

2D-Modellierung von Schlumberger-Sondierungen auf Fundamenten des ehemaligen Bahnbetriebswerkes Düren.

Hanni Roosen und Bülent Tezkan, Institut für Geophysik und Metereologie der Universität zu Köln.

Veranlassung und Zielsetzung

Nordöstlich von Düren (NRW) befindet sich parallel zur Bahnlinie Aachen-Köln das Gelände des ehemaligen Bahnbetriebswerkes Düren (Abb. 1), das zu Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten von Triebfahrzeugen diente. Nach der Verlagerung der Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten nach Aachen und Mönchengladbach wurden der Gebäudebestand und sämtliche Gleisanlagen Ende der 80er Jahre rückgebaut. Dabei ist unklar, inwieweit Fundamente im Untergrund verblieben sind. Nach Aussagen von Anwohnern wurden zudem große Mengen an Bauschutt während der Rückbauarbeiten im Boden zurückgelassen. In den Bereichen des ehemaligen Lokschuppens und seiner Nebengebäude liegen mindestens 300 - 600 qm Betonfundamente frei zutage oder sind mit Bauschutt und Schlacken bedeckt.

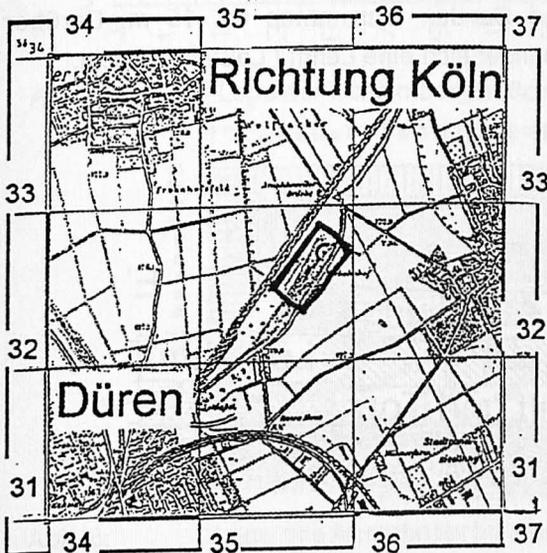


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes

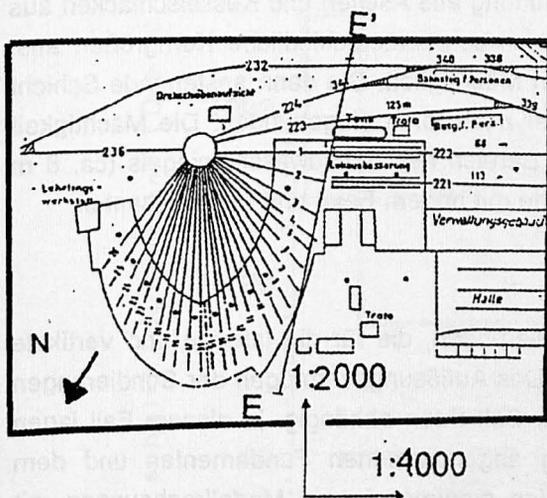


Abb. 2: Ausschnitt Bahngelände

Im Mai 1994 wurde die Firma ECOS, Aachen von der Deutschen Bahn AG mit einer Machbarkeitsstudie zur Sanierung des Geländes beauftragt. Diese beinhaltete die Entwicklung eines Sanierungskonzeptes für das ehemalige Bahnbetriebswerk Düren (Abb. 1), wozu auch ein Verwendungskonzept für die zurückgebliebenen Restfundamente erstellt wurde. Dazu sollte im Rahmen einer Diplomarbeit durch geophysikalische Messungen die horizontale und vertikale Ausdehnung der im Boden verbliebenen Restfundamente der ehemaligen Bebauung ermittelt werden. Je nach der gewählten Sanierungsvariante kann die Anwesenheit dieser Fundamentreste eine erhebliche Bedeutung besitzen, da diese abhängig von Menge, Ausbildung und Ausdehnung eine deutliche Verfahrensbehinderung bzw. Einschränkung verursachen können. Dies gilt insbesondere für mit einem Erdaushub verbundene Sanierungsmaßnahmen.

Das Gelände erstreckt sich in südwestlich-nordöstlicher Richtung, ist ca. 800 m lang und 90 m breit. Zu den Hauptbauwerken zählten die Drehscheibe mit Strahlgleisen, der Lokschuppen, die Lokreparaturhalle, Trafos, Schuppen, das Verwaltungsgebäude, die Betankungsanlagen mit Schienen und Weichen sowie Gleiskörper mit Schienen und Weichen. Abb. 2 zeigt einen Ausschnitt des Bahngeländes aus Abb. 1, in dem die geophysikalischen Messungen stattfanden. Auf den geologischen Schnitt E-E' wird in Abb. 4 eingegangen.

Geologie

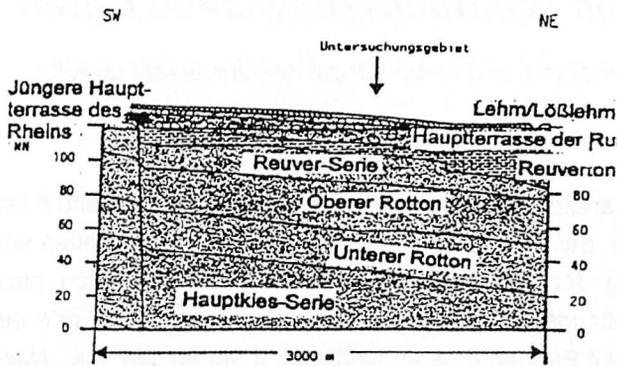


Abb. 3: Geologie

Das Gelände gehört zum südlichen Ausläufer der niederrheinischen Bucht (Abb. 3). Aus dem Tertiär stammt die Hauptkiesserie mit einer Mächtigkeit von bis zu 50 m aus Kiesen mit tonigen und feinsandigen Zwischenablagernungen. Darüber befindet sich die Rotton-Serie aus Fein- und Mittelsanden sowie Schluff und Tonhorizonten mit einer Mächtigkeit von ebenfalls etwa 50 m. Die Reuver-Serie aus Schluff-/Tonlagen mit eingeschalteten Braunkohlen hat eine Mächtigkeit von ca. 24 m. Aus dem Quartär stammt die jüngere Hauptterrasse des Rheins mit groben Schottern und Sanden sowie die Hauptterrasse der Rur aus Kiesen und Sanden, zusammen ca. 15 m. Darüber befindet sich eine Lehm / Lößlehmschicht.

