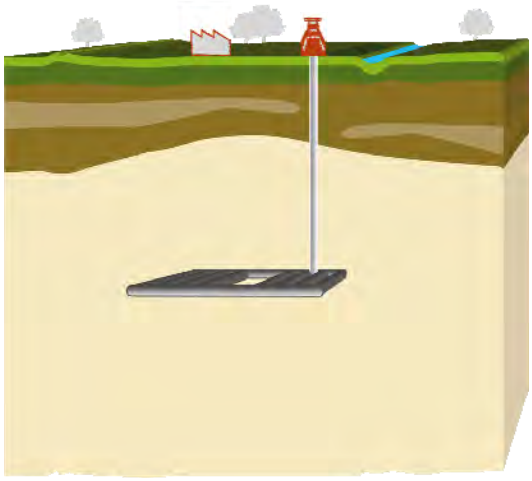
Öko-Institut e.V.
Institut für angewandte Ökologie
Institute for Applied Ecology

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

Anhang Standorterkundung

Das geologische Endlagersystem: Gebirgsverhalten und Erkundungsmethoden



30.09.2008

Bearbeiter:

Brasser, T.

Herbert, H.J.

Miehe, R.

Braunschweig / Darmstadt **Anhang zu GRS-247**
September 2008 **ISBN 978-3-939355-22-9**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E9783 und 02E9793 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1 Gebirgsverhalten 3

1.1 Gebirgshebungen und Gebirgssenkungen 4

1.2 Störungstektonik (Bruchtektonik) 7

1.3 Seismizität und Erdbeben 11

1.4 Vulkanismus 14

1.5 Erosion / Subrosion 21

2 Geländeuntersuchungen 28

2.1 Geologische Untersuchungsverfahren 30

2.2 Geophysikalische Untersuchungen 41

2.2.1 Seismik 42

2.2.2 Geoelektrik 56

2.2.3 Gravimetrie 67

2.2.4 Magnetik 70

2.2.5 Bohrlochgeophysik 72

2.3 Hydrogeologische Untersuchungen 75

2.3.1 Zielsetzung hydrogeologischer Untersuchungen 75

2.3.2 Erfahrungen aus der Endlagerforschung 78

3 Literatur 87

1 Gebirgsverhalten

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle sollen nach /IAE 05/ die geologische Formation und die Tiefe die Isolation des Abfalls von der Biosphäre und vom Menschen für lange Zeiträume gewährleisten. Im Sicherheitsnachweis muss dieses sowohl für die Szenarien der natürlichen Entwicklung des geologischen Endlagersystems als auch für die Szenarien mit unterstellten Störfällen gezeigt werden.

Bereits die natürliche Entwicklung eines geologischen Endlagersystems kann unter bestimmten Voraussetzungen dazu führen, dass beispielsweise eine heute erkundete und nachgewiesene günstige geologische Gesamtsituation durch unterschiedliche Prozesse verändert und gegebenenfalls auch beeinträchtigt wird. Hierzu gehören insbesondere

- Gebirgshebungen und -senkungen
- Störungstektonik bzw. Bruchtektonik
- Seismizität und Erdbeben
- Vulkanismus
- Erosion und Subrosion

Darüber hinaus kann auch der durch den Bau eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen bewirkte Eingriff in ein natürliches System nachteilige Auswirkungen verursachen. Bekannt und in diesem Zusammenhang zu nennen sind beispielsweise induzierte Seismizität oder das Auftreten von Erdfällen und Gebirgsschlägen. In den nachfolgenden Abschnitten werden wichtige Prozesse mit ihren Ursachen und möglichen Auswirkungen zusammenfassend dargestellt.

1.1 Gebirgshebungen und Gebirgssenkungen

Unter Epirogenese wird die langsame Hebung bzw. Senkung von Erdkrustenschollen verstanden, die als Grenzfall zu bruchhaften Vorgängen auch das Zerbrechen von Krustenteilen in einzelne Blöcke zulässt. Diese Bewegungen können isostatische Ausgleichsbewegungen sein oder durch Masseverlagerungen im tieferen Untergrund verursacht werden. Sichtbare Zeichen solcher Hebungen und Senkungen sind Transgression (Vorrücken des Meeres in Landgebiete) und Regression (Rückzug des Meeres aus vorher überfluteten Gebieten) (Abb. 1).

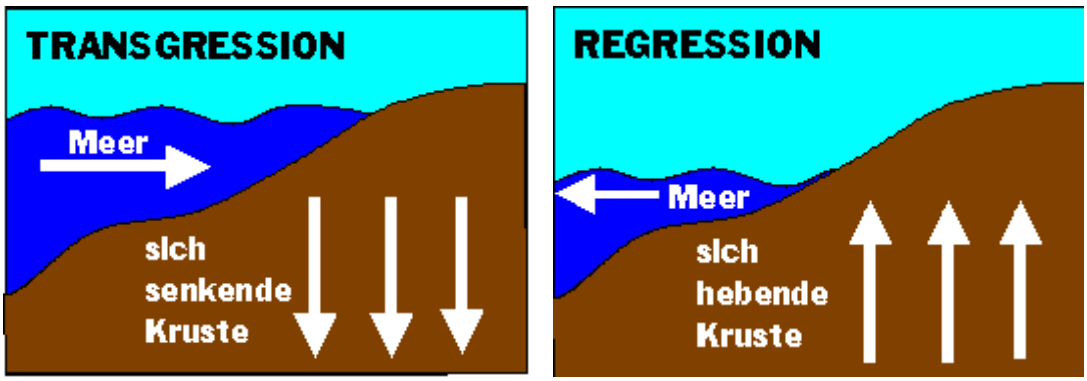


Abb. 1 Prinzipskizze von Transgression und Regression /REG 08/

In Gebieten, in denen keine halokinetischen Vorgänge stattfinden, entsprechen die Absenkungsbeträge während bestimmter geologischer Zeiten etwa den zugehörigen Sedimentmächtigkeiten /BFS 90/.

Damit sich Gebirgshebungen bzw. -senkungen nicht nachteilig auf ein Endlager auswirken (z. B. durch Aufstieg des Wirtsgesteins in geringere Tiefen, Entstehung neuer Wasserwegsamkeiten infolge von Störungen, Klüften) ist ein Kriterium für die Abgrenzung von Gebieten mit offensichtlich ungünstigen geologischen Verhältnissen die folgende Anforderung /AAE 02/:

- Keine Hebungen/Senkungen von mehreren Millimetern pro Jahr im prognostizierbaren Zeitraum (Kriterium „Großräumige Vertikalbewegungen“)

Basis für eine Abgrenzung von Gebieten mit besonderen Vertikalbewegungen in Deutschland bilden die Karten des Bundesamtes für Geodäsie und Kartografie (BGK) bzw. Karten der geologischen Landesämter sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen zu speziellen Gebieten (z. B. Rheinischer Schild, Küstenländer). Vertikalbewegun-

gen sind ein Ausdruck geodynamischer Aktivität und damit potenzieller Gefährdung für ein Endlager. Im kleinräumigen Bereich können Vertikalbewegungen beispielsweise im Zusammenhang mit Grundwasser-Absenkungen bzw. untertägigen Flutungen auftreten. Derartige Veränderungen des Grundwasserstandes treten zumeist im Zusammenhang mit bergbaulichen Aktivitäten auf.

Bei der Abgrenzung eines für die Anlage eines Endlagers offensichtlich ungünstigen Gebietes mit erhöhten Vertikalbewegungen müssen natürliche und anthropogene, also durch menschliche Aktivitäten hervorgerufene Bewegungen, unterschieden werden. Natürliche Vertikalbewegungen laufen meist großräumig ab. Probleme ergeben sich bei der exakten und anwendbaren Abgrenzung der ungünstigen Gebiete, speziell im Zusammenhang mit anthropogenen Bewegungen. Randgebiete sollten einer Einzelprüfung unterzogen werden. Vertikalbewegungen eines Gebietes sind eng verknüpft mit dem Auftreten geodynamischer Aktivitäten und sollten im Zusammenhang mit den Erdbeben und der Verteilung von Störungszonen interpretiert werden /BRE 01/. Tektonische Hebungen von 1 mm pro Jahr würden - bei Annahme der Konstanz und bei gleichzeitiger Erosion - ein in 1.000 m Tiefe errichtetes Endlager in 1 Million Jahren freilegen. Demzufolge sollten Gebiete, die derartige (und größere) Vertikalbewegungen aufweisen, gemieden werden. Nach den Kriterien des AkEnd gelten Gebiete mit Vertikalbewegungen von mehr als 1 Millimeter als ungünstig für die Auswahl eines Endlagerstandortes.

Ein Beispiel für großräumige Hebungen stellt heute Skandinavien dar, das nach Abklingen der letzten Vereisung aufgrund der resultierenden Eisentlastung eine kontinuierliche Aufwärtsbewegung zeigt, die sich lokal auf bis zu ca. 10 mm/a beläuft (Abb. 2).

Untersuchungen am Gorlebener Salzstock

In der Umgebung des Salzstocks Gorleben sind für den Zeitraum Zechstein bis heute die in Tab. 1 zusammengestellten Senkungs- bzw. Hebungsraten ermittelt worden.

Für den Zeitraum Mittelmiozän bis heute fehlen epirogenetisch bedingte Sedimente. Die Bewegungsraten sind also so klein (Abb. 3), dass wesentliche Auswirkungen auf den Salzstock erst in einigen Millionen Jahren zu erwarten wären.

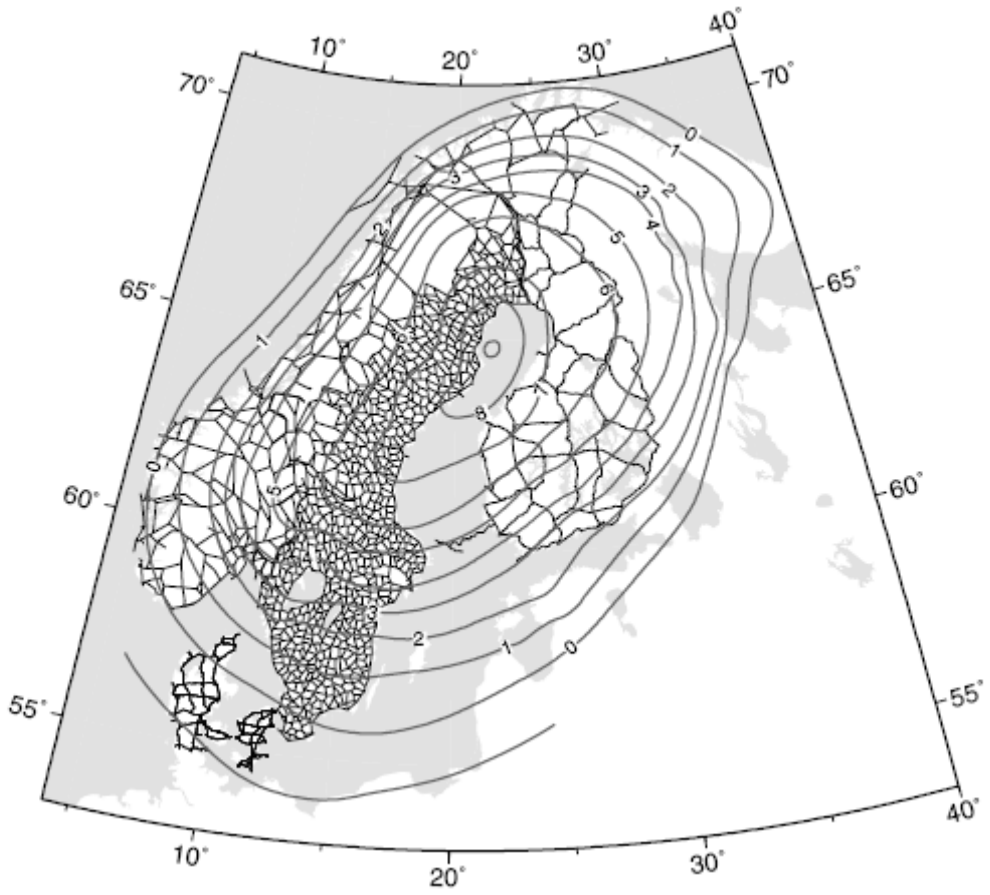


Abb. 2 Gegenwärtige Hebungsraten (mm/a) von Skandinavien (bezogen auf Meeresspiegel) /MAE 03/)

