchungen wurden dabei nicht von den NORISC-Mitgliedern selbst, sondern von normalen Firmen durchgeführt. Drei der vier Flächen wurden in dieser Arbeit mit Hilfe der neu entwickelten geophysikalischen Module reinterpretiert, um die Effizienz dieser neuen Module im Vergleich zu den existierenden NORISC-Untersuchungen zu testen.

Der erstmalig durchgeführte interdisziplinäre Ansatz auf der Kölner Testfläche hat als solches gut funktioniert. Anhand der geophysikalischen Ergebnisse wurden Vorschläge für Bohrungen an die Analytik-Firma gegeben. Der Nachteil dieses Gebietes war jedoch, dass dieses schon einer Teilsanierung (Boden- und Luftaustausch) unterzogen worden war und daher keine stark erhöhten Kohlenwasserstoffe anzufinden waren. Trotzdem hat die Nachinterpretation mit Hilfe von aus der Geologie resultierenden Startmodellen ergeben, dass ansatzweise eine positive Korrelation zwischen Kohlenwasserstoffen und elektrischen Widerständen in der vadosen Zone vorliegt und sich eine lokale Kontaminationsfahne in den Ergebnissen zeigt und

bei Nutzung dieses Ansatzes gezielt hätte beprobt werden können.

Im Falle der italienischen schwermetallkontaminierten Testfläche sollten mittels Widerstandsgeoelektrik und elektromagnetischen Verfahren zur Widerstandsbestimmung der Untergrund bzgl. eines Zwei-Aquifer-Systems untersucht werden. Das Hauptziel lag in der Lokalisierung möglicher Verbindungsfenster zwischen den Aquiferen, da der zweite Aquifer stark kontaminiert war. Die von der ausführenden Geophysikfirma erbrachten Ergebnisse zeigten u.a. ein Rohr, welches quer durch die Geoelektrik-Profile läuft. Der Einfluss war so groß, dass im Hauptuntersuchungsbereich keine befriedigenden Aussagen erreicht werden konnten, da keine Modellierung des Rohres durchgeführt worden war. In der Nachinterpretation wurden diese dann durchgeführt, wobei sich zeigte, dass ein Großteil der Daten im Aquiferübergang durch das Rohr beherrscht wird. Um diese Einflüsse zu minimieren wurden anhand von 1D-Widerstandsinversionen entlang der Profile geschichtete 2D-Startmodelle erstellt und mittels der vorhandenen geologischen Bohrungen kalibriert. Da die Bohrungen nicht bis zur geforderten Erkundungstiefe der Geoelektrik reichen, konnte die Verlässlichkeit der so erstellten Startmodelle nicht ausreichend für den unteren Aquifer verifiziert werden. Eine weitere Möglichkeit der Minimierung des Rohreinflusses bestand in der Reduzierung derjenigen Datenpunkte, welche in synthetischen Berechnungen Einwirkungen durch das Metallrohr gezeigt haben. Die daraus folgenden Modelle sind zwar weitestgehend von dem Rohreinfluss bereinigt, lassen aber nur für die Randbereiche der Profile Aussagen über den Übergang zwischen oberen und unterem Aquifer und dem zweiten Aquifer selbst zu. Die Basis des unteren Aquifers konnten in beiden Fällen nicht lokalisiert werden.

Zum Projektabschluss wurde eine ungarische Testfläche mit einer Kohlenwasserstoff - Kontamination in einem vermuteten Zwei-Aquifer-System untersucht. Die Hauptaufgabe der Geophysik bestand dabei wiederum in der Lokation möglicher Diskontinuitäten zwischen den beiden Aquiferen und der Erkundung von Untergrundobjekten. Die während der NORISC-Untersuchung erbrachten Geoelektrik-Ergebnisse wiesen Widerstandsverteilungen auf, die für größere Tiefen sehr untypisch waren und nicht mit den geologischen Informationen übereinstimmten. Die Reinterpretation dieser Daten mit Hilfe der neuen Module zeigte sehr große RMS-Fehler auf, die nur durch Datenreduzierung von rund 4/5 der Daten auf ein normales Maß gebracht werden konnten. Dadurch ging die geforderte Tiefeninformation verloren, wodurch nur Aussagen bis zum Grundwasserspiegel möglich waren. Trotzdem hat die Auswertung der Geoelektrik für diesen Bereich eine gut leitende Rinnenstruktur gezeigt, welche der ursprünglichen geologischen Annahme einer söligen Schichtung widersprach. Unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung wurden gezielt Bohrungen in gut- und schlecht-leitenden Bereiche abgeteuft. Während in den schlecht leitenden sandigen Bereichen keine Kontaminanten lokalisiert wurden, ergab sich für die gut leitenden Bereiche, dass die dort anwesenden Tone und Schluffe in einem Korridor Kohlenwasserstoffe enthielten. Diese wurden dann als Quelle der wiederauftretenden Kontamination bestätigt.

Zusätzlich durchgeführte RMT- und Direct-Push-Messungen sollten ursprünglich mit den Ergebnissen der Geoelektrik verglichen werden und im Falle der Direct-Push-Messungen mögliche Korrelationen zwischen elektrischen Widerständen und Kohlenwasserstoffkonzentrationen aufzeigen. Auf Grund eines unpassenden Bohrgerätes konnten aber nur Proben bis zum Grundwasserspiegel entnommen werden. Die RMT-Messungen wurden mit der Geo-

elektrik und Direct-Push verglichen. Dabei zeigte sich, dass trotz Verwendung von nur vier Frequenzen die Übereinstimmungen mit den Direct-Push-Ergebnissen relativ gut sind, aber aufgrund der geringen Mächtigkeit von Schluffen und Tonnen keine detaillierte Aussage über den Untergrund und die Beantwortung nach einem Zwei-Aquifer-System erlauben.

Die in dieser Arbeit gesteckten Ziele konnten erfolgreich erfüllt werden. Mit Hilfe der während des Projektes entwickelten Untersuchungsmethodik können Altastflächen effizienter als mit bisherige Standardverfahren untersucht werden. Als planerische Ausgangsbasis dient die Entwicklung eines Entscheidungshilfeworkzeugs (DSS) zur Ermittlung von optimalen Methodenkombinationen. Für die Interpretation und Evaluierung der Daten vor Ort wurde das GIS-Programm *GSI3D* weiterentwickelt, mit dem die verschiedenen Datensätze einfach und flexible miteinander verglichen werden können. Für die Geophysik wurden weiterhin Möglichkeiten zur Feldkalibration implementiert, um einerseits eine an die Geologie angepasstere Untergrundstruktur zu erreichen, welche den Verlauf geologischer Strukturen besser widerspiegelt und andererseits um dadurch Hinweise auf nicht-geologisch bedingte Anomalien zu lokalisieren. So können auffällige Strukturen gezielt beprobt werden, welches zu einer drastischen Zeit- und Kostenreduzierung bei mindestens gleichbleibender Qualität führt.

## 5.1 Ausblick

Die Arbeit mit dem Programm *GSI3D* erlaubt bisher die Bearbeitung geoelektrischer, radio-magnetotellurischer und transientelektromagnetischer Daten. Die logische Fortführung besteht in der Implementierung von Modulen zur Bearbeitung seismischer, magnetischer oder gravimetrischer Daten, um so ein umfassendes Werkzeug zur Untergrundmodellierung zu erhalten. Eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Geologie besteht darin, dass die notwendigen Bohrlochinformationen zur Verfügung stehen, um eine durchgängige Kalibration an den geophysikalischen Daten durchführen zu können. Wie man anhand der Beispielen aus dem NORISC-Projekt gesehen hat führen nicht vorhandene geologische Tiefeninformationen dazu, dass die Aussagen der Geophysik für untersuchungskritische Abschnitte nicht verifiziert werden können.

---

## Literaturverzeichnis

---

- AbdelAal, G. Z., E. A. Atekwana, L. D. Slater and E. A. Atekwana**, Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments, *Geophys. Res. Lett.*, 31,12, L12505, 1–4, 2004.
- Archie, G.**, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. Am. Inst. Min. Metal. and Petr. Eng.*, 146, 54 – 62, 1942.
- Atekwana, E. A., W. Sauck and D. Werkema**, Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site, *Journal of Applied Geophysics*, 44, 167 – 180, 2000.
- Atekwana, E. A., D. P. Cassidy, C. Magnuson, L. Enders, D. D. Werkema and W. A. Sauck**, Changes in geoelectrical properties accompanying microbial degradation of LNAPL, in *Proceedings of the SAGEEP, OCS1*, 2001.
- Atekwana, E. A., E. A. Atekwana and R. S. Rowe**, Relationship between total dissolved solids and bulk conductivity at a hydrocarbon contaminated aquifer, in *Proceedings of the SAGEEP*, 228 – 237, 2003.
- Auken, E. and A. V. Christiansen**, Layered and laterally constrained 2d inversion of resistivity data, *Geophysics*, 69, (3), 752 – 761, 2004.
- Bailey, N. J. L., M. Jobson and M. A. Rogers**, Bacterial degradation of crude oil: comparison of field and experimental data, *Chemical geology*, 11, 1973.
- Barker, R.**, Improving the quality of resistivity sounding data in landfill studies, in *Geotechnical and Environmental Geophysics*, edited by S. Ward, vol 2, 245–251, Soc. Explor. Geophys., Tulsa, 1990.
- Bastani, M. and L. B. Pedersen**, Estimation of magnetotelluric transfer functions from radio transmitters, *Geophysics*, 66, 1038 – 1051, 2001.
- Bedient, P. B., H. S. Rifai and C. J. Newell**, *Groundwater Contamination - Transport and Remediation*, Prentice Hall; 2nd Edition (September 1999), 1999.

- Benson, A. and N. Mustoe**, DC Resistivity, Groundpenetrating Radar, and Soil and Water Quality Data Combined to Access Hydrocarbon Contamination - A case study in Arizona, *Environmental Geosciences*, 3, (4), 165 – 175, 1997.
- Benson, A., L. Kelly and M. Stubben**, Mapping groundwater contamination using dc resistivity and vlf geophysical methods - a case study, *Geophysics*, 62, 80 – 86, 1997.
- Beyaert, G., G. Chevassu and R. Lagabrielle**, Reconnaissance rapid de projets de tranchées par radio-magnétotellurique, *Bull. lision Labo. P. et Ch.*, 152, 85 – 91, 1987.
- Breiner, S.**, *Applications manual for portable magnetometers*, GeoMetrics, 1973.
- Brunotte, E., R. Immendorf and R. Schlimm**, Die Naturlandschaft and ihre Umgestaltung durch den Menschen. Erläuterungen zur Hochschulexkursionskarte Köln and Umgebung, in *Kölner Geographische Arbeiten*, edited by H. Besler, H. Bremer, and E. Brunotte, vol 63, Universität zu Köln, 1994.
- Cagniard, L.**, Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, 18, 605 – 635, 1953.
- Constable, S., R. Parker and C. Constable**, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 52, 289–300, 1987.
- Dahlin, T. and B. Zhou**, A numerical comparison of 2d resistivity imaging with 10 electrode arrays, *Geophys. Prospect.*, 52, 379 – 398, 2004.
- de Groot-Hedlin, C. and S. Constable**, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, 55, 1613 – 1624, 1990.
- de Groot-Hedlin, C. and S. Constable**, Inversion of magnetotelluric data for 2d structure with sharp resistivity contrasts, *Geophysics*, 69, (1), 78 – 86, 2004.
- Dietrich, P.**, Site characterization using geoelectrical and hydraulic direct push probes, *Con-soil 2003 - 8th international FZK/TNO conference on contaminated soil, Gent, Belgium, 12th-16th May 2003, Conference proceedings, Theme B, Lecture session B*, 917–918, 2003.
- Dixon, J. B. and S. B. Weed**, *Minerals in Soil Environments*, Soil Science Society of America, Ser. 1, 2nd edition, 1989.
- Dupis, A., A. Choquier and G. Boussuet**, La radio magneto-tellurique: une nouvelle méthode de la geophysique appliquee, *Bull. Soc. geol. France*, 166, 231 – 242, 1995.
- Eberle, I.**, Der Begriff Altlasten: Genese, Eingrenzung and Anwendungspraxis in den Bundesländern, *Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung*, 2, 1989.
- Fachgruppe Wasserchemie in der GDCh**, *Chemie and Biologie der Altlasten*, VCH, Weinheim, 1996.

- Frischknecht, F. C., V. F. Labson, B. R. Spies and W. L. Anderson**, Profiling Methods Using Small Sources, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, edited by M. N. Nabighian, vol 2, chapter 3, Soc. Explor. Geophys., 1991.
- Gajdos, V. and V. Kral**, Influence of hydrocarbon pollution to soil conductivity, in *Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, 1995.
- Gargini, A., S. Moretto and E. Scardazzi**, Pre-Information Report for the NORISC investigators of the 3rd test site Massa, NORISC Technical Report, University of Ferrara, Earth Sciences Department, 2003.
- Geologisches Landesamt NRW**, *Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen - 1:100.000*, Krefeld, 1992.
- GeotomoSoftware**, Res2DInv: Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the leastsquares method, 3.4 Auflage, Geotomo Software, 2001.
- Günther, T.**, *Inversion method and resolution analysis for 2D/3D reconstruction of resistivity structures from DC measurements*, Ph.D. Thesis, University of Freiberg, 2004.
- Goldman, M. R.**, SEGY to ASCII Conversion and Plotting Program 2.0, Open-File Report 2005-1311 Version 2.0, U.S. Geological Survey, 2005.
- Green, A., E. Lanz, H. Maurer and D. Boerner**, A template for geophysical investigations of small landfills, *The Leading Edge*, 18, 248–254, 1999.
- Greenhouse, J. and D. Slaine**, The use of reconnaissance electromagnetic methods to map contaminant migration, *Ground Water Monit. Rev.*, 3, 47 – 59, 1983.
- Heim, D.**, *Tone and Tonminerale*, Elsevier, Stuttgart, 1990.
- Hördt, A. and B. Tezkan**, Europäisches Projekt NORISC hat begonnen, in *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, Nr.1, 2001.
- Iaco, R. D., A. Green and H. Horstmeyer**, An integrated geophysical study of a landfill and its host sediments, *Europ. J. Environ. Eng. Geophys.*, 4, 223 – 263, 2000.
- Illich, B.**, Tiefeindringender Metalldetektor, in *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien and Altlasten*, edited by Knödel, Krummel, and Lange, Springer-Verlag, 1997.
- Inman, J. R.**, Resistivity inversion with ridge regression, *Geophysics*, 40, 798 – 817, 1975.
- Jackson, J. D.**, *Classical Electrodynamics*, JohnWiley, 1975.
- Jäger, W.**, Persönliche Mitteilung an Klaus Knödel, in , 1994.
- Jupp, D. L. B. and K. Vozoff**, Simple Iterative Methods for the Inversion of Geophysical Data, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 42, 957–976, 1975.

- Kaufman, A. A. and G. V. Keller**, The magnetotelluric sounding method, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, 2.nd Edition*, edited by M. N. Nabighian, vol 15, Soc. Explor. Geophys., 1981.
- Keller, G. V. and F. C. Frischknecht**, *Electrical methods in geophysical prospecting*, Pergamon Press, 1966.
- Kemna, A.**, *Tomographic Inversion of Complex resistivity*, Ph.D. Thesis, Institut für Geophysik, Ruhr-Universität Bochum, 2000.
- Kessler, H., S. J. Mathers and H.-G. Sobisch**, GSI3D - The software and methodology to build near-surface 3-D geological models, Internal Report IR/04/029, 96pp, British Geological Survey, 2004.
- Knödel, H. Krummel and G. Lange**, *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien and Altlasten*, Geophysik, Springer-Verlag, 1997.
- Kolodziej, A. W.**, EM 38, EM 31, EM 34, in *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien and Altlasten*, edited by Knödel, Krummel, and Lange, Springer-Verlag, 1997.
- Kolodziej, A. W., E. Prácsér, G. Rezessy, K. Seidel, L. Szabadvány and L. Vértesy**, Elektromagnetische Zweispulen-Systeme, in *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien and Altlasten*, edited by Knödel, Krummel, and Lange, Springer-Verlag, 1997.
- Kvapil, J. and S. Mares**, Cone penetration logging for the direct detection of Inapls contamination, *Near Surf. Geoph.*, 4, 157 – 160, 2003.
- LAGA**, Gefährdungsabschätzung and Sanierungsmöglichkeiten bei Altablagerungen, in *Müll- and Abfallbeseitigung (Müll-Handbuch)*, vol 4/83, LAGA-Mitteilungen Nr. 5, 1983.
- Lagabrielle, R.**, Les bases de lad radio magnéto-tellurique, *Industrie minéral-Mines et Carrières - Les Techniques*, 373 – 384, 1986.
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg**, *Handbuch Altlasten and Grundwasserschadensfälle: Leitlinien zur Geophysik an Altlasten*, Geophysik, Karlsruhe, 2. unveränderter Nachdruck, 1990.
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen**, Umwelt NRW - Daten and Fakten, in *LUA NRW*, Essen, 2000.
- Loke, M. and R. Barker**, Practical techniques for 3d resistivity surveys and data inversion, *Geophysical Prospecting*, 44, 499–523, 1996a.
- Loke, M. and R. Barker**, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method, *Geophys. Prospect.*, 44, 131–152, 1996b.
- Losecke, W. and K. Knödel**, Magnetotellurik, in *Angewandte Geowissenschaften*, edited by F. Bender, vol 2, Enke, 1985.

- Mackedanz, J.**, Mehrdimensionale Modellierung von Geoelektrikdaten eines kohlenwasserstoffkontaminierten Gebietes in Ploiesti (Rumänien), Master Thesis, Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln, 2005.
- Mackie, R., S. Rieven and W. Rodi**, *Users Manual and Software Documentation for Two-Dimensional Inversion of Magnetotelluric data*, Massachusetts Institute of Technology, Earth Resources Laboratory., Cambridge, Massachusetts 02139, USA, 1997.
- Mayer, P.**, Sicherheitstechnische Aspekte bei der Sanierung von Altlasten, *Abfallwirtschafts Journal*, 1, 39, 1989.
- Mazic, O., I. Landa and A. Maskova**, Determination of the extend of oil contamination in groundwater by geophysical methods, in *Geotechnical and Environmental Geophysics*, edited by S. H. Ward, vol 2, Soc. Explor. Geophys., 1990.
- Meju, M. A.**, *Geophysical Data Analysis: understanding Inverse Problem Theory and Practice*, 6, Soc. Explor. Geophys., 1994.
- Menke, W.**, *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Academic Press Inc., 1984.
- Müller, M.**, Mehrdimensionale Modellierungen von magnetotellurischen and erdmagnetischen Meßdaten aus den Anden Nordchiles, Master Thesis, Institut für Geophysik und Meteorologie, Institut für Geophysik und Meteorologie, 1995.
- Modin, I. N., V. A. Shevnin, A. A. Bobatchev, D. K. Bolshakov, D. A. Leonov and M. L. Vladov**, Investigation of oil pollution with electrical prospecting methods, in *Proceedings of the 3rd EEGS-ES-Meeting*, 267 – 270, Aarhus, Denmark, 1997.
- Neber, A.**, *Anleitung zur geologischen 3D Kartierung and Modellierung mit GSI3D*, lithosphere – applied 3D geological surveying, 2005.
- Newman, G. A. and D. L. Alumbaugh**, Three-dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients, *Geophys. J. Int.*, 140, 410 – 424, 2000.
- Oldenburg, D. W. and Y. Li**, Estimating depth of investigation in dc resistivity and ip surveys, *Geophysics*, 64, 403 – 416, 1999.
- Olhoeft, G. R.**, Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetrating radar and complex resistivity, in *Proceedings of the API and NWWA Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water - Prevention, Detection and Restoration*, Nov.12 - 14, 1986, 284 – 305, Houston: Dublin, Ohio, Natl. Water Well Assoc., 1986.
- Perk, M., B. Tezkan and H.-G. Sobisch**, Der Feld-Einsatz der Visualisierungssoftware GSI3D (Geological Surveying and Investigation in 3D) im EU-Projekt NORISC am Beispiel der Testfläche Balassagyarmat (Ungarn), in *GeoLeipzig 2004: Volume of Abstracts*, 12, 2004.

- Plumb, R. H. and A. M. Pitchford**, Volatile organic scans - implications for ground water monitoring, in *Proceedings of the API and NWWA Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water - Prevention, Detection and Restoration, Nov.13 - 15, 1985*, 207 – 222, Houston, Texas, 1985.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky and W. T. V. ans Brian P. Flannery**, *Numerical Recipes in C*, zweite Auflage, Cambridge University Press, 1992.
- Raimundo, C.**, Transient Electromagnetic Measurements on a waste site in Düren and their Interpretation, Master Thesis, Institut für Geophysik und Meteorologie, Institut für Geophysik und Meteorologie, 2005.
- Rat der Sachverständigen für Umweltfragen**, Altlasten - eine Kurzfassung des Sondergutachtens, *Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung*, 2, 325 – 354, 1989.
- Recher, S.**, Untersuchung der Anwendbarkeit der Madiomagnetotelluik-Methode auf die Lokalisierung von kontaminierten Boden, Master Thesis, Institut für Geophysik and Meteorologie, Universität zu Köln, 1998.
- Recher, S.**, *Doktorarbeit: Dreidimensionale Erkundung von Altlasten mit Radiomagnetotellurik*, Ph.D. Thesis, Institut für Geophysik und Meteorologie, 2002.
- Rühlow, A., B. Tezkan and O. L. D. Lima**, DC resistivity and time-domain induced polarization survey for the study of groundwater contamination in bahia, brazil, *EEGS*, 3, 143 – 159, 1999.
- Rodi, W. and R. L. Mackie**, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-d magnetotelluric inversion, *Geophysics*, 66, (1), 174 – 187, 2001.
- Sauck, W. A.**, A conceptual model for the geoelectrical response of NAPL plumes in granular sediments, in *Proceedings of the SAGEEP*, 805 – 817, 1998.
- Sauck, W. A.**, A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environson sandy sediments, *J. Appl. Geophys.*, 44, 151 – 165, 2000.
- Scales, J. A., M. L. Smith and S. Treitel**, *Introductory Geophysical Inverse Theory*, Samzidat-Press, 1997.
- Schlumberger, C. and M. Schlumberger**, Electrical studies of the Earth's crust at great depths, Techn. Publ., Nr. 315, Amer. Inst. Mining and Metallurgy, 1930.
- Schmucker, U. and P. Weidelt**, *Electromagnetic Induction in the Earth*, Lecture Notes, Aarhus, 1975.
- Schön, J.**, *Petrophysik*, Enke, Stuttgart, 1983.
- Scholl, C.**, Die Periodizität von Sendesignalen bei Long-Offset Transient Electromagnetics, Master Thesis, University of Cologne, Institute for Geophysics and Meteorology, 2001.

- Scholl, C.**, *The influence of multidimensional structures and the interpretation of LOTEM data with one-dimensional models and the application to data from Israel*, Ph.D. Thesis, University of Cologne, Institute for Geophysics and Meteorology, 2005.
- Seher, T.**, *Untersuchung von Feuchtbiotopen in Ostfriesland: Gefährdungsabschätzung mit Multielektroden-Geoelektrik und Radiomagnetotellurik*, Master Thesis, Institut für Geophysik und Meteorologie, Institut für Geophysik und Meteorologie, 2005.
- Smith, J. T. and J. R. Booker**, Rapid inversion of two- and three- dimensional magnetotelluric data, *J. Geophys. Res.*, 96, 3905–3922, 1991.
- Sobisch, H.-G.**, *Ein digitales räumliches Modell des Quartärs der GK 25 Blatt 3508 Nordhorn auf der Basis vernetzter Profilschnitte*, Shaker Verlag GmbH, 2000.
- Spies, B. R.**, Depth of investigation in electromagnetic sounding methods, *Geophysics*, 54, 872–88, 1989.
- Strack, K. M.**, *Exploration with Deep Transient Electromagnetics*, Methods in Geochemistry and Geophysics, Bd. 30, Elsevier, 1992.
- Swift, C. M.**, Theoretical magnetotelluric and turam response from two-dimensional inhomogeneities, *Geophysics*, 36, (1), 38 – 52, 1971.
- Taban, T.**, *Exploration of contaminated soils using magnetic and multielectrode dc-resistivity geophysical techniques*, Master Thesis, University of Cologne, Institute for Geophysics and Meteorology, 2005.
- Telford, W. M., L. P. Geldart and R. E. Sheriff**, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, 2. Auflage, 1990.
- Tezkan, B.**, A review of environmental applications of quasi-stationary electromagnetic techniques, *Surveys in Geophys.*, 20, 279–308, 1999.
- Tezkan, B. and P. Georgescu**, Detection of hydrocarbon contaminated layer near the refinery Brazi/Romania by using shallow EM techniques, in *15th EM Induction Workshop*, 3, 2000.
- Tezkan, B., M. Goldman, S. Greinwald, A. Hördt, I. Müller, F. M. Neubauer and H. G. Zacher**, A joint application of radiomagnetotellurics and transient electromagnetics to the investigation of a waste deposit in Cologne (Germany), *Applied Geophysics*, 34, 199–212, 1996.
- Tezkan, B., P. Georgescu and F. U.**, A radiomagnetotelluric survey on an oil-contaminated area near the brazi refinery, romania, *Geophys. Prospect.*, 53, 311 – 232, 2005.
- Tikhonov, A. N.**, On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, *Doklady Akad. Nauk*, 2, 295 – 297, 1950.
- Turberg, P. and R. Barker**, Joint application of radio-magnetotelluric and electrical imaging surveys in complex subsurface environments, *First Break*, 14, 105 – 112, 1996.

- U.S. Army Corps of Engineers Department of the Army**, *Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations*, US Army, 1993.
- US EPA**, *Use of airborne surface and borehole geophysical techniques at contaminated sites: a reference guide*, US EPA Office of Science Planning and Regulatory Evaluation Center for Environmental Research Information, 1993.
- Vanhala, H.**, Mapping oil-contaminated sand and till with spectral induced polarization (sip) method, *Geophys. Prospect.*, 45, 303–326, 1997.
- Veeser, V.**, Untersuchung des Auflösungsvermögens bei Radiomagnetotellurischen Messungen, Master Thesis, Institut für Geophysik und Meteorologie, Institut für Geophysik und Meteorologie, 1997.
- Vogelsang, D.**, *Geophysik an Altlasten*, Springer-Verlag, 2. Auflage, 1991.
- Vogelsang, D.**, *Environmental Geophysics: A Practical Guide*, Springer-Verlag, 1995.
- Vozoff, K.**, The magnetotelluric method, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, edited by M. N. Nabighian, vol 2, chapter 3, Soc. Explor. Geophys., 1987.
- Vozoff, K.**, The Magnetotelluric Method, in *Electromagnetic methods in applied geophysics*, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, edited by M. N. Nabighian, Soc. Explor. Geophys., 1991.
- Wannamaker, P. E., J. A. Stodt and L. Rijo**, A stable finite elementsolution for two-dimensional magnetotelluric models, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 88, 227–296, 1987.
- Ward, S. H.**, *Geotechnical and Environmental Geophysics: Environmental and Groundwater*, vol II, Soc. Explor. Geophys., Tulsa, 1990.
- Ward, S. H. and G. W. Hohmann**, Electromagnetic theory for geophysical applications, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, edited by M. N. Nabighian, Soc. Explor. Geophys., 1988.
- Werkema, D., E. Atekwana, A. Endres and W. Sauck**, Temporal and Spatial Variability Of High Resolution In Situ Vertical Apparent Resistivity Measurements At A LNAPL Impacted Site, in *Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, 2002.
- Woll, B., J. Mack, F. Ellerbusch and J. Vetter**, Facilitating Brownfields Transactions Using Triad and Environmental Insurance, *Journal of Environmental Cleanup Costs, Technologies & Techniques*, 13, no.2, 113–130, 2003.
- Yang, C.-H. and J.-I. You**, High resistivities associated with an LNAPL plume imaged by geoelectrical tomography, in *Expanded Abstracts of the SEG Meeting*, 1999.
- Zacher, G., B. Tezkan, F. Neubauer, A. Hördt and I. Müller**, Radiomagnetotellurics: a powerful tool for waste-site exploration, *Europ. J. Environ. Eng. Geophys.*, 1, 139 – 159, 1996.

---

## ERGEBNISSE DER TESTFLÄCHE KÖLN

---

### Finale Widerstandsmodelle

Diese Sektion zeigt die Ergebnisse der Widerstandsprofile der Kölner Testfläche unter Benutzung von Startmodellen, die sich aus 1D-Widerstandsergebnissen ergeben. Diese 1D-Modelle wurden mit benachbarten geologischen Bohrinformationen kalibriert, um einen Zusammenhang zwischen den Widerständen und der vorhandenen Geologie zu ermitteln.

Allgemein lässt sich für diese Fläche sagen, dass ein Großteil der gewonnenen 1D-Ergebnisse nur durch unterschiedliche physikalische Bedingungen innerhalb der durchwegs einheitlichen sandig-kiesigen Matrix der Bohrungen herrührt. In Randbereichen einiger Profile, in denen tonige Anteile gefunden wurden (Profile nor00, nor10 und nq70), korrelieren diese Einträge auch mit Widerstandsübergängen in den 1D-Modellen.

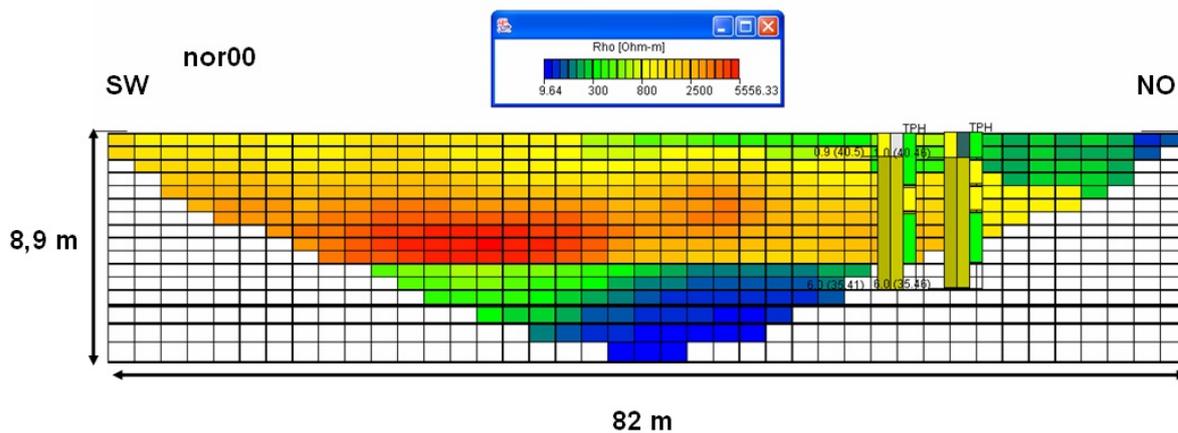
Die Lage des Grundwasserspiegels kann in den Ergebnissen mit homogenem Startmodell (s. Abbildung 4.6) aufgrund der Verteilung der Datenpunkte bzw. der verwendeten Messkonfiguration (vergleiche Abbildung 4.11) nur bedingt bestimmt werden. 1D-Inversionen im Rahmen der NORISC-Untersuchung konnten dann den Übergang genauer festlegen, wobei Messungen mit einem Lichtlot in nahegelegenen Grundwasserbeobachtungsbrunnen diese unabhängig zwischen 4,5 - 5,0 m bestätigten.

Wie schon in Kapitel 4.2.4 erwähnt, lassen sich die Profile in mehrere Bereiche unterteilen. Während der Bereich außerhalb der Sanierungszone (Profile nor00, nor10, nor50, nor60, nor70) Widerstände bis zu 7700  $\Omega$ -m in einem Tiefenbereich zwischen 3 - 5 m anzeigt, sind die Widerstände innerhalb der Sanierungszone (Profile nor20, nor32, nor43) in dieser Tiefe deutlich geringer, welches vermutlich auf den Bodenaustausch zurückzuführen ist. Trotz einen relativ hohen Kohlenwasserstoffmesswertes in Profil nor32 zeigt sich dort aber keine

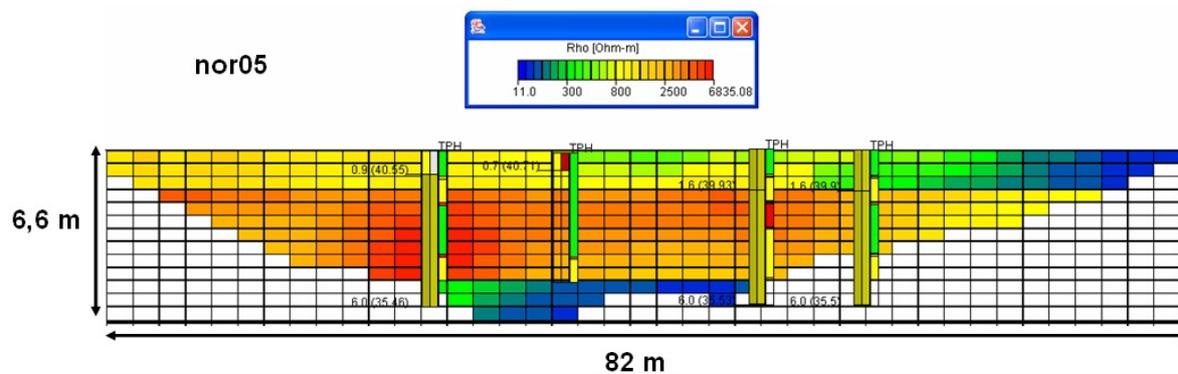
Anomalie in den Messwerten.

Weiterhin zeigen alle Profile, insbesondere durch Vergleich der Profile nq30 und nq70, dass allgemein geringere Widerstände im östlichen Teil des Gebietes vorliegen als im westlichen Teil. Dieses wird teilweise auf tonige Anteile an der Oberfläche zurückgeführt, zum anderen durch einen Abfall der hohen Widerständen zwischen 3 - 5 m entlang der Profile in Richtung Osten. Der Grund dafür kann jedoch nicht aus den vorliegenden Informationen (Geologie, Chemie) ermittelt werden.

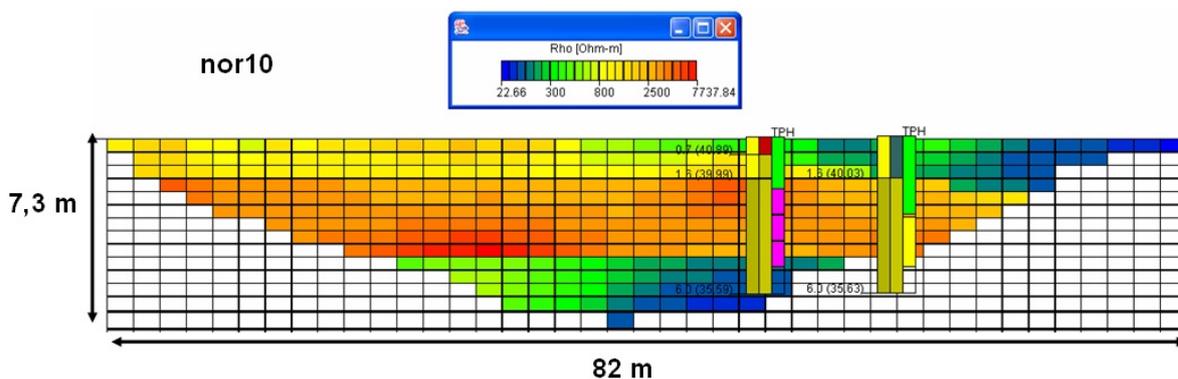
Das Referenzprofil nott0 in Abbildung A.12 zeigt ein ähnliches Verhalten wie z.B. die Profile nor50, nor60 oder nor70. Dabei ist auffällig, dass ähnlich dem Profil nor10 eine Zone lokal erhöhter Widerstände mit ca. 3500  $\Omega$ -m im dritten Meter im zentralen Bereich des Profils sichtbar ist, weiterhin deutlich erhöhte Widerstände nahe der Oberfläche am rechten Rand des Profils. Da auf diesem Profil weder Bohrungen noch chemische Untersuchungen getätigt wurden, kann nicht festgestellt werden, ob diese erhöhten Widerstände mit erhöhten Kohlenwasserstoff-Konzentrationen korrelieren.