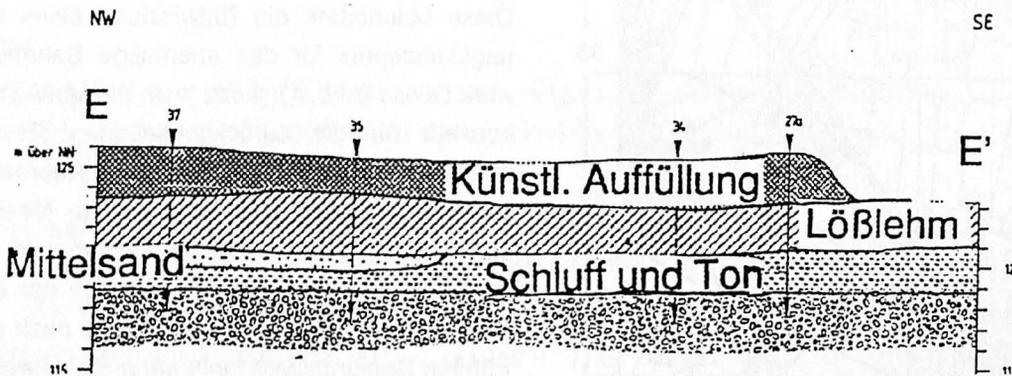


Abb. 4: Schnitt E - E' durch das Bahngelände

Auf diesem von der Firma Geotechnik erstellten Schnitt E-E' (Abb. 4) aus Abb. 2 erkennt man für das Bahngelände zunächst eine bis zu 5 m mächtige Aufschüttung aus Aschen und Kesselschlacken aus dem Bahnbetrieb. Letztere zeichnen sich besonders durch sehr unterschiedliche Korngrößen aus. Darunter befindet sich die Lößlehmschicht von 2 bis 4 m Mächtigkeit. Die dann anstehende Schicht ist im oberen Bereich sehr feinkörnig, z.T. schluffig aber auch tonig eingebunden. Die Mächtigkeit beträgt 1 bis 1,5 m. Darunter wird sie grobkörniger, im Bereich des Grundwasserspiegels (ca. 8 m unter Geländeoberkante) finden sich Mittel- bis Grobsande mit hohem Fein- und Mittelkiesanteil.

Vorüberlegungen

Die Erkundungen erfolgten mittels geoelektrischer Sondierungen, die für die laterale und vertikale Verteilung der Leitfähigkeit eine Aussage liefern sollten. Das Auflösungsvermögen der Sondierungen ist dabei wesentlich von den Leitfähigkeitskontrasten der Schichten abhängig. In diesem Fall lagen starke Widerstandskontraste zwischen den hochohmig angenommenen Fundamenten und dem anstehendem Löß bzw. Lößlehm vor. Im Vorfeld wurden eindimensionale Modellrechnungen mit synthetischen, vorwärts berechneten Daten durchgeführt, die anschließend mit einem Inversionsprogramm interpretiert wurden. Die Ergebnisse ließen eine gute Auflösung der Fundamente zum Anstehenden erwarten.

Messungen

Es wurden etwa 100 Schlumberger-Sondierungen in einem Meßraster von etwa 10*15 m durchgeführt, an manchen Punkten konnten wegen lagernder Halden keine Sondierungen vorgenommen werden. Die Lage der Meßpunkte zeigt Abb. 5, die Lage des Ausschnitts (Abb.5) im Bahngelände Abb. 6 Die Schlumberger-Sondierungen erfolgten bis zu einer maximalen Auslage von 100 m. Zusätzliche Messungen fanden außerhalb des Geländes auf umliegenden Feldern statt.



Abb. 5: Lage der Schlumberger-Sondierungspunkte

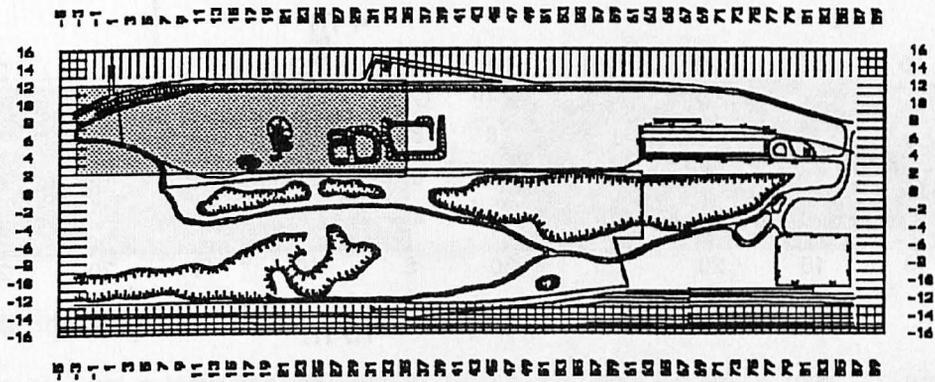


Abb. 6: Lage des Ausschnitts im Bahngelände

Meßbeispiele:

