



**Bundesanstalt für Geowissenschaften  
und Rohstoffe**

**Verbundvorhaben:  
Methoden zur Erkundung und Beschreibung des  
Untergrundes von Deponien und Altlasten  
Teilvorhaben 3  
- Umsetzung der erzielten Ergebnisse in  
Handlungsempfehlungen -**

**Schlußbericht für den Bearbeitungszeitraum 1995 bis 1997**

K. KNÖDEL, H. WILKEN, G. LANGE, C. WIESSNER, F. KÜHN, T. WIPPERMANN

Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und  
Technologie (BMBF) gefördert  
Förderkennzeichen: 1460605 B  
Projektträger Abfallwirtschaft und Altlasten im Umweltbundesamt, Berlin

**Ort und Datum:** Berlin/Hannover, im Juni 1998  
**BGR Archiv-Nr.:** 117295  
**BGR Tagebuch-Nr.:** DB 404/98

## Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Aufgabenstellung des Vorhabens	3
2	Ergebnisse	4
2.1	Handbuchbände 1 bis 6, Darstellung der Methoden für die Standorterkundung	4
2.2	Handlungsempfehlungen für die Erkundung der geologischen Barriere bei Deponien und Altlasten	7
2.3	Beratungssystem	36
2.4	Fallbeispiele aus der Teststandortforschung	58
2.4.1	Schöneiche Mittenwalde	58
2.4.2	Eulenberg	65
2.4.3	Rabenstein	71
2.5	Internationale Ausgabe des Methodenhandbuchs	82
3	Anwendung der Ergebnisse des Vorhabens	84
4	Dank	85
Anhang	Inhaltsverzeichnisse der bisher noch nicht erschienenen Handbuchbände	86
A 1	Geochemie	86
A 2	Handlungsempfehlungen für die Erkundung der geologischen Barriere bei Deponien und Altlasten	91
A 3	Fallbeispiel Schöneiche-Mittenwalde	94
A 4	Fallbeispiel Eulenberg	97
A 5	Fallbeispiel Rabenstein	99
A 6	Remote Sensing for Site Characterization	101
A 7	Noninvasive Geophysics for Site Characterization	106

# 1 Aufgabenstellung des Vorhabens

Die Gesteinsschichten des Untergrundes behindern den Austrag von Schadstoffen aus Deponien und Altlasten. Für die Erkundung dieser geologischen Barriere besteht bundesweit ein großer Bedarf an geeigneten Verfahren. Das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) hat deshalb über seinen Projektträger "Abfallwirtschaft und Altlasten" im Umweltbundesamt im Rahmen des Programmes "Umweltforschung und Umwelttechnologie" das Verbundvorhaben "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten" (Kurztitel "Deponieuntergrund") gefördert. Die Hauptziele des Verbundvorhabens waren:

- Analyse des Deponieuntergrundes als geologische Barriere,
- Analyse und Bewertung der vorhandenen Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten,
- Weiterentwicklung eingeführter Verfahren und Entwicklung neuer Methoden,
- Anwendung ausgereifter und neuer Verfahren an verschiedenen Standorttypen zur Auswahl effektiver und kostengünstiger Methodenkombinationen,
- Erstellung eines Methodenhandbuches und eines wissensbasierten Beratungssystems.

Dem Forschungsverbundvorhaben liegt ein interdisziplinärer Ansatz zugrunde. Dabei hat sich die enge Zusammenarbeit von Hochschulen, Forschungseinrichtungen, Bundes- und Länderbehörden sowie mittelständischen Firmen bewährt.

Bei der **Methodenentwicklung** arbeiteten im Verbundvorhaben 37 Forschungseinrichtungen und Firmen in 28 Einzelvorhaben zusammen. Neben der Methodenentwicklung erfolgte die Erprobung effektiver und kostengünstiger Methodenkombinationen an ausgewählten Teststandorttypen (**Teststandortforschung**).

Der Schlußbericht zum Verbundvorhaben für den Bearbeitungszeitraum 1989 bis 1995 ist in der grün/weißen Reihe des BMBF erschienen und kann beim PT Abfallwirtschaft und Altlasten im Umweltbundesamt, Postfach 33 00 22, 14191 Berlin (Tel. 030/8903-3834, Fax 3833) angefordert werden.

Die Arbeitsschwerpunkte des Teilvorhabens 3 waren

- Fertigstellung der Handbuchbände Geophysik, Geotechnik/Hydrogeologie, Tonmineralogie und Bodenphysik sowie Geochemie zur **Darstellung der Methoden und Werkzeuge**,
- die Erstellung von **Handlungsempfehlungen** für die Erkundung der geologischen Barriere bei Deponien und Altlasten,
- die Erstellung eines **wissensbasierten Beratungssystems** auf der Basis der Handlungsempfehlungen,
- die wissenschaftliche Auswertung der Teststandortforschung als **Fallbeispiele** für die Handlungsempfehlungen sowie
- die Vorbereitung der **Internationalen Ausgabe der Handbuchbände "Geofernerkundung" und "Geophysik"**.

Weiterhin erfolgten einige ergänzende Untersuchungen im Rahmen der **Teststandortforschung**, deren Ergebnisse in die Fallbeispiele eingearbeitet wurden.

## **2 Ergebnisse**

### **2.1 Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bände 1 bis 6, Darstellung der Methoden für die Standorterkundung**

Herausgeber Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), erschienen im Springer-Verlag.

#### **Band 1: Geofernerkundung**

**1995.** X, 166 Seiten, 74 Abbildungen, 45 in Farbe, 5 Tabellen  
Geb. DM 118,-; öS 920,40; sFr 113,50  
ISBN 3-540-58728-4

Mit den Methoden der Geofernerkundung können Erkenntnisse über die geologische Situation, den heute von Ablagerungen verdeckten Untergrund, die Umweltbelastung und die historische Entwicklung von Deponie- oder Altlaststandorten gewonnen werden. Ein wesentlicher Vorteil ist die Möglichkeit zur schnellen, zeitgleichen und flächenhaften Erfassung beliebiger Geländeabschnitte. Außerdem liefert die Geofernerkundung Ansatzpunkte für die weitere Erkundung mit geophysikalischen, hydrogeologischen und geochemischen Methoden. Dabei sind Satellitenbilder auf Grund ihrer begrenzten Bodenauflösung nur in Einzelfällen anwendbar. Für die Erkundung von Deponie- und Altlaststandorten sind hochauflösende Verfahren erforderlich, die Details eines Geländes sowie strukturelle und stoffliche Inhomogenitäten an der Geländeoberfläche erkennbar machen. Diesen Anforderungen werden gegenwärtig nur Luftbilder und Daten nichtphotographischer Flugzeugsysteme (Scanner) gerecht. Die nichtphotographischen Aufnahmesysteme sind zudem in der Lage, unmittelbar digital weiterverarbeitbare multispektrale Daten vom sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums bis hin zur Thermalstrahlung zu liefern.

#### **Band 2: Strömungs- und Transportmodelle**

**1996.** 418 Seiten, 169 Abbildungen, 14 in Farbe, 112 Tabellen  
Geb. DM 128,-; öS 934,40; sFr 123,-  
ISBN 3-540-59140-0

Strömungs- und Transportmodelle dienen zunächst als Parameterstudien der hydro-geologischen Erkundung, um die Datenqualität, Datendichte sowie die fehlenden Parameter und Systemstruktur einzuschätzen, und dann insbesondere für Stoffausbreitungsprognosen auf der Grundlage der in den vorangegangenen Untersuchungsphasen ermittelten Standortparameter und Daten. Sie können auch für die Planung von Grundwasserüberwachungskonzepten und Sicherungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen genutzt werden. Dieser Band erläutert zunächst die mathematischen Grundlagen der Modellierung und ermöglicht dem Leser anschließend - im Rahmen seiner Tätigkeit - selbst Modelle zu entwickeln und zu interpretieren.

#### **Band 3: Geophysik**

**1997.** XXVIII, 1063 Seiten, 418 Abbildungen, 78 in Farbe, 72 Tabellen  
Geb. DM 198,-; £ 85,50; FF 746,-; Lit. 218,680; US \$ 132,90; öS 1445,40; sFr 173,-  
ISBN 3-540-59462-0

Die Geophysik untersucht die Verteilung der physikalischen Parameter in der Erde durch Messungen an der Erdoberfläche ohne Eingriff in den Untergrund (eine Ausnahme bilden geophysikalische Bohrlochmessungen). Geophysikalische Methoden werden eingesetzt, um ein räumliches Modell des Deponieuntergrundes zu entwerfen, Störungszonen nachzuweisen und das regionale Grundwassersystem zu erkunden. Sie bieten darüber hinaus Möglichkeiten, Altlasten und ggf. Kontaminationsfahnen aufzufinden und abzugrenzen, den Deponiekörper zu untersuchen sowie Aussagen über physikalische und lithologische Parameter des Untergrundes zu erhalten. Dafür sind eine Vielzahl geophysikalischer Verfahren eingeführt. Notwendige Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz geophysikalischer Methoden ist das Vorhandensein von Kontrasten der physikalischen Materialparameter im Untergrund (Magnetisierung, Dichte, spezifischer elektrischer Widerstand, Dielektrizitätszahl, Aufladefähigkeit, Geschwindigkeit seismischer P- und S-Wellen etc.). Vor geophysikalischen Messungen sollte in jedem Fall abgeschätzt werden, ob die zu erwartenden Anomalien in den Meßgrößen unter Beachtung künstlicher Störungen durch Industrie, Verkehr, Bebauung und Versiegelung einen Einsatz rechtfertigen und welches Verfahren den größten Beitrag zur Lösung der anstehenden Probleme liefert. Gegebenenfalls sind Modellrechnungen und/oder Testmessungen durchzuführen.

In diesem Band sind die geophysikalischen Methoden und Werkzeuge dargestellt worden. Mit einer leichtverständlichen durch Prinzipskizzen veranschaulichten Methodenbeschreibung und Angaben zu den Anwendungsmöglichkeiten sollen auch fachfremde Leser angesprochen werden. Vorwiegend in den Grundlagenkapiteln findet der Geophysiker das spezielle Wissen, das er zum Einsatz der Methode oder zur Beurteilung von Untersuchungsergebnissen benötigt. Erläutert werden auch die Meßprinzipien und der Stand der Meßgerätetechnik, die Anlage und Durchführung der Feldarbeiten, die Bearbeitung und Interpretation der Meßdaten, die Qualitätssicherung sowie der personelle, technische und zeitliche Aufwand. Zahlreiche Beispiele aus der Erkundungspraxis veranschaulichen die Anwendungsmöglichkeiten der Methoden und die Darstellung der Ergebnisse. Der Band enthält Informationen, die so bisher in der Literatur nicht oder nur schwer zugänglich sind. Hinzuweisen ist auch darauf, daß neben den klassischen Methoden (Magnetik, Gravimetrie, Seismik etc.) die Bohrlochgeophysik, Petrophysik, Milieusondenmessungen und Überwachungssysteme aufgenommen wurden.

#### **Band 4: Geotechnik Hydrogeologie**

**1998.** XXVI, 578 Seiten, 226 Abbildungen, 38 Tabellen  
Geb. DM 178,-; £ 68.50; FF 671,-; Lit. 196.590; US \$ 111.25; öS 1299.40; sFr 161,-  
ISBN 3-540-59461-2

Bei der Einrichtung von Abfalldponien sowie der Bewertung von Altablagerungen, Altdeponien und Altlasten müssen der Aufbau und die Beschaffenheit der Gesteine im Untergrund sowie die Grundwasserverhältnisse bekannt sein. Die entsprechenden Untersuchungen umfassen ingenieurgeologische, boden- und felsmechanische sowie hydrogeologische Methoden. Im Mittelpunkt geotechnischer Untersuchungen steht das breite Spektrum der "punktweise" ansetzenden Aufschluß- und Testverfahren. Diesen Bohrungen, Schürfen, Sondierungen, Bohrloch- und Bohrkernuntersuchungen, hydraulischen Tests, Pump- und Tracerversuchen gehen in der Regel geologische Voruntersuchungen (geologische Kartierungen, Kartenauswertungen) voraus. Mit den Möglichkeiten geostatistischer Erkundungsoptimierung kann die Verteilung der

Untersuchungspunkte den lokalen Gegebenheiten angepaßt werden. Geologische Untersuchungen liefern Informationen über den geologischen Aufbau des unmittelbaren Untergrundes und des Umfeldes von Altlasten und Deponien. Sie bilden die Grundlage für die detaillierte Erkundung und Standortbeurteilung. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen und das daraus abgeleitete geologische Modell sind für die Planung weiterer Untersuchungen, Aufschlußarbeiten, Probenahmen und andere Maßnahmen wichtig. Die Ausdehnung des zu untersuchenden Gebietes hängt im wesentlichen meist von seinem geologischen Bau, von der Größe des regionalen Grundwassersystems, aber auch von der Art und Menge der abgelagerten Schadstoffe ab.

Dieser Band beginnt bei den geologischen Voruntersuchungen wie Kartierungen und Feldarbeiten und unterrichtet die Leser dann ausführlich über Aufschlußverfahren zur Erkundung der Locker- und Festgesteine und der Grundwasserverhältnisse sowie über Probenahmetechniken und zerstörungsfreie Bohrkernuntersuchungen. Der Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit mit Hilfe hydraulischer Bohrlochtests wurde ein umfangreicher Teil gewidmet. Zum Schluß werden isotopenhydrologische und geostatistische Methoden erläutert.

### **Band 5: Tonmineralogie und Bodenphysik**

**1998.** 297 Seiten, 68 Abbildungen, 2 in Farbe, 33 Tabellen

Geb. DM 128,-; £ 49,50; FF 483,-; Lit. 141,370; US \$ 77,90; öS 934,40; sFr 113,-  
ISBN 3-540-59465-5

Die die Barrierefunktion bestimmenden Stoffeigenschaften des Untergrundes werden maßgeblich von dessen mineralogischer und bodenphysikalischer Beschaffenheit bestimmt. Die mineralogischen und bodenphysikalischen Untersuchungsmethoden gehören damit zu einem zentralen Instrumentarium, um durch Ermittlung der mineralogischen und stofflichen Zusammensetzung, der physikalischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften qualitative und quantitative Aussagen zu den entscheidenden Kriterien Durchlässigkeit und Adsorptionsvermögen bzw. zum Schadstoffrückhaltevermögen zu erhalten. Diese Untersuchungen erfolgen auf der Grundlage der geologischen Erkundung, die die Auswahl der näher zu untersuchenden Gesteine bestimmt sowie die Proben liefert. Die bodenmechanische Stabilität bildet neben den Barriereigenschaften ein weiteres Kriterien für die Eignungsprüfung des Untergrundes.

Dieser Band befaßt sich mit der Untersuchung der Materialeigenschaften des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Von den in den Technischen Anleitungen (TA) Abfall und Siedlungsabfall für den tieferen Untergrund und das unmittelbare Auflager von Deponien aufgestellten Grundanforderungen beziehen sich allein vier, nämlich hohes Adsorptionsvermögen, Tonmineralhaltigkeit, geringe Gebirgsdurchlässigkeit und Dichte auf die Materialeigenschaften des Bodens bzw. der Barrieregesteine. Neben den tonmineralogischen und bodenphysikalischen Eigenschaften, die maßgebend sind für die Barrierewirkung gegen Schadstoffe, bildet die bodenmechanische Stabilität ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Eignungsprüfung im Deponiebau. Hier wird ein Überblick über das Methodenspektrum, die Untersuchungsmöglichkeiten und Bewertungskriterien gegeben. Bei der Darstellung der Untersuchungsmethoden wird auf folgende Punkte eingegangen: Verfahrensbeschreibung, wissenschaftlich-technische Grundlagen, Meßprinzip, Meßgeräte, Durchführung, Auswertung und Interpretation der Analysen, Aussage- und Anwendungsmöglichkeiten, Qualitätssicherung, technischer und zeitlich-finanzieller Aufwand.

### **Band 6: Geochemie**

**1998.** 494 Seiten  
Geb. ca. DM 189,-  
ISBN 3-540-59464-7

Stoffflüsse aus Deponien und Altlasten verändern die natürlichen Stoffkonzentrationen in den angrenzenden Untergrundkompartimenten Boden/Gestein, Grundwasser und Bodengas. Die geochemische Untersuchung des Untergrundes von Deponien und Altlasten hat das vorrangige Ziel, das komplexe Stoffinventar des Untergrundes differenziert nach natürlicher (geogener) Grundausstattung und der durch Deponien und Altlasten verursachten Stoffbelastung zu charakterisieren. Eine wesentliche Voraussetzung zum Erkennen von anthropogenen stofflichen Beeinträchtigungen ist die Ermittlung der Hintergrundgehalte, wobei die lokalen geochemischen Verhältnisse des Standortes und seines Umfeldes zugrunde zu legen sind.

Der Hauptausbreitungsweg für Schadstoffe bzw. Sickerwasserinhaltsstoffe ist der Grundwasserpfad, so daß Untersuchungen zur Beschaffenheit des Grundwassers für den Nachweis und die Überwachung von Schadstoffausträgen das wesentliche Instrument darstellen. Neben den Methoden zur Analyse der Verteilung von Stoffkonzentrationen in Boden/Gestein, Wasser und Bodengas verfügt die Geochemie über spezifische Verfahren zur Simulation von Migrationsprozessen bzw. zur Ermittlung migrationsbestimmender Kennwerte, die weitergehende Aussagen hinsichtlich des Stoffverhaltens erlauben. Die Untersuchungen zur stofflichen Charakterisierung sind in die Erkundungsstrategie eines Standortes einzugliedern und erfolgen in der Regel im Anschluß an die geologische und hydro-geologische Erkundung, deren Ergebnisse die Grundlage für eine gezielte und repräsentative Probenahmestrategie sowie die hydrogeochemische Überwachung darstellen. Nur in Zusammenhang mit diesen Standortfaktoren und unter Einbeziehung der mineralogischen und bodenphysikalischen Daten erlauben die Ergebnisse der geochemischen Untersuchungen eine Beurteilung des Standortes bzw. eine Abschätzung des Stoffverhaltens im Untergrund.

Der Band ist im Druck. Er wird im September 1998 ausgeliefert. Das Inhaltsverzeichnis ist dem Anhang A1 zu entnehmen.

## **2.2 Handlungsempfehlungen für die Erkundung der geologischen Barriere bei Deponien und Altlasten**

Gegenstand der Handlungsempfehlungen ist die Erkundung der geologischen Barriere bei Deponienuanlage, betriebene Deponien und Altlasten. Das Inhaltsverzeichnis befindet sich im Anhang A 2 dieses Berichtes. Die in diesem Band 7 behandelten Themen reichen von den geowissenschaftlichen Standortkriterien über Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes, Prognose des Standortverhaltens, Hinweisen zur Vergabe und Durchführung von Untersuchungsaufträgen bis zum Arbeitsschutz. Nachstehend werden exemplarisch Auszüge aus den Kapiteln 4.1 Generelle Erkundungsstrategien und 4.2 Aufbau des Untergrundes wiedergegeben.

### **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.1 Generelle Erkundungsstrategien**

Bei der Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten begegnet man komplexen Standortgegebenheiten mit individuellen topographischen, naturräumlichen, geologischen und stofflichen Eigenschaften, die eine Einzelfallbearbeitung erfordern. Knappes Budget, langwierige

Verwaltungsvorgänge und enge Termine bilden den üblichen Rahmen für eine Tätigkeit, die durch hohe Qualitätsansprüche und hohe Verantwortung gekennzeichnet ist. Zusätzlich sind oft

- der Leistungsumfang schwer abgrenzbar,
- die Anforderungsprofile an die Experten unklar,
- Normen und Richtlinien teilweise nicht vorhanden,
- der Untergrund heterogen,
- das Gefährdungspotential unbekannt und die Schadstoffausbreitung stark heterogen,
- die Stofftransportvorgänge vielfältig und insbesondere für die wasserungesättigte Zone wenig erforscht,
- eine Schadstoffmobilisierung durch Aufschlußtätigkeiten möglich,
- Meß- und Analyseergebnisse insbesondere durch Probenahmefehler nicht reproduzierbar sowie
- das zu erkundende Gelände (teilweise) unzugänglich.

Es werden andererseits hohe Anforderungen gestellt an

- die Auflösung von Untergrundstrukturen,
- die Genauigkeit der Daten,
- die Zuverlässigkeit der aus den Erkundungsdaten abgeleiteten Prognosen,
- die Wirtschaftlichkeit der empfohlenen Maßnahmen und
- den Arbeitsschutz.

Um den Schwierigkeiten und Anforderungen gerecht zu werden, sind auf die Standortverhältnisse abgestimmte

- Methodenkombinationen,
- Qualitätssicherungskonzepte sowie
- Betriebspläne

auszuarbeiten. Die bei der Standorterkundung von Deponien und Altlasten übliche Aufgabenverteilung zwischen Aufsichtsbehörde, Auftraggeber und Auftragnehmer ist der *Tab. 4.1* zu entnehmen:

Art und Umfang der notwendigen Untersuchungen sind selten vorher zutreffend abzuschätzen und ergeben sich erst im Laufe der Standorterkundung. Um die Erkundungsmethoden wirtschaftlich einzusetzen und einen flexiblen Entscheidungs- und Handlungsspielraum zu gewährleisten, wird deshalb ein *stufenweises Vorgehen* empfohlen. Für die Planung eines Erkundungsprogramms eignet sich grundsätzlich eine Aufteilung in die Schritte

- Bestandsaufnahme
- orientierende Voruntersuchungen
- detaillierte Hauptuntersuchungen
- ergänzende und spezielle Untersuchungen

Nach jeder Phase sind die Kenntnisse zusammenzufassen, zu bewerten, zu dokumentieren und mit den Anforderungen bzw. Ausgangspunkten zu vergleichen sowie daraus weitergehende Maßnahmen zu erarbeiten. Die Auswahl der in den jeweiligen Erkundungsphasen geeigneten Untersuchungsmethoden richtet sich nach



- dem Ziel der Untersuchung,
- Art und Umfang der Informationen, die aus der Untersuchungsmethode erhalten werden,
- Wirtschaftlichkeit,
- den zu berücksichtigenden Normen und Richtlinien und
- Vergleichbarkeit der Ergebnisse (Qualitätssicherung, Zuverlässigkeit).

**Tab. 4.1:** Aufgabenverteilung bei der Standortuntersuchung

	Aufgaben
Aufsichtsbehörde (z. B. Bezirksregierung)	- Anordnung einer Untersuchung - Prüfung der Untersuchungsergebnisse - ggf. weitere Anordnungen
Auftraggeber (Deponiebetreiber, Landkreise, Firmen etc.)	Projektleitung - Festlegung von Untersuchungszielen und -phase - Auftragsvergabe (s. Kap. 6.1) - Termin- und Kostenplanung - Bereitstellung vorhandener Informationen, Daten, Gutachten, Lageplänen etc. - Auftragskontrolle - Leistungsabnahme, ggf. Nachkalkulation - Bewertung der Ergebnisse und Entscheidung über weiteres Vorgehen - ggf. Berichterstattung an die Aufsichtsbehörde
Auftragnehmer, ggf. Unterauftragnehmer (Ingenieurbüros, Labors, Fach- und Bohrfirmen etc.)	Planung und Durchführung der wissenschaftlich-technischen Erkundung - Erstellung des Untersuchungskonzeptes (Festlegung von Untersuchungsparametern, Methoden, Genauigkeit und Qualitätssicherung; ggf. Berücksichtigung des Arbeitsschutzes) - Zeit- und Kostenkalkulation - Angebotsabgabe - Aufstellung von Betriebsplänen - Einholung aller Genehmigungen - Durchführung der Feldarbeiten - ggf. Vergabe und Überwachung von Fremdleistungen - Auswertung, Interpretation und Berichterstattung - Leistungsnachweis und Abrechnung

Bei der Planung und Durchführung der Erkundungsarbeiten ist zu unterscheiden zwischen Standorten für Deponieanlagen, bei denen der Schwerpunkt der Erkundung in der Prüfung der Barriereigenschaften liegt (s. Kap. 3), sowie betriebenen Deponien und Altlasten, bei denen es darum geht, das Gefährdungspotential unter den gegebenen Standortsituationen zu ermitteln. Zu den jeweiligen Verfahrensabläufen und den vorhandenen behördlichen Richtlinien siehe Kap. 2. Die in diesen Handlungsempfehlungen beschriebenen Untersuchungsmöglichkeiten setzen dort ein, wo die Erstbewertung einer Altlast bzw. der erste Schritt des Standortsuchverfahrens, die Abgrenzung von Positivflächen, bereits vollzogen sind und orientierende bzw. detaillierte Untergrunduntersuchungen als erforderlich angesehen werden bzw. den nächsten Schritt des Verfahrens darstellen. Im Rahmen der Erstbewertungen sind allgemeine Einflußmerkmale erhoben, alle bereits verfügbaren Daten, Gutachten und Informationen hinsichtlich der geologischen Verhältnisse und des Gefährdungspotentials ausgewertet und daraus der Informationsbedarf und die Untersuchungsziele definiert worden.

Dieses Kap. 4 ist nach Einflußgrößen gegliedert, die für die geowissenschaftliche Standortbeurteilung von Bedeutung sind. Zu jedem Parameter bzw. Kriterium sind Methoden und Verfahren zur Erkundung und Beschreibung aufgeführt, die sich unter den angegebenen Rahmenbedingungen eignen. Die ausführlichen Beschreibungen der Methoden sind in den entsprechenden Bänden der Methodenhandbücher enthalten.

## **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.1.1 Nutzung der Methodenhandbücher bei den Erkundungsarbeiten**

Die für die Standorterkundung von Deponien und Altlasten anwendbaren Methoden und Verfahren sind in den ersten sechs Bänden des *Handbuchs zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten* beschrieben, aufgeteilt in die Bereiche Geofernerkundung, Geophysik, Geotechnik/Hydrogeologie, Tonmineralogie und Bodenphysik, Geochemie sowie Strömungs- und Transportmodellierung. Bei der Darstellung der einzelnen Methoden, Verfahren und Untersuchungsstrategien sind in der Regel folgende Aspekte berücksichtigt:

- Prinzip der Methode und Grundlagen
- Anwendungsmöglichkeiten
- Allgemeine Randbedingungen
- Versuchsanordnung, erforderliche Ausrüstung und Versuchsdurchführung bzw. Vorgehensweise
- Qualitätssicherung
- Ergebnisse und deren Bearbeitung, Darstellung, Interpretation sowie Meßgenauigkeit
- Beurteilung der Methode:
  - technischer, personeller, zeitlicher, finanzieller Aufwand
  - Möglichkeiten und Grenzen
  - Vor- und Nachteile
- Anwendungsbeispiele
- Normen und Richtlinien, weiterführende Literatur

Die im Kap. 4.2 angegebene Matrix verknüpft die für geowissenschaftliche Standortbeurteilungen möglichen Untersuchungsparameter und Kriterien mit der Vielzahl der Methoden aus den unterschiedlichen Bereichen, um für umfassende Standorterkundungen die Breite der wissenschaftlich-technischen Möglichkeiten und Anwendungs- und Kombinationsvielfalt aufzuzeigen. Für ein Untersuchungskriterium sind häufig mehrere Methoden oder Methodenkombinationen möglich, deren jeweilige Eignung bzw. Angemessenheit von Standortsituation, Randbedingungen und Genauigkeit der Ergebnisse sowie Aufwand und Kosten abhängig ist. Es folgen Kurzdarstellungen der Inhalte der Handbuchbände.

## **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.1.2 Fragenkatalog zur Vorbereitung der Erkundungsarbeiten**

Der folgende Fragenkatalog (*Tab. 4.2*) soll auf Rahmenbedingungen und Probleme aufmerksam machen, die Einfluß auf die Auswahl der Untersuchungsmethoden bzw. Planung des Untersuchungskonzeptes haben. Die Fragen sind im Vorfeld der Planung zu klären, so daß eine optimale Erkundungsstrategie für den zu untersuchenden Standort in Abstimmung mit den Anwendungsmöglichkeiten der entsprechenden Methoden erarbeitet werden kann. Als Beispiele dafür sollen genannt werden:

- Ist die Größe des Untersuchungsgebietes (Frage 10) sehr groß, so sind zunächst luftgestützte Verfahren (Geofernerkundung und Aero-geophysik) einzusetzen. Das trifft auch zu, wenn die Zugänglichkeit des Gebietes (Frage 31-33) nicht gegeben ist. Einschränkungen ergeben sich für einige Fernerkundungsverfahren durch dichten Bewuchs (Frage 30). Bewuchs ermöglicht hingegen die Kartierung von Schadstoffbelastungen über Vegetationsschäden.
- Die Versiegelung von Flächen (Frage 23 und 24) schließt den Einsatz bestimmter geophysikalischer Verfahren (z. B. Gleichstromgeoelektrik) aus oder macht ihn unwirtschaftlich. Bei der Bodenprobenahme ist in solchen Fällen mit wesentlich höheren Kosten zu rechnen.

Der folgende Fragenkatalog kann wegen der Individualität der Untersuchungsfälle nur eine Auswahl von planungsrelevanten Fragen auflisten. Im konkreten Untersuchungsfall kommt es schließlich auf die Erfahrungen des jeweiligen Gutachters an.

**Tab. 4.2:** Fragenkatalog zur Vorbereitung der Erkundungsarbeiten

Nr.	Frage	Fallunterscheidungen	Hinweise
1	Art der Aufgabe?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Standorterkundung für Deponieanlage</li> <li>- Nacherkundung einer betriebenen Deponie</li> <li>- Gefährdungsabschätzung einer Altablagerung/-eines Altstandortes</li> </ul>	zu Verfahrensablauf und behördlichen Vorgaben s. Kap. 2
2	Deponieklasse bzw. Art des abgelagerten Materials?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deponieklasse I</li> <li>- Deponieklasse II</li> <li>- Sonderabfalldeponie</li> <li>- unbelasteter Bodenaushub, natürliche Gesteine, Mineralstoffe</li> <li>- Siedlungsabfälle: Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle</li> <li>- Gewerbe- und Industrieabfälle</li> </ul>	zu den Kriterien und speziellen Anforderungen bezüglich des Untergrundes siehe TA Abfall bzw. TA Siedlungsabfall
3	Form der Ablagerung?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufhaldung</li> <li>- Hangschüttung</li> <li>- Verfüllung eines Steinbruchs</li> <li>- Verfüllung einer Kiesgrube</li> <li>- Verfüllung eines Tonabbaus</li> <li>- Verfüllung eines Braunkohlentagebaurestloches</li> <li>- Polderdeponie</li> </ul>	
4	Welche Untersuchungsphase?	<p><i>Deponieanlage</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auswahlverfahren</li> <li>- Standortvorerkundung</li> <li>- Standorteignungsprüfung</li> </ul> <p><i>Altlasten</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung und Erstbewertung</li> <li>- orientierende Untersuchung</li> <li>- Detailerkundung</li> <li>- Sicherung, Sanierung und Überwachung</li> </ul>	zu Verfahrensablauf und Richtlinien s. Kap. 2
5	Wie dringlich ist der Handlungsbedarf?		
6	Welche Vorkenntnisse und Voruntersuchungen liegen vor?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Luftbilder</li> <li>- topographische und thematische Karten</li> <li>- Bohrdaten</li> <li>- Untersuchungsergebnisse</li> <li>- Gutachten</li> <li>- Planungsunterlagen</li> <li>- etc.</li> </ul>	<p>Mögliche Quellen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fachämter (Geologische Dienste, Umwelt-, Wasserwirtschafts-, Bergämter)</li> <li>- Kreis-, Stadt- und Gemeindeverwaltungen</li> <li>- Landesvermessungsämter</li> <li>- private und öffentliche Archive</li> <li>- Geländebegehungen</li> <li>- Befragung von Zeitzeugen</li> </ul>

7	Welches Schadstoffspektrum liegt vor?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deponietyp, Altablagerungen</li> <li>- Typ des Altstandortes</li> <li>- Klärschlamm</li> <li>- Rüstungsalast</li> <li>- Intensivlandwirtschaft</li> </ul>	Das Schadstoffspektrum kann über eine historische Recherche (Abfallinventar, Nutzung, branchenspezifische Stoffe etc.) ermittelt werden. Siehe auch entsprechende Materialien zu branchen- und prozeßspezifische Emissionen sowie deponiespezifischen Inhaltsstoffen.
8	Art der Schadstoffe?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- wassergefährdende Stoffe</li> <li>- gasförmige und flüchtige Stoffe</li> <li>- anorganische Stoffe</li> <li>- organische Stoffe</li> <li>- toxische, kanzerogene, mutagene Stoffe</li> <li>- Kampfmittel, Explosivstoffe</li> <li>- radioaktive Stoffe</li> </ul>	Die Untersuchungsstrategie ist auf die Ausbreitungsmechanismen der Schadstoffarten abzustimmen. Je nach Stoffart sind entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich (s. Kap. 6.2)
9	Ablagerungszeitraum bei betriebenen Deponien und Altablagerungen?		Einfluß auf Ausbreitung und den Metabolismus der Schadstoffe sowie die chemischen Milieubedingungen.
10	Wie groß ist das zu untersuchende Objekt?		
11	Welche Tiefenbereiche müssen erkundet werden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oberfläche</li> <li>- bis 50 m</li> <li>- mehr als 50 m</li> </ul>	
12	Wie ist die geologische Situation im Erkundungstiefenbereich?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lockergesteine</li> <li>- Festgesteine</li> <li>- Festgesteine mit Lockergesteinsüberdeckung bzw. Verwitterungszone</li> </ul>	aus geologischer Voruntersuchung (s. Kap. 4.2.1 bzw. Band 4)
13	Art der Gesteine?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Granit, Basalt</li> <li>- Metamorphe Gesteine</li> <li>- Tonstein, Tonschiefer</li> <li>- Sandstein</li> <li>- Karbonate (Kalkstein)</li> <li>- Ton</li> <li>- Torf, Mudden</li> <li>- Geschiebemergel</li> <li>- Sand, Kies</li> </ul>	aus geologischer Voruntersuchung (s. Kap. 4.2.1 bzw. Band 4)
14	Wie groß ist der Abstand zum Grundwasser?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kleiner 3 m</li> <li>- 3 - 10 m</li> <li>- 10 - 30 m</li> <li>- mehr als 30 m</li> </ul>	Hydrogeologischer Standorttyp
15	Liegt das Untersuchungsgebiet in einer Grundwasserschutzzone?		
16	Gewässer im Untersuchungsgebiet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flüsse</li> <li>- Bäche</li> <li>- Quellen</li> <li>- Stehende Gewässer (Seen, Teiche, Tümpel)</li> <li>- Kanäle, Gräben</li> </ul>	
17	Wie sind die klimatischen Bedingungen?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mittlere Jahrestemperatur</li> <li>- Tiefe der Bodengefrierens</li> <li>- Niederschlagsmenge</li> </ul>	Bedeutung für die Grundwasserneubildung und die Verwitterung.
18	Gibt es alten Bergbau?		Alter Bergbau schafft mit seinen Hohlräumen Wasserwegsamkeiten. Auch die mit dem alten Bergbau einhergehenden Senkungserscheinungen schaffen Wasserwegsamkeiten für die Schadstoffausbreitung
19	Sind Karsterscheinungen im Untersuchungsgebiet bekannt?		Zu erwarten sind Klüfte und Hohlräume als Wegsamkeiten für die Schadstoffausbreitung und Senkungserscheinungen.

20	Gibt es Dolinen oder Anzeichen von Senkungen?		Kann oft aus topographischen und geologischen Karten sowie Luftbildern entnommen werden.
21	Gibt es Setzungserscheinungen auf der Deponie bzw. Altablagerung?		Der Grad der Kompaktion einer Deponie bzw. Altablagerung ist ein wesentlicher Parameter für die Prognose.
22	Sind Teile des Untersuchungsgebietes bebaut?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gebäude</li> <li>- Fundamente und Keller</li> <li>- Unterirdische Bauwerke (z. B. Bunker, Fabrikationsanlagen)</li> </ul>	
23	Sind Teile des Untersuchungsgebietes versiegelt?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine Versiegelung</li> <li>- Asphalt, Beton ohne Armierung, Schotterung</li> <li>- Beton mit Armierung</li> </ul>	Asphalt, Beton und Schotterung kann einige geophysikalische Methoden und die Probenahme stören.
24	Grad der Bebauung oder Versiegelung?		
25	Wie sieht die Umgebung des Untersuchungsgebietes aus?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Natürlich</li> <li>- Ländlich</li> <li>- Vorstädtisch</li> <li>- Städtisch</li> <li>- Industriegebiet</li> <li>- Militärgebiet</li> </ul>	
26	Gibt es unterirdische Tanks?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metalltanks</li> <li>- Nichtmetalltanks (Kunststofftanks)</li> </ul>	
27	Welche ober- und unterirdischen Leitungen gibt es im Untersuchungsgebiet oder im nahen Umfeld?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektrizität</li> <li>- Wasser- und Abwasser</li> <li>- Telefon</li> <li>- Gas- und Ölpipelines</li> </ul>	Die Leitungspläne sind oft ungenau und spiegeln den Planungsstand wider. Ggf. Vorerkundung mit Kabel- und Leitungssuchgeräten.
28	Gibt es eine Deponieabdichtung?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Basisabdichtung <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kunststoff</li> <li>- bindiges Material</li> <li>- beide Materialien</li> </ul> </li> <li>- Oberflächenabdichtung <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kunststoff</li> <li>- bindiges Material</li> <li>- beide Materialien</li> </ul> </li> </ul>	
29	Werden Teile des Untersuchungsgebietes landwirtschaftlich genutzt?		Zeit für die Arbeiten so legen, daß Flurschäden vermieden werden.
30	Wie ist der Bewuchs?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wiese oder Acker</li> <li>- einzelne Büsche</li> <li>- Wald</li> <li>- Gärten</li> </ul>	
31	Zugänglichkeit des Untersuchungsgebietes?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- befahrbar mit Normalfahrzeugen (PKW, LKW)</li> <li>- befahrbar mit Geländefahrzeugen</li> <li>- befahrbar mit Bohrgeräten</li> <li>- begehbar</li> <li>- unbegehbar</li> </ul>	Entscheidend für die Zugänglichkeit sind: Wegenetz, Straßenanbindung, Bewuchs, Zäune und Hangneigung. Gründe dafür, daß ein Gebiet nicht befahrbar oder begehbar ist, können auch Kampfmittel, Explosiv- und radioaktive Stoffe sein.
32	Wie groß ist der unbefahrbare Anteil des Untersuchungsgebietes?		
33	Wie groß ist der unbegehbarer Anteil des Untersuchungsgebietes?		
34	Wie groß ist der Vermessungsaufwand?		Wird bestimmt durch die Dichte des Meßnetzes, die Sichtverhältnisse (Bewuchs, Bebauung und Relief) und durch die Entfernung zu topographischen Bezugspunkten.

35	Wie groß sind die Reliefunterschiede im Untersuchungsgebiet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bis 1m</li> <li>- 1 bis 3 m</li> <li>- bis 10 m</li> <li>- größer als 10 m</li> </ul>	Bei einigen geophysikalischen Verfahren müssen die Meßergebnisse für eine korrekte Interpretation einer topographischen Korrektur unterzogen werden.
36	Gibt es Radio-, Fernseh-, Mobilfunk- oder Radarsender in einem Bereich von 2 km um das Untersuchungsgebiet?		Einige geophysikalische Methoden können durch Sender gestört werden. Beachten Sie in diesem Zusammenhang auch Flughäfen, Polizeistationen, Mobilfunkstationen und andere nichtkommerzielle Sender.
37	Gibt es akustische Störquellen im Untersuchungsgebiet oder in der Umgebung?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stark befahrene Straßen</li> <li>- Eisenbahnlinien</li> <li>- Flughäfen</li> <li>- Industrieanlagen</li> </ul>	Einige geophysikalische Methoden können durch akustische Störquellen beeinträchtigt werden.
38	Gibt es metallische Objekte im Untersuchungsgebiet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zäune</li> <li>- Stahlgittermasten</li> <li>- Metalltanks</li> <li>- Rohrleitungen</li> <li>- metallische Bohrlochverrohrungen</li> </ul>	Metallische Objekte stören magnetische (ferromagnetische Objekte) und elektromagnetische Messungen. Entscheidend ist die Masse und die Entfernung der Objekte.
39	Sind Vorbereitungen für die Feldarbeiten erforderlich?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Genehmigungen</li> <li>- Vermessungen</li> <li>- Regulierung von Flurschäden</li> <li>- etc.</li> </ul>	Hinweise zur Vorbereitung der Feldarbeiten (einschl. Rechtsgrundlage für die Arbeiten, Einholen von Genehmigungen mit Checkliste, Regulierung von Flurschäden und zu den notwendigen Vermessungsarbeiten) können Band 3 Geophysik, Kap. 2 entnommen werden.

### **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.1.3 Stufenweises Vorgehen bei der Erkundung**

Für die Standorterkundung für Deponien und Bearbeitung der Verdachtsflächen, von denen eine Gefahr für die Schutzgüter Boden, Wasser und Luft ausgehen kann, ist das stufenweise Vorgehen in Untersuchungsphasen, ausgehend von der Bestandsaufnahme und anschließender Erkundung mit eingeschränktem Aufwand und darauf aufbauender detaillierter Erkundung Stand der Technik (s. Kap. 2).

Jeder Deponie- oder Altlast-Standort befindet sich in einem regionalen Grundwassersystem mit einer Größe von mehreren  $10 \text{ km}^2$ , das in der Übersicht erkundet werden muß. Der Standort selbst ist mit einem engmaschigen Netz zu untersuchen. Für die Erkundung des Untergrundes von Altlasten (und neu anzulegenden Deponien) ist hauptsächlich der Tiefenbereich bis 50 m relevant. Für die Beschreibung des regionalen Grundwassersystems müssen vielfach auch Tiefen bis 300 m einbezogen werden.

Unabhängig von der jeweiligen Untersuchungsphase hat es sich bei Standortuntersuchung grundsätzlich bewährt, erst die Flächenaufnahmen mit

- geologischer Kartierung,
- Geofernerkundung und
- geophysikalischer Vermessung

durchzuführen. Die Geofernerkundung bietet sich insbesondere bei großflächigen Objekten an. Nach den Flächenaufnahmeverfahren kann die punktweise Erkundung gezielt angesetzt werden:

- Schürfe,
- Sondierungen,
- Bohrungen und Bohrkernaufnahmen sowie
- Auf- oder Ausbau des Netzes von Grundwassermeßstellen nachgeordnete geophysikalische und hydraulische Bohrlochuntersuchungen.

Aufbauend auf den punktuellen Erkundungsmaßnahmen und der gezielten Gewinnung von Grundwasser-, Boden- und Gesteinsproben erfolgen im nächsten Schritt die Laborversuche zur Ermittlung der physikalischen, petrographischen, mineralogische und physikalisch-chemischen Gesteinsparameter sowie chemischen Stoffgehalte. Ggf. schließen sich spezielle Laborversuche zur Ermittlung von Migrationsparametern und detaillierte Untersuchungen zum Gefüge an. Bei umfangreichen und komplexen Datenmaterial können auch statistische oder geostatistische Verfahren als Interpretationshilfen herangezogen werden.

Zu allen diesen Erkundungsschritten gibt es methodische Beispiele in Band 8 Fallbeispiele, aus denen Hinweise zu Aufwand und Nutzen der durchgeführten Untersuchungen entnommen und auf andere Standorte übertragen werden können. Die Beratung durch erfahrene Fachleute soll dadurch jedoch nicht ersetzt werden.

#### **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.1.4 Zuverlässigkeit der Aussagen (Sicherheitskonzept)**

Für eine weitgehend objektive Beurteilung eines Standortes ist die strenge methodische Trennung der Untersuchung und Charakterisierung des Standortes einerseits von der Evaluierung (Prognose, Risikoanalyse) andererseits sehr wichtig. Insofern ist beispielsweise ein Schadstoff-Transportmodell nicht das Endergebnis einer Standortbeurteilung, sondern lediglich eine Prognose, deren Aussagesicherheit (Wahrscheinlichkeit) durch Analysen, bzw. durch halbquantitative Sicherheitsbetrachtungen zu bestimmen ist. Die Aussagesicherheit (im Englischen bezeichnenderweise Unsicherheit = uncertainty genannt) hängt ihrerseits von 3 Typen der "Unsicherheiten" ab (MANN 1993):

Typ I: Fehlerhafte Messungen (zufällig oder systematisch) und Ungenauigkeiten des jeweiligen Meßverfahrens (Fehlergrenzen, Bestimmungsgrenzen) (s. Handbücher Band 1 - 6, einzelne Methoden).

Typ II: Natürliche Streuung der Parameter, die in der Geologie auch räumlich variiert (Heterogenität), Treffsicherheit bzw. Repräsentativität der gefundenen Werte (s. Band 4, Kap. 13).

Typ III: Unwägbarkeiten infolge unvollständiger Kenntnisse und notwendiger Vereinfachung der Modelle; Fehleinschätzungen von Zusammenhängen oder Gewichten einzelner Parameter; Rechenfehler.

Während sich Unsicherheiten vom Typ I u. II mit Hilfe der Statistik quantifizieren lassen, sind bei Typ III theoretisch gesehen nur qualitative Angaben möglich. Aus der Praxis kann man jedoch Abschätzungen der Fehlerwahrscheinlichkeiten vornehmen, z.B. durch Vergleichsmodelle und Validierung (s. Band 2) und durch fuzzy sets ("Methode der unscharfen Mengen") (FANG & CHEN 1990; KACEWICZ 1991; GANOULIS 1994).

Eine unabhängige Betrachtung der Aussagesicherheit gehört in jeder Erkundungsphase zur Qualitätssicherung (LANGER 1995).