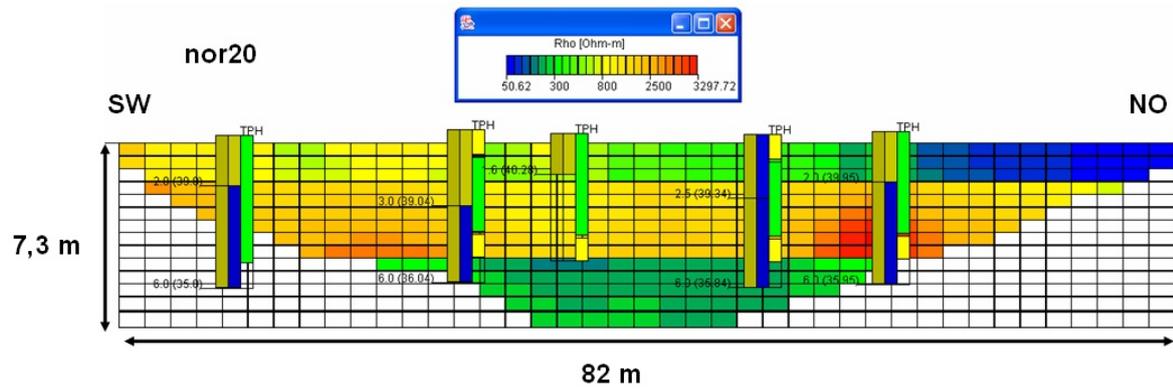
**Abbildung A.1:** Widerstandsmodell des Profils nor00 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 6.0%.



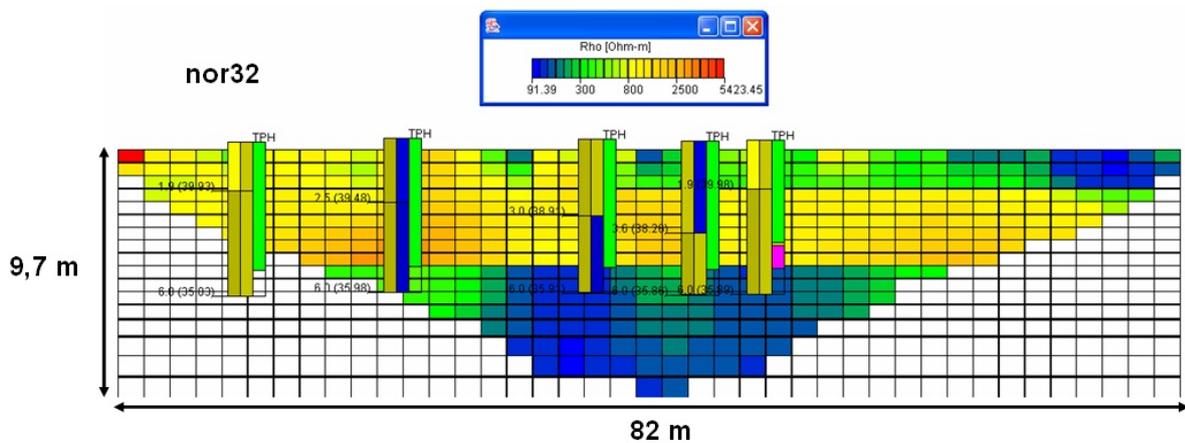
**Abbildung A.2:** Widerstandsmodell des Profils nor05 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 6.0%.



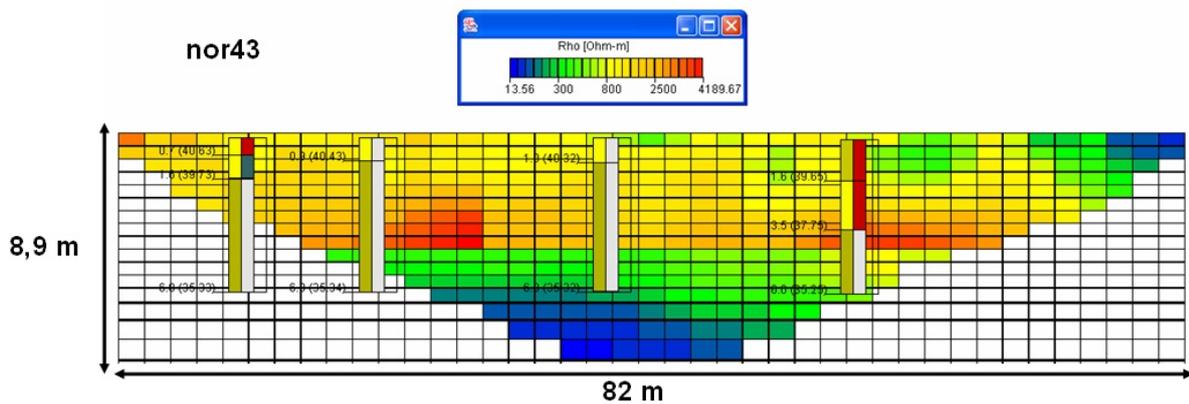
**Abbildung A.3:** Widerstandsmodell des Profils nor10 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 7.2%.



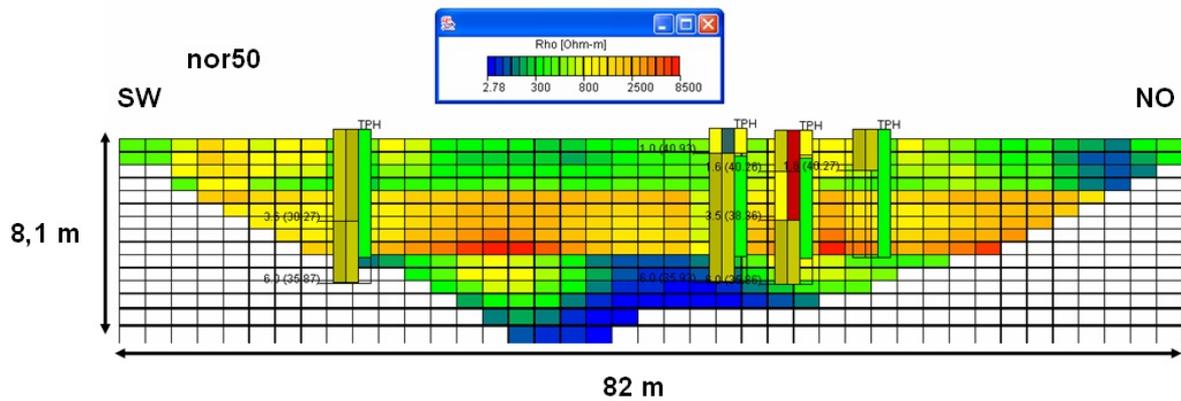
**Abbildung A.4:** Widerstandsmodell des Profils nor20 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 4.2%.



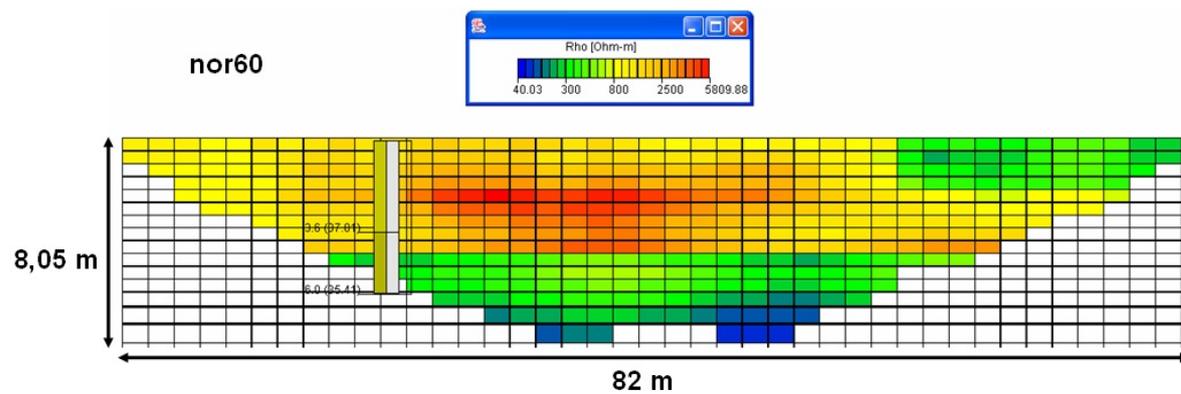
**Abbildung A.5:** Widerstandsmodell des Profils nor32 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 6.2%.



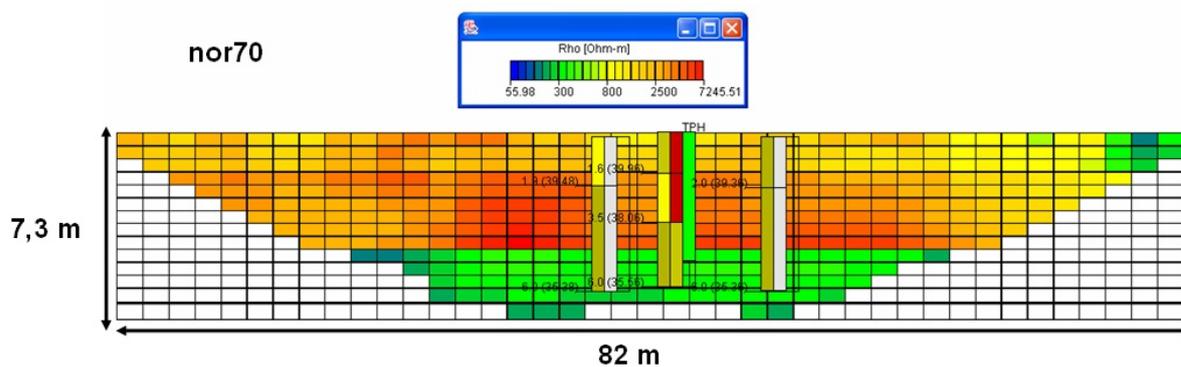
**Abbildung A.6:** Widerstandsmodell des Profils nor43 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 5.4%.



**Abbildung A.7:** Widerstandsmodell des Profils nor50 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 7.8%.



**Abbildung A.8:** Widerstandsmodell des Profils nor60 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 7.3%.



**Abbildung A.9:** Widerstandsmodell des Profils nor70 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 6.7%.

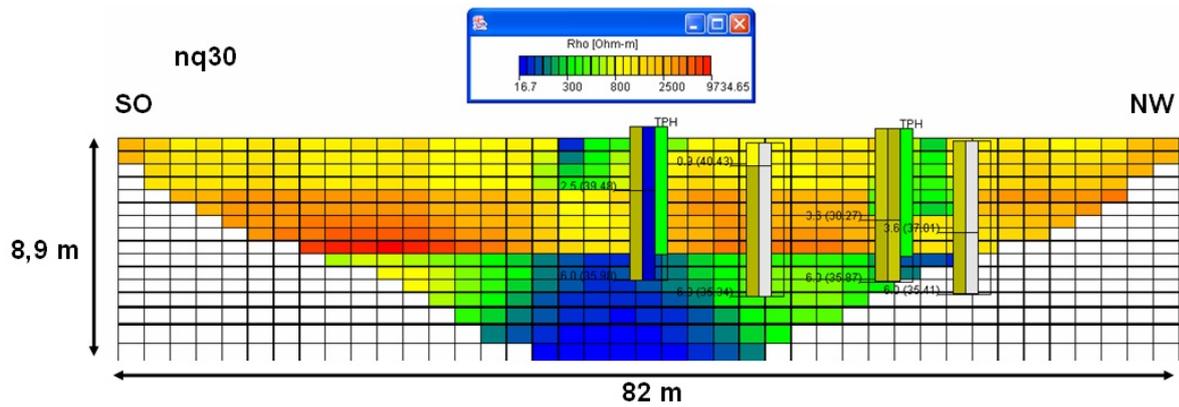


Abbildung A.10: Widerstandsmodell des Profils nq30 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 5.4%.

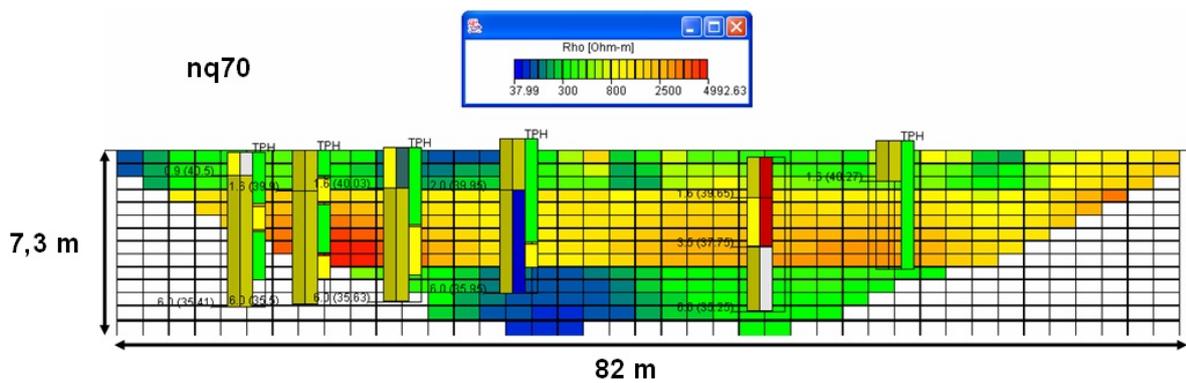


Abbildung A.11: Widerstandsmodell des Profils nq70 nach Benutzung eines Startmodells anhand von 1D-Inversionsergebnissen. Der RMS-Fehler beträgt 6.1%.

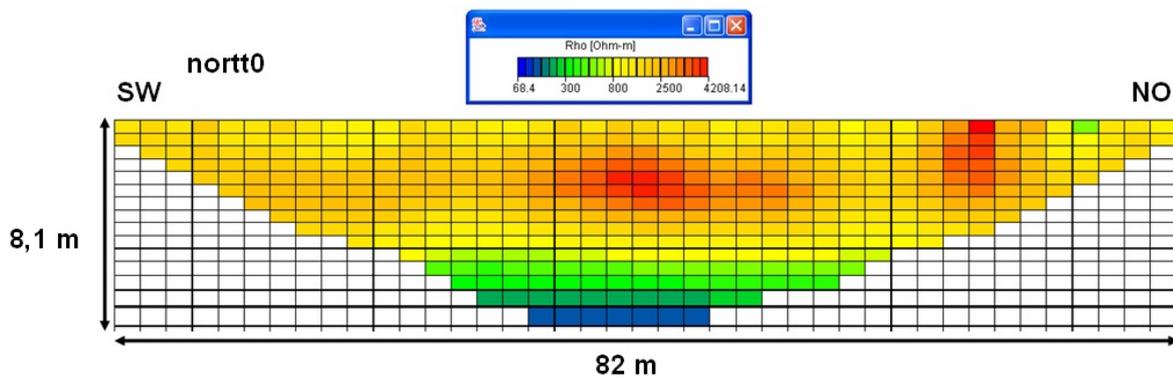


Abbildung A.12: Referenzprofil nott0. Der RMS-Fehler beträgt 8.0%.

---

## ERGEBNISSE DER TESTFLÄCHE MASSA / ITALIEN

---

### **Finale Widerstandsergebnisse**

Wie im Abschnitt 4.3.5 erläutert wurden für die Widerstandsprofile der Testfläche Massa an ausgesuchten Positionen 1D-Inversionen durchgeführt, welche mit nahegelegenen Bohrlokalationen zusammen fallen. Daraus wurden jeweils 2D-Startmodelle für die Inversionen der Messdaten erzeugt, um so den Einfluss des durch alle Profile verlaufenden Metallrohres zu reduzieren. Dabei war darauf zu achten, dass diese Lokationen sich nach Möglichkeit relativ weit von der Position des Rohres befinden, um ungestörte Daten zu erhalten. Lokationen nahe des Rohres (d.h. in einem Abstand  $\leq 20$  m) wurden eher für eine oberflächennahe Bestimmung der Parameter Mächtigkeit und Widerstand verwendet, solche mit zunehmender Entfernung dann für Aussagen auch in größeren Tiefen. Der gestörte Einflussbereich des Rohres wurde in Abschnitt 4.3.4 untersucht.

Durch Benutzung unterschiedlicher Messraster der Geophysik und der Chemie / Geologie wurde eine Kalibrierung der 1D-Ergebnisse erschwert, da sich die Bohrungen teilweise in mehreren Metern Entfernung befinden und daher nicht immer gewährleistet werden kann, dass die Lithologie der Bohrung mit der Position innerhalb des Profils genau übereinstimmt. Pro Profil wurden drei - fünf Bohrlokalationen zur Erzeugung eines Startmodells genommen.

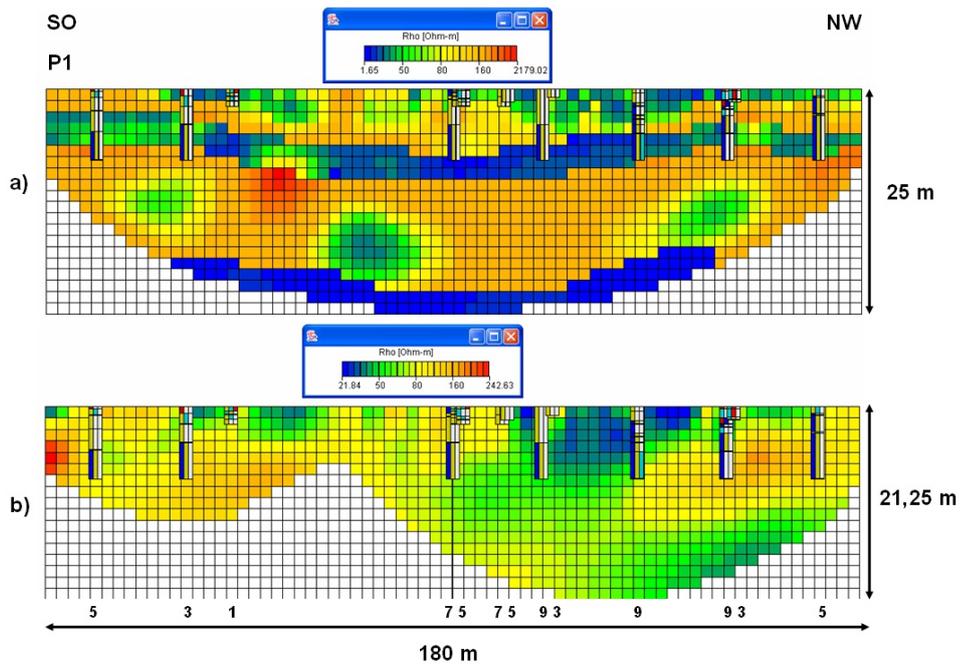
Eine weitere Modellierungsmöglichkeit besteht in der Reduzierung der gestörten Daten, wie sie in Kapitel 4.3.5 durchgeführt wurde. Dazu wurden die Datenpunkte entfernt, welche den Einfluss des Metallrohres in einem homogenen Halbraum widerspiegeln.

Die Ergebnisse der Inversionen unter Verwendung beider Methoden mit einer Überdeckung  $\geq 0,2$  sind in den Abbildungen B.1 - B.5 unter a) (Benutzung von Startmodellen aus 1D-

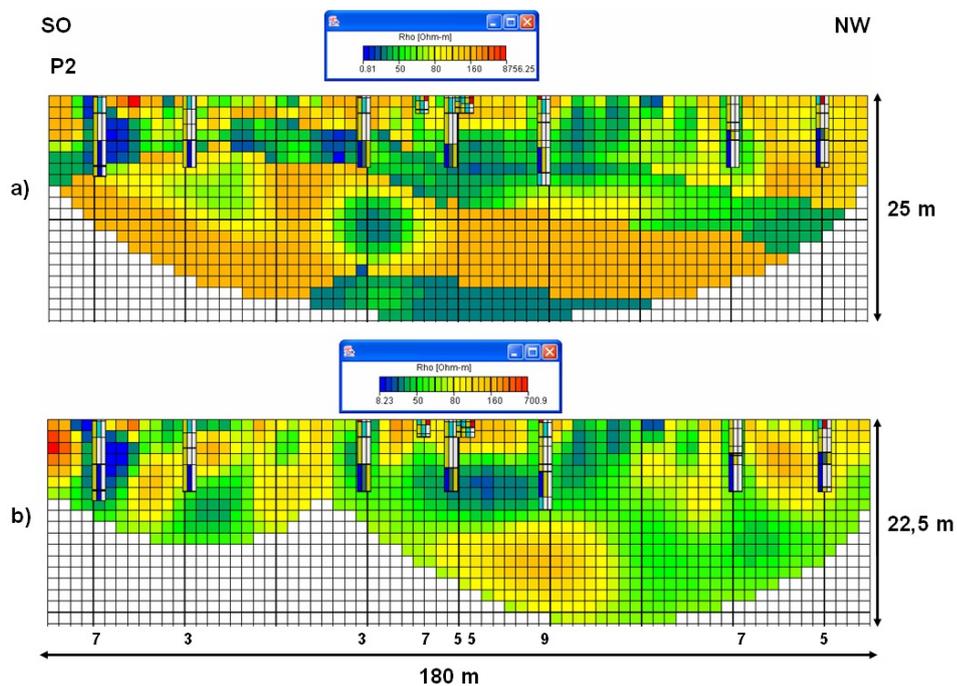
Inversionsergebnissen) bzw. b) (Datenreduzierung) dargestellt. Ein direkter Vergleich der Profile untereinander zeigt deutlich die Auswirkungen eines geschichteten Startmodells auf die Daten. Aufgrund der abnehmenden Sensitivität mit zunehmender Tiefe ist ein geschichtetes Startmodell ab 10 - 15 m Tiefe recht dominant, sodass sich das Startmodell zunehmend gegenüber den Daten durchsetzt. In dem Tiefenbereich zwischen ca. 10 - 20 m treten Strukturen hervor, die sich vom Startmodell unterscheiden. Liegen diese in den Randbereichen, so passt das Modell ungestörte Daten an, treten diese aber in der Umgebung des Rohres auf, sind dies Auswirkungen des Metallrohres, welche zwar in ihrer räumlichen Ausdehnung im Gegensatz zu einem homogenem Startmodell verkleinert, aber nicht eliminiert werden konnten. Trotz der Verwendung von angepassten Startmodellen können die Inversionsergebnisse keine gesicherte Aussage bzgl. einer möglichen Verbindung zwischen 1. und 2. Aquifer treffen.

Die Profile mit reduzierten Datensätzen können nur für den nordwestlichen Teil Aussagen über den zweiten Aquifer liefern, da nur für diesen Bereich die entsprechenden Auslagenlängen und damit geforderten Eindringtiefen erreicht werden.

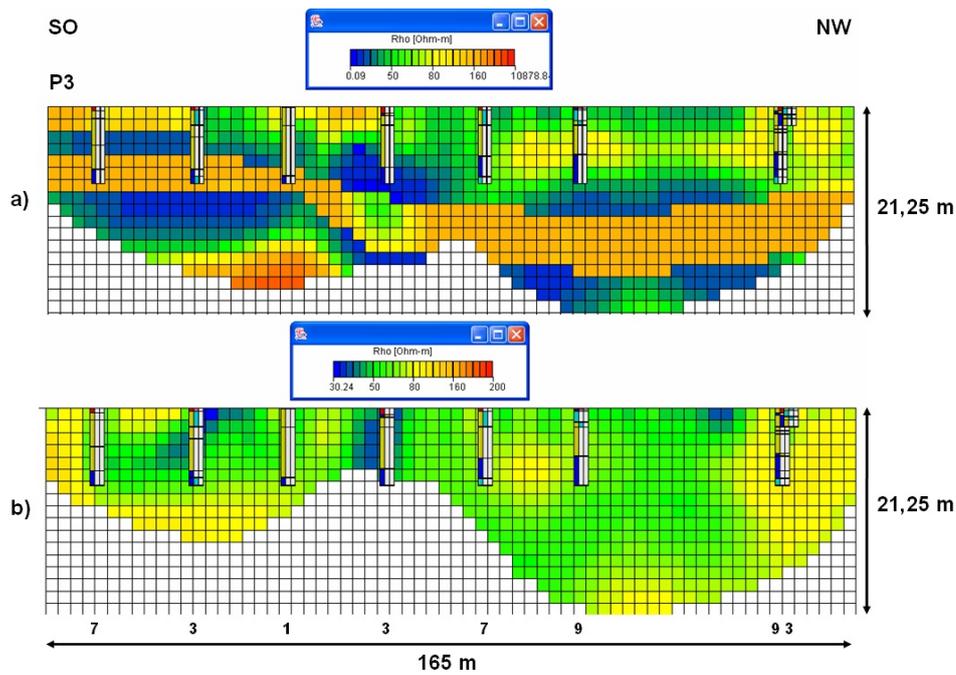
Die Profile 3 und 5 zeigen für den diesen Bereich erhöhter Widerstände im Bereich von 90  $\Omega$ -m, welche sich bis in rund 15 - 20 m Tiefe erstrecken und so auf eine Verbindung zwischen den zwei Aquiferen deuten. Der Bereich um die Tiefbohrung in Profil 5 zeigt aber wieder eine Abtrennung von höheren zu geringeren Widerständen ab 8 m, sodass auch für die erwähnten erhöhten Widerstände eine fehlende, zumindest aber nur gerinmächtige Tonschicht als Basis des oberen Aquifers vermutet wird. Der massive abfallende gute Leiter nahe der ehemaligen Rohrposition geht auf Glättungsbedingungen des Inversionsalgorithmus und nicht auf Rohdaten zurück.



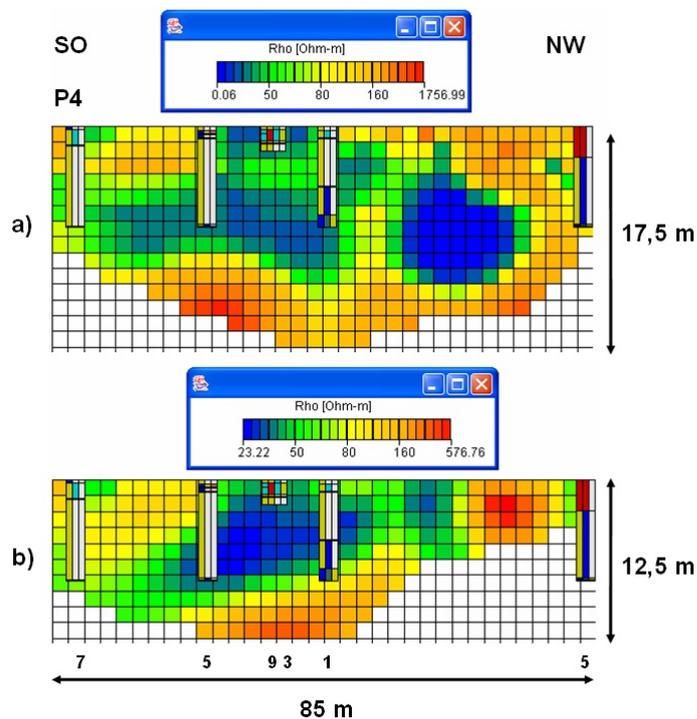
**Abbildung B.1:** Widerstandsprofil P1 als Inversionsergebnis a) durch Benutzung eines von 1D-Inversionsergebnissen erstellten Startmodells und b) durch Herausnahme von Datenpunkten, die durch das Metallrohr beeinflusst wurden. Die RMS-Fehler betragen 5,3% bzw. 4,7%.



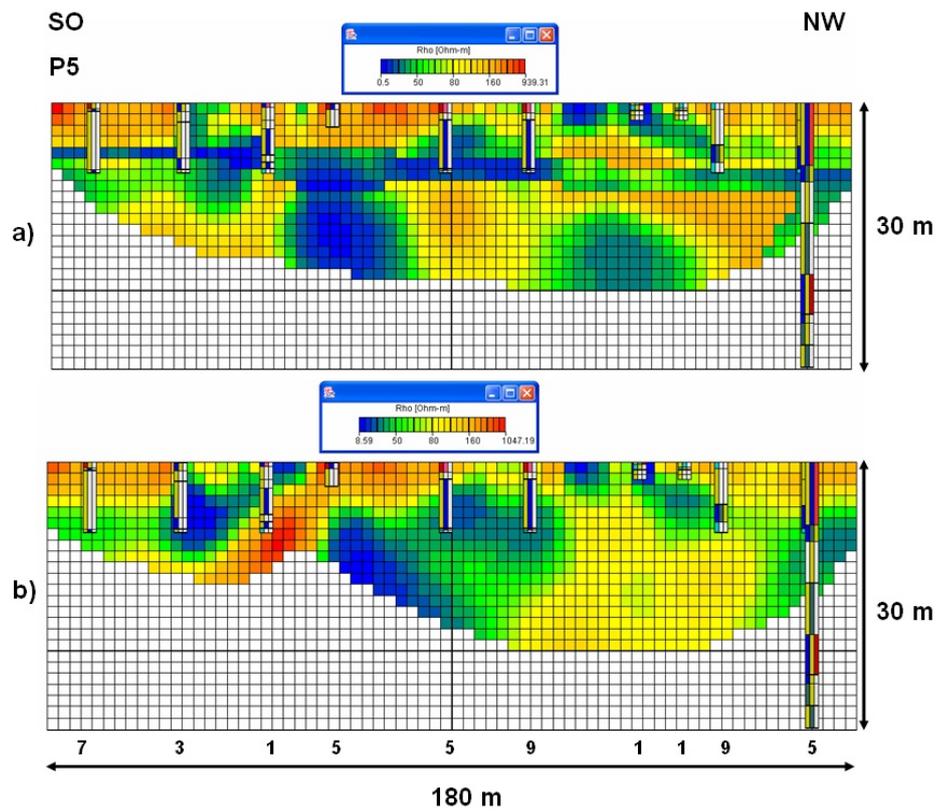
**Abbildung B.2:** Widerstandsprofil P2 als Inversionsergebnis a) durch Benutzung eines von 1D-Inversionsergebnissen erstellten Startmodells und b) durch Herausnahme von Datenpunkten, die durch das Metallrohr beeinflusst wurden. Die RMS-Fehler betragen 9,9% bzw. 5,7%.



**Abbildung B.3:** Widerstandsprofil P3 als Inversionsergebnis a) durch Benutzung eines von 1D-Inversionsergebnissen erstellten Startmodells und b) durch Herausnahme von Datenpunkten, die durch das Metallrohr beeinflusst wurden. Die RMS-Fehler betragen 5,3% bzw. 4,2%.



**Abbildung B.4:** Widerstandsprofil P4 als Inversionsergebnis a) durch Benutzung eines von 1D-Inversionsergebnissen erstellten Startmodells und b) durch Herausnahme von Datenpunkten, die durch das Metallrohr beeinflusst wurden. Die RMS-Fehler betragen 28,6% bzw. 6,3%.

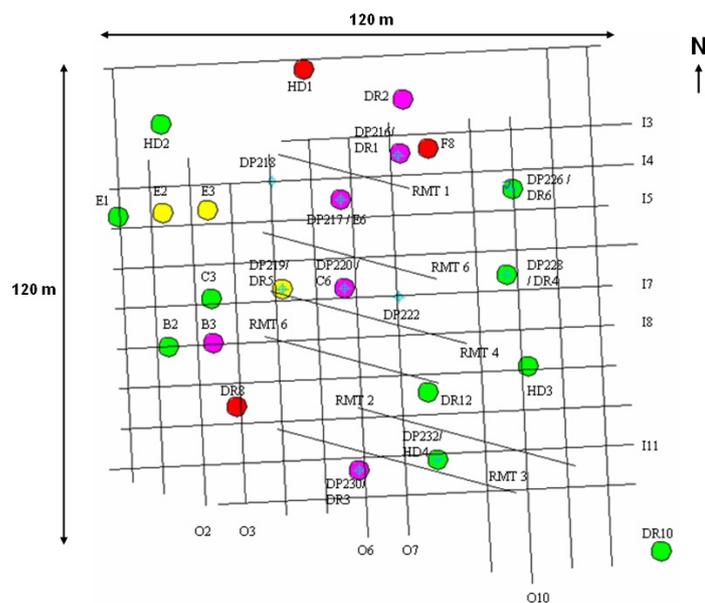


**Abbildung B.5:** Widerstandsprofil P5 als Inversionsergebnis a) durch Benutzung eines von 1D-Inversionsergebnissen erstellten Startmodells und b) durch Herausnahme von Datenpunkten, die durch das Metallrohr beeinflusst wurden. Die RMS-Fehler betragen 10,6% bzw. 16,5%.



## ERGEBNISSE DER TESTFLÄCHE BALASSAGYARMAT/UNGARN

Zur Übersicht über alle modellierten Profile zeigt Abbildung C.1 die Lage aller Geoelektrik- und RMT-Profile, sowie die Position von Bohrungen und Direct-Push-Sondierungen. Positionen, die nur Direct-Push-Sondierungen markieren (dies sind DP218 und DP 222), sind durch kleine blaue Kreuze mit umschließenden Kreis dargestellt. Die unterschiedlichen Methoden sind in den folgenden Abschnitten einzeln aufgeführt.



**Abbildung C.1:** Kartierungsansicht des GSI3D: Übersicht über die Lage aller Profile, Sondierungen und Bohrungen. Die Bezeichnungen lauten: Geoelektrik: 'Ixy' und 'Oxy'; RMT: RMTx; Direct-Push: DPxyz; die restlichen Bezeichnungen stehen für Bohrungen.

## Widerstandsergebnisse

Die Ergebnisse der Remodellierung der Geoelektrik-Daten werden in diesem Abschnitt zusammengefasst. Wegen der teilweisen hohen Informationsdichte durch die auf die Profile projizierten Bohrungen wurden mögliche Direct-Push-Sondierungen nur in ihrer Position und Entfernung unterhalb des Profils angegeben und können in Abschnitt C detailliert im Vergleich zur Geoelektrik und RMT betrachtet werden. Die gezeigte Überdeckung der Geoelektrik-Profile beträgt 0,2. Die Entfernungen zu den Bohrungen sind über den Profilen in Metern angegeben. Kleine Verstärkte in der Höhe der Bohrungen resultieren daraus, dass die Höhenlage der Geoelektrik-Profile jeweils konstant ist, während die Bohrungen mit ihren eigenen Höhenwerten auf die Profile projiziert werden.

Allgemein lässt sich sagen, dass in allen Profilen linsenartige gut leitenden Strukturen (Tone und Schluffe) in Höhe des Grundwasserspiegels um ca. 4,5 m auftauchen und eher isoliert als zusammenhängend erscheinen. Dieses kann einerseits durch die Rinnenstruktur bedingt sein, andererseits aber auch die notwendige Reduzierung der Daten in den Profilen, um akzeptable RMS-Fehler zu erhalten. Wie schon in Kapitel 4.4.4 erwähnt zeigen geringmächtige ( $\leq 1\text{m}$ ) Toneinlagerungen kaum Auswirkungen auf die Widerstände, während Einlagerungen größerer Mächtigkeit sich in erhöhten Leitfähigkeiten auswirken. Bei rein sandigen Anteilen oder Auffüllungen ergeben sich meist Widerstände  $\geq 80 \Omega\text{-m}$ , bei den tonigen - schluffigen Anteilen Widerstände  $\leq 40 \Omega\text{-m}$ .

Bei allen in Grundwasserspiegelhöhe gefundenen Kohlenwasserstoff-Kontaminationen wurden diese in Tonen / Schluffen nachgewiesen.