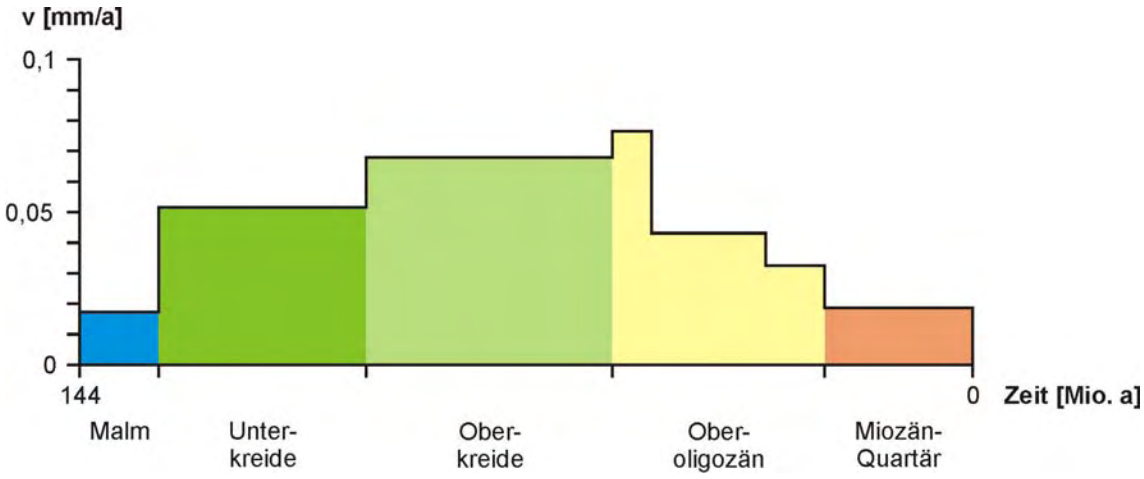


Abb. 3 Hebung der Salzstockoberfläche des Gorlebener Salzstocks im Zeitraum Malm bis heute (nach /GNS 08/)

Tab. 1 Epirogenetisch bedingte Senkungs- bzw. Hebungsraten in der Umgebung des Salzstocks Gorleben (nach /BFS 90/)

Geologischer Zeitraum	Senkung [mm/a]	Hebung [mm/a]	Dauer [10^6 a]
Untermiozän	0,013		8
Oberoligozän	0,014		4
Mitteloligozän	0,037		4
Mitteleozän bis Unteroligozän	0,007		14
Oberpaläozän bis Untereozän	0,015		10
Oberkreide bis Unterpaläozän	0,003		40
Unterkreide	0,002		24
Malm und Wealden		0,015	
Obertoarcium bis Callovium	0,011		33
Hettangium bis Untertoarcium	0,016		21
Keuper	0,010		25
Röt und Muschelkalk	0,036		11
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	0,12		5
Zechstein	0,25		5

1.2 Störungstektonik (Bruchtektonik)

In den Geowissenschaften bezeichnet Tektonik den Aufbau der äußeren Schicht des Erdkörpers in seiner Struktur und großräumigen Bewegung /EIS 91/, /SCH 72/. Mit Tektonik werden oft auch regionale Bewegungsvorgänge in der Erdkruste bezeichnet, die zu langsamen Verschiebungen, Verbiegungen, Faltungen oder Brüchen von Gesteinsschichten oder größeren Einheiten führen, beispielsweise:

- Tektonische Störung (flächenförmige tektonische Schwächezone, oft mit verstärkter Erosion oder Erdbebentendenz)

- Bruchtektonik (Aufbrechen bzw. gegenseitige Verschiebung von Gesteinsschichten oder Einsenkung von Sedimentbecken)

- Tektonische Erdbeben (seismische Aktivität durch Lösen von Spannungen im Untergrund) (Seismizität und Erdbeben sind Gegenstand eines separaten Abschnitts 1.3).

Das Barrierensystem eines Endlagers in einer Tiefe von etwa 1.000 m kann in entsprechend gefährdeten Gebieten durch Störungen bzw. Bruchtektonik negativ beeinflusst werden. Daher umfassen die Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte /AAE 02/ u. a. die Forderung

- Keine aktiven Störungszonen im Endlagerbereich.

Der Begriff „Störung“ steht dabei sowohl für den Prozess als auch für das Ergebnis des Prozesses. Eine Störung ist in der breitesten Definition ein tektonischer oder atektonischer Vorgang, der die primäre, d. h. bei der Bildung eines Gesteinsverbandes entstandene Lagerungsform verändert. Damit umfasst dieser Begriff sowohl die plastische als auch die mit Bruch verbundene Verformung /BRE 01/. Im Weiteren beschränkt sich der AkEnd auf die mit Bruch verbundene Verformung des Gesteinsverbandes, die einerseits zu Verwerfungen (mit Gesteinsversatz) und andererseits zu Zerrüttungszonen führen kann. Verwerfungen mit deutlicher Dislokation geologischer Einheiten werden bei der herkömmlichen Geländekartierung oder mit seismischen Erkundungsverfahren erkannt und dokumentiert. Zerrüttungszonen werden mit den traditionellen Kartierungsmethoden in der Regel nicht erkannt. Zu ihrer Lokalisierung sind spezielle Methoden erforderlich, wie z. B. die Fernerkundung, die u. a. Feuchtigkeits- und Vegetationsanomalien erkennt oder geoelektrische Verfahren, die ebenfalls Feuchtigkeitsanomalien registrieren. Zerrüttungszonen können als Ausdruck aktiver Bruchtektonik von großer Bedeutung sein, zumal hierbei die Frage der Entstehungszeit einer Störung zu beachten ist. Die Genese der Störungen oder Störungszonen in Raum und Zeit ist im Detail meist nicht befriedigend aufgeklärt. Das geologische Faktenmaterial reicht in der Regel nur für eine sehr grobe Rekonstruktion der Bewegungsereignisse aus. Über die Initialphasen von Störungen ist oft nicht sehr viel bekannt. Für die Bewertung tektonischer Aktivitäten in der jüngsten geologischen Vergangenheit (Quartär) ist besonders wichtig, ob sich diese aus Zerrüttungszonen entwickelt haben und ob sich erst nach einer längeren Phase tektonischer Aktivität ein messbarer Gesteinsversatz herausgebildet hat.

Als „aktive Störungen“ werden im Allgemeinen Störungen mit Bewegungen im neotektonischen Zeitabschnitt bezeichnet. Dieser Zeitabschnitt beginnt mit der Basis des Rupel (Unteroligozän). Die marine Referenzfläche des Rupel hat ein absolutes Alter von 34 Mio. Jahren und ist z. B. in Norddeutschland über ausgedehnte Flächen nachweisbar.

Die quartären (pleistozänen) bruchtektonischen Bewegungen sind dagegen schwerer fassbar, da die Basis des Pleistozäns kein einheitliches Höhenniveau darstellt, an dem sich Bewegungen ablesen lassen. In Störungszonen mit gut datierbaren jungen Sedimenten, wie z. B. dem hochmobilen Niederrhein-Graben, ist die zeitliche Einordnung der Bewegungsphasen günstiger. Einige Störungen sind hier bis in die Gegenwart aktiv. Als neotektonisch "aktive" Störungen mit Sicherheitsrelevanz für ein Endlager sind alle Dislokationen anzusehen,

- die im Zeitraum Rupel bis rezent bewegt wurden, abgestuft nach dem Zeitpunkt ihrer nachweislichen Letztbewegung,
- die mit seismischen Ereignissen im Zusammenhang stehen und
- an denen nachweislich Fluid- und/oder Gastransport stattfindet.

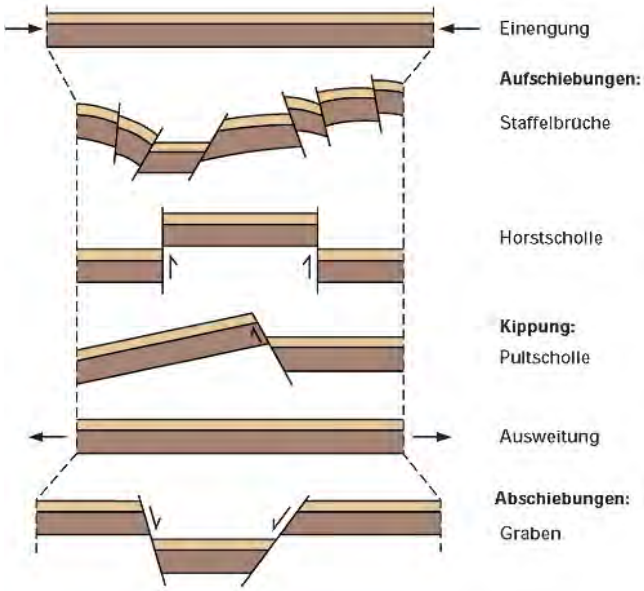


Abb. 4 Formen der Bruchtektonik /KLE 03/

Als Indikationen gelten neben erkennbaren Versatzbeträgen auch Mächtigkeitsunterschiede in gleichen Formationen bei synsedimentären Bewegungen. Neben echten Verwerfungen müssen auch nachweisliche Zerrüttungszonen in die Sicherheitsbetrachtungen einbezogen werden. Die Breiten von Störungs"zonen" sind individuell abzuschätzen. Neben Parallelstörungen untergeordneten Ranges sind auch begleitende Zerrüttungszonen für die Festlegung einer „Sicherheitszone“ einzubeziehen. Da eine exakte Zonenbreite in der Regel nicht bestimmbar ist, sollte für eine Ausweisung von

Gebieten mit besonders ungünstigen Verhältnissen ein "Sicherheitsaufschlag" von einigen Kilometern beidseits der erkannten Zone festgelegt werden /BRE 01/.

Die wichtigsten Formen der Bruchtektonik sind in Abb. 4 zusammengestellt. Abb. 5 zeigt die hauptsächlichen tektonischen Elemente in Deutschland. Herausragendes Element ist der Oberrheingraben, der auch heute noch eine deutliche Aktivität aufweist.