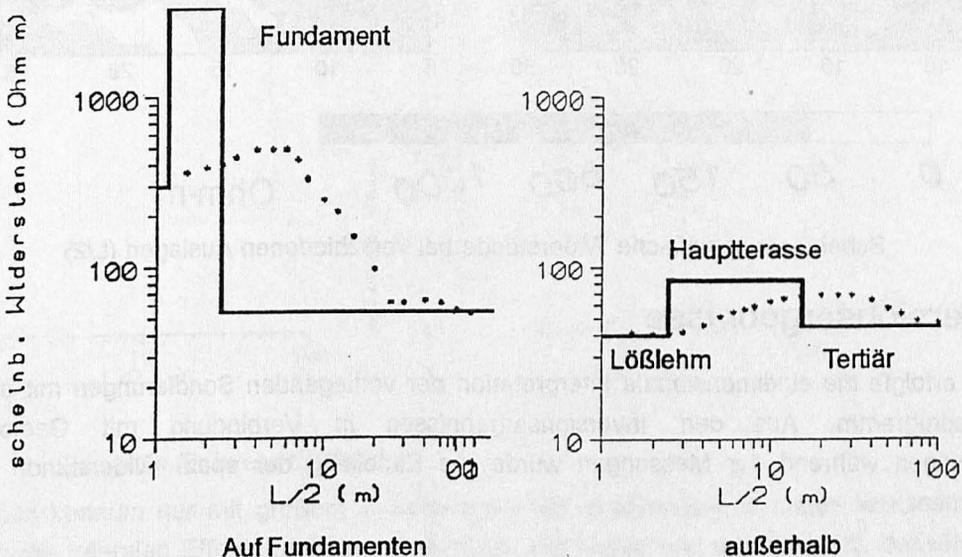


Abb. 7: Typische Meßkurven

In Abb. 7 sieht man zwei typische Sondierungskurven, einmal auf ungestörter Geologie sowie auf Fundamenten. Für die ungestörte Geologie erhält man einen Dreischichtfall mit einer etwa 1,5 m mächtigen Deckschicht mit einem Widerstand von etwa 40 Ωm (Lößlehm), darunter für die Hauptterasse einen Widerstand von etwa 80 Ωm bis zu einer Tiefe von etwa 15 m, anschließend für das Tertiär einen Widerstand von 45 Ωm . Im Gegensatz dazu liegen in der Kurve über dem Fundament wesentlich stärkere Widerstandskontraste vor. Der scheinbare Widerstand wächst von 350 Ωm auf über 500 Ωm , um dann auf etwa 50 Ωm abzusinken. Erklären kann man diese Kurve durch eine etwa 1 m mächtige Deckschicht mit einem Widerstand von 300 Ωm , dann bis in 2,5 m Tiefe einem „Fundament“ mit einem Widerstand von 1500 Ωm und darunter durch ungestörte Geologie.

Die gemessenen scheinbaren Widerstände wurden für verschiedene Auslagen ($L/2$) interpoliert. In Abb. 8 sind deutlich die sehr schlecht leitenden Flächen im Bereich der ehemaligen Drehscheibe und Gleisanlagen zu erkennen. Die scheinbaren Widerstände nehmen mit zunehmender Auslage ab, während die Anomaliefächen größer werden. Im Bereich der ehemaligen Halle liegen im allgemeinen viel geringere Widerstände vor.

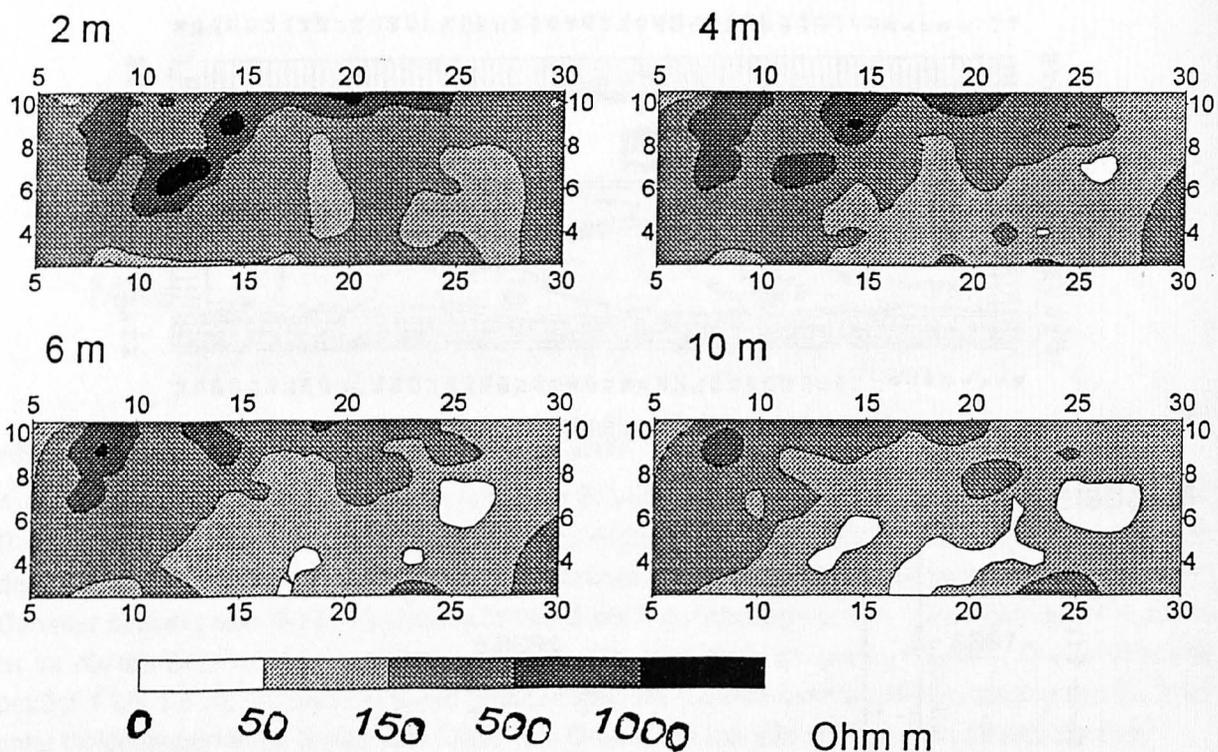


Abb. 8: Scheinbare spezifische Widerstände bei verschiedenen Auslagen ($L/2$)