## Literatur

- FANG, J. H. & CHEN, H. C. (1990): Uncertainties are better handled by fuzzy arithmetics. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol. **74**: 1228-1233.
- GANOULIS, G. J. (1994): Engineering risk analysis - Probabilities and fuzzy sets. VCH, Weinheim NewYork Basel Cambridge Tokio.
- KACEWICZ, M. (1991): Shape prediction with a fuzzy uncertainty measure. Math. Geol. **23**: 289-295.
- LANGER, M. (1995): Engineering geology and waste disposal. Scientific report and recommendations of the IAEG commission No. 14. IAEG Bull. **51**: 5-29. Paris.
- MANN, C. J. (1993): Uncertainty in geology. In: DAVIS, J. C. & HERZFELD, U.C. (Hrsg.) Computers in geology - 25 years of progress; pp. 241-253, Oxford Univ. Press.
- RAMSAY, L. (1995): Quality trade-offs in site investigations: Advantages of using test methods instead of laboratory analyses. In: VAN DEN BRINK, W. J., BOSMANN, R. & ARENDT, F. (eds.) Contaminated soil '95 pp. 113-123, Kluwer Academic Publishers.

## Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.2 Aufbau des Untergrundes

Ziel der Arbeiten ist die Erkundung des Aufbaus und der Wirksamkeit der geologischen Barriere (s. Kap. 3.2) im Untergrund von Deponie- und Altablagerungsstandorten. Dabei sind folgende Elemente zu beachten:

- Lithologische, biostratigraphische und petrographische Gliederung,
- Struktur, Lagerungsverhältnisse und Tektonik,
- geogene Veränderlichkeiten (Karst, Erdbeben, Senkungserscheinungen etc.),
- anthropogene Veränderungen (Bergbau, Bauwerke, Steinbrüche, Kiesgruben, Tonabbau etc.)

Zur Erkundung und Charakterisierung der geologischen Barriere ist ein detailliertes geowissenschaftliches Untersuchungsprogramm erforderlich. Die dabei eingesetzten Methoden müssen auf die geologisch/hydrogeologischen Verhältnisse am Standort abgestimmt sein. Zu untersuchen ist nicht nur der Aufbau des Untergrundes unterhalb der Ablagerungsfläche (*Deponieuntergrund*) sondern auch das Umfeld.

Als *geologisches Umfeld* wird der Bereich um eine Deponie/Altablagerung bezeichnet, der von möglichen Schadstoffausträgen über den Boden-, Wasser- und Luftpfad mit einer von Null verschiedenen Wahrscheinlichkeit verändert und dessen Schadstoffrückhaltevermögen in Anspruch genommen werden könnte. Dazu gehört auch der Teil des regionalen Grundwassersystems, der eine mögliche Schadstoffbelastung beeinflusst bzw. in dem die Schadstoffbelastung durch Verdünnung und andere Vorgänge bis zu den Grenz- oder Hintergrundwerten vermindert wird. Die laterale und vertikale Ausdehnung dieses Bereiches wird, abhängig von der Standortsituation, durch Plausibilitätsbetrachtungen und Erfahrung festgelegt. Anhaltswerte werden in Kap. 4.1.3 angegeben.



Relevant für die Erkundung ist der Tiefenbereich von der Geländeoberfläche bis 50 m Tiefe. Darüber hinaus ist der Tiefenbereich bis 500 m Tiefe oft zum Verständnis der Strukturen (regionale Stratigraphie und Tektonik) sowie für das regionale Grundwassersystem beachtlich.

Bei der Erkundung des Aufbaus des Deponieuntergrundes sowie des geologischen Umfeldes ist ein stufenweises Vorgehen angeraten:

- Phase 1: Orientierende Untersuchungen
- Phase 2 : Detaillierte Untersuchungen

### **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.2.1 Orientierende Untersuchungen**

Der Planung des geowissenschaftlichen Erkundungsprogramms für einen Deponie- oder Altlaststandort muß zunächst eine Bestandsaufnahme der geologischen Situation (Zusammenstellung der relevanten Unterlagen und Erstbewertung) vorausgehen. Die meisten Informationen dazu sind Archivmaterial zu entnehmen. An erster Stelle stehen

- Topographische Karten (insbesondere die TK 25 - früher "Meßtischblätter" genannt sowie die in Ostdeutschland verbreitete TK 10)

Diese (auch ältere Ausgaben) und äquivalente Kartenwerke sowie digitale Karten werden von den Landesvermessungsämtern herausgegeben. In östlichen Bundesländern ergeben sich Probleme durch die Existenz zweier Kartensysteme (s. Bd. 4, Kap. 2). Die Landesvermessungsämter verfügen auch über die wichtigen Archive für

- Luftbilder.

Seit den 50iger Jahren werden etwa alle 5 Jahre neue Luftbildserien zur Aktualisierung der topographischen Landesaufnahme hergestellt. Dadurch und mit Hilfe spezieller, z.B. militärischer und historischer Luftaufnahmen (Quellen s. Bd. 1), in eingeschränktem Maße auch mit Satellitenbildern, lassen sich topographische Veränderungen besonders gut herausfinden: z.B. verfüllte Steinbrüche und Gruben, bebaute Halden, alte Flußläufe, Kanäle, Gräben und Dränagen, ehemalige Gebäude, Industrieanlagen und Bahngleise (ausführliche Angaben s. Bd. 1). Die

- Befragung von Zeitzeugen liefert vielfach wertvolle Zusatzinformationen.

Die Geologischen Dienste der Bundesländer führen folgende Unterlagen:

- Geologische Karten (insbesondere GK 25 mit Erläuterungen u. GÜK 200), z.T. digital,
- Bodenkundliche Karten (insbesondere BK 25, BK 50 u. BÜK 200), z.T. digital,
- Hydrogeologische Karten (Übersichtskarten und insbesondere Karten der geologischen Landesaufnahme 1 : 50.000),
- Ingenieurgeologische Karten 1 : 25.000 bis 1 : 50.000,
- Baugrunderkarten meist 1 : 2.000 bis 1 : 10.000),
- Bohrprofile, Aufschlußbeschreibungen und Manuskriptkarten, Streckenaufnahmen für Straßenbauten, ingenieurgeologische Aufnahmen für Brückenbauwerke, Tunnel u.ä.),
- Berichte und Gutachten sowie Spezialliteratur.

Die Geologische Spezialkarte GK 25 mit Erläuterungen ist in Deutschland nahezu flächendeckend vorhanden. Einige Regionen weisen noch Lücken auf. Der Bearbeitungsstand ist sehr unterschiedlich. Viele der bereits 60 - 100 Jahre alten Blätter wurden im Zuge der geologischen Landesaufnahme noch nicht neu bearbeitet. Ihr Informationsgehalt beschränkt sich in der Regel auf die "klassische Geologie" mit Hinweisen auf die Rohstoffvorkommen. Die Angaben über den tektonischen Bau des Untergrundes entsprechen nicht mehr den heutigen Vorstellungen, ebenso die Einteilung der Lockergesteine des Quartärs (besonders im Flachland). Die GK 25 - etwa der letzten 30 Jahre - zeichnen sich durch vielfältige und z.T. sehr ausführliche ingenieurgeologische, bodenmechanische, hydrogeologische und bodenkundliche Informationen aus. Oft enthalten die Erläuterungshefte Spezialkarten zu diesen Fachgebieten und Bohrprofile (weitere Angaben dazu in Bd. 4, Kap. 2).

Außer den amtlichen Kartenwerken enthalten z.B. die vom Verlag Bornträger herausgegebene *Sammlung Geologischer Führer* (über 40 Bände) sowie *geowissenschaftliche, bautechnische und rohstoffwirtschaftliche Fachzeitschriften* häufig nützliche regionale und lokale geologische Darstellungen. Diese Beiträge sind in Dokumentationssystemen erfaßt (u. a. GEOFIZ der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - BGR, Hannover; *Geotechnical Abstracts* bei der Bundesanstalt für Straßenwesen - BASt, Bergisch Gladbach). Eine Adressenliste einschlägiger Stellen findet sich im Anhang.

Daten zu Geographie, Topographie, Bodenformen, Geologie und weitere "Naturdaten" sind in zunehmendem Maße in digitaler Form in Geographischen Informationssystemen (GIS), verschiedenen Geo-Datenbanken der Länder und des Bundes (Bodeninformationssystem BIS) abgelegt. Für die Erstellung digitaler Karten wird in Deutschland das *Amtliche Topographische Kartographische Informationssystem* (ATKIS) verwendet, dessen Daten mit Spezialprogrammen, z.B. ARCINFO, weiterverarbeitet werden können.

Die Datenbeschaffung in Archiven kann mit erheblichem Zeitaufwand verbunden sein. Die praktisch stets verfügbaren TK 25 und GK 25 liefern jedoch in vielen Fällen schon genügend Informationen über den Aufbau des Untergrundes, die Grundwassersituation und hydrologisch relevanten Tatsachen, um mit der Planung der Erkundungsmaßnahmen oder sogar mit ihrer Ausführung beginnen zu können.

**Tab. 4.3 :** Informationsquellen für die Beschreibung der geologischen Situation eines Standortes; ausführlichere Angaben zu den Informationsquellen stehen an den in der letzten Spalte angegebenen Stellen des Handbuches "Deponieuntergrund".

Merkmale	Informationsquellen	Band, Kapitel
1. Landschaftstyp (Marsch, Hochfläche, Talau, ...)	Kleinmaßstäbliche topographische Karten	IV, 2.1
2. Morphologie (eben, geneigt, Hanglage, starkes Relief, NN- Höhen, ...)	TK 25 und größer; GIS; ATKIS Luftbilder	I, IV, 2.1, 2.2
3. Gewässernetz; Quellen	TK 25 u. größer; GIS; ATKIS; Luftbilder; Geländebegehung	I, IV, 2.1, 2.2 2.6
4. Beschaffenheit des Oberbodens (feucht, ammoorig, trocken, tiefgründig, Aufschüttungen, ...)	TK 25, GK 25; Luftbilder; spez. Fernerkundung; bodenkundliche Karten; BIS; Geländebegehung	I, 2.1, 2.2, 2.5, 2.6, 2.7
5. Regionale Geologie (z.B. Schieferhülle des Granulitgebirges, Wachsenburggraben, Elbe-Urstromtal, ...)	GK 25; Geol. Spezialliteratur; Archive der Geologischen Dienste; GEOFIZ	IV, 2.1

6. Lokale geologische Struktur (z.B. Hochscholle in der Randverwerfung, grabenartige Senke, Geestrücken, ...)	s. Zeile 5	IV, 2.1
7. Schichtenfolge (Boden-/Gesteinsarten und ihre stratigraphische Zuordnung)	s. Zeile 5; zusätzlich Bohrprofile, Manuskriptkarten, Streckengutachten (diese auch bei Bauämtern, Landesverwaltungsämtern, öffentlichen und privaten Projektträgern größerer Bauvorhaben) ggf. zusätzlich Geländebegehung	IV, 2.1 2.3
8. Tektonische Elemente (Einfallen und Ausbildung der Schichtflächen; Faltenachsen; Raumlage, Häufigkeit und Ausbildung der Schieferungs- u. Kluffflächen, Verwerfungen)	s. Zeile 7; zusätzlich Aufschlußbegehung; Luftbilder	IV, 2.1, 2.3 I,
9. Tieferer Untergrund (z.B. Salzstock; mächtige eintönige Gesteinsserien)	s. Zeile 5; Oberbergämter	IV, 2.1
10. Grundwasservorkommen; Grundwassernutzung; langjährige Wasserstände des Grundwassers und der Oberflächengewässer	s. Zeile 5; wasserwirtschaftliche Verwaltungen und regionale Verbände; Bauverwaltungen, Versorgungsunternehmen	II, IV, 2.1, 2.6
11. Verkarstung (Oberflächen-/Tiefenkarst)	s. Zeile 5; ggf. zusätzlich Luftbilder	I, IV, 2.1, 2.6, 2.7
12. Erdbebengefährdung	s. Zeile 5, besonders BGR; DIN 4149; Erdbebenwarten; Geophysikalische Institute	IV, 2.1, 2.7
13. Bergbauliche Aktivitäten; Bergsenkungen; Setzungsbeobachtungen	s. Zeile 5; Bergämter; Bergsicherung Schneeberg und Ilfeld bzw. Nachfolgeeinrichtungen (östl. Bundesländer) Bauverwaltungen; alte TK 25; Luftbilder	I, IV, 2.1, 2.2, 2.7

Umfangreiche geophysikalische Ergebnisse liegen durch die Landesaufnahme, die Lagerstätten erkundung auf Erdöl und Erdgas, Braunkohle, Uran und andere Rohstoffe sowie aus der Grundwasser erkundung und von ingenieur geophysikalischen Arbeiten vor. Dabei ist die Datendichte und die Zugänglichkeit der Daten (Eigentumsrechte) in den alten und neuen Bundesländern unterschiedlich. Ausgangspunkt war in beiden Teilen Deutschlands die "Reichsaufnahme" bis 1945 mit Karten für magnetische und Schweranomalien sowie refraktionsseismische Messungen.

### **Alte Bundesländer**

Als Ergebnisse der Landesaufnahme stehen zur Verfügung:

- BGR (1976): Karte der Anomalien der Totalintensität des erdmagnetischen Feldes der Bundesrepublik Deutschland 1 : 500 000,
- PLAUMANN, S. (1983, 1991, 1995): Schwerekarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 500 000. NLfB, Hannover,
- regionale seismische Ergebnisse, z. B. DEKORP,
- magnetische, gravimetrische und geoelektrische Spezialuntersuchungen.

Anfragen sind zu richten an die Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Hannover und die Geologischen Landesämter (GLÄ) der Bundesländer. Umfangreiche seismische Ergebnisse aus der Kohlenwasserstoffprospektion liegen bei den Erdölfirmen vor. Eine Auswertung dieses Materials enthält der von der BGR im Rahmen eines BMFT/BMBF-Vorhabens erstellte "Geotektonische Atlas von NW - Deutschland" mit Tiefenlinienplänen ausgewählter geologischer Horizonte 1 : 100 000 in zahlreichen Einzelblättern:

- KOCKEL, F. et al. (1985): Geotektonischer Atlas von NW - Deutschland. Unveröff. Abschlußbericht, BGR, Archiv-Nr. 98 866, Hannover.
- KOCKEL, F. et al. (1996): Geotektonischer Atlas von NW - Deutschland 1 : 300 000. BGR, Hannover. (Über den Vertrieb der BGR erhältlich.)

### **Neue Bundesländer**

Für die neuen Bundesländer liegen sehr viel mehr geophysikalische Daten und zusammenfassende Ergebnisberichte vor als für die alten Bundesländer. Da die Explorationsziele für den Süd- und Nordteil der ehemaligen DDR unterschiedlich waren (Nordteil: überwiegend Kohlenwasserstofferkundung, Südteil: überwiegend Mineralische Rohstoffe), findet sich diese Einteilung auch in zusammenfassenden Ergebnisberichten wieder. Als Grenze zwischen beiden Regionen wurde die Mitteldeutsche Hauptlinie (Hauptabbruch) definiert. Andere Erkundungsziele waren die Braunkohle Mitteldeutschlands und der Lausitz sowie die Uranprospektion der SDAG Wismut. Beispiele sind:

- Regionales Kartenwerk der Reflexionsseismik. Mächtigkeitkarten der Reflexionshorizonte vom Zechstein bis zum Quartär 1 : 100 000 und 1 : 500 000.
- LINDNER, H. & SCHEIBE, R. (1977): Magnetische Karte der DDR 1 : 500 000.
- LEHMANN, M. et al. (1971/1980):  $\Delta Z / \Delta T$  - Isanomalien Südteil der DDR 1 : 200 000.
- LEHMANN, M. et al. (1979):  $\Delta Z / \Delta T$  - Isanomalien Südteil der DDR, Metallogenetische Karte Erzgebirge - Vogtland 1 : 100 000.
- RÖLLING, G. et al. (1990): Abschlußbericht Vergleichende Bewertung der Rohstoffführung in den Grundgebirgseinheiten im Südteil der DDR. UWG, Berlin. Zusammenfassender Bericht mit zahlreichen Karten. Enthalten sind auch geochemische Ergebnisse.
- LINDNER, H. et al. (1989): Zusammenfassende geophysikalische Karten - Südteil der DDR. VEB Geophysik, Leipzig.
- EICHNER, M. et al. (1980): Kartierung von Tiefenlagen der Pleistozänbasis. Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Seismik, Gravimetrie und Magnetik. VEB Geophysik, Leipzig.
- EICHNER, M. et al. (1980): Rayonierung Südteil der DDR. Geophysikalisch - geologische Rayonierung und Interpretation der Schwerekarte und magnetischen Karten sowie daraus abgeleiteter Transformationskarten. VEB Geophysik, Leipzig.
- KLEE, H. & RÖDER, M. (1989): Gravimetrie/Aeromagnetik Zittau-Süd. Gravimetrische Spezialmessungen zur Strukturerkundung im Prätertiär und zur Präzisierung der Lagerungsverhältnisse im Tertiär und Quartär im Gebiet des Zittauer Beckens. Bericht im Sachgebiet Braunkohle. VEB Geophysik, Leipzig.

Das umfangreiche Datenmaterial und das Berichtsarchiv des ehemaligen VEB Geophysik wird im Auftrag der Geologischen Landesämter der neuen Bundesländer von Geophysik GGD, Leipzig verwaltet. Die Rechte an den Daten aus der Nicht - Kohlenwasserstoff - Exploration liegen bei den Geologischen Landesämtern. Die Eigentumsrechte an dem sehr umfangreichen Datenmaterial aus der Kohlenwasserstoffprospektion in der ehemaligen DDR liegen bei Erdöl und Erdgas, Gommern.

**Tab. 4.4 : Datendichte**

Methode	Nordteil Datendichte bzw. Meßpunktabstand	Südteil Datendichte bzw. Meßpunktabstand
Magnetik	500 m	5 - 1000 m (1,2)
Gravimetrie	1200 - 1500 m (1) 250 - 2000 m (2)	500 - 1500 m (1) 100 - 500 m (2) 25 - 200 m (3)
Reflexionsseismik	0,2 - 1,0 km/km <sup>2</sup> 20 - 100 m (G) 50 - 320 m (S)	

(1) Regionalmessungen, (2) Übersichts- / Spezialvermessungen, (3) Braunkohlenerkundung, (G) Geophongruppenabstand, (S) Schußpunktabstand

Neben der Nutzung der Originalberichte können durch ein den heutigen rechentechnischen Möglichkeiten entsprechendes Reprozessing der Meßdaten bzw. eine der angestrebten Nutzung angepaßte Datenaufbereitung ggf. mit Verdichtungs- oder Ergänzungsmessungen eine deutliche Verbesserung gegenüber der Erstbearbeitung erreicht und wertvolle Informationen erschlossen werden. Ein Beispiel dazu ist in Kap. 4.4.2. des Bd. 8, Fallbeispiele enthalten. Mit einem Reprozessing von Meßergebnissen aus der seismischen Prospektion auf Erdöl und Erdgas konnten u. a. Informationen zu pleistozänen Rinnenstrukturen, der Oberfläche Oligozän (Rupelton) und zur Tertiärbasis erhalten werden. Die neuen Möglichkeiten der Signalbearbeitung sowie zusätzliche dynamische und statische Korrekturverbesserungen bei der Nachbearbeitung führen zu einer deutlichen Qualitätsverbesserung.

Zusätzlich sind *Geländebegehungen* für die Planung unerlässlich, weil

- a) erst die unmittelbare Wahrnehmung eine wirklichkeitsgetreue Vorstellung vom Planungsgebiet vermittelt,
- b) die vorhandenen Daten aktuell überprüft und Veränderungen durch Baumaßnahmen o.ä. erkannt werden müssen und
- c) Fachleute vor Ort erfahrungsgemäß oft wichtige neue Aspekte feststellen.

Orientierende Untersuchungen können auch Feldarbeiten einschließen, die der "Orientierung" für die Detailuntersuchungen dienen. Es gelten die in Kap. 4.1 dargestellten generellen Untersuchungsstrategien. Entscheidungen über Art und Umfang weiterer Maßnahmen werden auf der Grundlage der Ergebnisse der orientierenden Untersuchungen getroffen.

### **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.2.2 Detaillierte Untersuchungen**

Detaillierte Untersuchungen beinhalten eine Verdichtung der Untersuchungen aus den vorangehenden Phasen und sind u. a. auf folgende Erkundungsziele gerichtet:

### **Lithologische, biostratigraphische und petrographische Gliederung**

- Laterale Abgrenzung lithologischer Einheiten (flächenhafte (laterale) Verbreitung der geologischen Barriere)
- Vertikale Abgrenzung lithologischer Einheiten (vertikale Verbreitung der geologischen Barriere)
- Bestimmung der Teufe und Mächtigkeit von Grundwasserleitern und Stauern
- Ermittlung der lithologischen, petrophysikalischen und hydraulischen Eigenschaften lithologischer Einheiten
- Bestimmung der Homogenität von Gesteinspaketen
- Bestimmung des Schadstoffrückhaltepotentials lithologischer Einheiten

### **Struktur, Lagerungsverhältnisse und Tektonik**

- Erkundung regionaler geologischer Strukturen
- Erkundung lokaler geologischer Strukturen
- Bestimmung des Verlaufs (Einfallens und Streichens) von Schichten
- Kartierung von Erosionsrinnen (in Abhängigkeit von Rinnenfüllung)
- Ermittlung der Festgesteinsoberkante unter Lockergestein sowie der Mächtigkeit der Verwitterungsschicht
- Lokalisierung von Verwerfungen, Störungen, Kluft- und Auflockerungszonen im Festgestein
- Nachweis von Lagerungsstörungen und Wasserwegsamkeiten in Lockergesteinen

### **Geogene Veränderlichkeiten**

- Beurteilung der Erdbebengefährdung und Aktivität von tektonischen Störungen
- Einschätzung der Gefahr von Hangrutschungen
- Prüfung auf Gefahr von Bergsenkungen und Tagesbrüchen als Folge ehemaligen Bergbaus sowie Erdfällen in Karstgebieten
- Erkundung von Setzungen verfüllter Tagebaue und sonstiger Restlöcher

### **Anthropogene Veränderungen**

- Auffinden von verdeckten Altablagerungen und Altstandorten
- Erkundung anthropogener Strukturen unter Deponien und Altablagerungen
- Ermittlung der Mächtigkeit von Deponiekörpern und Kartierung der Deponiebasis
- Gliederung des Deponiekörpers (Abgrenzen von Bereichen mit erhöhtem Bauschuttanteil, mit galvanischen Schlämmen, mit stärkerer Durchfeuchtung, Faßlager etc.)
- Erkundung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung einer Deponie
- Nachweis von Wärmequellen (z. B. Schwel- bzw. Brandherde) sowie von Gasaustrittsbereichen
- Nachweis und Abgrenzung von Sickerwasseraustritten und ggf. der Schadstoffausbreitung im Deponieumfeld
- Erkundung abbaubedingter Veränderungen des Gebirges

- Ortung natürlicher und künstlicher Hohlräume

Bei der Planung der Erkundungsarbeiten sind die in Kap. 4.1 dargestellten generellen Erkundungsstrategien, Voraussetzungen (Zugänglichkeit etc.) und Fallunterscheidungen (z. B. Locker- oder Festgestein) zu beachten.

### **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.2.2.1 Lithologische, biostratigraphische und petrographische Gliederung der geologischen Barriere**

Die Verbreitung und Mächtigkeit der geologischen Barriere werden mit geologischen Untersuchungsverfahren (Schürfen, Bohrungen, Sondierungen) in Kombination mit geophysikalischen Methoden und Fernerkundungsverfahren bestimmt.

*Geologische Untersuchungen* (Bd. 4, Kap. 2) liefern Informationen über den geologischen Aufbau des unmittelbaren Untergrundes und des Umfeldes von Altlasten und Deponien. Sie bilden die Grundlage für die detaillierte Erkundung und Standortbeurteilung. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen und das daraus abgeleitete geologische Modell sind für die Planung der geophysikalischer Messungen, Aufschlußarbeiten, Probenahmen und anderer Maßnahmen wichtig. Die Ausdehnung des zu untersuchenden Gebietes hängt im wesentlichen von seinem geologischen Bau, von der Größe des regionalen Grundwassersystems, aber auch von der Art und Menge der abgelagerten oder abzulagernden Schadstoffe ab.

Am Anfang wird die in der Geologischen Karte (vorzugsweise im Maßstab 1:25.000) dargestellte Situation auf den betreffenden Flächen interpretiert. Diese Angaben sind durch geologische Feldarbeiten zu überprüfen, ggf. zu revidieren und durch spezielle Informationen zu ergänzen.

Geologische Feldarbeiten für die Standorterkundung werden in Maßstäben durchgeführt, welche die Genauigkeit der üblichen Kartierungen für die Geologische Karte 1: 25.000 übersteigen. Bei ungünstigen natürlichen Aufschlußverhältnissen (z.B. im Flachland) ist die notwendige Datendichte häufig erst mit Sondierungen, Schürfen, Bohrungen, geophysikalischen Messungen, Probenahmen und Laboruntersuchungen zu erreichen. Die Bedeutung der durch unmittelbare Beobachtung mit geologisch geschulten Augen im Feld gewinnbaren Informationen wird jedoch häufig unterschätzt.

*Schürfgruben und -gräben* (Bd. 4, Kap. 4) geben auf einfachste und kostengünstigste Weise zuverlässigen Aufschluß über die Untergrundverhältnisse bis in etwa 6 m Tiefe, allerdings i. allg. nur bis zum Erreichen des Grundwasserspiegels. Für tiefere Bereiche sind besondere und meist kostspielige Maßnahmen erforderlich (Verbau, Wasserhaltung, 2 oder mehr Bagger). Schürfe können auch in Festgestein (Bodenklassen 5 und 6, DIN 18300; in Bodenklasse 7 unter Umständen mit Hilfe von Sprengmitteln) sowie auf Deponien, Bergbau-, Hütten- und sonstigen Fabrikgeländen angelegt werden. Schürfe dienen wegen ihres großflächigen Ausschnitts sehr gut der Erkundung der geologischen Situation, beispielsweise der Ermittlung des unter Verwitterungszonen, Hangschutt, Fließerden, Halden, Gebäuden und Verkehrswegen anstehenden Gesteins und seiner Lagerungsverhältnisse, der Ausdehnung von Aufschüttungen mit Siedlungs- und Gewerbeabfällen, von Bauschutt oder bergbaubedingten Bruchzonen. Sie können einen Einblick in die Grundwasserverhältnisse geben, die Interpretation von Ergebnissen von Bohrungen und geophysikalischen Untersuchungen erleichtern und erste Hinweise auf Kontaminationen liefern. Schürfe bieten die beste Möglichkeit, einwandfreie Sonderproben (bei nicht standfestem Untergrund allerdings nur von der Schürfsohle aus) zu gewinnen. Schürfe sind bisweilen für den Ansatz von Bohrungen hilfreich oder sogar notwendig, um Bauschutt, Abfälle oder andere Bohr- und Sondierhindernisse zu beseitigen.

Das Hauptkriterium für die Auswahl des *Bohrverfahrens* (Bd. 4, Kap. 5) ist die sichere Erkundung des Untergrundes bis zu der geforderten Aufschlußtiefe und die Erreichung einer hohen Probenqualität. Dieses Kriterium beinhaltet die Abteufung der Bohrung in der Form, daß nicht äußere Einflüsse den Bohrvorgang bestimmen oder zum Abbruch führen können. Die in der DIN 4021 in Tabelle 1 und 2 definierten Bohrverfahren (Bohrungen mit durchgehender Gewinnung von nicht gekernten und gekernten Boden- und Gesteinsproben) gewährleisten diese Anforderung. Mit den Kleinbohrungen (früher Sondierbohrungen genannt) nach Tabelle 3 der DIN 4021 kann diese Forderung nicht erfüllt werden. Die Kleinbohrverfahren (z.B. Rammkernsondierungen) können als ergänzende oder verdichtende Aufschlüsse dazu dienen, die Mächtigkeit und das Vorhandensein der geologischen Barriere zwischen den Hauptbohrungen nachzuweisen. Diese Einsatzmöglichkeit von Kleinbohrungen ist insbesondere von Bedeutung, wenn vom geotechnischen Sachverständigen oder den Genehmigungsbehörden ein engeres Untersuchungsrastraster festgelegt wird. Die ergänzende Erkundung der geologischen Barriere mit Kleinbohrungen muß, hinsichtlich des Rückbaues der Bohrungen, mit dem gleichen Qualitätsstandard wie bei den Hauptbohrungen erfolgen. Diese Anforderung macht generell den Einsatz einer Verrohrung, zumindest einer Hilfsverrohrung, erforderlich (Bd. 4, Kap. 5.8). Bohrungen verursachen i.d.R. den größten Anteil der Kosten für die Felderkundung. Geophysikalische Bohrlochmessungen (Bd. 3, Kap. 11), die die Aussagekraft von Bohrproben und Bohrkernen insbesondere hinsichtlich der Genauigkeit der Teufenangaben von Schichtgrenzen beträchtlich erhöhen, sollten in keinem Fall fehlen. Milieusondenmessungen (Bd. 3, Kap. 13) können einen schnellen Überblick über den Zustand von Grundwässern liefern.

*Geotechnische Sondierungen* (Bd. 4, Kap. 3.2) dienen zur Ermittlung der Untergrundeigenschaften durch Messungen in einem durch Bodenverdrängung geschaffenen Loch. Die Durchführung von Rammsondierungen, Standard Penetration Tests und Drucksondierungen sind in DIN 4094 genormt. Dabei wird im wesentlichen der Widerstand des Bodens gegen das Einrammen oder Eindringen einer Sondenspitze bestimmt. Zur Bestimmung von Schichtgrenzen bzw. Mächtigkeiten von Lockergesteinen eignen sich Ramm- und Drucksondierungen gleichermaßen, wobei die Drucksondierungen in Verbindung mit Messungen der lokalen Mantelreibung und des Porenwasserdrucks auch eine Bodenansprache in begrenztem Umfang ermöglicht. Durch Porenwasserdruckmessungen lassen sich sandige und tonige Schichten sehr gut voneinander unterscheiden (i.e. siehe Bd. 4, Kap. 3.2). Alle genannten Sondierungen sind ohne Korrelation mit Bohrproben nicht eindeutig zu interpretieren. Sie sind also als Maßnahmen zur Ergänzung von Bohrergebnissen zu verstehen.

Bei *Geophysikalischen Penetrationssondierungen* (Bd. 3, Kap. 12) wird das Aufschlußverfahren der Penetrationssondierung (Drucksondierung) mit ausgewählten Methoden der geophysikalischen Bohrlochmessungen und einer Probenahmetechnik kombiniert. Die Messung der Parameter erfolgt in zwei Phasen. Während des Eindringens des Gestänges liefern die Sensoren im Gestängekopf die mechanischen Parameter Spitzenwiderstand, Mantelreibung sowie den Porenwasserdruck. Gleichzeitig wird die zum Eindringen erforderliche hydraulische Gesamtdruckkraft gemessen. In der 2. Phase werden im Inneren des Gestänges verschiedene Sonden herabgelassen, die digitale Daten in gleichmäßigen, dichten Abständen liefern (Tongehalt aus natürlicher Gamma-Aktivität, Gamma-Gamma-Dichte und Neutron-Neutron-Wassergehalt). Zur lithologischen Gliederung der durchteuften Schichten sollten bei Penetrationssondierungen wenigstens 3 voneinander unabhängige physikalische Parameter gemessen werden. Besonders geeignet sind dafür der Spitzenwiderstand, die natürliche Gamma-Aktivität und die Dichte nach Gamma-Gamma-Messungen. Für Drucksonden sind Sondenköpfe und feldtaugliche Meßanlagen zur faseroptischen Laserfluoreszenzspektrometrie verfügbar. Die Nachweisgrenze für PAK im Wasser liegt bei  $0,1 \mu\text{g l}^{-1}$ . Systeme zur In-situ-Bestimmung der Gehalte von MKW, Phenolen und Monoaromaten (BTX) sind in der Entwicklung und z. T. schon verfügbar (s. a. Bd. 6, Kap. 3.1.1.3).

Für die weitere Erkundung des Untergrundes steht ein breites Spektrum geophysikalischer Methoden zur Verfügung (s. Band 3). Dabei sind u. a. als Verfahren eingeführt: Magnetik,



Gravimetrie, Geoelektrik, Elektromagnetik, Bodenradar, Refraktions- und Reflexionsseismik, Geothermik, Aerogeophysik, Bohrlochgeophysik und Milieusondenmessungen. Geophysikalische Meßmethoden sind aufgrund ihrer 3-dimensionalen Raumdurchdringung besonders gut geeignet, um die zwischen den Aufschlußpunkten (z. B. Bohrungen) liegenden Bereiche quasikontinuierlich zu erfassen und ein räumliches Abbild des Untergrundes zu erstellen. Auch dort, wo wegen Bebauung, hoher Kontamination oder verborgener Munition nicht gebohrt werden darf, ermöglichen geophysikalische Messungen Feststellungen über die Strukturen des Untergrundes von der Erdoberfläche und gegebenenfalls auch vom Flugzeug bzw. Hubschrauber aus. Geophysikalische Methoden dienen auch dazu, die Ansatzpunkte für Bohrungen und Brunnen richtig anzusetzen und damit Mittel zu sparen.

Die geophysikalischen Verfahren ergänzen sich wechselseitig, da sie für unterschiedliche Materialparameter (Dichte, Leitfähigkeit etc.) sensitiv sind. So werden mit seismischen Methoden vorwiegend die mechanischen Parameter und die Lagerungsverhältnisse untersucht, während die Seismik bisher kaum Aussagen über den stofflichen Bestand der Schichten und Schichtwässer liefert. Elektrische und elektromagnetische Methoden reagieren sehr empfindlich auf Änderungen im Elektrolytgehalt der Schichtwässer. Bodenradar verspricht nur in trockenen, schlechtleitenden Locker- und Festgesteinen Erfolge. Radar und elektromagnetische Verfahren können gut durch trockene Sande "sehen", wo die hochfrequente Seismik Probleme zeigt. Eine mit Sand oder Kies gefüllte Rinne in einer Ton- oder Geschiebemergelschicht kann bei versalztem Schichtwasser kaum mit elektrischen und elektromagnetischen Verfahren nachgewiesen werden. In solchen Spezialfällen können Schweremessungen weiterhelfen.

Zum Auffinden und Abgrenzen verdeckter Altablagerungen haben sich magnetische und elektromagnetische Kartierungen bewährt. Auch große Flächen können mit diesen Verfahren in kurzer Zeit abgemessen werden. Zur Erkundung der Strukturen, die das regionale Grundwassersystem beeinflussen, bieten sich Seismik und Geoelektrik an. Zur Untersuchung des lokalen Systems und von Wasserwegigkeiten können alle Verfahren mit den bereits genannten Einschränkungen beitragen. Die Deponiesohle ist oft wegen des fehlenden oder geringen Parameterkontrastes nur schwer zu kartieren. In einigen Fällen (z. B. mit Abfall verfüllter Steinbruch) können neben der Seismik auch Schweremessungen zur Darstellung der Deponiesohle verwendet werden. Zur Überwachung von Altlasten eignen sich die Eigenpotentialmethode sowie andere geoelektrische und elektromagnetische Verfahren. Mit geothermischen Messungen können sowohl Sickerwasseraustritte/Schadstofffahnen als auch Wärmequellen im Deponiekörper (z. B. Schwel- bzw. Brandherde sowie Gasaustrittsbereiche) nachgewiesen und abgegrenzt werden.

Bei großen und/oder unzugänglichen Untersuchungsgebieten sollten aerogeophysikalische Messungen (Bd. 3, Kap. 10) in Erwägung gezogen werden.

Für die Projektierung und Auswertung geophysikalischer Messungen zur lithologischen Gliederung des Untergrundes von Deponien und Altlasten sowie zur Bewertung der Eigenschaften der geologischen Barriere ist die Kenntnis der physikalischen Materialparameter des Untersuchungsobjektes unerlässlich. Die petrophysikalischen Eigenschaften können durch in Feld- und Laborversuchen bestimmt werden (Bd. 5, Kap. 4.1 und Bd. 3, Kap. 14). Hierzu gehören Dichte, Porosität, Wassergehalt, Sättigung, porengometrische Parameter, Durchlässigkeit, Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen, elektrische Eigenschaften, magnetische Suszeptibilität sowie Wärmeleitfähigkeit.

Tab. 4.5 gibt einen Überblick (Anhaltspunkte und Erfahrungswerte) über die Eignung geowissenschaftlicher Methoden für die Aufgaben der detaillierten Standorterkundung. Damit soll nicht die Beratung durch den erfahrenen Fachmann ersetzt werden.

### Kapitel 4.2.2.2 Homogenität - Heterogenität der geologischen Barriere

In der TA Siedlungsabfall vom 01. 06. 1993 wird gefordert, daß die geologische Barriere möglichst homogen ausgebildet sein soll. Die Heterogenität des Untergrundes kann durch eine geschickte punktuelle Probenahme (i.w. Bohrungen) - mit ergänzenden bohrlochgeophysikalischen Messungen (Bd. 3, Kap. 11) - und mit geophysikalischen Methoden (Bd. 3) erkundet werden.

Da Struktur und Heterogenität des Untergrundes am Anfang der Untersuchung meist nicht genügend bekannt sind, ist die Frage nach der erforderlichen Anzahl und räumlichen Verteilung der Bohr-, Sondier- und Probennahmepunkte in der Praxis schwierig zu beantworten. Man kann sich einer repräsentativen Beprobung nur durch schrittweise Verdichtung der Probenahmeraster nähern. Geostatistische Modelle (Bd. 4, Kap. 13) können helfen, wenn eine größere Anzahl von Untersuchungspunkten bereits vorliegt. Wenn nur sehr wenige Informationen über den Untergrundaufbau vorliegen, bedient man sich meist eines regelmäßigen rechteckigen, quadratischen oder dreieckigen Rasters mit Gitterpunktabständen von 25 m, von 15 m bei kleineren Flächen und von 100 m bei ausgedehnteren Objekten. Diese Raster lassen sich im 2. Untersuchungsschritt lokal leicht auf 5 m verdichten. Im Dreiecksraster sind zur Erfassung einer Fläche weniger Punkte erforderlich als im quadratischen Raster (ISO/CD 10381 - 1.3). Zufallsraster sind besser geeignet, wenn man von regelmäßigen Strukturen im Untergrund ausgehen muß.

Die Wahrscheinlichkeit, daß Inhomogenitäten übersehen werden, die kleiner sind als der halbe Rasterabstand, ist erstaunlich hoch (Bd. 4, Tabelle 3.3). Die Reduzierung des Risikos ist nach dieser Modellrechnung gleich mit einem vielfachen Kostenaufwand verbunden.

**Tab. 4.6 :** Wahrscheinlichkeit des Verfehlens von Inhomogenitäten bei verschiedenen Probenpunktabständen [%]. (Aus Bd. 4, Tabelle 3.3)

Rasterabstand	Kostenfaktor	Wahrscheinlichkeit in %			
		Radius einer kreisförmigen Inhomogenität in m			
in m	-	5	10	25	50
<b>100</b>	1	99	96	80	20
<b>71</b>	2	98	95	60	0
<b>50</b>	4	96	87	20	0
<b>35</b>	8	93	73	0	0

Aufgrund der Heterogenität des Untergrundes stellen geowissenschaftliche Daten von Ort zu Ort veränderliche Größen (*Variablen*) dar. Ihre Verteilung kann mit Hilfe von diskreten, endlich vielen Messungen beschrieben (geschätzt) werden und zwar durch ortsabhängige Bestimmungen, z.B. mittels Bohrungen. Die geostatistischen Untersuchungen (Bd. 4, Kap. 13) dienen dazu, die Zuverlässigkeit von Ergebnissen aus Bohrungen, geophysikalischen Messungen, chemischen Analysen an Wasser- und Bodenproben usw. genau zu ermitteln. Wie aussagefähig ein Erkundungsstand (beispielsweise Bohrraster) ist, hängt davon ab, wie sehr das Auflösungsvermögen der räumlich verteilten Daten dem mehr oder weniger komplizierten bzw. heterogenen Aufbau des Untergrundes entspricht.

Für den wirtschaftlichen Einsatz von Feldmethoden gibt es 2 *geostatistische Ansätze*:

- Bestimmung der für eine vorgegebene Aussagesicherheit erforderliche Anzahl der Meß- oder Probenahmestellen
- Verbesserung der Aussagegenauigkeit durch eine günstige räumliche Anordnung einer vorgegebenen Anzahl von Meß- oder Probenahmestellen (Reduzierung der Schätzfehler).

Eine Erkundung, bei deren Planung die Ergebnisse der beschriebenen Verfahrensweise berücksichtigt werden, weist somit folgende wichtige Eigenschaften auf:

- Die Entscheidungen hinsichtlich der Kosten-Nutzen-Maxime, wie z.B. die Eignung eines Standorts unter Berücksichtigung eines vertretbaren Erkundungsaufwandes (Kostenaufwandes), können durch die Möglichkeit der Evaluierung der Zuverlässigkeitsentwicklung in einer frühen Phase der Erkundung getroffen werden.
- Für Interpretationen oder weiterreichende Auswertungen der erkundeten, meßbaren Eigenschaften eines Deponieuntergrundes existieren nun Angaben über deren räumliche Zuverlässigkeitsverteilung sowie über die Zuverlässigkeit eines Meß- oder Analysenwertes für ein Einflußpolygon oder -volumen, so daß die Auswertung der räumlichen Verteilung von Meß- oder Analysenwerten sowie Vergleiche von Meß- oder Analysenwerten unter Berücksichtigung des ortsbezogenen Fehlers durchgeführt werden können.
- Der Erkundungsaufwand wird durch die in der Anfangsphase einer Erkundung festzulegenden Mindest-Zuverlässigkeiten für zu erkundende Untersuchungsgrößen dimensioniert. Die Quantifizierung des nötigen Erkundungsaufwandes erfolgt unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeitsentwicklung, wobei immer jener Erkundungsvariante der Vorzug gegeben werden sollte, die bei geringstem Aufwand eine maximale Steigerung der Zuverlässigkeit von Erkundungsergebnissen verspricht. Somit wird dem "oversampling" Einhalt geboten, indem bei Erreichen von genügend zuverlässigen Erkundungsergebnissen die Erkundung eingestellt wird.
- Immer mehr Verordnungen und Vorschriften zum Schutz unterschiedlicher Umweltmedien enthalten Richtwerte mit zugehörigen Vertrauensintervallen. Dies gilt insbesondere für Richtlinien der Europäischen Union. Eine Optimierung des Erkundungsaufwandes unter Verwendung der beschriebenen Verfahren mit global geforderter Aussagesicherheit für Orientierungs-, Prüf- oder Höchstwerte diesen neuen Anforderungen entsprechen und Folge leisten.

Für die *Heterogenität des Untergrundes im Kleinbereich* (Größenordnung 1 - 100 cm) sind in geotechnischer (und hydrogeologischer) Sicht folgende Eigenschaften maßgebend:

- Aufbau und Zusammensetzung (Gefüge, Korngröße, Mineralbestand, Dichte, Wassergehalt, ggf. Kontamination),
- Festigkeit (Zusammendrückbarkeit, Scherfestigkeit),
- Porosität (Hohlraumgehalt) und Wassersättigung,
- Durchlässigkeit (Hydraulische Leitfähigkeit, Permeabilität).

Grundsätzlich lassen sich diese Eigenschaften direkt durch Messungen an Proben im Labor bestimmen. Sondierungen erlauben es, die o.g. Eigenschaften indirekt durch Messungen korrelierter physikalischer Parameter, z.B. der Eindringungswiderstände der Sonden oder der Absorption radioaktiver Strahlung im Untergrund ("in situ") zu bestimmen.

Der Aufwand für die Entnahme von *Bodenproben* besonderer Güte wächst mit zunehmender Tiefe sehr deutlich. Außerdem ist es meist zeitaufwendig und kostspielig, durch bodenmechanische Laborversuche zuverlässige und repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Deshalb wird man mit Hilfe von Sondierungen das Stichprobenraster indirekt verdichten. Ohne "Eichung" an direkten Aufschlüssen und Proben sind Sondierergebnisse aber nicht eindeutig zu interpretieren. Probenahme und Sondierungen ergänzen sich daher gegenseitig. Die Störung des natürlichen Gleichgewichtszustandes im Untergrund infolge der Probenahme beeinflusst die mechanischen und

hydraulischen Eigenschaften der Gesteine. Denn Gefüge, Festigkeit, Porosität, Sättigungsgrad und Durchlässigkeit sind eng aneinander gekoppelt. Die *Durchlässigkeit* stellt in diesem Zusammenhang auch den am empfindlichsten auf Störungen reagierenden Parameter dar. Anders als im Festgestein liegt im Lockergestein bzw. im Boden keine oder nur eine mäßige Kornbindung vor. Das Korngerüst und der Porenraum unterliegen daher bereits merklichen, zum größten Teil irreversiblen Verformungen, Festigkeits- und Konsistenzänderungen, wenn nur geringe mechanische Beanspruchungen einwirken (Be- und Entlastung, Frosthebung) oder Porenfluide aufgenommen bzw. abgegeben werden (Durchfeuchtung, Austrocknung). Selbst mit sehr aufwendigen und sorgfältig durchgeführten Probenahmetechniken sind diese Störungen nicht ganz zu vermeiden. In gewissem Maße können jedoch an Laborproben ursprüngliche Spannungszustände wiederhergestellt werden.

Bei allen Laborversuchen ist zu beachten, daß die Probengröße klein bis sehr klein ist im Vergleich zum beurteilenden Gebirgskörper und (oft entscheidende) Inhomogenitäten nicht erfaßt werden. Wegen dem normalerweise heterogenen Aufbau des Untergrundes kann eine Boden- oder Gesteinsprobe nur einen begrenzten Bereich repräsentieren. Die repräsentative Probenahme stellt uns daher vor 2 Fragen:

- Optimale Anzahl und räumliche Verteilung der Probenahmestellen?
- Notwendige Menge der Einzelprobe?