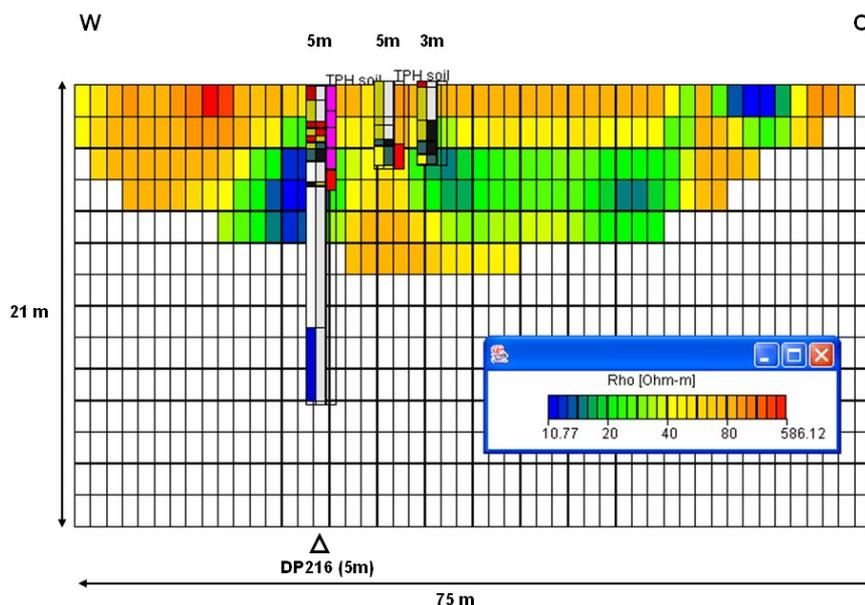


Abbildung C.2: Geoelektrik-Profil I03. RMS-Fehler: 6,1%

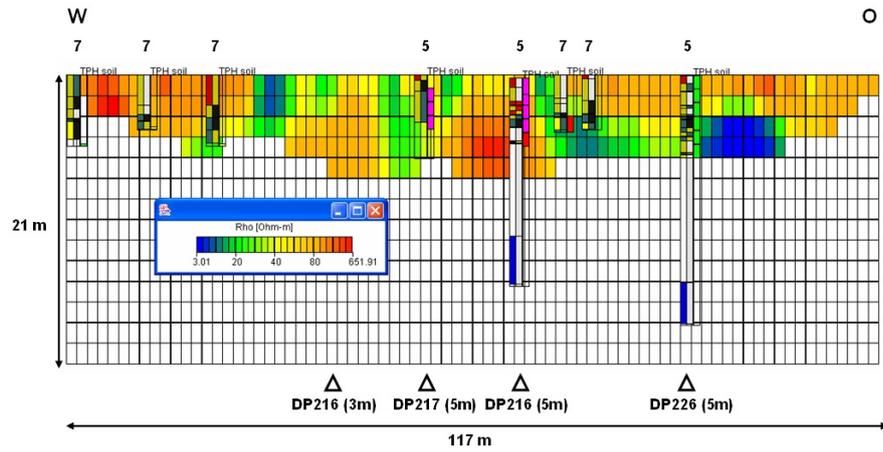


Abbildung C.3: Geoelektrik-Profil I04. RMS-Fehler: 9,0%

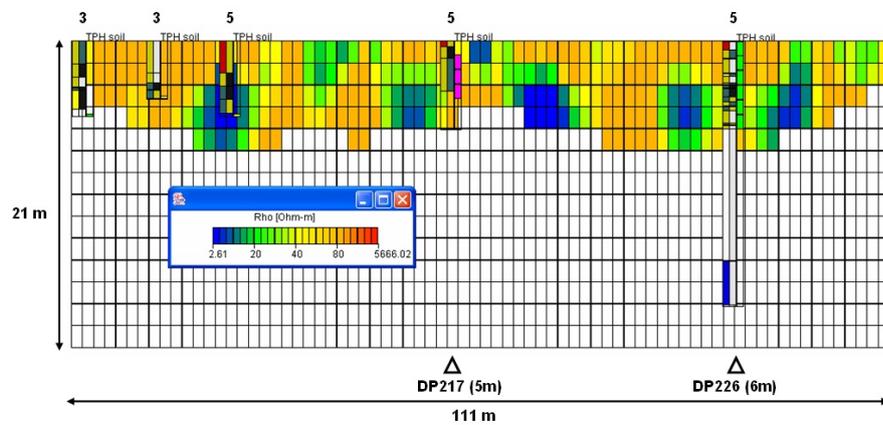


Abbildung C.4: Geoelektrik-Profil I05. RMS-Fehler: 6,7%

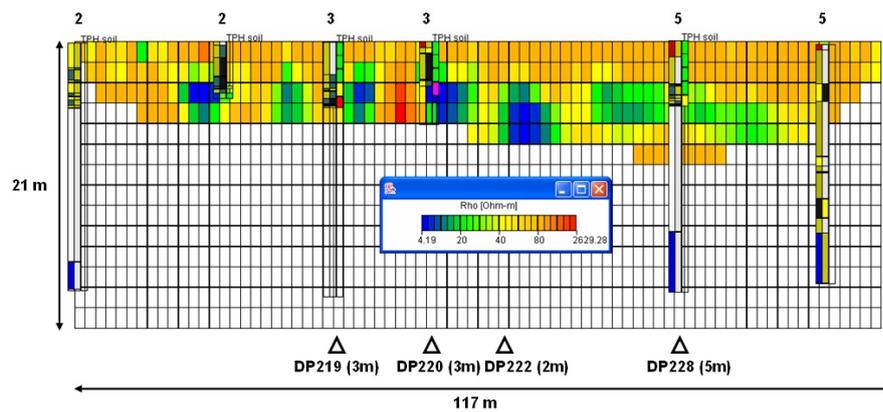


Abbildung C.5: Geoelektrik-Profil I07. RMS-Fehler: 7,7%

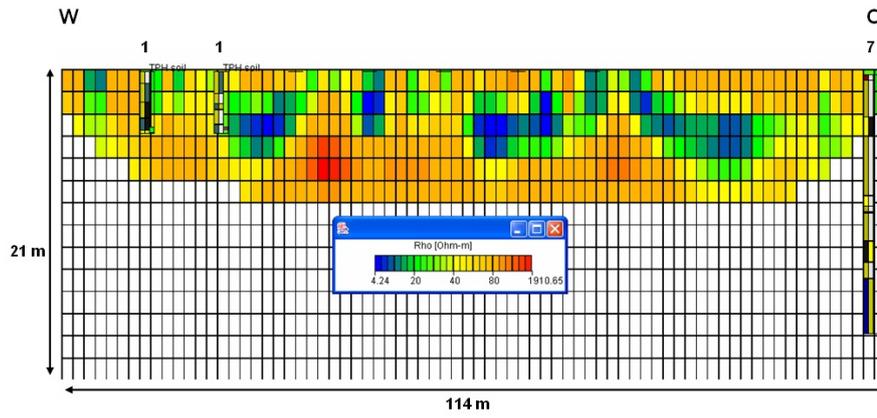


Abbildung C.6: Geoelektrik-Profil I08. RMS-Fehler: 6,9%

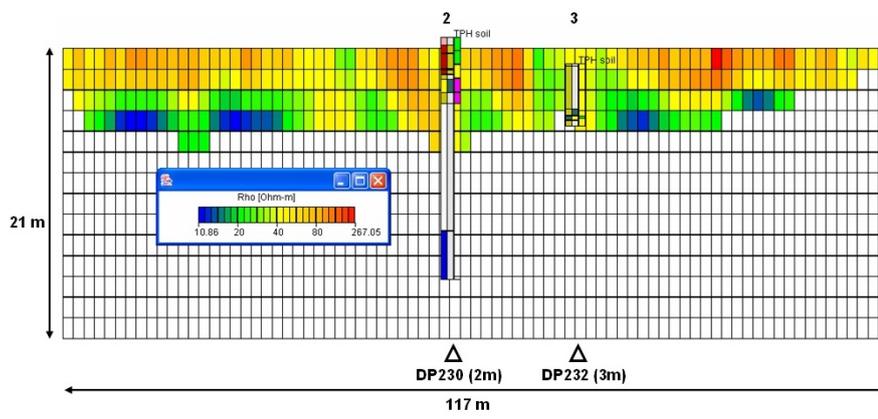


Abbildung C.7: Geoelektrik-Profil I11. RMS-Fehler: 6,9%

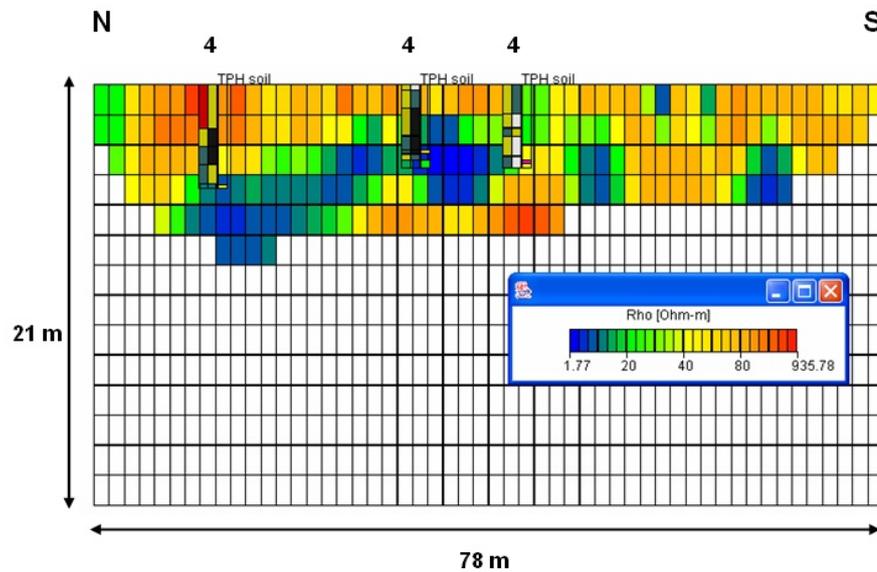


Abbildung C.8: Geoelektrik-Profil O02. RMS-Fehler: 7,0%

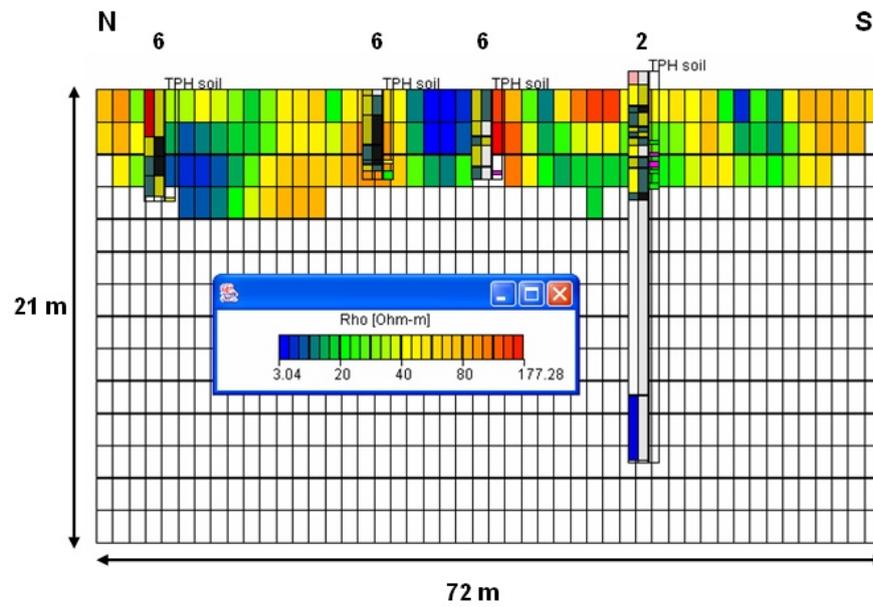


Abbildung C.9: Geoelektrik-Profil O03. RMS-Fehler: 8,9%

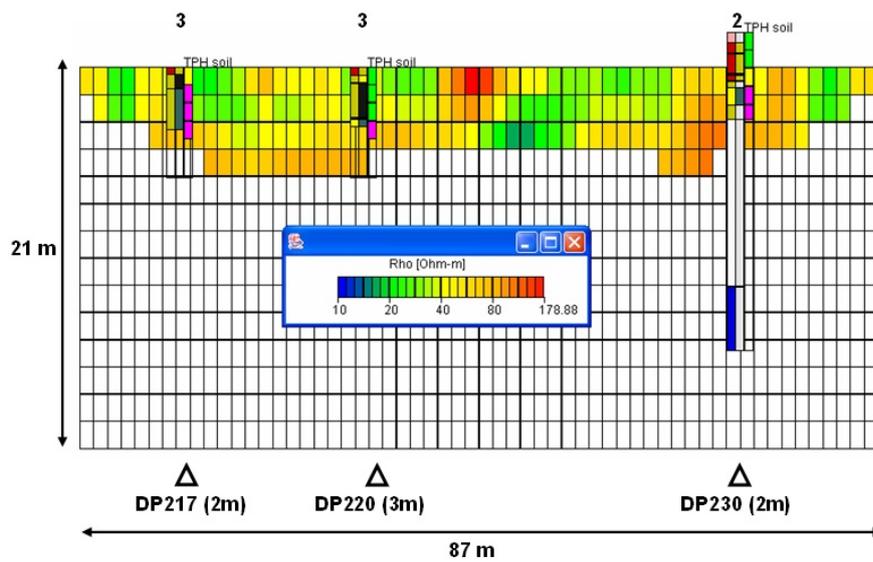


Abbildung C.10: Geoelektrik-Profil O06. RMS-Fehler: 6,1%

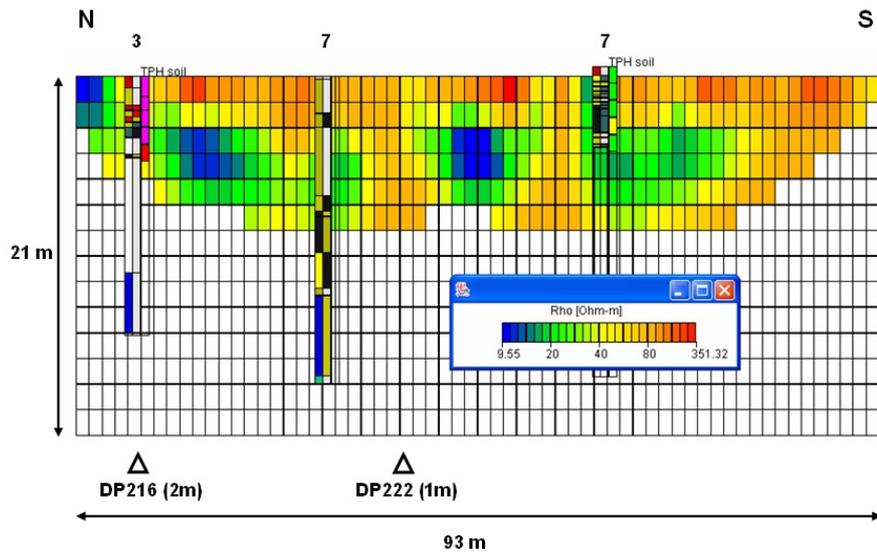


Abbildung C.11: Geoelektrik-Profil O07. RMS-Fehler: 6,3%

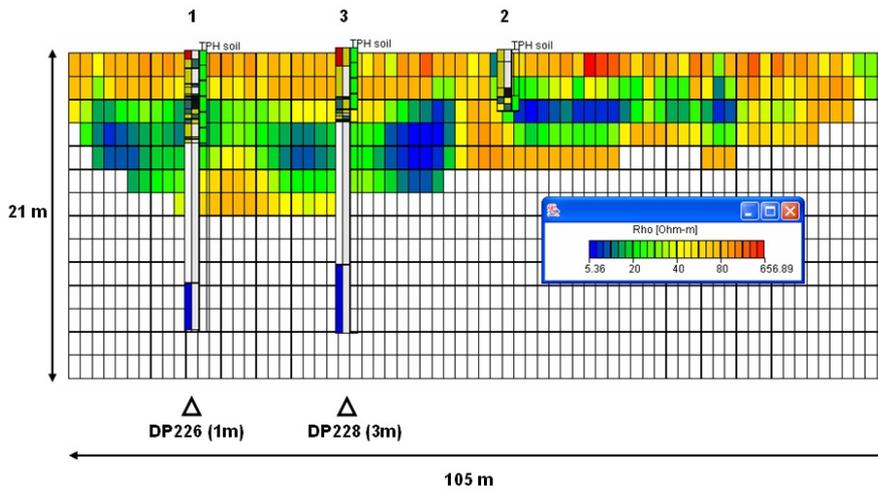


Abbildung C.12: Geoelektrik-Profil O10. RMS-Fehler: 7,1%

## RMT-Ergebnisse

Die Ergebnisse der von der Universität zu Köln durchgeführten RMT-Messungen werden in diesem Abschnitt gezeigt. Die Messstationen sind oberhalb des Profils durch auf der Spitze stehende Dreiecke markiert, der Messpunktabstand beträgt 5 m. Ebenso wie bei der Geoelektrik sind die Positionen und Entfernungen der Direct-Push-Sondierungen aus Gründen der Übersichtlichkeit unterhalb des Profils angegeben und können in Abschnitt C detailliert betrachtet werden.

Die Profile können in zwei Klassen eingeteilt werden. Klasse 1 (Profile RMT1, RMT4, RMT5 und RMT6) gibt ähnlich der Geoelektrik linsenförmige gute Leiter mit Widerständen um 10 - 20  $\Omega$ -m in einer Tiefe von 3 - 12 m wieder. Darunter werden Widerstände zwischen 30 - 70  $\Omega$ -m angetroffen, wobei davon die höheren Widerstände nur an den Profilrändern vorkommen (vergl. Profile RMT1, RMT4 und RMT5).

Die Profile RMT2 und RMT3 gehören zu der zweiten Klasse. Diese besitzt großräumige gute Leiter, die sich ab dem Grundwasserspiegel in rund 4,5 m Tiefe bis auf 20 m und darunter erstrecken. Die synthetischen Berechnungen in Abschnitt C zeigen, dass Tone in Tiefen um 20 m nicht mehr erkannt werden und daher die Strukturen aus den Glättungsbedingungen des Inversionsalgorithmus herrühren.

Oberhalb des Grundwassers korrelieren sandige Bereiche und Auffüllungen mit Widerständen  $\geq 60 \Omega$ -m, wobei größere tonig-schluffige Anteile in den Bohrungen zu einer Verringerung der Widerstände führen können. In den Profile RMT1, RMT2 und RMT5 werden auch direkt an der Oberfläche kleine gut leitende Bereiche angezeigt, wobei diese Positionen keine Bohrungen oder Direct-Push-Messungen enthalten und so keinen näheren Aufschluss über die Geologie geben können.

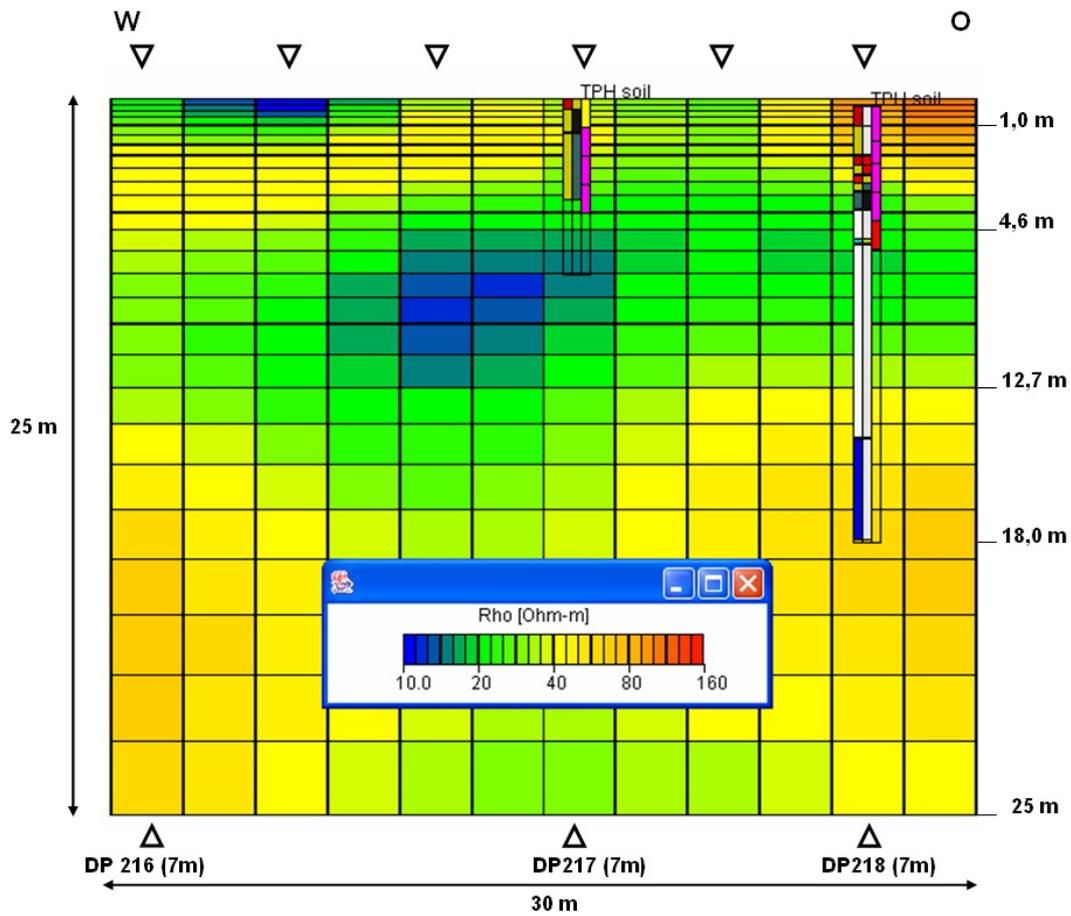


Abbildung C.13: RMT-Profil RMT1. RMS-Fehler: 1,0%

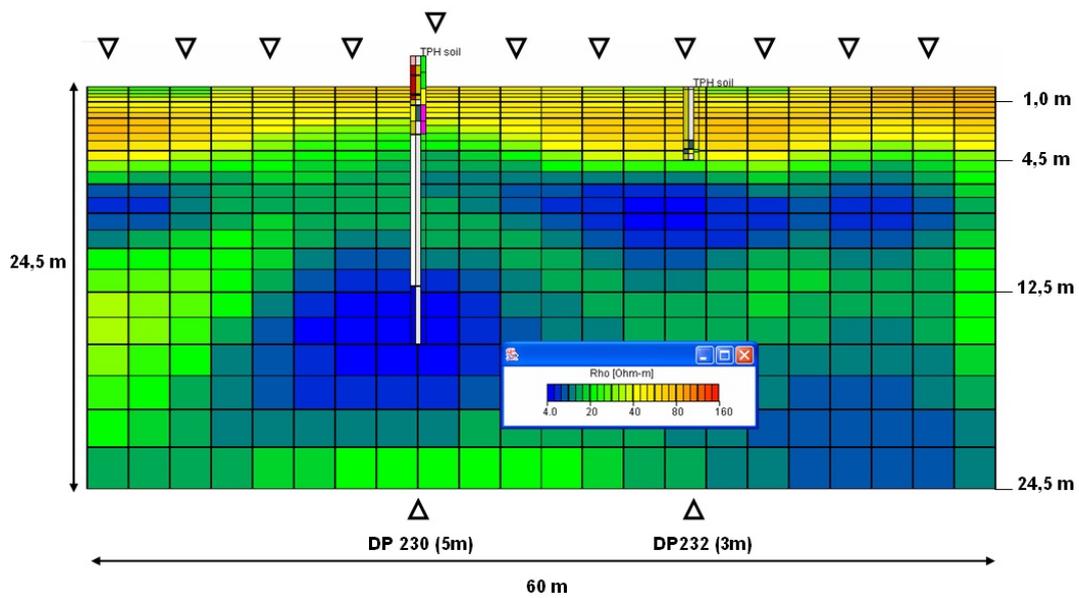


Abbildung C.14: RMT-Profil RMT2. RMS-Fehler: 1,0%

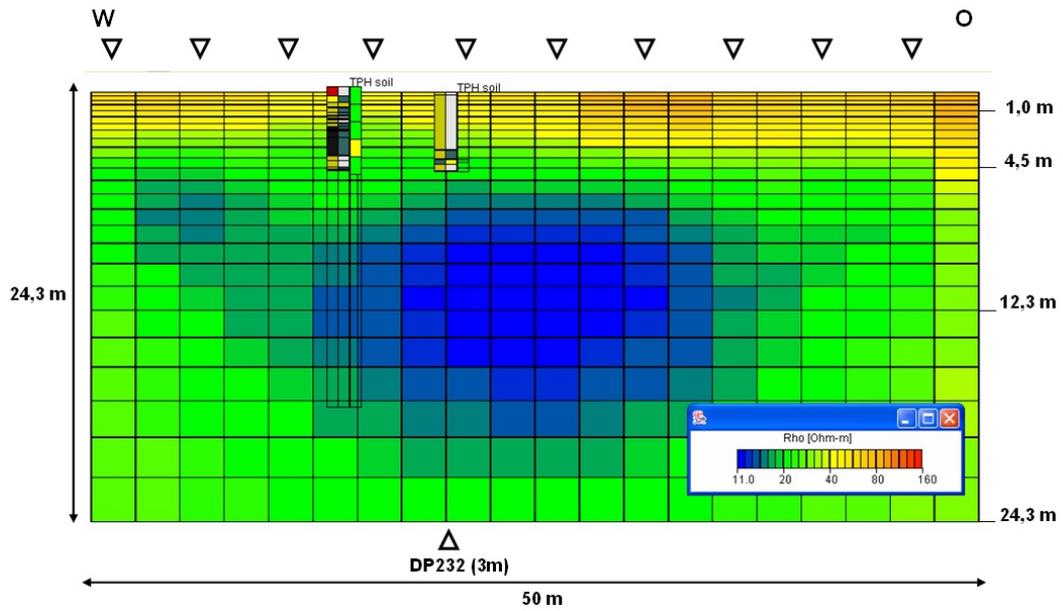


Abbildung C.15: RMT-Profil RMT3. RMS-Fehler: 1,0%

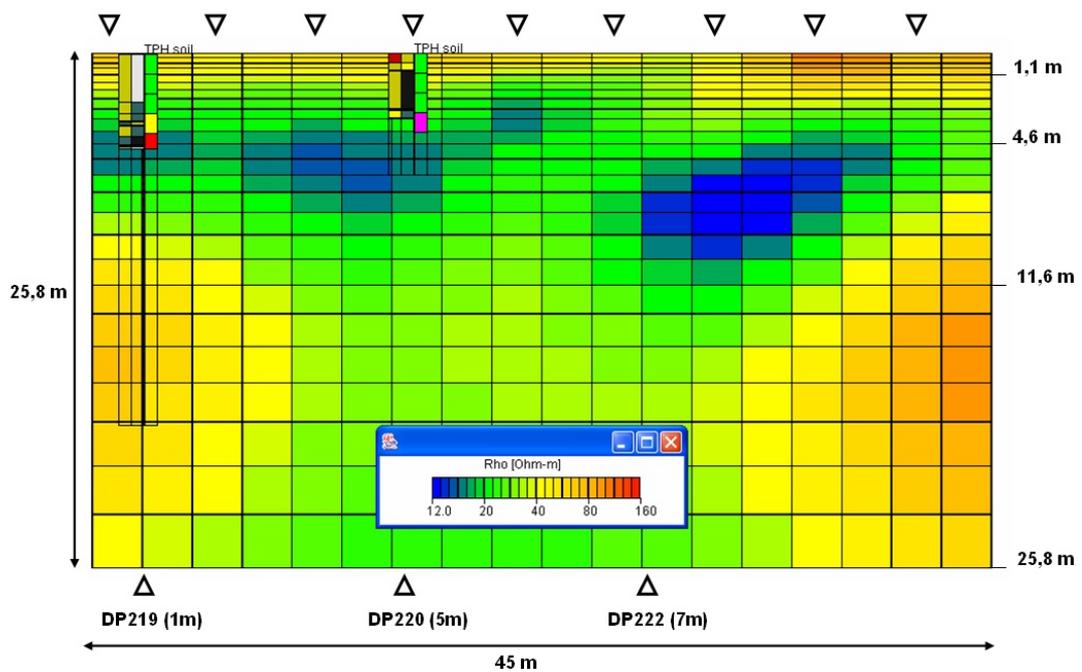


Abbildung C.16: RMT-Profil RMT4. RMS-Fehler: 1,0%

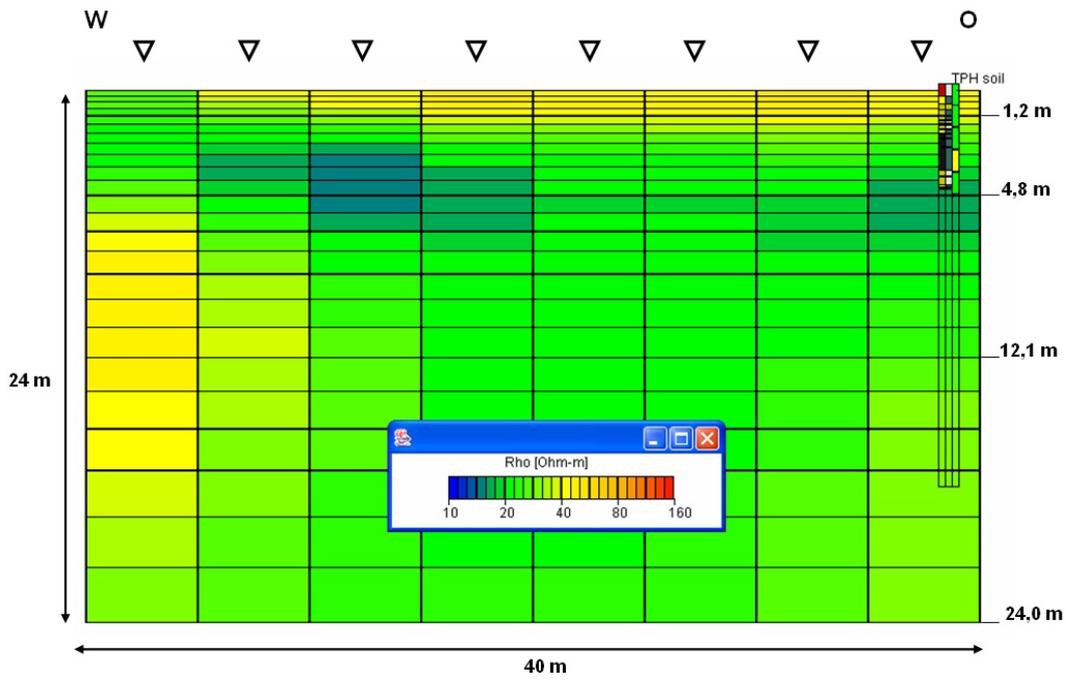


Abbildung C.17: RMT-Profil RMT5. RMS-Fehler: 1,0%

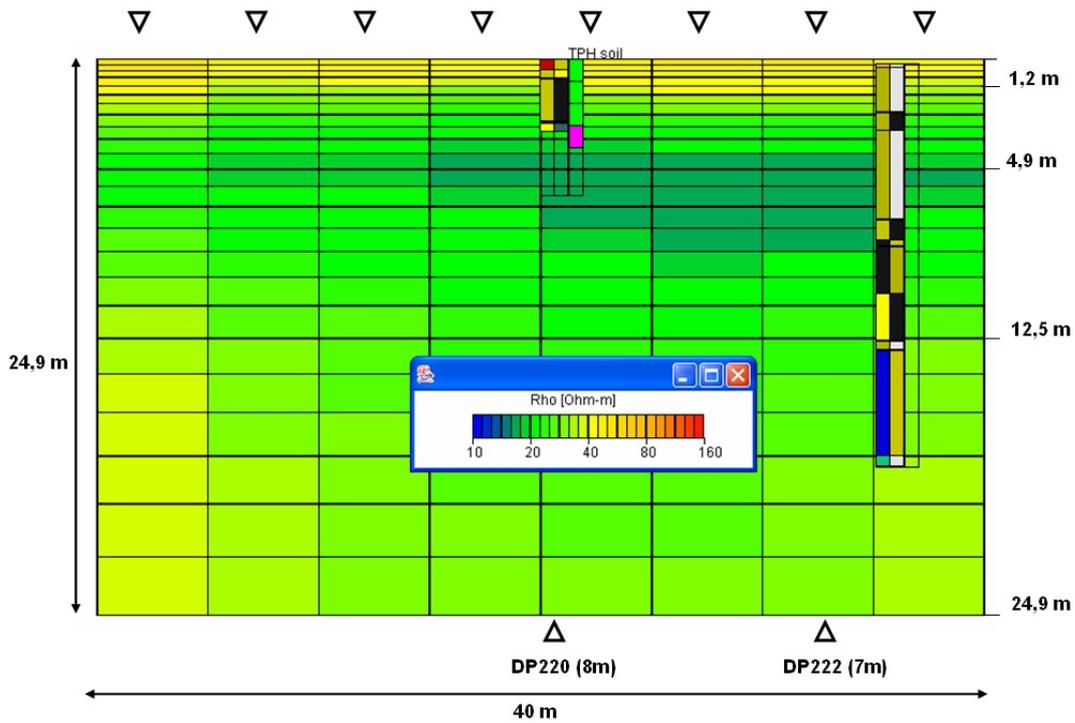


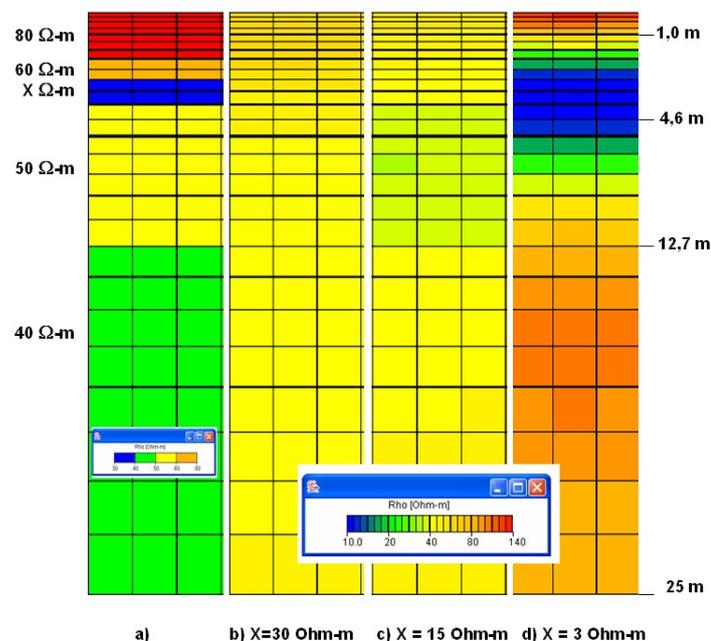
Abbildung C.18: RMT-Profil RMT6. RMS-Fehler: 1,0%

## Synthetische RMT-Modellierungen

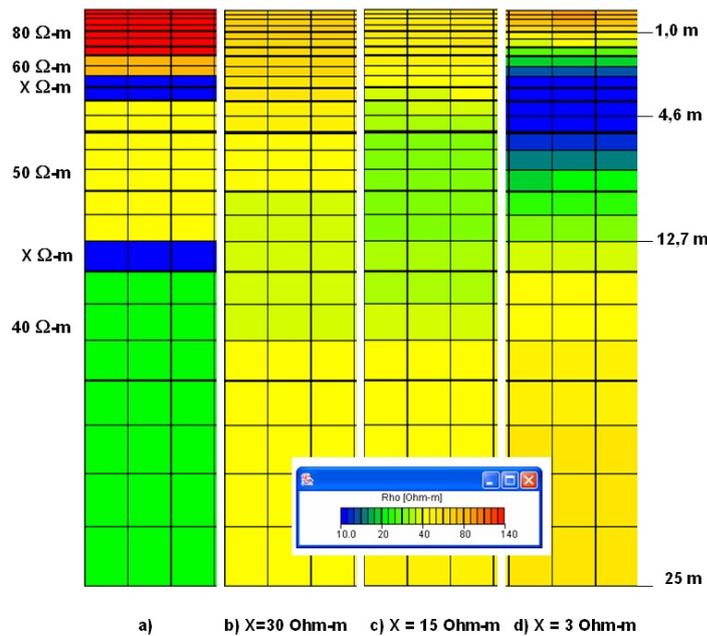
Um die Güte der RMT-Ergebnisse unter der in Kapitel 4.4.1 angenommenen Geologie abzuschätzen, wurden verschiedene synthetische 1D-Untergrundmodelle unter Berücksichtigung der Geoelektrik- und Direct-Push-Ergebnisse und der bekannten Geologie erstellt. Um den Einfluss der Ton-Schluff-Mächtigkeit zu berücksichtigen, wurden dafür drei unterschiedliche Widerstände für vorhandenen Tone verwendet: 30  $\Omega\cdot\text{m}$  für jeweils geringe Einlagerungen mit niedrigem Tonanteil in sandiger Umgebung, 15  $\Omega\cdot\text{m}$  für Einlagerungen mit einem höheren Volumenanteil in einer sandigen Matrix und 3  $\Omega\cdot\text{m}$  bei ausschließlicher Anwesenheit von Tonen (vergl. Tabelle 2.2).

Dabei wurden Ton-Schluff-Bereiche mit rund je 1 m Mächtigkeit implementiert: im Bereich des Grundwassers um 4 m Tiefe und zwei Schichten um 9 und 13 m Tiefe (Abbildungen C.19 - C.21). Die vierte Schicht in 18 bzw. 25 m (Abbildungen C.22 und C.23) wurde aufgrund der Ergebnisse der Profile RMT2 und RMT3 (Abbildungen C.14 und C.15) eingeführt, um zu überprüfen, ob tiefliegende gute Leiter noch in den Daten erkannt werden können.