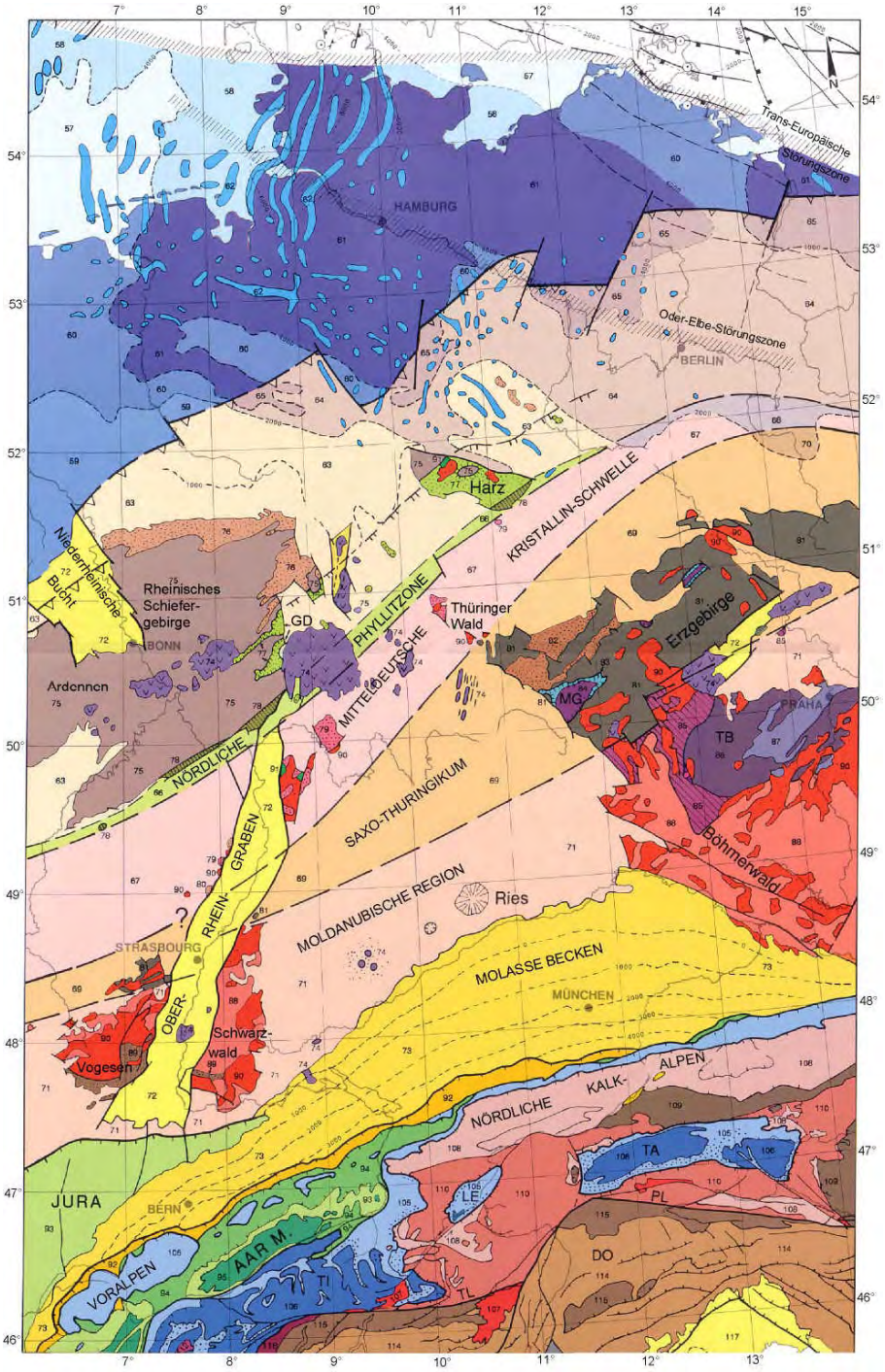


Abb. 5 Tektonische Übersichtskarte von Deutschland /BUR 92/

1.3 Seismizität und Erdbeben

Das Wirtsgestein muss gegenüber geodynamischen Einwirkungen, wie sie beispielsweise Erdbeben oder neotektonische Bewegungen darstellen, stabil sein. Erdbeben wirken einerseits durch ihre Erschütterungsfähigkeit und durch bleibende Verschiebungen, andererseits sind sie Indikatoren für derzeit ablaufende tektonische Prozesse /BFS 90/.

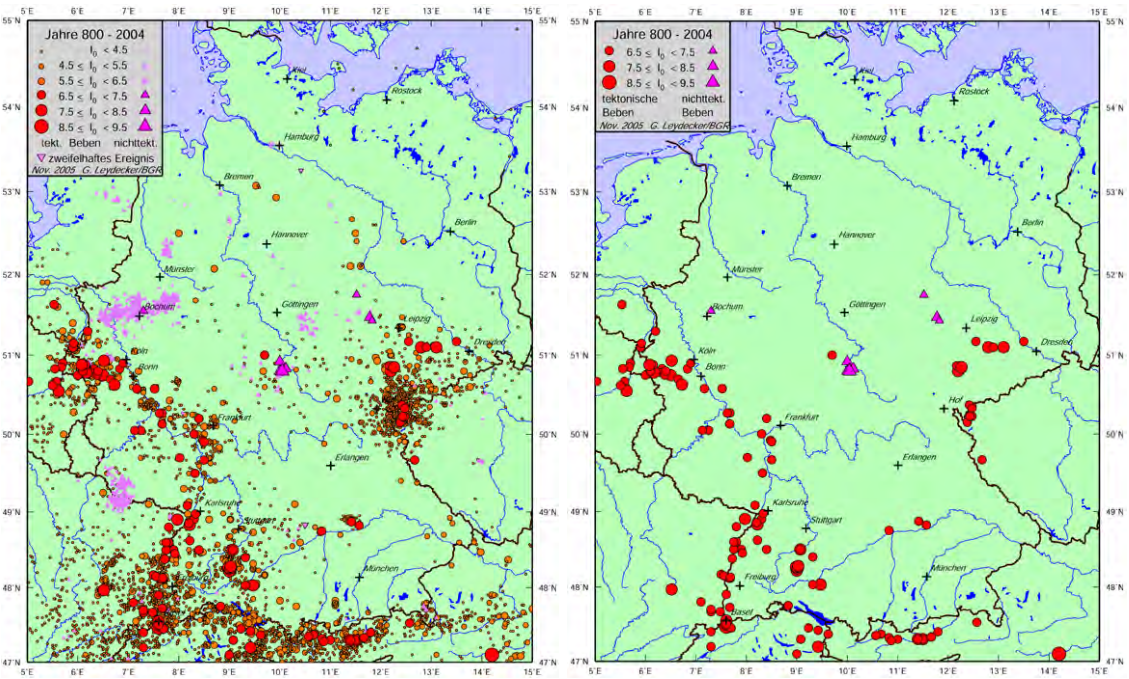


Abb. 6 Karte der Erdbebenepizentren in der Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2004 (links). I_0 = makroseismische Epizentralintensität; die Intensität $I_0 < 4{,}5$ beinhaltet auch nicht verspürte Beben. Die Karte auf der rechten Seite umfasst nur Epizentren der Schadenbeben (ab Intensität VI-VII) und verdeutlicht die Gebiete erhöhter Seismizität: Alpennordrand, Bodenseegebiet, Oberrheingraben, Schwäbische Alb, Mittelrheingebiet und Niederrheinische Bucht, Vogtland, Region Gera und Leipziger Bucht. Die nichttektonischen Schadenbeben sind durch Bergbau verursachte Gebirgsschläge /LEY 05/

Durch Erdbeben verursachte seismische Wellen führen auch zu einer dynamischen Zusatzbeanspruchung der Hohlräume eines Endlagerbergwerkes. Da es in Deutschland durchaus Gebiete erhöhter Seismizität gibt (Abb. 6), muss zum Nachweis der Erdbebensicherheit eines Grubengebäudes beurteilt werden, ob die Wechselwirkungen

zwischen seismischen Wellen und untertägigem Hohlraum zu sicherheitsrelevanten Beeinträchtigungen des Endlagerkonzeptes führen können.

Für einen Endlagerbereich ist festgelegt, dass die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 /DIN 05/ sein dürfen. Basis für eine Abgrenzung von erdbebengefährdeten Gebieten bildet in Deutschland die „Karte der Erdbebenzonen Deutschlands“ (/GFZ 07/, siehe auch /DIN 05/, /GRU 03/, /GRU 07/, /MES 07/) (Abb. 7).

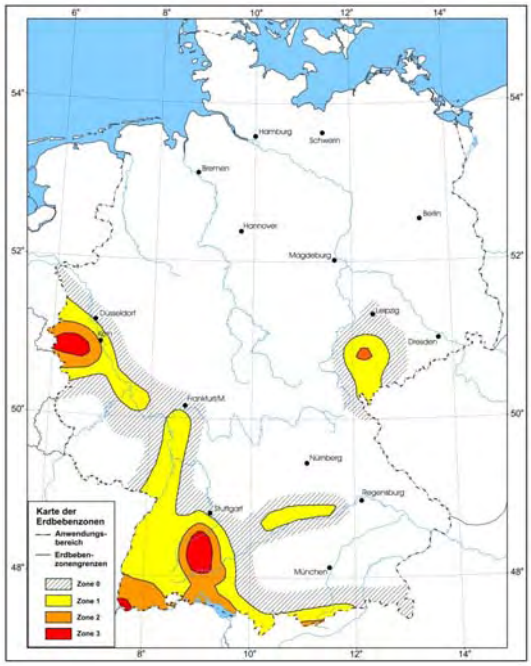


Abb. 7 Karte der Erdbebenzonen /GFZ 07/ mit Darstellung der Warnzone 0 und der Erdbebenzonen 1 bis 3. Die Anforderungen der deutschen Erdbebenbaunorm DIN 4149 (Fassung 2005) gelten nur in den Zonen 1 - 3.

Dabei wurden Zonen entsprechend der in einem Zeitraum von ca. 500 Jahren maximal zu erwartenden Intensitäten abgegrenzt. Als Grundlage dafür dienten der historische Erdbebenkatalog, der alle bekannten Erdbeben in Deutschland seit dem Jahr 800 aufführt (s. o.), die Karte der seismotektonischen Einheiten Deutschlands und die Verteilung der beobachteten Schadenbeben in Deutschland. Mit eingeflossen in die Zonenkarte sind auch Annahmen über maximal mögliche Beben in den entsprechenden Gebieten /AAE 02/.

Bei der Abgrenzung eines für die Anlage eines Endlagers offensichtlich ungünstigen Gebietes muss berücksichtigt werden, dass sich die Zonierung auf Schäden an Ober-

flächenbauwerken bezieht. Die Auswirkungen von Erdbeben auf Untertagebauwerke werden dagegen i. A. als geringer eingeschätzt (z. B. /PRA 78/).

Der AkEnd kam 2002 deshalb überein, dass eine Grenzziehung für ungünstige Gebiete erst ab Erdbebenzone 2 /DIN 05/ sinnvoll ist. Dies entspricht einer maximal beobachteten Erdbebenintensität ab VII an der Oberfläche /AAE 02/. Die seismische Aktivität eines Gebietes ist eng verknüpft mit dem Auftreten aktiver Störungen.

Bei allen Angaben über die seismische Gefährdung eines Gebietes muss berücksichtigt werden, dass eine Prognose, die allein auf den Erdbebenbeobachtungen ab dem Jahre 800 basiert, über einen Zeitraum von einer Million Jahren nicht möglich ist.

Bei der Festlegung des Bemessungserdbebens nach KTA 2201.1 /KTA 90/ ist es insbesondere in Gebieten geringer Seismizität (wie z. B. in Norddeutschland) notwendig, neben deterministischen auch probabilistische Verfahren anzuwenden. Durch die Aufsummierung der Überschreitenswahrscheinlichkeiten von Erdbebenwirkungen aus einer größeren Umgebung am Standort wird es möglich, die deterministisch festgelegten Standortintensitäten durch die Angabe von Wahrscheinlichkeiten zu bewerten. Eine solche gegenseitige Kontrolle zweier unabhängiger Verfahren bietet die Gewähr, realistische seismische Lastannahmen zu erhalten. Um eine Prognose für Überschreitens-Wahrscheinlichkeiten kleiner 10^{-4} pro Jahr abgeben zu können, bedarf es zusätzlicher, detaillierter strukturgeologischer Kenntnisse der Standortumgebung mit Angaben zur Bewegungsgeschichte benachbarter Sockelstörungen als potenzielle Erdbebenherde.