Über die notwendigen Mengen und Abmessungen für *Einzelproben* (Stichproben und Mischproben) existieren Richtlinien, z.B. in den DIN-Normen (Tabelle ).

**Tab. 4.7** : Mindest-Probenmengen und Probenabmessungen für verschiedene Untersuchungen in Abhängigkeit von den geschätzten Größtkorndurchmessern

Untersuchung		Probenmenge/Abmessungen	Quelle
<b>Korngrößenanalyse (Siebung)</b>		[g]	DIN 18123
Größtkorn [mm]	2	150	
	5	300	
	10	700	
	20	2 000	
	30	4 000	
	40	7 000	
	50	12 000	
	60	18 000	
<b>Korngrößenanalyse (Sedimentation)</b>			DIN 18123
Ausgeprägt plastische Tone		10 - 30	
Bindige Böden ohne Sandgehalt		30 - 50	
Sandhaltige Böden		bis 75	
<b>Wassergehaltsbestimmung</b>			DIN 18121 T1
Ton, Schluff		10 - 50	
Sand		50 - 200	
Kiesiger Sand		200 - 1 000	
Kies		1 000 - 10 000	
Steinige Böden		10 000 - 32 000	
<b>Dichtebestimmung</b>		-	DIN 18125, T2
Volumen des Ausstechzylinders		100 x Größtkornvolumen	
<b>Durchlässigkeitsbeiwert</b>			
Höhe und Durchmesser		5 bis 10 x Größtkorndurchmesser	DIN 18130, T1

Querschnittsfläche feinkörniger Böden	$\geq 10 \text{ cm}^2$	
Querschnittsfläche grobkörniger Böden	$\geq 20 \text{ cm}^2$	

Diese Angaben gelten nicht für mineralogisch-petrographische und chemische Analysen, da hierbei entsprechend den häufig größeren stofflichen Inhomogenitäten größere Probenmengen erforderlich werden können. Für die Beprobung von Abfällen gilt z.B. die Richtlinie LAGA PN 2/78.

Weitere Angaben zu diesem stofflichen Komplex werden im Bd. 6 "Geochemie" dieser Handbuchreihe behandelt.

Für Korngrößenanalysen, Wassergehaltsbestimmungen und andere stoffliche Analysen werden häufig *Mischproben* aus der Vereinigung von rasterförmig verteilten Einzelproben oder direkt als *Schlitzproben* entnommen und danach geteilt.

In Festgesteinen wird die Heterogenität im Kleinbereich u.a. anhand von *Bohrkernen* untersucht (Bd. 4, Kap. 7). Zur routinemäßigen makroskopischen Bearbeitung der Bohrkerne gehören folgende Untersuchungen und Aufgaben:

- Geologisch-petrographische Bohrkernbeschreibung,
- fotografische Dokumentation,
- Darstellung eines vorläufigen geologischen Profils,
- Strukturaufnahme und geologisch strukturelle Auswertung,
- Aufbereitung der Meßergebnisse für die Datenbank und
- Probenarchivierung.

In Abhängigkeit vom Umfang der vorgesehenen Aufgaben der Deponie/Altlasten-Untersuchung gehören zur weiterführenden Bohrkernbearbeitung v. a. sedimentologische, petrographische, petrophysikalische, mineralogische und geochemische Laboruntersuchungen (s. Bde. 5 und 3), bei denen schwerpunktmäßig Informationen unter anderem zu folgenden Fragestellungen, Parametern und Größen gewonnen werden:

- Bestand an Mineralen und Gesteinskomponenten,
- Mineral- und Komponentenverteilung,
- Tonineralbestand und -gehalte,
- Gesamtkarbonat und Karbonatphasen,
- Alteration des Mineralbestandes,
- Bestand an organogenen Komponenten,
- natürlicher Wassergehalt und Formationsfluide,
- Gas- und Ölzeichen, Kontamination mit Schadstoffen,
- Aufbau, Lagerung und tektonische Überprägung der Gesteine,
- erkennbare Korngrößen und Kornverteilungen,
- Partikelgrößen im Mikron- und Submikronbereich,
- Matrix, Bindemittel und Porenzemente,
- Porosität und Permeabilität,
- Porengröße und -größenverteilung,
- planare und lineare Strukturen, Risse, Klüfte, Harnische,
- Gesteins- und Korndichte,
- natürliche Gammastrahlung,

- elektrische Eigenschaften,
- seismische Geschwindigkeiten,
- magnetische Eigenschaften,
- Wärmeleitfähigkeit und
- Spannungsnachwirkungen.

Die im jeweiligen Projekt erforderlichen Bohrkernuntersuchungen sollten sich sowohl auf bewährte Standarduntersuchungen der angewandten Geowissenschaften als auch auf Informationen und Untersuchungsergebnisse der aktuellen Spezialliteratur stützen. So sind für Gefügeuntersuchungen an Tongesteinen die makroskopische Gesteinsbeschreibung, die ungestörte Entnahme repräsentativer Proben sowie die artefaktfreie Präparation wichtige Voraussetzungen. Insbesondere sind für Detailuntersuchungen von Tongesteinen *zerstörungsfreie Bohrkernuntersuchungen* u. a. zur Auswahl artefaktfreier Proben von großer Bedeutung. Deshalb liegt der Schwerpunkt neben der Aufnahme und Dokumentation der Bohrkern bei den zerstörungsfreien Bohrkernuntersuchungen wie radiometrische Dichtebestimmung, Transmissions-Computertomographie, elektrische Widerstandstomographie, akustische Tomographie, Messung der magnetischen Suszeptibilität sowie der Bohrkernorientierung (Bd. 4, Kap. 7).

#### **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.2.2.3 Struktur, Lagerungsverhältnisse und Tektonik**

Grundsätzlich greifen die Aufklärung der Strukturen des Untergrundes und die oben dargestellten Untersuchungen der Verbreitung, Mächtigkeit und Heterogenität in vieler Hinsicht untrennbar ineinander.

Strukturen, wie z.B. schräg einfallende Schichten, Verwerfungen, Zerüttungszonen, Mylonite, dominante Kluftsysteme, Hohlräume, sind in einzelnen Kernbohrungen zu sehen; ihre Raumlage kann (z.T. mit Unterstützung der Bohrlochgeophysik) in günstigen Fällen lokal bestimmt werden. Bei steil stehenden Schichten sind Bohrungen schräg anzusetzen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Die (vielfach) gekrümmten Verwerfungsflächen sowie Faltenstrukturen, Erdfällen, Auflockerungszonen, Karstschloten, verfüllte Rinnen, verlandete Flüsse und Seen u.ä. geben sich erst in mehreren Aufschlußpunkten zu erkennen. Um solche Strukturen des Untergrundes darzustellen, sind die Ergebnisse mehrerer Aufschlußpunkte zu zweidimensionalen Modellen (geologische Schnitte) bzw. dreidimensionalen Modellen (Blockbilder) zusammensetzen (Bd. 4, Kap. 2).

#### **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.2.2.4 Erdbebengefährdung, Aktivität tektonischer Störungen und Hangrutschungen**

Aussagen über die **Erdbebengefährdung** für Deponie- oder Altlastenstandorte können aus den Kenntnissen über das zeitlich-räumliche Auftreten von Erdbeben in der Vergangenheit abgeleitet und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in die Zukunft extrapoliert werden. Als Maßstab für die Beurteilung der Erdbebenwirkung wird die zwölfteilige makroseismische MSK-(Medwedjew-Sponheuer-Karnik)-Skala verwendet.

**Tab. 4.8 :** Kurzform der zwölfteiligen makroseismischen MSK-(Medwedjew-Sponheuer-Karnik)-Intensitätsskala (zitiert nach LEYDECKER, 1986)

Intensität	Beobachtungen
I	Nur von Erdbebeninstrumenten registriert.
II	Nur ganz vereinzelt von ruhenden Personen wahrgenommen.
III	Nur von wenigen verspürt.
IV	Von vielen wahrgenommen. Geschirr und Fenster klirren.
V	Hängende Gegenstände pendeln. Viele Schlafende erwachen.
VI	Leichte Schäden an Gebäuden, feine Risse im Verputz.
VII	Risse im Verputz, Spalten in den Wänden und Schornsteinen.
VIII	Große Spalten im Mauerwerk. Giebelteile und Dachgesimse stürzen ein.
IX	An einigen Bauten stürzen Wände und Dächer ein; Erdbeben.
X	Einstürze von vielen Bauten. Spalten im Boden bis 1 m Breite.
XI	Viele Spalten im Boden, Erdbeben in den Bergen.
XII	Starke Veränderungen an der Erdoberfläche.

Neben der überwiegenden Zahl tektonischer Erdbeben treten durch Auslaugungserscheinungen im Untergrund (Subrosion) und durch Bergbauaktivitäten Einsturzbeben auf. Auch anthropogene Veränderungen (Auflasten durch Stauseen, Grundwasserabsenkungen und Flüssigkeitsinjektionen) induzieren Erdbeben.

Die mit Erdbeben verbundenen Horizontalbeschleunigungen sind abhängig von der am Erdbebenherd freiwerdenden mechanischen Energie, von der Herdtiefe und von den geologisch-tektonischen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet. Die Herdtiefen tektonischer Beben liegen im Bereich 2 bis 20 km und für Einsturzbeben in Tiefen bis zu 2 km. Die Horizontalbeschleunigung ist bei Bauwerken auf Lockergesteinen größer als auf anstehenden Festgesteinen. Die Verschiebungsbeträge erreichen für mittlere Beben einige Millimeter bis wenige Zentimeter und für schwere Erdbeben Dezimeter bis Meter (PRINZ, 1991). Tektonische Störungen können durch Erdbeben aktiviert werden.

**Abb. 4.1** (hier nicht dargestellt) Epizentren der Schadenbeben (ab Intensität VI - VII) für die Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 800 - 1996. Parameter ist die Epizentralintensität  $I_0$ , (LEYDECKER, 1998)

Ein Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 - 1993 (Schadenbeben bis 1997) ist bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (LEYDECKER, 1998) erhältlich. Der Datenfile enthält Angaben zu Datum, Herdzeit, Koordinaten und Tiefe des Herdes sowie zur Stärke des Bebens.

DIN 4149 T 1 gibt eine Richtlinie für die Beurteilung der Erdbebengefährdung von üblichen Hochbauten in Deutschland sowie Verfahren zur Berechnung der Beanspruchung von Hochbauten aus Erdbeben. Basierend auf der MSK-Skala der Erdbebenwirkungen wird eine Einteilung in 6 Erdbebenzonen (A, 0, 1, 2, 3, 4) vorgenommen. In DIN 4149 T 1 A 1 wird eine Karte der Erdbebenzonen angegeben.

Die Karte der Schadenbeben Abb. 4.1 zeigt die Schwerpunkte der Seismizität für die Bundesrepublik Deutschland: Schwäbische Alb, Bodenseegebiet, nördlicher Alpenrand, Oberrheingraben und Niederrheinische Bucht. Außerhalb der Gebiete mit Schadenbeben, die den Erdbebenzonen 1, 2, 3, 4 der DIN 4149 T 1 entsprechen, ist die Erdbebengefährdung für Deponiestandorte als gering zu bewerten. Auch in den Gebieten mit Schadenbeben ist die Erdbebengefährdung im Einzelfall zu prüfen.

**Störungen** entstehen durch mechanische Vorgänge wie Zerrung und Pressung, die die bei der Gesteinsbildung entstandene Lagerungsform verändern. Bei Plastischer Verformung bilden sich Falten, Überschiebungen, Flexuren und Salzstöcke. Bei Verformung mit Bruch entstehen

Verwerfungen (Störungen im engeren Sinn). Dabei kommt es durch tektonische Kräfte zu einer relativen Verschiebung zweier Gesteinspakete längs einer Bruchfläche. Der Untergrund ist von einem "Netzwerk" tektonischer Störungen unterschiedlicher Entstehungszeit, Bildungsmechanismen, Streichrichtung und Tiefenreichweite durchzogen. Nicht jede tektonische Störung ist in der Gegenwart aktiv. Rezente tektonische Deformationen werden u. a. beobachtet in den Alpen, im Faltenjura, Schwarzwald, Oberrheingraben, Niederrheinische Bucht, Eifel, Kraichgaumulde, Südrand des Rheinischen Massivs und Elbtalzone (PRINZ, 1991). Nach SCHWEIZER (1991) beträgt die tektonisch bedingte mittlere Höhenänderung an der Scharzwaldstörung 0,2 mm/a und an der Rheinverwerfung 0,6 mm/a. ELLENBERG (1993) weist darauf hin, daß zwar die Beträge der rezenten vertikalen Krustenbewegungen 1 mm/a und mehr betragen, jedoch die Relativbewegungen an Störungen aneinandergrenzender Schollen meist nur wenig von Null verschieden sind und kaum die Signifikanzschwelle erreichen. So gibt ELLENBERG (1993) für die Finnestörung 0,2 mm/a, für einzelne Bereiche der Eichenberg - Gotha - Saalfelder Störungszone 0,48 mm/a, für die Hörselbergstörung 0,43 mm/a und für die Ilmenauer Störung 0,15 mm/a an. BANKWITZ., GROSS & BANKWITZ (1993) vermuten, daß die rezenten tektonisch bedingten Horizontalbewegungen größer als die Vertikalbewegungen sind.

Störungen (Verwerfungen) können durch tektonische Vorgänge und/oder anthropogene Veränderungen (Grundwasserabsenkungen, Förderung von Erdöl oder Erdgas, Bergbau, Aufhaldungen etc.) aktiv sein oder aktiviert werden. Die Lage bekannter, oberflächennaher Störungszonen kann den Geologische Karten 1 : 25 000 (GK25) entnommen werden. Für Deponieanlagen sind Störungszonen in jedem Fall zu meiden. Ob eine Störungszone aktiv ist, kann im Bedarfsfall durch seismoakustische Messungen nachgeprüft werden. Rezente Höhenänderungen an Störungszonen zeichnen sich in den Ergebnissen von Wiederholungs-nivellements ab, die von den Landesvermessungsämtern durchgeführt werden. Es ist zu beachten, daß sich den tektonisch bedingten Anteilen der Höhenänderungen Anteile von lokalen Bauwerksbewegungen, Grundwasserstandsänderungen, Rutschungen und Karsterscheinungen überlagern.

**Hangrutschungen** sind der Erdschwerkraft folgende Massenverlagerungen. Einflußfaktoren, die zu Hangrutschungen führen können, sind morphologische und geologische Strukturen, klimatische Auswirkungen, Wirkung des Wassers sowie anthropogene und geogene Veränderungen (Abholzungen, Abgrabungen, Auswaschungen, Deponieauflast etc.). Ausgelöst werden Hangrutschungen durch eine z. T. kurzzeitige Änderung der Einflußfaktoren. Rutschungen können auch durch Erdbeben ausgelöst werden. REUTER ET AL. (1992) geben als Bewegungsgeschwindigkeiten bei Kriechen mm bis cm pro 10 Jahre bis mm bis cm pro Jahr, für Gleiten mm bis m je Tag, für Fließen m je Stunde und bei Fallen oder Stürzen m je Sekunde an. Nach PRINZ (1991) sind gut wasserwegsame Locker- und Festgesteine (Kiese, Sande, Sandsteine, Kalksteine, Basalte etc.) über tonigen und mergeligen Schichten besonders rutschungsgefährdet. Als Gleitbahnen wirken Störungs- und Kluftzonen, Schichtfugen und Verwitterungshorizonte.

Im Gelände werden Rutschungen und rutschungsgefährdete Strukturen durch morphologische Untersuchungen, Aufnahme von Bauschäden, Untersuchungen des Baumbestandes, Luftbildauswertung, geologische Aufschlußarbeiten, geodätische und photogrammetrische Messungen der Verlagerungen von Festpunkten sowie durch Inklinometermessungen untersucht. Zur Erkundung struktureller und stofflicher Voraussetzungen für Rutschungsvorgänge (Gleitbahnen) sind geoelektrische und seismische Methoden Stand der Technik. Bewegungen von Gesteinspaketen können durch seismoakustische Messungen nachgewiesen und lokalisiert werden (BORNSCHEIN. & LINDNER 1990 sowie HILL, DIXON & KAVANAGH, 1998).



## **Handlungsempfehlungen, Kapitel 4.2.2.6 Subrosion, Karst, Senkungs- und Setzungserscheinungen**

Die im Untergrund ablaufenden Lösungsvorgänge an Karbonat-, Sulfat- und Chloridgesteinen werden als Subrosion (Untertageform der Korrosion) bezeichnet. Nach REUTER et al. (1992) verhalten sich die Lösungsgeschwindigkeiten für Kalkstein, Gips und Steinsalz im Verhältnis 1 : 100 : 10 000. Durch den mit der unterirdischen Auslaugung verbundenen Masseschwund kommt es an der Erdoberfläche zu bruchlosen Veränderungen (Senkungen) und zu bruchartigen Veränderungen (Einsturztrichtern, Erdfällen). Als Karst werden die durch Wasser hervorgerufenen Lösungserscheinungen der Gesteine und die dadurch in und über den löslichen Gesteinen entstandenen Strukturen bezeichnet. Nach der Art des gelösten Gesteins unterscheidet man Karbonat-, Sulfat- oder Chloridkarst. Karstbildungen gibt es nicht nur bei Sedimenten, sondern auch bei metamorphen Gesteinen (z. B. Marmor). Die Verkarstung kann abgeschlossen (Paläokarst) oder im Fortschreiten sein. Oft steht die Verkarstung auch in Verbindung mit anthropogenen Ursachen. So führte nach REUTER et al. (1992) die Wasserhaltung im Gipsbruch Sperenberg in den 20er Jahren zu Senkungen von 1 m in 10 Jahren, im Gebiet Bad Frankenhausen war die Sohlegewinnung die Ursache vieler Erdfälle. Das Ersaufen von Kalischächten in Raum Staßfurt am Ende des 19. Jahrhunderts verursachte Senkungen von über 6 m. Die Senkungen halten an (ENGELMANN & KLAMSER, 1996). ELLENBERG (1993) stellte in Thüringen flächenhafte Absenkungen der Erdoberfläche durch Subrosion zwischen 0,4 und 1 mm/a fest. Bruchartige Veränderungen im Gefolge von untertägigem Bergbau werden als Tagesbrüche bezeichnet.

Karststrukturen sowie bergbaubedingte Senkungserscheinungen und Tagesbrüche können durch Geofernerkundung, morphologische Geländeanalyse (Geländeformen, Vegetationsveränderungen, Bauschäden) sowie durch geologische und geophysikalische Untersuchungen (Mächtigkeitsanalyse kanozoischer Sedimente, Hohlraumerkundung, Nachweis von Lagerungsstörungen und auslaugungsbedingter Zerrüttungszonen) erkundet werden. An einem Beispiel aus dem Raum Staßfurt stellen KUEHN ET AL. (1997) Möglichkeiten und Grenzen der Geofernerkundung bergbaubedingter Senkungserscheinungen und Tagesbrüche dar. Dabei hat sich die kombinierte Auswertung von hochauflösenden Luftbildern, Thermalaufnahmen, Lasermessungen und Satellitenaufnahmen bewährt. Radarmessungen allein liefern derzeit verglichen mit den vorgenannten Verfahren weniger aussagekräftige Ergebnisse. Die bei Bergbaufolgeschäden gewonnenen Erkenntnisse können auch auf die Erkundung von Subrosion, Karsterscheinungen und Hangrutschungen übertragen werden.

Setzungen treten in unverfestigten Lockersedimenten auf, wie sie z. B. in den Absetzerkippen des Braunkohlentagebergbaus durch Umlagerung und Veränderung der Lithologie durch Mischkörperbildung für den "Abraum" über dem Kohleflöz abgelagert worden sind. Neben Setzungen ist auf Tagebaukippen mit Setzungsfließen, Tragfähigkeits- und Erosionsproblemen zu rechnen. Setzungserscheinungen sind auch bei mit Lockermaterial verfüllten Hohlformen (Sand- und Tongruben, Steinbrüchen) zu beobachten. Die Setzungsbeträge werden durch Nivellements und ggf. durch hochgenaue DGPS-Messungen (DGPS - Differential Global Positioning System) bestimmt. Fragen der Standsicherheit und Setzungen durch eine Deponieauflast werden in Kap. 4.3 behandelt.

### **Literatur**

- BANKWITZ, P., GROSS, U. & BANKWITZ, E. (1993): Krustendeformation im Bereich der Finne - Kyffhäuser - Gera - Jachymov-Zone. Z. geol. Wiss., **21**, 1/2, 3 - 20, Berlin.
- BORNSCHEIN, H. & LINDNER, H. (1990): Apparatur für den Nachweis akustischer Emissionen aus Lockergesteinen. Neue Bergbautechnik **20**, 5, 165 - 169, Leipzig.

- DIN 4149, T1 (1981/1992): Bauten in deutschen Erdbebengebieten.
- ELLENBERG, J. (1993): Rezente vertikale Erdkrustenbewegungen in Thüringen. Jenaer geographische Schriften, **1**, 7 -22.
- ENGELMANN, D. & KLAMSER, P. (1996): Die Tätigkeit des Bergamtes Staßfurt im Hinblick auf die Bergbaufolgeschäden am Beispiel des Staßfurter Sattels. Exkursionsführer und Veröfftl. GGW, **198**, 29 - 47, Berlin.
- HILL, R., DIXON, N. & KAVANAGH, J. (1998): Monitoring deformation of soil slopes using AE: Case histories. Proceedings of the Sixth Conference Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, 381 - 400, TIP TRANS TECH PUBLICATIONS, Clausthal-Zellerfeld.
- KUEHN, F., TREMBICH, G. & HOERIG, B. (1997): Multisensor remote sensing to evaluate hazards caused by mining. Proceedings of the Twelfth International Conference "Applied Geologic Remote Sensing" 17 - 19 November 1997, Denver, Colorado, **I**, 425 - 432.
- LEYDECKER, G. (1986): Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 1000 - 1981. Geol. Jb., **E 36**, 3 - 83, Hannover.
- LEYDECKER, G. (1998): Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 - 1993 (Schadenbeben bis 1997). Erweiterter Datenfile. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- PRINZ, H. (1991): Abriß der Ingenieurgeologie mit Grundlagen der Boden- und Felsmechanik, des Erd-, Grund- und Tunnelbaus sowie der Abfalldeponien. 2. Aufl., Enke, Stuttgart.
- REUTER, F., KLENGEL, J. & PASEK, J. (1992): Ingenieurgeologie. 3. Aufl., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart.
- SCHWEIZER, R. (1991): Interpretation von Höhenänderungen im südlichen Oberrheingraben. Geol. Jb., **E 48**, 219 - 258, Hannover.

## 2.3 Beratungssystem

Die Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten ist durch die Vielfalt der Standortsituationen und der verfügbaren Untersuchungsmethoden sehr komplex. Ein Auskunfts- und Beratungssystem zur Wissensvermittlung und Entscheidungshilfe (Das **Deponieuntergrund Beratungssystem DESY**) soll dafür Wissen und Lösungsmöglichkeiten anbieten. Die Grundlage des Beratungssystems DESY bilden die im Verbundvorhaben „Deponieuntergrund“ erstellten Methodenhandbücher und die Fallbeispiele aus der Teststandortforschung. Das Beratungssystem soll in der Endausbaustufe drei Hauptaufgaben erfüllen:

1. Vermittlung von Fachwissen über die Erkundungsmethoden
2. Beratung bei der Standorterkundung
3. Prüfung der Aussagefähigkeit von Methoden durch Modellrechnungen.

Gegenwärtig wird nach der Entwicklung des Basissystems die Vermittlung von Fachwissen aus dem Band Geophysik realisiert.

Das Beratungssystem soll für einen breiten Nutzerkreis zur Verfügung stehen. Folgende Berufsgruppen werden bei der Beratung unterschieden:

- Geologen
- Hydrogeologen
- Geofemerkunder
- Geophysiker
- Geochemiker
- Bohrtechniker
- sonstige Naturwissenschaftler oder Techniker
- Bauingenieure
- Verwaltungsangestellte
- Studenten
- Sonstige Nutzer

Ein Benutzermodell soll sicherstellen, daß das System keine „dummen“ Fragen stellt und das Wissen in angemessener Form bereitgestellt wird.

### Benutzermodell

Entsprechend den Hauptaufgaben von DESY werden unterschiedliche Datenmodelle entwickelt und aufgebaut.

Für die **Darstellung von Fachwissen** werden die Untersuchungsmethoden der verschiedenen Methodenhandbücher folgendermaßen untergliedert:

*Prinzip der Methode:* Mit einer leichtverständlichen durch Prinzipskizzen veranschaulichten Methodenbeschreibung soll eine Einführung in die Meßmethode auch für fachfremde Benutzer gegeben werden.

*Anwendungsmöglichkeiten:* Die Möglichkeiten für einen sinnvollen Einsatz der Methode werden in Stichworten angegeben. Eine Vollständigkeit ist gerade bei den Anwendungsmöglichkeiten wegen der Vielfältigkeit der Untersuchungsobjekte schwer zu erreichen.

*Grundlagen:* In diesem Abschnitt finden Fachleute das spezielle Wissen, das sie zum Einsatz der Methode oder zur Beurteilung von Untersuchungsergebnissen benötigen. Das Aufgabengebiet ist so vielfältig, daß nur sehr wenige Fachleute alle Verfahren hinreichend kennen und das Wissen für den Einsatz der Methode schnell verfügbar haben.

<i>Meßgeräte:</i>	Dargestellt werden die Meßprinzipien und der Stand der Technik. Auf spezielle Meßgeräte und Hersteller wird nur in Ausnahmefällen eingegangen, da der Meßgerätemarkt in schneller Bewegung und eine Vollständigkeit nicht zu erreichen ist.
<i>Feldarbeiten:</i>	Die Anlage und Durchführung der Feldarbeiten entscheidet oft über Erfolg oder Mißerfolg eines Erkundungsauftrages. Neben den Kriterien für die Anlage und Durchführung der Untersuchungen werden typische Meßeinsätze beschrieben.
<i>Bearbeitung und Interpretation der Meßdaten:</i>	Es werden die spezifischen Methoden zur Meßdatenaufbereitung und Interpretation dargestellt. Auf das breite Spektrum der Auswertesoftware kann wegen der schnellen Entwicklung nicht eingegangen werden.
<i>Qualitätssicherung:</i>	Die Qualitätssicherung erstreckt sich nicht nur auf die Messungen, sondern auch auf die Bearbeitung und Interpretation der Meßdaten sowie auf die Ergebnisdarstellung und Berichterstattung.
<i>Personeller, technischer und zeitlicher Aufwand:</i>	Es soll die Möglichkeit gegeben werden, den Aufwand der Erkundungsarbeiten und damit die Kosten abzuschätzen.
<i>Abschätzung der zu erwartenden Meßeffekte:</i>	Ergebnisabschätzung
<i>Beispiele:</i>	Durch Beispiele aus der Erkundungspraxis werden <i>Anwendungsmöglichkeiten</i> der Methode und die Darstellung der Ergebnisse veranschaulicht.
<i>Literatur:</i>	Die bei der Bearbeitung der Methodenbeschreibung verwendeten Quellen werden durch Angaben über weiterführende Literatur ergänzt.

Für die **Beratung bei der Standorterkundung** wird eine Führungs- und Abfragestruktur nach fachlichen Aspekten aufgebaut. Der Band „Handlungsempfehlungen“ bildet die fachliche Grundlage für das Beratungssystem.

### **Spezifikation der Software**

Personalcomputer sind in Ingenieurbüros und Behörden am häufigsten vertreten. Deshalb soll DESY als PC-Anwendung dem Nutzer zur Verfügung stehen. Zu Beginn des Projektes war die Entwicklung von DESY mit der hybriden Expertensystemshell NEXPERT OBJECT vorgesehen. NEXPERT OBJECT ist ein leistungsfähiges Werkzeug zur Entwicklung von Expertensystemen. Es verfügt über verschiedene erprobte Methoden zur Wissensrepräsentation, eine hochentwickelte Schlußfolgerungskomponente mit Vorwärts- und Rückwärtsverkettung sowie eine Erklärungskomponente. NEXPERT OBJECT ist inzwischen durch die Entwicklungsumgebung für portable graphische Benutzeroberflächen OPEN INTERFACE erweitert worden. Beide Softwarewerkzeuge sind jetzt in dem Entwicklungswerkzeug SMART ELEMENTS integriert. Wegen der Kosten für die Laufzeitlizenz wurde von der Entwicklung unter Smart Elements Abstand genommen. Die Laufzeit-Lizenz von Smart Elements muß bei jeder verkauften Anwendung mit erworben werden. Diese hohen Anschaffungskosten können dazu führen, daß das Beratungssystem keine oder nur eine geringe Akzeptanz und Verbreitung findet.

Die Entwicklungsumgebung von DESY soll auch in Zukunft den Nutzeransprüchen genügen. Deshalb müssen Trends der Datenverarbeitungstechnik berücksichtigt werden. Im Zeitalter der multimedialen Darstellung von Informationen (Bild und Ton) ist eine Entwicklungsumgebung zur besseren Visualisierung von Wissen empfehlenswert. Auf Grund der geringen Kapazitäten für Spezifizierung, Entwurfsphase und Kodierung wurde eine Entwicklung mit Hilfe des Autorensystems Multimedia ToolBook ausgewählt. ToolBook ist

ein Programmiersystem mit kaum überschaubaren Gestaltungsmöglichkeiten. Mit ToolBook lassen sich schnell Window-Präsentationen entwickeln, ohne auf Programmiersprachen wie etwa C zurückgreifen zu müssen. Der Einsatz von Multimedia ToolBook senkt den Programmieraufwand erheblich. Weitere Vorteile von Multimedia ToolBook sind:

- Werkzeuge für die Einbindung von Bild, Ton, Animation, und Hypertext sind vorhanden,
- Ressourcenbibliothek mit 250 Fertigelementen mit Icons, Menüs, Cursors und Bitmaps,
- Treiber für Datenbankzugriffe sowie DLL-Dateien zur Einbindung von Window-Anwendungen,
- Laufzeit-Lizenz darf beliebig oft und kostenfrei kopiert werden, um entwickelte ToolBook-Anwendungen zu vertreiben,
- das mitgelieferte Installationsprogramm ermöglicht eine Auslieferung des Programms als Disketten oder CD,
- eigene Grafikfunktionen und Importschnittstellen zur grafischen Gestaltung von Karten und Hintergründen,
- einfache objektorientierte Programmierung mit der objektorientierten Sprache „OpenScript“ (mehr als 200 Befehle),
- Schutzmechanismen für Zugriff auf Daten und Programm,
- Entwicklung von Hypertext-Anwendungen mit Hotwords möglich und
- Einbinden von TrueType-Fonts als Ressource ist möglich.

Die erste Entwicklungsetappe von DESY kann vollständig mittels ToolBook realisiert werden. Programme zur Verarbeitung unscharfen Wissens (Fuzzy-Logik-Tools) für eine zweite Entwicklungsetappe sollen über Schnittstellen später eingebunden werden. Die Entwicklung dieser Programmteile wird noch zurückgestellt.

Der Programmablauf des Beratungssystems Deponieuntergrund wird in den Abb. 22 dargestellt. Diese Übersicht kann auf Grund der komplexen Verzweigungsmöglichkeiten im Programm nur den grundlegenden Ablauf oder die Verfahrensweise darstellen. Dem Benutzer des Beratungssystems stehen viele Möglichkeiten zur Verfügung, Informationen in Form von Bildern, Übersichten, Formeln und erklärenden Text zu erhalten.

## **Benutzeroberfläche**

Die Anforderungen der Benutzermenüs werden folgendermaßen festgelegt:

- Die Menüs von DESY werden fensterorientiert aufgebaut, d. h. jede thematisch zusammengehörende Information in einem frei wählbaren Bereich auf den Bildschirm dargestellt. Das Programm wird über fest definierte Kommandoleisten (Menüs) gesteuert (Window-konforme Oberfläche).
- Die Bedienung erfolgt interaktiv. Die Oberfläche muß eine einfache und sinnfällige Bedienung ermöglichen, um die Lernphase beim Nutzer kurz zu halten.
- Der Nutzer muß zu jedem Zeitpunkt eine genau auf den Punkt seines derzeitigen Aufenthaltes im Programm zugeschnittene Hilfestellung anfordern und sich jederzeit über den Zustand des Programmes informieren können (kontextsensitive Hilfe).
- Für die Beratung und Modellierung müssen jederzeit Programmentscheidungswege dokumentiert und abrufbar bereitgestellt werden. Damit ist der Weg der Entscheidungsfindung für ein Problem nachvollziehbar und veränderbar.

## **Darstellung und Erläuterung der Benutzermenüs an einem Beispiel**

Der Bildschirmaufbau des Beratungssystems Deponieuntergrund soll hier an einem Beispiel dargestellt und erläutert werden. Eine vollständige Übersicht kann auf Grund der Vielfalt der Möglichkeiten, die benutzerabhängig sind, nicht gegeben werden.

## I. Eröffnungsbild und Hauptmenü

Nach dem Aufruf des Programmes DESY erscheint nach dem Startbildschirm (Abb. 1) das Hauptmenü (Abb. 2)

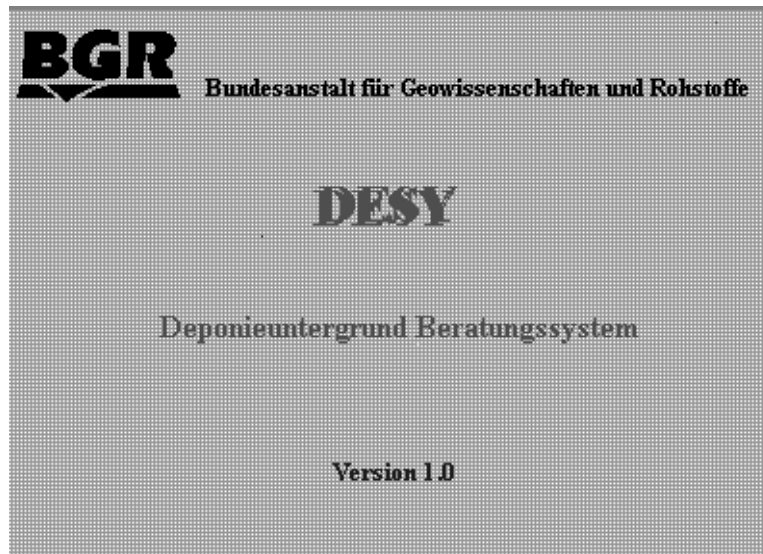


Abb. 1: Eröffnungsbild des Beratungssystems Deponieuntergrund



Abb. 2: Hauptmenü des Beratungssystems Deponieuntergrund

Das Hauptmenü bietet dem Nutzer folgende Wahlmöglichkeiten:

1. **Programm:** In diesem Punkt werden allgemeine Einstellungen vorgenommen (z.B. Druckereinstellungen). Das Programm DESY kann hier auch beendet werden. Siehe dazu auch Abb. 3.
2. **Methodenbeschreibung:** Die Methodenbeschreibung bietet Informationen über die Methoden zur Erkundung von Deponie- und Altlastenstandorten.
3. **Beratung:** Beratung bei der Standorterkundung.
4. **Glossar:** Das Glossar bietet Begriffserläuterungen an.
5. **Hilfe:** Auswahl von Hilfsinformationen (z. B. Statuszeile) zur Bedienung des Programms



Abb. 3: Hauptmenü, Auswahlpunkt Programm

## II. Glossar

Das Glossarfenster wird nach Auswahl des Punktes „Glossar“ angezeigt. Im Fenster werden alle Begriffe alphabetisch sortiert zur Auswahl angeboten (siehe Abb. 4).

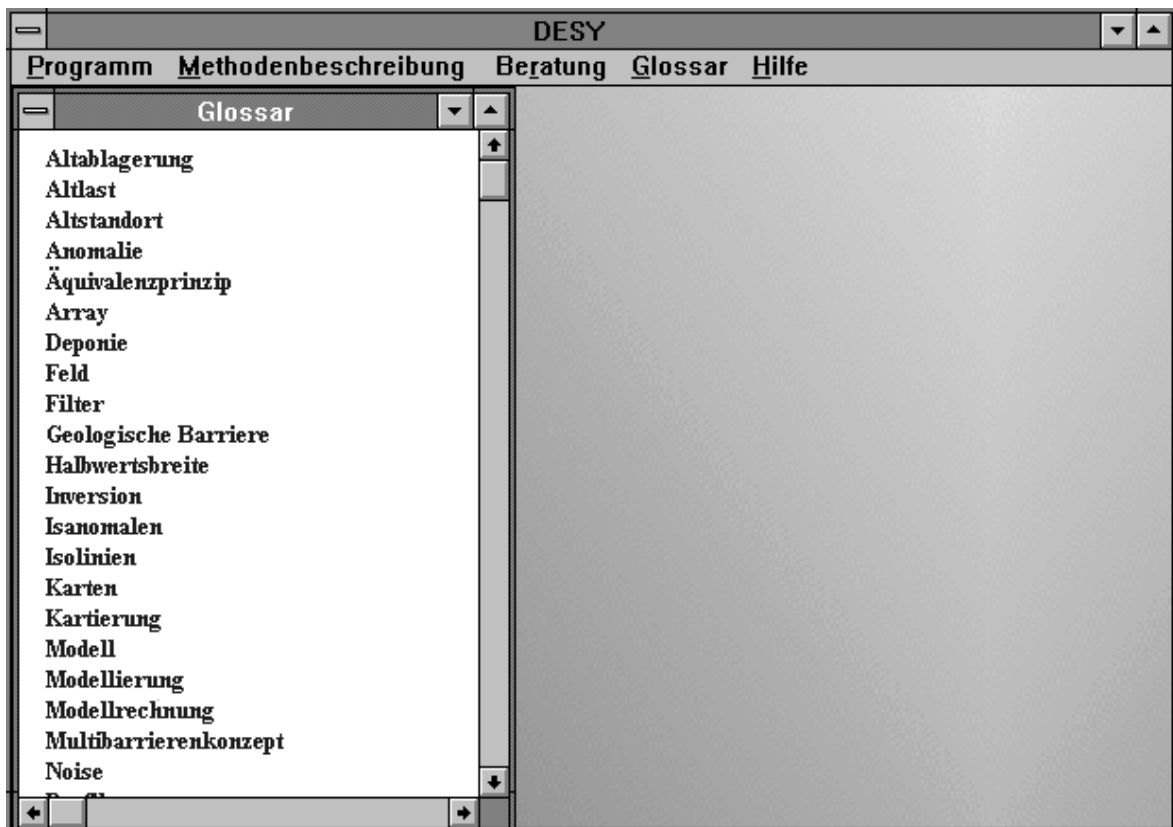


Abb. 4: Hauptmenü mit Glossarfenster

Nach Auswahl eines Glossarwortes (z.B. „Geologische Barriere“) wird in einem Fenster (Abb. 5) der dazugehörige Text angezeigt. Eine Ausgabe des Glossartextes ist über Drucker, Mausdruck auf die Taste mit dem Druckersymbol, möglich. Im Glossartext werden gegebenenfalls weiter Glossarwörter benutzt (siehe Abb. 5 - Glossarwörter „Deponie“, „Multibarrierenkonzept“). Die Erläuterungen dieser Glossarwörter können durch Mausklick auf den Begriff ebenfalls angezeigt werden.

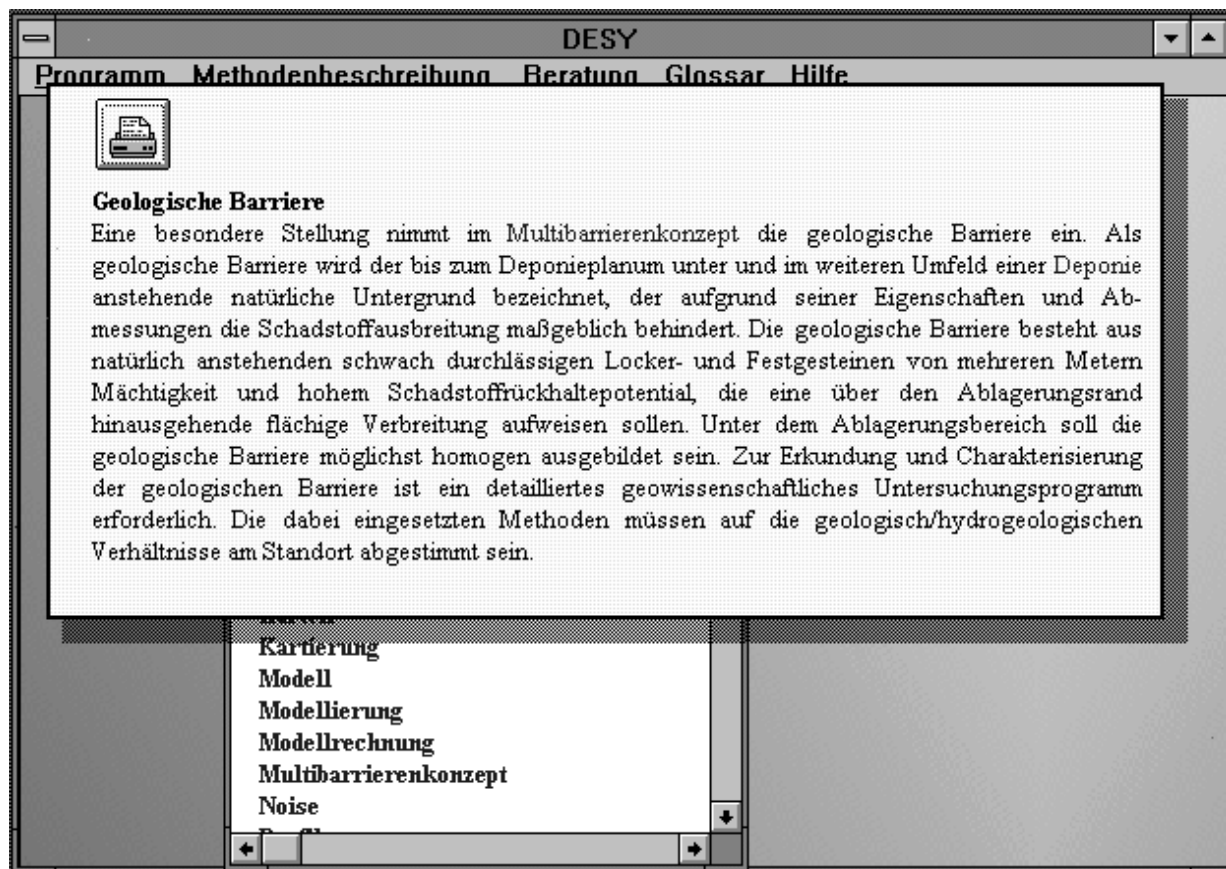


Abb. 5: Hauptmenü mit Glossarfenster und Glossartext für „Geologische Barriere“

## II. Methodenbeschreibung

In der Methodenbeschreibung werden die verschiedenen Untersuchungsmethoden dargestellt. Um die gesuchte Methode schneller zu finden, werden drei verschiedene Sortierungskriterien angeboten (siehe Abb. 6).

1. **Nach Sachgebieten:** Die Untersuchungsmethoden werden analog der Gliederung der Methodenhandbücher angeboten (siehe Abb. 8 und 8a).
2. **Alphabetische Methodenauswahl:** Die Methoden werden in alphabetischer Reihenfolge zur Auswahl angezeigt (siehe Abb. 7).
3. **Nach Anwendungsmöglichkeiten:** Die Methoden werden nach ihrer Wertigkeit beim Einsatz für eine bestimmte Erkundungsaufgabe (beginnend mit der höchsten Priorität 4 - bevorzugte Methode) sortiert (Entscheidungshilfematrix siehe Bd. 7 Handlungsempfehlungen, Kap. 4.2).