1D-Inversionsergebnisse

Zunächst erfolgte die eindimensionale Interpretation der vorliegenden Sondierungen mit einem 1D-Inversionsprogramm. Aus den Inversionsergebnissen in Verbindung mit Geologie und Beobachtungen während der Messungen wurde die Einteilung der spez. Widerstände wie folgt angenommen:

spezifischer Widerstand in Ωm	Deutung
20 - 100	Deckschicht/Tertiär
100 - 500	Aufschüttung
500 - 1000	Haldenmaterial
≥ 1000	Fundamente

Unter der Voraussetzung, daß der spezifische Widerstand der Fundamente $\geq 1000 \Omega\text{m}$ ist, erhält man für die Lage der Restfundamente aus den 1D-Inversionsergebnissen folgendes Bild:

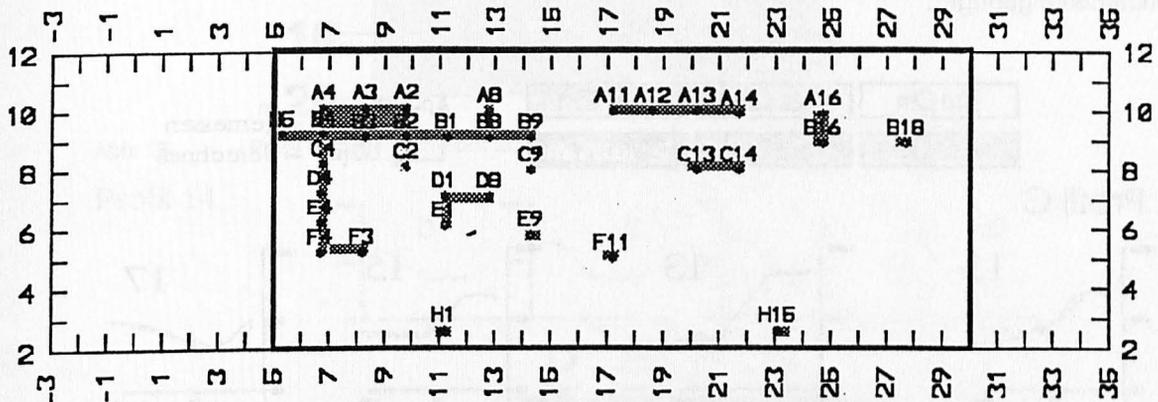


Abb. 9: Lage der Restfundamente nach 1D-Inversion (spez. Widerstand $\geq 1000 \Omega\text{m}$)

Die Restfundamente befinden sich demnach vor allem im Bereich des ehemaligen Lokschuppens / Drehscheibe sowie des Bahnsteiges und der ehemaligen Lehrlingswerkstatt.

2D-Modellierung

Die Voraussetzung des Horizontalschichtfalles für die 1D-Inversion war in dem Meßgebiet nicht erfüllt. Dies äußerte sich in vielen Meßkurven durch übersteile Abfälle/Anstiege der Kurven, starke Krümmung in den Extrema oder Sprünge in den Kurven. Beispiele dafür gibt Abb. 10.

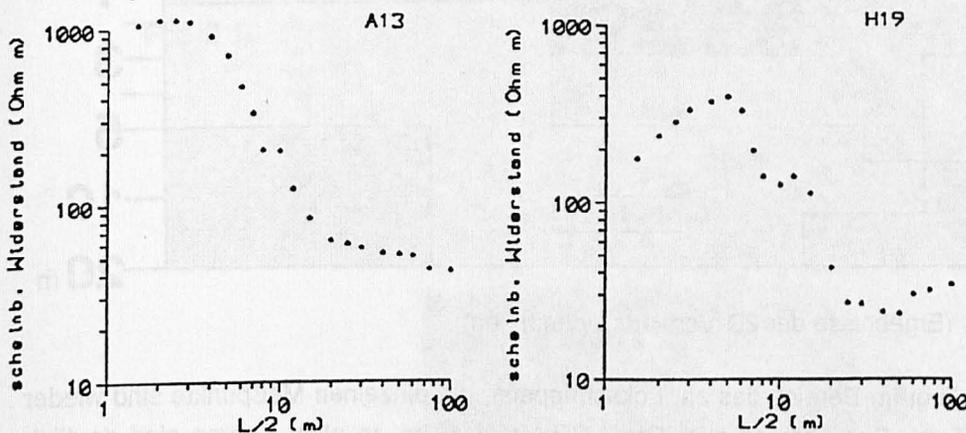


Abb. 10: Beispiele für laterale Effekte

Beide Kurven konnten nur mit großem Anpassungsfehler eindimensional erklärt werden. Bei A13 äußern sich die lateralen Effekte im übersteilen Abfall der Kurve und dem Versatz, der nicht durch das Versetzen der Elektroden entstanden ist. Bei H19 sieht man die starke Krümmung im Maximum, den übersteilen Abfall der Kurve und den kleinen Wiederanstieg des scheinbaren Widerstandes.

Nach Mundry (1981) erzeugen selbst zweidimensionale Strukturen in der Regel bei Punktquellen dreidimensionale Potentialfelder. Im 2D-Vorwärtsmodellierungsprogramm von Mundry wird dieses Problem durch Superposition entsprechender zweidimensionaler Potentiale mit einem Differenzenverfahren gelöst.

Grundlage der Modelle für die 2D-Vorwärtsmodellierung, die mit dem Programm von Mundry (1981) durchgeführt wurden, waren die 1D-Inversionsergebnisse.

Der dargestellte Teil des Profils C befindet sich im Bereich der ehemaligen Lokausbesserung. Das Modell selbst ist viel komplizierter als hier dargestellt, da große Widerstandsbereiche zusammengefaßt wurden. Die Punkte haben einen Abstand von jeweils 15 m zueinander. In den Meßkurven ist der Unterschied zwischen Kurven über Fundamenten und ohne zu erkennen. Bei C13 und C14 sind deutlich die hohen scheinbaren Widerstände und der steile Abfall der Kurven zu erkennen. Bei C15 sind die scheinbaren Widerstände durch die geringere Mächtigkeit der Fundamente geringer.