Diese Vorgehensweise wurde bislang beispielhaft für den Standort des ehemaligen Erzbergwerkes Konrad in Norddeutschland, einem planfestgestellten Endlager für nicht wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, durchgeführt /LEY 99/.

Die Unterteilung Deutschlands in seismographische Regionen (Abb. 8) /LEY 98/ erfolgte auf Beschluss der IASPEI (International Association for Seismology and Physics of the Earth Interior). Aufgrund der bei der Festlegung der Regionen beachteten Zusammenschau von Erdbebentätigkeit, geologischer Entwicklung und Tektonik können die erdbebengeographischen Regionen auch als seismotektonische Regionen bzw. als tektonische Regionen im Sinne der KTA 2201.1 angesehen werden.

Zusammenfassend wird in /HER 98/ das Fazit gezogen, dass „*in Deutschland die Gebiete mit der relativ stärkeren Seismizität und dem häufigeren Auftreten von Erdstößen*

nicht in Norddeutschland liegen, sondern im süd- und westdeutschen Raum (s. Abb. 6)*. Alle bisherigen Beobachtungen aus der geologischen Vergangenheit weisen darauf hin, dass in der nahen Zukunft (mehrere hunderttausend Jahre) tektonische Ereignisse und Erdbeben nicht vorrangig die Langzeitsicherheit von Untertage-Deponien* (zu denen auch Endlager gehören) *in den … Salzstöcken Norddeutschlands beeinflussen werden.*“

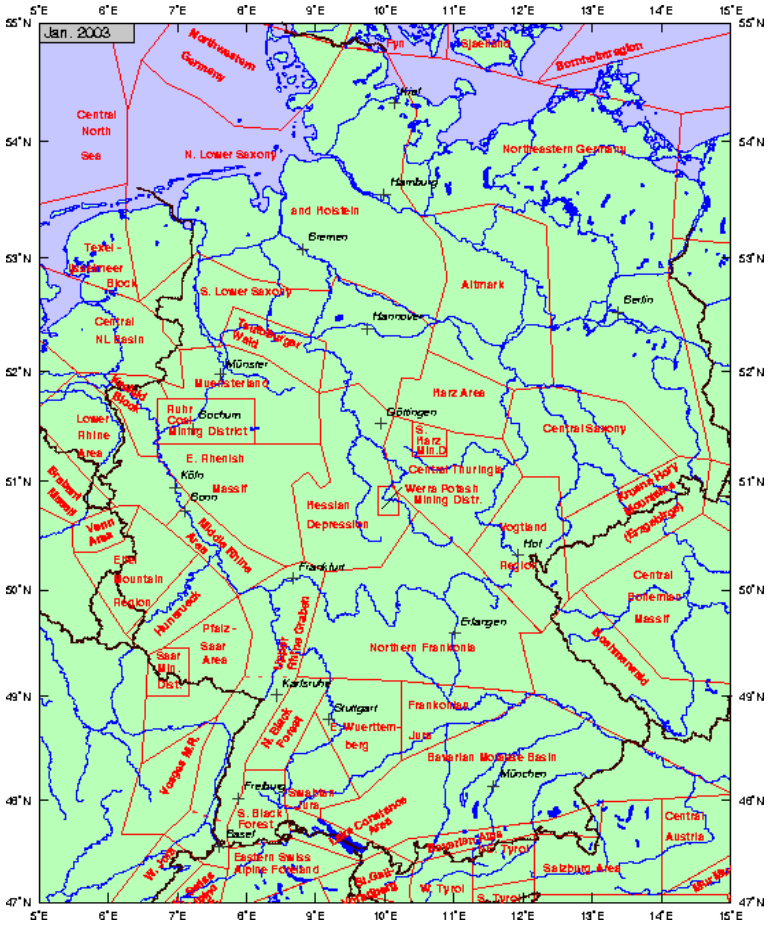


Abb. 8 Karte der erdbebengeographischen Einteilung Deutschlands und benachbarter Regionen mit den englischen Namen der Regionen /LEY 98/

1.4 Vulkanismus

Überblick

Als Vulkan wird allgemein eine punktuelle Austrittsstelle vulkanischer Förderprodukte an die Oberfläche eines Planeten bezeichnet. Die dabei freigesetzten Stoffe sind fest, flüssig oder gasförmig. Grundsätzlich unterscheidet man aktive, schlafende und erlo-

schene Vulkane, wobei es jedoch keine verbindliche Festlegung dieser Begriffe gibt. Ob ein Vulkan erloschen ist oder nur eine Ruhephase eingelegt hat, entscheidet sich nach

- der Gesamtlebensdauer eines Vulkankomplexes oder Vulkanfeldes sowie
- der Häufigkeit von Einzeleruptionen während der Gesamttätigkeit.

Vulkane und Vulkangebiete sind oft über Millionen von Jahren tätig. Dabei wechseln relativ kurze Perioden vulkanischer Aktivität mit längeren Ruhepausen ab, die Hunderttausende bis Millionen von Jahren dauern können.

Vulkanismus tritt grundsätzlich an aktiven Schwächezonen der Erdkruste auf und ist in nahezu allen geologischen Zeitaltern anzutreffen. Auch in Deutschland ist Vulkanismus unterschiedlichen Alters zwischen 10.500 Jahren und rund 2,1 Milliarden Jahren dokumentiert (Tab. 2).

Jüngerer Vulkanismus (Känozoikum: Tertiär und Quartär) findet sich in Mitteleuropa in einem Gürtel von Schottland - England - Eifel - Westerwald - Vogelsberg - Rhön - Vogtland / Eger-Graben bis SW-Polen sowie in S-Frankreich, dem Massif Central und S-Deutschland (Urach, Hegau, Kaiserstuhl). Ursächlich ist er mit der tektonischen Entwicklung verbunden, die zur Auffaltung der Alpen und zur Entwicklung großer Graben-Strukturen führte (Abb. 9).

Die stärksten vulkanischen Aktivitäten im Tertiär fanden im Zeitraum Eozän - Miozän (vor etwa 40 - 7 Mio. Jahren) statt. Im Quartär (< 2,5 Mio. Jahre) entwickelten sich die Vulkan-Provinzen Eifel sowie südwestlicher Eger-Graben. Die vulkanische Aktivität in der Eifel mit ihren Maaren (Abb. 10) begann vor ca. 600.000 Jahren und umfasst insgesamt etwa 250 Vulkane. Nach 5.000 Jahren Ruhe entstand vor rund 12.900 Jahren der Explosionskrater des Laacher Sees. Die gegenwärtige Ruhephase begann dort vor ca. 11.000 Jahren. Das Alter des jüngsten Vulkans in Deutschland, das Ulmener Maar, ist auf 10.500 Jahre datiert.

Tab. 2 Bedeutende Vorkommen vulkanischer Gesteine in Deutschland (zusammengestellt nach /WIS 06/)

Alter	Region
Eiszeitalter	West- und Osteifel
Miozän	Vogelsberg, Westerwald, Rhön, Fichtelgebirge, Oberpfalz, Schwäbische Alb, Kaiserstuhl, Heldburg, Unterfranken, Hegau
Oligozän	Eifel, Siebengebirge, Rhön, Schwarzwald
Eozän	Oberrheingraben, Hocheifel
Kreide	Eifel
Perm	Saar-Saale-Senke, Pfalz, Thüringer Wald
Karbon	Nord- und Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges
Devon	Fichtelgebirge, Sauerland, Oberfranken, Lahn-Dill-Gebiet
Silur	Frankenwald
Ordovizium	Ostseegebiet, Oberfranken
Präkambrium	Schwarzwald

Abb. 9 Bedeutende Vulkangebiete der letzten 65 Mio. Jahre in Deutschland /GEO 05/

Ein Wiederaufleben des Vulkanismus in der Eifel innerhalb von ca. 1 Mio. Jahren wird als sicher angenommen; für den westlichen Teil des Eger-Grabens besteht hierfür eine Wahrscheinlichkeit von 50 %; weitere Gebiete mit einer vulkanischen Gefährdung werden in Deutschland allerdings nicht gesehen /AAE 02/. Auf dieser Basis ergibt sich die Ausweisung von Gebieten mit einer vulkanischen Gefährdung in Deutschland, wie sie in Abb. 11 dargestellt ist.

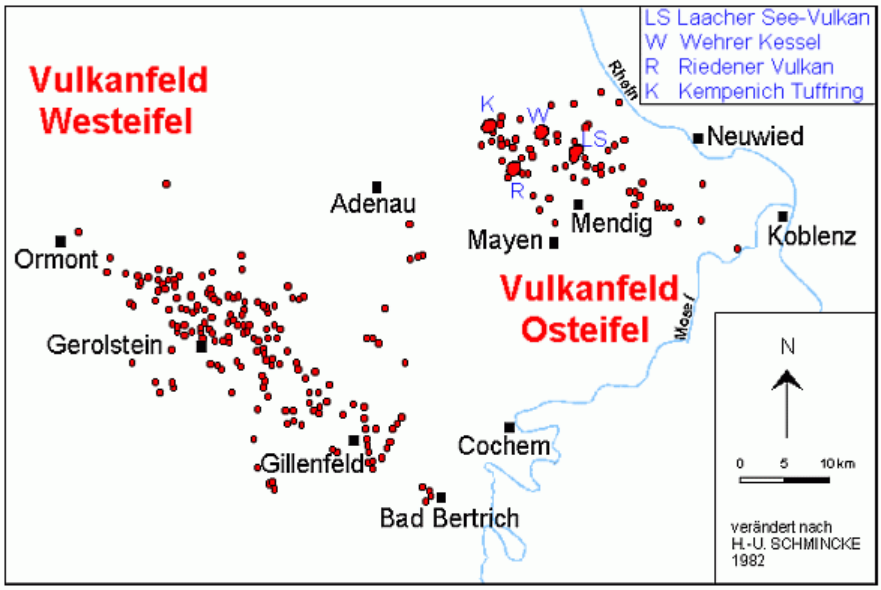


Abb. 10 Die jungen Vulkangebiete der Eifel /MUE 05/

Potenzielle Gefährdung eines Endlagers

Auswirkungen vulkanischer Aktivität können an der Erdoberfläche oder unterirdisch auftreten und können somit auch für ein Endlager relevant sein. Die wesentlichen möglichen Auswirkungen vulkanischer Aktivitäten sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Schlussfolgerungen

Der AkEnd empfiehlt, zukünftige vulkanische Aktivitäten bei der Endlagerstandortauswahl in Deutschland ebenfalls zu berücksichtigen und beim Ausschluss von Gebieten mit vulkanischer Aktivität zusätzlich einen Sicherheitsspielraum von 10 km um potenziell gefährdete Bereiche anzusetzen. Hierdurch ergeben sich nur wenige Ausschlussgebiete, wie Abb. 11 zeigt.