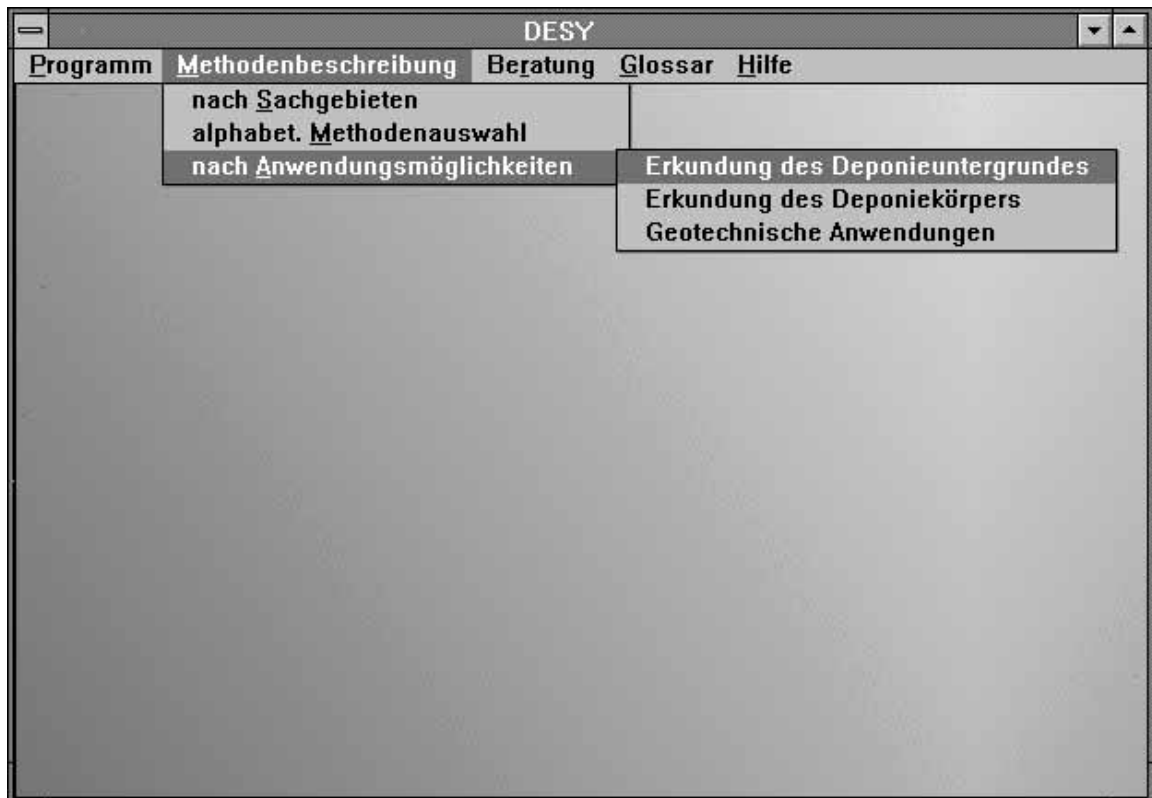


Abb. 6: Hauptmenü, Auswahlmöglichkeiten der Methodenbeschreibung

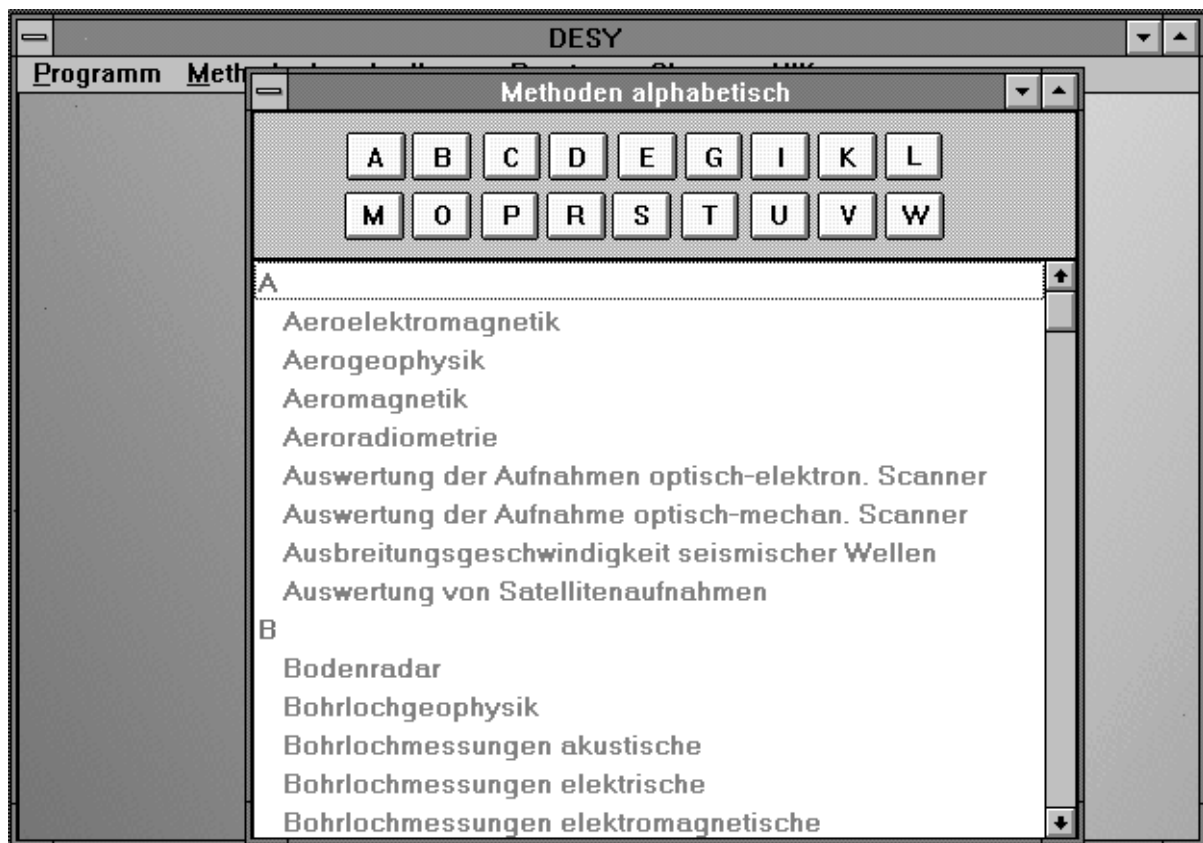


Abb. 7: Hauptmenü, mit Fenster der alphabetische Auswahl der Methoden

Über Mausklick auf das Methodenwort wird die Methode gewählt. Die Buchstabentasten im oberen Fensterteil dienen zur schnelleren Suche der Methode. Die ausgewählte Untersuchungsmethode erscheint, beginnend mit dem „Prinzip der Methode“, im Hauptmenü (siehe Abb. 9).

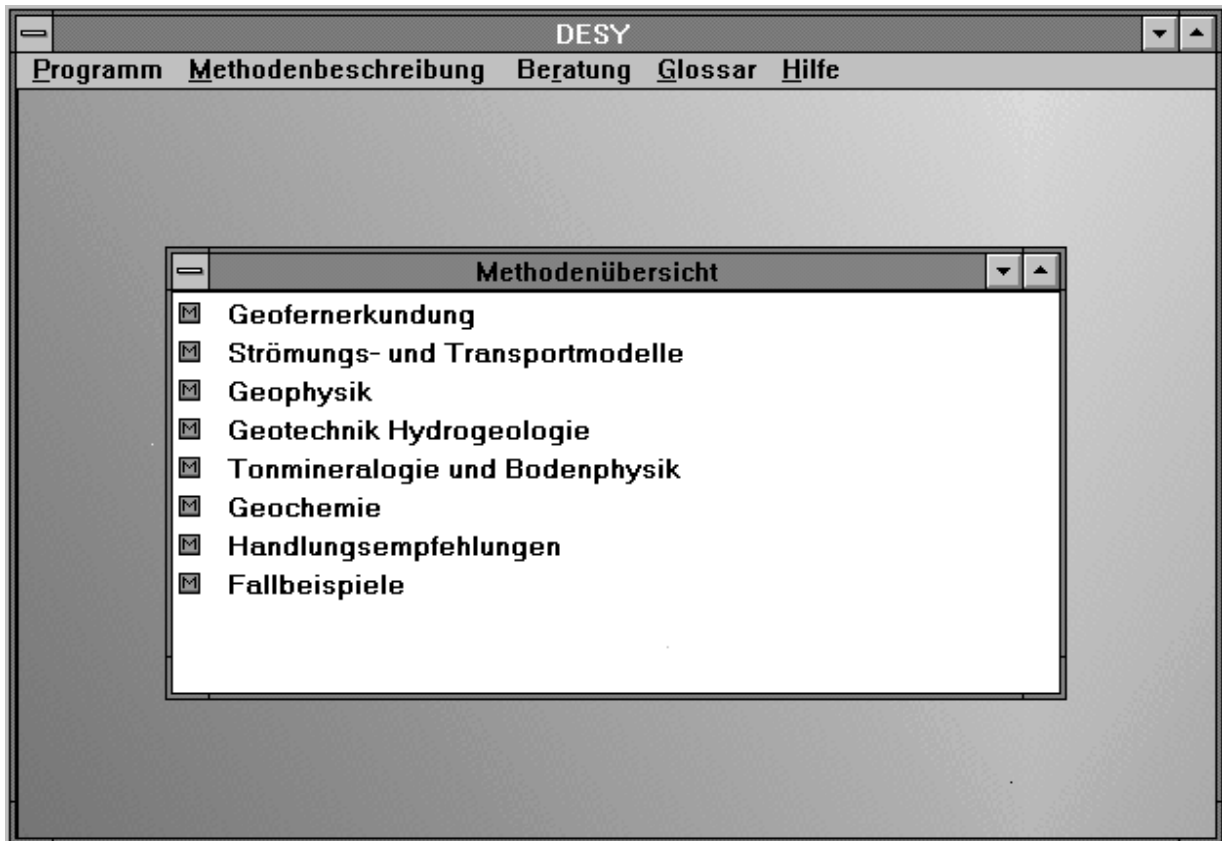


Abb. 8: Hauptmenü, mit Fenster den Methoden sortiert nach Methodenhandbüchern

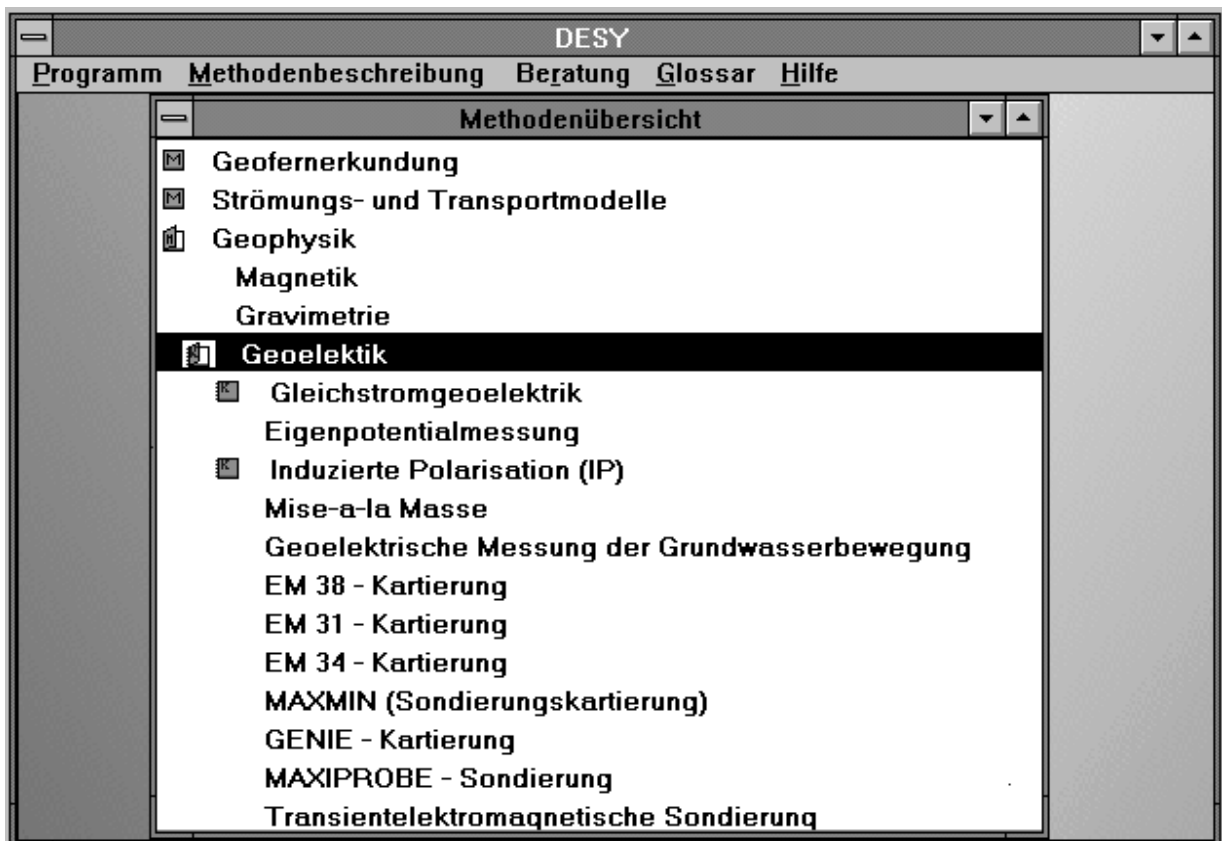


Abb. 8a: Hauptmenü, Methodengliederung am Beispiel des Methodenhandbuches Band 3, Geophysik

Über Mausklick auf das Methodenbuch werden die Methoden und/oder Kapitel entsprechend der Gliederung des Buches (Kennzeichnung: M- Methodenhandbuch, K-Kapitel) vorgestellt. Die Untersuchungsmethode wird per Mausklick ausgewählt und erscheint, beginnend mit dem „Prinzip der Methode“, im Hauptmenü (siehe Abb. 9).

Die Bildschirmdarstellungen der Untersuchungsmethoden sollen am Beispiel der „Magnetik“ erläutert werden. Wird eine Methode über die entsprechenden Kriterien (siehe oberen Text mit Abb. 6, 7, 8 und 8a) ausgewählt, so erscheint immer das „Prinzip der Methode“. Zugriff auf weitere Informationen der Methode bietet die obere Tastenleiste. Am Ende der Beschreibung ist ein Wechsel zum nächsten Gliederungspunkt durch einen entsprechenden Verweis (Pfeil) möglich (siehe dazu Abb. 10, 16 und 20).

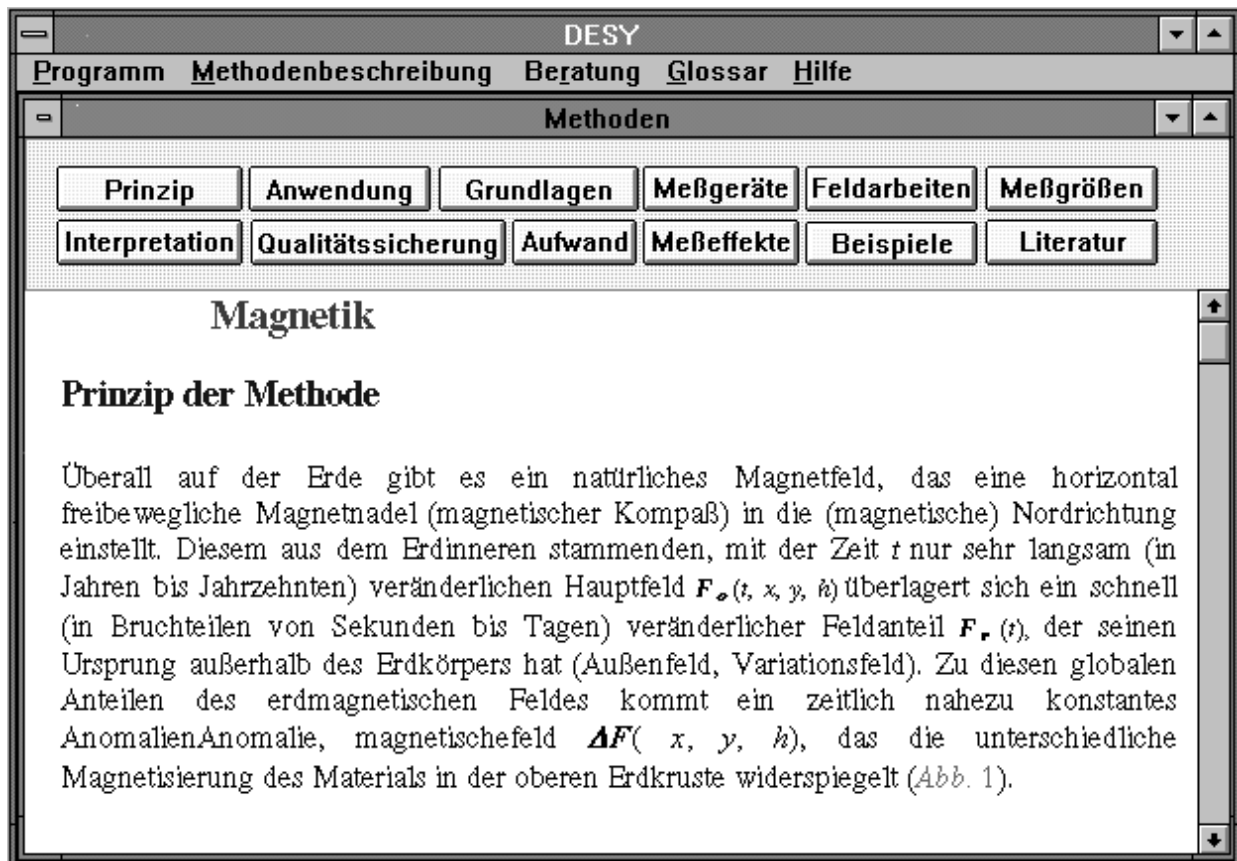


Abb.9: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Prinzip“

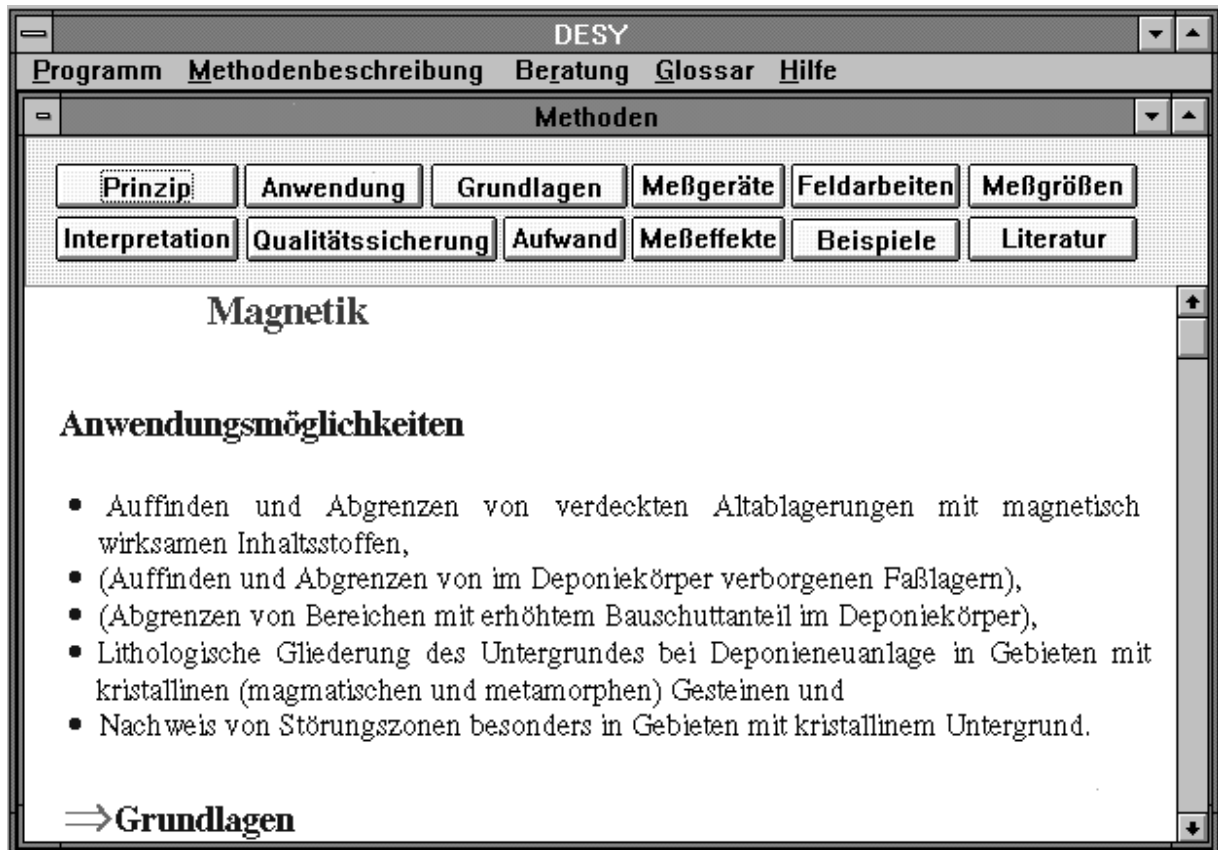


Abb. 10: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Anwendung“

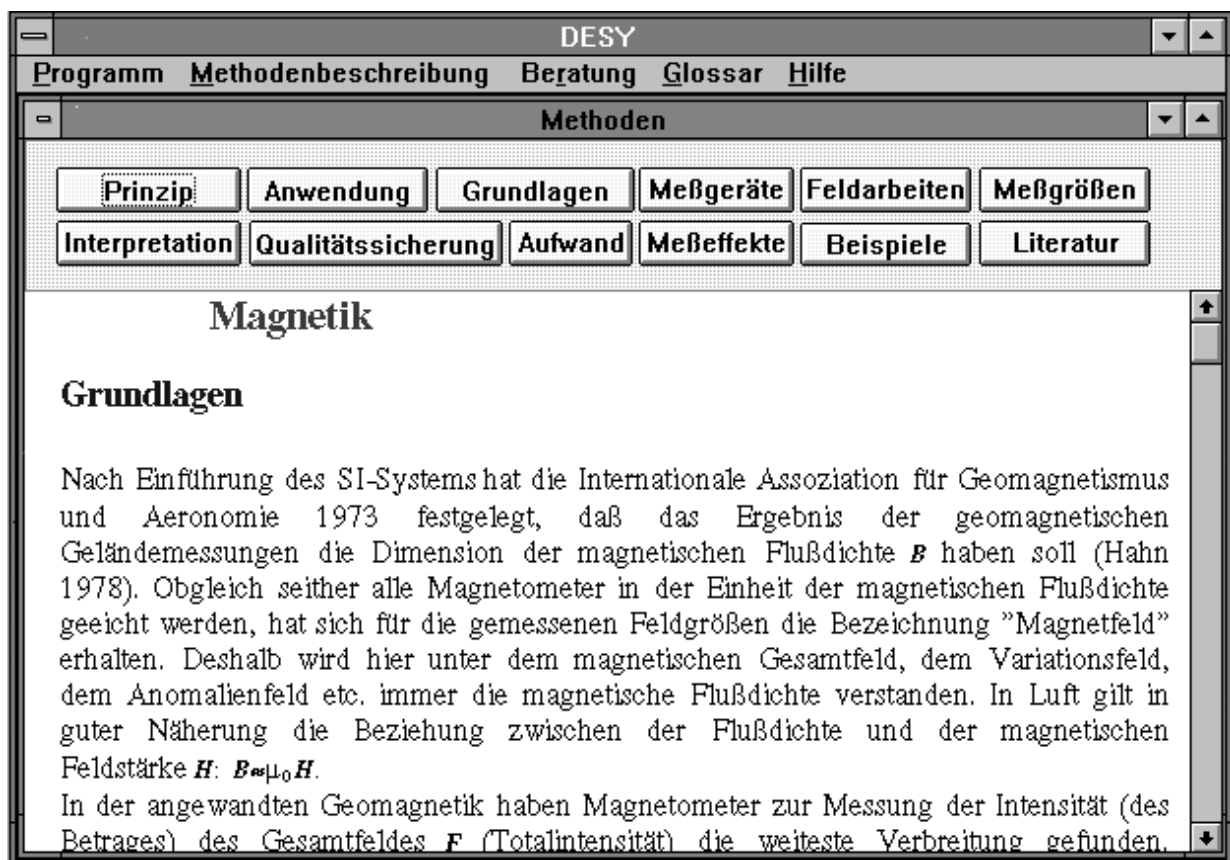


Abb. 11: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Grundlagen“

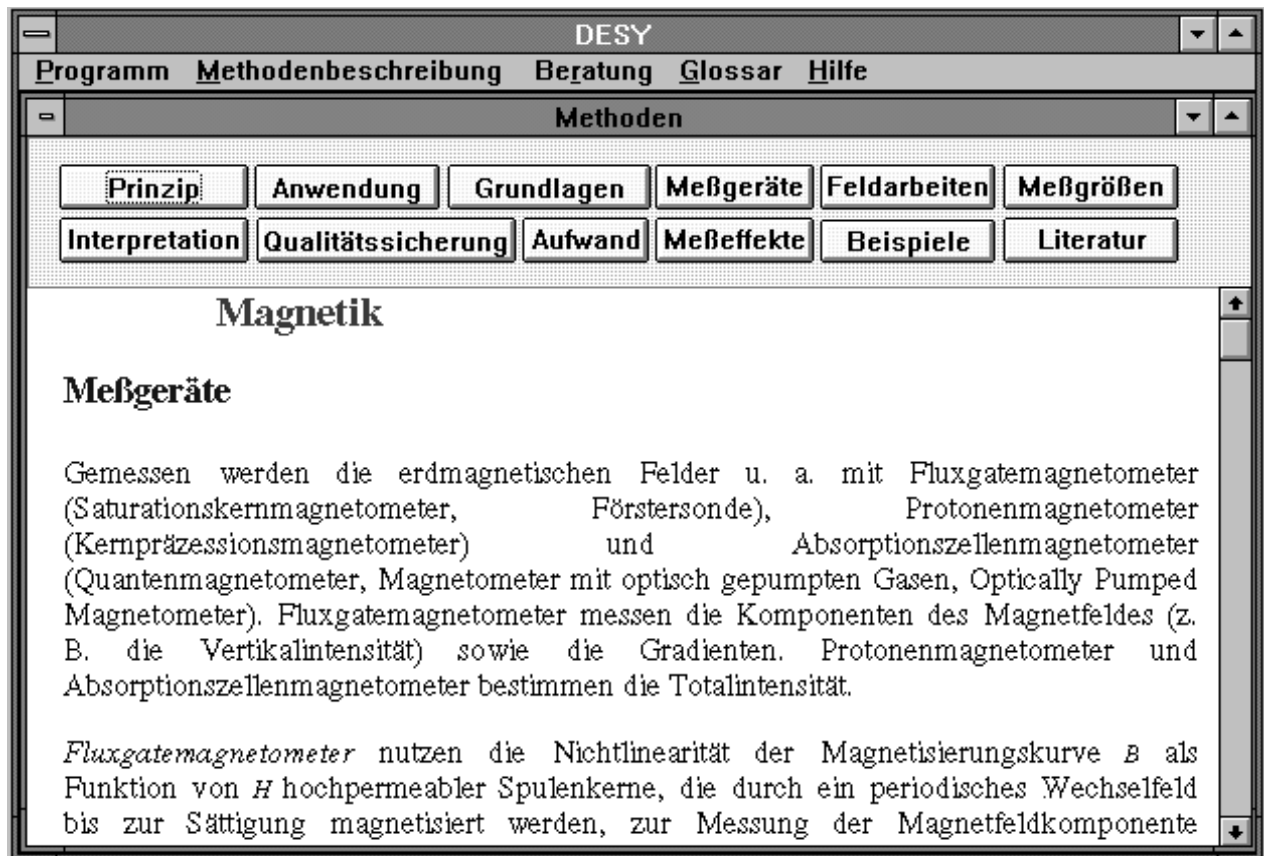


Abb. 12: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Meßgeräte“

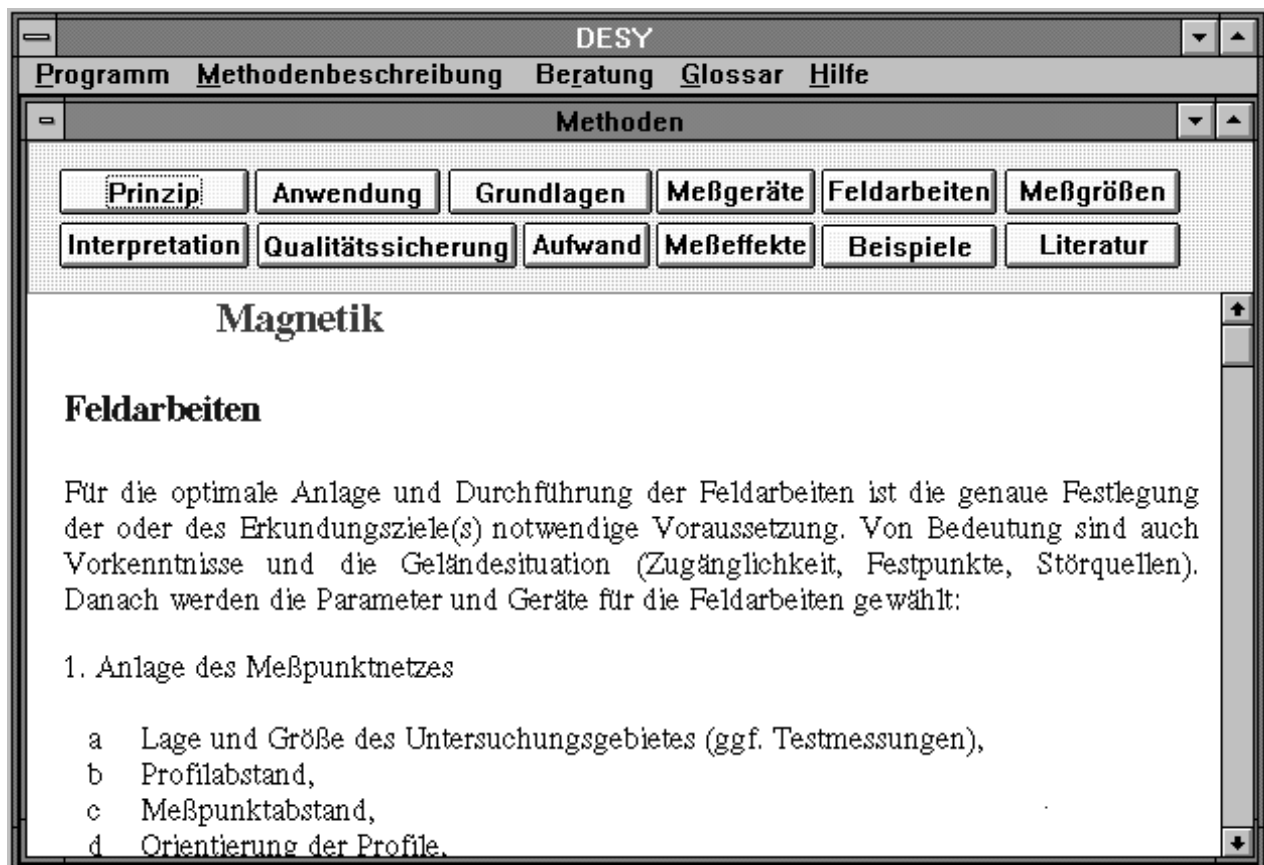


Abb. 13: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Feldarbeiten“

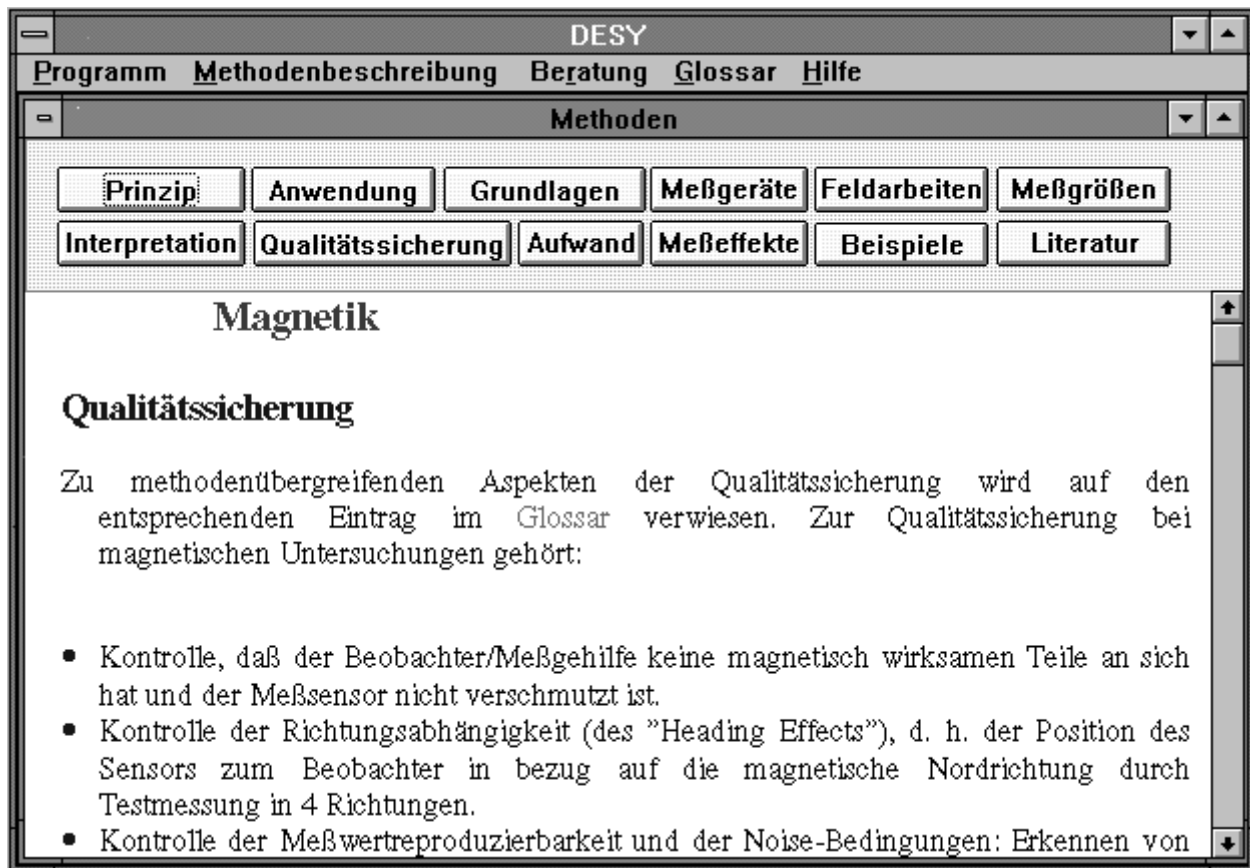


Abb. 14: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Qualitätssicherung“

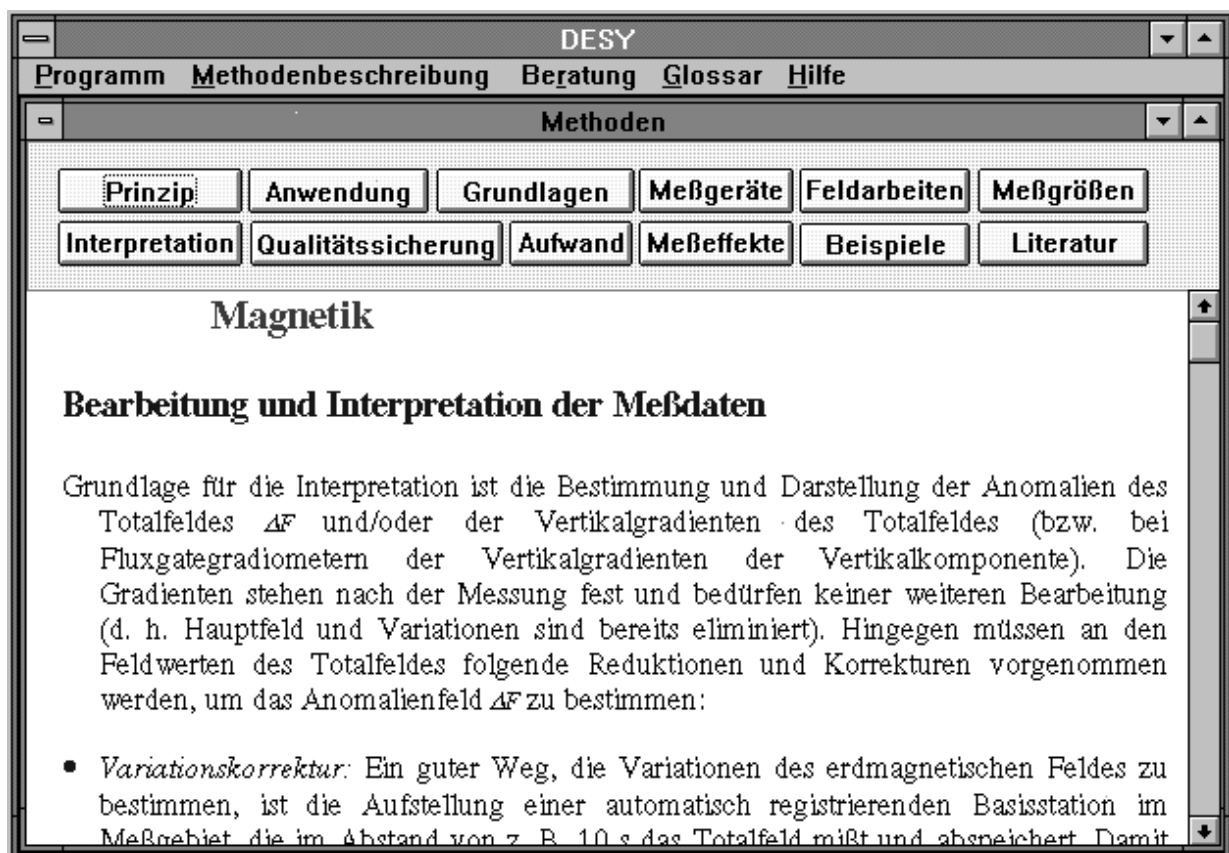


Abb. 15: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Interpretation“

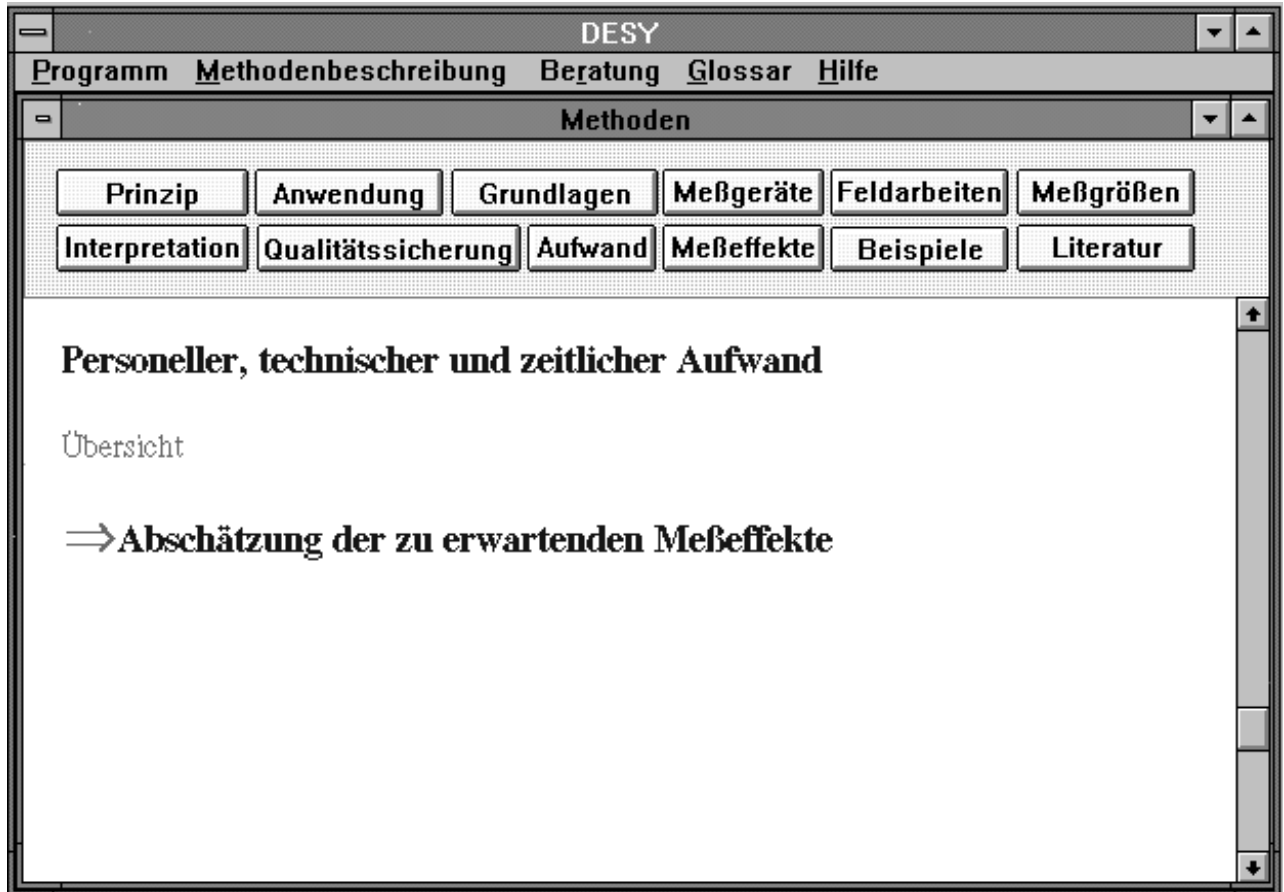


Abb. 16: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Aufwand“

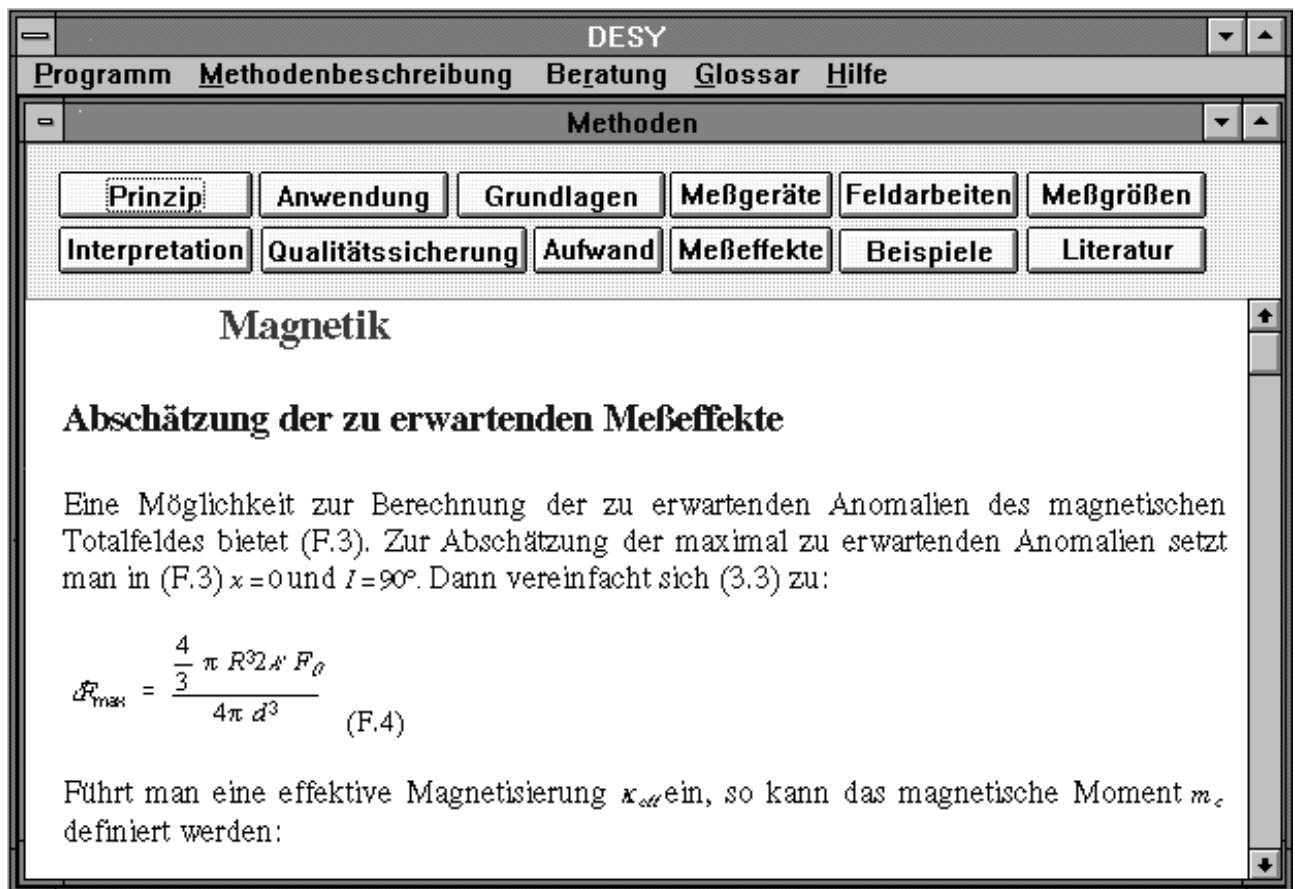


Abb. 17: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Meßeffekte“

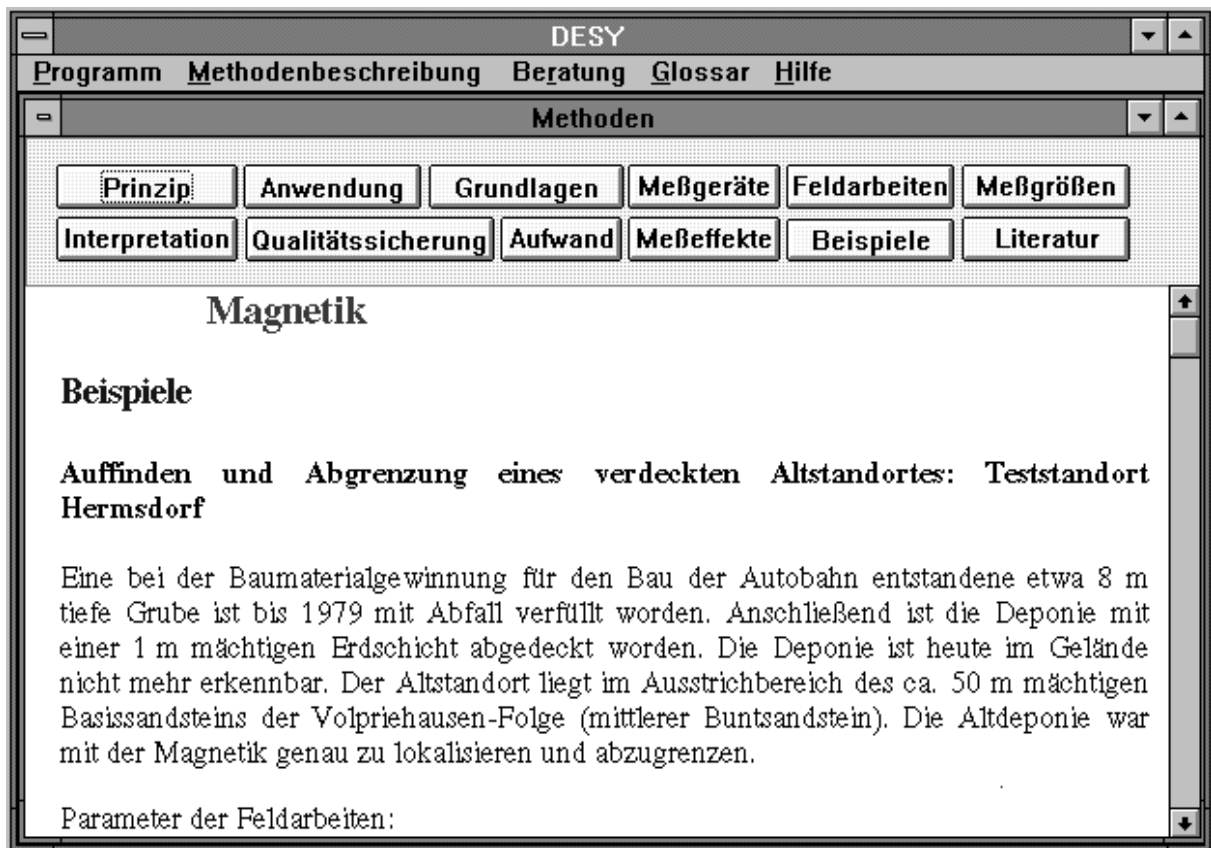


Abb. 18: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Beispiele“

Verweise im Text der Methodenbeschreibung auf andere Untersuchungsmethoden sowie Bilder und Tabellen können über Mausklick ausgewählt werden. Die Darstellung der Methode erfolgt ebenso wie oben beschrieben, beginnend mit „Prinzip“. Die Bilder und Tabellen werden im Hauptmenü in einem Fenster angezeigt.