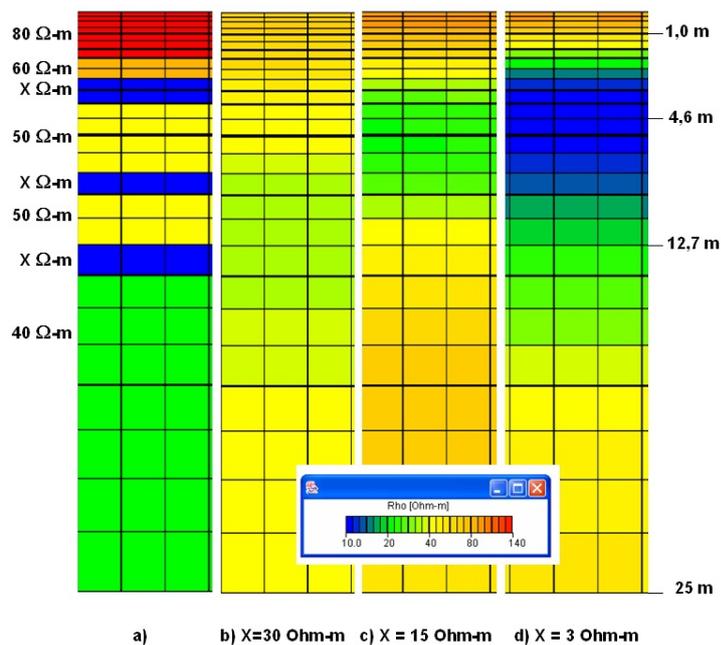
Wegen der nicht-linearen Gitterdiskretisierung wurden die jeweils nächsten Gittergrenzen angenommen. Die Ergebnisse der Inversion haben einen RMS-Fehler von ca. 1 - 2%. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung der oben erwähnten Startmodelle gutleitende Tone schon ab 12 m nur noch schwer erkennbar sind, wenn darüber andere Tone existieren (Abbildungen C.20 und C.21). Tone in 18 m (entspricht ca. 1,5  $z^*$ ; max. Erkundungstiefe) bzw. 25 m werden von den Daten nicht mehr aufgelöst und sind nicht im Modell erkennbar. Daher sind die guten Leiter in den Profilen RMT2 und RMT3 (Abbildungen C.14 und C.15) auf Glättungsbedingungen des Algorithmus zurückzuführen.



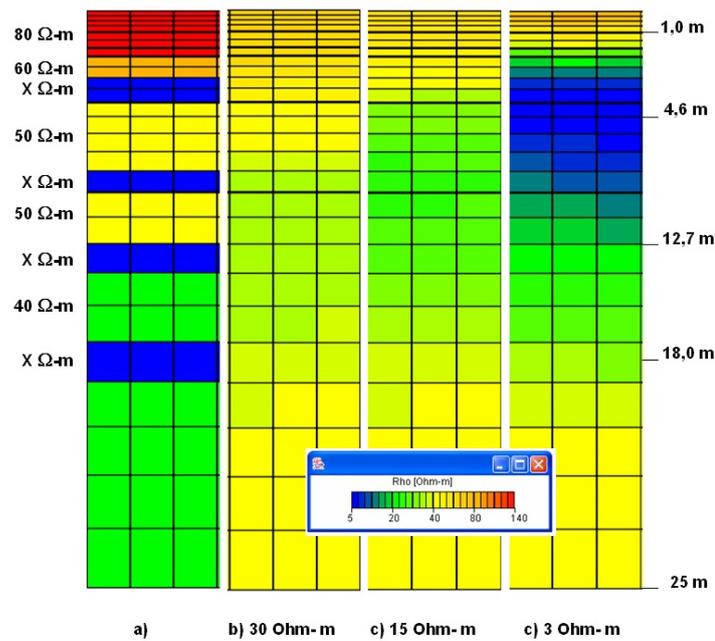
**Abbildung C.19:** Inversionsergebnisse unter Vorgabe eines synthetischen Startmodells mit 1 Tonschicht in a) und anschließender Inversion. Die Tonschichten (Startmodell: blau) wurden mit b) 30  $\Omega\cdot\text{m}$ , mit c) 15  $\Omega\cdot\text{m}$  und d) 3  $\Omega\cdot\text{m}$  belegt.



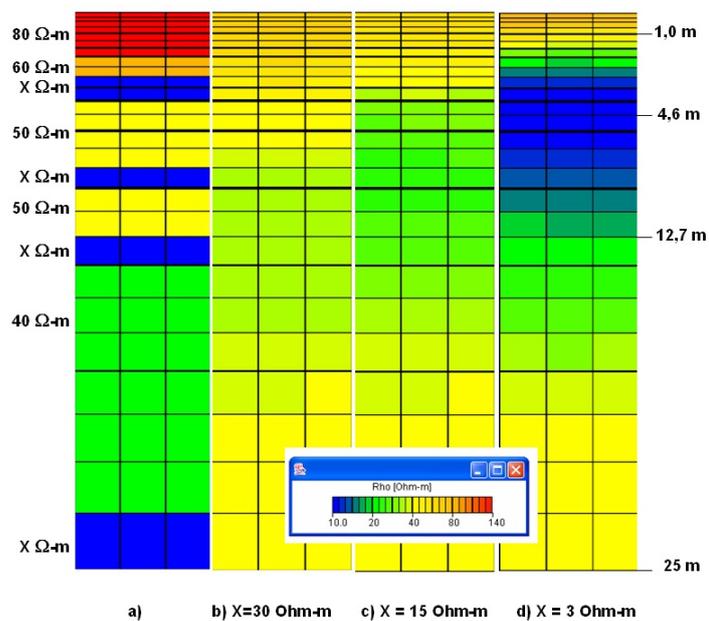
**Abbildung C.20:** Inversionsergebnisse unter Vorgabe eines synthetischen Startmodells mit 2 Tonschichten in a) und anschließender Inversion. Die Tonschichten (Startmodell: blau) wurden mit b) 30  $\Omega\text{-m}$ , mit c) 15  $\Omega\text{-m}$  und d) 3  $\Omega\text{-m}$  belegt.



**Abbildung C.21:** Inversionsergebnisse unter Vorgabe eines synthetischen Startmodells mit 3 Tonschichten in a) und anschließender Inversion. Die Tonschichten (Startmodell: blau) wurden mit b) 30  $\Omega\text{-m}$ , mit c) 15  $\Omega\text{-m}$  und d) 3  $\Omega\text{-m}$  belegt.



**Abbildung C.22:** Inversionsergebnisse unter Vorgabe eines synthetischen Startmodells mit 4 Tonschichten (4. Schicht um 18 m) in a) und anschließender Inversion. Die Tonschichten (Startmodell: blau) wurden mit b) 30  $\Omega$ -m, mit c) 15  $\Omega$ -m und d) 3  $\Omega$ -m belegt.



**Abbildung C.23:** Inversionsergebnisse unter Vorgabe eines synthetischen Startmodells mit 4 Tonschichten (4. Schicht um 25 m) in a) und anschließender Inversion. Die Tonschichten (Startmodell: blau) wurden mit b) 30  $\Omega$ -m, mit c) 15  $\Omega$ -m und d) 3  $\Omega$ -m belegt.

## Direct-Push-Sondierungen

Dieser Abschnitt zeigt eine Übersicht über die von der Universität zu Tübingen gemachten Direct-Push-Sondierungen. Um eine sinnvolle Darstellung als Farbsäule zu ermöglichen wird nur jeder vierte Wert dargestellt (alle 6 statt 1,5 cm), da sonst das Intervall / die Mächtigkeit des Abschnitts zu klein für eine geeignete Wiedergabe der Widerstände in Relation zu den Geoelektrik- und RMT-Sektionen ist. Während normalerweise die Direct-Push-Ergebnisse auf die kompletten Profile projiziert werden, werden hier nur diejenigen x-Abschnitte der Profile gezeigt, die mit den Sondierungen zusammenfallen. Die Entfernung der jeweiligen Sektion zur Sondierung steht im Header der Geoelektrik- bzw. RMT-Sektion in Metern und ist zusätzlich in Tabelle C.1 angegeben. Die Maßeinheit ist darunter angegeben und nicht über der Farbskala. Die genaue Lage von Sondierungen und Profilen kann in Abbildung C.1 nachgeschaut werden. Für die Widerstandswerte der Geoelektrik wurden die reduzierten Datenbestände genommen.

Direct-Push-Sondierung	Profil	Profil	Profil	Profil
DP216	I03 (5m)	I04 (5m)	O07 (2m)	RMT1 (7m)
DP217	I04 (5m)	I05 (5m)	O06 (3m)	RMT1 (7m)
DP218	I04 (3m)	RMT1 (7m)		
DP219	I07 (3m)	RMT4 (1m)		
DP220	I07 (3m)	O06 (3m)	RMT4 (5m)	RMT6 (8m)
DP222	I07 (1m)	O07 (1m)	RMT4 (7m)	
DP226	I04 (5m)	I05 (5m)	O10 (1m)	
DP228	I07 (5m)	O10 (3m)		
DP230	O06 (2m)	I11 (4m)	RMT2 (5m)	
DP232	I11 (3m)	RMT2 (3m)		

*Tabelle C.1: Übersicht über die Entfernungen der Geoelektrik- und RMT-Profile zu den Direct-Push-Sondierungen*

Allgemein lässt sich sagen, dass trotz der Datenreduzierung die visuelle Korrelation zwischen Geoelektrik und Direct-Push in den ersten Metern sehr gering ist. Im Gegensatz dazu zeigen die RMT-Sektionen größtenteils gute Korrelationen, auch was die Tonschichten in 9 und 12 m betrifft. Diese werden von der Direct-Push-Methode aufgrund der hohen Abtastrate bestens lokalisiert, wobei die Mächtigkeit sehr gering sein kann.

Aufgrund der geringen Tonmächtigkeiten ist die RMT unter diesen Bedingungen nur als unterstützende Methode zur Untersuchung der Fläche geeignet und kann daher keine Aussage über das Vorhandensein eines 2-Aquifer-Systems tätigen, trotzdem werden geringmächtige Einlagerungen / gute Leiter auch in Tiefen ab 10 m erkannt.

Die Teufenangaben der RMT-Ergebnisse in den nachfolgenden Abbildungen erscheinen nicht teufen-korrekt. Der Grund liegt darin, dass das Programm **GSI3D** die Teufen bei geringen Höhenunterschieden nicht teilweise überschreibt, sondern die Teufenangabe soweit nach unten verschiebt, bis diese lesbar ist. Daher wurden zur besseren Vergleichbarkeit der nachfolgenden Abbildungen Hilfslinien bei 4,5 m, 9 m und 12 m eingetragen.

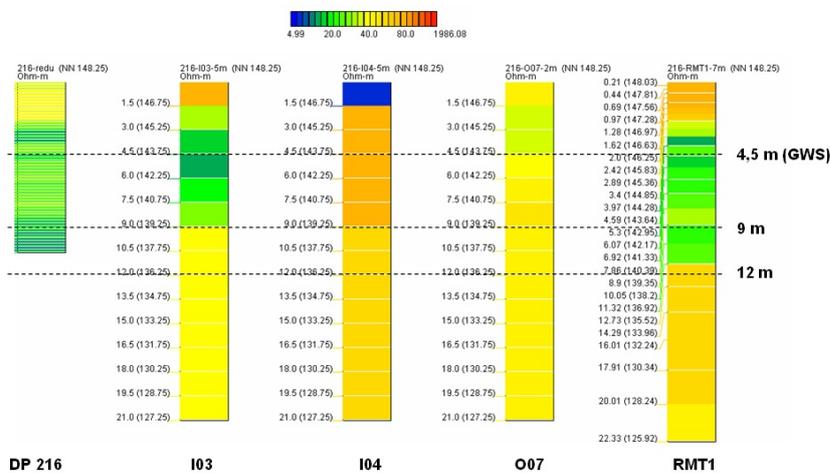


Abbildung C.24: Direct-Push-Sondierung 216 mit Geoelektrik-Profile I03, I04, O07 und RMT-Profil RMT1.

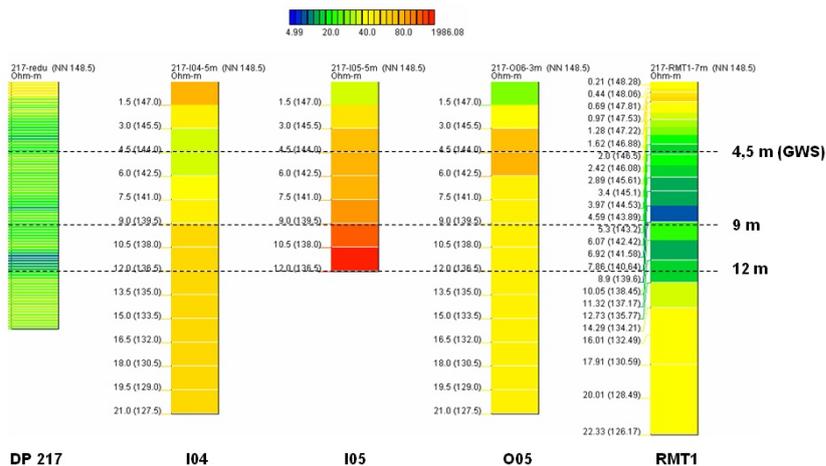


Abbildung C.25: Direct-Push-Sondierung 217

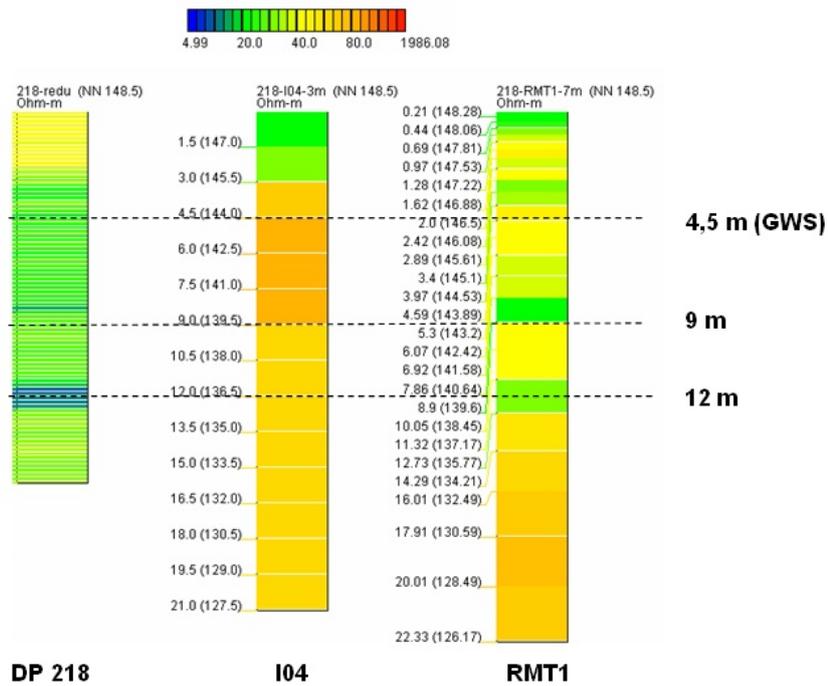


Abbildung C.26: Direct-Push-Sondierung 218

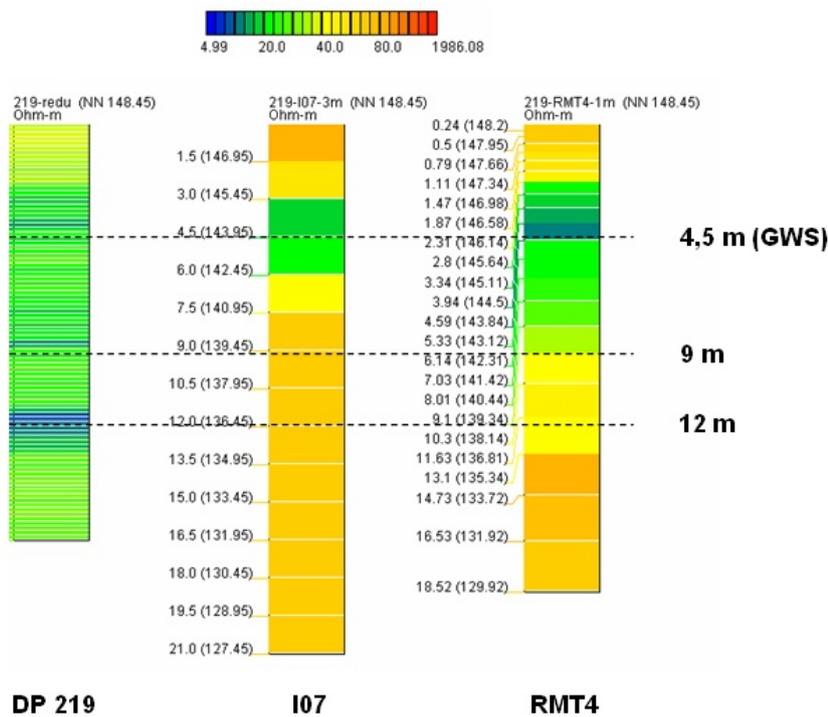


Abbildung C.27: Direct-Push-Sondierung 219

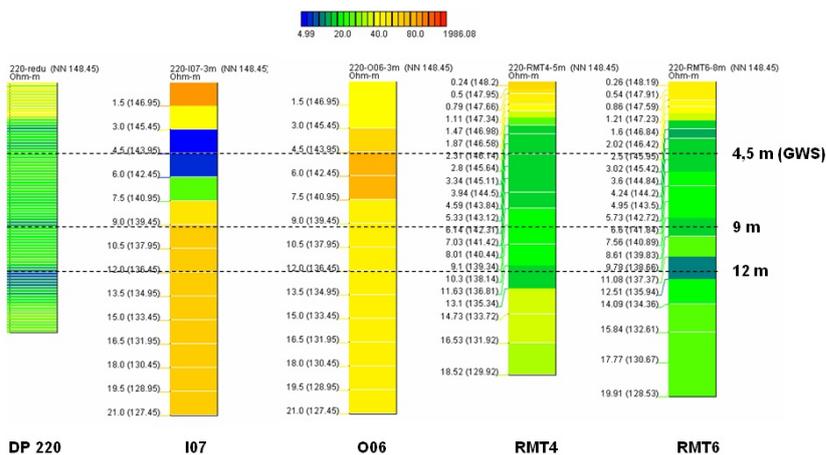


Abbildung C.28: Direct-Push-Sondierung 220

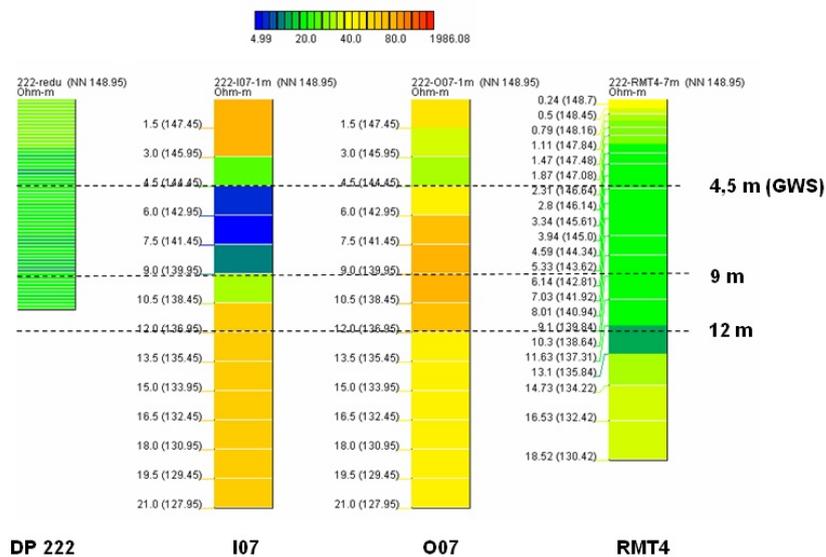


Abbildung C.29: Direct-Push-Sondierung 222

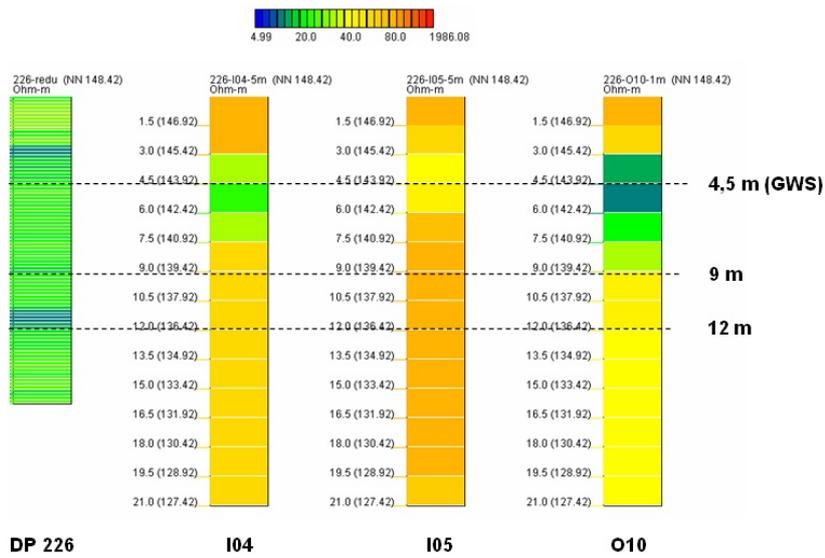


Abbildung C.30: Direct-Push-Sondierung 226

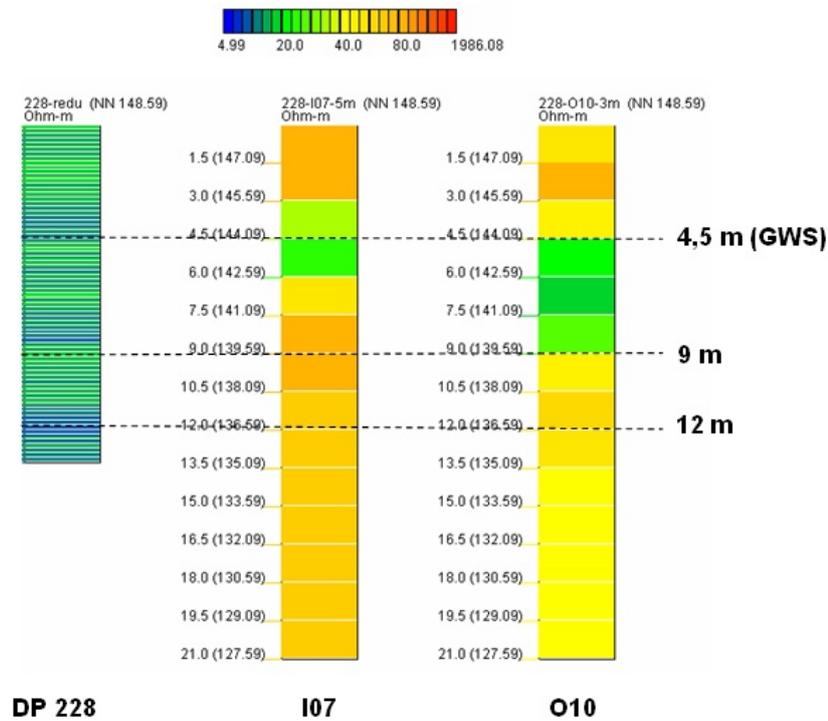


Abbildung C.31: Direct-Push-Sondierung 228

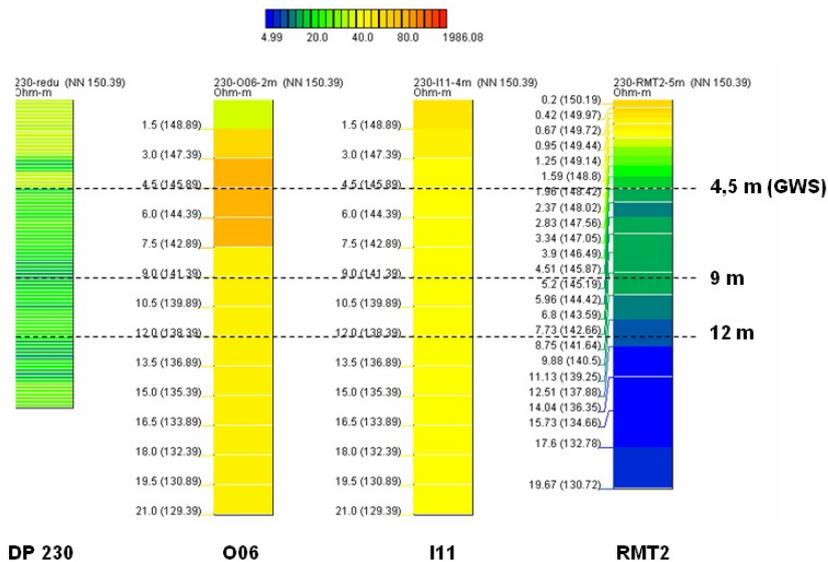


Abbildung C.32: Direct-Push-Sondierung 230

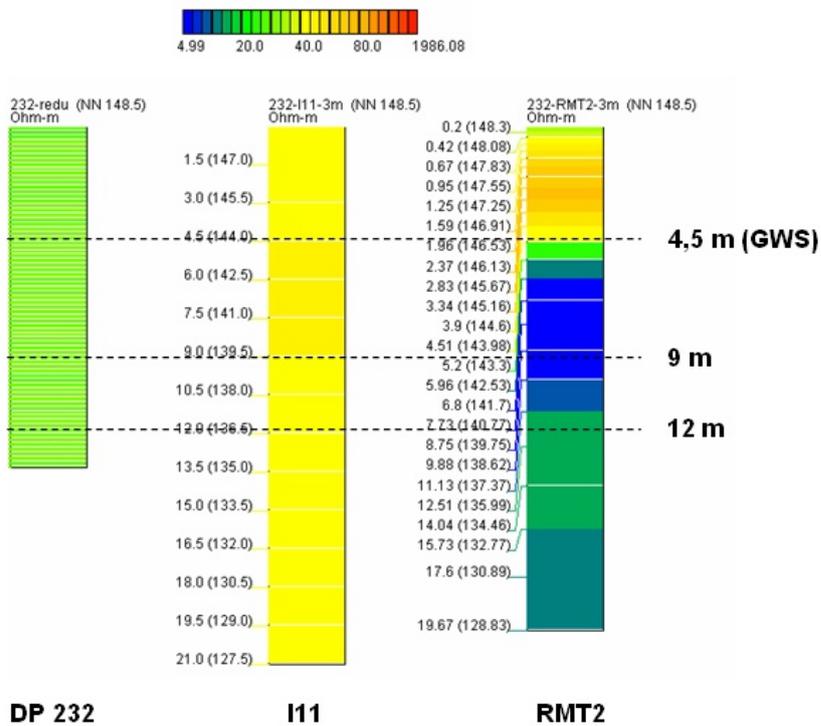


Abbildung C.33: Direct-Push-Sondierung 232



---

# Geophysikalische Module im GSI3D

---

## Allgemeines

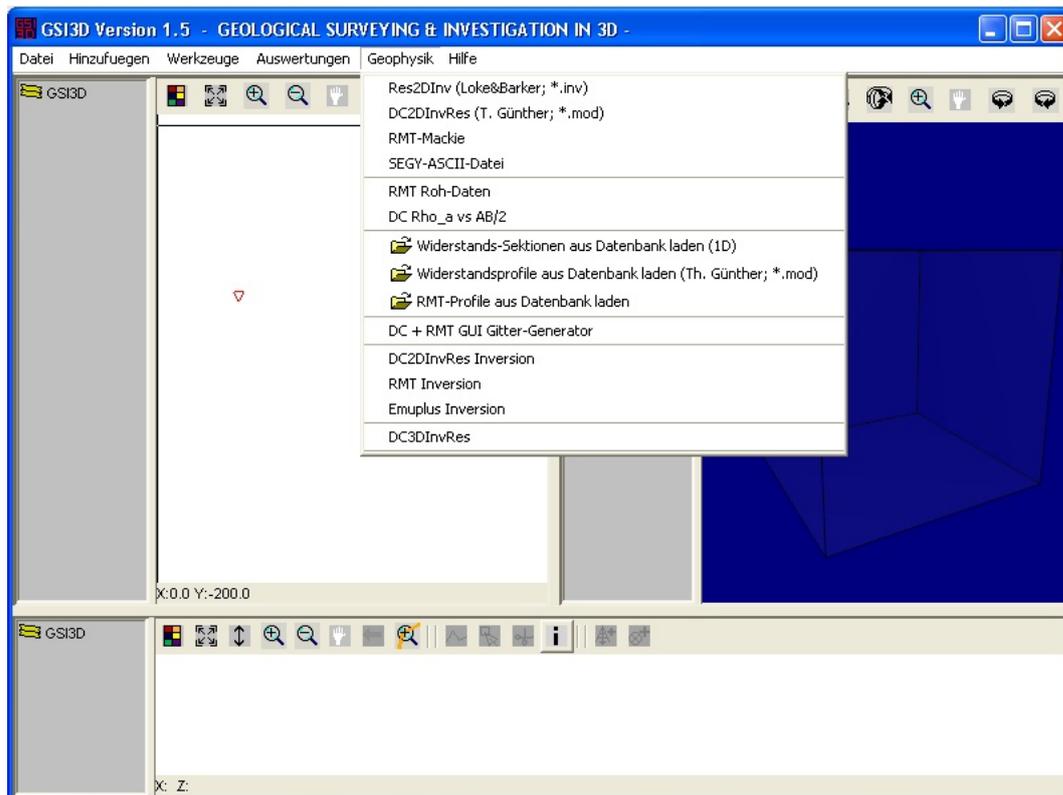
Das Programm **GSI3D** (*Geological Surveying and Investigation in 3D*) wurde von Herrn Dr. Sobisch während der letzten 15 Jahre programmiert und weiterentwickelt. Es ermöglicht eine 3D - Untergrundmodellierung der Geologie eines Gebietes auf intuitive und einfache Weise. Dazu werden Bohrlochinformationen georeferenziert und die Bohrlöcher über Profile miteinander vernetzt, um so eine großräumige 3D - Struktur zu erhalten.

Um das Programm den Bedürfnissen des NORISC-Projektes anzupassen, wurden von Sobisch und Perk (*Perk et al.* [2004]) Routinen zum Einlesen von vertikalen und horizontalen Schnitten in Form von Bildern (z.B. \*.jpg, \*.gif) und Rasterdaten (SURFER-ASCII-Format) implementiert, um geophysikalische Flächendaten (z.B. Ergebnisse einer 2D - Widerstandsgeoelektrik oder Magnetik-Messung) innerhalb des Programmes georeferenziert darzustellen.

Das Programm ist in *JAVA* geschrieben und basiert auf einer *XML-Datenstruktur*. Somit ist das Programm systemunabhängig und die *XML-Struktur* ermöglicht es, dass verschiedene Benutzer sich einfach in den Daten-Beständen zurecht finden können, anstatt wie bei Datenbanken sonst üblich, auf Entity-Relationship-Strukturen angewiesen zu sein.

In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen entwickelten geophysikalischen Module von *Perk et al.* [2004] im Programm **GSI3D** beschrieben. Diese sind dazu gedacht, geophysikalische (d.h. geoelektrische, radiomagnetotellurische und transientelektromagnetische) Daten innerhalb des Programms im Feld zu bearbeiten, Kalibrationen an vorhandenen geologischen und chemischen Bohrlochinformationen vorzunehmen und Inversionen durchzuführen. Durch diese integrierte Arbeitsweise wird eine effiziente und flexible Altlastuntersuchung ermöglicht.

Durch Anklicken von **Geophysik** (s. Abb. C.34) im Hauptmenü des Programms werden diese dann aufgerufen. Die Module lassen sich in folgende Gruppen einteilen:



**Abbildung C.34:** GSI3D-Menü: Anzeigen der geophysikalischen Module im GSI3D. Durch Anklicken von **Geophysik** im Hauptmenü werden die einzelnen Module angezeigt.

- **2D-Profil:** Mit diesen Modulen werden Modell-Dateien für Geoelektrik, RMT (Radio-Magneto-Tellurik) und SEGY-Daten eingelesen. Die Dialoge und Funktionen der 2D - Profile ähneln sich stark und werden von daher nicht jedesmal von Neuem komplett beschrieben.
- **Rohdaten-Viewer:** Diese Module erlauben es, sich Geoelektrik-Daten im Res2DInv-Format und RMT-Daten, wie sie das Programm von Mackie (*Mackie et al.* [1997]) verwendet, anzuschauen.
- **Einlesen von Daten aus einer GXML-Datei:** Nach dem Erzeugen von 2D - Datenbeständen werden diese beim Abspeichern eines Projektes im Menü unter **Menü - Objekte speichern unter** als **\*.gxml-Dateien:** abgelegt (s. GSI3D - Benutzerhandbuch, Abschnitt VI.1). In diesen **XML-Dateien** befinden sich Information, wo sich die Dateien befinden und wie diese vom Programm georeferenziert werden müssen. Eine Ausnahme bilden die 1D-Widerstandsdateien. Aufgrund der Struktur des GSI3D-Programms werden diese Daten ausschließlich über diese Option eingelesen und haben keinen eigenen Dialog zur Erzeugung georeferenzierter Daten. In diesem Punkt gleichen sie den geologischen Bohrlochdaten, die auch außerhalb des Programms erzeugt werden müssen. Mit Hilfe der Routinen können nun mehrere Profile auf einmal in das System eingelesen werden und liegen dann georeferenziert vor.
- **Erstellen von Startmodellen für die Programme DC2DInvRes (Geoelektrik) und Mackie (RMT):** Mit Hilfe dieser Module können Gitter für die Inversion von geoelektrischen Widerstandsdaten und RMT - Daten erzeugt werden.

- **Inversionmodule für die Programme DC2DInvRes (Geoelektrik), Mackie (RMT) und Emuplus (TEM):** Diese Dialoge werden zur Erzeugung von Inversion-Skripten und deren Ausführung benutzt.
- **Einlesen von 3D-Daten:** Neben dem Programm *DC2DInvRes* (Günther [2004]) existiert auch eine Version für eine 3D - Inversion (*DC3DInvRes*). Auf der Grundlage der von diesem Programm verwendeten Daten-Struktur wurde eine Routine zum Einlesen von 3D - Datenbeständen erstellt. 2D - Profile von den Programmen *DC2DInvRes* und dem RMT - Programm von Mackie können als 3D - Strukturen exportiert und als eine Pseudo - 3D - Strukturen im Block dargestellt werden.

## Res2DInv-Dialog

Das *Res2DInv* - Modul dient der Darstellung von Widerstandsprofilen, die mit dem Programm *Res2DInv* von Loke & Barker (*Loke and Barker* [1996b]) erstellt wurden (s. Abb. C.35). Ursprünglich war vorgesehen, dass dieses Inversionsprogramm zur Bearbeitung der während des NORISC-Projektes gemachten Widerstandsmessungen benutzt wird, jedoch wurde aufgrund einiger Kriterien (Erzeugen von und Übersichtlichkeit der zu verwendenden Batch-Dateien, Vorhandensein und Ausleihen eines Hardware-Dongles) das Programm von Thomas Günther (*Günther* [2004]) später bevorzugt. Aus diesem Grunde gibt es auch keine automatisierte Einleseroutine für diese Dateien.

Der Aufbau des Dialog - Fensters sieht folgendermaßen aus:

Abbildung C.35: *Res2DInv*-Fenster: Dialog zur Darstellung von *Res2DInv* - Inversionsergebnissen.

**Datei einlesen.** Die Datei wird über den Eingabe - Dialogknopf (oben links) eingelesen. Daneben erscheint anschließend der Name des Datei und der RMS - Fehler des Inversionsergebnisses.

**zusätzliche Angaben.** In den nächsten zwei Zeilen stehen Angaben über *Profil-Namen*, den *Elektrodenabstand*, die *Messkonfiguration*, die *Anzahl der Datenpunkte*, *Bezugspunkt der Elektroden* (wichtig für den Rohdaten-Viewer), Art der gemessenen Werte (*Widerstände und/oder IP*) und *Anzahl der Blöcke*.

**Farbvergabe.** In der nächsten Zeile werden die **Farben** und deren Verteilung für die 5 Intervallwerte festgelegt. Neben der Farbwahl für einzelnen Intervallwerte können auch vorgefertigte Farbverteilungen über eine Colorbox vorgenommen werden (s. Abb. C.36). Nach Anklicken und Auswahl der Farbvorgaben werden die Farben sofort auf die Knöpfe übertragen.