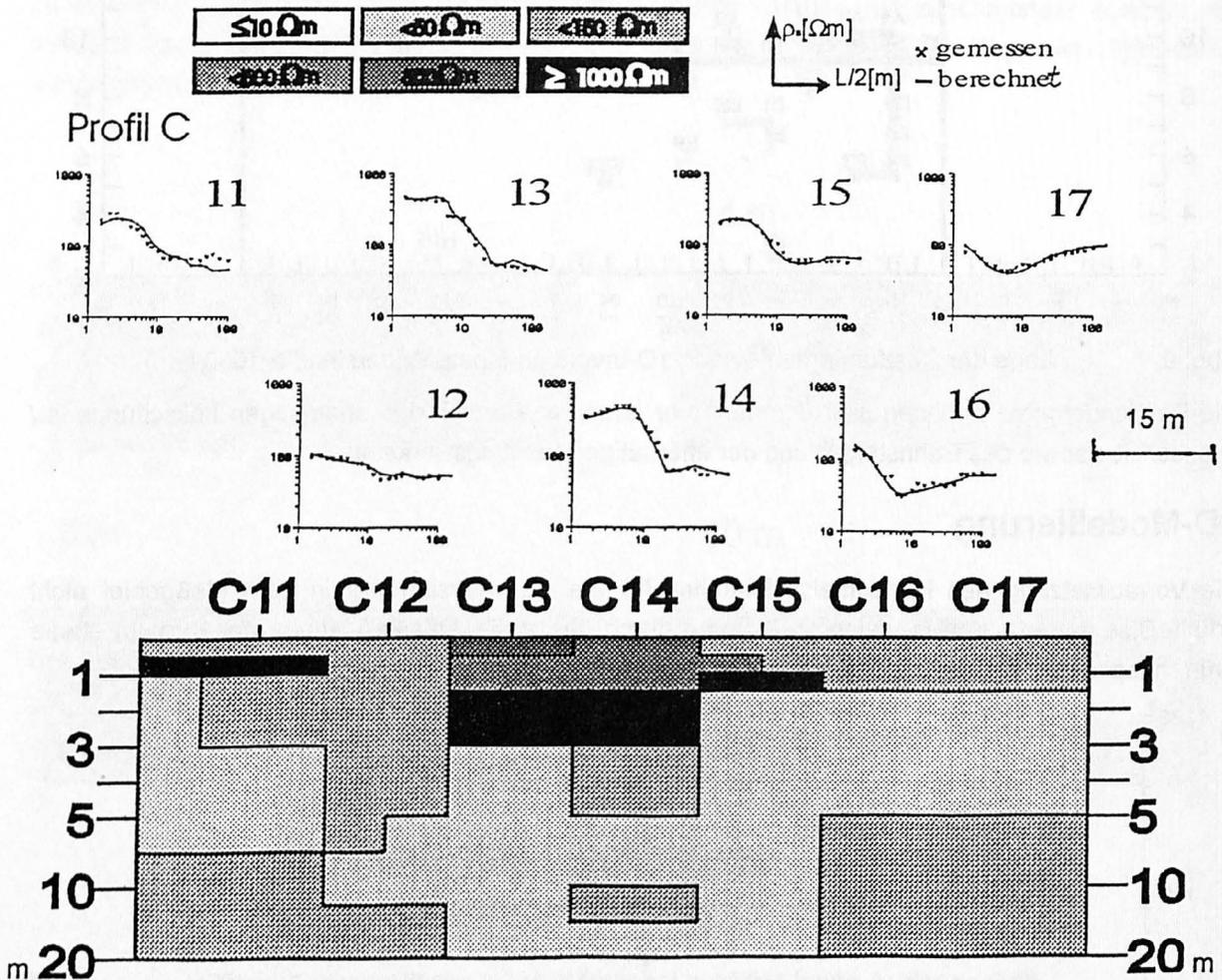
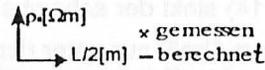
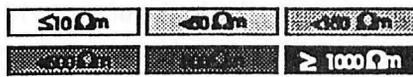


Abb. 11: Profil C (Ergebnisse der 2D-Vorwärtsrechnungen)

Das Profil G (Abb. 12) liegt im Bereich des eh. Lokschruppens, die einzelnen Meßpunkte sind wieder 15 m voneinander entfernt. Der Abstand zum Profil C beträgt 40 m. In allen Kurven sind deutlich laterale Effekte zu erkennen.

Die Profile 14, 15 und 16 haben einen Abstand von 15 m zueinander, der Abstand der Meßpunkte beträgt 10 m. Bei Profil 14 (Abb. 13) mußte bei der 2D-Vorwärtsmodellierung ein sehr gut leitender Block eingeführt werden, um den steilen Abfall der Kurve in G zu erreichen. Der gut leitende Block setzt sich auch im Profil 15 vergrößert fort. Es wird angenommen, daß der gut leitende Block durch einen hohen Stahlgehalt der Fundamente zu ehemaligen Strommasten erklärt werden kann.