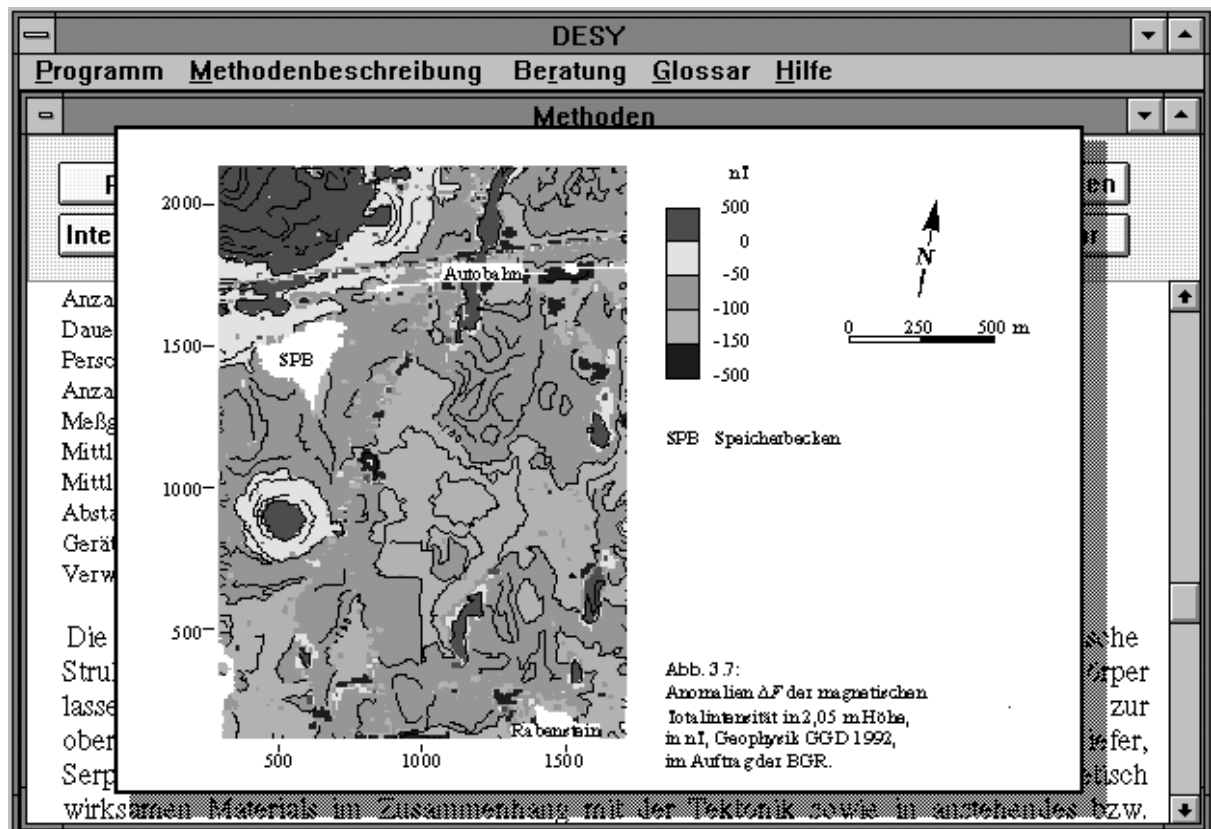


Abb. 19: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Beispiel“ mit Bildanzeige im Fenster



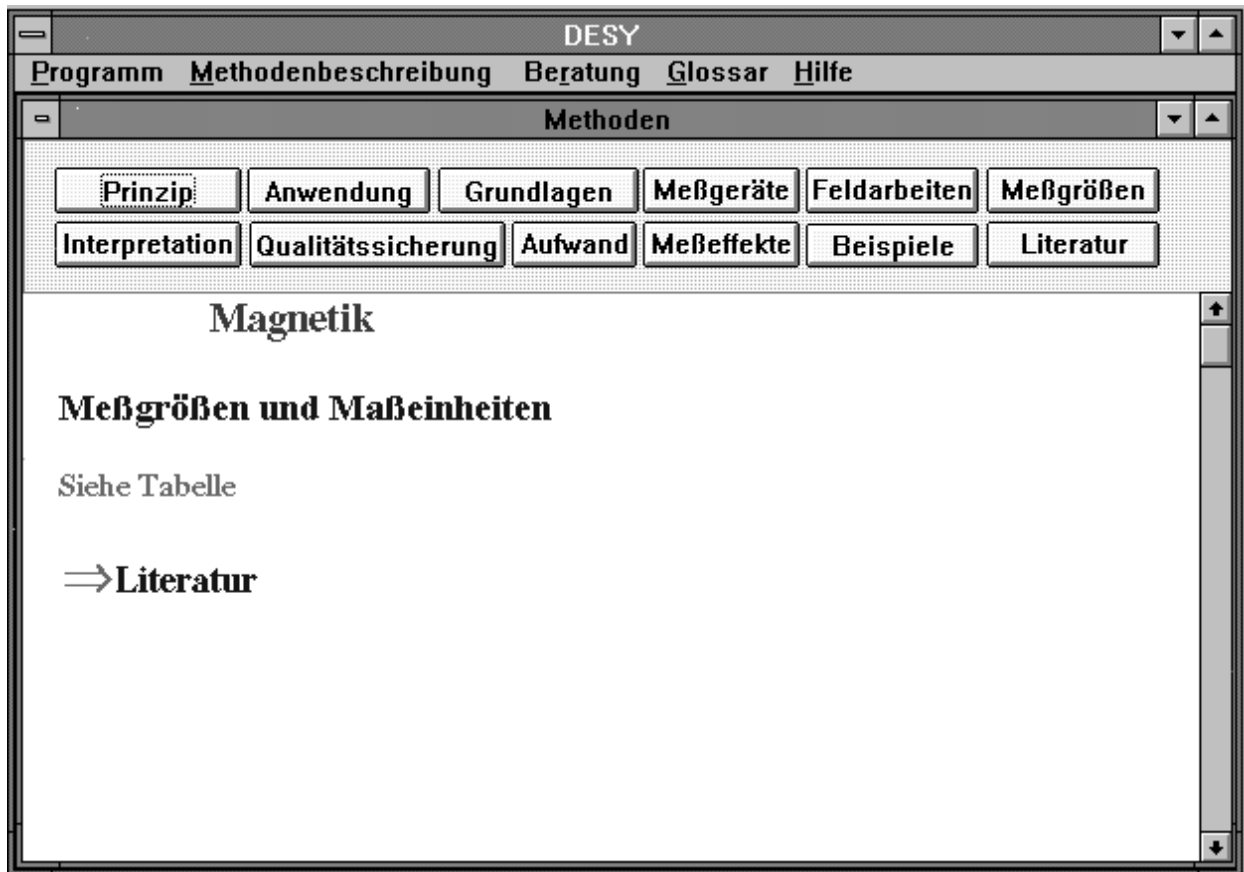


Abb. 20: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Meßgrößen“

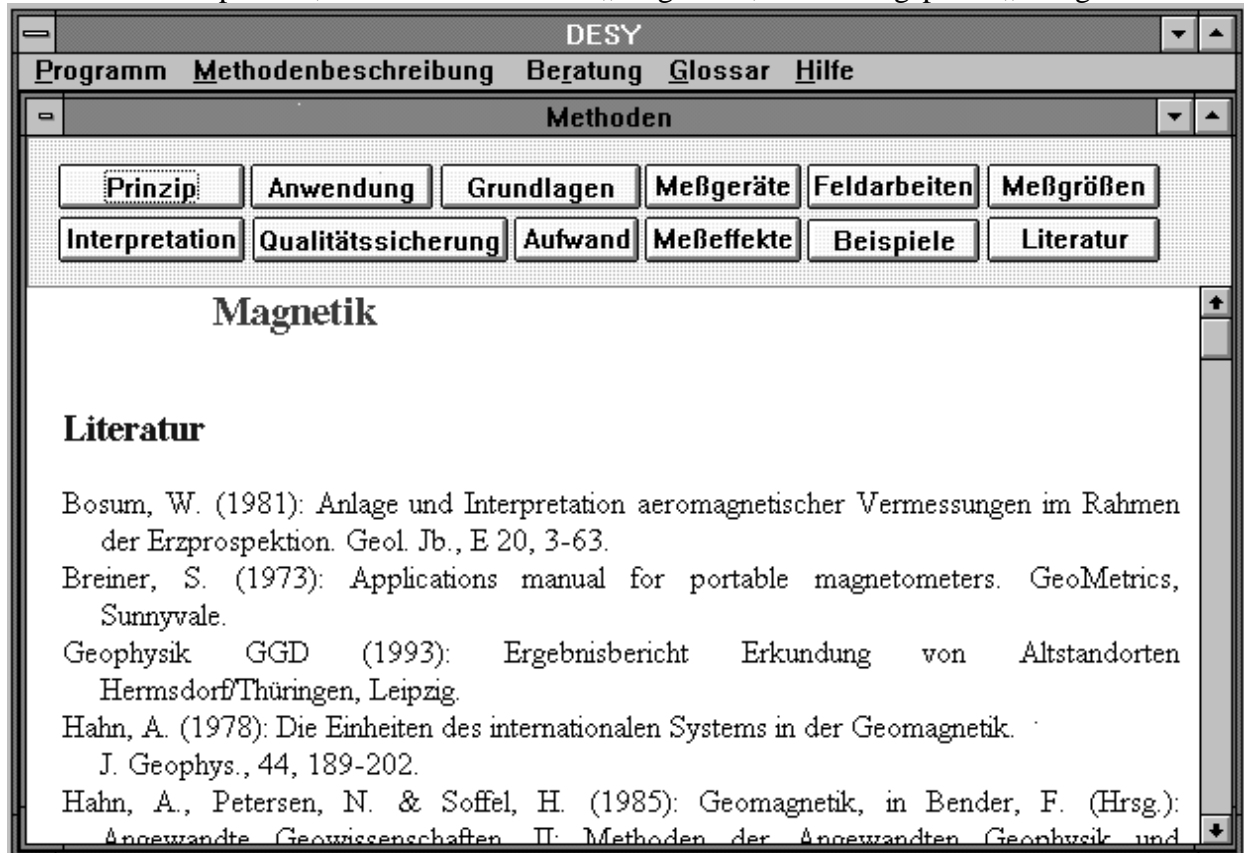
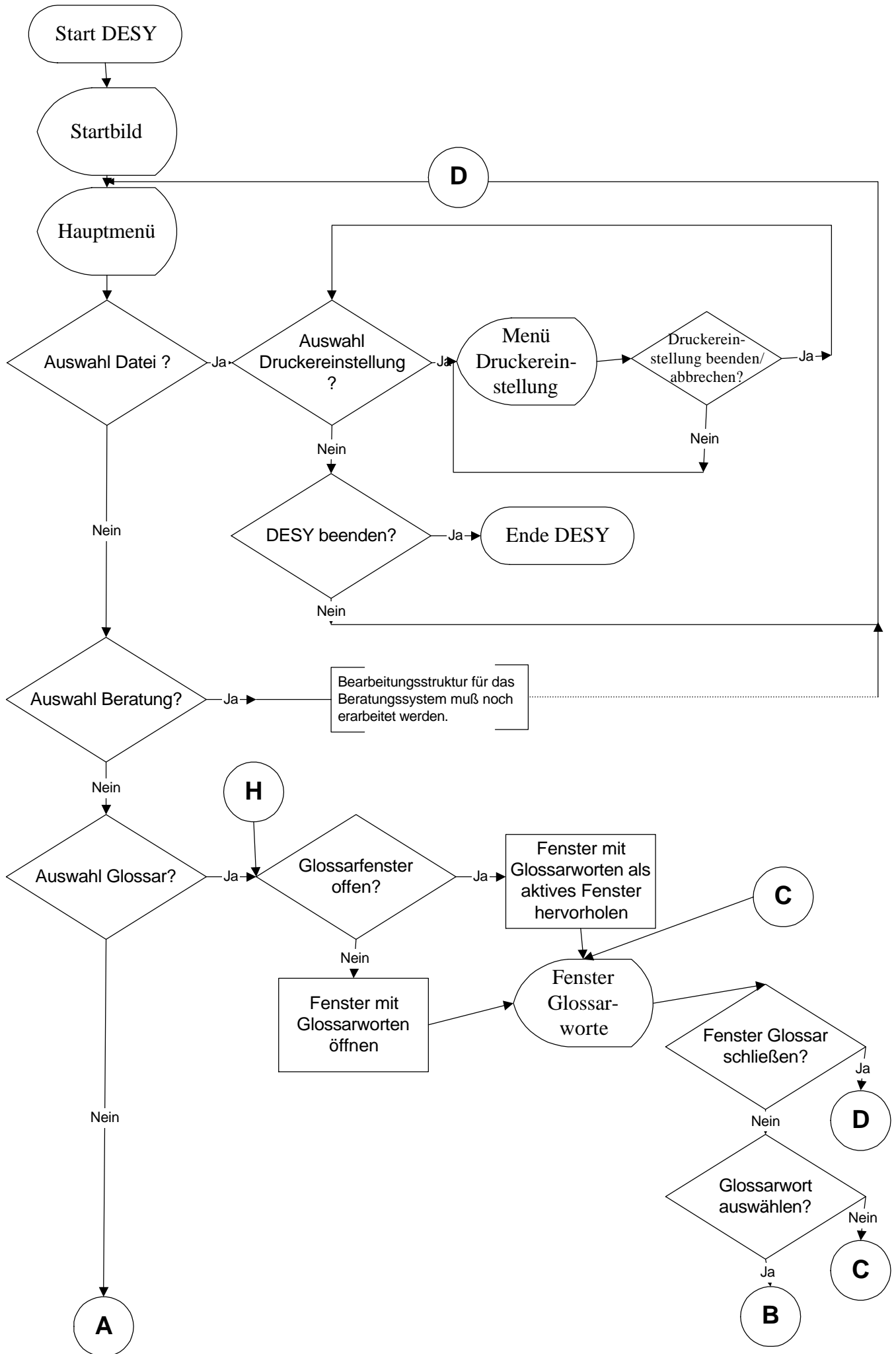
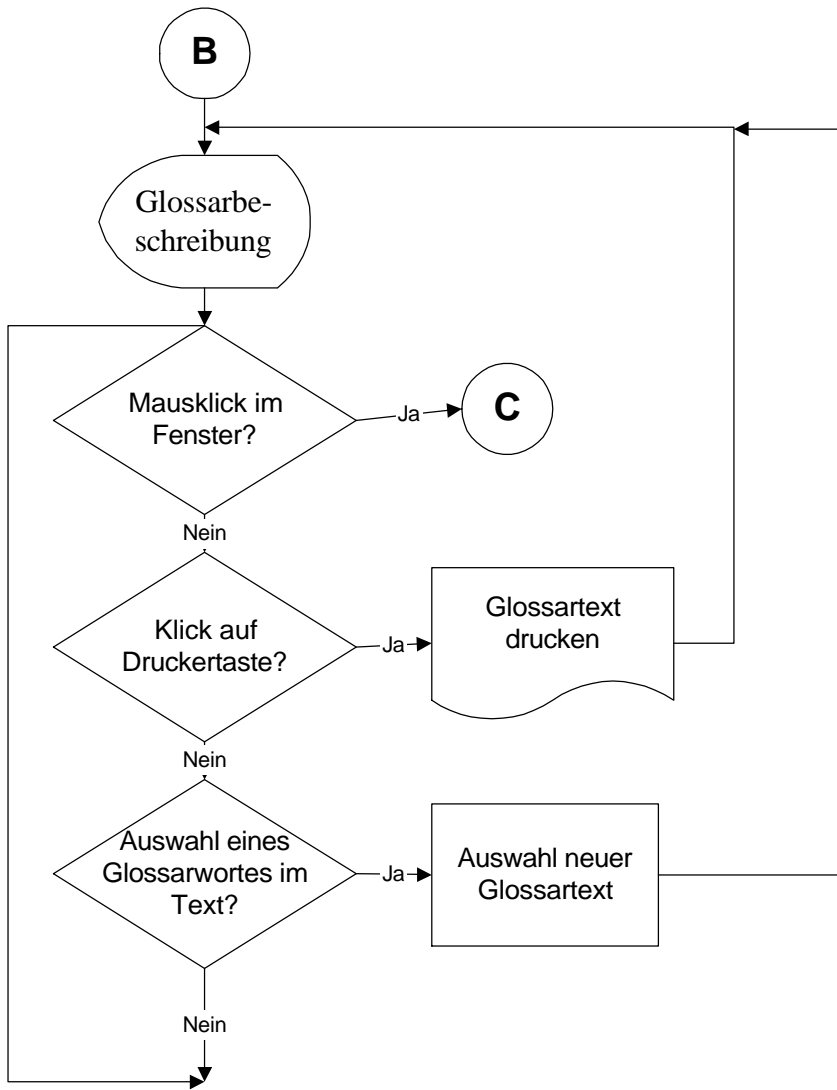
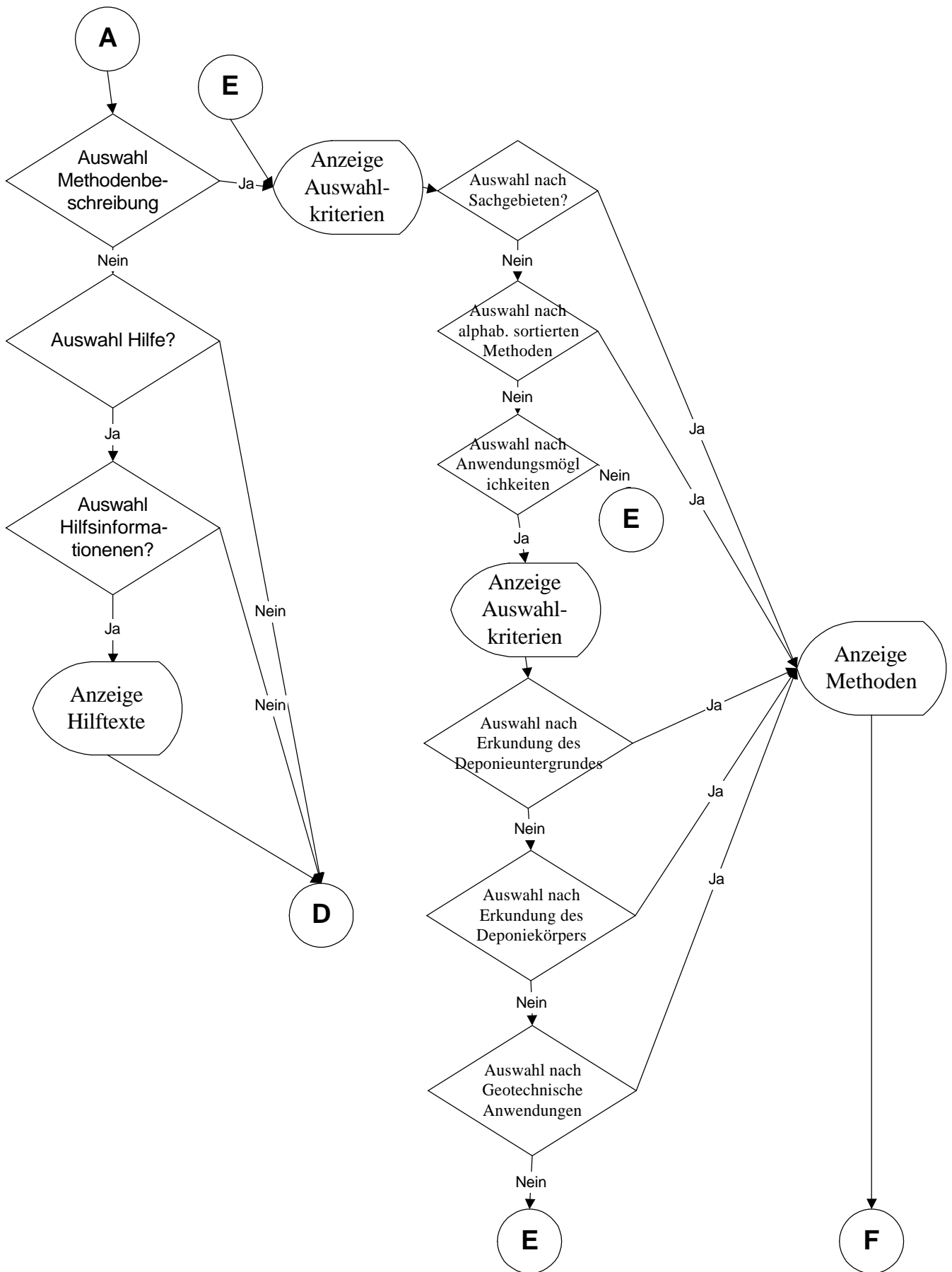


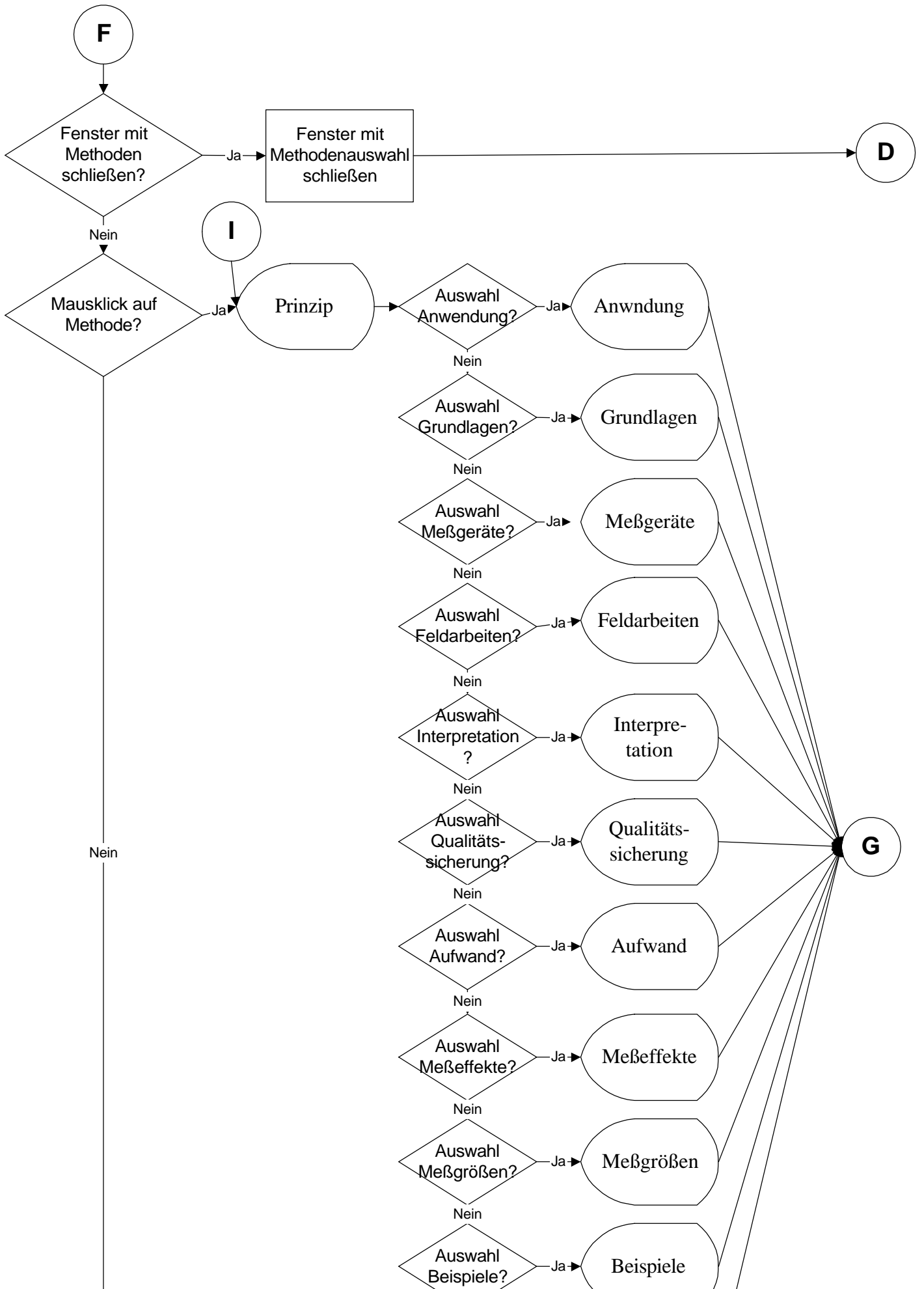
Abb. 21: Hauptmenü, Fenster der Methode „Magnetik“, Gliederungspunkt „Literatur“

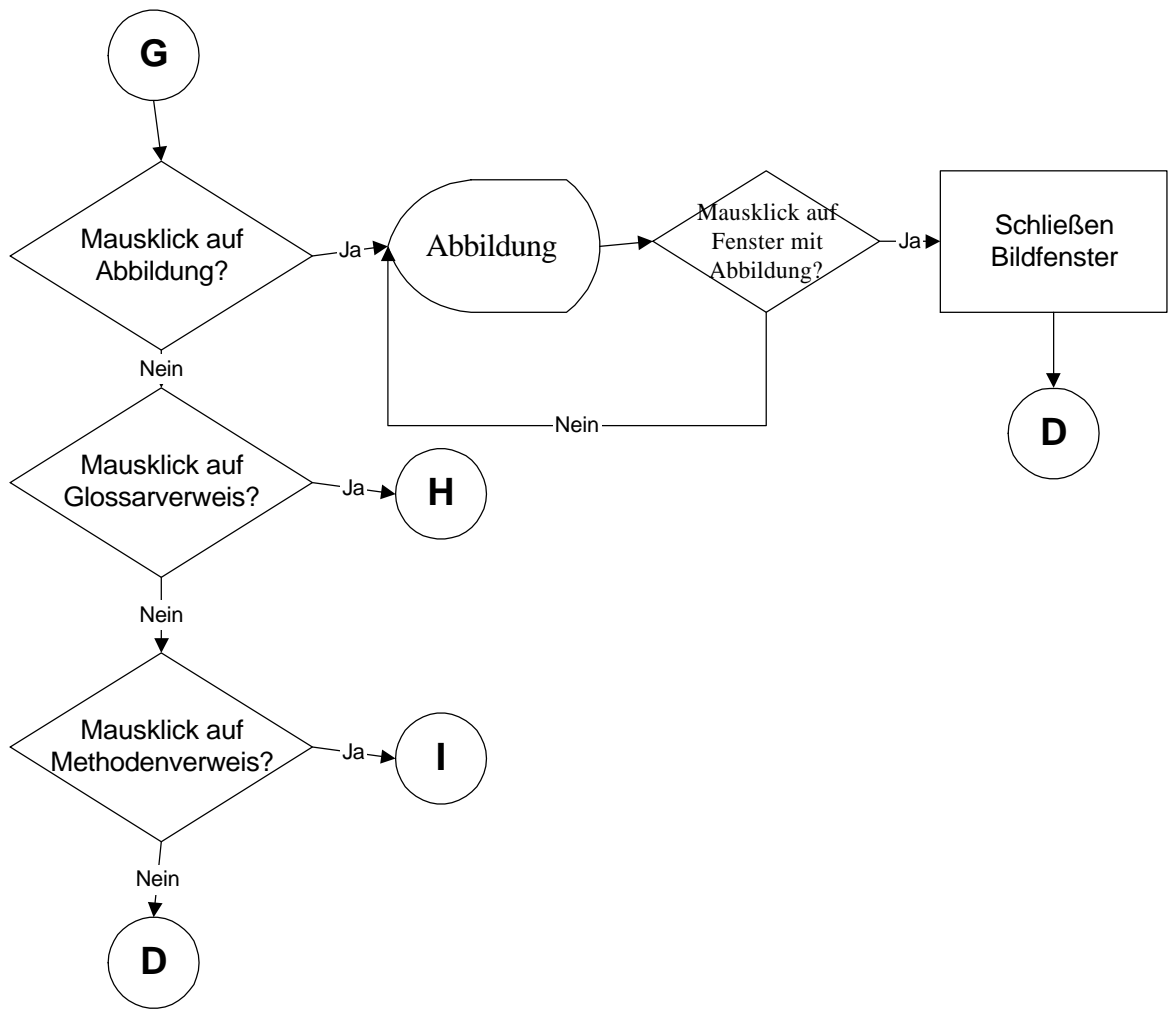
Abb.22: Datenflußplan











## 2.4 Fallbeispiele aus der Teststandortforschung

Neben der Entwicklung bzw. Weiterentwicklung der Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten war die Forschung an Teststandorten ein weiterer Schwerpunkt im Verbundvorhaben. Durch die Anwendung ausgereifter und neuer Verfahren an ausgesuchten Teststandorttypen konnten folgende Ziele erreicht werden:

- Test von Verfahrenskombinationen für bestimmte Aufgabenstellungen.
- Kriterien für die Auswahl der effektiven und kostengünstigsten Methoden der Standorterkundung abzuleiten: Die vorhandenen Verfahren (Standardverfahren) und die neu entwickelten Methoden für die Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten wurden an verschiedenen Standorttypen erprobt und nach Kosten und Nutzen bewertet.
- Instruktive Beispiele für die Methodenhandbücher und ein wissensbasiertes Beratungs-system zu erhalten.

Im Rahmen der Forschung an den Teststandorten war ein sehr vielfältiges Forschungsfeld zu bearbeiten. Eine umfassende Bearbeitung war mit dem vorgegebenen Finanzrahmen nicht möglich. Deshalb mußten Schwerpunkte gesetzt werden. Auswahlkriterien waren regionale Gesichtspunkte und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf möglichst viele andere „Fälle“. Als Fallbeispiele wurden folgende typische Teststandorte ausgewählt:

- Schöneiche, Brandenburg, quartäre und tertiäre Lockergesteine, betriebene Deponien und Ablagerungen,
- Eulenberg, Thüringen, verkarstete Karbonatgesteine der Muschelkalk-Formation und Ton-/Mergelsteine der Keuper-Formation mit anthropogenen Strukturen im Deponieuntergrund, Ablagerung mit Haus- und Industrieabfällen,
- Rabenstein, Sachsen, kristalline Schiefer des Altpaläozoikums unter z.T. tiefgründiger Verwitterungszone, möglicher Standort für eine Deponieanlage.

Die Teststandortforschung hat wesentlich zur Schließung von Forschungslücken beigetragen.

### 2.4.1 Schöneiche - Mittenwalde

Das Gebiet Schöneiche - Mittenwalde südöstlich von Berlin ist ein Lockergesteinsstandort mit einer komplizierten geologischen Situation (Glazialtektonik) und vielfältigen Umweltbelastungen durch eine fast 100-jährige Nutzungsgeschichte als Abfallablagerungsplatz, Gewerbe-/Industriegebiet und Standort für intensive Landwirtschaft einschließlich Intensivtierhaltung. Mit einem methodischen Projekt im Rahmen des Verbundvorhabens sollte gezeigt werden, welchen Beitrag die interdisziplinäre geowissenschaftliche Forschung zur Erkundung eines Lockergesteinsstandortes mit Umweltbelastungen und damit zur Lösung von Umweltproblemen leisten kann.

Es war nicht Ziel dieses Vorhabens, das Untersuchungsgebiet flächendeckend zu erkunden oder eine gutachterliche Bewertung der Umweltsituation im Untersuchungsgebiet vorzunehmen. Im Vordergrund der Arbeiten stand immer der methodische Aspekt. Vollständigkeit konnte auch hinsichtlich der Methodik mit den verfügbaren Mitteln nicht erreicht werden. Dennoch gibt es in diesem Untersuchungsgebiet mehr methodische Versuche, Daten und Ergebnisse als für viele vergleichbare Standorte. Diese Erfahrungen und Ergebnisse werden in dem vorliegenden Ergänzungsband des "Handbuches zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten" dargestellt, um Handlungsempfehlungen für die Arbeiten an vergleichbaren Standorten zu liefern. Die methodischen Beispiele geben Anhaltspunkte zur Leistungsfähigkeit und zu den Grenzen der eingesetzten Verfahren unter den Standortbedingungen der vielfältigen Umweltbelastungen und der komplizierten Quartärgeologie.

Nachfolgend werden die Erkundungsmethoden, die Erkundungsziele und die durchgeführten Arbeiten aufgelistet:

## **Geologie**

Aufgabe war es, auf der Grundlage vorliegender Archivunterlagen, der Revisionskartierung des Blattes Königs Wusterhausen 1 : 50 000 (1993), der Nutzung geophysikalischer Ergebnisberichte, der Auswertung von Sondierungen der Bodenkunde und der Aufnahme und Interpretation von neuen Bohrungen ein geologisches Modell zu erstellen, welches Auskunft gibt über den lithologischen, faziellen und stratigraphischen Aufbau des geologischen Untergrundes und gleichzeitig die Grundlage darstellt für die Erarbeitung eines hydraulischen Modellkonzeptes.

Die Untersuchungen zur Geologie beinhalteten:

- Geologische Spezialkartierung im Maßstab 1:10 000,
- Bewertung und gegebenenfalls Neuinterpretation der zur Verfügung stehenden Schichtenaufnahmen und anderer relevanter Unterlagen (u.a. Erkundungsberichte, Kartenmanuskripte),
- Dokumentation der im Rahmen des Projektes durchgeführten Bohr- und anderen Aufschlüsse,
- genetische und stratigraphische Interpretation der erbohrten Schichtenfolgen sowie
- Erarbeitung geologischer Profilschnitte und die Darstellung des geologischen Aufbaus des Untersuchungsgebietes (geologisches Modell).

## **Geofernerkundung**

Die Untersuchungsziele für die Geofernerkundung waren:

- Erkundung der Besonderheiten der Abfallaufhaldung,
- des Zustands der Geländeoberfläche bzw. der obersten Bodenschichten unter dem heutigen Deponiekörper,
- des Zustands der Geländeoberfläche im Umfeld des Deponiekörpers,
- der Gefährdungspotentiale für den Boden und das Grundwasser ausserhalb des Deponiekörpers sowie der
- möglichen Migrationswege von Sickerwässern aus der Deponie.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Multitemporale Auswertung von Luft- und Satellitenbildern zur photogeologischen Ansprache des Deponie-Untergrundes, zur Beschreibung des Regimes der Müllaufhaldung,
- Auswertung aktueller Farbinfrarot-Luftbilder zur Abschätzung des Umfangs möglicher Belastungen im Umfeld der Deponien,
- Spektroradiometer-Untersuchungen an geländetypischen Pflanzen zur Erfassung und Bewertung von Stresserscheinungen, die auf mögliche Schadstoffausbreitungen zurückzuführen sind sowie
- Test nichtphotographischer Fernerkundungssysteme (z. B. Wärmebildtechnik) und Auswertung von Scannerdaten.

## **Geophysik**

Mit geophysikalischen Messungen wurden Beiträge zur Strukturerkundung, zum Grundwasserströmungsmodell und zur Erkundung der Schadstoffbelastung gewonnen.

Aerogeophysik: Die Ziele der aerogeophysikalischen Messungen waren, Altlasten und Deponien geophysikalisch zu erfassen sowie Beiträge zur geologisch / hydrogeologischen Erkundung des Deponieuntergrundes im Untersuchungsgebiet zu liefern. Mit insgesamt 4 Meßflügen und einem Kontrollflug wurden 59 Profile auf einer Fläche von 27 km<sup>2</sup> mit insgesamt ca. 396 Profilkilometern geflogen. Die Flugrichtung war N-S, die 52 Fluglinien sind maximal 7,9 km lang. Bei einem Fluglinienabstand von nominal 80 m ergibt sich eine Überdeckung von ca. 4 km in EW-Richtung. In dieser Richtung wurden auch die 7 Kontrollprofilinien geflogen. Die mittlere Meßflughöhe des



Hubschraubers lag bei ca. 75 m. Zum Einsatz kamen die drei Methoden Elektromagnetik, Magnetik und Radiometrie (Gammastrahlen-Spektrometrie). In der Elektromagnetik und Magnetik wurde viermal pro Sekunde gemessen; dies entspricht einem Meßpunktabstand von ca. 10 m. In der Radiometrie wurden die Zählraten einmal pro Sekunde aufgezeichnet, entsprechend einem Meßpunktabstand von ca. 40 m.

Gleichstromgeoelektrik und Induzierten Polarisation: Das Meßgebiet umfaßt das Umfeld der Deponien Schöneiche und Schöneicher Plan auf einer Fläche von ca. 3,5 x 4 km. Hauptziel der Arbeiten war die Erkundung des Untergrundes bis in ca. 100 m Tiefe im Hinblick auf die Tiefenlage und Verbreitung bindiger Schichten, die das Grundwasser vor dem Eindringen von Deponiesickerwasser schützen könnten. Solche abdichtenden, bindigen Schichten (z. B. Ton, Schluff, Mergel) unterscheiden sich von durchlässigen, rolligen Horizonten (Sand) meist durch einen niedrigeren spezifischen elektrischen Widerstand. Eingesetzt wurden geoelektrische Sondierungen nach Schlumberger mit maximalen Auslagen von 240 bis 1 000 m und acht Punkte je AB/2-Dekade. In einigen Fällen wurden statt der klassischen Schlumberger-Sondierungen Spezialmessungen durchgeführt. Außer dem spezifischen elektrischen Widerstand wurde auch die IP-Aufladefähigkeit (im Zeitbereich) gemessen, da man sich hiervon eine bessere Unterscheidungsmöglichkeit zwischen bindigen und nicht bindigen Sedimenten sowie zwischen kontaminierten und nicht kontaminierten Bereichen versprach. Es stellte sich jedoch während der Messungen heraus, daß die IP-Effekte im Meßgebiet überwiegend sehr gering sind. Bei größeren Auslagen wurden die Werte von anthropogenen Störungen überlagert. Daher wurde darauf verzichtet, die Aufladefähigkeit bei Auslagen über 130 m zu messen. Außerdem wurde der kombinierte Einsatz von geoelektrischer Tiefensektionen und tiefenorientierter Wasserprobennahme getestet.

Geoelektrische Messung der Grundwasserbewegung: Voraussetzung für eine zuverlässige Beurteilung des Verunreinigungsrisikos von Grundwasser durch Schadstoffausbreitung ist die Kenntnis von Richtung und Geschwindigkeit der Grundwasserbewegung. Die Grundwasserfließrichtung wird oft aus Grundwassergleichenkarten abgeleitet. Die damit erhaltenen Angaben sind aber nur für relativ homogene Untergrundverhältnisse und eine entsprechende Dichte der Grundwassermeßstellen hinreichend sicher. Bei komplizierteren Untergrundverhältnissen versucht man, die Grundwasserbewegung durch Markierungsstoffe (Tracer), die über Bohrungen, Pegel, Brunnen etc. zugeführt werden, zu ermitteln. Ein geoelektrisches Verfahren zur Bestimmung der Grundwasserbewegung in Lockergesteinsaquiferen basiert auf dem Prinzip der Gleichstromgeoelektrik. Im Untersuchungsgebiet wurden geoelektrische Grundwasserbewegungsmessungen an 7 Meßstellen durchgeführt.

Seismik: Grundlage der seismischen Messungen ist die gezielte Anregung elastischer Wellen zur Durchschallung des Untergrundes. Die Aufzeichnung der aus dem Untergrund an die Erdoberfläche zurückkehrenden seismischen Wellen läßt Rückschlüsse auf den strukturellen und lithologischen Aufbau der Gesteinsschichten im Untergrund zu. Im Bereich der Deponie Schöneicher Plan wurden seismische Messungen mit hoher Überdeckung auf 2 Profilen mit einer Gesamtlänge von ca. 3 600 m durchgeführt. Die Arbeiten wurden als refraktionsseismische Messungen mit hoher Überdeckung ausgeführt, so daß auch eine refraktionstomographische Auswertung und eine reflexionsseismische Bearbeitung des Datenmaterials vorgenommen werden konnte. Außerdem wurde ein Reprozessing von 7 Profilen der seismischen Prospektion auf Erdöl und Erdgas aus den Jahren 1973/74 durchgeführt. Die Bearbeitungslänge betrug 1 s Zwei-Wege-Laufzeit. Für den Bereich bis zur Tertiärbasis erfolgte eine Interpretation und eine Zeit-Tiefen-Transformation.

Geophysikalische Penetrationssondierungen: Die geophysikalische Penetrationssondierung ist eine Methode zur Erkundung der oberflächennahen Lockersedimente. Dabei wird das Aufschlußverfahren der Penetrationssondierung (Drucksondierung) mit ausgewählten Methoden der geophysikalischen Bohrlochmessungen und einer Probenahmetechnik kombiniert. Die Penetrationssondierungen wurden im Untersuchungsgebiet neben anderen geophysikalischen Verfahren und Bohrungen zur Stukturerkundung eingesetzt. Außerdem wurden in bestimmten Tiefen Wasser- und Bodenproben entnommen. Sondiert wurde an 74 Meßpunkten auf ausgewählten Profilen. Die Gesamtlänge der Sondierungen beträgt 1 337 m und die maximale Sondierungstiefe 10 - 30 m.

Bohrlochmessungen: Im Rahmen geologischer Aufschlußarbeiten für eine tiefe Grundwassermeßstelle nahe der Deponie Schöneiche/Schöneicher Plan wurde eine Bohrung als Test- und Kalibrierbohrung ausgebaut und eine repräsentative bohrlochgeophysikalische Vermessung durchgeführt. Die Bohrung steht als ausgebaute Grundwassermeßstelle mit 99 m Teufe allen Interessenten für Test- und Kalibrierungsmessungen offen. Der kombinierte Einsatz einer Anzahl handelsüblicher Ringraumabdichtungsmaterialien und einer Reihe unterschiedlicher Rohrverbindertypen ermöglicht die Leistungsfähigkeit der Verfahren der Bohrlochgeophysik zu testen.

Milieusondenmessungen: Zur Bewertung der Umweltbelastungen eines Gebietes gehört die Erkundung der Beschaffenheit der Grund- und Oberflächenwässer sowie die Prognose von deren Entwicklung. Der Zustand der Wässer ist abhängig von der Struktur und vom Stoffbestand des Untergrundes (Böden und Gesteine), von der Menge und dem Chemismus der Niederschläge sowie von anthropogenen Veränderungen (z. B. Ablagerung von Abfällen). In Grund- und Oberflächenwässern laufen physikalische, chemische und biologische Prozesse ab. Somit ändert sich die Beschaffenheit der Wässer in Raum und Zeit. Eine Methode zur Erkundung der Beschaffenheit von Grund- und Oberflächenwässern ist die Messung der Milieuparameter elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert und Redoxpotential. Die Milieuparameter wurden mit einer kombinierten Sonde in-situ in 10 ausgewählten Grundwassermeßstellen im Oktober und Dezember 1994 sowie im Februar, April und Juni 1995 gemessen.

### **Historische Nutzungsanalyse**

Für die Untersuchung der vielfältigen Umweltbelastungen im Untersuchungsgebiet und insbesondere für die Zuordnung der möglichen Kontaminationen zu Verursachern ist die historische Nutzungsanalyse von großer Bedeutung. Eine Quelle dafür ist die Auswertung von Luftbildern (Kapitel 3). Weitere Quellen sind Archivunterlagen und die Befragung von Zeitzeugen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Kapiteln 5 und 6 dargestellt.

### **Bodenkunde**

Ziel der Untersuchungen war die Feststellung der Bodenbeeinflussung im Umfeld der Deponien unter Berücksichtigung der natürlichen minerogenen Grundgehalte und die Erfassung der Bodenprozesse und Bodeneigenschaften zur Beurteilung des Verhaltens von Schadstoffen im Boden. Zur Ermittlung der Belastungssituation wurden 28 Schürfe bis max. 2 m Tiefe angelegt und diese horizontbezogen für bodenchemische und bodenphysikalische Untersuchungen beprobt. Die Ergebnisse wurden punktbezogen bewertet. Zur Ermittlung der jährlichen Sickerwassermengen wurde auf die Anwendung des bodenhydrologischen Verfahrens der Methodenbank des FIS Boden im Niedersächsisches Boden-Informationssystem (NIBIS) orientiert. Dieses Verfahren hat den Vorzug, mit wenigen Klimadaten und Bodenkennwerten auszukommen, und bietet die Möglichkeit, die im Untersuchungsgebiet vorhandenen morphologischen Verhältnisse zu berücksichtigen. Die Anwendung dieses Verfahrens gestattet auch die Nutzung der für das Untersuchungsgebiet vorliegenden mehr als siebenhundert in die KA4 umgesetzten Grablochbeschriebe der Reichsbodenschätzung aus den 30er und 50er Jahren.