Vorgefertigte Farbverläufe sind *Rot - Blau*, *Blau - Rot*, *dunkel Rot - Blau*, *Blau - dunkel Rot*, *Blau - Weiss - Rot*, *Rot - Weiss - Blau*, *nur Rot* und *nur Blau*. Für die ein- bzw. drei-farbigen Vorgaben sind Fälle vorgesehen, wo z.B. nur ein ganz bestimmter Wertebereich farblich gekennzeichnet werden soll, bzw. um Differenzenplots effektiv oder in einer 3D- Ansicht nur z.B. gut leitende Schichten darzustellen.

**darzustellende Werte.** Die nächste Zeile zeigt den jeweiligen maximalen und minimalen Wert der möglichen auszuwählenden Einheit an. In diesem Dialog kann man zwischen den Darstellungen elektrischer Widerstand (**Rho** in Ohm-m), der Leitfähigkeit (**Leitf.** in mS), den IP-Werten (**IP** in ms), den Sensitivitäten (**Sensitivitäten**) und der Unsicherheit (**Unsicherheit (in %)**) wählen.

**Intervallwerte.** Es werden 5 **Intervallwerte** angezeigt, mit denen die Farbvergabe gesteuert wird. Nach dem ersten Einlesen der Daten wird sowohl der jeweilige maximale und minimale Wert an erster bzw. letzter Stelle eingefügt und die restlichen drei Felder dazwischen linear interpoliert (1/4, 1/2, 3/4). Aufgrund möglicher großer Wertebereiche kann man eine 10-er logarithmische Darstellung (**log(10)**) wählen oder wieder zu den Ausgangswerten (*orig. Werte herstellen*) zurückkehren. Werte außerhalb der maximalen / minimalen Bereiche werden nicht farblich dargestellt.

**Ausschluss-Wert.** Der sogenannte *Ausschluss-Wert* kommt ursprünglich aus der Darstellung von RMT-Ergebnissen, um eine mögliche Topographie zu simulieren. Diese wird als extrem schlecht leitende Schicht mit Werten von  $10^6 \Omega\text{-m}$  bzw.  $999999 \Omega\text{-m}$  angenommen. Die Zahl 999999 ergibt sich daher, dass die Zahl  $10^6$ , bzw. 1000000 zu Problemen mit der RMT-Einleseroutine (kein trennendes Feld zwischen benachbarten Werten) geführt hat. Stattdessen wird eine um 1 kleiner Zahl verwendet, da so die Werte durch eine Leerstelle getrennt werden.

Wird während der Darstellung ein Feld mit dem Ausschluss-Wert gefunden, wird diese Zelle mit der Farbe aus dem nebenstehenden Farbknopf gefüllt. Die Farbe kann beliebig gewählt werden.

**Farben pro Intervall.** Das Feld **Anzahl der Farben pro Intervall** gibt an, wieviele Farben pro Intervall vergeben werden. Standardmäßig ist 3 eingestellt.

**x- / z-Überhöhung.** Die Felder **x-Überhöhung** und **z-Überhöhung** innerhalb eines Dialogs haben historische Bedeutung. Während der Anfangsphase der Programmierung der Module wurde überlegt, wie man relativ unkompliziert und ohne allzu großen programmiertechnischen Aufwand geophysikalische Daten darstellen kann. Die Lösung war, ein *Image* der Daten zu erzeugen und dieses dann zu georeferenzieren. Der Nachteil dieser Methode ist, dass je nach Größe / Länge der Profile diese recht grobkörnig oder zu feinkörnig erscheinen können, weswegen man diese Werte an die jeweilige

Profillänge anpassen muss.

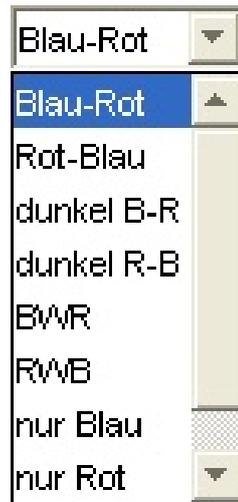
Um diesen Nachteil auszugleichen werden die x- und z-Positionen überhöht, damit eine scharfe Darstellung des Profils in der 2D - Ansicht erreicht wird. Dabei gilt: je kleiner die Profillänge, um so größer sollte die Überhöhung sein.

**Anfangs- und Endkoordinaten.** Die **Anfangs- und Endkoordinaten** werden in den nächsten zwei Zeilen angegeben. Um die Lage eines Objekts im Raum zu bestimmen, werden 6 Punkte / Koordinaten benötigt: x-, y- und z-Koordinate des unteren linken und des oberen rechten Eckpunktes des Objekts. Für ein 2D - Profil werden für die x- und y-Punkte jeweils die Koordinaten des „0“ - und des End - Punktes angegeben. Für die z-Position wird nur Angabe der Oberflächenkoordinate (absolute Höhe in m) benötigt, die andere wird automatisch berechnet. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass es auch Profile geben kann, die negative x- und y-Startkoordinaten haben können (z.B. bei einer *roll-along*-Konfiguration). Zur Georeferenzierung wird aber immer stets als Anfangskoordinate die des „0“ - Punktes angegeben. Negative Koordinaten werden dann entsprechend korrekt georeferenziert.

**Profillänge und Tiefe.** Die nächsten drei Zeilen erhalten Angaben über die **Profillänge**, die **relative Profiltiefe** und den **relativen dargestellten Bereich**. Die letzte Angabe ist nur pro forma zu betrachten.

**OK, Abbruch & Bohrlochsettings.** Als letzte Komponenten sind 3 Knöpfe angegeben: **OK** (schließt das Fenster und übernimmt die gemachten Eingaben), **Abbruch** (schließt das Fenster ohne die gemachten Eingaben zu übernehmen) und **Bohrlochsettings**. Nach Anklicken dieses Knopfes öffnet sich ein Dialog (s. Abb. C.37), in dem festgelegt wird, welche Komponenten der Bohrungen auf ein Profil in der vertikalen Ansicht projiziert werden.

**Bohrlochprofil-Layout-Einstellungen.** Die Felder erhalten Angaben über die **Breite** der Säule in 2D und 3D, die darzustellenden Haupt- und Nebengemenge-Anteile (0: Hauptgemenge; 1 - n: Nebengemenge-Anteile) oder chemische Daten (z.B: TPH („Total Polycyclic Hydrocarbons“)), ob diese als **Textur** dargestellt werden sollen und die **Textgröße** bei gewählter **Schichttiefe** und **Schichtbeschreibung**. Es können bis zu 4 Komponenten gleichzeitig dargestellt werden, wobei die erste Komponente auch in der 3D - Ansicht wiedergegeben wird.

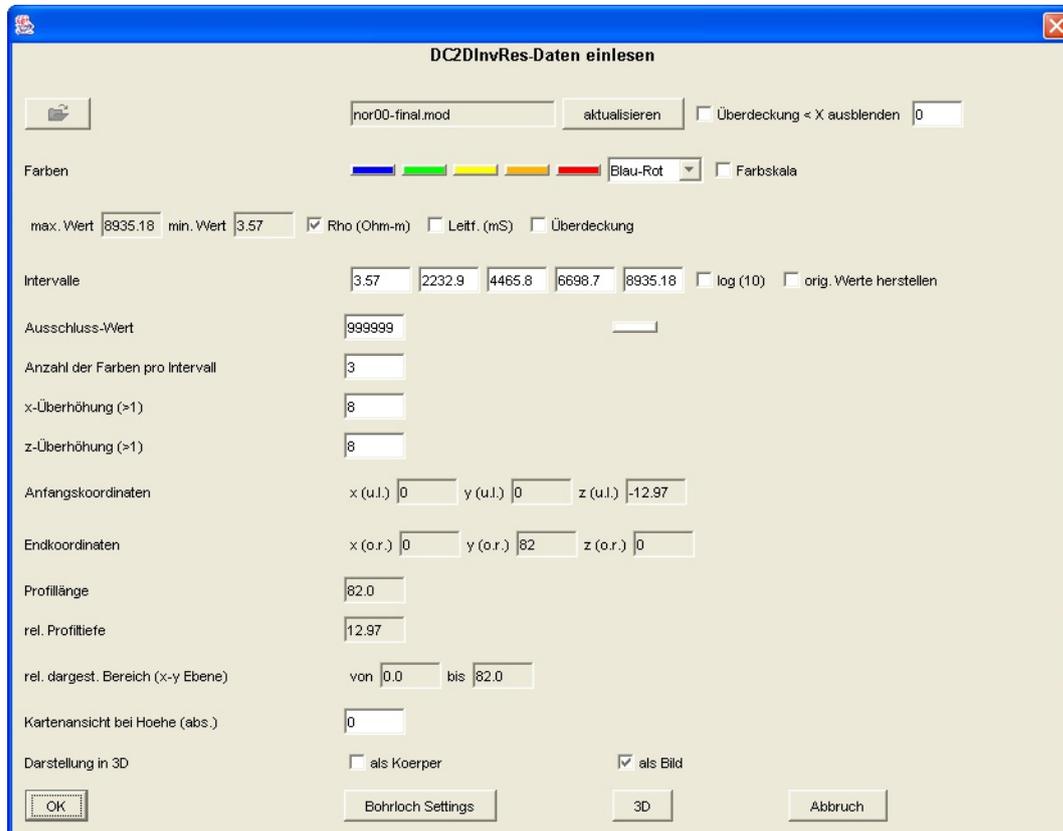


**Abbildung C.36:** Colorbox: vorgefertigte Farbkombinationen für die gebräuchlichsten Farbverläufe.

**Abbildung C.37:** Bohrlochprofil-Layout-Einstellungen: mit diesen Einstellungen werden die Breite der Bohrlöcher in 2D und 3D, sowie die darzustellenden Komponenten festgelegt.

## DC2DInvRes-Dialog

Das Modul *DC2DInvRes* dient der Darstellung von Widerstandsprofilen, die mit dem Programm *DC2DInvRes* von Thomas Günther (Günther [2004]) hergestellt worden sind. Abb. C.38 zeigt das Dialog-Fenster.



**Abbildung C.38:** *DC2DInvRes-Fenster: Dialog zur Darstellung von DC2DInvRes - Inversionsergebnissen.*

Ähnlich wie bei dem Modul *Res2DInv* (s. Abb. C.35) wird die Datei über den entsprechenden Dialog oben links eingelesen. Zusätzlich zum Namen der Datei hat man die Möglichkeit, die Datei mittels des Knopfes „**aktualisieren**“ nochmals einzulesen, nachdem ggfs. eine erneute Inversion der Daten durchgeführt worden ist, und Werte kleiner als eine gewisse **Überdeckung** (s. Kapitel 2.4.3) für eine Zelle auszublenden. Laut (Günther [2004]) haben Daten Einfluss auf Zellen mit einer Überdeckung  $\geq 0.3$ .

Die darauf folgenden Einstellungen für die Intervalle - Werte, für die Überhöhung und die Eingabe der Koordinaten entspricht dem *Res2DInv* - Dialog (s. Abschnitt C), unterscheiden sich aber in den letzten zwei Zeilen.

In der Zeile **Kartenansicht bei Höhe (absolut)** wird die absolute Höhe eingestellt, bei der eine horizontale Schnittebene des Profils in der horizontalen Ansicht gemacht wird. Somit ergibt sich die Möglichkeit, eine visuelle Korrelation von verschiedenen Datenbeständen (geophy-

---

sikalisch, geologisch und chemisch) vorzunehmen.

Bei der Option **Darstellung in 3D** wird zwischen einer **Körper-** oder **Bild-Darstellung** ausgewählt. Während bei gewählter **Bild**-Option das Image aus der 2D - Ansicht in die 3D - Ansicht kopiert wird, werden bei der Option **als Körper** nur die Zellen als kleine Würfel dargestellt, welche aufgrund der gewählten Optionen (Wertebereich und Überdeckung) auch in der 2D-Ansicht farblich zu sehen sind.

In der letzten Zeile bietet der Knopf „**3D**“ die Möglichkeit, die georeferenzierten Werte ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $z_1$  und  $z_2$ ) des Profils in einer Datei abzuspeichern. Wenn man diesen Vorgang für verschiedene Profile wiederholt, werden die Daten an eine bestehende Datei angehängt, um sie mittels des Dialogs **DC3DInvRes** (C) räumlich verteilt anzuschauen.

## RMT-Dialog

In dem Modul *RMT-Dialog* werden Daten des Programms *rund2inv\_nlcg2\_fast* von Randall und Mackie (*Mackie et al.* [1997]) eingelesen und dargestellt.

The screenshot shows the 'RMT-Daten einlesen' dialog box with the following settings:

- Block-Datei:** wannemaker1.block
- Ergebnis-Datei:** result1.rmt, RMS (%) 0.98, aktualisieren
- Sensitivitäten:** sens1.dat, Werte < X ausblenden 0
- Farben:** Blau-Rot
- max. Wert:** 93.0, **min. Wert:** 12.0,  Rho (Ohm-m),  Leitf. (mS),  Sensitivitäten,  als Koerper,  als Bild
- Intervalle:** 12.0, 32.25, 52.5, 72.75, 93.0,  log (10),  orig. Werte herstellen
- Ausschluss-Wert:** 999999
- Anzahl der Farben pro Intervall:** 6
- x-Überhöhung (>1):** 12
- z-Überhöhung (>1):** 12
- Anfangskordinaten:** x (u.l.) 12, y (u.l.) 15, z (u.l.) -22.3, Richtung (in Grad) 305
- Endkordinaten:** x (o.r.) -6.43, y (o.r.) 27.9, z (o.r.) 0
- x-Intervallbreite (m):** 2.5
- Tiefe (m):** 22.3
- Profillänge:** 22.5
- rel. dargest. Bereich (x-y Ebene):** von -1.25 bis 23.75
- Kartenansicht bei Hoehe (abs.):** -21

Buttons at the bottom: OK, Bohrloch Settings, 3D, Abbruch

Abbildung C.39: RMT-Fenster: Dialog zur Darstellung von RMT - Inversionsergebnissen.

Im Gegensatz zu den Widerstands-Dialogen werden hier zwei bzw. drei Dateien eingelesen:

**Block-Datei einlesen.** Über diese Option wird das RMT-Gitter eingelesen. Im Gegensatz zu den Widerstands-Gittern ist diese über die Messstationen hinaus nach x und z erweitert. Daher gibt es im Dialog eine Möglichkeit, die Ausdehnung des Gitters, welches angezeigt werden soll, zu bestimmen.

**Ergebnis-Datei einlesen.** Hier besteht die Möglichkeit, zwei unterschiedliche Arten des Inversionsergebnisses einzulesen: entweder den Standard-Output oder die in eine Datei umgeleitete Bildschirmausgabe. Letztere enthält im Gegensatz zur Standardausgabe noch den RMS-Fehler, welcher im Dialogfenster angezeigt wird.

**Sensitivitäten einlesen.** Zusätzlich zu den eigentlichen Inversionsergebnissen lassen sich die Sensitivitäten der Zellen einlesen. Nach *Recher* [1998; 2002] sind die vom Macki - Programm ausgegeben Sensitivitäten eigentlich Sensitivitätsdichten ( $[1/m^2]$ ), da die Werte auf die Größe der einzelnen Zellen normiert werden. Nach *Seher* [2005] dienen diese Angaben eher zu einer generellen Unterscheidung zwischen gut und schlecht aufgelösten Schichten.

---

Anschließend finden sich wieder die Möglichkeiten, Widerstände, Leitfähigkeiten oder die Sensitivitäten darzustellen, und diese über die Intervalle farblich darstellen zu lassen.

**Anfangs- und Endkoordinaten.** Im Gegensatz zu den Geoelektrik-Widerstandsmodulen wird hier nur der Startpunkt (x-, y- und z-Koordinate) angegeben. Die Georeferenzierung erfolgt dann über die Gradzahl (gegen geographisch Nord), mit der angezeigt wird, in welche Richtung das Profil läuft.

**x-Intervallbreite und Tiefe.** Da bei einem RMT-Inversionsergebnis nicht nur der Stationsbereich, sondern auch das restliche Gitter mit in die Ergebnis-Datei einfließen, wurde eine Möglichkeit implementiert, die es erlaubt, nur den Stationsanteil der Messung darzustellen. Über sogenannte *Listen* werden einerseits die jeweiligen *Zellenbreiten* als auch die aufsummierte *Tiefe* zur Auswahl gestellt.

Für die *x-Intervallbreite* wird das Intervall ausgewählt, welches normalerweise nur die x-Zellen der Messstationen enthält. Für die *Tiefe* werden die gewünschte Tiefe ausgewählt.

**relativer dargestellter Bereich.** Aufgrund der RMT-Messkonfiguration werden die Messpunkte in die Mitte einer Zelle platziert. Um nicht am Profilanfang die Zelle abzuschneiden, wird auch noch der 'negative' Bereich dargestellt. Dieser entspricht einer halben Zellenbreite und wird bei der Georeferenzierung des Profils mit berücksichtigt.

## SEGY-ASCII-Dialog

Dieser Dialog wurde für zukünftige Darstellung seismischer Daten mit dem GSI3D eingebunden und liest ASCII-exportierte SEG-Y-Dateien (\*.xyz) nach *Goldman* [2005] ein. Das Suffix ist hier nicht verbindlich und kann anderweitig lauten. Das SEG-Y-ASCII-Format sieht folgendermaßen aus:

```
#
 95.28      -50  -0.0466
 95.28      -48   0.0105
 .....
 95.28       48   0.3105
 95.28       50   0.0105
 .....

```

Für den Beginn einer neuen Spur kennzeichnet # den Anfang. Daran anschließend stehen die x-Position, die Tiefe (z nimmt mit der Tiefe zu, negative z-Werte sind also oberhalb des 0-Höhenniveaus) und der Amplitudenwert.

Das Dialogfenster ist in Abbildung C.40 zu sehen und gleicht den vorigen Dialogen bis auf folgende Ausnahmen:

**Gitterdarstellung.** Wegen der möglichen großen Auslagen, der hohen Datendichte und der damit zusammenhängenden kleinen Ausdehnung einzelner Felder für die Amplitudenwerte ist das Gitter (d.h. separate schwarze Umrandung der einzelnen Felder) standardmäßig ausgeschaltet, kann aber dazugeschaltet werden.

**Darstellungen der Werte.** Bei den vorigen Modulen hatte man die Möglichkeit einer logarithmischen Skalierung, welche in diesem Modul nicht eingebaut wurde. Große Wertebereiche über mehrere Dekaden, wie sie in der Geoelektrik möglich sind, werden für die seismischen Amplituden nicht erwartet.

**Start-Koordinaten.** Es ist darauf zu achten, dass die Start-Koordinaten der kleinsten x-Position (s. Feld '*rel. dargestellter x-Bereich*') entspricht, und nicht der '0'-Koordinate.

Die restlichen Option sind aus den vorigen Beschreibungen zu entnehmen.

**SEGY-Daten einlesen**

test.xyz    aktualisieren

Farben: [Color palette] BWR     Gitter darstellen?

max. Wert: 5.52    min. Wert: -4.62

Intervalle: [-4.62] [-2.08] [0.44] [2.98] [5.52]     orig. Werte herstellen

Ausschluss-Wert: 999999

Anzahl der Farben pro Intervall: 3

x-Überhöhung (>1): 8

z-Überhöhung (>1): 8

Anfangskoordinaten: x (u.l.) 10    y (u.l.) 0    z (u.l., unter GOK)

Endkoordinaten: x (o.r.) 10    y (o.r.) 244.73    z (o.r., über GOK) 0

z-Bereich (m): von (über GOK) -50.0    bis (unter GOK) 250.0

rel. dargest. Bereich (x-Ebene): von 95.28    bis 340.01

Profillänge: 244.73

Kartenansicht bei Hoehe (abs.): 0

Darstellung in 3D:  als Koerper     als Bild

OK    Bohrloch Settings    3D    Abbruch

**Abbildung C.40:** SEGY-ASCII-Dialogfenster: Darstellung von ASCII-exportierten SEGY-Daten.

## RMT-Roh-Daten-Dialog

Dieses Modul dient der Darstellung der im Feld gemessenen Werte einer RMT-Messung. Anhand der Rohdaten wird so eine erste Auswertung der Daten möglich, welche Rückschlüsse über die vorhandene Untergrundstruktur zulässt. Anhand des kurzen unten aufgeführten Auszugs soll die verwendete Struktur, wie sie das Programm von *Mackie et al.* [1997] verwendet, erklärt werden.

2

4 1

7.9365079365E-05 ( 35.30, 45.80) 0.02 0.01

1.6694490818E-05 ( 27.70, 46.00) 0.02 0.01

7.7639751553E-06 ( 32.90, 45.10) 0.02 0.01

4.8309178744E-06 ( 36.00, 43.10) 0.02 0.01

4 1

7.9365079365E-05 ( 14.60, 46.00) 0.02 0.01

1.6694490818E-05 ( 17.90, 47.40) 0.02 0.01

7.7639751553E-06 ( 15.80, 47.30) 0.02 0.01

4.8309178744E-06 ( 16.40, 46.90) 0.02 0.01

**2:** Anzahl der Messstationen auf einem Profil.

**4 1:** '4': Anzahl der gemessenen Frequenzen pro Station; '1': Shift-Faktor auf die scheinbaren Widerstände;

**7.9365079365E-05:** Frequenz als Periode in Sekunden.

**( 35.30, 45.80):** gemessener Widerstand in  $\Omega$ -m und Phase in Grad.

Dabei ist zu beachten, dass die Setzung der Klammern und des Kommas streng eingehalten werden muss, da es sonst möglicherweise zu einem Einlese-Fehler kommt.

**0.02:** Fehler des Widerstands in %. Abhängig von der einzelnen Person und von den Messkonditionen (Wetter, Störquellen, etc.).

**0.01:** Fehler der Phase %. Abhängig von der einzelnen Person und von den Messkonditionen (Wetter, Störquellen, etc.). Sollte die Hälfte des Fehler des Widerstands betragen (s. Programmbeschreibung von *Mackie et al.* [1997]).

Nach dem Aufrufen des Moduls (s. Abb. C.41) ist der Aufbau wie folgt:

**Einlesen der Datei:** Über den Einlese-Knopf wird die Datei eingelesen.

**Darstellungs-Optionen:** 4 Darstellungsmöglichkeiten stehen zur Auswahl:

- **Scheinbare Widerstände:** Darstellung der scheinbaren Widerstände pro Station (s. Abb. C.41).
- **Phase:** Darstellung der Phase pro Station für jede Frequenz (s. Abb. C.42).
- **Rho\* - Z\* - Darstellung:** Darstellung von Rho\* - Z\* - Werten (nach *Schmucker and Weidelt* [1975], s. Abb. C.43).
- **Pseudo - Sektion:** Darstellung der scheinbaren Widerstände als farblich gekennzeichnete Säulen pro Station (s. Abb. C.44).

Bei den Optionen **Scheinbare Widerstände** und **Phase** werden die einzelnen Frequenzen jeweils farblich differenziert dargestellt.

**Werte-Feld:** Je nach gewählter Option werden die Werte über den Mauszeiger ausgelesen und hier dargestellt.

**Farbpalette:** Wie in den 2D - Modulen können hier 5 Intervall-Werte und -Farben angegeben werden, die für die **Pseudo - Sektion** angewendet werden.

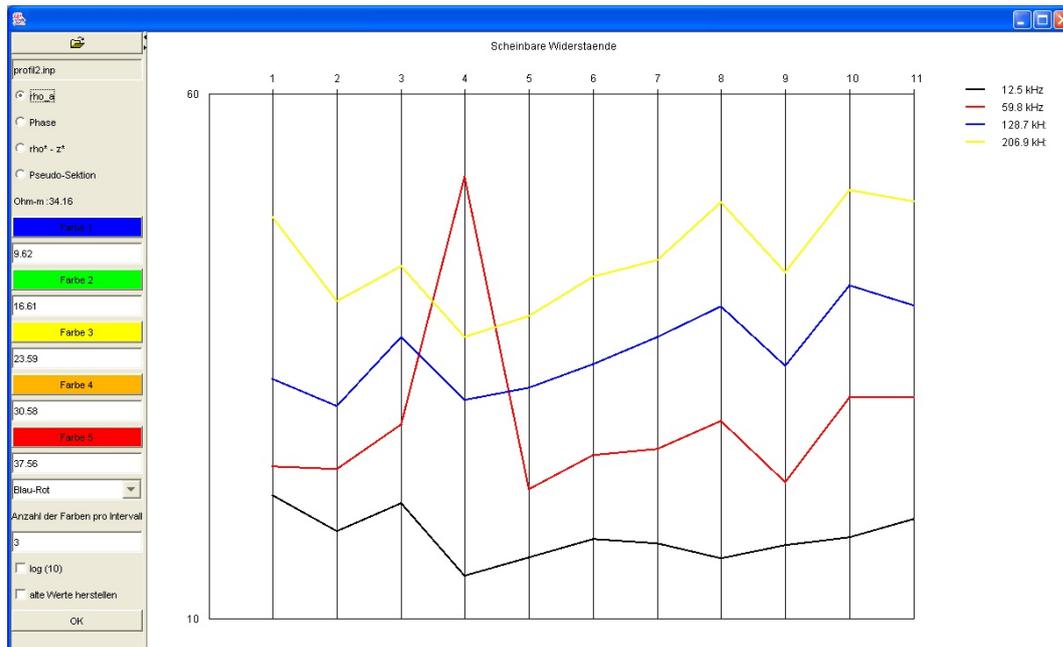
**Color-Box:** Möglichkeit der Vorgabe vorgefertigter Farbverläufe.

**Anzahl der Farben:** Anzahl der Farben pro Intervall.

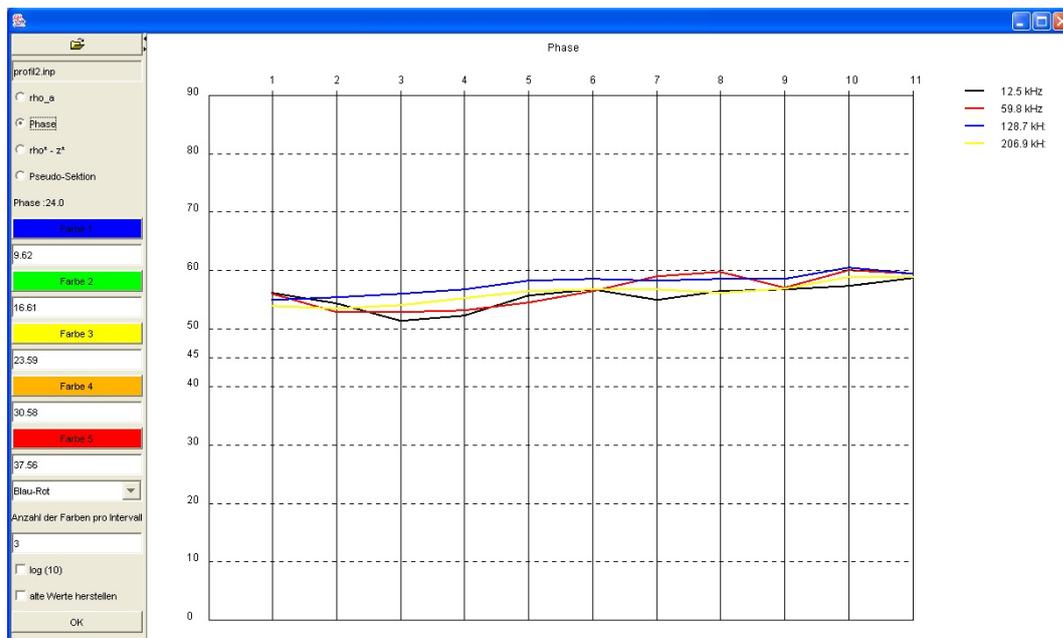
**log(10):** Darstellung der scheinbaren Widerstände als log(10)-Werte.

**Alte Werte herstellen:** linear-vertreile Anfangs-Werte anzeigen.

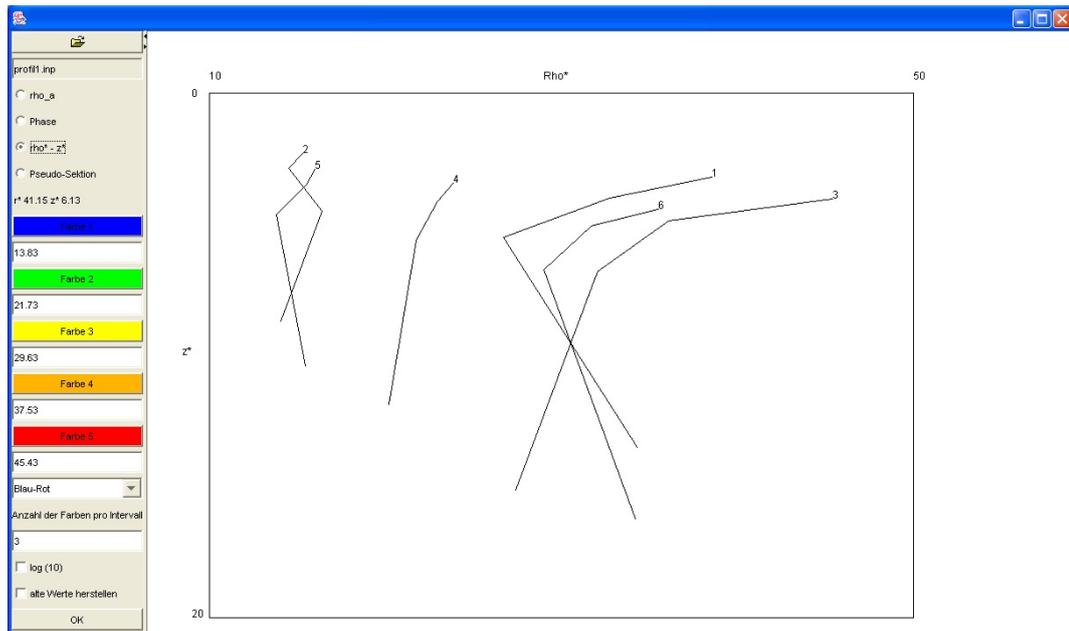
**'OK'-Knopf:** Nach dem ersten Einlesen der Daten muss dieser Knopf gedrückt werden, um die Daten anzuzeigen. Danach werden die Grafiken nach Anklicken der Options-Knöpfe angezeigt.



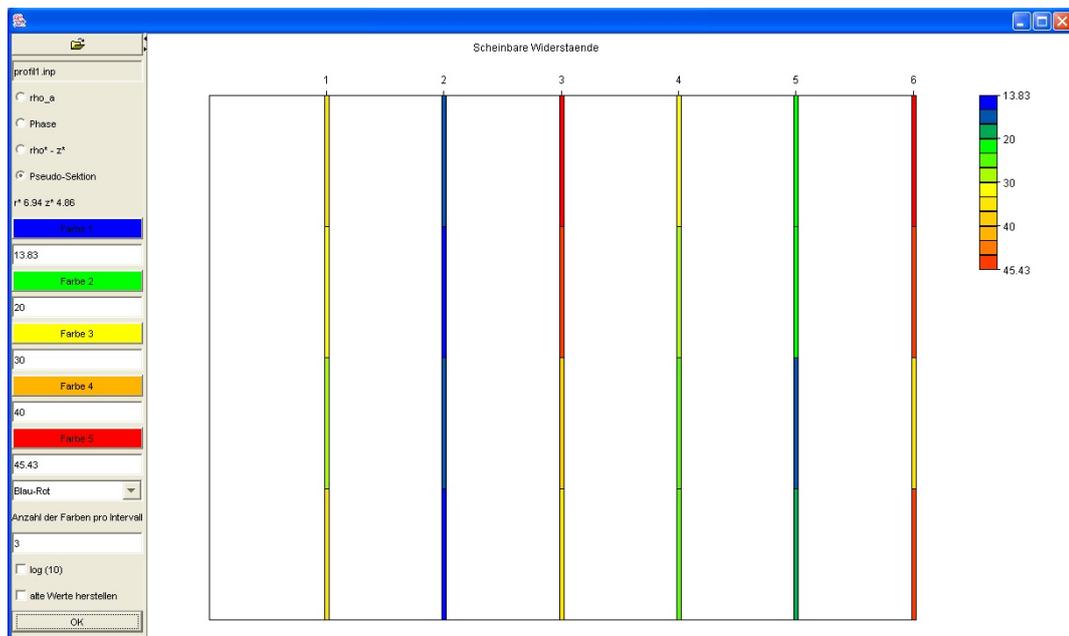
**Abbildung C.41:** RMT-Rohdaten-Fenster: Darstellung von RMT-Rohdaten, hier scheinbare Widerstände.



**Abbildung C.42:** RMT-Rohdaten-Fenster: Darstellung von RMT-Rohdaten, hier Phase.



**Abbildung C.43:** RMT-Rohdaten-Fenster: Darstellung von RMT-Rohdaten, hier  $\rho^* - z^*$ .



**Abbildung C.44:** RMT-Rohdaten-Fenster: Darstellung von RMT-Rohdaten, hier Pseudo-Sektion.

## DC- $Rho_a$ vs. AB/2 -Dialog

Das Modul „ $Rho_a$  vs. AB/2“ (s. Abb. C.45) dient der Darstellung von Widerstands-Roh-Daten als Sondierungskurve, um einen ersten Überblick über die Konsistenz der Daten zu bekommen. Momentan sind folgende Konfigurationen möglich:

- Wenner
- Pol-Pol
- Dipol - Dipol
- Schlumberger
- Pol - Dipol

Nach Einlesen der Daten wird der Sondierungsverlauf der jeweiligen Messstation über die Stationsbox angezeigt. Über den Mauszeiger werden die Angaben über den scheinbaren Widerstand und die Auslagenlänge, welche in der Grafik als  $\log(10)$ -Werte angegeben sind, angezeigt.

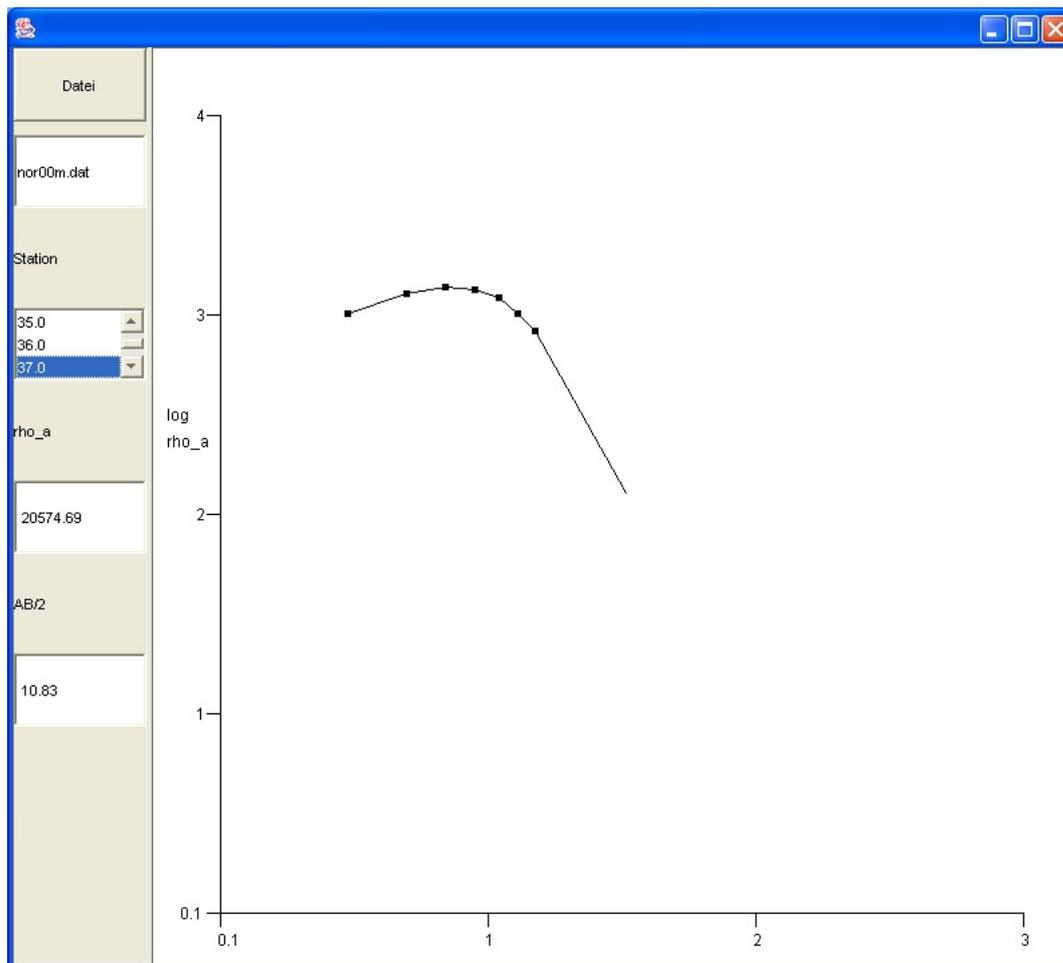


Abbildung C.45: DC-Rohdaten-Fenster: Darstellung von DC-Rohdaten als Sondierungskurven.