Abb. 11 Karte der ausgewiesenen Gebiete in Deutschland mit einer vulkanischen Gefährdung. 1 = Vogtland/Egergraben, 2 = Eifel /AAE 02/

Tab. 3 Potenzielle Auswirkungen vulkanischer Aktivitäten auf ein Endlager (nach /AAE 02/)

Auswirkung	Mögliche Beeinflussung / Reichweite
a) Erdoberfläche	
Hebungen (mögliche Beeinflussung von Talsperren)	500 - 1.500 km²
Vulkanische Beben	[keine Angabe]
Waldbrände (durch Eruption)	50 - 200 km²
Bildung von Maaren (explosiv)	50 - 200 km²
Druckwellen (durch hochexplosive Magma-Wasser-Eruptionen)	Bis ca. 5 km vom Eruptionszentrum (etwa 75 km²)
Talfüllungen (durch Lavaströme und Lahare)	Bis ca. 10 km (etwa 300 km²)
b) unterirdisch (Endlager)	
Magmenzutritt	[sehr unwahrscheinlich]
Temperaturspannungen	Beeinträchtigung der Integrität des Endlagers, Verringerung der Barrierewirkung (über den Zutritt von Grundwasser)
Vulkanische Beben	
Induzierte Bewegungen an Störungen	

Maarentstehung

Die jüngsten vulkanischen Aktivitäten in Deutschland zeichnen sich durch die Bildung von Maaren aus. Maare sind in das Landschaftsrelief eingeschnittene Krater, umgeben von einem niedrigen Wall aus Tephra (Pyroklastika). Sie stellen die zweithäufigste Vulkanform auf den Kontinenten. Ihr Tephrawall besteht überwiegend aus "Grundgebirgsfragmenten". Die Maare sind meist weniger als 2 km breit. Ihre Tiefe beträgt etwa ein Fünftel ihres Durchmessers. Da die Kraterböden häufig den Grundwasserspiegel unterschreiten, besitzen Maare anfänglich Kraterseen mit steilen Wänden, die im Laufe der Zeit durch Erosion immer flacher werden.

Abb. 12 Pulvermaar, Eifel (Foto: G. Hofbauer 1999, aus: /MIN 06/)

Maare entstehen durch einen vielzyklischen gravitativen Einbruch der Gesteine über einer Explosionskammer. Während des Kontaktes zwischen heißer Schmelze und Grundwasser bildet sich durch den entstehenden Wasserdampf ein Explosionshohlraum in 200-300 m Tiefe, der bis in 2.000 m Tiefe wandern kann. Der unter Überdruck stehende Hohlraum entleert sich durch einen schmalen Förderkanal explosionsartig in Form einer gewaltigen Eruptionswolke an die Erdoberfläche. Die Decke des nun "leeren" Hohlraums bricht an Störungsflächen ein und lässt im Laufe der Zeit ein größer werdendes Maar entstehen. Weitere Details sind in /MEY 85/ zusammengefasst.

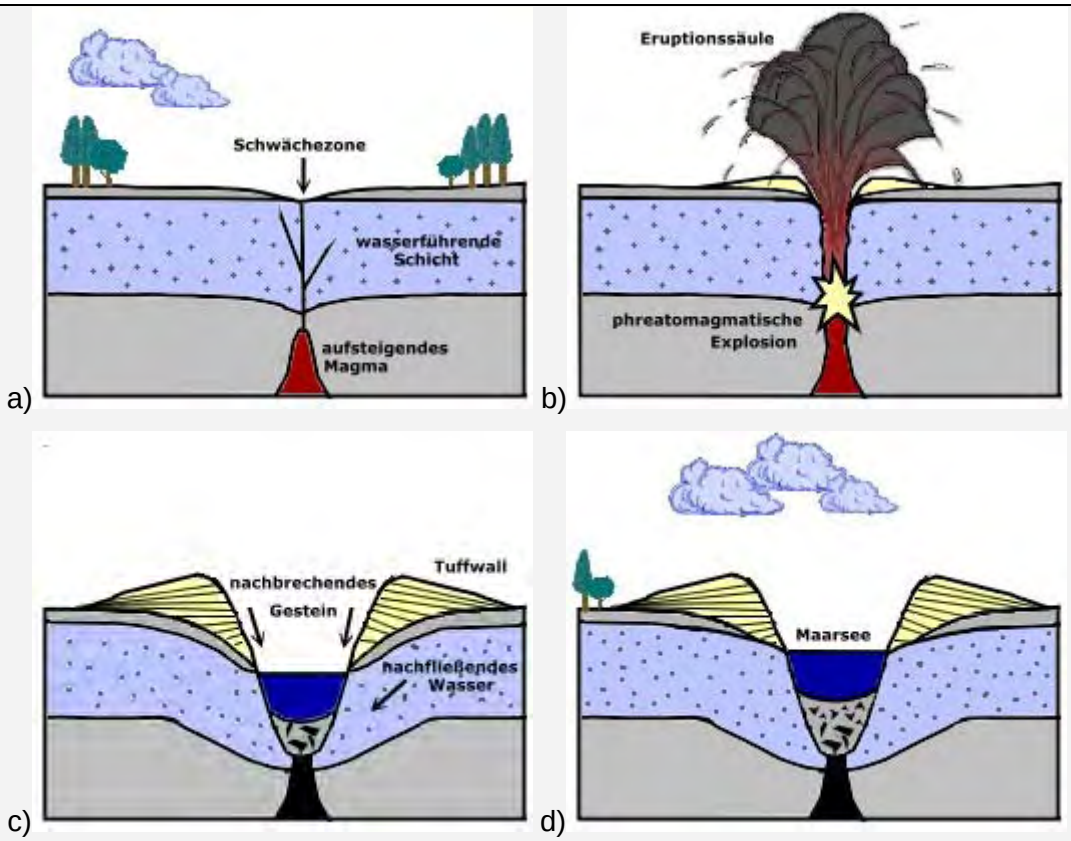


Abb. 13 Schematische Entwicklung einer Maar-Entstehung (von „a“ nach „d“, aus: /VUL 06/)

1.5 Erosion / Subrosion

Erosion

Erosion umfasst alle Vorgänge, durch die verwittertes oder aufgelockertes Gestein abtransportiert wird, z. B. durch Wasser (fluviatile bzw. marine Erosion), Wind (äolische Erosion), Gletscher (glaziale Erosion) oder auch Gravitation (Berg-, Felsstürze). Voraus gehen in der Regel unterschiedliche Verwitterungsprozesse, welche die Gesteine im Laufe der Zeit auflockern und zerstören. Es werden drei Arten von Verwitterung unterschieden:

- Physikalische Verwitterung (durch mechanische Prozesse wie z. B. Frostsprengung; Salzsprengung; Wärmeausdehnung; Abtragung durch Wind, Wasser oder Eis; tektonische Auflockerung),

- Chemische Verwitterung (durch Wechselwirkungen von Gesteinsbestandteilen mit Wasser bzw. Luft wie z. B. Lösungsverwitterung; Kohlensäureverwitterung; Oxidationsverwitterung; hydrolytische Verwitterung),

- Biologische Verwitterung (durch mechanische oder [bio]chemische Prozesse wie z. B. Wurzelwachstum; chemische Reaktionen durch Stoffwechselprodukte von Kleinstlebewesen).

Ein besonders eindrucksvolles Beispiel für die möglichen Auswirkungen von Erosion bietet der Grand Canyon in den USA (Abb. 14), der heute zwischen etwa 5 und 30 km breit ist, eine Tiefe von bis zu 1.600 m erreicht und insgesamt etwa 350 km lang ist. Die stärksten Erosionswirkungen sind in erster Linie durch Wasser und Eis, aber auch durch Wind verursacht. Darüber hinaus haben aber auch der Verlauf des Colorado River selbst, Vulkanismus, Kontinentaldrift und Variationen in der Erdbahn (die wiederum Veränderungen in Jahreszeiten und Klima verursachen) Einflüsse auf die Erosion des Canyon gehabt.

Abb. 14 Grand Canyon, USA /NPS 08/

Bedeutung der Erosion für die Sicherheit eines Endlagers

Durch die Zerstörung und den Abtransport von Gesteinsmaterial kann der ursprüngliche Gesteinskomplex insbesondere hinsichtlich Mächtigkeit und Ausdehnung, aber auch seiner Eigenschaften (z. B. hydraulische Durchlässigkeit, Festigkeit, Rückhaltevermögen) verändert werden. Damit entspricht der betroffene Gesteinskomplex im Verlauf des zu betrachtenden Zeitraumes möglicherweise nicht mehr den Anforderungen hinsichtlich der Isolation von Schadstoffen. Neben negativen Effekten (Reduzierung der Barrieremächtigkeit, Schaffung von Wegsamkeiten, Bildung von Hohlräumen) können aber auch positive Effekte auftreten (Erhöhung des Rückhaltevermögens durch Vergrößerung der Oberfläche).

Die Tiefenlage des Endlagers soll die Integrität der geologischen Barriere gewährleisten, so dass Erosionsprozesse an der Erdoberfläche auf die Langzeitentwicklung keinen Einfluss haben. Auch extreme klimatische Bedingungen wie bei zukünftigen Eiszeiten dürfen die Integrität des Endlagers nicht beeinträchtigen. Tektonische Hebungen von einem Millimeter pro Jahr würden - bei Annahme der Konstanz und bei gleichzeitiger Erosion - ein in 1.000 m Tiefe errichtetes Endlager in einer Million Jahren freilegen. Für den AkEnd /AAE 02/ gelten daher Gebiete mit großräumigen natürlichen Hebungen in dieser Größenordnung als ungünstig für die Auswahl eines Endlagerstandortes. Diese Gebiete sollten für die Standortsuche ausgeschlossen werden.

Für ein potenzielles Endlager im norddeutschen Raum ist insbesondere eine dort häufig vorkommende eiszeitliche Erosionsform von Bedeutung. Dabei räumen unter dem Gletscher abfließende Schmelzwässer das Deckgebirge in Form flacher Rinnen aus. So wurde durch die elsterkaltzeitliche Tiefenerosion in der Gorlebener Rinne (Abb. 15) das Hutgestein, an eng begrenzten Stellen sogar das Salz selbst, auf einer Fläche von ca. 7,5 km² freigelegt, was wiederum eine verstärkte Subrosion (s. u.) ermöglicht hat /ZWI 04/.

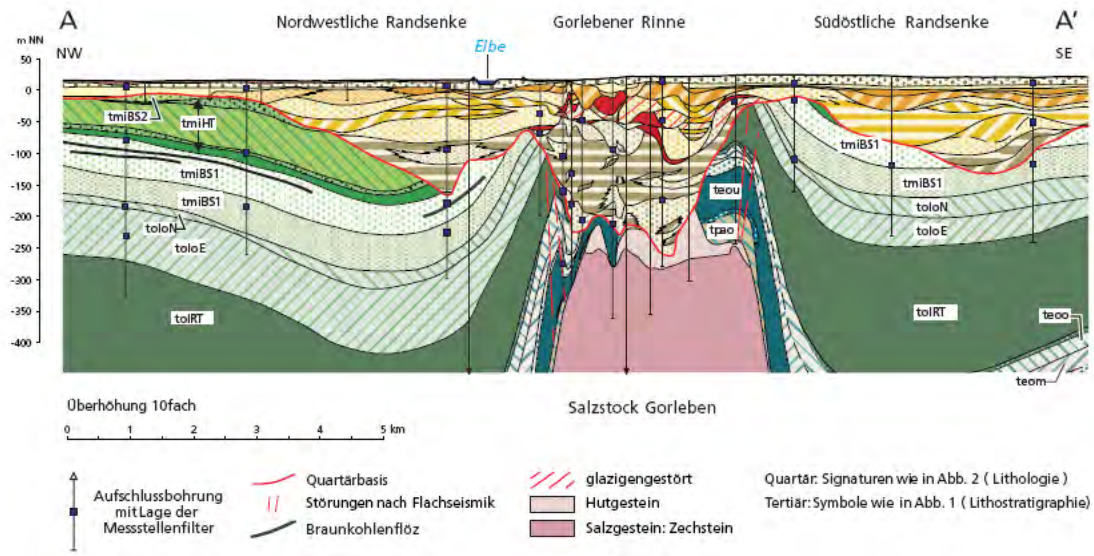


Abb. 15 Geologischer Profilschnitt über den Salzstock Gorleben /KLI 02/. In der Bildmitte ist deutlich der Bereich der Gorlebener Rinne erkennbar: die tertiären Sedimente (grün) sind hier durch glazial verursachte Tiefenerosion entfernt und es finden sich jüngere (quartäre) Sedimente

Subrosion

Bei Subrosion handelt es sich um eine „Spezialform“ der Verwitterung, nämlich die unterirdische Lösungsverwitterung leicht löslicher Gesteine, vor allem von Salzen (insbesondere Chloride, Karbonate, Sulfate). Solche unterirdische Ablaugung kann ein Nachsinken des darüber liegenden Gebirgsbereiches zur Folge haben, so dass sich an der Erdoberfläche eine Senke (Subrosionssenke) bildet. Folgewirkungen der Subrosion an der Erdoberfläche gelten in Gebieten mit entsprechenden Vorkommen wenig lösungsresistenter Gesteine als landestypisches Georisiko. Sie äußern sich in flächenhaft verlaufenden bruchlosen Senkungen oder abrupt eintretenden engräumigen Einbrüchen (Erdfälle - siehe Abb. 16). Ingenieurgeologische Bedeutung hat die Sulfatsubrosion

(Gipskarst) mit ihren charakteristischen Schadwirkungen durch Bruchdeformationen /LAN 87/.