Die Arbeiten erfolgten in 3 Etappen:

- Recherche vorhandener Unterlagen und Durchführung von 35 Handbohrungen bis max. 20 dm unter Geländeoberfläche (GOF) für die Projektierung von Schurfpunkten.
- Anlegen von 28 Schürfen mit horizontbezogener Bodenprobenahme und Durchführung von 147 Handbohrungen bis max. 20 dm unter GOF.
- Laboruntersuchungen, Fortsetzung der Rechercharbeiten, Interpretation von 700 Grablochbeschrieben sowie der bodenkundlichen Untersuchungsergebnisse und Dokumentation, Darstellung der Bodenverhältnisse in Karten und Berechnung der jährlichen Sickerwasserrate.

### **Geochemie**

Die geochemischen Arbeiten im Untersuchungsgebiet hatten das Ziel, das komplexe chemische Inventar von Böden und Gewässersedimenten (Oberflächenbereich) im Umland der Deponien Schöneiche und Schöneicher Plan nach Grundbelastung und Fremdstoffeintrag differenziert zu bewerten. Die eingesetzte geochemische Untersuchungsmethodik der regionalen Oberflächengeochemie im Bereich der Deponiestandorte und ihres Umfeldes liefert Informationen über das exogene geochemische Grundangebot, d. h. den natürlichen geogenen Einfluß auf das komplexe System Umwelt sowie den anthropogen/technogen bedingten Elementanteil und deren Ursachen.

Mit der umweltgeochemischen Bestandsaufnahme des Industrie- und Altlastengebietes Schöneiche (chemische und metallverarbeitende Industrie, Lackiererei, Galvanik, Agrochemisches Zentrum) wurde eine breite Emissionsstruktur von Industrie- bzw. Produktionsprozessen, Müllentsorgungsflächen (Hausmülldeponien, gemischte Deponien, Industrierückstände) sowie Ablagerungen unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung und die Einflüsse der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung im Oberboden nachgewiesen und geochemisch charakterisiert. Aus dem regionalen (lateralen) Verteilungstrend lassen sich anthropogene Schwermetallanreicherungen vom geogenen Untergrund abgrenzen und belastungsgefährdete Bereiche im Untersuchungsgebiet ausweisen.

An den luftgetrockneten 170 Boden- und 39 Bachsedimentproben der Fraktion < 2,0 mm wurden 56 anorganische Parameter, davon 11 Hauptkomponenten, 42 Spurenelemente sowie  $C_{org}$ , pH-Wert (in  $H_2O$  und  $CaCl_2$ ) und die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Für die geochemische Multielementanalytik kamen folgende Verfahren zum Einsatz: Energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse (EDRFA), Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-AES), flammenlose Atomadsorptionsspektrometrie (AAS), Flammen-Atomadsorptionsspektrometrie mit Hydridsystem (AAS-HS), Flammen-Atomadsorptionsspektrometrie mit Graphitrohr (AAA-GR), Pyrohydrolyse und Naßchemie. Die pH-Wertbestimmung erfolgte potentiometrisch, während die Leitfähigkeit konduktometrisch ermittelt wurde. In 160 Bodenproben wurden die organischen Schadstoffe AOX, EOX, Cyanid, MKW, Phenol, BTEX, LCKW, PCB, PAK analysiert. Für 90 Bodenproben liegen Analysenergebnisse aus der Kopplung hochauflösender Gaschromatographie mit der Massenspektrometrie (HRGC/MS) zur PCDF/PCDD-Führung vor.

Die geochemischen Daten wurden mittels univariater und multivariater statistischer Verfahren bearbeitet und in flächendeckenden geochemischen Karten der Gehaltsverteilungen der Einzelemente sowie in Form von Faktorwertkarten und als Clusterpunktlagekarte (Karte der geochemischen Anomalien) dargestellt. Desweiteren wurden auf der Grundlage der natürlichen Hintergrundgehalte der Region Karten des geochemischen Belastungsgrades des Oberbodens (Geochemische Kontaminationskarten) sowie Karten der Kontrastwerte der Elementgehalte zu den Gefahrenwerten der Berliner Liste erstellt. Erstmals wurden anorganische und organische Schadstoffdaten einer gemeinsamen Bearbeitung mittels multivariater statistischer Methoden unterzogen und die Ergebnisse der Faktor- und Clusteranalyse flächenhaft ausgewertet und dokumentiert.

## **Hydrogeologische Untersuchungen und hydraulische Modellierung**

Mit Hilfe eines numerischen Strömungsmodells sollte die regionale Grundwasserströmung abgeschätzt werden. Dazu wurden einige hydrogeologische Basisdaten erhoben. Der Kenntnisstand ist insbesondere hinsichtlich der für wasserwirtschaftliche und ökologische Fragestellungen wichtigen Kenngrößen (z. B. Transmissivität) unzureichend. Das numerische Modell beschreibt den Ist-Zustand des Grundwasserleiters. Anschließend erfolgte die Simulation künstlicher Eingriffe in den Wasserhaushalt des Modellgebietes und Abschätzung von Auswirkungen auf die Grundwasserströmung.

## **Übertragbarkeit der methodischen Ergebnisse**

Das Gebiet Schöneiche - Mittenwalde südöstlich von Berlin ist ein Raum, der hinsichtlich der geologischen Situation und der vielfältigen Umweltbelastungen typisch für das Berliner Umland und weite Bereiche der neuen Bundesländer ist.

Das Untersuchungsgebiet zeigt eine sehr komplizierte Quartärstratigraphie und -tektonik. In "Stauchmoränen" ist mit einem vielfachen Wechsel rolliger und bindiger Partien zu rechnen. Es gibt weder einheitlich ausgebildete stratigraphische Horizonte noch aushaltende Aquifere. Die Gebirgsdurchlässigkeit und die Schadstoffrückhaltewirkung dieser Schichten sind mit großer Sicherheit Funktionen, die von allen 3 Raumkoordinaten abhängen. Festzustellen ist, daß sich die Lagerungsstörungen, wie sie u. a. im Untersuchungsgebiet beobachtet werden, nicht auf den Randbereich der Vereisung beschränken, sondern auch in den vermeintlich "ruhigen" Grundmoränen angetroffen werden. Die methodischen Ergebnisse sind somit hinsichtlich der geologischen Situation auf zahlreiche andere Standorte in Norddeutschland übertragbar.

Jeder Deponie- oder Altlast-Standort befindet sich in einem regionalen Grundwassersystem mit einer Größe von mehreren 10 km<sup>2</sup>, das in der Übersicht erkundet werden muß. Der Standort selbst ist mit einem engmaschigen Netz zu untersuchen. Für die Erkundung des Untergrundes von Altlasten (und neu anzulegenden Deponien) ist hauptsächlich der Tiefenbereich bis 50 m relevant. Für die Beschreibung des regionalen Grundwassersystems müssen vielfach auch Tiefen bis 300 m einbezogen werden.

Bei der Standortuntersuchung hat es sich bewährt, erst die Flächtaufnahmen mit

- geologischer Kartierung,
- Geofernerkundung,
- geophysikalischer Vermessung und
- oberflächengeochemischer Aufnahme

durchzuführen und danach die punktweise Erkundung gezielt anzusetzen:

- Schürfe,
- Sondierungen,
- Bohrungen (Auf- oder Ausbau des Netzes von Grundwassermeßstellen und nachgeordnete geophysikalische und hydraulische Bohrlochuntersuchungen sowie Bohrkernaufnahme und Laborversuche sowie
- geochemische Untersuchung von (teufenorientierten) Proben aus Grundwassermeßstellen.

Zu allen diesen Erkundungsschritten gibt es methodische Beispiele in den Kapiteln des Fallbeispiels Schöneiche, aus denen Hinweise zu Aufwand und Nutzen der durchgeführten Untersuchungen entnommen und auf andere Standorte übertragen werden können. Die Beratung durch erfahrene Fachleute sollte dadurch jedoch nicht ersetzt werden.

Um die Großdeponien Schöneiche und Schöneicher Plan wurde mit Bedacht ein großes Untersuchungsgebiet gewählt, um das Grundwassersystem erkunden sowie den Einfluß verschiedener anderer möglicher Schadstoffquellen entsprechend dem Verursacherprinzip berücksichtigen zu können. Es zeigt sich, daß eine kleinräumige Betrachtung zu Fehlinterpretationen führen würde. Die Möglichkeit zur Bearbeitung großer Untersuchungsgebiete mit einem vertretbaren Aufwand bieten die Geofernerkundung, Aerogeophysik, Geochemie und in eingeschränktem Maße auch die Geoelektrik.

Der Standort ist hinsichtlich des Schadstoffpotentials der Deponien und der weiteren Quellen für mögliche Umweltbelastungen typisch für zahlreiche andere Standorte in Norddeutschland besonders der neuen Bundesländer. Erstmals wurden anorganische und organische Schadstoffdaten einer gemeinsamen Bearbeitung mittels multivariater statistischer Methoden unterzogen und die Ergebnisse der Faktor- und Clusteranalyse flächenhaft ausgewertet und für die Zuordnung von Schadstoffbelastungen zu möglichen Verursachern (Schadstoffquellen) genutzt. Damit wurde eine optimale Methode zur Erkundung der regionalen und lokalen Schadstoffbelastung im oberflächennahen Bereich entwickelt.

Die Gliederung des in der Endredaktion befindlichen Bandes kann dem Anhang A 3 entnommen werden.

## **2.4.2 Eulenberg**

Mit der Altablagerung Eulenberg bei Arnstadt in Thüringen wurde eine mögliche Altlast an einem Standort in mesozoischen Festgesteinen untersucht. Die Besonderheiten des Standortes Eulenberg liegen darin begründet, daß durch den mit der Errichtung eines unterirdischen Bauwerkes in den 40er Jahren verbundenen Steinbruchbetrieb die natürlichen geologischen Verhältnisse gestört wurden. Um die Auswirkungen der massiven Eingriffe in den Untergrund auf dessen Barrierewirkung abschätzen zu können, war die geologische Erkundung hier in besonders enger Weise mit der historischen Standortanalyse zu verknüpfen. Ohne die aus organistorischen Gründen erst zu einem relativ späten Zeitpunkt mögliche Einbeziehung von Geofernerkundung und Geophysik in den Erkundungsprozeß wäre es sicher nicht möglich gewesen, die Situation unter der Altablagerung zu klären.

Mit methodischen Arbeiten im Rahmen des Forschungsverbundvorhabens "Deponieuntergrund" sollte gezeigt werden, welchen Beitrag die interdisziplinäre geowissenschaftliche Forschung zur Erkundung eines belasteten Festgesteinsstandortes und damit zur Lösung von Umweltproblemen leisten kann. Es war nicht Ziel dieses Vorhabens, den Standort flächendeckend zu erkunden oder eine gutachterliche Bewertung der Umweltsituation im Untersuchungsgebiet vorzunehmen. Im Vordergrund der Arbeiten stand immer der methodische Aspekt. Vollständigkeit konnte auch hinsichtlich der Methodik mit den verfügbaren Mitteln nicht erreicht werden. Die Erfahrungen und Ergebnisse der Erkundungsarbeiten und der methodischen Versuche werden in dem vorliegenden Ergänzungsband des "Handbuches zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten" dargestellt. Damit werden Handlungsempfehlungen für die Arbeiten an vergleichbaren Standorten geliefert.

## **Standortsituation**

Das Untersuchungsgebiet liegt am SW-Rand des Thüringer Triasbeckens. Es umfaßt stratigraphische Einheiten vom Oberen Buntsandstein bis zum Mittleren Keuper. Morphologisch ist das Gebiet durch einen herzynisch (NW-SE) verlaufenden, scharf ausgeprägten Steilabfall des Hebungsabschnittes der südwestlichen Störungsschar der Eichenberg-Gotha-Saalfelder Störungszone (Wachsenburgabschnitt) gegen die Keuperniederung der Wachsenburgmulde gekennzeichnet. Am NE-Rand des Steilabfalls und damit unmittelbar nördlich einer den Störungsbereich gegen die Keupermulde begrenzenden Bruchzone befindet sich am westlichen Stadtrand von Arnstadt die Altablagerung Eulenberg. Die Altablagerung, die ab Anfang der 60er Jahre bis 1979 als ungeordnete Deponie betrieben wurde, liegt in der weiteren Schutzzone des Wasserwerkes Arnstadt.

Die lokalen und regionalen hydrogeologischen Verhältnisse werden im Untersuchungsgebiet vorrangig vom Kluftnetz, den Störungssystemen und der Geometrie der Schichtflächen kontrolliert. Starke Verkarstung durch Auslaugung führt in Karsthohlräumen mitunter zu einer bedeutenden Wasserführung. Im Bereich der Störungszone fungiert der Mittlere Muschelkalk als kombinierter Kluft- und Karstgrundwasserleiter. Nach den Ergebnissen der gemeinsamen Auswertung von Luftbildern und seismischen Resultaten sowie eine Extrapolation der im Umfeld auszuhaltenden tektonischen Situation in den durch den Abfallkörper bedeckten Bereich werden die Verhältnisse unter der Altablagerung durch ein Mosaik kompliziert gegeneinander verstellter Kleinschollen bestimmt. Begrenzt werden diese leistenförmigen Schollen von steilen NW-SE streichenden Störungen und NE-SW streichenden Querstörungen.

Der Abfallkörper der Altablagerung Eulenberg bildet eine mit Bermen versehene Schütthalde. Das Relief seiner Liegendbegrenzung wird durch die Grubenbaue und das Abraumhaldenmaterial der ehemaligen Baugrube bestimmt. Die Auflagefläche der Altablagerung ist morphologisch stark gegliedert. Bereits im Jahr 1946 war der Eulenberg durch Massenumlagerungen großen Ausmaßes gekennzeichnet. Die Böschungshöhen der in den Oberen Muschelkalk gebrochenen Grube, in der später Abfall abgelagert wurde, lassen sich aus der "Deutschen Grundkarte" von 1946 direkt ermitteln und betragen 25 m im Westen, 23 m im Süden, 10 - 20 m im Osten und 15 m im Norden.

Im zentralen Teil beträgt die Mächtigkeit des Abfalls bis zu 26 m. Allein die im Bereich der Baugrube befindliche Abfallmenge umfaßt mehr als 100 000 m<sup>3</sup>. Auf diesem Teil des Abfallkörpers sind Kleingärten und Wochenendhäuser angelegt worden. Südöstlich der Baugrube wurde der bei den Steinbrucharbeiten anfallende Abraum aufgehaldet. Auch auf diesem Gelände befinden sich heute Gartenanlagen.

Die Oberfläche des Abfallkörpers besteht aus einem System mehrerer Bermen mit steilen Böschungswinkeln. Die Höhendifferenz zwischen den Bermen liegt bei 4 - 7 m. Im zentralen Bereich (südlich des ehemaligen Schießstandes) beträgt die Böschungshöhe sogar 12 m. Der gesamte Höhenunterschied innerhalb des in 3 Terrassen gegliederten Böschungssystems summiert sich auf 33 m. Da die Böschungen häufig Hangneigungen größer 1:1 aufweisen, ist deren dauerhafte Standfestigkeit nicht gewährleistet. Im Rahmen der 1994 durchgeführten Erdstoffeinlagerungen erfolgte bereits ein teilweiser Ausgleich der steilen Böschungen.

Das Gesamtvolumen des Abfallkörpers wurde mit 430 000 m<sup>3</sup> berechnet und beträgt damit etwa nur die Hälfte des nach Deponieprotokollen ermittelten Abfallaufkommens, auch wenn noch geringe Kompaktionseffekte des locker geschütteten Materials in Betracht gezogen werden müssen. Inhaltsstoffe der Altablagerung sind u. a.: Bauschutt, Hausbrandasche, Schlachthofabfälle, Gerbereirückstände, Galvanikschlämme, Fäkalien, Schleifschlämme aus der Bleikristallfertigung, zyanidhaltige Schlämme und phenolhaltige Abfälle aus der Bitumenproduktion.

### **Erkundungsmethoden, Erkundungsziele und durchgeführte Arbeiten**

Nachfolgend werden die Erkundungsmethoden, die Erkundungsziele und die durchgeführten Arbeiten aufgelistet:

#### **Geologie und Hydrogeologie**

- Historische Erkundung der Altablagerung und Ermittlung ihres Schadstoffpotentials ("Deponiegeschichte"),
- Erstellung eines geologisch-hydrogeologischen Vormodells nach regionalen geologischen Kenntnissen, den Ergebnissen von Altbohrungen und einzelner gezielt angesetzter Flachbohrungen sowie Wasseranalysen,
- Bewertung und teilweise Neuinterpretation von Altbohrungen (Archivmaterial),
- geologische Spezialkartierung mit Aufnahme tektonischer Elemente,
- Bohrarbeiten und Schürfe.

Im November 1992 wurden in den Bohrungen E 10 und E 11 hydraulische Formationstests (Packertests) mit folgender Zielstellung durchgeführt:

- Bestimmung der hydraulischen Parameter wie Permeabilität und Speicherkapazität,
- Prüfung, welche hydraulischen Testverfahren und welche Auswertemethoden für die Standort-situation am besten geeignet sind,
- Bewertung des Einflusses, den der Ausbau einer Bohrung zur Grundwassermeßstelle auf die Testdurchführung und die Testergebnisse ausübt. Die Bohrung E 10 wurde zunächst im nicht ausgebauten Zustand getestet (Open Hole Test), danach im ausgebauten (Cased Hole Test). Durchgeführt wurden Puls-Test, Slug-Test, Injektionstest, Pumptest und WD-Test.

#### **Geofernerkundung**

Ziel der Arbeiten zur Geofernerkundung war die Aufklärung des Ablaufs und der Besonderheiten der Abfallablagerung, die Untersuchung des Vorhandenseins, des Zustands und der Verbreitung abdichtender Gesteinsschichten sowie der Nachweis möglicher Migrationswege für kontaminierte Wässer aus der Altablagerung in das Umfeld.

- Erstellung eines phototektonischen Schemas für die weitere Umgebung des Standortes Eulenberg. Grundlage dafür bildete eine Photolineationskarte, die nach visueller Dechiffrierung von Scanneraufnahmen der Landsat-Satelliten 1 bis 5 und Photoaufnahmen von zwei sowjetischen Kosmos-Satelliten erarbeitet wurde. Es wurden dabei alle Photolineationen berücksichtigt, die eine mögliche geologisch-tektonische Relevanz aufweisen. Zur Eliminierung von "Pseudolineationen", die durch die Aufnahmetechnik (Scanner-Zeilen) oder anthropogene Strukturen (Bergbau, Trassen, Land- und Forstwirtschaft) verursacht sind, erfolgte bei der Dechiffrierung ein Abgleich mit topographischen Karten.

- Die Rekonstruktion der Entwicklung des Deponiestandortes von 1944 bis zur Gegenwart erfolgte durch multitemporale Luftbildauswertung auf der Grundlage von Krieglufbildern der US-Luftwaffe aus den Jahren 1944 und 1945 sowie von Schwarzweiß-Luftbildern der laufenden topographischen Befliegungen aus den Jahren 1961, 1971, 1981 als Stereo-Paare und einem Farbinfrarot (CIR)-Luftbild von 1991.
- Photogeologische Luftbildauswertung: Dafür konnten im Bereich der Altablagerung lediglich die Luftbilder der Befliegungen aus den Jahren 1945 und 1961 verwendet werden. Später haben hier die Störfaktoren durch Bebauung und militärische Übungen erheblich zugenommen, so daß eine geologisch orientierte Auswertung nahezu unmöglich wurde.

## Geophysik

Magnetik: Ziel der magnetischen Messungen war die Abgrenzung der Altablagerung, die Lokalisierung größerer magnetisch wirksamer Einlagerungen sowie die Konturierung möglicher stahlbetonbewehrter unterirdischer Bauten. Zum Einsatz kam ein Protonenmagnetometer in Gradiometer-Konfiguration zur Messung des magnetischen Totalfeldes und seines vertikalen Gradienten. Die Vermessung erfolgte im Bereich der Abfallverbreitung auf einer Fläche von 500 x 600 m mit einem regelmäßigen Gitter von 5 m Punktabstand.

Gravimetrie: Da zu Beginn der Untersuchungen am Standort Eulenberg die Lage der im Untergrund der Altablagerung vermuteten unterirdischen Wehrbauten unbekannt war, und Luftbilder bzw. Baupläne aus der Zeit vor dem Beginn der Ablagerung von Abfällen noch nicht zur Verfügung standen, wurde versucht, entsprechende Informationen über Schweremessungen zu erhalten. Aufgrund der Dichteunterschiede zwischen den Gesteinen des Keupers und Muschelkalkes einerseits sowie den in die offene Baugrube verkippten Abfällen andererseits war mit einer hinreichenden Dichtedifferenz zu rechnen, so daß über der verfüllten Baugrube ein deutliches Schwereminimum erwartet werden konnte. Die gravimetrischen Messungen erfolgten auf einer Meßfläche von 500 x 420 m mit der Altablagerung im Zentrum. Die Meßpunkte lagen auf einem regulären Gitter mit einem Punktabstand von 20 m. Lediglich im Bereich steiler Böschungen und bei Hindernissen durch Bebauung innerhalb der Gartenanlagen wurde geringfügig von dem vorgegebenen Punktgitter abgewichen. Wegen der Höhenabhängigkeit der Schwere ist eine Höhenreduktion der gemessenen Schwerewerte erforderlich. Dafür erfolgte neben der Koordinatenbestimmung ein Präzisionsnivellement aller Meßpunkte.

Gleichstromgeoelektrik: Die mit dieser Methode untersuchte Materialeigenschaft ist der spezifische elektrische Widerstand des Untergrundes bzw. dessen Kehrwert, die elektrische Leitfähigkeit. Der elektrische Widerstand eines Gesteins ist abhängig von seinem Wassergehalt, dem Mineralgehalt des Wassers, der Lithologie (Porenraumstruktur) und vom Tongehalt. Daher wird die Gleichstromgeoelektrik sowohl zur Erkundung der geologischen Strukturen als auch zum Nachweis von Schadstoffaustrag (in Form kontaminierter Wässer) aus Altablagerungen eingesetzt. Dazu wurden auf einer Fläche von 1000 x 1000 m eine geoelektrische Widerstandskartierung nach Schlumberger mit einem halben Elektrodenabstand  $AB/2 = 50$  m und 30 Tiefensondierungen (davon 6 Sondierungen in Kreuzauslage zur Abschätzung der Effekte durch laterale Leitfähigkeitsänderungen) bis zu einem halben Elektrodenabstand  $AB/2 = 420$  m durchgeführt. Während der Aussagetiefenbereich bei der Widerstandskartierung bis zu 15 m beträgt, konnten mit den Tiefensondierungen Informationen bis etwa 100 m erhalten werden. Bei der Widerstandskartierung konnte infolge schwieriger Geländebedingungen und eingeschränkter Zugänglichkeit mit einer linearen Schlumberger-Anordnung von 100 m Auslagenweite an etwa 30 % der Meßpunkte im Untersuchungsgebiet nicht gemessen werden. Zur Bestimmung der Abfallverbreitung wurde daher im Zentralteil der mit der Schlumbergerkartierung vermessenen Fläche eine Mise-a-la-Masse-Messung durchgeführt (Meßfläche 400 x 530 m). Durch die flexiblere Anpassung an die Geländebedingungen war es möglich, die Meßlücke der Widerstandskartierung weitgehend zu schließen.

Elektromagnetik: Auch elektromagnetische Meßverfahren werden zur Untersuchung von Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund eingesetzt. Der wesentliche Vorteil der elektromagnetischen Verfahren ist, daß Leitfähigkeitsmessungen auch dann durchgeführt werden können, wenn der Einsatz

von Gleichstromverfahren erschwert oder praktisch unmöglich ist. Das betrifft z. B. versiegelte Bereiche. Weitere Vorteile ergeben sich aus dem relativ geringen Raumbedarf der Meßanordnung, der daraus resultierenden hohen Mobilität und dem geringeren Personalbedarf. Am Standort Eulenberg wurden die Gerätesysteme MaxMin und Maxiprobe eingesetzt. Dabei handelt es sich um Multifrequenz-Systeme, die durch wählbare Abstände zwischen Sender- und Empfängerspule sowie in einem weiten Bereich variabler Sendefrequenzen sehr gut an die Erkundungsaufgabe und die Geländebedingungen angepaßt werden können. Die Meßsysteme werden sowohl zur Kartierung als auch zur Sondierung eingesetzt. Da neben geologischen auch methodische Fragestellungen gelöst werden sollten, wurden auf einer Meßfläche 1000 x 1000 m mit dem MaxMin-Verfahren an jedem Meßpunkt alle 10 verfügbaren Frequenzen gemessen. Routinemäßig nutzt man für Kartierungszwecke nur 2 bis 4 Frequenzen. Ziel der Maxiprobe-Messungen waren die Erkundung struktureller Elemente des mesozoischen Untergrundes, die Kartierung von Bruchstörungen sowie die Erfassung möglicher kontaminierter Bereiche. Das Meßprogramm umfaßte sowohl Multifrequenz-Sondierungen als auch Sondierungskartierungen auf insgesamt 43 Profilen. Die Ergebnisse wurden dargestellt als Knickpunktkurven, Profile und Karten des Neigungswinkels der Polarisationsellipse sowie Widerstandskarten für 17 ausgewählte Frequenzen von 229 bis 58594 Hz. Für 120 Einzelsondierungen auf den Profilen wurden Schichtmodelle durch Inversion berechnet.

Seismik: Am Teststandort Eulenberg kamen (Standard)-Refraktionsseismik, Refraktionstomographie und hochauflösende 2-D-Reflexionsseismik teilweise in Kombination zum Einsatz. Die Grundaufgabe refraktionsseismischer Messungen ist die Ermittlung der Teufenlage von Schichtgrenzen und der seismischen Geschwindigkeiten dieser Schichten, um daraus Aussagen über den strukturellen Aufbau des Untergrundes und dessen Materialeigenschaften (Lithologie) ableiten zu können.

Liegen im Untersuchungsgebiet komplexe Lagerungsverhältnisse vor, z. B. kleinräumige laterale und vertikale Inhomogenitäten, steht mit der Refraktionstomographie ein geeignetes Verfahren zur Verfügung. Dabei wird ein Untergrundmodell zugrunde gelegt, das nicht nur an Schichtgrenzen auftretende sprunghafte, sondern auch quasi-kontinuierliche Änderungen der seismischen Geschwindigkeit (sog. Geschwindigkeitsgradienten) berücksichtigt.

Bei reflexionsseismischen Messungen werden Kompressionswellen (P-Wellen) angeregt und reflektierte Signale von Schichtgrenzen im Untergrund empfangen. Die Meßergebnisse unterzieht man einer umfangreichen rechentechnischen Bearbeitung - dem seismischen Prozessing. Ein wesentliches Ergebnis dieses Prozessings ist die Laufzeitsektion, d. h. eine Darstellung der seismischen Spuren in einer senkrecht unter dem Bezugsniveau des Profils verlaufenden Ebene. Darin werden die Schichtgrenzen durch Reflexionseinsätze sowie Lagerungsstörungen als Versatz von Reflexionshorizonten abgebildet.

Im Bereich der Altablagerung Eulenberg und in ihrer Umgebung wurden 8 Profile mit einer Gesamtlänge von 4,5 km refraktionsseismisch und 17 reflexionsseismische Profile mit einer Gesamtlänge von 12,5 km vermessen. 5 reflexionsseismische Profile mit einer Gesamtlänge von 1,8 km wurden auch refraktionstomographisch ausgewertet. Folgende Erkundungsziele standen im Vordergrund:

- Erkundung der Lagerungsverhältnisse im Untergrund und dem Umfeld der Altablagerung,
- Kartierung von Auflockerungszonen und Inhomogenitäten als Hinweise auf tektonisch beanspruchte Bereiche,
- Erfassung und Beschreibung des regionalen und lokalen Störungssystems,
- Abgrenzung der Altablagerung zum gewachsenen Untergrund,
- Bestimmung von Mächtigkeit und Auflagefläche des Abfallkörpers, Konturierung der unter dem Abfall verborgenen ehemaligen Baugrube,
- Erfassung von Strukturen innerhalb des Abfallkörpers,
- Lokalisierung möglicher künstlicher Hohlräume.

Geophysikalische Penetrationssondierungen: Diese Methode wird eingesetzt zur Erkundung der oberflächennahen Lockersedimente und atropogener Ablagerungen. Dabei wird das Aufschlußverfahren der Penetrationssondierung (Drucksondierung) mit ausgewählten Methoden der geophysikalischen Bohrlochmessungen und einer Probenahmetechnik kombiniert. Ziele der Arbeiten im Untersuchungsgebiet waren die Erkundung des Abfallkörpers, der Auflagefläche der Altablagerung



und des oberflächennahen Deponieumfeldes. Im November und Dezember 1992 wurden an 90 Sondierungspunkten insgesamt 792 m Sondierungen abgeteuft und an vorgegebenen Punkten, bei Antreffen des Ruhewasserspiegels, insgesamt 9 verfilterte Beobachtungsbrunnen angelegt. Außerdem wurden 200 Bodenproben nach den Ergebnissen der Sondierungen aus charakteristischen Tiefenintervallen gezogen und zur Ermittlung ergänzender hydrogeologischer Informationen Versickerungsversuche im Liegenden der Deponie durchgeführt.

### **Milieusondenmessungen und hydrochemische Untersuchungen**

- Milieusondenprofilvermessungen zur Bestimmung von elektrischer Leitfähigkeit, Temperatur und pH-Wert als Funktion der Tiefe zu vier Zeitpunkten im Abstand von etwa 3 Monaten.
- Tiefenorientierte Wasserprobenahme unter in-Situ-Verhältnissen nach den Ergebnissen der Milieusondenprofilvermessungen.
- Von April bis November 1994 erfolgten Untersuchungen zur Grundwasserspiegelentwicklung. Dazu wurden in Grundwassermeßstellen Wasserstand und Temperatur in zeitlichen Abständen von 5 min automatisch registriert.
- An fünf ausgewählten Meßstellen der Wilden Weißen erfolgten Abflußmessungen mit einem Mikroflügel, um Rückschlüsse auf die im Untersuchungsgebiet zu erwartende Grundwasserneubildung zu ziehen.
- Untersuchung einzelner Quellbereiche des Wasserwerkes Schönbrunn auf Bor und AOX.
- Auswertung und Interpretation der Profilvermessung und der Grundwasseranalysedaten sowie Ableitung eines räumlichen-zeitlichen Modells, mit dem sich von der Deponie ausgehende Kontaminationen beschreiben lassen.

### **Zusammenfassung und Übertragbarkeit der methodischen Ergebnisse**

Am Beispiel der Altablagerung Eulenberg bei Arnstadt konnte demonstriert werden, welchen Beitrag die kombinierte Anwendung geowissenschaftlicher Erkundungsmethoden zur Klärung einer komplizierten Standortsituation leisten kann. Die Schwierigkeit des Vorgehens bestand unter anderem darin, daß Standortverhältnisse zu rekonstruieren waren, die von der heutigen Situation des Geländes erheblich abweichen. Zum anderen mußte die geologische Situation im Deponieuntergrund durch eine lokal über 20 Meter mächtige Müllschicht erkundet werden. Beide Komponenten, anthropogene Veränderungen und natürliche geologische Gegebenheiten an der Deponiebasis, bestimmen maßgeblich das vom Standort auf das Umfeld ausgehende Gefährdungspotential.

Das Untersuchungsgebiet zeigt ein kompliziertes Schollenmosaik, das durch die Störungsstaffeln der Eichenberg - Gotha - Saalfelder - Störungsszone und verschiedenen dazu senkrechten Störungen gebildet wird. Die Gesteine des Untergrundes sind in erheblichem Umfang verkarstet. Es wurden mehrere z. T. gespannte Grundwasserhorizonte nachgewiesen, die ein kompliziertes hydraulisches System bilden. Vergleichbare Standortsituationen gibt es im weiten Bereichen Mittel- und Süddeutschlands.

Abgesehen von geringmächtigen grundwasserführenden Quartärablagerungen, die erst im nördlichen Vorland des Eulenberges an Bedeutung gewinnen, sind im Untergrund der Altablagerung die stratigraphischen Einheiten des Muschelkalk und des Keuper für die Grundwasserführung bedeutsam, die über lokale Störungssysteme und Karsthohlräume in komplizierter Weise miteinander kommunizieren. Die Basis dieses grundwasserführenden Systems wird von den vergleichsweise undurchlässigen Tonsteinen des Oberen Buntsandstein (Röt) gebildet.

Im Unteren Muschelkalk sind besonders die Kalksteine, der Oolith-, Terebratula- und Schaumkalkzone als grundwasserführende Horizonte wirksam, die einen ergiebigen Kluffgrundwasserleiter bilden. Der Mittlere Muschelkalk ist im Bereich der Störungsszone aufgrund der hier anstehenden, z. T. stark ausgelaugten Gipse, Dolomite und Kalksteine als ausgesprochener Karstgrundwasserleiter ausgebildet. Mit der Bohrung E 11 konnten Karsthohlräume von mehr als 1 m Breite nachgewiesen werden. Als grundwasserführender Horizont im Oberen Muschelkalk ist im Thüringer Becken der Trochitenkalk ausgebildet, der auch am Eulenberg als gut durchlässige Zone

auftritt. Der Untere Keuper besteht aus geringdurchlässigen Ton und Schluffsteinen, in die jedoch lokal Sandstein, Kalkstein- und Dolomitbänke mit guter Wasserdurchlässigkeit eingeschaltet sind.

Die Grundwasseroberfläche bildet im Bereich der Altablagerung keine stetig ausgebildete Potentialfläche. Sie zeigt sich morphologisch gegliedert, teilweise gespannt und von Störungs- und Kluffflächen stark modifiziert. Der Grundwasserspiegel kulminiert im Abfallkörper und fällt von da in nordöstliche und in südwestliche Richtung steil ab. Es ist anzunehmen, daß wegen der höheren Durchlässigkeit lockerer Abfallschüttungen im Durchschnitt unter der Altablagerung eine stärkere Grundwasserneubildung stattfindet als in der natürlichen Umgebung. Der Druckausgleich vollzieht sich durch das relativ langsam von einer Stauwasserkalotte im Deponiekörper in das Umland abströmende Grundwasser.

Die Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen untermauern Modellvorstellungen, wonach Grund- und Sickerwässer unter der Altablagerung in die Tiefe und an ihrem Südrand entlang der Südrandstörung des Wachsenburggrabens in Südostrichtung fließen. Große Bedeutung kommt den in Nordost-Südwest-Richtung verlaufenden Querstörungen zu, da sie die Sickerwässer des Abfallkörpers den überregionalen Störungssystemen beschleunigt zuführen. Die höchsten Grundwassergeschwindigkeiten treten im verkarsteten Mittleren Muschelkalk im Einflußbereich der herzynischen Störungszonen auf. Nach der beobachteten Zeitdifferenz zwischen einem Havariefall im Bereich von Bittstädt und dem Eintreffen der Schadstoffe in der "Schönbrunnquelle" kann mit Abstandsgeschwindigkeiten von 200 m/h gerechnet werden.

Jeder Deponie- oder Altlast-Standort befindet sich in einem regionalen Grundwassersystem mit einer Größe von mehreren 10 km<sup>2</sup>, das in der Übersicht erkundet werden muß. Der Standort selbst ist mit einem engmaschigen Netz zu untersuchen. Für die Erkundung des Untergrundes von Altlasten (und neu anzulegenden Deponien) ist hauptsächlich der Tiefenbereich bis 50 m relevant. Für die Beschreibung des regionalen Grundwassersystems müssen vielfach auch Tiefen bis 300 m einbezogen werden.

Bei der Standortuntersuchung hat es sich bewährt, erst die Flächtaufnahmen mit

- geologischer Kartierung,
  - Geofernerkundung,
  - geophysikalischer Vermessung und
  - geochemischen Untersuchungen
- durchzuführen und danach gezielt die punktweise Erkundung anzusetzen durch:
- Schürfe,
  - Sondierungen,
  - Bohrungen (Auf- oder Ausbau des Netzes von Grundwassermeßstellen und nachgeordnete geophysikalische und hydraulische Bohrlochuntersuchungen sowie Bohrkernaufnahme und Laborversuche) sowie
  - geochemische Untersuchung von (teufenorientierten) Proben aus Grundwassermeßstellen.

Zu diesen Erkundungsschritten werden methodische Beispiele gezeigt, aus denen Hinweise zu Aufwand und Nutzen der durchgeführten Untersuchungen entnommen und auf andere Standorte übertragen werden können.

Die Gliederung des in der Endredaktion befindlichen Bandes kann dem Anhang A 4 entnommen werden.

### **2.4.3 Fallbeispiel Rabenstein**

Der Standort Rabenstein westlich von Chemnitz in Sachsen mit der Lokalität Galgenberg im Bereich des Autobahndreiecks Chemnitz-Nord wurde aus der vergleichenden Bewertung von insgesamt zehn Standortmöglichkeiten nach den Kriterien der Nutzwertanalyse für die Errichtung einer Deponie des Abfallwirtschaftsverbandes Chemnitz favorisiert.

Mit methodischen Arbeiten im Rahmen des Forschungsverbundvorhabens sollte gezeigt werden, welchen Beitrag die interdisziplinäre geowissenschaftliche Forschung zur Erkundung eines Standortes für eine Deponieanlage bei einem Untergrund aus metamorphen Gesteinen leisten kann. Es war nicht Ziel dieses Vorhabens, das Untersuchungsgebiet flächendeckend zu erkunden oder eine gutachterliche Bewertung der Eignung des Standortes für eine Deponieanlage vorzunehmen. Im Vordergrund der Arbeiten stand immer der methodische Aspekt. Vollständigkeit konnte auch hinsichtlich der Methodik mit den verfügbaren Mitteln nicht erreicht werden. Die Erfahrungen und Ergebnisse der Untersuchungen werden in dem vorliegenden Ergänzungsband des "Handbuches zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten" dargestellt, um Handlungsempfehlungen für die Arbeiten an vergleichbaren Standorten zu liefern. Die methodischen Beispiele geben Anhaltspunkte zur Leistungsfähigkeit und zu den Grenzen der eingesetzten Verfahren unter den Standortbedingungen.

## **Standortsituation**

Der Standort liegt auf dem äußeren Schiefermantel des Sächsischen Granulitgebirges. Unmittelbar südlich verläuft die Granulitgebirgsrandstörung (Hohensteiner Störung), auf deren herausgehobenem Flügel sich das Untersuchungsgebiet befindet. Diese ENE verlaufende Störung stellt die Grenze zweier regionaler tektonischer Einheiten dar: Granulitgebirge und Erzgebirgisches Becken (Permokarbon).

Das Untersuchungsgebiet wird von einer Folge schwachmetamorpher Gesteine eingenommen, die im wesentlichen der Grünschieferfazies zuzuordnen sind. Im engeren Untersuchungsgebiet steht eine NE-SW bis N-S-streichende und mit 20 - 50° SE bis E einfallende Serie von Phylliten, Glimmer- und Schwarzschiefern mit Einlagerungen von Amphiboliten, Quarziten und Karbonatgesteinen (Kalkphyllite, Marmore) an. Durch Wechsellagerungen sind die Phyllite mit dunkelgrauen Glimmerschiefern und feingebänderten, dunkelgrauen bis schwarzen Schwarzschiefern (Meta-Schwarzschiefern) verbunden, die wegen sandiger Einlagerungen eine linsenartige Textur aufweisen. Sie enthalten lagenweise reichlich Pyrit und Markasit, so daß sie die angrenzenden Gesteine lösen und zersetzen können. Die Schwarzschiefer enthalten Einschaltungen von graugrünen und dunkelgrauen bis schwarzen Amphiboliten, in denen häufig vulkanogene Edukte sichtbar sind. Sie zerfallen plattig und sind im allgemeinen von zahlreichen, mit Calcit und Quarz erfüllten Klüften durchzogen.

Weitere Einlagerungen in diese Phyllit-, Glimmerschiefer- und Schwarzschieferfolge sind die Karbonate, die am Niederrabenstein abgebaut wurden und dort in einem Besucherbergwerk zugänglich sind. Sie sind teils kompakt, teils im mm- bis cm-Bereich von tonigen Bändern durchzogen. Es handelt sich um weißgraue bis schwarzgraue Calcit-Marmore und Kalkphyllite, die meist feinkristallin und dickbankig bis massig ausgebildet sind. Auch flaserige und brekziöse Partien kommen vor. Seit der Oberkreide kam es durch Lösungsvorgänge zur Bildung von Höhlen und Spalten. Bei diesen Lösungen dürfte der FeS<sub>2</sub>-Gehalt der Schwarzschiefer ein maßgeblicher Faktor gewesen sein.

Der liegende Abschnitt dieser Gesteinsserie wird lithostratigraphisch als Äquivalent der Griebbacher Folge, ihr mittlerer und hangender Abschnitt (engerer Standortbereich) als Äquivalent der Phyllite der Breitenbrunner und Herolder Folge des Kambriums der Erzgebirgsrandzone interpretiert. Diese Gesteine liegen am Rabenstein teils in Grünschieferfazies, teils in Amphibolitfazies vor.

Durch eine vulkano-tektonische Absenkung des Beckens im Oberkarbon und unterem Perm, kam es zu einer großflächigen, am Rabenstein nur noch in Senken erhaltenen Rotliegend-Sedimentation. Die in unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebiets anstehenden Gesteine des unteren Rotliegenden werden in den Bereich der Härtensdorfer Schichten gestellt. Den Konglomeraten, Tonen und Letten sind Eruptiva und Pyroklastite eingeschaltet.

Das heutige strukturelle und geomorphologische Bild entstand im Verlauf varistischer (einschl. sudetischer), permischer, saxonischer und känozoischer Schollenbewegungen. Im Zusammenhang mit einer jüngeren Heraushebung des Untersuchungsgebiets - wohl in der Oberkreide und im Alttertiär - kam es zu tiefreichenden Verwitterungserscheinungen, die z. B. in der Bohrung Rabenstein 3 bis in mindestens 60 m Tiefe nachgewiesen wurden. Sie führten zu einer Zersetzung und Verlehmung der Phyllite, Glimmer- und Schwarzschiefer, deren Struktur in den Verwitterungsböden noch gut erkennbar ist. Diese Zersetzungsprodukte sind kalkfrei. Die Verwitterungsbildungen werden durch

jüngeren Lehm, bei dem es sich u. a. um umgelagerten weichselzeitlichen Lößlehm handelt, überlagert. Im Pleistozän kam es zu periglazialen Rutschungen, die in Bohrungen angetroffen wurden.

Die Lineationen lassen für das Untersuchungsgebiet drei vorherrschende tektonische Richtungen erkennen, die NNW-SSE, ein NNE-SSW und E-W gerichtet sind. Im einzelnen lassen sie auf die Existenz mehrerer größerer Störungszonen schließen:

- eine NNE-SSW- und ESE-WNW-streichende Lineation im Bereich der Rinnenstruktur,
- mehrere NNW-SSE-streichende Lineationen im Bereich der Burg Oberrabenstein,
- ENE-WSW-streichende Lineationen südlich der Stallungen des Stadtgutes.

Diese zeichnen sich im Relief als auffällige Geländekanten, als Depressionen oder als Taleinschnitte ab.

Das Kluft- und Störungsmuster, die damit verbundenen Engkluftzonen sowie ein in einzelnen Aufschlüssen beobachteter hoher "Durchtrennungsgrad des Gebirges" läßt Rückschlüsse auf eine Anisotropie der geohydraulischen Leitfähigkeit im Streichen von Großklüften, steilen Engkluftzonen und Störungen bzw. Störungszonen zu. Da diese Elemente zum großen Teil steil einfallen, ist in Abhängigkeit von der Bedeckung - zumindest im Bereich geringmächtiger Verwitterungsbildungen und von Hangschuttdecken - mit einem relativ schnellem Eintritt des Sickerwassers in den tieferen Untergrund zu rechnen.

Unter dem Begriff "Grundgebirge" werden hier summarisch die kambrischen anstehenden low-grade-Metamorphite des südlichen Schiefermantels des Sächsischen Granulitgebirges (Phyllite, Amphibolite, Marmore usw.) verstanden. In dieser Gesteinsfolge treten als hydrogeologisch und ingenieurgeologisch bemerkenswerte Gesteine Metakarbonate auf, aus denen Verkarstungen bekannt sind. Die detaillierte Kenntnis der Lagerungsverhältnisse des Grundgebirges ist deshalb elementare Voraussetzung für die Beurteilung des Deponiestandortes.

## **Erkundungsmethoden, Erkundungsziele und durchgeführten Arbeiten**

### **Geologie und Hydrogeologie**

In den Jahren 1991 bis 1995 wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- geologische Kartierung 1:5 000 als auf Schürfe gestützte Lesestein-Kartierung,
- Zusammenstellung regionalgeologischer Neuerkenntnisse,
- Luftbildinterpretation und geomorphologisch fundierte Störungsanalyse,
- tektonische Aufnahme,
- Bearbeitung bzw. Neuinterpretation älterer und neuer Bohrungen (einschl. Bohrlochgeophysik und hydraulischer Tests),
- Auswertung von Grundwassermeßstellen.