## 1D - Widerstandsprofile aus Datenbank einladen

Diese und die nächsten zwei Abschnitte beschäftigen sich mit dem Einladen georeferenzierter geophysikalischer Daten aus einer \*.gxml-Datei.

Als erstes werden ein-dimensionale Widerstands-Dateien eingelesen, welche aus 3 Datenformaten bestehen können:

**1D-Schichtverteilung:** Diese Dateien haben die Endung \*.r1d und die Struktur sieht folgendermaßen aus:

```
1.65 511
7.15 1121
10 2.73
```

Der linke Wert ist jeweils die Tiefe in Metern unter der Geländeoberkante, der rechte Wert der Widerstandswert für diese Schicht. Es werden immer Schichttiefen angegeben, daher gibt es keine unendlich tiefen homogenen Halbraum.

**Direct - Push Messwerte:** Während der Ungarn - Messung wurde die neuartige Direct - Push - Methode eingesetzt, um einen Vergleich zwischen der dort durchgeführten Multielektroden-Widerstands-Messung und einer 1D-Sondierung zu bekommen (*Dietrich* [2003]). Die Endungen dieser Dateien sind \*.dp. Die Struktur einer solchen Datei sieht folgendermaßen aus:

```
0.00 34.05 4.18 0.000 4.10
0.05 34.52 8.63 0.015 1.28
0.10 34.26 14.98 0.030 2.63
0.15 32.13 10.48 0.046 4.57
0.20 32.57 12.49 0.061 3.19
0.25 34.28 18.82 0.076 3.81
. . . . .
```

Dabei stehen die Spaltenangaben von links nach rechts für

- **Tiefe in Fuß**
- **Leitfähigkeit in mS**
- **Geschwindigkeit in Fuß**
- **Tiefe in m**
- **Geschwindigkeit in m**

Aus der Leitfähigkeit wird der Widerstand berechnet.

**EMUPLUS - Ergebnisse:** Diese Dateien (\*.mod) sind Ergebnis-Dateien des Programms **EMUPLUS** (Scholl [2005]), für welches in Kooperation mit *Raimundo* [2005] ein Inversionsmodul in das GSI3D integriert wurde. Die \*.mod - Datei hat folgenden Aufbau:

```
#Layer No. | Resistivity | Thickness | Anisotropy
           1 |      8.63   |      0.5   |      1.00
           2 |     13.46   |      0.5   |      1.00
           3 |     18.23   |      0.6   |      1.00
           . |      .      |      .     |      .
          39 |    102.08   |      1.5   |      1.00
          40 |    101.97   |      0.00  |      1.00

# Calibration factor: 1.0000
# Tx-Distortion DX:   1.0000
# Tx-Distortion DY:   0.0000
# Error:              1.842
```

Nach dem Anklicken des Menüs erscheint der Dialog (s. Abb. C.46) und wählt nach dem Öffnen der Datei die einzulesenden Stationen aus einer Liste aus. Nach Bestätigung mittels des 'OK'-Knopfes werden die Daten eingelesen und als rote Kreise in der Horizontal-Ansicht dargestellt (Abb. C.47, rechte Bildhälfte). Die Objekte werden über den Datenbank-Namen in der Sektion **maps** angezeigt und können bei Bedarf ein- oder ausgeschaltet werden und farblich neu zugeordnet werden.

Nach Aktivierung des **Info**-Knopfes in der Kartierungsansicht und Anklicken der gewünschten Stationen werden die ausgewählten Stationen in dem Bohrprofil-Fenster, welches über **Werkzeuge - 'Einzelbohrungen an'** aufgerufen wird, angezeigt (s. Abb. C.47, linke Seite). Die globale Steuerung und Darstellung der Daten erfolgt über den **Eigenschafts-Dialog**, der über einen Klick mit der rechten Maustaste zu öffnen ist.

Der **Eigenschafts-Dialog** (s. Abb. C.48) erlaubt folgende Optionen:

**Farb-Säule, Linien-Darstellung und Farbskala:** In der ersten Zeile wählt man zwischen einer der Darstellung als Farb-Säule und/oder einer Linien-Darstellung. Bei einer sehr engen Tiefenabastung (z.B. bei Direct-Push-Messungen) ist es weniger sinnvoll, eine farbliche Darstellung zu wählen, da die Intervalle so klein sind, dass die Farbintervalle nicht mehr erkennbar sind. Ansonsten sollten die Farb-Intervalle den 2D-Profilen angepasst werden, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten.

Bei gewählter Farbskala wird eine Skala in der Einzelprofil-Ansicht angezeigt (Abb. C.47, linke Hälfte).

**Farbzuweisungen und darzustellende Werte:** Wie in den 2D-Profilen können hier die Farbintervalle und die darzustellenden Werte (d.h. Widerstände oder Leitfähigkeiten) ausgewählt werden.

**Intervalle, Anzahl der Farben pro Intervall, Breite in 2D und 3D, Koordinaten:** Die **Intervallwerte** definieren die Farbvergabe und bei der Liniendarstellung für die Obergrenze des dargestellten Bereiches. Werte, die darüber hinaus gehen, werden auf den

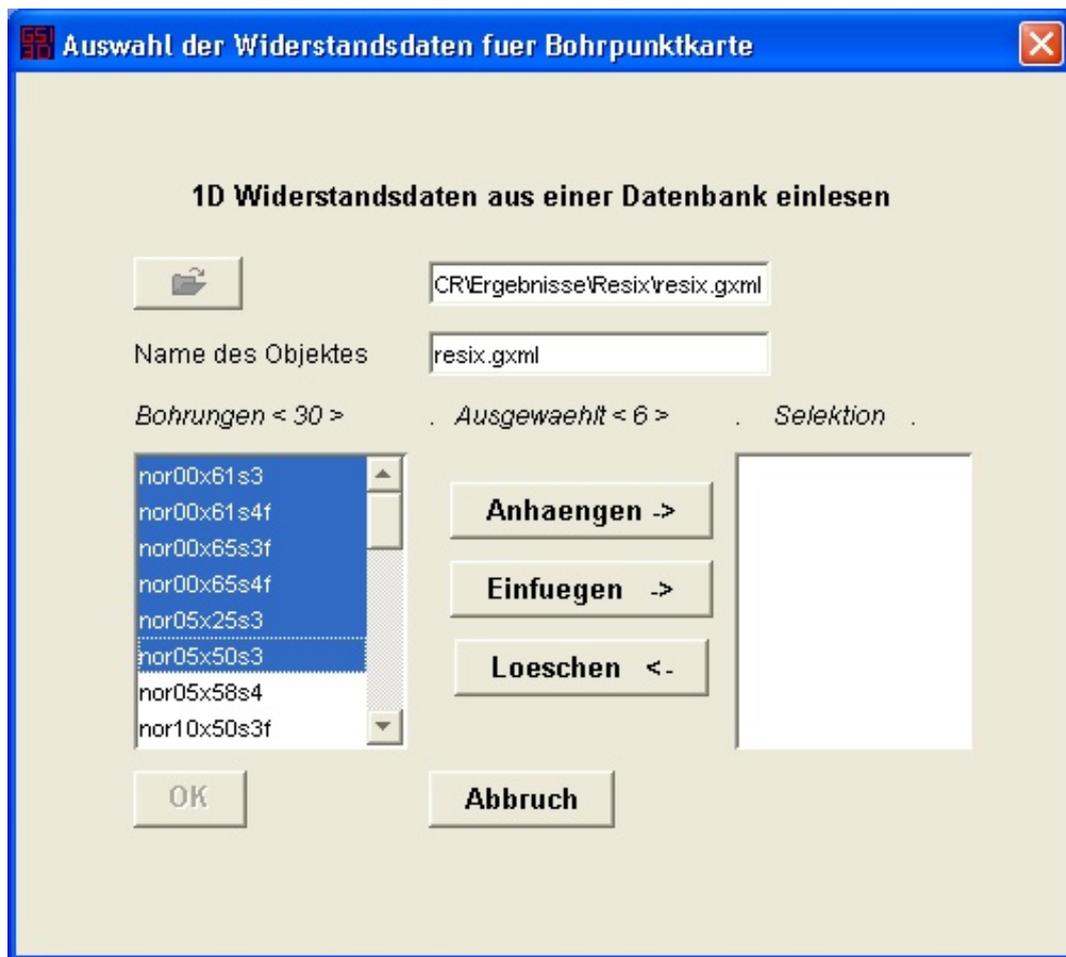


Abbildung C.46: 1D-DC-Datenbank-Dialog: Laden von 1D-Widerstandsdateien aus einer \*.gxml-Datei.

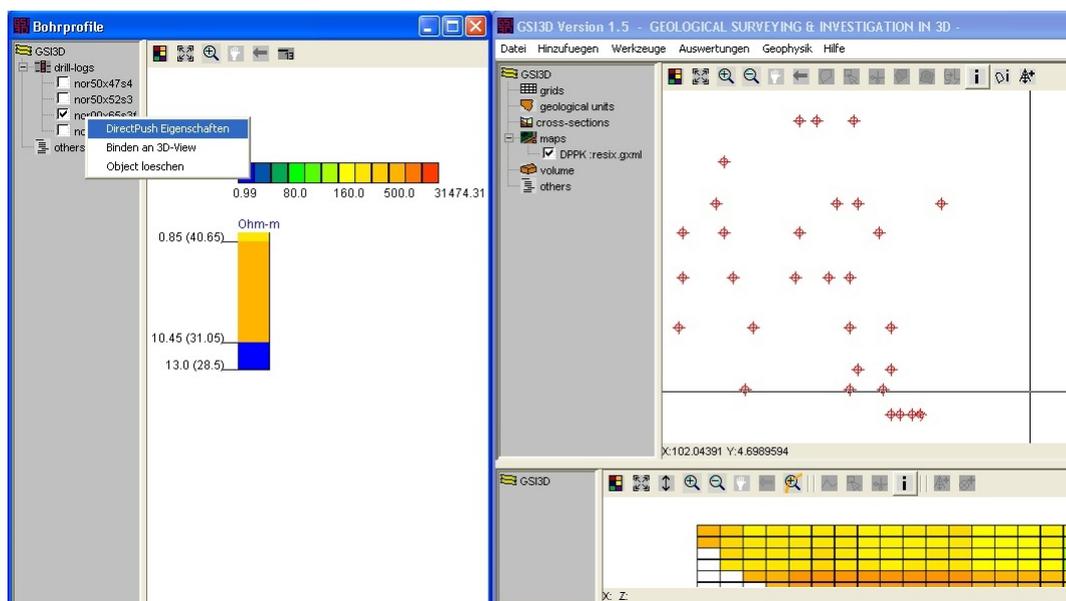


Abbildung C.47: 1D-DC-Ansicht: Anzeige von 1D - DC - Widerstandsdaten. Die Maßeinheit ( $\Omega\text{-m}$  oder Leitfähigkeit) wird direkt über der Säule angezeigt und nicht über der Werteskala.

aktuellen maximalen Wert normiert.

Die **Breite** der Säulen in 2D und 3D wird in Metern angegeben und die **Koordinaten** werden aus der Datenbank ausgelesen.

**Teufentext anzeigen:** Bei Auswahl dieser Option werden die verschiedenen Tiefen-Intervalle bzgl. relative und absoluten Tiefe angezeigt (Abb. C.47, linke Hälfte).

Die Einstellungen für ein Profil werden auf die anderen übertragen, sodass eine mehrfache Änderung für jedes einzelne Profil nicht nötig ist.

**Abbildung C.48:** 1D-DC-Eigenschafts-Dialog: Mögliche globale Einstellungen zur Darstellungen von 1D - Widerständen.

Abschließend wird hier exemplarisch der Aufbau einer \*.gxml-Datei gezeigt. Wie anfangs schon erwähnt, existiert kein eigener Dialog, um 1D - Daten in das GSI3D einzubinden, so dass eine solche Datei per Hand erzeugt werden muss.

```
<GSI3DMODEL>
<DIRECTPUSH NAME="resix" x="69" y="1" z="41.5" />
<DIRECTPUSHURL NAME="file://C:\NORISC\resix.r1d" />
</DIRECTPUSH>
<DIRECTPUSH NAME="directpush" x="69" y="5" z="41.5" />
<DIRECTPUSHURL NAME="file://C:\NORISC\directpush.dp" />
</DIRECTPUSH>
```

```
<DIRECTPUSH NAME="emuplus" x="69" y="10" z="41.5" />
<DIRECTPUSHURL NAME="file://C:\NORISC\emuplus.mod" />
</DIRECTPUSH>
</GSI3DMODEL>
```

Beginnend und abschließend steht ein so genannter 'Tag' des Programms

```
<GSI3DMODEL>
```

bzw.

```
</GSI3DMODEL> .
```

Dazwischen folgen pro Datei Angaben für den

**Namen:** Leitet sich aus der URL ab.

**Koordinaten:** x-, y- und z-Koordinate

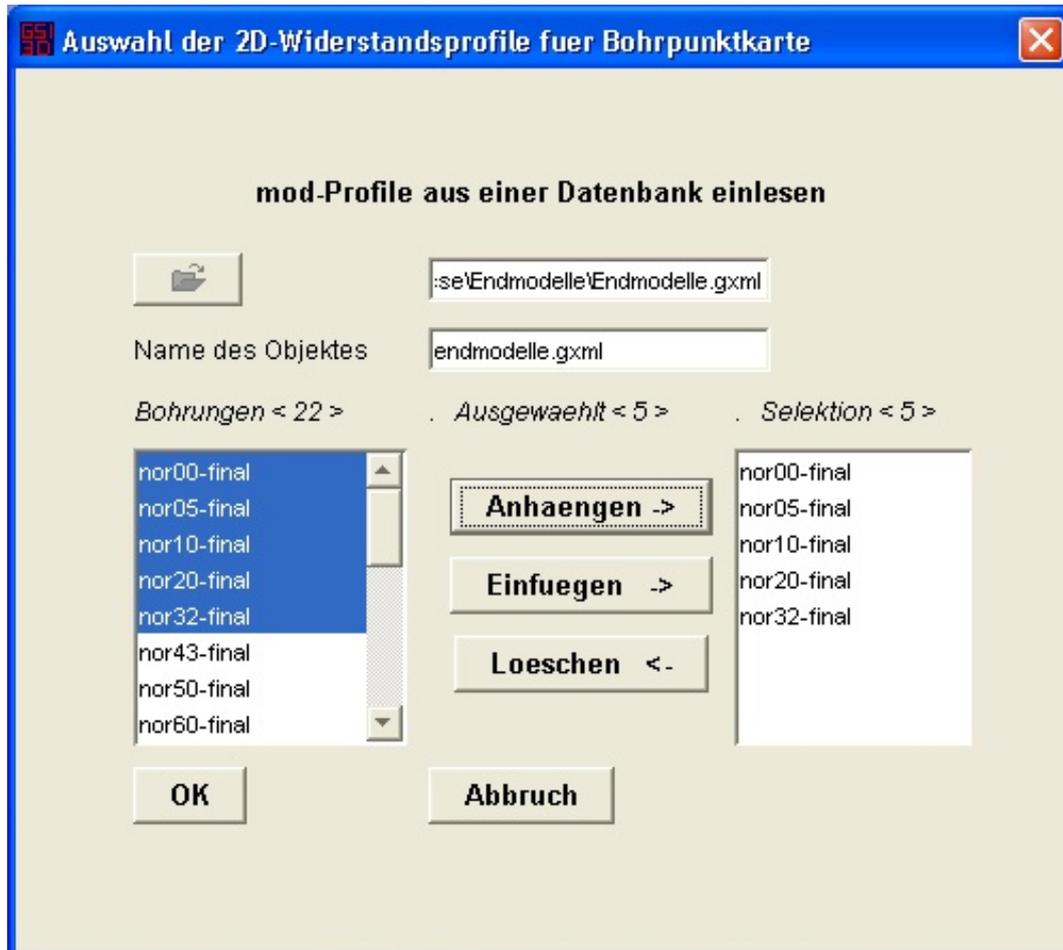
**Ordner bzw. URL:** absolute Pfadangabe

Die Tags '**DIRECTPUSH**' haben historischen Ursprung, da mit der Programmierung zur Darstellung von 1D - Widerständen mit den Direct Push-Daten als Erstes begonnen wurde.

Es ist wichtig, dass die Datei-Endungen strikt eingehalten werden, da sich die Einlese-Routinen an den Suffixen orientiert.

## 2D-Widerstandsprofile aus Datenbank laden

Ähnlich wie in C sieht die Routine zum Einlesen von Widerstandsmodellen des Programms **DC2DInvRes** von *Günther* [2004] aus. Nach Anklicken des Menüpunkts öffnet sich die Einlese-Maske (s. Abb. C.49). Nach Öffnen der \*.gxml-Datei erscheint eine Übersicht der vorhandenen Profile, die über **Anhaengen** oder **Einfuegen** zum Einlesen bereit gestellt werden sollen.



**Abbildung C.49:** 2D-DC-Datenbank-Dialog: Laden von 2D-Widerstandsdateien aus einer \*.gxml-Datei.

Nach Bestätigen durch **OK** werden die Profile automatisch eingelesen und georeferenziert dargestellt. Der Eigenschafts-Dialog ist der gleiche wie in C.

Die Struktur in der \*.gxml--Datei sieht folgendermaßen aus:

```
<GSI3DMODEL>
.
.
.
<MOD2D NAME="norisc" xLL="10.0" yLL="0.0" xUR="92.0" yUR="0.0"
zUR="41.4" />
<MOD2DURL NAME="file://C:\NORISC\Endmodelle\norrisc.mod" />
```

---

```
</MOD2D>
```

```
. . .
```

```
</GSI3DMODEL>
```

Ähnlich wie für die Einlese-Routine für 1D - Widerstandsdateien aus einer Datenbank, werden folgende Tags und Einstellungen verwendet:

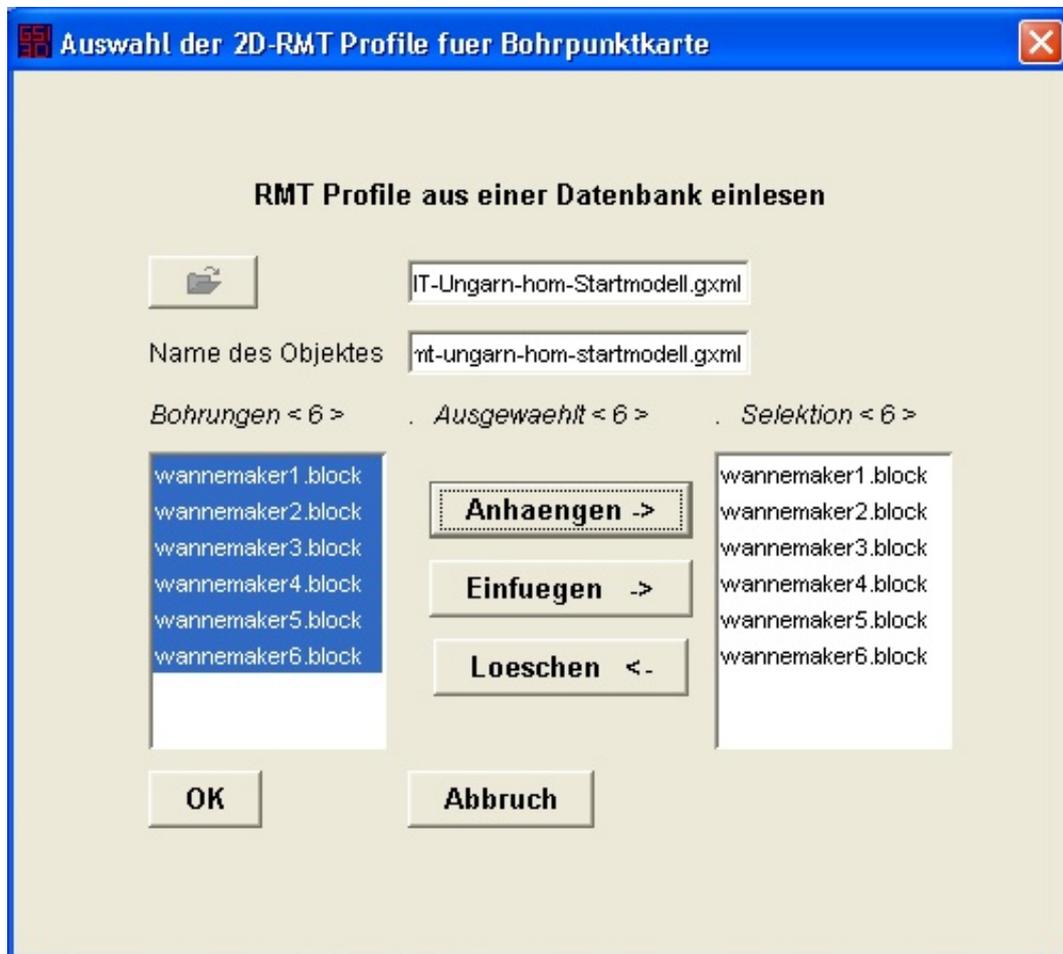
**Namen:** Leitet sich aus der URL ab.

**Koordinaten:** Koordinaten des '0'-Punkts (s. C) und des Endpunkts, Angabe der GOK (Geländeoberkante); Dabei bedeutet LL = LowerLeft und UR: UpperRight.

**Ordner bzw. URL:** absolute Pfadangabe

## 2D-RMT - Profile aus Datenbank laden

Dieser Menüpunkt dient zum automatisierten Einlesen von RMT - Profilen, welche mit dem Programm von Mackie (*Mackie et al. [1997]*) erstellt worden sind. Nach Anklicken des Menüs erscheint die Dialogmaske zum Öffnen und Auswählen der Profile (Abb. C.50).



**Abbildung C.50:** RMT-Datenbank-Dialog: Laden von 2D - RMT - Widerstandsdateien aus einer \*.gxml-Datei.

Nach Bestätigen durch 'OK' werden die Profile automatisch eingelesen und georeferenziert dargestellt. Der Eigenschafts-Dialog ist analog zu C.

Die Struktur für die RMT-Profile in der \*.gxml--Datei sieht folgendermaßen aus:

```
<GSI3DMODEL>
.
.
.
<RMT2D NAME="wannamaker1" xLL="668792.8" yLL="303345.34"
zUR="148.5" angle="105" xList1="20" xList2="29" zList1="15" />
<RMT2DURL GRID="C:\NORISC\wannamaker1.block" />
<RMT2DURL1 DATA="C:\NORISC\result1.rmt" />
<RMT2DURL2 SENS="C:\NORISC\sens1.dat" />
```

```

</RMT2D>
. . .
</GSI3DMODEL>

```

Im Gegensatz zu den 1D - und 2D - Routinen zum Einlesen von Widerstandsdateien benötigen die RMT - Profile zusätzliche Angaben wie:

**Namen:** Leitet sich aus der URL ab.

**Koordinaten & Intervallangaben:** Es werden die Koordinaten des Startpunktes **xLL**, **yLL** und **zUR** angegeben, weiterhin der Winkel (**'angle'**) und die bei der Erstellung des Profils verwendete x-Intervalle (**xList1**, **xList2**) und die Tiefenangabe **zList1**. Diese letzten 3 Werte werden aus den Indizes der Listen der x-Intervalle und des Tiefenintervalls aus dem Eigenschafts-Dialog (s. Abschnitt C) ausgelesen.

**Gitter ('Grid'):** absolute Pfadangabe der Gitter-Datei

**Modell ('Data'):** absolute Pfadangabe der Modell-Datei; wie in Abschnitt C erwähnt, ist es möglich, 2 Arten von Modell-Dateien einzulesen: den Standard-Output des Programms (**\*.dat**)-Datei und die in eine Datei umgeleitete Bildschirmausgabe. Diese sollte **\*.rmt** benannt werden, da die Einleseroutine suffix-spezifisch ist.

**Sensitivität ('Sens'):** absolute Pfadangabe der Sensitivitäts-Datei. Wird keine solche Datei verwendet, muss jedoch der Tag in der **\*.gxml**-Datei vorhanden sein und lautet :

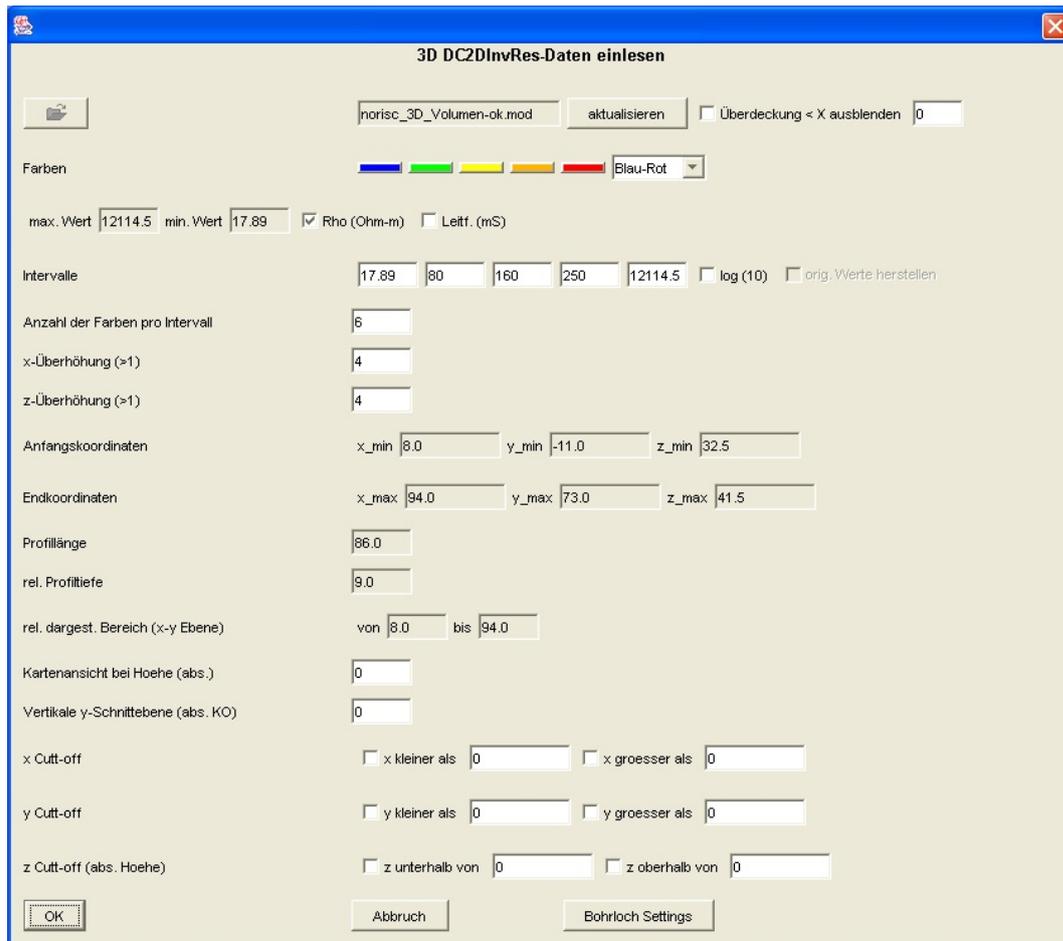
```

. . .
<RMT2DURL2 SENS="null" />
. . .

```

## DC3DInvRes-Dialog

Das Programm **DC3DInvRes** von Günther [2004] dient der 3D - Inversion von geoelektrischen Daten. Aufbauend auf das Ausgabeformat dieses Programms wurde diese Einlese-Routine entwickelt, um 3D - Block - Daten einzulesen. Dieses Modul ist in erster Linie dafür gedacht, Ergebnisse von 2D - Widerstands-Profilen (Widerstands-Geoelektrik oder RMT) in ihrer Gesamtheit in das System zu laden und zu visualisieren. Die Abbildung C.51 zeigt das Dialog-Fenster.



**Abbildung C.51:** DC3DInvRes-Fenster: Dialog zur Darstellung von DC3DInvRes - Inversionsergebnissen oder georeferenzierten 2D - Modellen.

Der Aufbau ist ähnlich dem Modul aus Abschnitt C:

**Datei einlesen; 'aktualisieren'; Überdeckung ausblenden:** Wie in Abschnitt C schon angegeben, wird hier die Datei eingelesen, ggfs. aktualisiert und es können Blöcke unterhalb einer bestimmten Überdeckung ausgeblendet werden.

**Farben; darzustellende Werte; Intervalle:** In Abhängigkeit der gewählten Farben und Intervall-Werte können elektrische Widerstände oder Leitfähigkeiten als normale oder logarithmische Einheiten dargestellt werden.

**x- und z-Überhöhung:** Hier werden die Werte für die Überhöhung der Zellen in der vertikalen Ansicht eingestellt.

**Anfangs- und Endkoordinaten:** Diese werden automatisch aus der \*.mod-Datei ausgelesen.

**Profil-Länge; relative Profiltiefe; relativer dargestellter Bereich:** Hier stehen Angaben bzgl. der Profil-Länge in x-Richtung, der Profiltiefe und des dargestellten Bereichs in der x-Ebene.

**Kartenansicht bei Höhe (absolut):** Angabe der horizontalen Schnittebene.

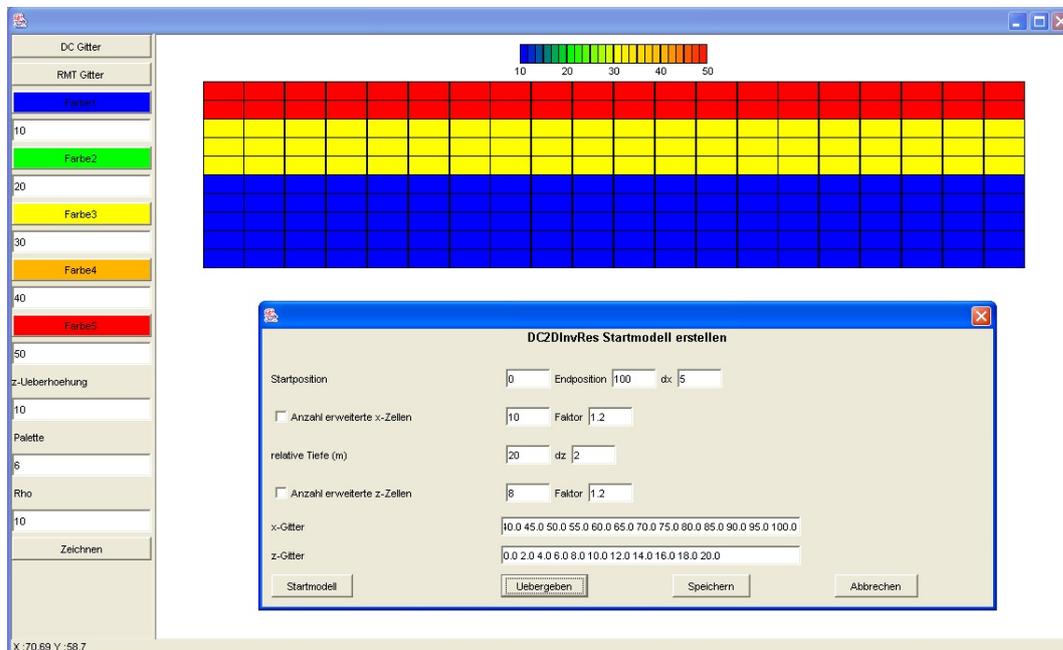
**vertikale y-Schnittebene:** Angabe der vertikalen Schnittebene.

**x-, y- und z-CuttOff - Möglichkeiten:** Bei Selektion einer oder mehrerer dieser Optionen werden die Daten entsprechend den Vorgaben ausgeblendet, sodass man auch in die verschiedenen Ebene der Daten schauen kann. Es ist zu beachten, dass nur vollständige Zellen abgeschnitten werden, sprich: verläuft eine Schnittebene durch eine Zelle, wird diese vollständig ausgeblendet.

**'OK', 'Abbruch', Bohrlochsettings:** Die Funktionalität ist die Gleiche wie in den 2D - Modulen (vergl. Abschnitt C).

## DC2DInvRes- und RMT-Startmodelle erstellen

Dieses Modul wird benutzt, um Startmodelle für die Inversionsprogramme **DC2DInvRes** (Günther [2004]) und für das RMT-Programm von Mackie *et al.* [1997] zu erstellen (s. Abb. C.52 und C.53).



**Abbildung C.52:** DC2DInvRes-Startmodell-Fenster: Im Vordergrund: Dialog zur Erzeugung eines Startmodells für das Programm DC2DInvRes; im Hintergrund: Fenster zum Editieren eines erzeugten Startmodells.

Beim Anklicken des Menüs 'DC + RMT GUI Gitter-Generator' erscheint ein Fenster zur Bearbeitung von Startmodellen (Abb. C.52). Auf der linken Seite stehen folgende Optionen zur Verfügung:

**Knöpfe 'DC-Gitter', 'RMT-Gitter':** Öffnen den jeweiligen Dialog zur Erstellung eines Startmodells. Diese Dialoge werden unten näher beschrieben

**Farbintervalle:** Hier werden die fünf Farbintervalle mit den jeweiligen Intervallgrenzen angezeigt. Sollte beim Zeichnen (s. Feld **Rho**) der maximale oder minimale Wert über- bzw. unterschritten werden, wird dieser automatisch in das jeweilige Feld übernommen.

**z-Überhöhung:** Da man nicht in die Modelle hineinzoomen kann, wurde für die RMT die Option 'z-Überhöhung' implementiert. Gerade die oberflächennahen Zellen haben eine sehr geringe Mächtigkeit und sind bei der Standardeinstellung nicht klar erkennbar. Durch die Wahl eine größeren 'z-Überhöhung' werden diese Zellen deutlich erkennbar und können ggfs. mit einzelnen Widerstandswerten belegt werden.

**Palette:** Das Feld 'Palette' gibt die Anzahl der möglichen Farben zwischen zwei Intervallwerten wieder.

**Rho:** Hier steht der aktuelle Widerstandswert, der zum Zeichnen benutzt wird.

Wurde ein Startmodell erstellt, erscheint es als homogenes Modell. Um dieses nun zu editieren kann man nun durch Eingabe des gewünschten Widerstandswerte und durch Klicken oder Ziehen der Maus einzelne Zellen oder Flächen mit dem ausgewählten Widerstandswert belegen.

Nach Anklicken des Knopfes '**DC-Gitter**' erscheint der entsprechende Dialog (s. Abb. C.52). Zur Erzeugung eines solchen Gitters stehen folgende Optionen zur Verfügung:

**Startposition, Endpunkt, dx:** Eingabe des relativen Profil-Startpunkts, des Endpunkts und der Schrittweite.

**Option 'erweiterte x-Zellen':** Hier hat man die Möglichkeit, das Gitter entlang der x-Achse nicht-linear zu erweitern. Ausgangswert ist die Zellenbreite, wobei dies dann iterativ mit dem Faktor multipliziert wird.

**relative Tiefe, dz:** Angabe der relativen Tiefe des Profils und der Schrittweite.

**Option 'erweiterte z-Zellen':** Möglichkeit der nicht-linearen Erweiterung des z-Gitters, wobei die Zellenmächtigkeit dann iterativ mit dem Faktor multipliziert wird.

**x-Gitter, z-Gitter, Widerstände:** Diese Felder zeigen die Komponenten des x- und des z-Gitters und der pro Schicht gewählten Widerstände (lateral geschichtet) an.

**Knöpfe 'Startmodell', 'Übergeben', 'Speichern' und 'Abbrechen':** Nach Drücken des **Startmodell**-Knopfes wird entsprechend der Vorgaben das Startmodell mit einem Widerstandswert von  $50 \Omega\text{-m}$  erzeugt. Falls gewünscht können die Gitterabstände nun noch in den entsprechen Feldern abgeändert werden. Um das Modell in das Zeichenfenster zu übergeben wird der Knopf **Übergeben** benutzt. Nach anschließendem Editieren der Widerstandswerte wird das Modell mittels **Speichern** in ein Verzeichnis geschrieben. '**Abbrechen**' schließt das Dialog-Fenster. Der Dialog muss jedoch bis zum Abspeichern des Modells geöffnet bleiben.

Nach Anklicken des Knopfes '**RMT-Gitter**' wird das Modul zum Erstellen von RMT-Startmodellen für das Programm von Mackie (*Mackie et al.* [1997]) in Abb. C.53 dargestellt.