Profil G

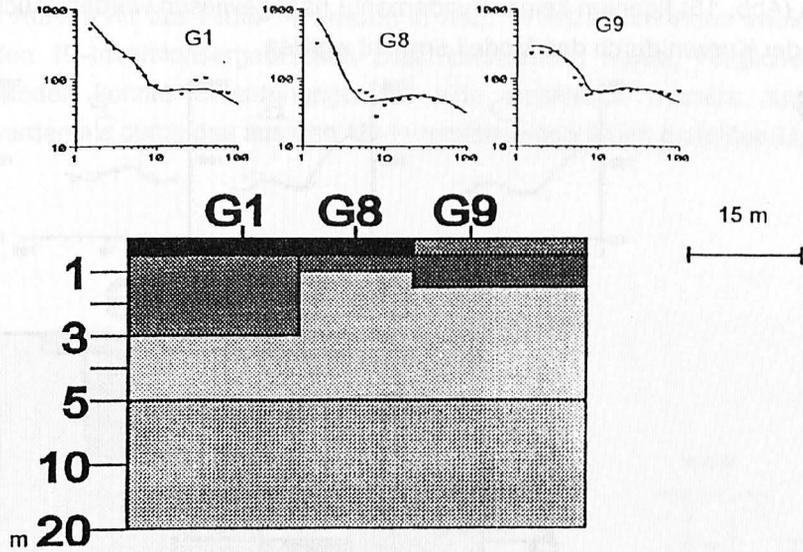


Abb. 12: Profil G (Ergebnisse der 2D-Vorwärtsrechnungen)

Profil 14

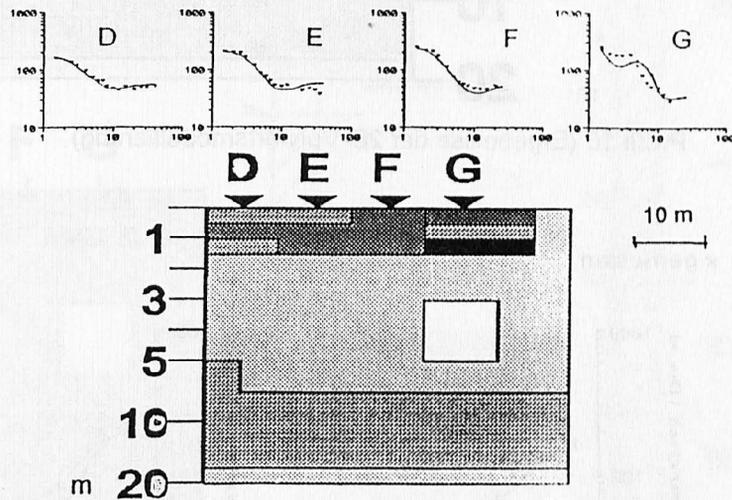


Abb. 13: Profil 14 (Ergebnisse der 2D-Vorwärtsmodellierung)

Profil 15

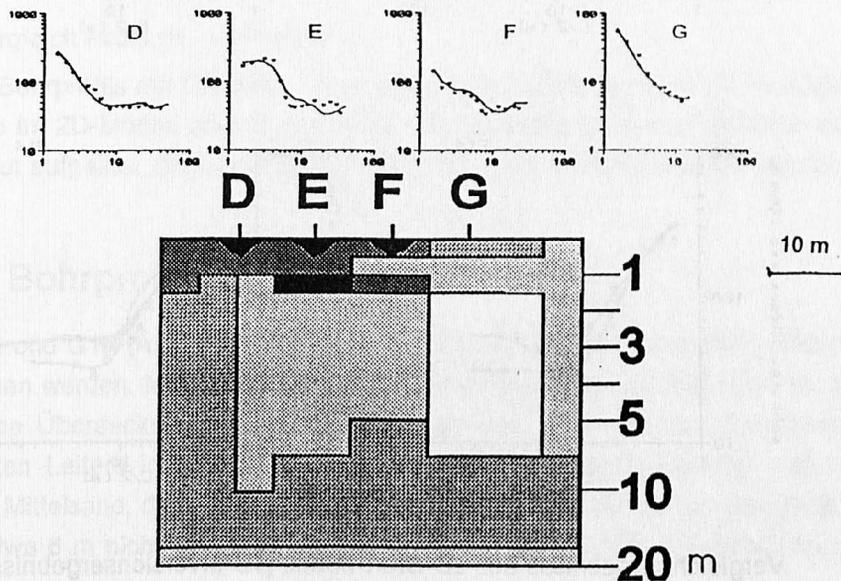


Abb. 14: Profil 15 (Ergebnisse der 2D-Vorwärtsmodellierung)

Im Profil 15 (Abb. 14) sinkt der scheinbare Widerstand im Punkt G auf unter $10 \Omega\text{m}$ ab. Fundamente finden sich in diesem Profil nur unter dem Punkt E in relativ kleiner Ausdehnung. In der Kurve F sind deutlich die Einflüsse des schlechten und sehr guten Leiters zu erkennen.

Im Profil 16 (Abb. 15) konnten keine Fundamente nachgewiesen werden. Auch hier konnte eine gute Anpassung der Kurven durch das Modell erreicht werden.

Profil 16

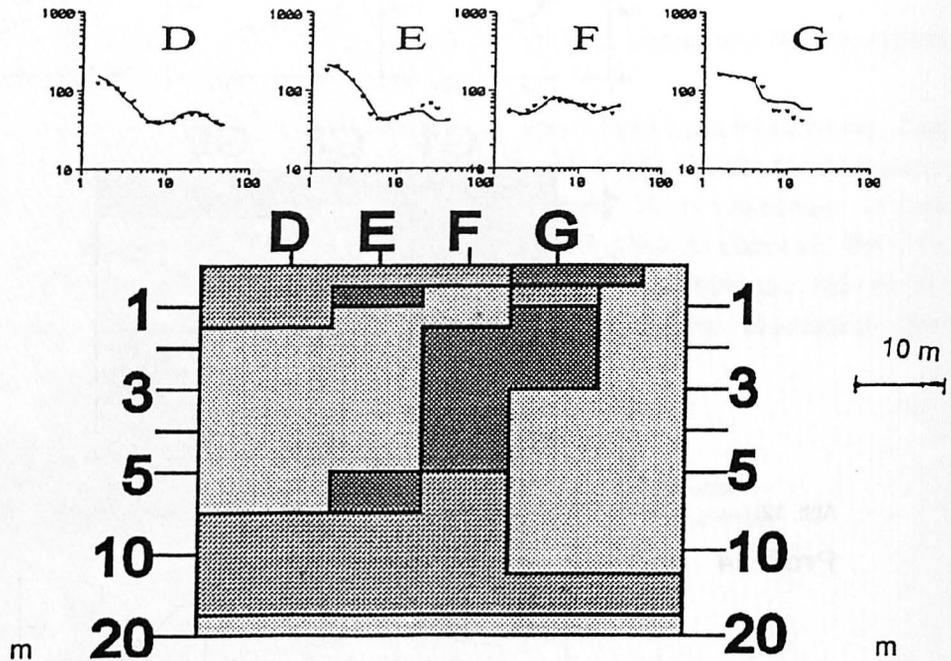


Abb. 15: Profil 16 (Ergebnisse der 2D-Vorwärtsmodellierung)