Luftbildinterpretation und geomorphologisch fundierte Störungsanalyse: Ziel der diesbezüglichen Arbeiten war es, das Bruchstörungsmuster unter Berücksichtigung einer Gefügeaufnahme zu ermitteln. Hierfür wurden eine Lineationsanalyse und geomorphologische Analysen durchgeführt. Diese Analysen und Feldbeobachtungen, ermöglichten es Rückschlüsse auf das Störungsmuster zu ziehen. Insgesamt wurden 21 infrarotsensibilisierte Farbluftbilder und 4 panchromatische Schwarzweiß-Luftbilder ausgewertet. Nach Ausarbeitung der Karten wurde versucht, quantitative Aussagen zum Streichen und zur Dichte der als Störungs- bzw. Engkluftzonen interpretierten Lineationen zu treffen. Dies war wegen der geringen Lineationsdichte nur bedingt möglich. Die aus den Lineationskarten abgeleiteten vorherrschenden Streichrichtungen wurden mit den Streichrichtungen der Klüftung in sämtlichen Aufschlüssen verglichen. Die Ergebnisse der Luftbildinterpretation wurden durch eine geomorphologische Analyse der Isoliniendarstellung des Geländereiefs kontrolliert. Damit sollten weitere Aussagen zum Störungsmuster des Untersuchungsgebietes getroffen werden.

Tektonische Aufnahme: Auf der Grundlage der geologischen Kartierung und der Ergebnisse der geophysikalischen Messungen erfolgte eine tektonische Dokumentation der Aufschlüsse, wobei die tektonischen Strukturelemente richtungsstatistisch ausgewertet wurden. Durch die Neubearbeitung von Tiefbohrungen der ehemaligen SDAG Wismut und der 1993 neu abgeteufte Bohrungen wurde

die Grundlage für ein geologisches Untergrundmodell des geplanten Deponiestandortes erstellt. Am geplanten Deponiestandort wurden sechs aufgelassene und stark verwachsene, z.T. wassergefüllte Steinbrüche untersucht. Das Muster der steilstehenden Störungen entspricht dem durch die geomorphologische Analyse und die Luftbildinterpretation ermittelten Störungsmuster.

Bohrungen: Die Lagerungsverhältnisse des Grundgebirges im Gebiet des Galgenberges wurden zu verschiedenen Zeiten durch Bohrungen erkundet. Relevant für die Bewertung des geplanten Deponiestandortes waren neben im Verbundvorhaben "Deponieuntergrund" abgeteuften Bohrungen auch Altbohrungen z. B. der SDAG Wismut. Im November 1992 wurden auf dem Gelände des Teststandortes Rabenstein östlich des Galgenberges auf einer Fläche von 0,7 km<sup>2</sup> 14 Flachbohrungen (Schneckenbohrungen) niedergebracht. Geologisches Ziel der Bohrungen war es, Aufbau und Mächtigkeit der das Grundgebirge bedeckenden Lockermassen (Verwitterungsbildungen) sowie die hydrogeologische Situation zu untersuchen. Weiterhin sollten Erkenntnisse über den Aufbau des unmittelbar unter den Lockermassen anstehenden Grundgebirges und dessen Relief erzielt werden. Speziell ging es hier um die von der Geophysik mit Hilfe geoelektrischer Messungen ermittelte bis 70 m tiefe, etwa N-S-streichende Rinnenstruktur. Außer den Flachbohrungen erfolgten für die Untersuchung der mit Lockermassen erfüllten Rinnenstruktur 9 tiefere Bohrungen. Am Ostrand der geplanten Deponiefläche wurde ein Testfeld eingerichtet. Hier wurden sternförmig um eine 100 m tiefe Bohrung drei je 35 m tiefe Bohrungen mit einem Abstand von sieben Metern von der Zentralbohrung niedergebracht. Das Testfeld lag in einem Bereich mit sehr geringmächtigen Lockermassen.

Hydraulische Tests: Im März 1993 wurden auf den nicht ausgebauten Bohrungen Rabenstein 1 und 2 hydraulische Formationstests (Packertests) durchgeführt.

Rabenstein 1: Zwei Screening-Tests.

Rabenstein 2: Ein Screening Test sowie zwei "reguläre" Doppelpackertests in der unverrohrten Bohrung und danach im zur Grundwassermeßstelle ausgebauten Bohrloch (Tests 2 und 3).

Ziele der Testarbeiten waren :

- (1) Ermittlung der hydraulischen Parameter der getesteten Formationen. Dabei sollten die Screening-Tests in erster Linie den Initialdruck der getesteten Formationen in Abhängigkeit von der Teufenlage bestimmen.
- (2) Prüfung, mittels welcher hydraulischen Testverfahren und Auswertemethoden der Untergrund von Deponien und Altlasten am besten untersucht werden kann.
- (3) Bewertung des Einflusses, den der Ausbau einer Bohrung zur Grundwassermeßstelle auf die Testdurchführung und die Testergebnisse ausübt. Diesem Ziel dienten die "regulären" Doppelpackertests (Tests 2 und 3) auf der Lokation Rabenstein 2.

Bestimmung des Durchlässigkeitsverhaltens der Gesteine und der Schadstoffausbreitung entlang von Trennflächen: Die Untersuchungen erfolgten im Zeitraum von August 1993 bis November 1995 auf einem Testfeld in vier Abschnitten:

- Voruntersuchungen am Teststandort (Bohrkernaufnahme, Fernsehsondierungen im Bohrloch) zur Klärung der geologischen Verhältnisse.
- Pumpversuche, Slug- und Bail-Tests über das gesamte Bohrloch für eine erste Bewertung der Durchlässigkeit des Gesteins.
- Abtrennung mehrerer Intervalle in der Zentralbohrung auf dem Testfeld durch Abpackern. In jedem Intervall Ausführung verschiedener Tests, ohne die Versuchsausrüstung zu ändern. Ziel dieser Untersuchungsreihe war der Vergleich verschiedener Testverfahren unter gleichen Randbedingungen. Außerdem Aussagen über die Vergleichbarkeit sowie über Übereinstimmungen und Abweichungen verschiedener Verfahren. Ermittlung der Reaktionen der einzelnen Testverfahren in den Beobachtungsbohrungen.
- Auffüllversuche mit konstanter Druckhöhe in ausgewählten Intervallen der Zentralbohrung zur Messung der Druckausbreitung in den Beobachtungsbohrungen über die Tiefe hin (Interferenztests). Hierfür Abpackern einzelner Intervalle in den Beobachtungsbohrungen zur Messung der Reaktion in separierten Abschnitten. Danach erneute Auffüllversuche in den Intervallen der Zentralbohrung, Markierung des Wassers mit einem Tracer. In den Beobachtungsbohrungen Erfassung der Eintrittsstellen und -zeiten des Tracers. Erfassung der Schadstoffausbreitung (simuliert durch einen Tracer) durch die zuvor durchgeführten hydraulischen Versuche.

Geophysikalische Bohrlochmessungen: In die ingenieurgeologische Auswertung gehen die für die lithologische Gliederung und für die Einschätzung geomechanischer Eigenschaften, wie Auflockerungsgrad und Klüftigkeit, maßgeblichen folgende Bohrlochmessungen ein:

- Gamma-Ray-Log (GR),
- Dichtelog (GG.D),
- Neutronlog (NN),
- Widerstandslog (EL und Laterolog bzw. FEL),
- Akustiklog (AL),
- BHTV ("Bore Hole Tele Viewer"),
- Flowmetermessung und Fluid-Logging,
- Kaliberlog (CAL), zur Beurteilung des Zustandes des Bohrloches und zur Korrektur anderer Bohrlochmeßverfahren,
- Abweichungsmessungen, zur Korrektur der Teufenlage von Schicht- und Trennflächen.

Die Meßwerte wurden in Teufenschritten von 0,05 m digital aufgenommen. Die optischen und geophysikalischen Bohrlochmessungen im Zusammenhang mit der Kernaufnahme ermöglichten es, die Geologie des Testfeldes unter besonderer Berücksichtigung des Trennflächengefüges eindeutig zu erfassen und zu beschreiben. Die Kombination von Fluid-Logging und Flowmetermessung ermöglichte eine Unterteilung des Bohrprofils in unterschiedliche hydrodynamisch aktive Bereiche.

### **Ermittlung der Sickerwasserrate (Grundwasserneubildung) aus bodenkundlichen Daten**

Für den Teststandort Rabenstein erfolgte die Berechnung der Sickerwasserrate im Bereich und im Umfeld der geplanten Ablagerungsfläche mit dem Regressionsansatzes von RENGER & WESSOLEK. Nach der Bestimmung der effektiven Durchwurzelungen und nutzbaren Feldkapazitäten für homogene Einheiten (Standorttypen) wurden unter Einbeziehung der Werte langfristiger mittlerer Niederschläge für Winter- und Sommerhalbjahr die Sickerwasserraten für den ebenen Standort berechnet. Durch Reliefaktoren wird diese Berechnung über ein Triangulationsmodell an den landwirtschaftlich genutzten Hangstandorten angepaßt. Die Grundwasserneubildungsrate ist erforderlich für die Eichung eines Standortgrundwasserströmungsmodells.

## Geophysik

Im Untersuchungsgebiet durchgeführte geoelektrische, elektromagnetische und magnetische Messungen unterstützen die geologischen Arbeiten zur Klärung des Aufbaus von Grund- und Deckgebirge und zur Erkundung des regionalen und lokalen Grundwassersystems. Da zu erwarten war, daß Teile der im Meßgebiet vorkommenden Phyllite und Hornblendeschiefer magnetisch wirksam sind, konnten Aussagen zum lithologischen Aufbau und zur Tektonik des Grundgebirges aus den Ergebnissen der Magnetikmessungen erwartet werden. Mittels Geoelektrik und Elektromagnetik wurden Aussagen zur Mächtigkeit der Lockerbedeckung und zur Tektonik abgeleitet.

Magnetik: Das durch die eingemessenen Profile sicher vermarkte Gebiet wurde in seinen zugänglichen Teilen in einem 10-m-Gitter mit einem Protonenmagnetometer (Sondenhöhen 0,65 und 2,05 m ) magnetisch vermessen. Bestimmt wurden die Anomalien des magnetischen Totalfeldes und des Vertikalgradienten.

Geoelektrik: Zu Beginn der geoelektrischen Messungen wurden 7 Widerstandssondierungen nach Schlumberger als Kreuzsondierungen durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Sondierungen wurde die Wirkungstiefe für die Widerstandskartierung nach SCHLUMBERGER auf den E-W-Profilen (WK 1) zu  $AB/2 = 50$  m abgeleitet. Darüberhinaus ließen die Ergebnisse der Kreuzsondierungen die Notwendigkeit erkennen, für fundierte Aussagen zur Lockermaterialverbreitung eine zusätzliche Kartierung mit geringerer Wirkungstiefe ( $AB/2 = 10$  m) durchzuführen (WK 3). Außerdem erschien zur möglichst vollständigen Erfassung des tektonischen Inventars eine weitere Widerstandskartierung mit  $AB/2 = 50$  m senkrecht zur ersten Meßrichtung zweckmäßig (WK 2). Insgesamt wurden 71 Widerstandssondierungen nach Schlumberger mit einer maximalen Aufstellungsweite  $AB/2 = 420$  m durchgeführt. Der mittlere Abstand der Sondierungsmittelpunkte betrug ca. 200 m. Die Ergebnisse der drei Widerstandskartierungen sind als Isolinien des scheinbaren spezifischen Widerstandes dargestellt. Darin werden qualitativ die Leitfähigkeitsverhältnisse des Untersuchungsgebietes verdeutlicht. Die Widerstandssondierungen wurden quantitativ ausgewertet.

Elektromagnetik: Die Apparatur EM34-3XL erlaubt die Messung in mehreren Kombinationen von Spulenabstand und -anordnung, so daß Tests notwendig waren, um die geeignete Technologie zu bestimmen. Neben diesen Parametern spielten auch die Optimierung des Meßprozesses und die Vergleichbarkeit mit den Widerstandskartierungen eine Rolle. Die Tests ergaben, daß die besten Resultate im Horizontalmodus bei einem Spulenabstand von 20 m erzielt werden. Die Konfiguration 10 m schied aufgrund ihrer geringen Eindringtiefe aus, und bei 40 m waren die Ergebnisse weniger detailliert und auch weniger stabil als die bei 20 m Spulenabstand. Die Vergleiche mit der bis dahin schon vorliegenden Widerstandskartierung fielen ebenfalls zu Gunsten der gewählten Kombination aus. Die mit der Apparatur EM34-3XL gewonnen Werte entsprechen in ihrer strukturellen Aussage sehr gut den Ergebnissen der geoelektrischen Widerstandskartierung.

Aussagen zur Lithologie, Tektonik und Lockergesteinsbedeckung: Auf der Basis der geoelektrischen Untersuchungen sind zwei Karten konstruiert worden, in denen die geophysikalischen Meßergebnisse in eine geologische Aussage umgesetzt wurden. So ist aus den Widerstandskartierungen und der Elektromagnetik unter Einbeziehung der Ergebnisse der Magnetikmessungen sowie der geologischen Lesesteinkartierung ein lithologisch-tektonisches Schema des Untersuchungsgebietes erstellt worden. Es enthält die nach den geophysikalischen Informationen wahrscheinlichen lithologischen Grenzen und tektonischen Störungen. Die Gesteinsansprache entspricht der geologischen Lesesteinkartierung. Die Klassifizierung der tektonischen Störungen erfolgte nach geophysikalischen Indizien (z. B. Anomalienform und -amplitude).

## **Bodenuntersuchungen auf geogene Grundbelastung mit mobiler Vor-Ort-Analytik**

Im Sommer 1994 wurden am Galgenberg mit mobiler Vor-Ort-Analytik die Schwermetallgehalte im Boden erfaßt, wobei insbesondere die räumliche Konzentrationsverteilung in Abhängigkeit von den verschiedenen Gesteinseinheiten des geologischen Untergrundes von Interesse war. In diesem Zusammenhang wurden am Teststandort Rabenstein 25 Sondierungen bis zu einer Tiefe von 3 m niedergebracht und Rammkerne mittels Röntgenfluoreszenzanalyse auf ihren Gehalt an wichtigen Elementen untersucht. Ziel der Untersuchung war es auch, die Aussagefähigkeit der "mobilen Analytik" zu prüfen, d. h. die Möglichkeit, mit geringem zeitlichen und analytischen Aufwand die geochemische Grundbelastung im Zielgebiet zu ermitteln.

### **Zusammenfassung und Übertragbarkeit der methodischen Ergebnisse**

Zur Erkundung der geologischen Barriere am Teststandort Rabenstein wurden stufenweise verschiedene Erkundungsmethoden eingesetzt. Einen ersten Überblick über die Standortsituation ergab eine geologische Geländeaufnahme (Lesesteinkartierung). Es folgte eine flächenhafte magnetische, geoelektrische und elektromagnetische Kartierung zur lithologischen und strukturellen Differenzierung des Untergrundes im Untersuchungsgebiet. Das Bohrprogramm umfaßte u.a. Kernaufnahmen, hydraulische Tests und geophysikalische Bohrlochmessungen. Das wichtigste Ergebnis für die Bewertung der geologischen Barriere am Standort Rabenstein stellt das Schema der Verbreitung und Mächtigkeit von Lockermaterial nach Widerstandskartierungen und -sondierungen dar. Ein vergleichbares Ergebnis lieferte die elektromagnetische Kartierung. Dieses Modell ist inzwischen durch die Angaben zur Lockergesteinsmächtigkeit in Bohrungen verifiziert worden. Damit wurden die bisherigen Vorstellungen zur Lockergesteinsbedeckung im Gebiet Rabenstein grundlegend revidiert.

Das Untersuchungsgebiet wird östlich des Galgenberges von einer etwa NNO-SSW-streichenden, 1 500 m langen, 400 m breiten und bis zu 70 m tiefen Rinnenstruktur durchzogen. Die Rinnenstruktur ist mit wechselhaften Verwitterungsbildungen erfüllt, in denen es vermutlich mehrere eng begrenzte Grundwasserniveaus gibt, die untereinander nicht in Verbindung stehen müssen. Deshalb kann es auch zur Ausbildung von gespanntem Grundwasser kommen. Der Grundwasserabstrom erfolgt nach N und S entlang einer durch das Profil II gekennzeichneten Wasserscheide. Diese rinnenartigen Struktur endet an einer N-S-streichenden Störungszone, die im N des Untersuchungsgebietes als kurze, aber auffällige Geländekante angedeutet ist. Sie ist auch auf den Luftbildern als Lineation erkennbar. Ob die Anlage der Rinnenstruktur einer Verkarstung der Metakarbonate folgt, kann aufgrund der Bohrergebnisse und Kartierung nicht beurteilt werden.

Die im Testfeld aus der Kernansprache und TV-Sondierung gewonnenen Ergebnisse fügen sich zu einem einheitlichen Bild zusammen. In der in den Bohrungen angetroffenen Folge von Metasedimenten und Metabasiten wurde entsprechend der Hauptfoliation (S1) eine bevorzugte Einfallrichtung von 30 - 60° bei einem Einfallen von 30 - 50° ermittelt. Die aus den Polpunktdiagrammen und den Fallwinkeldiagrammen der Kernaufnahme ermittelte zweite Foliation (S2) fällt bei einer Einfallrichtung von 60 bis 90° mit 40 bis 60° ein. Eine als Ablösungsfläche wirkende dritte Foliation (S3) kann insbesondere aufgrund der Polpunktauswertung der Bohrung Rabenstein 7 mit einer Richtung von 270 bis 300° vermutet werden. Trotz der großen Streuung der Einfallswinkel von 30 bis 80° liegt diese Vermutung nahe, zumal die Foliation - auch der Kernaufnahme folgend - als eine der S1-Foliation entgegengesetzte Fläche nachgewiesen wurde. Aus den Schichtenverzeichnissen und den Klüftprofilen der TV-Sondierung lassen sich Abhängigkeiten zwischen Klüftung und Lithologie ableiten und so Homogenbereiche abgrenzen. Im Gegensatz zu den Phylliten weisen die Schwarzschiefer und Amphibolite eine geringere Zerklüftung auf. Mit Hilfe der Klüftprofile lassen sich die einzelnen Bereiche der Bohrungen hinsichtlich ihrer Wasserwegsamkeit gut korrelieren. Wahrscheinlich stellen die stark geklüfteten Bereiche der Phyllite die bevorzugten Fließwege dar. Diese Fließwege werden durch kaum geklüfteten, fein geschieferten Schwarzschiefer unterbrochen. Aufgrund der Lithologie und der Klüftauswertung ließ sich jedoch keine Verbindung zwischen den Klüften in den ober- und unterhalb der Schwarzschiefer angetroffenen Phylliten konstruieren, auch wenn dies nach der Auswertung der TV-Sondierung zunächst möglich erschien. In den Schwarzschiefern konnten bei der Kernaufnahme kaum Fe- und Mn-Hydroxide und somit



Wasserwegsamkeiten festgestellt werden. So liegt die Vermutung nahe, daß es sich unterhalb der Schwarzschiefer um einen gespannten Kluftwasserleiter handelt, zumal sich nach den Bohrarbeiten ein Grundwasserspiegel einstellte, der deutlich über dem während des Bohrens angetroffenen Grundwasserspiegel steht. Dieser Kluftwasserleiter ist hauptsächlich in den Phylliten und Amphiboliten ausgebildet.

### **Vergleich der Auswertungen hydraulischer Tests vor und nach dem Ausbau einer Bohrung zur Grundwassermeßstelle**

Vor dem Ausbau erhält man eine Permeabilität von etwa  $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ , wobei zwischen den beiden Testintervallen des Screening-Tests und des ersten "regulären" Tests keine deutlichen Unterschiede auftreten. Nach dem Ausbau erhält man eine etwas größere Permeabilität. Dies ist z. T. sicher auf den Einfluß des Filterkieses zurückzuführen, zum anderen ist es sehr wahrscheinlich, daß die Tonsperre nicht vollständig abgedichtet hat, so daß die Intervalllänge nicht richtig abgeschätzt werden konnte. Bei Tests in ausgebauten Bohrungen sollte man in jedem Fall sicherstellen, daß der eingebrachte Ton ausreichend Zeit zum Quellen hat. Sowohl vor als auch nach dem Ausbau zeigt sich eindeutig eine Abnahme der Permeabilität bei späteren Testzeiten. Dies kann durch einen Fluß zwischen Poren und Matrix erklärt werden oder durch eine Abnahme der Durchlässigkeit mit der Entfernung vom Bohrloch.

### **Durchlässigkeitsverhalten der Gesteine und Schadstoffausbreitung entlang von Trennflächen**

Nachdem die Bohrkerngeologie aufgenommen worden waren, begannen die Meßprogramme mit einer Fernsehkamera-Befahrung, bei der die angetroffenen Gefügeelemente eingemessen wurden. Die hydraulischen Versuche auf dem Testfeld begannen mit Pumpversuchen und Slug- und Bail-Tests, die sich über die gesamte Bohrlochstrecke erstreckten. Der Verlauf der Absenkungs- und Wiederanstiegsphase im Pump- und den Beobachtungsbrunnen bildete ein quasihomogenes Bild des Untergrundes nach. Die bei den Pumpversuchen ermittelten Transmissivitäten liegen im Bereich von  $T = 5,1 \cdot 10^{-5}$  bis  $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . In jeder Bohrung wurden je fünf Slug- und Bail-Tests durchgeführt. Die Mittelwerte der Ergebnisse schwanken im Bereich von  $T = 2,1 \cdot 10^{-5}$  bis  $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  und liegen damit im Größenbereich der Pumpversuchsergebnisse.

Die Untersuchungen zeigen, daß Slug- und Bail-Tests gut geeignet sind, die Durchlässigkeit des Untergrundes zu bestimmen. Die Ergebnisse liegen in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Pumpversuche. Nachteilig ist die geringe Reichweite der Tests. Vorteilhaft wirken sich dagegen der sehr geringe Zeitaufwand und das gegenüber kleineren Schwankungen innerhalb der Meßwerte relativ unempfindliche Auswerteverfahren von BOUWER & RICE aus.

In der Zentralbohrung des Testfeldes wurden insgesamt 18 Intervalle mit einer Länge von 2,6 m mit einer Doppelpackeranordnung separiert und diese Bereiche mit Slug- und Bail-Tests, Wasserdrucktests, Pulse-Tests und Drill-Stem-Tests untersucht. Ausgewertet wurden die verschiedenen Verfahren nach unterschiedlichen Auswerteverfahren. Aus der Masse der Testergebnisse wurden gewichtete Mittelwerte gebildet, die die Grundlage bilden die einzelnen Verfahren bewerten zu können.

Bei der Auswertung haben die in ihrer Durchführung einfachen Slug- und Bail-Tests am besten abgeschnitten. Die Versuchsdauer beträgt je nach Durchlässigkeit einige Minuten bis einige Stunden. Bis zu einer Durchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  dauert ein Slug-Test im Schnitt bis zu zwei Stunden, wobei die Testzeit durch längere Testintervalle verkürzt werden kann.

Auch die Wasserdrucktests (WD-Tests) haben sich auf dem Testfeld Rabenstein bewährt. Diese Versuche wurden mit geringen Drücken (max. 1,5 bar) durchgeführt. Die Ergebnisse liegen sehr dicht beieinander, wobei die Reichweite des Tests nur im Bereich von etwa 10 m lag. Vor und nach jedem WD-Test sollen Slug- und Bail-Tests überprüfen, ob durch die Wassereinleitung während des WD-Tests nachhaltige Änderungen im Gebirge entstanden sind. Die Tests vor und danach zeigten, daß die gewählten relativ geringe Drücke (max. 1,5 bar) keine Veränderungen im Gebirge hervorgerufen hatten. Der Versuchsaufwand für die Durchführung eines WD-Tests ist recht groß. Das liegt sicher an den meist sehr groben Ausrüstungen und Meßapparaturen der Bohrunternehmen, die aus dem Talsperrenbau kommen, wo mit Drücken bis zu 50 bar gearbeitet wird. Für die Erkundung einer

geologischen Barriere sollte jedoch immer mit gleicher Sorgfalt wie bei Labor- und Feldversuchen vorgegangen werden.

Der Drill-Stem-Test (DST-Test) kann nach den Erfahrungen auf dem Testfeld Rabenstein nicht empfohlen werden. Bei den nur geringen Druckunterschieden liefert die Schließphase im flachen Bereich nur selten brauchbare Daten. Für den Einsatz in tieferen Bereichen - der Test stammt aus der Erdölindustrie - ist er sicherlich hervorragend geeignet. Die Fließphase des DST-Tests entspricht einem Bail-Test. Die Auswertung der Fließphase liefert ebenso wie beim Bail-Test gute Ergebnisse. Zwar ist der Aufwand für die Durchführung eines DST-Tests nicht aufwendiger als bei anderen Versuchen, jedoch ist ein sogenanntes Shut-in-Ventil erforderlich, das nur als kostspielige Einzelanfertigung zu beziehen ist.

Der Pulse-Test ist das einzige Testverfahren, mit dem Durchlässigkeiten  $< 10^{-7}$  m/s erfaßt werden können. Bei Durchlässigkeiten  $> 10^{-7}$  m/s verläuft der Druckausgleich so schnell, daß die Meßdaten nicht mehr ausgewertet werden können. Der Aufwand für die Durchführung ist recht hoch, da z. B. das bereits oben genannte Shut-in-Ventil erforderlich ist. Der Tests selbst ist jedoch sehr einfach durchzuführen und liefert auch bei der mehrfachen Wiederholung stabile reproduzierbare Ergebnisse. Während der Tests in den Intervallen wurden zwei Bereiche getestet, die sich deutlich im Zu- und Abfluß unterscheiden. Die Ergebnisse der Tests, bei denen Wasser in das Gebirge eingeleitet wird, liegen hier fast eine Zehnerpotenz über den Tests, bei denen das Wasser aus dem Gebirge in das Intervall fließt.

In zwei der in der Zentralbohrung getesteten Intervallen wurden Interferenzttests durchgeführt. Hierbei wird in einer Bohrung in einem bestimmten Bereich ein Druck aufgebracht und die Reaktion auf diesen Druck in ebenfalls separierten Bereichen einer Beobachtungsbohrung gemessen. Es wurden zwei Intervalle mit für das Testfeld mittleren Durchlässigkeiten von  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s und  $k = 5 \cdot 10^{-6}$  m/s ausgewählt. In diese Intervalle wurde Wasser eingeleitet, bis sich im Testintervall ein konstanter Druck von 0,3 bar eingestellt hatte. Die Messungen wurden solange durchgeführt bis sich auch in den jeweiligen Beobachtungsintervallen der benachbarten Bohrungen konstante Reaktionen eingestellt hatten. Auf diese Weise ließ sich ein sehr differenziertes Bild der Wasserausbreitung innerhalb des Testfeldes gewinnen. Auf dem Testfeld in Rabenstein läuft der Wassertransport auf Schichtflächen und deren Schnittflächen ab. Dabei sind in Richtung des Einfallens sowie des Streichens die höchsten und schnellsten Reaktionen zu beobachten. Auf anderen Trennflächen dauert dieser Prozeß sehr viel länger und ist deutlich niedriger. Auch hierbei ist eine Abhängigkeit von der Einfallrichtung zu beobachten.

Parallel zu den Interferenzttests wurden in den einzelnen Beobachtungsintervallen Slug- und Bail-Tests durchgeführt. Die Durchlässigkeitsverteilungen in den benachbarten Bohrungen des Testfeldes stellt sich über die Tiefe deutlich anders dar als in der Zentralbohrung. Während die Durchlässigkeiten im oberen Bereich der Beobachtungsbohrungen niedriger sind, liegen sie im mittleren Bereich um bis zu einer Zehnerpotenz höher. Im unteren Bereich liegen die Durchlässigkeiten zum Teil um zwei Zehnerpotenzen höher als in der Zentralbohrung. Beim Vergleich mit den Ergebnissen der Interferenzttests zeigt sich keine Übereinstimmung. In den Intervallen mit den höchsten Reaktionen kommen nicht die höchsten Durchlässigkeiten vor. Die Slug- und Bail-Tests in den Beobachtungsbohrungen wurden mittels der Verdrängungskörpermethode mit nur sehr kleinen hydraulischen Gradienten durchgeführt. Die Reichweite der Tests ist damit auf die unmittelbare Bohrlochumgebung beschränkt. Da der Wassertransport in erster Linie auf dem Trennflächensystem erfolgt, stellt sich für jede Bohrung eine völlig neue geometrische Situation dar. Die in der Zentralbohrung ermittelten Vorzugsrichtungen gelten auch für die Beobachtungsbohrungen, so daß der Schluß gezogen werden kann, daß die ermittelten Durchlässigkeiten deutlich richtungsabhängig sind. Einerseits hätten sich größenordnungsmäßig etwa gleiche Werte einstellen müssen, doch sind die Unterschiede so groß, daß noch andere Ursachen dafür vorliegen müssen. Einerseits ist das Gebirge relativ wechselhaft und würde größere Unterschiede erklären, andererseits haben in der Zentralbohrung die Bohrarbeiten sehr viel länger gedauert als bei den Beobachtungsbohrungen. Auch wurde bei den Versuchen wiederholt Wasser eingeleitet, so daß Klüfte freigespült und toniges Material resedimentiert wurde.

In den Intervallen der Zentralbohrung, in denen die Interferenzttests erfolgten, wurde mit der selben Versuchsausrüstung im Anschluß jeweils ein Tracer-Test durchgeführt. Die Hauptzufließbereiche der Tracer entsprechen denen, die bei den Interferenzttests ermittelt wurden. Entgegen den Erwartungen wurden in den Intervallen, mit den höchsten Reaktionen bei den Interferenzttests nicht die höchsten

Tracerkonzentrationen gemessen. Diese lagen in Bereichen mittlerer Reaktionen der Interferenztests. Der Schadstofftransport verläuft im wesentlichen auf den Trennflächen, die auch hydraulisch gut reagieren. In die Vorzugsrichtungen, wo die schnellsten und höchsten Reaktionen während der Interferenztests angetroffen wurden, verläuft auch die Schadstoffausbreitung am schnellsten. Höhere Konzentrationen wurden jedoch in Richtungen mittlerer hydraulischer Aktivität beobachtet. Dies ist auf Verdünnungsvorgänge zurückzuführen, da in hydraulisch aktiveren Bereichen mehr Grundwasser hierfür zur Verfügung steht. Räumlich betrachtet eilt der Schadstoff in den hydraulischen Vorzugsrichtungen der Hauptkonzentrationsfront voraus, wobei diese beiden Richtungen nicht zusammenfallen müssen. Über langzeitliches Verhalten können aufgrund der recht kurzen Versuchszeiten von etwa sieben Stunden keine Aussagen getroffen werden.

Wie die Untersuchungen zeigten, können mit hydraulischen Versuchen hydraulische Vorzugsrichtungen von hydraulisch weniger aktiven Bereichen unterschieden werden. Doch kann hierdurch kein sicherer Hinweis auf eine damit verbundene Hauptausbreitung von Schadstoffen gegeben werden. Inwieweit hydraulische Tests und deren Ergebnisse in der Lage sind, Aussagen im Hinblick auf die Schadstoffbewegung im Untergrund treffen zu können, bleibt fraglich. Die vermutlich einzige Sicherheit darüber liefern Tracerversuche unter natürlichen hydraulischen Bedingungen.

### **Methodische Schlußfolgerungen aus der oberflächengeophysikalischen Vermessung**

Für die Erkundung von Deponiestandorten in geologisch ähnlich aufgebauten Gebieten wie Rabenstein / Chemnitz ist der Einsatz der Methodenkombination Magnetik, Geoelektrik und Elektromagnetik vorteilhaft. Das Magnetfeld wurde mit dem Meßpunktabstand von 10 m gut erfaßt. Eine geringere Meßpunktdichte hätte die künstlichen Quellen und die unmittelbar an der Oberfläche anstehenden bzw. ausstreichenden magnetisch wirksamen Gesteine unzureichend abgebildet. Das zweite Meßniveau führt zu erhöhter Sicherheit bei der Beurteilung der Meßwerte in Bezug auf ihre Reproduzierbarkeit. Die endgültige Festlegung der Meßparameter für die Widerstandskartierungen und für die Elektromagnetik nach der Auswertung gezielt angesetzter Kreuzsondierungen ist in so kompliziert gebauten Gebieten unbedingt erforderlich. Auch wenn in diesem Meßgebiet der Beweis nicht überzeugend ausgefallen ist, sollten zur optimalen Erfassung des tektonischen Inventars auch künftig in zwei Meßrichtungen geoelektrische Widerstandskartierungen vorgesehen werden. Für die Ermittlung der Verbreitung von Lockermaterial ist eine Widerstandskartierung mit geringem AB/2 (in diesem Gebiet 10 m) von großem Nutzen. Die Apparatur EM34-3XL ist gut für eine schnelle elektromagnetische Kartierung geeignet und liefert bei entsprechender Auswahl der Meßkonfiguration mit geringerem Aufwand ähnliche Ergebnisse wie die Widerstandskartierung nach Schlumberger, ohne jedoch mehr Informationen als diese bereitzustellen. So ist es nur möglich, Aussagen zu vertikalen Gliederungen zu treffen, wenn man das Meßgebiet mit allen drei zur Verfügung stehenden Spulenabständen übermißt, was jedoch zur Erhöhung des Aufwandes führt. Für die Aussagen zur vertikalen Gliederung sollten geoelektrische Verfahren herangezogen werden, die nach Auswertung der elektromagnetischen Kartierung gezielt eingesetzt werden können. Bei aller Problematik von Widerstandssondierungen im Festgestein sind diese zur Mächtigkeitsbestimmung von Lockermaterial unverzichtbar. Eine weitergehende quantitative Interpretation ist nur beschränkt möglich. Der Meßpunktabstand zwischen den Widerstandssondierungen wird mit ca. 200 m als optimal betrachtet.

Die Gliederung des in der Endredaktion befindlichen Bandes kann dem Anhang A 5 entnommen werden.

## 2.5 Internationale Ausgabe des Methodenhandbuchs

Grundlage für die internationale Ausgabe der Handbuchbände "Geofernerkundung" und "Geophysik" in englischer Sprache ist die deutsche Ausgabe, die um Beiträge aus USA/Kanada erweitert wird.

### **Methods in Environmental Geology, vol. 1: Friedrich Kuehn, Bernhard Hoerig, Trude V.V. King, Douglas C. Peters: Remote Sensing for Site Characterization**

Es ist gelungen, die englischsprachige Fassung dieses Bandes Geofernerkundung mit repräsentativen Beiträgen namhafter Autoren aus den USA und aus Kanada zu ergänzen. Mit diesen Beiträgen werden Anwendungsmöglichkeiten der Fernerkundung im Umweltbereich demonstriert. Der Vergleich der Fallstudien aus Nordamerika und Deutschland soll auch zeigen, wie die jeweiligen territorialen Bedingungen zu unterschiedlichen methodischen Ansätzen führen. Allein die unterschiedliche Besiedlungsdichte und die zum Teil erheblichen Unterschiede bei den Distanzen zwischen Ablagerungsflächen für Abfälle, Siedlungen und Grundwasserschutzgebieten machen ein differenziertes methodisches Vorgehen erforderlich.

Die nachfolgend wiedergegebene Einführung aus dem in der Endredaktion befindlichen Handbuchband gibt einen Überblick über Inhalt und Ziel dieses Bandes. Das Inhaltsverzeichnis und die Liste der Autoren kann dem Anhang A 6 entnommen werden.

This handbook, "Remote Sensing for Site Characterization", is the first in a series of planned publications under the general title "Methods in Environmental Geology". It is based on the German edition (Kuehn & Hoerig 1995), which has been considerably expanded by the addition of sections by U.S. and Canadian specialists. This volume illustrates the use of airborne and satellite-based methods for waste studies and addresses both the theory and technical aspects and gives examples of their application.

In recent years, remote sensing methods have been increasingly recognized as a means of obtaining crucial geoscientific data for both regional and site-specific investigations. Remote sensing data provides a synoptic perspective not achievable by traditional field observations; thus making it effective for fundamental and applied research covering a wide range of geoscientific subjects, including mineral exploration and geo-environmental evaluations.

Remote sensing methods can provide geoscientific data for large areas in a relatively short time. Remote sensing is an excellent site characterization tool because it is not limited by extremes in terrain or hazardous conditions, which may be encountered during an on-site appraisal. The acquisition of remote sensing data should be integrated, where possible, into the early stages of an investigation and used in conjunction with traditional mapping techniques to maximize its utility. Such data is best suited for the following purposes:

- Preliminary assessment or site characterization of an area prior to the application of the often more costly, time consuming, traditional assessment techniques such as field mapping, drilling, or geophysical measurements.
- Clarification of geoscientific problems that can be solved more effectively with the general perspective provided by an aircraft or satellite.
- Geoscientific assessment of regions of limited or no access, such as inaccessible terrain, hazardous sites, and disaster areas.

The data obtained from satellite-based remote sensing systems is best suited for regional studies at scales of 1:500,000 to 1: 100,000, in some cases 1:25,000. These data are commonly used to characterize natural resources that have a wide distribution (e.g., tropical rain forests), to monitor widespread altering of the landscape (e.g., desertification, coastal changes, ice cover of polar waters), as well as detect and monitor environmental problems (e.g., forest fires and oil spills).

Satellite images have also been shown to be an effective tool for characterizing and assessing areas of human activity, such as open pit mines and military training areas. Peters & Hauff (Section 6.6) and also Singhroy (Section 6.5) provide examples of the successful use of satellite data to detect changes in landscape character. However, for detailed site characterization, satellite data often is of limited use because of its relatively low spatial resolution.

For detailed geoenvironmental assessment of small-scale hazardous waste sites, waste dumps, and other anthropogenically altered areas, higher spatial resolution data are needed. For most geoenvironmental problems, mapping scales of 1:10,000 or larger are required to sufficiently characterize sites of limited size. Both high resolution aerial photographs and airborne scanners can provide data at these higher spatial resolutions.

To obtain maximum scientific return and eliminate questions regarding the utility of remote sensing data, the inexperienced user will benefit from working with a remote sensing expert. Without the interaction of a remote sensing expert, the full potential of the data may not be realized. For example, aerial photos and digital satellite and airborne data provide impressive images that can be used for problem solving. However, the data content of the images may not be fully recognized and consequently may be under-utilized because the means of data extraction are not understood or the image itself is believed to be the final data product. Consequently, much of the information available may be overlooked by the inexperienced user. Experience has shown that prior to beginning a remote sensing project, as with most other geoscientific enquiries, it is beneficial to first access the objectives and goals of the study. This analysis will better define the most suitable approach to take to meet the objectives of the study. In some cases, this analysis may determine that remote sensing methods are inappropriate for the investigation.

This handbook is designed to provide examples of the application and limitations of remotely sensed data to investigate waste disposal and mine-related sites. It is not intended to be used as a textbook, but instead to provide insights into the application and limits of remotely sensed data by discussion of case studies. The application and results of the investigations presented here should not be interpreted as being limited to mining and waste disposal problems. They should serve as methodological examples whose results can be extrapolated to address other geoenvironmental concerns.

In Chapter 6, we provide case studies to demonstrate the possible uses of remote sensing data to assess waste disposal and mining sites. Case studies from the United States (Summitville and Cripple Creek, Colorado; Goldfield, Nevada; and Oak Ridge, Tennessee), from Canada (Sudbury and Arnprior, Ontario; and White Lake, Manitoba), and from Germany (Schoeneiche, Brandenburg; and Arnstadt, Thuringia) are discussed.

Comparison of case studies from Germany and North America depict how geographical differences alone can influence the selection and application of site characterization methods. Differences in population density and distances between sites of interest are shown to have a significant impact on the selection of methods used for site characterization.

The authors and editors of this volume believe that the material will provide a basis for decision-makers when considering the application of remote sensing techniques in their own environmental investigations. The consistent and knowledgeable application of remote sensing methods will improve the timeliness, cost-effectiveness, and thoroughness of most environmental site assessments.

## **Methods in Environmental Geology, vol. 2: G. Olhoeft, K. Knoedel, and G. Lange, Noninvasive Geophysics for Site Characterization**

Wegen der Umstrukturierung bei amerikanischen Institutionen in 1996 konnte ein leistungsfähiger Partner für die internationale Ausgabe des Bandes "Geophysik" erst Ende 1996 gewonnen werden. Gewonnen wurde mit Prof. Gary Olhoeft, Colorado School of Mines ein international anerkannter Fachkollege als Mitherausgeber und Autor für mehrere Handbuchkapitel. Wegen der zur Zeit in den USA herrschenden große Nachfrage bei Geowissenschaftlern der Bereiche Erdöl/Erdgas, Bergbau und Umwelt haben bereits gewonnene Koautoren ihre Mitarbeit wieder abgesagt. Dafür wurden inzwischen deutsche und andere amerikanische Autoren gewonnen.

Erfahrungen mit der Übertragung des Bandes "Geofernerkundung" in amerikanisches Englisch machten eine Änderung der Vorgehensweise notwendig. So werden die in die internationale Ausgabe zu übernehmenden Handbuchkapitel des Bandes "Geophysik" nicht übersetzt, sondern von den Autoren gleich in Englisch erstellt. So wird abgesichert, daß Fachbegriffe richtig verwendet werden. Nachfolgend werden die Beiträge durch amerikanische Revisoren überprüft. Der Band ist in Bearbeitung. Die Gliederung des Bandes kann dem Anhang A 7 entnommen werden.

### **3 Anwendung der Ergebnisse des Vorhabens**

Als ein Ergebnis des Verbundvorhabens legt die BGR ein 10-bändiges Methodenhandbuch vor. Damit wird allen, die in Behörden und Firmen oder in der Wissenschaft an den Problemen des Umweltschutzes arbeiten, ein umfassendes Werk über die ökologisch wirksamen und ökonomisch effizienten Methoden zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten zur Verfügung gestellt. Die Resonanz auf das Methodenhandbuch ist gut.

Das Verbundvorhaben und das Methodenhandbuch haben auch im internationalen Raum großes Interesse gefunden. Es gibt weltweit kein vergleichbares Vorhaben. Das Know-how und die deutschen Standards sollen auch den sich schnell entwickelnden Regionen Südostasiens und Entwicklungsländern zugänglich gemacht werden.

So wurden Ergebnisse des Verbundvorhabens "Deponieuntergrund" bei verschiedenen staatlichen Institutionen in Thailand vorgestellt. Die Präsentation der Ergebnisse des Verbundvorhabens "Deponieuntergrund" in einem Vortrag und zahlreichen Gesprächen fand großes Interesse. Das trifft auch auf den Projektvorschlag "Development of recommendations for site investigations of disposal sites and contaminated sites in Thailand on the basis of the results of the German research project 'Deponieuntergrund (waste disposal sites)'" zu. In Thailand besteht Beratungs- und Handlungsbedarf sowohl hinsichtlich der Ablagerung von Haus- und Gewerbeabfall (municipal waste), Industrieabfall (hazardous waste) als auch hinsichtlich der Erkundung der Kontamination des Grundwassers durch Altablagerungen und betriebene Deponien.

In Namibia wurden Einführungskurse in die Ergebnisse des Verbundvorhabens "Deponieuntergrund" und in die Grundsätze der Standorterkundung für Deponien vor Vertretern des Geological Survey of Namibia (GSN), Ministry of Mines and Energy, des Department of Water Affairs (DWA), Ministry of Agriculture, Water and Rural Development und der Geological Society of Namibia abgehalten und ein Test- und Trainingsprogrammes zur Standortcharakterisierung entwickelt.

Die Präsentation der Ergebnisse des Verbundvorhabens ist in den Trainingskursen und in den Gesprächen mit großem Interesse aufgenommen worden. Vorgestellt wurde anhand von zahlreichen Beispielen sowohl die Erkundung von Altlasten als auch die auf den Anforderungen des deutschen Multibarrierenkonzepts aufbauende Erkundung von Standorten für eine Deponieanlage. Dabei wurde immer wieder auf die Bedeutung der interdisziplinären Zusammenarbeit bei der Lösung der komplizierten Aufgaben der Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten sowie der Schadstoffausbreitung und des Schadstoffrückhaltepotentials hingewiesen.

In Namibia besteht grundsätzlich Beratungs- und Handlungsbedarf sowohl hinsichtlich der Ablagerung von Haus- und Gewerbeabfall, von Bohr- und Ölschlamm als auch hinsichtlich der Erkundung der Kontamination des Grundwassers durch Altablagerungen und betriebene Deponien. Im Rahmen des Projektes "Beratung des Geologischen Dienstes von Namibia" bildet die BGR die Mitarbeiter des Geologischen Dienstes von Namibia weiter und trainiert sie u. a. in der Durchführung von geowissenschaftlichen Projekten. In 1998 erfolgt das "Training on the Job" im Rahmen Erkundung und Bewertung von möglichen Deponiestandorten im Raum Lüderitz. Die BGR unterstützt dieses Vorhaben durch Kurzzeitexperten und seinem Wissen aus den Verbundvorhaben "Deponieuntergrund".

#### **4 Dank**

Dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) wird für die Förderung des Vorhabens gedankt. Zu danken ist Herrn Dr. Hübenthal und den Mitarbeitern des Projektträgers des BMBF "Abfallwirtschaft und Altlasten" im Umweltbundesamt (UBA) für die fachliche und administrative Betreuung des Verbundvorhabens und des Methodenhandbuchs. Die Ermutigungen, kritischen Fragen und zahlreichen Hinweise durch die Mitarbeiter des Projektträgers und der Fachreferate im Umweltbundesamt haben das Projekt wesentlich vorangebracht.

Die vorliegenden Handbuchbände sind ein Gemeinschaftswerk von Wissenschaftlern und Technikern in Firmen, Hochschulen, Forschungsinstituten und Behörden. Die Forschung an den Teststandorten, wo instruktive Beispiele für die Handbücher gewonnen sowie die Methoden nach Kosten und Nutzen bewertet wurden, ist nachhaltig von den zuständigen Geologischen Landesämtern, Kreisbehörden und Deponiebetreibern unterstützt worden. Zu danken ist neben den Autoren allen Fachkollegen und Firmen, die durch Beiträge und Fallbeispiele die Bände mitgestaltet haben. Ein

besonderer Dank gilt den Revisoren der Methodenhandbücher für die gründliche Durchsicht der Manuskripte und zahlreiche konstruktive Hinweise zu deren Verbesserung.