**Auswahl der Gitter-Kriterien:** Hier besteht die Möglichkeit, das Gitter nach Wannamaker (*Wannamaker et al.* [1987]) oder Smith & Booker (*Smith and Booker* [1991]) erstellen zu lassen. Die Unterschiede liegen in der vertikalen Struktur der Gitter.

Die Gitter-Kriterien von Wannamaker sind wie folgt:

1. Berechne minimale und maximale Skintiefe  $\delta_{min}$  und  $\delta_{max}$ , basierend auf den minimal und maximal gemessenen Werten für  $\rho_a$ .
2. Teile den Stationsabstand durch zwei, bis der Wert kleiner als die minimale Skintiefe ist. Verwende diesen Wert als Zellenbreite. Das liefert eine horizontale Zellenlänge zwischen  $\delta_{min}$  und  $\delta_{min}/2$ .

**Abbildung C.53:** RMT-Startmodell-Fenster: Dialog zur Erzeugung eines Startmodells für das RMT-Programm von Mackie (Mackie et al. [1997]).

3. Füge horizontale Randzellen hinzu, bis für die Entfernung zum untersuchten Gebiet gilt:  $\Delta x \geq 8 \cdot \delta_{max}$ . Die Zellenbreite nimmt exponentiell zu.
4. Erzeuge ein vertikales Gitter beginnend mit  $\delta_{min}/20$ . Die Höhe der Zellen nimmt exponentiell zu, bis gilt:  $z \geq 8 \cdot \delta_{max}$ . Der Stützstellenabstand wurde wie folgt gewählt:

$$\exp(0,2 \cdot i) \quad \text{mit} \quad i = 1, \dots, N$$

Zwischen  $\exp(0)$  und  $\exp(1)$  liegen also fünf Stützstellen.

Smith & Booker verwenden für ein vertikales Gitter folgende Kriterien:

1.  $z_0$  sei 1/5 bis 1/10 der Skintiefe des niedrigsten Widerstandes für die höchste Frequenz (d.h. die kleinste Skintiefe).
2. Ein konstanter Faktor von 1.05 bis 1.2 wird verwendet, um den Knotenpunkt-Abstand bis auf 3 Skintiefen der längsten Periode bzgl. des durchschnittlichen Widerstandes dieser Schicht (d.h.  $\delta_{max}(f_{min}(\rho_{Durchschnitt}))$ ) zu erweitern.  
Die maximale dargestellte Tiefe im Editierfenster liegt bei ca.  $2 z^*$ . Tiefer liegende Gitterzellen werden nicht mehr dargestellt.

Der Aufbau des Moduls ist wie folgt:

**Wannamaker; Smith-Booker:** Auswahl des Verfahrens der Gittererzeugung;

**Eingabe von maximalen und minimalen scheinbaren Widerständen und Frequenzen:**

Diese Werte bestimmen die kleinsten und größten Skintiefen.

**maximale und minimale Skintiefe:** Nach Erzeugung des Startmodells werden in den Feldern die maximale und minimale Skintiefe angegeben.

**bei gewählter Smith-Booker-Option:  $z_0$ :** Eingabe des  $z_0$ -Faktors.

**bei gewählter Smith-Booker-Option: konstanter Faktor:** Eingabe des konstanten Faktors.

**bei gewählter Smith-Booker-Option: durchschnittlicher Widerstand bei kleinster Frequenz:** Eingabe des durchschnittlichen Widerstands der kleinsten Frequenz.

**Anzahl der Messstationen und Stationsabstand:** Angabe der Anzahl der Stationen und deren Abstand.

**Felder: 'nach links erweiterte Intervalle', 'Anzahl der Zellen', 'nach rechts erweiterte Intervalle', x-Intervalle ,z-Intervalle:** Angabe über die Intervalle. Diese können hier auch noch manuell geändert werden. Das Feld '**Anzahl der Zellen**' gibt die Anzahl der Zellen in den nach links erweiterten Intervallen wieder und wird erst nach Drücken des Knopfes '**Übergeben**' angezeigt. Dieser Wert wird benötigt, wenn für die Inversion die Stationsnummer des ersten Messpunktes (= Anzahl der Zellen + 1) angegeben werden muss.

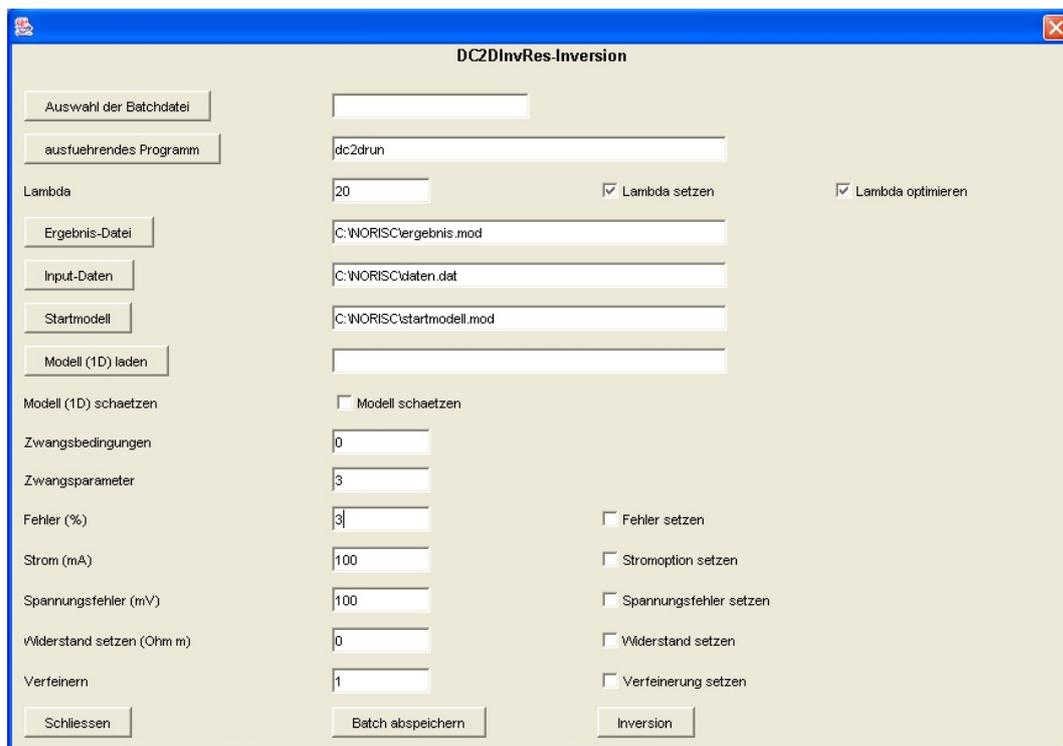
**Feld: 'Hintergrundwiderstand':** Hier steht der Hintergrundwiderstand für ein homogenes Startmodell.

**Box 'Widerstände nach aussen in Peripherie erweitern':** Nach Übergabe des Startmodells wird nur der Bereich angezeigt, welcher von den Messstationen abgedeckt wird. Um auch die äußeren Zellen zu berücksichtigen, kann diese Option gewählt werden, um z.B. 2D-Strukturen innerhalb des Messgebietes nach außen zu verlängern. Dabei werden die jeweilige linken, rechten und unteren Randzellen nach außen, bzw. unten verlängert.

**Knöpfe 'Startmodell', 'Übergeben', 'Speichern', 'Abbrechen':** Nach Betätigen des Knopfes '**Startmodell**' werden die entsprechende Felder berechnet. Um das Modell in das Zeichenfenster zu übergeben wird der Knopf '**Übergeben**' benutzt. Weiterhin wird nun die Anzahl der nach links erweiterten Zellen angezeigt. '**Speichern**' schreibt das Startmodell in eine Datei, '**Abbrechen**' schließt das Fenster.

## DC2DInvRes-Inversions-Modul

Diese Moduls dient der Ausführung von Inversionsrechnungen mit dem Programm **DC2DInvRes** von Günther [2004]. Die Inversions-Parameter werden über ein Skript an das Hauptprogramm übermittelt, welches die entsprechenden Optionen dann ausführt. Zu diesem wurde eine kommandozeilen-orientierte Eingabe zur Verfügung gestellt, die keine Eingabe über das Hauptprogramm benötigt. Abb. C.54 zeigt dieses Modul.



**Abbildung C.54:** DC2DInvRes-Inversions-Fenster: Dialog zur Erzeugung eines Skripts zur Steuerung und Durchführung einer Inversion des Programms **DC2DInvRes** von Günther [2004].

**Auswahl einer Batch-Datei:** Möglichkeit des Einladens einer vorher erstellten Batch-Datei;

**ausführendes Programm:** Angabe der Lage bzw. URL des auszuführenden Programms **dc2drun.exe**, welches eine kommandozeilen-orientierte Eingabe ohne Benutzung des Hauptprogramms ermöglicht. Ist der Ordner, in dem dieses Programm liegt, im Suchpfad des Rechner-Systems, genügt die Angabe des Namens, ansonsten muss die volle URL angegeben werden.

Momentan kann dieses Programm nur unter einem Windows-Betriebssystem angewendet werden. Eine Übersicht der möglichen Eingabe-Parameter erhält man über **dc2drun.exe -h**.

**Lambda setzen und optimieren:** Wird eine Inversion mit dem Regularisierungsparameter  $\lambda$  durchgeführt, kann dieser hier gesetzt werden (entspricht „**Fixed Regularisation**“ im Hauptprogramm); weiterhin besteht die Möglichkeit, diesen während der Inversion optimieren zu lassen (entspricht „**L-curve choosing**“ im Hauptprogramm).

**Knöpfe 'Ergebnis-Datei', 'Input-Daten', 'Startmodell', 'Model (1D) laden':** Durch Anklicken der Knöpfe werden Dialoge geöffnet, mit denen die entsprechenden Dateien erstellt oder geladen werden.

Die Struktur eines 1D - Modells entspricht der einer \*.r1d-Datei (s. Abschnitt C).

**Modell (1D) schätzen:** Bei Auswahl dieser Option wird aus den Messdaten ein 1D - Modell abgeleitet, welches als Startmodell dient.

**Zwangsbedingungen:** entspricht „Modell constraints“ im Hauptprogramm; hier werden Angaben zur Wichtungsmatrix gemacht. Dabei sind folgenden Optionen möglich:

- '0': gleich gewichtet;
- '1': Glättung 1. Ordnung;
- '2': Glättung 2. Ordnung (Dirichlet-Bedingung);
- '3': Glättung 2. Ordnung (Neumann-Bedingung);
- '4': Glättung 2. Ordnung (gemischte Bedingungen);
- '5': Glättung gewichtet nach Überdeckung;

**Zwangsparameter:** entspricht einer Parameterreduktion für schlecht überdeckte Zellen. Es stehen folgenden Möglichkeiten zur Verfügung:

- '0': keine Reduktion;
- '1': Löschen schlecht überdeckter Zellen;
- '2': Kombinieren schlecht überdeckter Zellen;
- '3': Löschen und Kombinieren schlecht überdeckter Zellen;

**'Fehler' setzten:** Angabe über den Fehler der Messdaten.

**'Strom' setzten:** Angabe über den Strom-Fehler der Messsystems.

**'Spannungsfehler' setzten:** Angabe über den Spannungs-Fehler der Messsystems.

**'Widerstand setzten':** Angabe einer Untergrenze des Widerstands während der Inversion.

**'Verfeinern' setzten:** entspricht „grid refinement“ bei der Vorwärtsrechnungen im Hauptprogramm. Mögliche Parameter sind:

- '0': automatisch;
- '1': keine Verfeinerung;
- '2': Doppelt;
- '3': Dreifach;
- '5': fünffach;

**Knöpfe 'Schließen', 'Batch abspeichern', 'Inversion' :** Der Knopf **'Schließen'** schließt das Fenster.

Vor der Ausführung einer Inversion müssen die aktuellen Angaben unter **'Batch abspeichern'** in eine Datei geschrieben werden. Geschieht dies nicht, können die möglicherweise geänderten Inversions-Parameter nicht zur Inversion verwendet werden. Der Knopf **'Inversion'** führt dann abschließend die Inversion aus.

## RMT-Inversions-Modul

Mit Hilfe dieses Moduls können RMT-Inversionsrechnung mit dem Programm von *Mackie et al.* [1997] durchgeführt werden. Abb. C.55 zeigt eine Übersicht des Moduls.

**Abbildung C.55:** RMT-Inversions-Fenster: Dialog zur Erzeugung eines Skripts zur Steuerung und Durchführung einer RMT-Inversion des Programms von *Mackie et al.* [1997].

**'Batch-Datei':** Möglichkeit zum Einlesen einer vorher angelegten Batch-Datei.

**TE / TM Mode:** Auswahl der Mode.

**Modell-Datei:** Einlesen des Gitters / des Startmodells. Die Erstellung eines solchen Gitters wird in Abschnitt C beschrieben.

**'TM-Datei', 'TE-Datei':** Auswahldialog für eine TM-oder eine TE-Datei.

**Termination für RMS-Fehler (%):** Abbruchkriterium für die Inversion, wenn der RMS-Fehler eine gewisse Grenze unterschreitet (normalerweise 1%).

**Glättungsfaktor tau:** Angabe des Regularisierungsfaktors bei der Inversion.

**Dämpfungsfaktor:** Angabe des Dämpfungsfaktors.

**Hintergrundrauschen für TE- bzw. TM-Mode (in %):** Angabe des Hintergrundrauschens für die TE- und TM-Mode.

**'feste Parameter' und 'Fixe Block-Paare':** Möglichkeit der Angabe fixer Zellen innerhalb des Startmodells. Die Angabe erfolgt in dem Feld **'Fixe Block-Paare'** als x,z-Angabe, z.B. '2,3', oder '4,5', jeweils durch ein Leerzeichen getrennt.

**Norm: Laplace- oder Gradienten-Verfahren:** Auswahl des Inversions-Algorithmus.

**Messstationen an Position:** Angabe der Position der Messstationen bzgl. des Startmodells.

**Ergebnis-Datei:** Angabe der Ergebnisdatei. Eine Sensitivitäts-Datei wird standardmäßig von dem Programm ausgegeben und wird in dem gleichen Verzeichnis unter **sens.dat** gespeichert.

**'Schließen', 'Batch abspeichern', 'Inversion':** Der Knopf **'Schließen'** schließt das Fenster. Mittels **'Batch abspeichern'** werden die Parameter in eine Datei geschrieben. Dies muss auf jeden Fall vor dem Ausführen mittels Drücken des Knopfes **'Inversion'** geschehen, da es sonst zu einem Fehler während der Ausführung kommt.

## Emuplus-Inversions-Modul

Das Programm **EMUPLUS** wird am Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln zur Inversion elektromagnetischer (MT, RMT und Geoelektrik) Daten verwendet (z.B. *Scholl* [2005]). Im Rahmen ihrer Masterthesis des IMES-Studienganges (International Master of Environmental Science) hat *Raimundo* [2005] die Bedienung dieses Programms grafisch in das GSI3D implementiert. Die notwendigen Eingaben können in einer Batch-Datei abgespeichert und anschließend die Inversion ausgeführt werden. Dieses Modul wird hier mit seinen Optionen beschrieben, es wird aber vorausgesetzt, dass der Benutzer mit den entsprechenden Termini vertraut ist. Für eine genauere Beschreibung des Programms wird auf *Raimundo* [2005] verwiesen.

**Input-Sektion (C.56):** Allgemeine Angaben zur Batch-Datei.

**Insert Batch:** Einlesen einer vorhandenen Batch-Datei

**Program Executable File:** Name des ausführenden Programmes, normalerweise 'emuplus'. Wenn das Programm in einem lokalen Pfad liegt, muss der komplette Pfad mit angegeben werden, ansonsten reicht der Name des Programms selbst.

**Input Data File (\*.clt):** Name der Datei, die invertiert werden soll. Diese sollte die Endung .clt haben, das Suffix wird aber nicht mit angegeben. Steht die Datei in einem anderen Verzeichnis als die zu speichernde Batch-Datei, muss der Pfad mit angegeben werden.

**Enter Data Type (TLHZ):** Angabe des Datentyps. T steht für 'TEM', L für 'Loop source' (Leiterschleife) und HZ für die gemessene Empfangskomponente. Standard ist 'TLHZ'

**Use Apparent Resistivities:** Scheinbare Widerstände benutzen (ja/nein). Bei 'nein' werden gemessene Spannungen invertiert, welches bei **EMUPLUS** der Normalfall ist. Die Voreinstellung ist 'nein'.

**Include System Response (.syt):** Einfügen der System-Antwort (ohne Suffix). Die Voreinstellung ist 'nein'. Bei 'ja' muss das nächste Feld ausgefüllt werden.

**Enter File Name (.syt):** Dateiname der System-Antwort. Die Endung sollte .syt sein, wird aber nicht mit in das Feld geschrieben. Steht die Datei in einem anderen Verzeichnis als die zu speichernde Batch-Datei, muss der Pfad mit angegeben werden.

**Include Errors:** Berücksichtigen von Messfehlern (ja/nein). Die Angaben stehen in der Daten-Datei.

**Output File:** Name der Ausgabedateien (\*.dat und \*.mod). Die \*.mod-Dateien können vom GSI3D als 1D-Widerstandsergebnisse dargestellt werden (s. Abschnitt C).

**Knöpfe 'Cancel', 'SaveBatch' und 'Inversion':** 'Abbrechen des Moduls, Speichern der aktuellen Parameter in eine Batch-Datei (am Besten in das gleiche Verzeichnis, in dem auch die zu invertierenden Daten sind), Starten der Inversion (funktioniert erst nach vorherigem Speichern der Batch-Datei).

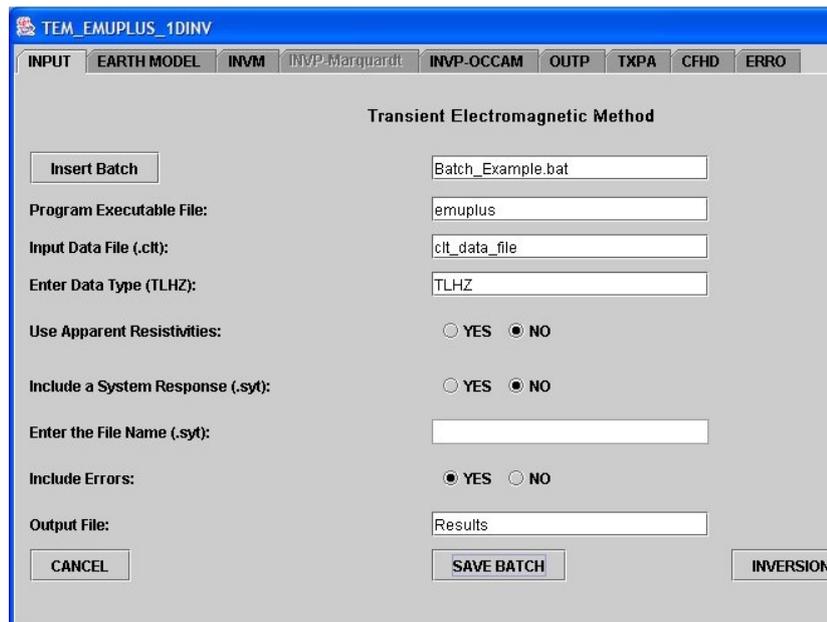


Abbildung C.56: Emuplus-Modul im GSI3D, 'Input-Sektion'

**EarthModel-Sektion** (Abbildung C.57): Einfügen oder Laden eines Erdmodells (Widerstände und Schichttiefen).

**Enter a New Earth Model:** Eingabe eines neuen Erdmodells (ja/nein). Bei 'nein' können die nachfolgenden Felder nicht belegt werden.

**Number of Layers:**  $n$  = Anzahl der Schichten.

**Layers Resistivities:** Schichtwiderstände  $R_1$  bis  $R_n$  in  $\Omega$ -m, durch Leerzeichen getrennt. Es sollten genau so viele Widerstände wie Schichten angegeben werden.

**Layers Depths:** Schichttiefen  $D_1$  bis  $D_{n-1}$  (in Meter), durch Leerzeichen getrennt. Es werden  $n-1$  Schichten angegeben. Die  $n$ -te Schicht entspräche dem Halbraum.

**Save Earth Model as:** Speichern des aktuellen Erdmodells in eine Datei (keine Suffix-Angabe).

**Knopf 'Load Earth Model':** Laden eines existierenden Erdmodells. Nach dem Laden und ggfs. gemachten Änderungen muss das Suffix in diesem Feld gelöscht werden, da es nach dem Abspeichern der Batch-Datei automatisch hinzugefügt wird.

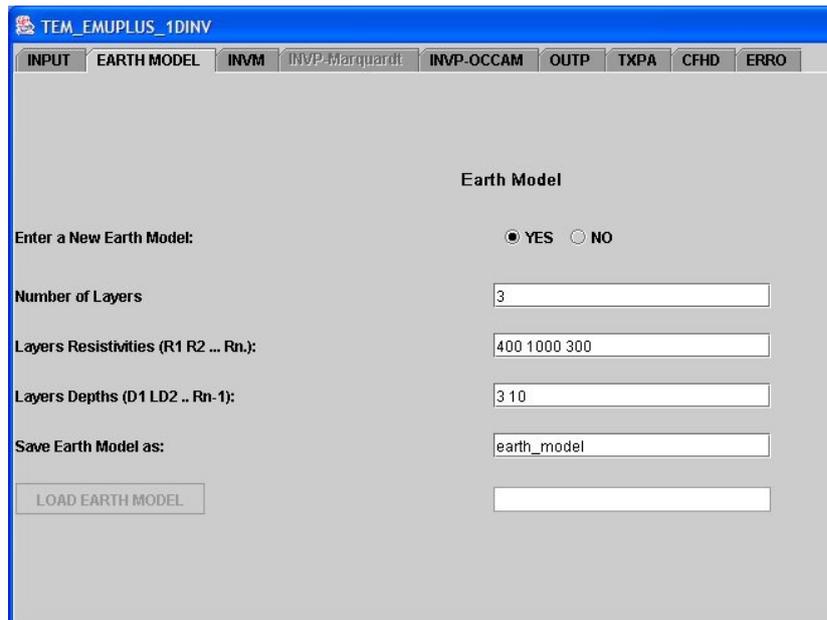


Abbildung C.57: Emuplus-Modul im GSI3D: 'EarthModel-Sektion'

**Inversionsalgorithmus** (Abbildung C.58): Auswahlmöglichkeit des Inversionsalgorithmus.

**Wahl der Inversionsmethode:** Marquardt- oder Occam-Inversion. Je nach Wahl wird der entsprechende Reiter 'INVP-Marquardt' oder 'INVP-Occam' freigeschaltet.



Abbildung C.58: Emuplus-Modul im GSI3D: 'Inversionsalgorithmus'

### INVP-Marquardt (Abbildung C.59): Eingabe der Marquardt-Inversionsparameter.

**Tolerance for fit:** Eingabe der Toleranz für den Fit. Wenn die Verbesserung des Misfits unterhalb des angegebenen Wertes liegt, bricht die Inversion ab. Der Standardwert ist 0.0.

**Minimum relative misfit decrease (%):** Abruch der Inversion, wenn der Misfit zwischen zwei Iterationen unterhalb des angegebenen Wertes (in %) liegt. Der Standardwert ist 1.0.

**Maximum number of iteration:** Maximale Anzahl von Iterationen. Der Standardwert ist 30.

**Minimum for relative singular threshold:** Eingabe des minimalen relativen Dämpfungsfaktors. Der Standardwert ist 0.01.

**Damped error bounds:** Benutzung von gedämpften Fehlergrenzen (ja/nein).

**68% confidence intervall (or else 95%):** Bei 'ja': Verwendung des 68%- Vertrauensintervalls, bei 'nein' Verwendung des 95%-Vertrauensintervalls. Diese Angabe bezieht sich auf das Feld **Damped error bounds**.

**Optimized Marquardt factor:** Optimierte Marquardt Faktor (ja/nein). Bei 'ja' versucht das Programm einen optimalen Dämpfungsfaktor zu finden.

**Enter transformation type:** Wahl des Transformationstyps (s. *Scholl* [2001]). '0': linear; '1': logarithmisch; '2': area sinus hyperbolicus. Bei der Wahl von '2' wird das nächste Feld aktiviert.

**Scale factor type:** Skalierungsfaktor für den area sinus hyperbolicus: '0': fix; '1': Minimum; '2': Maximum/10n;

Abbildung C.59: Emuplus-Modul im GSI3D: Marquardt-Inversionsparameter

**INVP-Occam** (Abbildung C.60): Eingabe der Occam-Inversionsparameter.

**Tolerance for fit:** Eingabe der Toleranz für den Fit. Wenn die Verbesserung des Misfits unterhalb des angegebenen Wertes liegt, bricht die Inversion ab. Der Standardwert ist 0.0.

**Minimum relative misfit decrease (%):** Abruch der Inversion, wenn der Misfit zwischen zwei Iterationen unterhalb des angegebenen Wertes (in %) liegt. Der Standardwert ist 1.0.

**Maximum number of iteration:** Maximale Anzahl von Iterationen. Der Standardwert ist 30.

**Roughness:** Rauigkeits-Kriterium; '1': 1. Ableitung; '2': 2. Ableitung; Der Standardwert ist 1.

**Criteria for choosing Lagrange multiplier:** Lagrange-Kriterium; '0': Suche nach kleinstem Chi; '1': L-Kurven-Kriterium; '2': Quasi-L-Kurve: Suche nach kleinsten Misfit. Das Modell wird aber nur akzeptiert, wenn die Kostenfunktion (Summe der Modell- und Daten-Norm) verringert wird (*Scholl [2001]*). Der Standardwert ist 0.

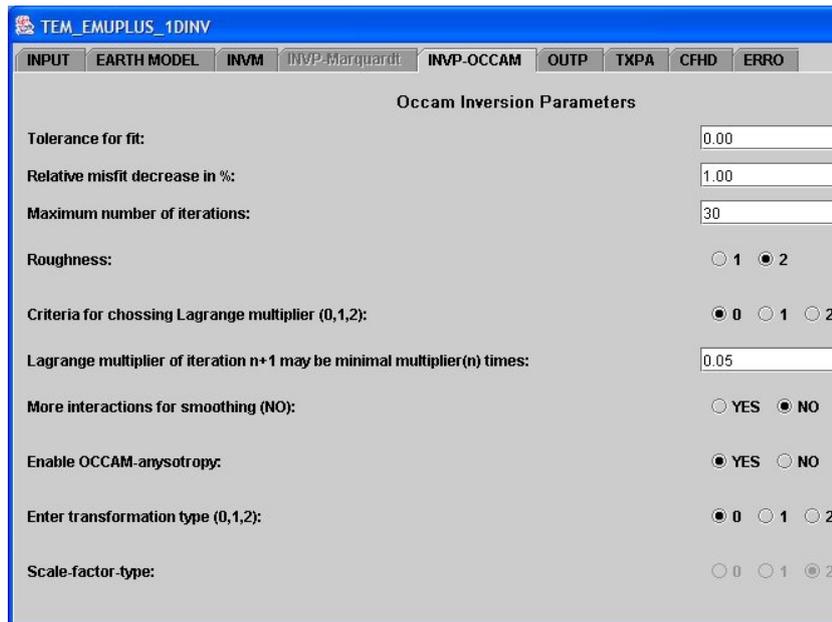
**Lagrange multiplier of iteration n+1 be minimal multiplier n times:** Wenn das Lagrange-Kriterium nicht '0' ist, wird pro Iteration der angegeben Wert verringert. Der Standardwert ist 0.05.

**More iterations for smoothing:** zusätzliche Iterationen für die Glättung; experimentelle Option; Voreinstellung ist 'nein'.

**Enable Occam anisotropy:** Anisotropie zulassen (ja/nein).

**Enter transformation type:** Wahl des Transformationstyps (s. *Scholl [2001]*). '0': linear; '1': logarithmisch; '2': area sinus hyperbolicus. Bei der Wahl von '2' wird das nächste Feld aktiviert.

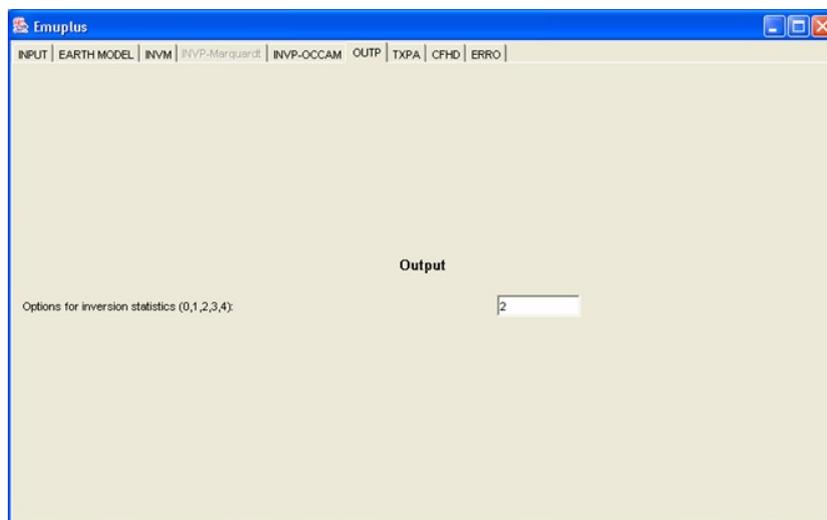
**Scale factor type:** Skalierungsfaktor für den area sinus hyperbolicus: '0': fix; '1': Minimum; '2': Maximum/10n;



*Abbildung C.60: Emuplus-Modul im GSI3D: Marquardt-Inversionsparameter*

**Output** (Abbildung C.61) Textausgabe ('verbose mode') während der Inversion.

**Options for inversion statistics:** Ausgabe der Marquard-Inversionsstatistik (0/1/2/3/4).



*Abbildung C.61: Emuplus-Modul im GSI3D: Optionen für die Marquard-Inversionsstatistik*

---

**TXPA** (Abbildung C.62) Hier werden die Parameter bzgl. des Transmitters (Tx) gesetzt.

**Normalized source moment:** Auswahl, ob das Quellenmoment normalisiert werden soll oder nicht. Die Voreinstellung ist 'nein'.

**Source current:** Eingabe des Quellenstroms. Normalerweise wird dies über das Daten-File (.clt) eingelesen.

**Dipole lenght:** Länge des Dipols. Im Falle einer Leiterschleife entspricht dies der Fläche, die die Schleife umspannt und wird normalerweise über das Daten-File (.clt) eingelesen.

**Include periodicity:** Auswahl, ob das vorige Umschaltsignal mit in die Vorwärtsrechnung einbezogen werden sollen. Bei 'ja' müssen die nächsten zwei Felder ausgefüllt werden, ansonsten nicht.

**Vibrotem (0), 50%(50) or 100%(100) duty cycle:** Setzen der Signalform: '0' wird für Vibrotem gewählt. Der 50% Arbeitszyklus bedeutet, dass der Transmitter angeschaltet wird, die Polarität wechselt und der Transmitter wieder ausgeschaltet wird. Der 100% Arbeitszyklus bedeutet, dass der Transmitter nicht abgeschaltet wird, sondern nur die Polarität des Sendestromes geändert wird. Normalerweise werden für eine short-offset TEM der 50% Zyklus benutzt, für eine long-offset TEM der 100% Arbeitszyklus.

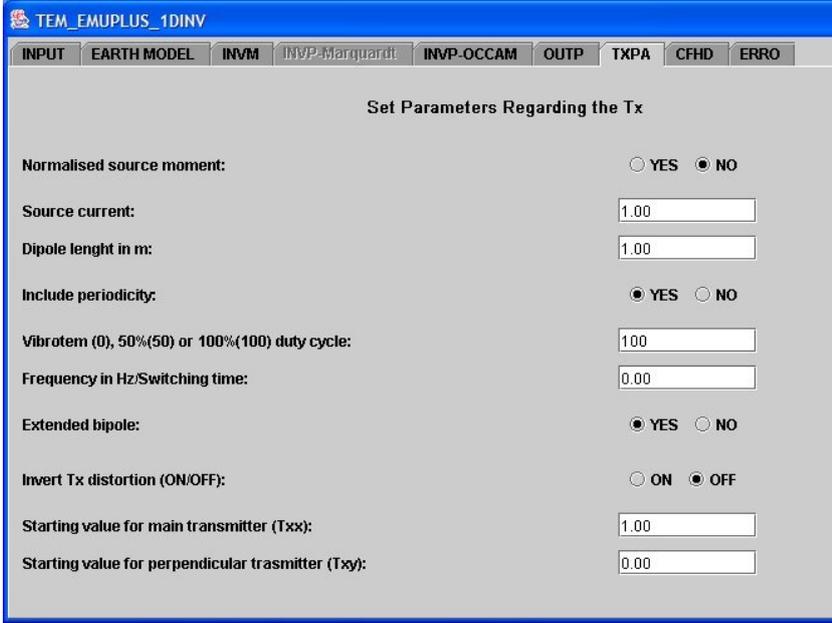
**Switching time/Frequency:** Angabe der Zeit zwischen dem Umschaltsignal oder der Signalfrequenz.

**Extended bipole:** Auswahl, ob bei der Vorwärtsrechnung nur 1 Transmitterdipol angenommen wird ('nein') oder ob mehrere Dipole zu einem gemeinsamen Dipol superpositioniert werden ('ja').

**Invert Tx-distortion:** Bei 'ja' werden die Tx-Verzerrungsparameter Txx und Tyx joint-invertiert und die nächsten zwei Felder müssen ausgefüllt werden.

**Starting value for main transmitter (Txx):** Setzt den Startwert für den Haupttransmitter.

**Starting value for perpendicular transmitter (Txx):** Setzt den Startwert für den Transmitter, der im rechten Winkel zum Haupttransmitter steht.



TEM\_EMUPLUS\_1DINV

INPUT EARTH MODEL INVM INVP-Marquardt INVP-OCCAM OUTP TXPA CFHD ERRO

Set Parameters Regarding the Tx

Normalised source moment:  YES  NO

Source current:

Dipole length in m:

Include periodicity:  YES  NO

Vibrotem (0), 50%(50) or 100%(100) duty cycle:

Frequency in Hz/Switching time:

Extended bipole:  YES  NO

Invert Tx distortion (ON/OFF):  ON  OFF

Starting value for main transmitter (Txx):

Starting value for perpendicular transmitter (Txy):

Abbildung C.62: Emuplus-Modul im GSI3D: Transmitterangaben

**CFHD** (Abbildung C.63) Eingaben für den Kalibrationsfaktor ('CF').

**Preset for CF:** Einfügen eines CF-Startwertes.

**Weight CF as much as all layers:** Setzt den Eintrag der Faktoren auf '1' oder gleich der Anzahl der Schichten in dem Feld der Occam-Inversion und schreibt diesen in die Glättungsmatrix

**Free-CF-fixes in iteration:** kann auf '0' oder '-1' gesetzt werden und gilt nur für die Marquardt-Inversion. Bei '0' wird der Algorithmus gezwungen, ein Modell ohne eine Änderung des Kalibrationsfaktors zu finden, bei '-1' kann der Faktor vom Algorithmus nach der ersten Iteration geändert werden.

**Never free CFs in storages over:** Wenn die Faktoren geändert werden können, werden höhere Datensätze als der Startwert ausgeschlossen.

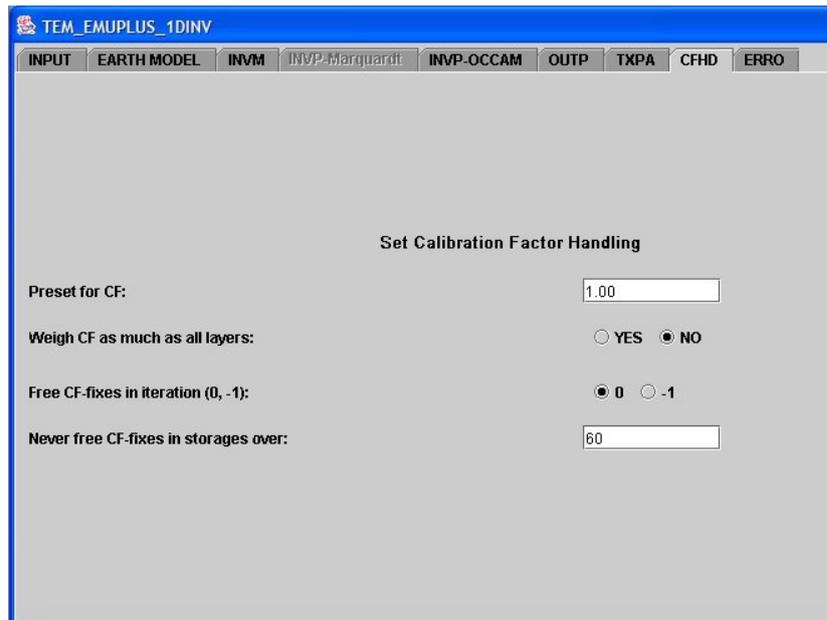


Abbildung C.63: Emuplus-Modul im GSI3D: Optionen für den Kalibrationsfaktor

**ERRO** (Abbildung C.64) Angaben bzgl. der Definition des Misfits und der Fehlerabschätzungen.

**Shall chi be used (RMS otherwise):** Angabe, welcher Fehlertyp verwendet werden soll. Bei 'ja' wird  $\chi$  (Misfit, nach Datenfehler gewichtet) genommen, bei 'nein' der RMS-Fehler.