Abb. 16 Erdfall über einem Karstgebiet (Photo: Hochschule Anhalt /BAU 08/)

Bedeutung der Subrosion für die Sicherheit eines Endlagers

Setzt Subrosion am Hut oder den Flanken eines Salzstockes (oder eines anderen Salzvorkommens) an, der für ein Endlager eingerichtet oder vorgesehen ist, können die Mächtigkeit der geologischen Barriere „Salz“ und damit ggf. auch die Barrierewirksamkeit reduziert bzw. verändert werden. Subrosion geschieht dabei nicht nur flächenhaft sondern kann - in Abhängigkeit von den Lagerungs- und hydraulischen Verhältnissen - auch in bestimmten Bereichen verstärkt wirksam werden. Aus diesem Grund werden Endlager für radioaktive Abfälle bei der Wirtsgesteinsoption „Salzgestein“ vorzugsweise in Salzstöcken mit entsprechendem Salzvolumen konzipiert, um eine ausreichende Barrieremächtigkeit sicherzustellen.

Art und Umfang von Subrosion sind in starkem Maße abhängig von der Entwicklungsgeschichte des Salzstockes. Weiterer Salzaufstieg könnte zur Folge haben, dass immer neue Bereiche des Salzstockes, im Extremfall der Einlagerungshorizont selbst, das Erosions- bzw. Subrosionsniveau erreichen und Schadstoffe ins Grundwasser freigesetzt werden.

Beim Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salzgestein wird deshalb ggf. auch ein Subrosionsszenario betrachtet.

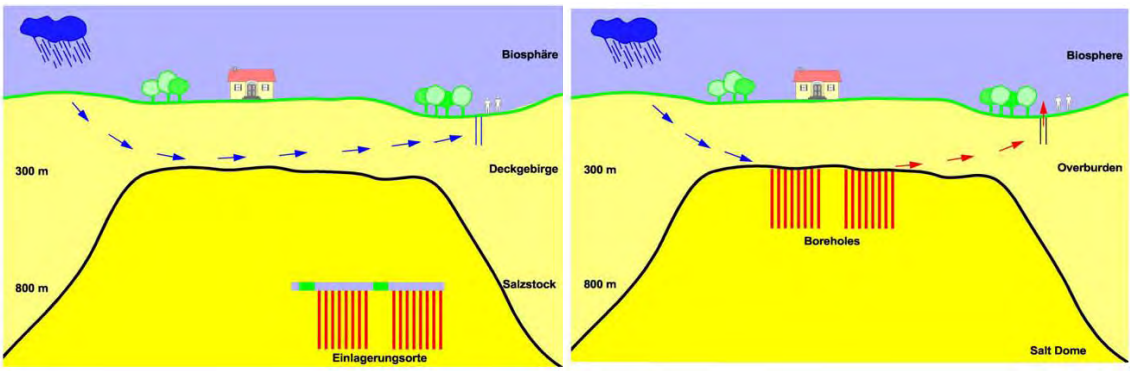


Abb. 17 Subrosionsszenario für ein Endlager im Steinsalz - Das Endlager ist zunächst allseitig von einer mächtigen Salzbarriere umschlossen (linke Bildhälfte). Bei Salzaufstieg und kompensierender Subrosion durch fließendes Grundwasser (blaue Pfeile) kann das Endlager zu einem zukünftigen Zeitpunkt dem direkten Zutritt von Grundwasser ausgesetzt sein (rechte Bildhälfte). Bei diesem Szenario sind dann eine Kontamination des Grundwassers mit Radionukliden (rote Pfeile) und in Folge eine Belastung der Biosphäre möglich

Die größten Salzverluste am Top des Salzstockes Gorleben erfolgten während des Diapirstadiums (Ende Malm bis Oberkreide), als das aufsteigende Salz die Geländeoberfläche erreichte. Mit der fortschreitenden Sedimentbedeckung des Salzstocks im Tertiär wurde die Subrosion wesentlich verringert /ZWI 04/.

Mit Hilfe der so genannten Randsenkenanalyse wurden für den Salzstock Gorleben die in Tab. 4 zusammengefassten Hebungsraten ermittelt. Das Andauern des Salzaufstiegs ergibt sich aus der geologisch langfristig wirksamen ungleichmäßigen Auflast auf den Salzstockfüßen, die Abnahme der Aufstiegsgeschwindigkeit aus der allmählichen Abwanderung der dort noch vorhandenen Salzmengen. Nach /BFS 90/ ist daher für den Salzstock Gorleben für die geologische Zukunft nicht mit einem größeren durchschnittlichen Salzaufstieg als ca. 0,01 - 0,02 mm/a zu rechnen. Findet keine Subrosion statt, bedeutet das eine natürliche Hebung der Salzstockoberfläche von 10 - 20 m in einer Million Jahren. Bei vollständiger Kompensation der Hebung durch Subrosion würde es - im Umkehrschluss - etwa 25 Mio. bis 50 Mio. Jahre dauern, bis eine etwa 500 m mächtige Salzbarriere zwischen Salzspiegel und Endlager abgelaugt wäre. Auf Grundlage dieser Werte wird ausgeschlossen, dass Subrosionsvorgänge die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salzstock Gorleben gefährden können.

Tab. 4 Hebungsraten des Salzstockes Gorleben in unterschiedlichen geologischen Zeiträumen (nach /BFS 90/)

Zeitraum	Hebungsrate [mm/a]
Miozän (Jungtertiär) bis Quartär	0,017 - 0,018
Oberpaläozän bis Untereozän (Alttertiär)	0,074
Unterkreide	0,067
Frühstadium der Diapirbildung (Beginn Kreide)	0,019 - 0,022

Darüber hinaus konnten für den Zeitraum der letzten rund 130.000 Jahre über der Salzstruktur Gorleben-Rambow mit geologischen Methoden keine Subrosions- oder Senkungsbewegungen nachgewiesen werden. Da sich die geologischen Verhältnisse im Deckgebirge des Salzstocks und an dessen Salzspiegel in diesem Zeitraum ebenfalls nicht mehr grundlegend verändert haben, wird für die Zukunft gefolgert, dass Subrosion zwar möglich, aber allenfalls sehr gering sein wird /ZWI 04/. Neuere Ergebnisse zu Zeiträumen und dem Ausmaß der Subrosion im Quartär sind in Tab. 5 zusammengefasst.

Am Standort des ERA Morsleben bei Helmstedt fanden - nachdem der Salinarkörper durch Abtragung der Deckschichten in das Ablaugungsniveau geraten ist - Subrosionsprozesse statt, die zunächst mit Scheitelgrabenbildungen begannen und später zur Ausbildung einer 500 m bis 1.000 m breiten und bis zu 240 m tiefen Subrosionswanne führten. In diese Depressionen wurde während der Oberkreide und im Alttertiär Abtragungsschutt von den umgebenden Hochgebieten sedimentiert. Nach einer vorübergehenden Unterbrechung der Subrosion im Zeitraum Untereozän bis Mitteleozän fand nach Abräumung des Alttertiärs im späten Tertiär und im Quartär wieder Subrosion statt, die bis in die Gegenwart anhält. Eine Bilanzierung der vorhandenen Salzvolumina im Vergleich mit der ursprünglich vorhandenen Primärmächtigkeit zeigt, dass 73 % des mobilen Salzes im Einzugsgebiet der Struktur in der Umgebung des ERAM gelöst bzw. erodiert wurde. Die heutige Salzstruktur besitzt mit durchschnittlich 490 m eine geringere Mächtigkeit als die Primärmächtigkeit des Zechsteins. Es handelt sich also bei der Allertalstruktur nur um ein rudimentäres Restvorkommen der ursprünglichen Salzmenge in einer tektonischen Spalte. Das heutige Hutgesteins-Volumen repräsentiert nur den Rückstand von ca. 1/3 des über die Spalte verlorengegangenen Salzes. Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich in der Erosion dieser Salzmenge im

Zeitraum des stärksten Heraushebens und der flächenhaften Abtragung in der hohen Oberkreide und im älteren Tertiär /BGR 04/, /LIP 98/.

Tab. 5 Übersicht zu Zeiträumen und Ausmaß der Subrosion im Quartär im Gebiet des Gorlebener Salzstocks (modifiziert nach /ZWI 04/ und /KÖT 07/)

ca. Alter (Mio a)	Stratigraphie	Subrosionsphasen / -raten
0,13	Holozän Weichsel-Kaltzeit Eem-Warmzeit	Geologisch nicht nachgewiesen mögliche Subrosionsrate: 0,01 - 0,05 mm/a
0,25	Saale-Kaltzeit	Subrosive Absenkung der Holstein-Ablagerungen im mittleren zentralen Salzstockgebiet um ∅ 25 m Subrosionsrate: 0,2 mm/a, max. 0,4 mm/a
0,35	Holstein-Warmzeit	Nicht nachgewiesen
0,50	Elster-Kaltzeit	Tiefenerosion bis -290 m NN partielle Freilegung der Hutgesteinsoberfläche Bildung einer Hutgesteinsbrekzie
0,90	Cromer-Komplex Bavel-Komplex Menap-Komplex	Subrosive Absenkung der Hutgesteinsoberfläche um ∅ 57 m Subrosionsrate: 0,1 - 0,2 mm/a

Fazit

Durch Erosions- und Subrosionsprozesse können insbesondere geologische Barrieren eines Endlagers in ihrer Wirksamkeit beeinträchtigt, im Extremfall sogar bereichsweise entfernt werden. Durch ausreichende Tiefenlage eines Endlagers, ausreichende Mächtigkeit des Wirtsgesteins und des Deckgebirges sowie Analyse der geologischen Entwicklung eines Standortes kann jedoch eine potenzielle Gefährdung minimiert, gegebenenfalls sogar vollständig ausgeschlossen werden. Bei einem Standort mit weitgehend abgeschlossenem Salzaufstieg ist das Subrosionsrisiko signifikant reduziert.