Mitarbeiter der BGR haben mit Fleiß, Kreativität und Umsicht Text und Abbildungen der Handbücher in die vorliegende Form gebracht. Für ihre mühevollen Arbeit gebührt ihnen der herzliche Dank der Autoren und des Herausgebers.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
Berlin/Hannover, im Juni 1998

Im Auftrag

(Dr. K. Hinz)  
-Direktor u. Professor-

(Dr. K. Knödel)  
-Wiss. Direktor-

## Anhang Inhaltsverzeichnisse der bisher noch nicht erschienenen Handbuchbände

### A 1 Geochemie

#### 1 Inhalt und Zielsetzung geochemischer Verfahren zur Gefährdungsabschätzung von Deponien

- 1.1 Geochemische Charakterisierung des Belastungspfades Deponie-Sickerwasser-Grundwasser
  - 1.1.1 Einleitung
  - 1.1.2 Emissionen von Deponien
  - 1.1.3 Charakterisierung des Hauptbelastungspfades Sickerwasser-Grundwasser
    - 1.1.3.1 Anorganische Veränderungen der Grundwasserqualität durch Deponiesickerwässer
    - 1.1.3.2 Organische Veränderungen der Grundwasserqualität durch Deponiesickerwässer
- 1.2 Übersicht über umweltrelevante Meßparameter, Anwendungsgebiete, Aussagen, Grenzen
  - 1.2.1 Einleitung
  - 1.2.2 Meßparameter
    - 1.2.2.1 Physikochemische Parameter
    - 1.2.2.2 Anorganische Parameter
    - 1.2.2.3 Organische Parameter
    - 1.2.2.4 Spezialparameter
- 1.3 Untersuchungsstrategie
  - 1.3.1 Erfassung der äußeren Kontaminationsfaktoren
  - 1.3.2 Innere Faktoren des Kontaminationsumfeldes
  - 1.3.3 Untersuchungsumfang  
Literatur

#### 2 Methoden zur Erfassung und Bewertung der Schadstoffemissionen

- 2.1 Bestimmung der geogenen Grundlast
  - 2.1.1 Bestimmung der geogenen Grundlast in Böden
    - 2.1.1.1 Einleitung
    - 2.1.1.2 Bestimmung von geogenen Grundgehalten ausgewählter Schwermetalle und Metalloide in Locker- und Festgesteinsböden
    - 2.1.1.3 Geogene Grundgehalte von Schwermetallen und Metalloiden in Lockergesteinsböden
    - 2.1.1.4 Geogene Grundgehalte von Schwermetallen und Metalloiden in Festgesteinsböden
    - 2.1.1.5 Abschätzung der überregionalen und regionalen geogenen Grundbelastung von Böden mit Schwermetallen und Metalloiden
  - 2.1.2 Bestimmung der geogenen Grundlast im Grundwasser
- 2.2 Ermittlung des Stoffaustrages aus Altlasten als direkter Undichtigkeitsnachweis
  - 2.2.1 Grundwasser
    - 2.2.1.1 Beurteilungsgrundlagen
    - 2.2.1.2 Methodisches Vorgehen
  - 2.2.2 Gasemissionen von Deponien und Altlasten
    - 2.2.2.1 Einleitung
    - 2.2.2.2 Gefährdung durch Deponiegas



- 2.2.2.3 Bewertungsgrundlage
- 2.2.2.4 Vorgehensweise
- 2.2.2.5 Untersuchungsumfang für einen Undichtigkeitsnachweis
- 2.2.2.6 Bewertung

- 2.3 Grundwasserüberwachung  
Literatur

### **3 Methoden der Gewinnung geochemischer Parameter**

- 3.1 Probennahme - Konservierung - Transport
  - 3.1.1 Einfluß des Bohrverfahrens und des Meßstellenausbau auf die Probengewinnung
    - 3.1.1.1 Bohrverfahren
    - 3.1.1.2 Meßstellenausbau
    - 3.1.1.3 Sediment- und Grundwasserprobennahme mittels Drucksondiertechnik
  - 3.1.2 Grundwasserprobennahme
    - 3.1.2.1 Einleitung
    - 3.1.2.2 Probennahmetechnik
    - 3.1.2.3 Technische Regeln und begleitende Meßtechnik bei Pumpproben
    - 3.1.2.4 Pumpvorgang
    - 3.1.2.5 Abfüllen der Probe
    - 3.1.2.6 Besonderheiten
    - 3.1.2.7 Normen, Richtlinien und Literatur
    - 3.1.2.8 Probenbehandlung und -transport
    - 3.1.2.9 Fehlermöglichkeiten
    - 3.1.2.10 Qualitätssicherung und Dokumentation
  - 3.1.3 Boden und Gesteine
    - 3.1.3.1 Einleitung
    - 3.1.3.2 Probennahmestrategie bei Schadstoffuntersuchungen
    - 3.1.3.3 Probenahme
    - 3.1.3.4 Probenvorbehandlung
    - 3.1.3.5 Analytisch-chemische Verfahren zur Untersuchung von Boden
    - 3.1.3.6 Bodenluftuntersuchungen
  - 3.1.4 Anforderungen an die Probenbehandlung und den -transport, soweit diese nicht in Normen und Richtlinien geregelt sind  
Literatur
- 3.2 Methodensammlung analytischer Bestimmungsverfahren  
Literatur
- 3.3 Alternative Vor-Ort-Nachweisverfahren für Schadstoffe bei der Erkundung und Beobachtung von Untergrundbelastungen im Bereich von Deponien und Altstandorten
  - 3.3.1 Einleitung
  - 3.3.2 Elektrische Signalerzeugung als Sensorprinzip
    - 3.3.2.1 Chemische Sensoren, auf Widerstandsänderung beruhend
    - 3.3.2.2 Sensoren mit Strom- bzw. Potentialbildung
    - 3.3.2.3 Chemische Sensoren als frequenzbestimmendes Bauteil in einer Oszillatorschaltung
    - 3.3.2.4 Detektion von Gasionenclustern als Sensorprinzip
  - 3.3.3 Erkennungsverfahren, die auf optischen Wechselwirkungen mit dem Analyten beruhen
    - 3.3.3.1 Photonenabsorption als Detektionsprinzip
    - 3.3.3.2 Photonenemission als Detektionsprinzip

- 3.3.4 Biochemische Schnellmeßtechnik zur Vor-Ort-Erkundung
- 3.3.5 Möglichkeiten der Immunoassay-Anwendung
- 3.3.6 Zusammenfassung und Ausblick  
Literatur
  
- 3.4 Spezifische Verfahren zur Ermittlung migrationsbestimmender Kennwerte
  - 3.4.1 Elutions- und Aufschlußverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Bindungsformbestimmung
    - 3.4.1.1 Einleitung
    - 3.4.1.2 Aufschlußverfahren
    - 3.4.1.3 Elementspeziesanalytik
    - 3.4.1.4 Eluatuntersuchungen
  - 3.4.2 Speziationsmodelle für Schwermetalle in Deponiesickerwässern
    - 3.4.2.1 Siedlungsabfalldeponien
    - 3.4.2.2 MV-Schlackendeponien
  - 3.4.3 Verfahren und Methoden zur Ermittlung von Migrationsparametern
    - 3.4.3.1 Einleitung
    - 3.4.3.2 Batchversuche
    - 3.4.3.3 Reaktorversuche (dynamische Batchversuche)
    - 3.4.3.4 Säulenversuche
  - 3.4.4 Geochemische Modellierung von wässrigen Lösungen
    - 3.4.4.1 Einleitung
    - 3.4.4.2 Geochemische Modelle - ein Überblick
    - 3.4.4.3 Theoretische Grundlagen
    - 3.4.4.4 Anwendungsbeispiele
    - 3.4.4.5 Beschaffung der Programme und Schulung
  - 3.4.5 Untersuchungen zur Veränderung natürlicher Barrieren unter dem Einfluß von Deponiesickerwasser
    - 3.4.5.1 Problematik und Hintergrund der Fragestellung
    - 3.4.5.2 Einfluß des Sickerwassers auf die Durchlässigkeit  
Literatur

## **4 Der Einsatz von Bodengasmessungen bei Deponiestandortuntersuchungen**

- 4.1 Vorkommen und Herkunft von Bodengasen
  - 4.1.1 Einführung
    - 4.1.1.1 Atmosphärische Gase
    - 4.1.1.2 Thermische und radiogene Gase aus dem tieferen Untergrund (geogene Gase)
    - 4.1.1.3 Im Boden bakteriell gebildete Gase
    - 4.1.1.4 Anthropogener Eintrag von flüchtigen Schadstoffen
  - 4.1.2 Physiko-chemische Phasenverteilung der Bodengase
  - 4.1.3 Anwendung der Bodengase
    - 4.1.3.1 Kohlenwasserstoffe
    - 4.1.3.2 Helium und Radon
    - 4.1.3.3 Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
  
- 4.2 Lokalisierung von Gaswegsamkeiten durch Bestimmung thermischer Kohlenwasserstoffe in adsorbierten Gasen
  - 4.2.1 Probennahmestrategie
  - 4.2.2 Analytische Vorgehensweise
  - 4.2.3 Statistische Kenngrößen
  - 4.2.4 Auswertung, Interpretation

- 4.3 Untersuchung von Gaswegsamkeiten mit der Helium-Radon-Methodik
  - 4.3.1 Probennahmestrategie
  - 4.3.2 Probennahme
  - 4.3.3 Analytik
  - 4.3.4 Auswertung, Interpretation
    - 4.3.4.1 Datenaufbereitung, Korrektur der Meßdaten
    - 4.3.4.2 Visualisierung der Meßdaten
    - 4.3.4.3 Interpretation der Meßergebnisse
    - 4.3.4.4 Qualitätsabschätzung und Kontrolle, Absicherung der Ergebnisse
    - 4.3.4.5 Aussagekraft der Ergebnisse: Höhe der Werte, Wiederfindungsrate, Bewertungsmaßstäbe

- 4.4 Bodengasuntersuchungen
  - 4.4.1 Probennahmestrategie
  - 4.4.2 Probennahme
    - 4.4.2.1 Konservierung und Transport
    - 4.4.2.2 Fehlerquellen, Fehlerminimierung
    - 4.4.2.3 Zeitlicher und finanzieller Aufwand
  - 4.4.3 Analytik
    - 4.4.3.1 Probenvorbereitung
    - 4.4.3.2 Meßtechnik
  - 4.4.4 Auswertung, Interpretation, Darstellung und Bewertung  
Literatur

## **5 Interpretationsverfahren**

- 5.1 Chemometrische Auswertung und Interpretation
  - 5.1.1 Problemstellung
  - 5.1.2 Übersicht über wichtige Methoden der Datenanalyse
  - 5.1.3 Ermittlung repräsentativer Probennahmeabstände zur Einschätzung belasteter Böden
    - 5.1.3.1 Mathematische Grundlagen der Autokorrelationsanalyse
    - 5.1.3.2 Anwendungsbeispiel
  - 5.1.4 Multivariat-statistische Methoden zur Interpretation von Schadstoffbelastungen kontaminierter Böden
    - 5.1.4.1 Allgemeine Grundlagen von Verfahren der multivariaten Datenanalyse
    - 5.1.4.2 Anwendungsbeispiel
  - 5.1.5 Geostatistische Methoden zur Belastungscharakterisierung kontaminierter Gebiete
    - 5.1.5.1 Theorie der geostatistischen Methoden
    - 5.1.5.2 Anwendungsbeispiel
  - 5.1.6 Homogenitätsprüfung als Alternative zur Modellierung der Schadstoffverteilung
    - 5.1.6.1 Statistische Verfahren zur Homogenitätsprüfung
    - 5.1.6.2 Anwendungsbeispiel
  - 5.1.7 Vergleichende Wertung und Schlußfolgerungen
- 5.2 Ausbreitungsprognosen von Schadstoffen mittels Simulationsmodellen
  - 5.2.1 Problemstellung
  - 5.2.2 Modellbildung
  - 5.2.3 Übersicht über wichtige Simulationsverfahren

- 5.2.4 Ausbreitungsprognosen im Lockergestein
  - 5.2.5 Ausbreitungsprognosen im Festgestein
  - 5.2.6 Ausbreitungsprognosen in der ungesättigten Bodenzone
  - 5.2.7 Anwendungsgrenzen und Entwicklungstendenzen
- Literatur

Sachverzeichnis

## **A 2 Handlungsempfehlungen für die Erkundung der geologischen Barriere bei Deponien und Altlasten**

### **1 Einleitung**

### **2 Anwendungsgebiete**

- 2.1 Deponieanlage
  - Standortsuche (Verfahren, Untergrunderkundungen)
  - Richtlinien
- 2.2 Betriebene Deponien
  - Überwachung, nachträgliche Maßnahmen, Nachsorge
  - Richtlinien
- 2.3 Altlasten
  - Untersuchungsablauf (Verfahren, Untergrunderkundungen)
  - Richtlinien

### **3 Geowissenschaftliche Standortkriterien**

- 3.1 Das Multibarrierenkonzept
- 3.2 Merkmale der geologischen Barriere
  - Durchlässigkeit
  - Mächtigkeit
  - Schadstoffrückhaltepotential
  - Verbreitung
  - Homogenität
  - Lage zum Grundwasser
  - AusschlußkriterienTragfähigkeit
- 3.3 Vorkommen von Barrieregesteinen

### **4 Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes**

- 4.1 Generelle Untersuchungsstrategien
  - 4.1.1 Nutzung der Methodenhandbücher bei den Erkundungsarbeiten
  - 4.1.2 Fragenkatalog zur Vorbereitung der Erkundungsarbeiten
  - 4.1.3 Stufenweises Vorgehen bei der Erkundung
  - 4.1.4 Zuverlässigkeit der Aussagen (Sicherheitskonzept)
- 4.2 Aufbau des Untergrundes
  - 4.2.1 Orientierend Untersuchungen
  - 4.2.2 Detaillierte Untersuchungen
- 4.3 Tragfähigkeit
  - Verdichtungsgrad
  - Setzungen
  - Grundbruch, Böschungsbruch
  - Rutschungen
  - Wechselwirkungen

- 4.4 Grundwasserverhältnisse und Grundwasserströmung
- Art, Ausdehnung, Mächtigkeit grundwasserführender und geringdurchlässiger Erdkörper
  - Durchlässigkeiten der ungesättigten Zone
  - Durchlässigkeiten und Transmissivitäten der gesättigten Zone
  - effektive Porositäten, Sättigungsgrad, Speicherkoeffizient
  - Spiegel frei/gespannt/artesisch/zusammenhängend
  - Grundwasserstände, Grundwasserschwankungen
  - Beziehungen zu offenen Gewässern
  - Fließrichtungen, Fließgeschwindigkeiten
  - Grundwasserneubildung, Grundwasserabfluß, Wasserbilanzen

- 4.5 Stoffbestand
- Porenwasser/Sickerwasser/Grundwasser  
Inhaltsstoffe, chemische Beschaffenheit/Milieubedingungen
  - Bodenluft  
Zusammensetzung, Herkunft der Gase, Gaspermeabilitäten des Untergrundes
  - Boden  
geogene Grundlast
  - anthropogene Belastung  
Verteilung Boden, Wasser, Luft  
Schadstoffeintrag, -austrag, Ausbreitung, Mobilität,  
Kontaminationspfade  
Überwachung

- 4.6 Schadstoffrückhaltevermögen
- Für Prozesse der Schadstoffausbreitung/-rückhaltung entscheidende Faktoren  
Eigenschaften der Feststoffe  
Eigenschaften der Schadstoffe  
Reaktions-(Stabilitäts)bedingungen
  - Für die Schadstoffausbreitung/-rückhaltung entscheidende Prozesse  
Sorption  
Dispersion, Diffusion  
Biochemischer Abbau
  - Bewertung des Schadstoffrückhaltepotentials
  - Berücksichtigung des Schadstoffrückhaltepotentials bei Planung und Durchführung von Maßnahmen

- 5 Prognose des Standortverhaltens**
- Entwurf eines Untergrundmodells
  - Festlegung charakteristischer Werte
  - Ausbreitungsbetrachtungen und Ausbreitungsberechnungen
  - Offene Fragen und Empfehlungen für ergänzende Untersuchungen
  - Überwachungsmaßnahmen

## **6 Hinweise zur Vergabe und Durchführung von Untersuchungsaufträgen**

- 6.1 Vertragsgestaltung
  - Grundlagen der Vertragsgestaltung
  - Leistungsbeschreibungen
  - Hinweise zur Kostenkalkulation
- 6.2 Arbeitsschutz

## **A 3 Fallbeispiel Schöneiche - Mittenwalde**

- 1 **Aufgabe, Lösungsweg und Übertragbarkeit der Ergebnisse**
  
- 2 **Geologisches Modell**
  - 2.1 Lage, Morphologie und geologische Einordnung des Untersuchungsgebietes
  - 2.2 Methodik
    - 2.2.1 Umfang und Ablauf der Untersuchungsarbeiten
    - 2.2.2 Benutzte Unterlagen
    - 2.2.3 Anmerkungen zur Nutzung geophysikalischer Ergebnisse für die Erarbeitung geologischer Modellvorstellungen
    - 2.2.4 Kartierung
  - 2.3 Ergebnisse
    - 2.3.1 Stratigraphisch - genetische Gliederung der quartären Schichtenfolge
    - 2.3.2 Geologischer Aufbau des Deponieuntergrundes Schöneiche/Schöneicher Plan
    - 2.3.3 Quartärgeologisches Modell von Schöneiche - Mittenwalde
  
- 3 **Geoferkundung**
  - 3.1 Auswertung von Luftbildern und Scannerdaten
    - 3.1.1 Untersuchung des Deponiekörpers
    - 3.1.2 Untersuchung des Deponieuntergrundes
    - 3.1.3 Untersuchung des Deponieumfeldes
      - 3.1.3.1 Eigenschaften der Geländeoberfläche
      - 3.1.3.2 Vitalitätskartierung an Einzelbäumen
  - 3.2 Zusammenfassende Bewertung
  
- 4 **Geophysikalische Erkundung**
  - 4.1 **Aerogeophysik**
    - 4.1.1 Methodik
    - 4.1.2 Ergebnisse
  - 4.2 **Geoelektrik**
    - 4.2.1 Gleichstromgeoelektrik und Induzierte Polarisierung
      - 4.2.1.1 Methodik
      - 4.2.1.2 Ergebnisse
    - 4.2.2 Kombiniertes Einsatz von geoelektrischer Tiefensektion und tiefenorientierter Wasserprobennahme
    - 4.2.3 Sondierungskartierung auf einem Testprofil bei Gallun
  - 4.3 **Geoelektrische Messung der Grundwasserbewegung**
  - 4.4 **Seismik**
    - 4.4.1 Seismische Untersuchungen im Bereich der Deponie Schöneicher Plan
      - 4.4.1.1 Methodik
      - 4.4.1.2 Ergebnisse
    - 4.4.2 Reprozessing von Meßergebnissen aus der seismischen Prospektion auf Erdöl und Erdgas
      - 4.4.2.1 Methodik
      - 4.4.2.2 Ergebnisse
  - 4.5 **Geophysikalische Penetrationssondierungen**
  - 4.6 **Bohrlochmessungen**



- 4.7 **Milieusondenmessungen**
- 5 **Geochemische Untersuchungen**
  - 5.1 **Standortsituation und Untersuchungsstrategie**
  - 5.2 **Untersuchungsmethodik und Datenerhebung**
    - 5.2.1 Probenahme
    - 5.2.2 Geochemische Multielementanalyse
    - 5.2.3 EDV-Bearbeitung geochemischer Daten
      - 5.2.3.1 Dateiaufbau
      - 5.2.3.2 Mathematisch-statistische Bearbeitung
      - 5.2.3.3 Rechnergestützte Herstellung flächendeckender geochemischer Karten
  - 5.3 **Ergebnisse**
    - 5.3.1 Bachsedimente- und Hydrogeochemie
      - 5.3.1.1 Hydrogeochemie der Oberflächenwässer
        - 5.3.1.1.1 Physikalisch-chemische Parameter
        - 5.3.1.1.2 Hauptinhaltsstoffe
        - 5.3.1.1.3 Neben- und Spurenelemente
        - 5.3.1.1.4 Organische Parameter und Schadstoffe
        - 5.3.1.1.5 Chemischer Sauerstoffbedarf
        - 5.3.1.1.6 Biochemischer Sauerstoffbedarf
      - 5.3.1.2 Bachsedimentgeochemie
        - 5.3.1.2.1 Verteilung der Hauptkomponenten
        - 5.3.1.2.2 Verteilung der Spurenelemente
        - 5.3.1.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse
    - 5.3.2 Bodengeochemie
      - 5.3.2.1 Hauptkomponenten, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und organischer Kohlenstoff
      - 5.3.2.2 Anorganische Spurenelemente und Spurenmetalle
      - 5.3.2.3 Organische Schadstoffe
    - 5.3.3 Komplexe Multielementanalyse der geochemischen Bodendaten
      - 5.3.3.1 Faktoranalyse
      - 5.3.3.2 Clusteranalyse (Q-Modus)
    - 5.3.4 Umweltgeochemische Bewertung
      - 5.3.4.1 Vergleich der umweltgeochemischen Ergebnisse mit Gefahren- und Richtwerten
      - 5.3.4.2 Geochemischer Belastungsgrad des Oberbodens
      - 5.3.4.3 Untersuchungen zur Schwermetallbindung und -mobilisierung im Oberboden
      - 5.3.4.4 Geochemische Abgrenzung von technogen belasteten Gebieten
  - 5.4 **Zusammenfassung**
- 6 **Bodenkundliche Arbeiten und Grundwasserneubildung**
  - 6.1 **Ziele und Ablauf der Arbeiten**
  - 6.2 **Übersicht über das Untersuchungsgebiet**
  - 6.3 **Methodische Ansätze zur Realisierung der bodenkundlichen Untersuchungen**
  - 6.4 **Ergebnisse**
- 7 **Hydrogeologische Untersuchungen und hydraulische Modellierung**
  - 7.1 **Datenbasis für die Grundwassermodellierung**
    - 7.1.1 Geologie
    - 7.1.2 Hydraulische, klimatische und hydrologische Verhältnisse

- 7.1.3 Modellparameter
- 7.2 **Grundwassermodellierung**
- 7.2.1 Kurzbeschreibung des verwendeten Programms
- 7.2.2 Modellaufbau
- 7.2.3 Modelleichung und Modellierung des Ist-Zustandes

## **A 4 Fallbeispiel Eulenberg**

### **1 Aufgabe, Lösungsweg und Übertragbarkeit der Ergebnisse**

### **2 Geologie**

#### 2.1 Standortbeschreibung

#### 2.2 Methodik und Ablauf der Untersuchungsarbeiten

##### 2.2.1 Benutzte Unterlagen

##### 2.2.2 Kartierungs- und Bohrarbeiten

#### 2.3 Ergebnisse der Untersuchungsarbeiten

##### 2.3.1 Stratigraphie

##### 2.3.2 Tektonik

##### 2.3.3 hydrogeologisches Modell

### **3 Geofernerkundung**

#### 3.1 Methodik

#### 3.2 Ergebnisse

### **4 Geophysik**

#### **4.1 Magnetik**

##### 4.1.1 Methodik

##### 4.1.2 Ergebnisse

#### **4.2 Gravimetrie**

##### 4.2.1 Methodik

##### 4.2.2 Ergebnisse

#### **4.3 Gleichstromgeoelektrik**

##### 4.3.1 Methodik

##### 4.3.2 Ergebnisse der Kartierung und Sondierung einschließlich Mise a la Masse

#### **4.4 Elektromagnetik**

##### 4.4.1 Methodik

##### 4.4.2 Ergebnisse MaxMin

##### 4.4.3 Ergebnisse Maxiprobe

##### 4.4.4 Ergebnisse CSAMT

#### **4.5 Seismik**

##### 4.5.1 Refraktionsseismik

###### 4.5.1.1 Grundlagen

###### 4.5.1.2 Feldmessungen

###### 4.5.1.3 Auswertung und Interpretation

##### 4.5.2 Refraktionstomographie

###### 4.5.2.1 Grundlagen

###### 4.5.2.2 Feldmessungen

###### 4.5.2.3 Auswertung und Interpretation

##### 4.5.3 2-D Reflexionsseismik

###### 4.5.3.1 Grundlagen

###### 4.5.3.2 Feldmessungen

###### 4.5.3.3 Auswertung und Interpretation

- 4.5.5 Vergleich des seismischen Modells mit den Bohrergebnissen und den anderen geophysikalischen Verfahren
- 4.5.6 Vergleichende Bewertung der seismischen Verfahren
- 4.5.7 Empfehlung für die Vorgehensweise bei der seismischen Erkundung von Deponien und Altlasten.

#### **4.6 Geophysikalische Penetrations Sondierungen**

- 4.6.1 Methodik
- 4.6.2 Ergebnisse

#### **5 Milieusondenmessungen und geochemische Untersuchungen an Wässern**

- 5.1 Methodik
- 5.2 Ergebnisse

## **A 5 Fallbeispiel Rabenstein**

- 1 **Aufgabe, Lösungsweg und Übertragbarkeit der Ergebnisse**
- 2 **Geologischen Verhältnisse im Bereich des Teststandortes Rabenstein**
- 3 **Luftbildinterpretation und geomorphologisch fundierte Störungsanalyse**
  - 3.1 Aufgabenstellung
  - 3.2 Grundlagen der Luftbildinterpretation
  - 3.3 Methodik der Interpretation
  - 3.4 Fotolineationen aus infrarot-sensibilisierten Farbluftbildern im Maßstab 1:5000
  - 3.5 Fotolineationen aus panchromatischen Schwarzweiß-Luftbildern im Maßstab 1:5000
  - 3.6 Karte der Fotolineationen im Maßstab 1: 12500
  - 3.7 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse
  - 3.8 Zusammenfassung und Interpretation
  - 3.9 Geomorphologische Analyse
4. **Tektonische Aufnahme**
  - 4.1 Das Strukturinventar
  - 4.2 Dokumentation der Aufschlüsse am Galgenberg
  - 4.3 Zusammenfassung der tektonischen Analysen in den Tagesaufschlüssen
  - 4.4 Das Schaubergwerk "Rabensteiner Felsendome" - Bergbaugeschichte und tektonisches Strukturbild
  - 4.5 Zusammenfassung und Interpretation
- 5 **Bohrungen und Bohrlochmessungen**
  - 5.1 Die Lagerungsverhältnisse des Grundgebirges im Gebiet des Galgenberges
  - 5.2 Bohrungen der SDAG WISMUT im Grundgebirge
  - 5.3 Flachbohrungen 1 - 14 (Spiralbohrungen) und Kernbohrungen 1 - 11 der Geophysik GmbH, Leipzig)
  - 5.4 Bohrungen Rabenstein 1 - 8 des Verbundvorhabens "Deponieuntergrund"
- 6 **Bodenuntersuchungen auf geogene Grundbelastung mit mobiler Vor-Ort-Analytik**
  - 6.1 Zielsetzung
  - 6.2 Technische Durchführung der Untersuchungen
  - 6.3 Ergebnisse
- 7 **Ermittlung der Sickerwasserrate (Grundwasserneubildung) aus bodenkundlichen Daten**
  - 7.1 Methodik
  - 7.2 Ergebnisse
8. **Geophysik**
  - 8.1 Vorbereitung der geophysikalischen Feldarbeiten
  - 8.2 Magnetik
  - 8.3 Geoelektrik

- 8.4 Elektromagnetik
- 8.5 Geologische Interpretation
- 8.6 Methodische Schlußfolgerungen

## **A 6 Remote Sensing for Site Charakterization**

**Methods in Environmental Geology, vol. 1: Friedrich Kuehn, Bernhard Hoerig, Trude V.V. King, Douglas C. Peters: Remote Sensing for Site Charakterization**

### **Table of Content**

- 1 Introduction**
- 2 Remote Sensing: An Overview of Physical Fundamentals**
- 3 Obtaining Remote Sensing Data**
  - 3.1 Satellite-Based Methods
  - 3.2 Aircraft-Based Methods
    - 3.2.1 Aerial Photos
    - 3.2.2 Nonphotographic Imaging Sensors
      - 3.2.2.1 Introduction
      - 3.2.2.2 Optical-Mechanical Line Scanners
      - 3.2.2.3 Optical-Electronic Scanners
      - 3.2.2.4 Imaging Spectrometers
      - 3.2.2.5 Radar-Based Methods
- 4 The Use of Remote Sensing in waste Disposal Site Investigations**
  - 4.1 Investigative Objectives and Interpretative Criteria
  - 4.2 Sample Cases
    - 4.2.1 Exploring the Body of a Waste Disposal Site
    - 4.2.2 Exploring the Immediate Vicinity of a Waste Disposal Site
    - 4.2.3 Exploration of a Waste Disposal Site Subsurface
    - 4.2.4 The Search for Waste Disposal Sites
- 5 Field Checking**
- 6 Case Studies**
  - 6.1 Introduction
  - 6.2 Historical Aerial Photography Used to Evaluate the Subsurface of a Waste Disposal Site (Arnstadt/Germany)
    - 6.2.1 Introduction and Problem Description
    - 6.2.2 Geophysical Investigations
    - 6.2.3 Aerial Photo Interpretation
    - 6.2.4 Summary

- 6.3 Airborne Remote Sensing to Characterize Waste Disposal Sites (Schoeneiche/Germany)
  - 6.3.1 Introduction and Problem Description
  - 6.3.2 Case Studies on the Interpretation of Aerial Images and Scanner Data
    - 6.3.2.1 Examining the Body of a Waste Disposal Site
    - 6.3.2.2 Examining the Subsurface of a Waste Disposal Site
    - 6.3.2.3 Examining the Immediate Vicinity of a Waste Disposal Site
      - 6.3.2.3.1 Characteristics of the Terrain Surface
      - 6.3.2.3.2 Mapping the vitality of trees
  - 6.3.3 Assessment Summary
- 6.4 Thermal Remote Sensing to Detect Buried Waste Material (Oak Ridge/USA)
  - 6.4.1 Introduction
  - 6.4.2 Background
  - 6.4.3 Imagery Analysis
  - 6.4.4 Ground Data
  - 6.4.5 Conclusions
- 6.5 Satellite and Airborne Remote Sensing to Characterize Mining Areas (Selected Sites/Canada)
  - 6.5.1 Introduction
  - 6.5.2 Sudbury Case Study
    - 6.5.2.1 Geological Setting
    - 6.5.2.2 Regional Environmental Restoration
    - 6.7.2.3 Site Characterization and Rehabilitation of Mine Tailings
  - 6.5.3 Acid Waste Rock Drainage
  - 6.5.4 Summarizing Conclusions
- 6.6 Multispectral Remote Sensing to Characterize Mine Waste (Cripple Creek and Goldfield/USA)
  - 6.6.1 Introduction
  - 6.6.2 Investigational Methodology
  - 6.6.3 Case Studies
    - 6.6.3.1 Cripple Creek Mining District
      - 6.6.3.1.1 Background
      - 6.6.3.1.2 Site Investigations
      - 6.6.3.1.3 Results
      - 6.6.3.1.4 Fracturing and Water Movement
    - 6.6.3.2 Goldfield Mining District
      - 6.6.3.2.1 Introduction
      - 6.6.3.2.2 Geologic Background
      - 6.6.3.2.3 Hydrothermal Alteration
      - 6.6.3.2.4 Satellite, Field, and Airborne Spectroscopy Techniques
      - 6.6.3.2.5 Mine Waste Evaluation and Discussion
      - 6.6.3.2.6 Miscellaneous Other Sites
  - 6.6.4 Prioritizing Waste Site Investigations Based on Remote Sensing
    - 6.6.4.1 Data Source
    - 6.6.4.2 Mineralogy Versus Priority



- 6.6.4.3 Application of GIS Technology
- 6.6.4.4 Site Prioritization
- 6.6.5 Summary
  
- 6.7 Imaging Spectroscopy to Characterize Mining Areas  
(Summitville/USA)
  
- 6.7.1 Introduction
- 6.7.2 Imaging Spectrometer Data
- 6.7.3 Data Analysis
- 6.7.4 Verification of Imaging Spectrometer Data and Results
- 6.7.5 Mapping Minerals
- 6.7.6 Mapping Vegetation
- 6.7.7 Senescence/Stress Mapping
- 6.7.8 Conclusions
- 6.7.9 Additional Considerations

## **Epilog**

### **Acknowledgments**

### **Sources of Maps Photos, and Images**

### **Glossary and Frequently Used Abbreviations**

### **Literature**

### **Subject Index**

## List of Contributors

Clark, Roger N.  
U.S. Geological Survey (USGS)  
Denver Federal Center  
PO Box 25046, MS 964  
Denver CO 80225-0046, USA

Evers, Thomas K.  
Oak Ridge National Laboratory  
PO Box 2008  
Oak Ridge, TN 37831-6274, USA

Hauff, Phoebe L.  
Spectral International Inc.  
PO Box 1027  
Arvada, CO 80001, USA

Hoerig, Bernhard  
Federal Institute for Geosciences and Natural Resources  
Bundesanstalt fuer Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
Aussenstelle Berlin  
Wilhelmstrasse 25–30  
13593 Berlin, Germany

Huff, Dale  
Oak Ridge National Laboratory  
PO Box 2008  
Oak Ridge, TN 37831-6274, USA

Irvine, John M.  
Environmental Research Institute  
of Michigan (ERIM)  
1101 Wilson Blvd, Suite 1100  
Arlington, VA 22209-2248, USA

King, Amy L.  
Oak Ridge National Laboratory  
PO Box 2008  
Oak Ridge, TN 37831-6274, USA

King, Trude V. V.  
U.S. Geological Survey (USGS)  
Denver Federal Center  
PO Box 25046, MS 964  
Denver CO 80225-0046, USA

Kuehn, Friedrich  
Federal Institute for Geosciences and Natural Resources  
Bundesanstalt fuer Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
Außenstelle Berlin  
Wilhelmstrasse 25–30  
13593 Berlin, Germany

Odenweller, Julie  
Environmental Research Institute of Michigan (ERIM)  
PO Box 134001  
Ann Arbor, MI 48113-4001, USA

Peters, Douglas C.  
Peters Geosciences  
169 Quaker St.  
Golden, CO 80401-5543, USA

Schmidt, Dietmar  
uwe GmbH  
Kantstrasse 33  
10625 Berlin, Germany

Singhroy, Vernon  
Canada Centre for Remote Sensing (CCRS)  
588 Booth Street, Room 207  
Ottawa, Ontario  
Canada K1A 0E4

Smyre, John L.  
Oak Ridge National Laboratory  
PO Box 2008  
Oak Ridge, TN 37831-6274, USA

Stahl, Gary  
Environmental Research Institute of Michigan (ERIM)  
PO Box 134001  
Ann Arbor, MI 48113-4001, USA

Swayze, Gregg A.  
U.S. Geological Survey (USGS)  
Denver Federal Center  
PO Box 25046, MS 964  
Denver CO 80225-0046, USA

## A 7 Noninvasive Geophysics for Site Characterization

Methods in Environmental Geology, vol. 2: G. Olhoeft, K. Knoedel, and  
Lange, Noninvasive Geophysics for Site Characterization

G.

### Table of Content

<b>1</b>	<b>Introduction</b>
<b>2</b>	<b>Common Problems (logistics, location, data density, etc.)</b>
<b>3</b>	<b>Magnetics</b>
<b>4</b>	<b>Electromagnetics</b>
<b>5</b>	<b>Ground Penetrating Radar (GPR)</b>
<b>6</b>	<b>Self-Potential (SP) / DC Resistivity</b>
<b>7</b>	<b>Induced Polarization (IP) / Complex Resistivity (CR)</b>
<b>8</b>	<b>Seismic</b>
<b>9</b>	<b>Radiometric</b>
<b>10</b>	<b>Soil Gas</b>
<b>11</b>	<b>Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR)</b>
<b>12</b>	<b>Surface/Borehole/Hole-to-Hole/Airborne/Satellite</b>
<b>13</b>	<b>Data Fusion/Integration</b>
<b>14</b>	<b>Petrophysics</b>
<b>15</b>	<b>Case Histories</b>
<b>15.1</b>	<b>Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL)</b>
<b>15.2</b>	<b>Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPL)</b>
<b>15.3</b>	<b>Unexploded Ordnances (UXO)</b>
<b>15.4</b>	<b>Landfill</b>
<b>15.5</b>	<b>Cavities</b>
<b>15.6</b>	<b>Sewer</b>
<b>15.7</b>	<b>Saltwater Intrusion</b>
<b>15.8</b>	<b>Agrochemical Nonpoint Sources</b>
<b>15.9</b>	<b>Swelling Clays</b>
<b>15.10</b>	<b>Landslides</b>
<b>15.11</b>	<b>Hydrogeology</b>

Each method chapter has the following subchapters:

- .1 Principle of the Method (review)
- .2 Applications and Limitations (assumptions, noise & interference)
- .3 Fundamentals (details)
- .4 Instruments (parameters/specs, state of the practice vs state of the art)

- .5 Survey Practice (data acquisition logistics, constraints, etc.)
- .6 Processing, Interpretation, Assumptions, and Modeling
- .7 Quality Assurance, Error Analysis and Confidence Estimation
- .8 Estimation of Effects to be Expected
- .9 Personnel, Equipment, Cost, Temporal and Regulatory Requirements
- .10 Examples

## Berichtsblatt

1. Berichtsnummer <b>BMBF FB</b>	2. Berichtsart <b>Schlußbericht</b>	3.
4. Titel des Berichts <b>Forschungsverbundvorhaben "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponiert und Altlasten" kurz "Deponieuntergrund" - Umsetzung der erzielten Ergebnisse in Handlungsempfehlungen - Schlußbericht Bewilligungszeitraum 1995 bis 1997</b>		
5. Autor(en) (Name, Vorname(n)) <b>K. KNÖDEL, H. WILKEN, G. LANGE, C. WIESSNER, F. KÜHN, T. WIPPERMANN</b>		6. Abschlußdatum des Vorhabens <b>31.12.1997</b>
		7. Veröffentlichungsdatum <b>15.06.1998</b>
8. Durchführende Institution <b>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe</b>  <b>Stilleweg 2</b>  <b>D-30655 Hannover</b>		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderungskennzeichen <b>1460605 B</b>
		11. Seitenzahl
		12. Literaturangaben
13. Fördernde Institution <b>Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)</b> <b>Postfach 20 07 06</b> <b>53137 Bonn</b>		14. Tabellen
		15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) <b>PT Abfallwirtschaft und Altlasten im Umweltbundesamt Berlin</b> <b>Fachgebiet III 3.6</b>		
18. Kurzfassung <b>Der Untergrund wird als letzte und wichtigste Barriere (geologische Barriere) zur Behinderung und Minderung des Austrags von Schadstoffen aus Deponien/Altlasten angesehen. Für die Neuanlage von Deponien sowie die Bewertung und ggf. Sicherung und Sanierung von Altlasten ist eine genaue Erkundung und Beschreibung des Untergrundes eine notwendige Voraussetzung. Für die Bewältigung dieser Aufgaben wurden in dem vom BMBF geförderten Verbundvorhaben "Deponieuntergrund" effektive und kostengünstige geowissenschaftliche Methoden entwickelt, eingeführte Verfahren verbessert und an Teststandorten erprobt. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Hydrogeologie, Geotechnik, Fernerkundung, Geophysik, Geochemie und Tonmineralogie brachte deutliche Erfolge bei der Schließung der Forschungslücken zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten.</b> <b>Als ein Ergebnis des Verbundvorhabens legt die BGR ein 10-bändiges "Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten" vor. Damit wird allen, die in Behörden und Firmen oder in der Wissenschaft an den Problemen des Umweltschutzes arbeiten, ein umfassendes Werk über die ökologisch wirksamen und ökonomisch effizienten Methoden zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten zur Verfügung gestellt.</b> <b>Sechs Bände behandeln die Themen Geofernerkundung, Strömungs- und Transportmodellierung, Geophysik, Hydrogeologie/Geotechnik, Tonmineralogie und Bodenphysik sowie Geochemie, ein weiterer Band gibt Handlungsempfehlungen für ein stufenweises Vorgehen bei der Erkundung von Deponie- und Altlaststandorten. Ergänzt werden die Handlungsempfehlungen durch Bände mit Fallbeispielen aus der Erkundungspraxis.</b> <b>Gegenstand des Bandes „Handlungsempfehlungen“ ist die Erkundung der geologischen Barriere bei Deponieanlagen, betriebene Deponien und Altlasten. Die in diesem Band behandelten Themen reichen von den geowissenschaftliche Standortkriterien über Vorkommen von Barrieregesteinen, generelle Untersuchungsstrategien, Erkundung von Aufbau und Tragfähigkeit des Untergrundes sowie der Grundwasserverhältnisse und Grundwasserströmung, des Stoffbestandes und des Schadstoffrückhaltevermögens bis zur Prognose des Standortverhaltens. Enthalten sind auch Hinweise zur Vergabe und Durchführung von Untersuchungsaufträgen sowie zum Arbeitsschutz. Dieser Band baut auf den Methodendarstellungen der Bände 1 bis 6 in Form eines Wegweisers bzw. einer gesamt einheitlichen Erkundungsstrategie auf.</b> <b>Die Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten ist durch die Vielfalt der Standortsituationen und der verfügbaren Untersuchungsmethoden sehr komplex. Ein Auskunfts- und Beratungssystem zur Wissensvermittlung und Entscheidungshilfe (Das Deponieuntergrund Beratungssystem DESY) soll dafür Wissen und Lösungsmöglichkeiten anbieten. Die Grundlage des Beratungssystems DESY bilden die im Verbundvorhaben erstellten Methodenhandbücher und die Fallbeispiele aus der Teststandortforschung.</b> <b>Die englische Ausgabe der Bände „Remote Sensing for Site Characterization“ und „Noninvasive Geophysics for Site Characterization“ ist in Vorbereitung.</b>		
19. Schlagwörter <b>Hydrogeologie, Geotechnik, Geophysik, Geochemie, Tonmineralogie, Fernerkundung, Strömungsmodelle, Transportmodelle, Deponie, Altlast, Deponieuntergrund, geologische Barriere, Schadstoffaustrag</b>		

20.	21.	22. Preis
-----	-----	-----------

Document Control Sheet

1. Report No <b>BMBF FB</b>	2. Type of Report <b>Final Report</b>	3.
4. Report Title <b>Methods for investigation and documentation of the ground beneath planned, operating and abandoned waste disposal sites - Transformation of the results in recommendations, Final report 1995 - 1997</b>		
5. Author(s) (Family Name, First Name(s)) <b>K. KNÖDEL, H. WILKEN, G. LANGE, C. WIESSNER, F. KÜHN, T. WIPPERMANN</b>		6. End of Project <b>31. 12. 1997</b>
		7. Publication Date <b>15. 06. 1998</b>
8. Performing Organization (Name, Address)		9. Organizer's Report No
<b>Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) Stilleweg 2 D-30655 Hannover</b>		10. Reference No <b>1460605 B</b>
		11. No. of Pages
		12. No. of References
13. Fördernde Institution		14. No. of Tables
<b>Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) Postfach 20 07 06 53137 Bonn</b>		15. No of Figures
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title Place Date) <b>PT Abfallwirtschaft und Altlasten im Umweltbundesamt Berlin Fachgebiet III 3.6</b>		
18. Abstract <p>The ground beneath waste disposal sites is regarded as the final and most important barrier to the spread of contaminants. A detailed geological investigation and documentation is a prerequisite for potential waste disposal sites, as well as for assessing abandoned landfills and other contaminated land, particularly before planning remedial action or decontamination. With this in view, BMBF initiated a research program designed to analyze and improve conventional site-investigation methods and to develop effective and economical new ones. Interdisciplinary cooperation involving hydrogeology, geotechnics, remote sensing, geophysics, geochemistry and clay mineralogy has had considerable success in attaining this objective.</p> <p>As a result of the research program, BGR prepared a handbook consisting of 10 volumes on investigation of the ground beneath landfills and contaminated sites. Thus, a comprehensive handbook has been provided on ecologically effective and economically efficient methods of site investigation of planned, operating and abandoned landfills; it is designed for people who work in authorities and companies and in the scientific community on problems of environmental protection .</p> <p>Volumes 1–6 are devoted to the following topics: Remote sensing, groundwater flow and transport modeling, geophysics, geotechnics/hydrogeology, clay mineralogy and soil physics, and geochemistry. Volume 7 provides recommendations for a systematic procedure for site investigation of landfills. These guidelines are supplemented by volumes containing site-investigation case histories.</p> <p>The "guidelines" volume deals with exploration of the geological barrier of planned waste disposal sites, as well as for operating and abandoned landfills. This volume covers: The geoscientific requirements of a landfill site, the occurrence of suitable barrier rocks, site investigation strategies, investigation of the geology of the site, ground stability, groundwater conditions and groundwater flow, the characteristics of the rocks beneath the landfill and possible contaminants, the contaminant retention potential, and the working out of a geological-barrier performance assessment. The guidelines also cover the contracting out of and performance of the investigation work, as well as health and safety standards. This volume functions as a practical guide, integrating the methods dealt with in Vols. 1 to 6 into a comprehensive site-investigation strategy.</p> <p>The investigation of planned, operating and abandoned landfills is a complex field owing to the variety of site characteristics and available geoscientific methods. An information and advisory system on investigation of waste disposal sites is being developed in the form of a knowledge-based system entitled DESY. It will be able provide the necessary information, help with decision making, and guide one systematically through the site investigation procedure. DESY is based on the above handbook including the case histories.</p> <p>The English editions of the volumes on "Remote Sensing for Site Characterization" and "Non-invasive Geophysics for Site Characterization" are in preparation.</p>		
19. Keywords <b>Remote sensing, groundwater flow and transport modeling, geophysics, geotechnics, hydrogeology, geochemistry, clay mineralogy and soil physics, site investigation, waste disposal sites, geological barrier</b>		



20.	21.	22. Preis
-----	-----	-----------