**Take number of free parameter into account:** Berücksichtigung der freien Parameter. Bei 'ja' wird der Misfit nicht bzgl. der Anzahl der Datenpunkte normalisiert, sondern bzgl. der Anzahl der Datenpunkte minus der Anzahl der freien Parameter.

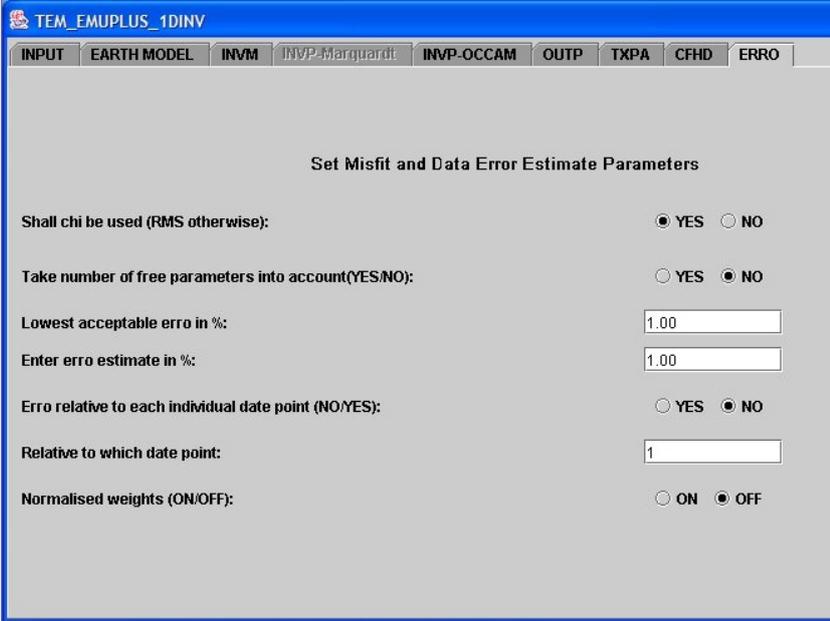
**Lowest acceptable error in %:** Datenfehler unterhalb dieses Wertes werden auf diesen Wert gesetzt.

**Enter error-estimate in %:** Wenn die Fehlerschätzungen 0 werden, werden sie auf diesen Wert gesetzt.

**Relative to each individual data point:** Die Auswahl kann zwischen 'ja' und 'nein' erfolgen.

**Relative to which data point:** Dieser Datenwert (z.B. der 25. Datenpunkt) wird als absoluter Fehlerwert verwendet, wenn keine Fehlerschätzungen gefunden werden oder beim vorigen Feld 'nein' gewählt wurde.

**Normalized weights:** Bei 'ja' werden die normalisierten Wichtungen für jeden Datenpunkt verwendet.



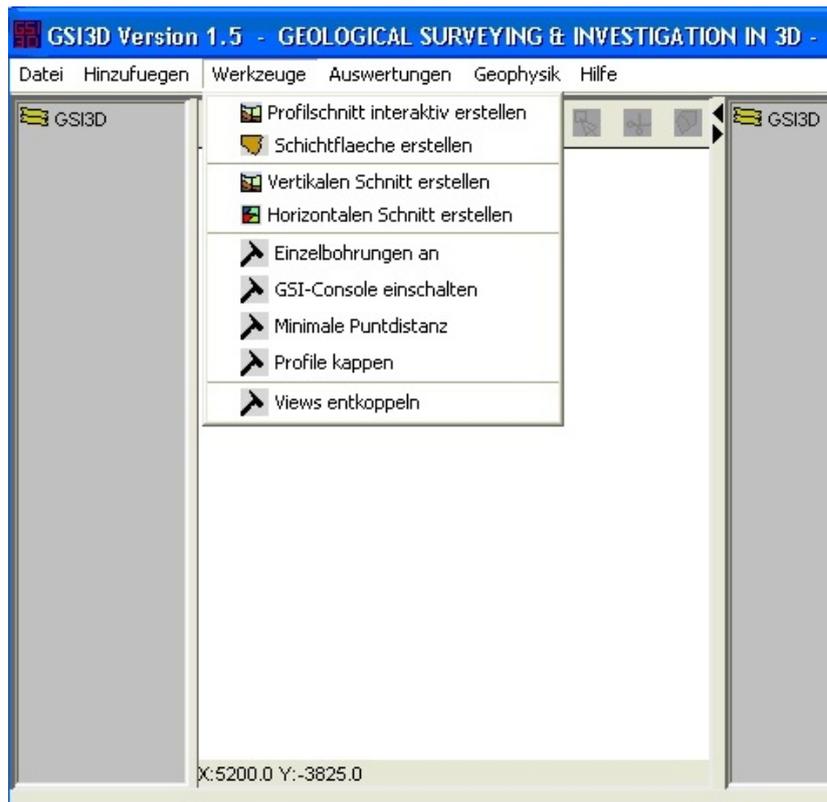
The screenshot shows a software window titled "TEM\_EMUPLUS\_1DINV" with a menu bar containing "INPUT", "EARTH MODEL", "INVM", "INVP-Marquardt", "INVP-OCCAM", "OUTP", "TXPA", "CFHD", and "ERRO". The main area is titled "Set Misfit and Data Error Estimate Parameters" and contains the following settings:

- Shall chi be used (RMS otherwise):  YES  NO
- Take number of free parameters into account(YES/NO):  YES  NO
- Lowest acceptable erro in %:
- Enter erro estimate in %:
- Erro relative to each individual date point (NO/YES):  YES  NO
- Relative to which date point:
- Normalised weights (ON/OFF):  ON  OFF

*Abbildung C.64: Emuplus-Modul im GSI3D: Optionen für den Kalibrationsfaktor*

## Erstellen & Laden vertikaler und horizontaler Schnitte

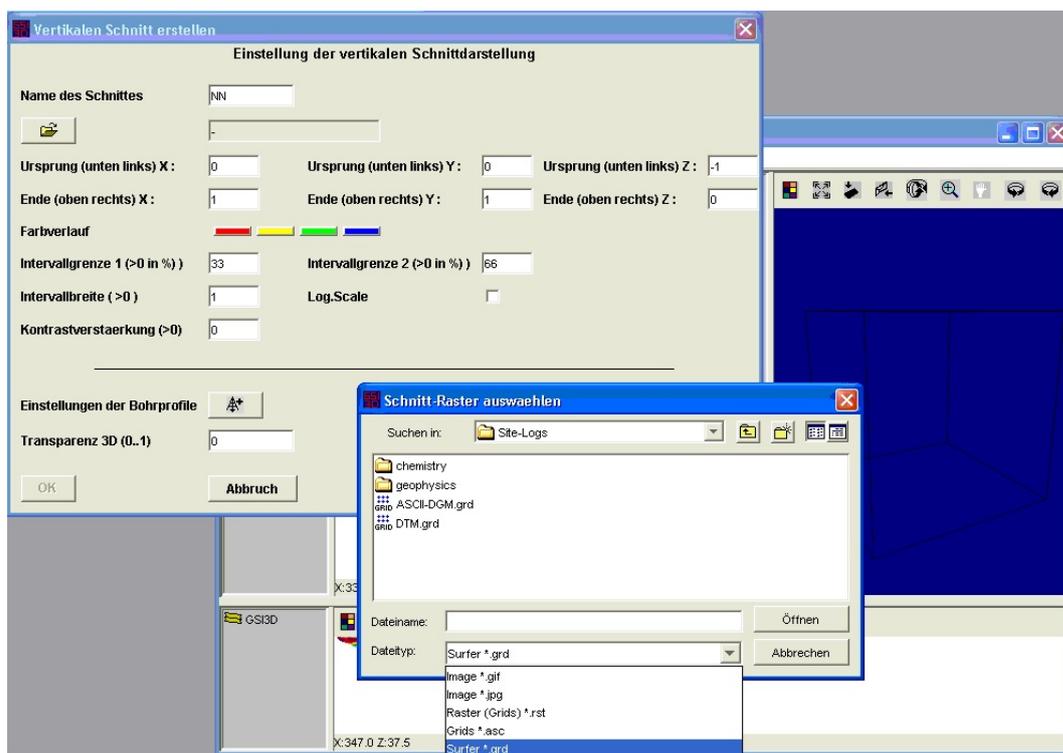
Zum Erstellen von vertikalen und horizontalen Schnitten werden unter dem Menüpunkt **Werkzeuge** die Optionen **'Vertikale Schnitte erstellen'** und **'Horizontale Schnitte erstellen'** in Abbildung C.65 angeboten. Diese Optionen wurden während des NORISC-Projektes implementiert, um flächenhafte nicht-bohrlochspezifische Daten innerhalb des GSI3D darzustellen. Dadurch sollten Vergleichsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Methoden und Datensätzen ermöglicht werden, da die Geophysik ihre Ergebnisse großteils als Bilder präsentiert.



**Abbildung C.65:** GSI3D-Menü: Menüpunkte zum Erstellen von horizontalen und vertikalen Schnitten.

Nach Wahl der Option der vertikale Schnitte öffnet sich das Dialogfenster in Abbildung C.66. Nach Anklicken des Datei-Dialogs zum Öffnen einer Datei ('Schnitt-Raster wählen') hat man die Möglichkeit zwischen den Formaten für Bilder (\*.jpg und \*.gif) und Rasterdaten (\*.rst, \*.grd und \*.asc) zu wählen. Nach Auswahl der Datei werden die Anfangs- und End-Koordinaten in die entsprechenden Felder eingetragen. Bei Wahl einer Raster-Datei hat man zusätzlich die Möglichkeit den Farbverlauf, zwei Intervallgrenzen für die zweite und dritte Farbe, die Intervallbreite und eine logarithmische Skalierung (bei großen Wertebereichen) festzulegen. Die Möglichkeit der Kontrastverstärkung und eine mögliche Transparenz besitzt nur rein farbliche/visuelle Aspekte. Die Einstellungen für die Bohrprofile können der vorigen Beschreibung entnommen werden.

Im Gegensatz zu den vertikalen Schnitten werden bei der Erstellung der horizontalen Schnitte in Abbildung C.67 nur die Koordinaten des Bildursprungs (welcher immer in der unteren lin-



**Abbildung C.66:** GSI3D-Menü: Erstellen von vertikalen Schnitten.

ken Ecke des Ursprungsbildes / Rasters liegt), das Verhältnis der Pixel/Zellen-Größe und der Rotationswinkel angegeben. Wie für vertikale Schnitte kann man auch hier wieder zwischen Bild- und Raster-Daten wählen und für Rasterdaten eine Farbvergabe vornehmen.

Zusätzlich kann man für die 3D-Ansicht einstellen, in welcher Höhe der Schnitt liegen soll. Dabei kann zwischen einer fixen Höhe oder einer relativen Höhe zu einem existierenden Höhenmodell gewählt werden.

Nach Abspeichern der Daten in eine \*.gxml-Datei können diese Schnitte über den Menüpunkt **'Vertikale / Horizontale Schnitte aus XML-Datenbank einlesen'** (s. Abbildung C.68) in dem Menü **'Hinzufügen'** wieder geladen werden. Nach Wahl der entsprechenden Option erscheint ein Auswahldialog, welcher die verfügbaren Schnitte anzeigt. Man hat nun die Möglichkeit diese mittels 'Anhängen' bzw. 'Einfügen' in das Programm einzulesen oder ausgewählte Schnitte mittels 'Löschen' wieder aus der Auswahl herauszunehmen.

Innerhalb des Programms kann man wie bei den anderen Profilen über 'Eigenschaften' Darstellungsparameter, wie z.B. die Transparenz, ändern.

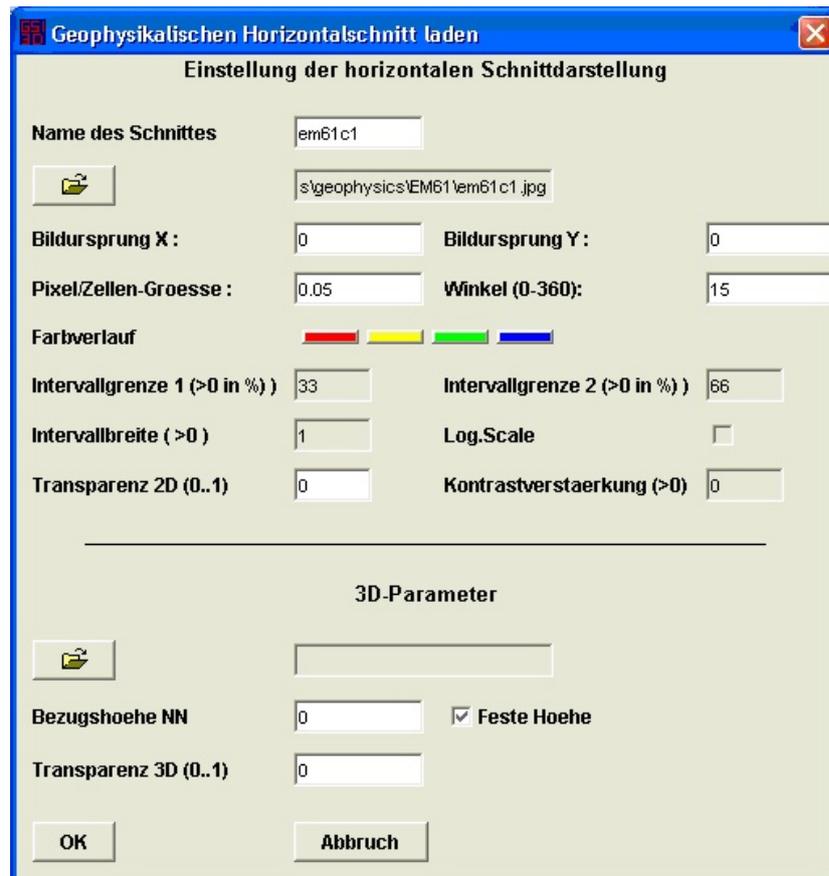


Abbildung C.67: GSI3D-Menü: Erstellen von horizontalen Schnitten.

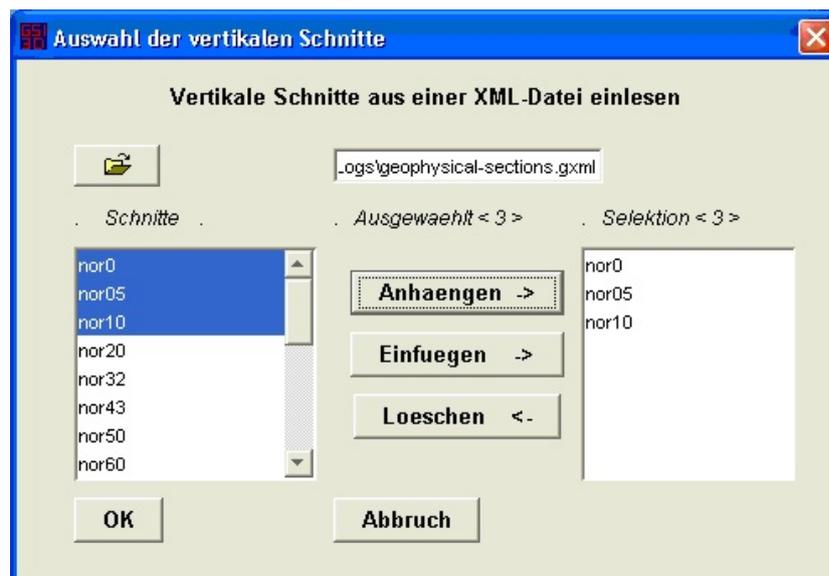


Abbildung C.68: Auswahl-Dialog zum Einlesen von horizontalen und vertikalen Schnitten aus einer Datenbank.

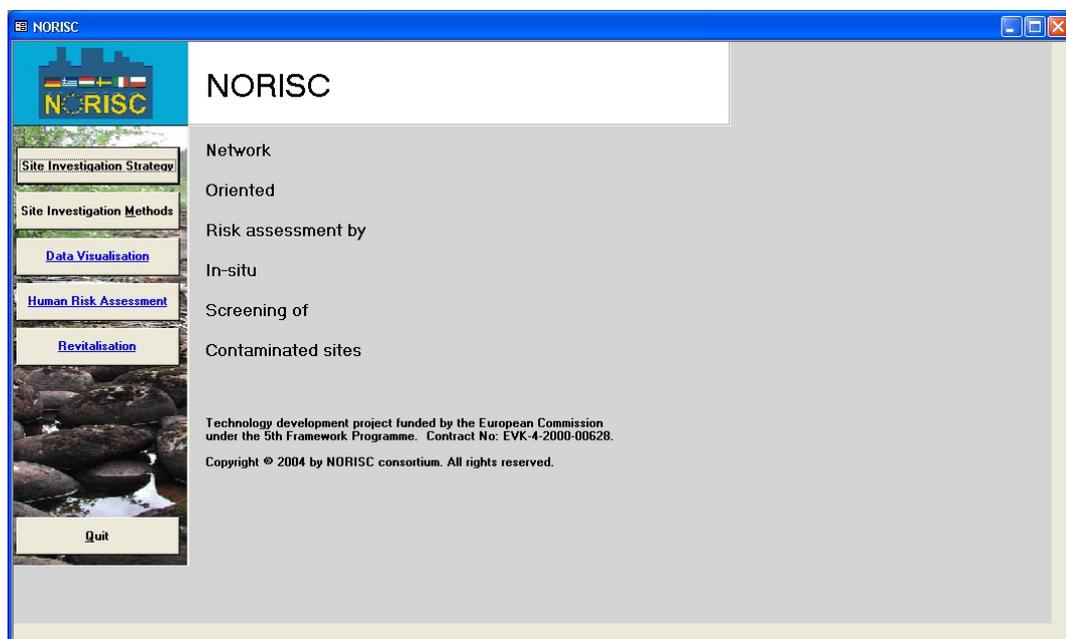


---

## DAS DSS-MODUL

---

Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau und die Handhabung der NORISC-DSS-Software anhand von Bildschirmfotos erläutert und demonstriert. Nach dem Start der MS-Access-Anwendung erscheint der Eröffnungsbildschirm (Abb. D.1).



*Abbildung D.1: Übersicht über das NORISC-Software-Paket.*

Die möglichen Optionen sind: 'Site Investigation Strategy', 'Site Investigation Methods', der Link zum Starten der Visualisierungssoftware GSI3D, das 'Human Risk Assessment' und das Revitalisierung.

Die 'Site Investigation Strategy' (kurz SIS) wurde entwickelt, um einen flexiblen und dy-

namischen Untersuchungsansatz zu ermöglichen. Die Schlüsselemente hierfür sind sowohl Kombination von geophysikalischem Screening in Kombination mit den herkömmlichen chemischen und (hydro-) geologischen Untersuchungstechniken als auch die tägliche Auswertung der erzielten Ergebnisse und eine daraus resultierende mögliche Anpassung an den Untersuchungsplan. Alle Untersuchungspunkte werden per GPS erfasst und zusammen mit den gemachten Untersuchungsergebnissen auf ein Laptop übertragen, um noch vor Ort ausgewertet zu werden.

Die nächste Auswahlmöglichkeit ist das DSS-Programm und wird im nächsten Abschnitt beschrieben. Die Visualisierungssoftware GSI3D wird mit ihren neuen geophysikalischen Modulen im Kapitel 3.6 bzw. Appendix C erläutert. Weitere in dieser Arbeit nicht näher beschriebene Auswahlmöglichkeiten bieten die Module für die toxische und biologische Risikobewertung für Menschen und das Revitalisierungs-Modul.

Nach Auswahl der Option 'Site Investigation Methods' gelangt man in das entsprechende DSS-Modul. Über eine Bildschirmmaske (s. Abbildung D.2) werden allgemeine Angaben über die Fläche abgefragt. Hier werden erste Parameter für die späteren Zeit- und Kostenberechnungen in Form von Größe der Fläche, Untersuchungstiefe, geschätzter Stundenlohn und Anzahl möglicher (chemischer) Bodenproben angegeben, bzw. ausgerechnet.

**Abbildung D.2:** DSS-Modul: allgemeine Angaben

Im Fenster *Geochemical Site Characteristics* in Abbildung D.3 werden die Angaben über die chemischen Untersuchungen getätigt. Nach Angabe der gewünschten in-situ-Untersuchungsbereiche (Boden, Grundwasser, Boden-Gas) ist eine Auskunft über die einzelne Untersuchungsmethoden möglich. Obwohl der Schwerpunkt auf in-situ-Methoden liegt können auch labor-technische Verfahren mit in den Auswertungsalgorithmus aufgenommen werden. Die Labor-

Verfahren dienen der Kalibrierung der untersuchten in-situ-Proben. Je nach Land existieren unterschiedliche chemische Grenzwerte, welche über die Option 'Guideline Values' überprüft werden können. Der Kontaminanten-Bereich umfasst, wie schon in Abschnitt 3.3 erwähnt, eine umfangreiche Liste an sogenannten Kontaminationsprofilen, welche den unterschiedlichen industriellen Nutzungen die am häufigsten dort anzutreffenden chemischen Schadstoffe zuordnet. Bei Bedarf könnten weitere Komponenten hinzugefügt oder gelöscht werden.

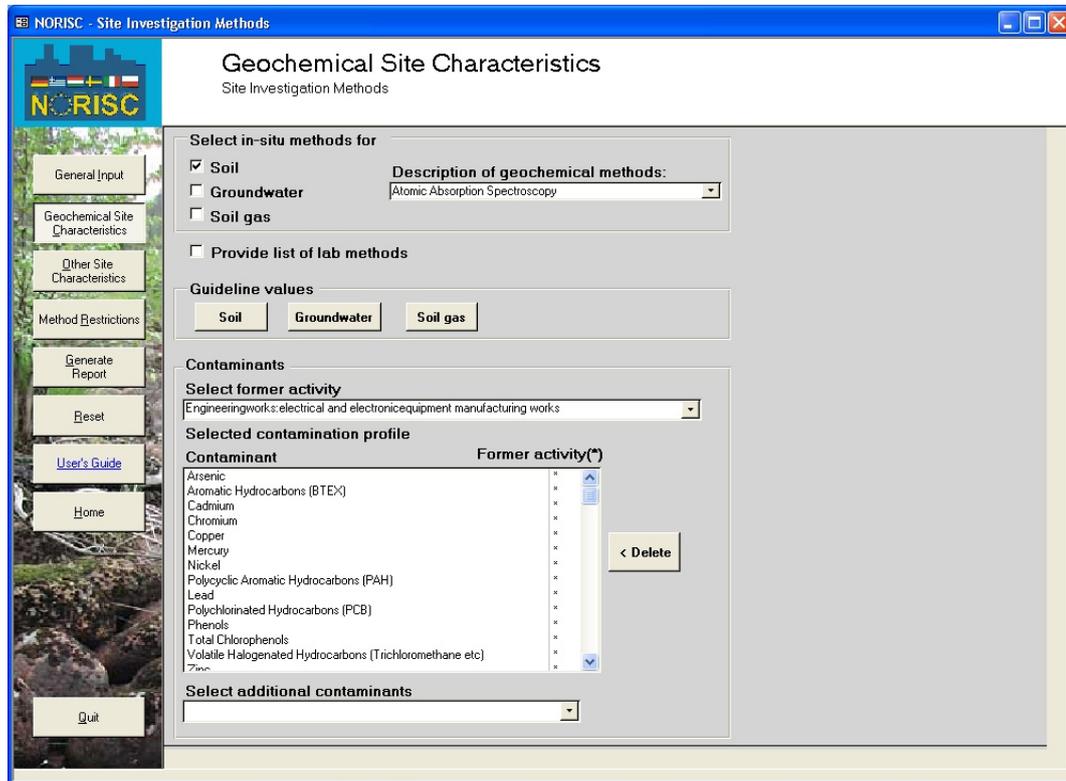


Abbildung D.3: DSS-Modul: geochemische Flächencharakterisierung

Die Angaben zur Untersuchung möglicher Untergrundstrukturen werden im Feld 'andere Flächencharakteristiken' in Abbildung D.4 getätigt. Hier besteht die Möglichkeit geologische und geophysikalische Methoden für die Untersuchungsziele auszuwählen. Dabei ist zu differenzieren, ob nur jeweils eine oder beide Disziplinen im Auswertalgorithmus berücksichtigt werden sollen. Wie bei der geochemischen Flächencharakterisierung besteht auch hier die Möglichkeit, sich einzelne Untersuchungsmethoden anzeigen bzw. erläutern zu lassen. Die Hauptuntersuchungsparameter sind die Erkundung bzw. Lokalisierung des Grundwasserspiegels, der hydraulischen Leitfähigkeit, der effektiven Porosität und der vertikalen und lateralen Ausdehnung der Stratigraphie. Weiterhin können sekundäre Parameter, wie beispielsweise das Lokalisieren von unterschiedlichen Bodenarten oder das Vorhandensein von Brüchen, kristallinem Gestein oder Aquiferen, eingetragen werden.

Anthropogene Untersuchungsziele, wie z.B. Rohre, Fundamente oder Tunnel, können über eine separate Liste ausgewählt werden.

Abschließend können mögliche Einschränkungen für die Untersuchungsmethoden eingegeben werden (vergleiche Tabelle 3.4). Der Grad der Schwere der Einschränkung richtet sich nach dem prozentualen Vorhandensein auf oder der Nähe zu dem Untersuchungsgebiet, wobei

**NORISC - Site Investigation Methods**

**Other Site Characteristics**  
Site Investigation Methods

Select group of methods to investigate other site characteristics

Both geophysical and geological/hydrogeological methods

Geophysical methods only

Geological/hydrogeological methods only

Description of methods:  
DC resistivity measurements, tomography, medium density

Main parameters to be measured

Groundwater level

Hydraulic conductivity

Effective porosity

Vertical extent of stratigraphy

Lateral extent of stratigraphy

Secondary parameters to be measured

<input type="checkbox"/> Water content	<input type="checkbox"/> Aquifers	Occurrence of	<input type="checkbox"/> Fractures and discontinuities	Occurrence of
<input type="checkbox"/> Pore water pressure	<input type="checkbox"/> Aquitards		<input checked="" type="checkbox"/> Crystalline rock	<input type="checkbox"/> Clay
<input type="checkbox"/> Hydraulic transmissivity	<input checked="" type="checkbox"/> Aquicludes		<input checked="" type="checkbox"/> Karst	<input type="checkbox"/> Silt
<input type="checkbox"/> Average groundwater velocity			<input type="checkbox"/> Sedimentary rock	<input type="checkbox"/> Sand
<input checked="" type="checkbox"/> Groundwater direction				<input type="checkbox"/> Gravel
				<input type="checkbox"/> Till

Anthropogenic underground objects/constructions

Select underground objects/constructions

Selected underground objects/constructions

Pipes, cables	Non-metallic	<input type="button" value="Delete"/>
Tunnels	Sub-horizontal	

Abbildung D.4: DSS-Modul: geologisch-geophysikalische Flächencharakterisierung

drei Möglichkeiten je Hindernis existieren (kleiner, mittlerer und großer Einfluss). Abbildung D.5 zeigt die Eingabemaske.

**NORISC - Site Investigation Methods**

**Method Restrictions**  
Site Investigation Methods

Restrictions for investigation methods

Select restrictions

Selected restrictions

Metal pipeline, unused cable (non-ferr.)	> 10 m/ 100 sqm
Buildings	< 50 % of total area
Steel concrete	< 20 % of total area
Pipelines with cathodic protection	Far (> 50 m distance)

Abbildung D.5: DSS-Modul: Einschränkungen für Untersuchungsmethoden

Nach Auswahl aller benötigten Informationen wird der Auswahl-Algorithmus über 'Generate Report' gestartet und das Ergebnis über das Programm *Excel* generiert. Auszugsweise ist dies in Abbildung D.6 dargestellt. Das Ergebnis beinhaltet außer den maximal drei optimalen Methodenkombinationen sowohl für die chemischen und als auch für die nicht-chemischen Untersuchungen auch die Auflistung aller Methoden, welche aufgrund der gewählten Untersuchungsziele mit einem 'A' oder 'B' in ihrem finalen Ranking versehen sind (vergl. Kapitel 3.4). Weiterhin wird für jede in Frage kommende Methode eine Beschreibung mit herausgegeben, um so die Benutzer auf mögliche alternative oder bisher unbekannte Untersuchungsverfahren hinzuweisen. Es ist sinnvoll, mehrmals verschiedene Untersuchungsparameter in die DSS einzugeben, da manche Untersuchungsziele nur von wenigen oder einzelnen Methoden, die unter Umständen kostspielig sind, lokalisiert werden können und so die Kosten für eine Untersuchung erhöhen.

Project name	Project manager			Site name		Site location
Norisc	Balázs Morvai			Test site #4		Balassagyarmat
RESULTS						
SUGGESTED COMBINATIONS OF CHEMICAL FIELD METHODS: ONE COMBINATION FOR EACH MEDIA MORE METHODS ARE SHOWN IN THE SHEET 'GEOCHEMICAL METHODS'						
	Method 1	Method 2	Method 3	Total Cost( )	Total Time(h)	
Soil	XRF-mobile	GC/FID		5714,7	20,5	
Groundwater	Titri	GC/FID	not necessary	2835,5	20,3	
Soil gas	GC/FID		not necessary	1819,3	12,5	
SUGGESTED COMBINATIONS OF HYDROGEOLOGICAL, GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL METHODS MORE METHODS ARE SHOWN IN THE SHEET 'OTHER METHODS'						
	Method 1	Method 2	Method 3	Total Cost( )	Total Time(h)	
Combination 1	Hydrogeology : Tracer Tests : M	GPR : Unshielded Antennas (	Geology : Soil Sample : L	3251,4	30,5	
Combination 2	Hydrogeology : Tracer Tests : M	GPR : Unshielded Antennas (	Geology : Soil Sample : M	3636,9	33,5	
Combination 3	Hydrogeology : Tracer Tests : M	GPR : Unshielded Antennas (	Geology : Soil Sample : H	5178,9	45,5	

**Abbildung D.6:** DSS-Modul: Ausschnitt aus einem DSS-Ergebnis; Übersicht über die optimalen chemischen und nicht-chemischen Methodenkombination, inkl. Zeit- und Kostenabschätzung.



---

## Liste der Symbole

---

<b>Symbol</b>	<b>Größe</b>	<b>Maßeinheit</b>
$A, B, M, N$	Elektrodenpositionen	—
<b>B</b>	Magnetische Flussdichte	$Tesla = Vs/m^2$
$C_1, C_2$	Integrationskonstanten	—
<b>D</b>	Dielektrische Verschiebung	$As/m^2$
$\delta$	Diracsche Delta-Funktion	—
$\delta$	Skintiefe	$m$
<b>E</b>	Elektrisches Feld	$V/m$
$E_x$	Elektrisches Feld, x-Komponente	$V/m$
$\varphi$	Elektrisches Potential	$V$
$e^+, e^-$	Amplitude des einfallenden/reflektierten elektrischen Feldes	
$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$	Dielektrizitätskonstante	$As/Vm$
$\varepsilon_0$	Elektrische Dielektrizitätskonstante	$8,854 \cdot 10^{-12} As/Vm$
$\varepsilon_r$	Relative Dielektrizitätszahl	—
$f$	Frequenz	$Hz = 1/s$
<b>H</b>	Magnetische Feldstärke	$A/m$
$H_y$	Magnetische Feldstärke, y-Komponente	$A/m$

$i$	Imaginäre Einheit	—
$I$	Stromstärke	$A$
$\mathbf{j}$	Stromdichte	$A/m^2$
$\mathbf{J}, \mathbf{S}$	Jacobi-Matrix	—
$k$	Wellenzahl	$1/m$
$k$	Geometriefaktor	—
$\kappa$	Magnetische Suszeptibilität	—
$\lambda$	Regularisierungsparameter	—
$\mathbf{M}$	Magnetisierung	$A/m$
$\mu = \mu_0 \mu_r$	Permeabilität	$Vs/Am$
$\mu_0$	Magnetische Permeabilitätskonstante	$4\pi \cdot 10^{-7} Vs/Am$
$\mu_r$	Relative Permeabilitätszahl	—
$\phi$	Phase	<i>Grad</i>
$\Phi$	Effektive Porosität	%
$q$	Raumladungsdichte	$As/m^3$
$Q$	Response-Parameter	—
$\mathbf{r}, \mathbf{r}_0$	Raumpunkt	—
$\rho, \rho_a$	Elektrischer Widerstand (spezifischer/scheinbarer)	$\Omega m = Vm/A$
$S$	Sättigungsgrad	—
$\sigma, \sigma_0$	Elektrische Leitfähigkeit (spezifische)	$S/m = A/Vm$
$\sigma_{q0}$	Elektrische Grenzflächenleitfähigkeit (spezifische)	$S/m = A/Vm$
$\sigma_w$	Elektrische Leitfähigkeit des Porenwassers (spezifische)	$S/m = A/Vm$
$\bar{\sigma}(z)$	Integrierte elektrische Leitfähigkeit (spezifische)	$S/m = A/Vm$
$U$	Elektrische Spannung	$V$
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz	$1/s$
$\mathbf{Z}$	Impedanz	$\Omega$
$\nabla$	Nabla-Operator	—
$\Delta$	Laplace-Operator	—

---

## Danksagung

---

Ich danke Herrn Prof. Tezkan für die Ermöglichung und Betreuung der Dissertation. Durch ihn hatte ich die Möglichkeit, nach meinem Studienabschluss weiter in der Geophysik tätig sein zu können.

Ein besonderer Dank geht an das NORISC-Team, hier stellvertretend durch Frau Dr. Barbara Möhlendick (Europa-Büro der Stadt Köln; Projekt-Koordination), Michael Kremer und Karl-Michael Gerhold (Umweltamt der Stadt Köln). Durch sie und das NORISC-Projekt konnte ich Erfahrungen über den geophysikalischen Bereich hinaus sammeln und ein Verständnis für interdisziplinäre Zusammenhänge entwickeln.

Herrn Dr. Hans-Georg Sobisch möchte ich für die Bereitstellung seines Programmes *GSI3D* und für seine Unterstützung in programmier-technischen Aspekten danken. Er gab mir immer Hinweise und Impulse, um meine Module zu verbessern. Ohne ihn wäre meine Dissertation so nicht zustande gekommen.

Danken möchte ich auch Jörn Lange, Martin Thiemer, Rainer Bergers, Roland Martin, Stefan Hellwig, Claudia Raimundo, Tim Seher und den weiteren (ehemaligen) Mitgliedern des Institutes. Bei Problemen waren sie immer hilfsbereit, offen für anregende und kritische Diskussionen und halfen mir teilweise bei der Korrektur der Dissertation.

Herrn Dr. Thomas Günther möchte ich für die Verwendung seines Programmes *DC2DInvRes* und dessen Anpassung an meine Module danken.

Meinen Dank richte ich auch an Frau Schönwald und Frau Anstötz (Sekretariat), 'Lex' Wennmacher (Systemgruppe), Herrn Käselau (ehem. Institutsverwaltung) und Herrn Neßeler.

Mein größter Dank geht an meine Freundin Melanie, die immer an mich geglaubt hat, auch wenn ich mal einen Durchhänger hatte und an meine Eltern, die durch das Ermöglichen meines Studiums einen großen Beitrag geleistet haben, sodass ich diese Dissertation überhaupt angehen konnte.



---

# Erklärung

---

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit - einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen -, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem Einzelfall als Entlehnung kenntlich gemacht habe; dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; dass sie - abgesehen von unten angegebenen Teilpublikationen - noch nicht veröffentlicht worden ist sowie, dass ich eine solche Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde.

Teilpublikationen:

-

Die Bestimmungen der Promotionsordnung sind mir bekannt. Die von mir vorgelegte Dissertation ist von Prof. Dr. B. Tezkan betreut worden.

Köln, 2. November 2006.

Markus Perk