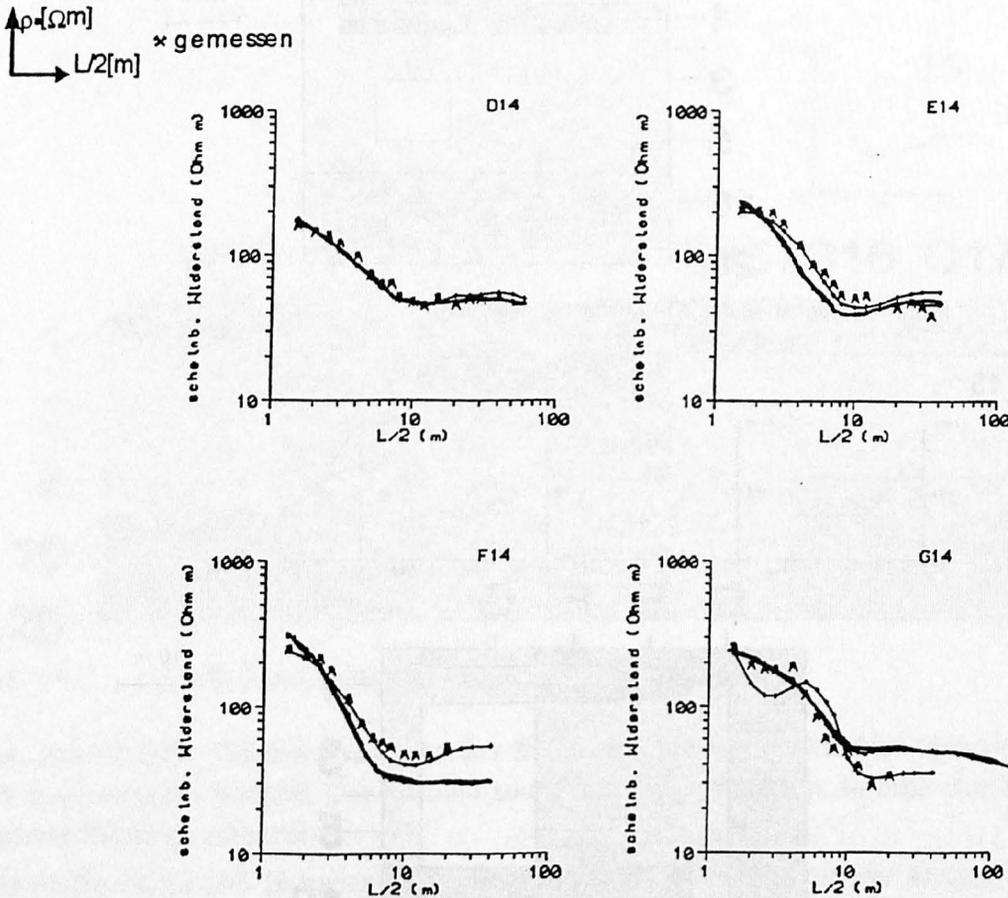


Abb. 16: Vergleich Ergebnisse aus 2D-Startmodell (1D-Inversionsergebnisse) und Endmodell

Vergleich der Ergebnisse aus dem 2D-Start- und Endmodell

Die 2D-modellierten Kurven für das Profil 14 werden in Abb. 16 mit denen eines zweidimensionalen Modells, das aus den 1D-Inversionsergebnissen zusammengesetzt wurde, verglichen. Durch das zweidimensionale Modell konnte erwartungsgemäß eine wesentlich bessere Anpassung aller Meßwerte erreicht werden als durch das aus den 1D-Inversionsergebnissen erstellten Modells.

Profil 14

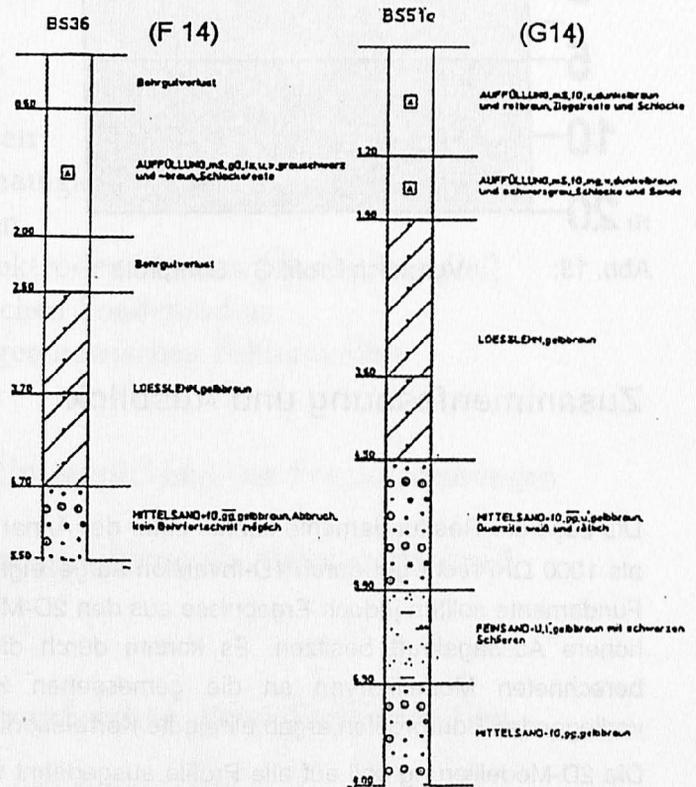
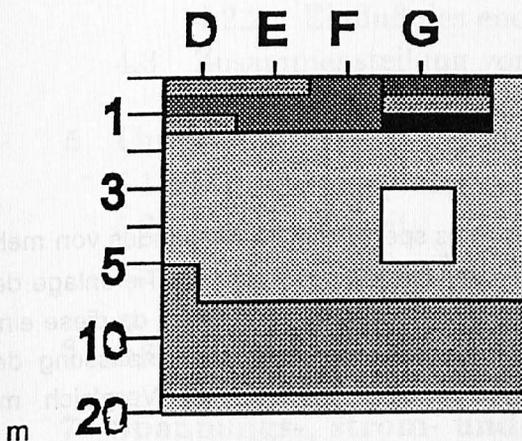
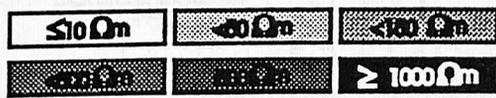