2 Geländeuntersuchungen

Geländeuntersuchungen dienen dazu, einen Standort hinsichtlich seiner geologischen, hydrogeologischen und hydrochemischen Eigenschaften zu erkunden, seine Eigenschaften als natürliche Barriere zu charakterisieren und auf dieser Grundlage letztlich eine günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen. Zu dieser günstigen geologischen Gesamtsituation gehören u. a. eine ausreichende Tiefe und laterale Ausdehnung des Wirtsgesteins, lang währende Grundwasserverweilzeiten, kein oder ein nur begrenzter Grundwasserfluss im Endlagerhorizont, ein vorteilhafter Grundwasserchemismus sowie insgesamt günstige geochemische Verhältnisse, die geeignet sind, eventuell gelöste Radionuklide oder andere Schadstoffe entlang eines denkbaren Ausbreitungspfades durch Sorption zu retardieren. Nach /IAE 05/ sollen geologische Formation und Tiefe die Isolation des Abfalls von der Biosphäre und vom Menschen für lange Zeiträume gewährleisten, wobei sowohl die natürliche Entwicklung des geologischen Endlagersystems als auch Störfälle berücksichtigt werden müssen.

Ein Standort für ein geologisches Endlager muss deshalb in einem Detaillierungsgrad charakterisiert werden, der es erlaubt, die wesentlichen Standortcharakteristika zu verstehen. Dies beinhaltet auch sowohl die Standortentwicklung in der Vergangenheit als auch - zumindest für sicherheitsrelevante Zeiträume - mögliche natürliche Entwicklungen in der Zukunft.

Die wesentlichen Komponenten einer natürlichen Barriere setzen sich folgendermaßen zusammen (nach /IAE 90/):

- Geologische Situation des Wirtsgesteins
- Umgebende geologische Formationen (deren Porenraum, Störungen und Klüfte potenzielle Ausbreitungspfade für Radionuklide mit dem Grundwasser darstellen können)
- Hydraulische Eigenschaften des Wirtsgesteins und des Deckgebirges
- Grundwasserchemismus
- Geochemische Verhältnisse

Um einen Standort hinsichtlich seiner Eignung als Endlager zu charakterisieren, sind deshalb insbesondere Kenntnisse zu folgenden Punkten erforderlich:

- Entwicklung der gegenwärtigen geologischen, hydrogeologischen, geochemischen und geomechanischen Charakteristika
- Vorhersehbare zukünftige Entwicklungen des Standortes aufgrund von beispielsweise tektonischen, klimatischen oder Erosionsereignissen
- Eventuelle Auswirkungen von Bau, Betrieb und Verschluss eines Endlagers auf die geologischen, hydrogeologischen, geochemischen und geomechanischen Charakteristika

In den nachfolgenden Abschnitten wird deshalb dargestellt, welche

- geologischen,
- geophysikalischen,
- hydrogeologischen und
- geochemischen

Untersuchungsverfahren heute zur Verfügung stehen und welche Folgerungen sich damit begründen lassen.

Am Beispiel des Gorlebener Salzstocks /BGR 90/ ist außerdem nachfolgend zusammengefasst, welche Untersuchungsmethoden im Rahmen dessen übertägiger geowissenschaftlicher Erkundung bislang zur Anwendung gekommen sind.

- Kartierungen (geologisch, photogeologisch, bodenkundlich, hydrochemisch)
- Hydrologische Untersuchungen
- Geophysikalische Untersuchungen (seismische, gravimetrische, geothermische, geoelektrische Messungen, elektromagnetische und geophysikalische Bohrlochmessungen)
- Bohrungen (Salzstockerkundung und Salzspiegelbohrungen, hydrogeologische Aufschlussbohrungen und Kernbohrungen, Grundwasser-Messstellen und Brunnen für Pumpversuche, Schachtvorbohrungen)
- Hydraulische Tests und Pumpversuche.

2.1 Geologische Untersuchungsverfahren

Die Kenntnis der geologischen Gesamtsituation an einem Standort ist unabdingbare Grundvoraussetzung für dessen Bewertung im Hinblick auf seine grundsätzliche Eignung als Endlagerstandort, die Ableitung von möglichen Szenarien und letztendlich die standortspezifische Durchführung eines Langzeitsicherheitsnachweises. Zur geologischen Untersuchung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, von denen die Wichtigsten in Tab. 6 zusammengefasst sind (siehe auch /BAR 90/, /WIL 99/).

Tab. 6 Verfahren zur geologischen Untersuchung eines Standortes

Verfahren	Aussage
Geologische Kartierung	Großräumige Verbreitung geologischer Schichten, Lagerungsverhältnisse, Mächtigkeiten, Vorhandensein von Störungen
Photogeologische Kartierung, Fernerkundung	Großräumige Strukturen, Störungen, Hinweise auf Tektonik, Schichtgrenzen
Aufschlüsse (z.B. Tunnel, Böschungen, Schächte, Stollen)	Lithologie, Stratigraphie, Probennahme für Laboruntersuchungen, Lagerungsverhältnisse
Bohrungen (Spül- und Kernbohrungen)	Lithologie, Stratigraphie, tiefenorientierte Probennahme für Laboruntersuchungen, Voraussetzung für geophysikalische Bohrlochmessungen, Voraussetzung für Grundwasser-Messstellen

Geologische Kartierung

Die wichtigste Darstellungsform geowissenschaftlicher Informationen sind Graphiken sowie zwei- und dreidimensionale Karten. Ihre Integration in Geographische Informationssysteme (GIS) ermöglicht es darüber hinaus, sie mit anderen Datenerhebungen wie geographischen, hydrogeologischen oder bodenkundlichen Informationen zu vergleichen oder zu kombinieren.

Basis jeglicher geologischen Begutachtung stellt die geologische Karte dar. Die geologische Karte ist eine flächenhafte Darstellung der an der Erdoberfläche anstehenden Gesteine, ihres geologischen Alters, ihrer relativen Lagebeziehungen und ihrer Genese sowie des geologischen Baus in einer dem Maßstab entsprechenden Informationsdichte. Die Daten für die Erstellung geowissenschaftlicher Karten werden zumeist über eine Kartierung im Gelände aufgenommen. Neben der klassischen Geländeaufnahme mit Feldbuch, Papier und Bleistift werden dabei heute verstärkt moderne Informationstechniken angewendet. Der Einsatz von GIS (Geographic Information System), GPS (Glo-

bal Positioning System) und Datenbanken unterstützt die Erfassung, Verwaltung und Darstellung der Kartierergebnisse. Die Karte erlaubt eine punktuelle, flächenhafte und räumliche geologische Zuordnung, die dem maßstabsbedingten Auflösungsgrad entspricht. Zusammen mit den dazugehörigen Schnitten ergibt sie ein flächendeckendes, in zwei- und dreidimensionaler Beziehung logisch konstruiertes und folgerichtig analysierbares Bild. Die von speziellen Fragestellungen unabhängige geologische Landesaufnahme erfolgt in der Regel im Maßstab 1:25.000 (GK 25, s. Abb. 18). Hauptzielsetzung dieses Kartenwerkes, das in der Bundesrepublik Deutschland allerdings nicht flächendeckend zur Verfügung steht, stellt die übersichtliche Darstellung wichtiger geowissenschaftlicher Fakten und Zusammenhänge dar; es bildet damit auch die Grundlage für abgeleitete Kartenwerke mit spezieller Thematik (z. B. Umweltgeologie, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, mineralische Rohstoffe) und/oder anderen Maßstäben. Übersichtskarten stellen die großräumige geologische Situation dar. Die geologische Karte ist also Informationsträger und Entscheidungshilfe für Fragen, Probleme und Lösungen, die an den geologischen Untergrund gebunden sind. Heute erlauben insbesondere digital gespeicherte Grunddaten und Karteninhalte eine Vielfalt spezieller Darstellungen, Kombinationen und Ableitungen.

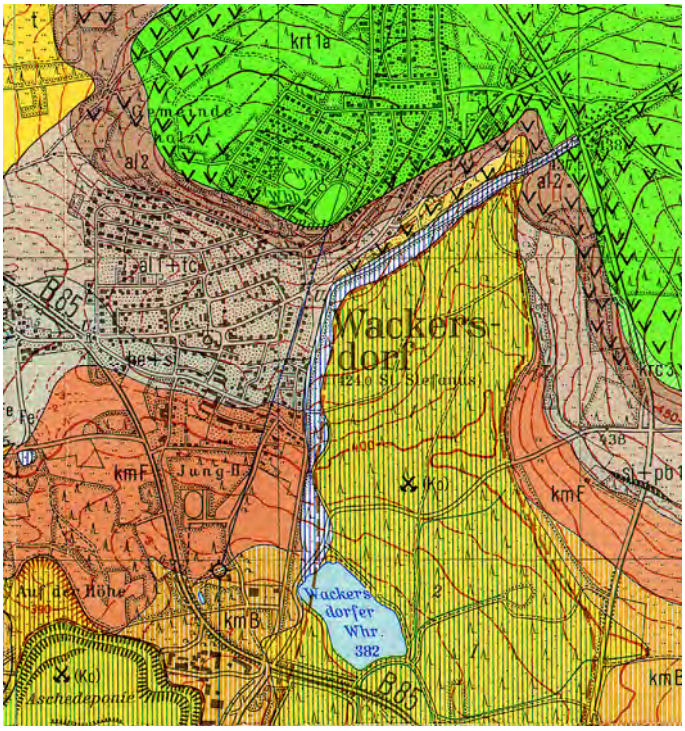


Abb. 18 Ausschnitt aus einer geologischen Karte im Maßstab 1:25.000 (GK 25, Blatt 6639 - Bayerisches Landesamt für Umwelt). Die unterschiedlichen Farben und Kürzel markieren unterschiedliche geologische Einheiten

Die Geologische Karte stellt die Gesteinseinheiten im Bereich des oberflächennahen Untergrundes unterhalb der obersten, belebten Verwitterungszone des Bodens dar. Sie weist Areale aus, die von Gesteinen gleichen Alters und gleicher petrographischer Zusammensetzung aufgebaut werden und verdeutlicht deren Verbreitung, Raumlage und Mächtigkeit. Ziel der geologischen Kartierung ist es, durch möglichst widerspruchsfreie Verknüpfung sämtlicher Befunde ein flächendeckendes, logisch aufgebautes und durch Sachdaten untermauertes Gesamtbild der abgegrenzten geologischen Einheiten sowie ihrer räumlichen und zeitlichen Abfolge zu erarbeiten, somit auch den tektonischen Bau aufzuklären und ein räumliches geologisches Modell des Untergrunds im Aufnahmegebiet zu gewinnen. Bei flachliegenden Sedimentgesteinen, Tiefengesteinen oder auch gestörten und gefalteten Sedimentgesteinen und Metamorphiten ist unmittelbar aus der Karte nur eine zweidimensionale Verbreitung der Gesteinskörper abzuleiten. Durch Kombination des Oberflächenbildes mit der Topographie, der Ausstrichbreite der Schichten, ihrer Mächtigkeit und ihrem Einfallen (Lagerungsverhältnisse) lassen sich aber mittelbar Angaben über den geologischen Bau des Untergrundes bis in mehrere 100 m Tiefe gewinnen. Ein einfaches Beispiel hierzu ist in Abb. 19 dargestellt. Eine geologische Übersichtskarte ist beispielhaft für den Raum Gorleben in Abb. 20 wiedergegeben.