Abb. 17: Vergleich Profil 14 - Bohrprofil

Der Vergleich des Bohrprofils mit G1 (Abb. 18) ergibt für die Aufschüttung eine Mächtigkeit von etwa 2,5 m, während sie im 2D-Modell etwa 3 m erreicht. Die Schichtgrenze von Lößlehm zum Sand bei etwa 5 m ist sehr gut aufgelöst, die darunter liegenden Tone und Schluffe dagegen gar nicht.

Vergleich mit Bohrprofilen

In den Punkten F14 und G14 (Abb. 17) kann das Modell des Profiles 14 mit Bohrprofilen der Firma Geotechnik verglichen werden. Man erhält sehr gut übereinstimmend eine Mächtigkeit von etwa 2m für die anthropogene Überdeckung, der Lößlehm bis in eine Tiefe von ca. 5 m kann durch die Unterkante des guten Leiters in G erklärt werden. In etwa 7 m Tiefe befindet sich die Grenze zwischen Fein- und Mittelsand, die gut angepaßt werden kann, während die Grenze zwischen Mittel- und Feinsand bei etwa 6 m nicht aufgelöst werden kann, was auch an den Gittereigenschaften des Programms liegt.

PROFIL G

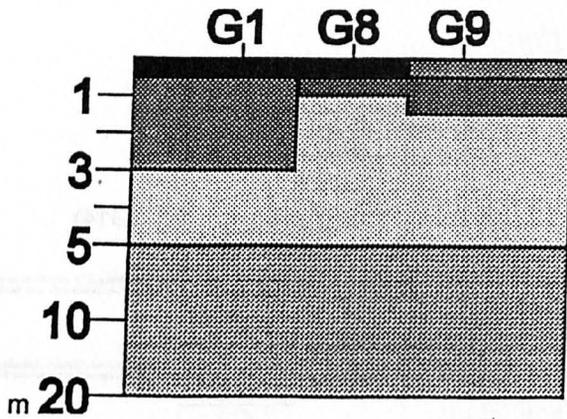
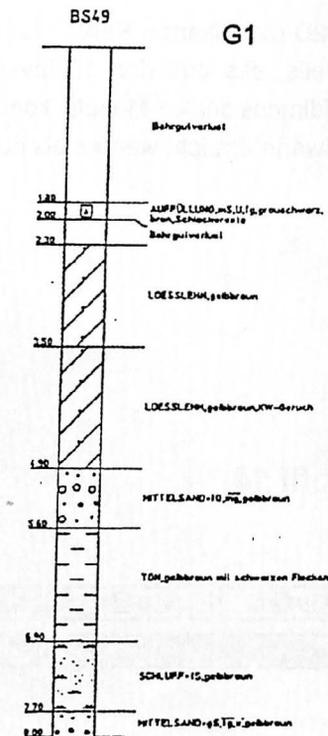


Abb. 18: Vergleich Profil G - Bohrprofil



Zusammenfassung und Ausblick

Die Lage der Restfundamente konnte unter der Annahme eines spezifischen Widerstandes von mehr als $1000 \Omega m$ recht gut durch 1D-Inversion aufgezeigt werden. Zu Aussagen über die Tiefenlage der Fundamente sollten jedoch Ergebnisse aus den 2D-Modellierungen verwendet werden, da diese eine höhere Aussagekraft besitzen. Es konnte durch die 2D-Modellierung eine gute Anpassung der berechneten Modellkurven an die gemessenen Kurven erreicht werden. Der Vergleich mit vorliegenden Bohrprofilen ergab eine gute Korrelation.

Die 2D-Modellierung soll auf alle Profile ausgedehnt werden, dabei wird das Vorwärtsprogramm von Mundry (1981) benutzt sowie das 2D-Inversionsprogramm Resistomo (Kemna, 1995). Anschließend soll ein exemplarischer Vergleich mit dem 3D-Vorwärtsprogramm Spitzer (1994) erfolgen.

Literatur

ECOS Umwelt GmbH, Aachen: Machbarkeitsstudie zur Sanierung des ehemaligen DB-Betriebswerkes Düren, Auftraggeber: Deutsche Bahn AG, Aachen 1995.

Geotechnik: Zwischenbericht zu den zusätzlich durchgeführten Grundwasseruntersuchungen im Bereich des ehemaligen Betriebswerkes Düren, Auftraggeber: Deutsche Bundesbahn, Bundesbahndirektion Köln, Köln 1992.

Kemna, A.: Tomographische Inversion des spezifischen Widerstandes in der Geoelektrik, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, Köln, 1995.

Mundry, E.: Geoelektrische Modellrechnungen für zweidimensionale Strukturen, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung Hannover, 1981.

Spitzer, K.: Dreidimensionale geoelektrische FD-Modellrechnungen mittels vorkonditionierter konjugierter Gradienten, in Elektromagnetische Tiefenforschung - 15. Kolloquium Höchst im Odenwald, DGG, 1994.