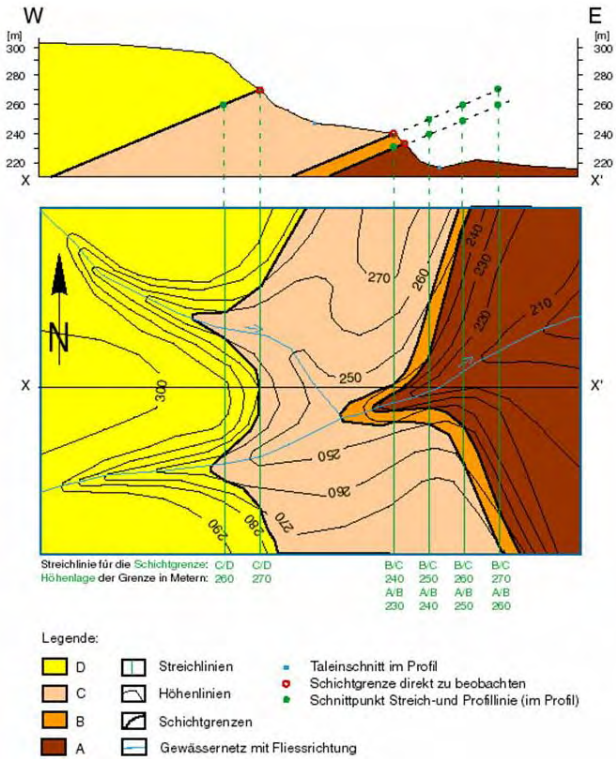


Abb. 19 Konstruktion eines geologischen Profils mit Hilfe einer geologischen Karte /ULM 06/

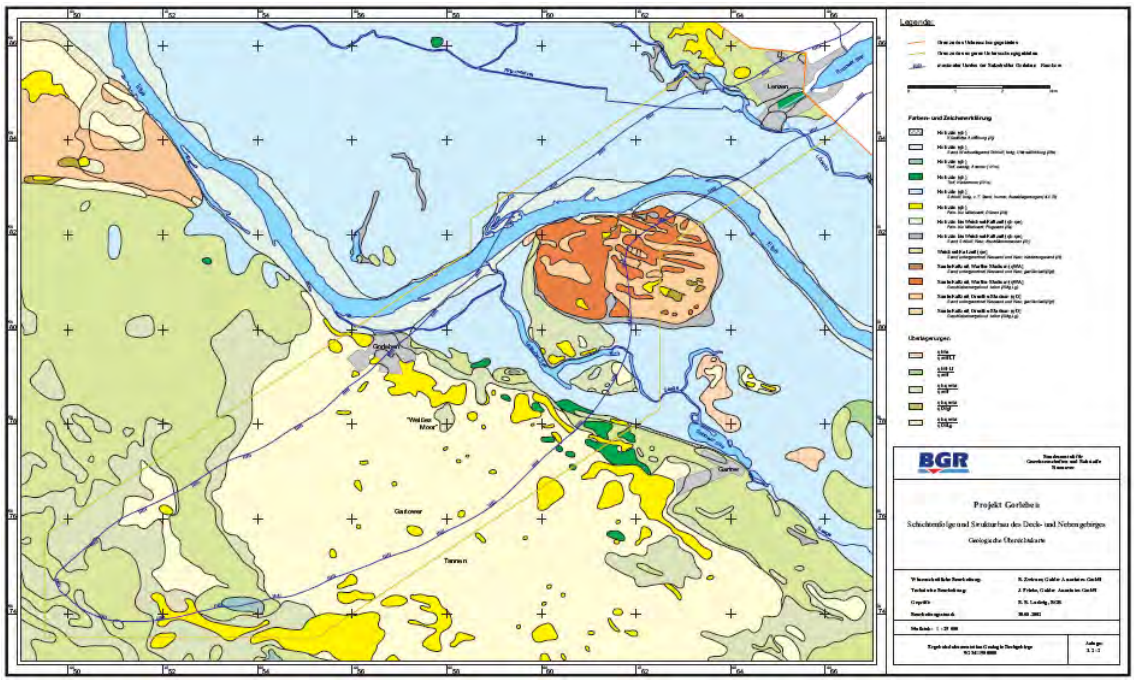


Abb. 20 Geologische Übersichtskarte der Schichtenfolge und des Strukturbaus des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben, Maßstab (im Original) 1:25.000 /ZIR 03/

Photogeologische Kartierung, Fernerkundung

Die geologische Kartierung basiert zumeist auf direkten Geländebeobachtungen und bezieht darüber hinaus Informationen aus Aufschlüssen, flachen Bohrungen etc. ein (ggf. auch Laboruntersuchungen), die für das jeweilige Kartiergebiet verfügbar sind oder aber im Rahmen der Kartierung angelegt bzw. durchgeführt wurden. Eine Ergänzung hierzu stellen die photogeologische Kartierung und die Fernerkundung dar, die ohne direkten Kontakt zu den Untersuchungsobjekten mit Luft- und Satellitenbildern sowie dem Einsatz von Radargeräten, Lasern und Infrarot-Detektoren arbeiten, um Informationen über Morphologie, Struktur, Lithologie und chemische Zusammensetzung der obersten Erdkruste zu erhalten. Mit deren Hilfe lassen sich beispielsweise großräumige Strukturen, Störungen, Schichtgrenzen und Hinweise auf tektonische Bewegungen ermitteln, die im Gelände nicht direkt zu erkennen sind (Abb. 22).

Die Photogeologie basiert auf der Auswertung photographischer Aufnahmen der Erdoberfläche aus Flugzeugen oder Satelliten im Hinblick auf geologische Strukturen und Schichtgrenzen, die sich als Photolineamente (z. B. einzelne Störungen) oder Photolineationen darstellen. Abb. 21 zeigt als Beispiel das nordwestliche Sattelende des Asse-Höhenzuges in SE-Niedersachsen. Die im Bereich des Höhenzuges selbst gut zu

kartierenden geologischen Einheiten lassen sich am NW-Ende der Struktur nicht mehr mit hinreichender Genauigkeit weiterverfolgen. Die Luftbildauswertung erlaubt hier eine genaue Verfolgung des Schichtenverlaufes und auf dieser Grundlage eine Verbesserung der dreidimensionalen Vorstellung dieser geologischen Struktur.

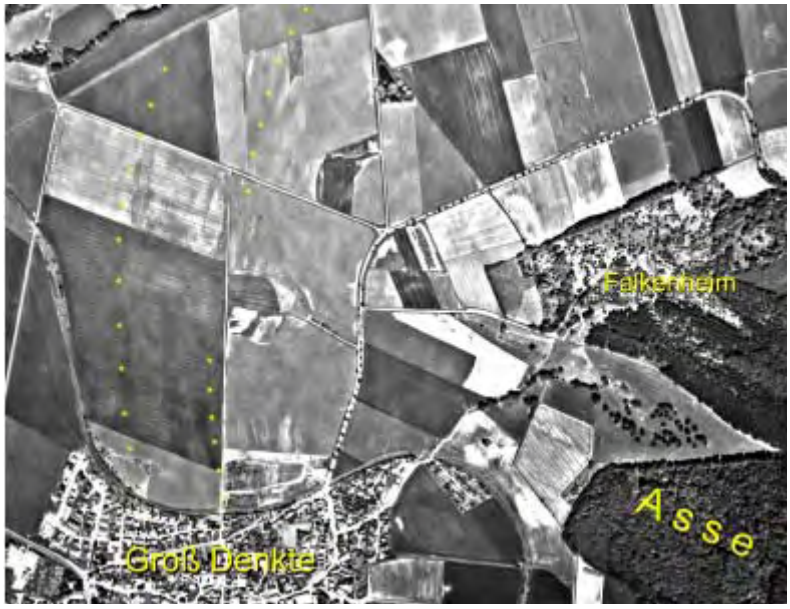


Abb. 21 Umlaufendes Streichen am nordwestlichen Sattelende des Asse-Höhenzuges (SE-Niedersachsen) im Luftbild /SCH 02/

Abb. 22 Reliefausdruck einer größeren Störung im Grundgebirge (Luftbild). Weniger bedeutende Störungen und Klüfte sind durch geradlinige Vegetationsreihen angedeutet /KRO 67/

Unter Fernerkundung (engl. remote sensing) werden alle Verfahren verstanden,

- die sich mit dem Beobachten, Speichern, Kartieren und Interpretieren bzw. Klassifizieren von Erscheinungen auf der Erdoberfläche (einschließlich der Meere sowie in der Atmosphäre oder auf der Oberfläche anderer Himmelskörper) befassen,
- die ohne direkten physischen Kontakt des Aufnahmesystems, des so genannten Sensors, mit dem zu erkundenden Objekt arbeiten,
- die das Beobachtungsobjekt i. d. R. über eine Erstreckung von mehreren hundert Metern abbilden (nicht: Nahbereichs-Photogrammetrie), und
- die zur Gewinnung von Informationen die elektromagnetische Strahlung benutzen, die vom beobachteten Objekt abgestrahlt wird.

Oft wird die Aufzeichnung von Gravitationsfeldern, magnetischen oder elektrischen Feldern sowie von akustischen Wellen (Sonar) nicht dem Begriff Fernerkundung zugeordnet. Für die Geowissenschaften liegen die Anwendungsbereiche der Fernerkundung in ihren unterschiedlichen Teilbereichen, wie z. B.:

- Kartographie: als Grundlage von topographischen Karten und Landnutzungskarten in wenig erforschten Gebieten (mittlere bis kleine Maßstäbe)
- Stereophotogrammetrie: Erstellung von digitalen Höhenmodellen sowie, bei höchstauflösenden Daten, Erstellung von Stadtplänen
- Geologie und Petrographie: visuelles Erkennen von Störungs- und Zerrüttungslinien, in semiariden/ariden Gebieten Differenzierung von verschiedenen Gesteinsbereichen
- Geomorphologie: visuelles Erkennen des morphologischen Formenschatzes
- Landwirtschaft: Programme zu Ertragsaussichten, Anbauarten-Differenzierung, Anbau-Kontrollen
- Forstwirtschaft und Global Change-Forschung: Deforestation, Waldschadensforschung, Desertifikation, globaler saisonaler Vegetationswandel, Urbanisierung
- Katastrophenmonitoring, -management: Waldbrände (Ausmaß der Zerstörung), Vulkanaktivität (Vorhersage, Risikoanalyse und Überwachung), Erdbeben (Risikoanalyse, Höhenänderungen), Umweltverschmutzung (Öleinleitung auf den Weltmeeren)

Aufschlüsse und Bohrungen

Unter Aufschluss (auch: Anriss, Ausbiss) wird eine Stelle im Gelände verstanden, an der ein Gestein unverhüllt zutage tritt. Aufschlüsse können durch natürliche geologische Prozesse wie beispielsweise Abtragung (Steilufer, Schichtstufen etc.) oder menschliche Tätigkeit (Bau-, Sand- und Kiesgruben, Straßen- und Bahneinschnitte, Schurfgräben, aber auch Tunnel und im Bergbau zusätzlich Schächte und Stollen etc.) entstehen. Ein Aufschluss ermöglicht eine unmittelbare Untersuchung des geologischen Körpers und seiner Struktur sowie dessen Beprobung für weiterführende Laboruntersuchungen (z. B. chemisch-mineralogische Zusammensetzung, hydraulische Durchlässigkeit, Porosität, Festigkeit).

Ein Endlager für radioaktive Abfälle ist in der Bundesrepublik Deutschland ausschließlich in tiefen geologischen Formationen konzipiert. Das vorgesehene Wirtsgestein sowie alle umgebenden und überlagernden geologischen Formationen (incl. ihrer räumlichen Ausdehnung, Struktur, chemisch-mineralogischen Zusammensetzung, Festigkeitseigenschaften, Fluidgehalte und -zusammensetzung etc.) müssen deshalb mit Hilfe von Bohrungen erkundet und untersucht werden. Bohrungen dienen also meist dem Aufschluss des verdeckten Untergrundes.

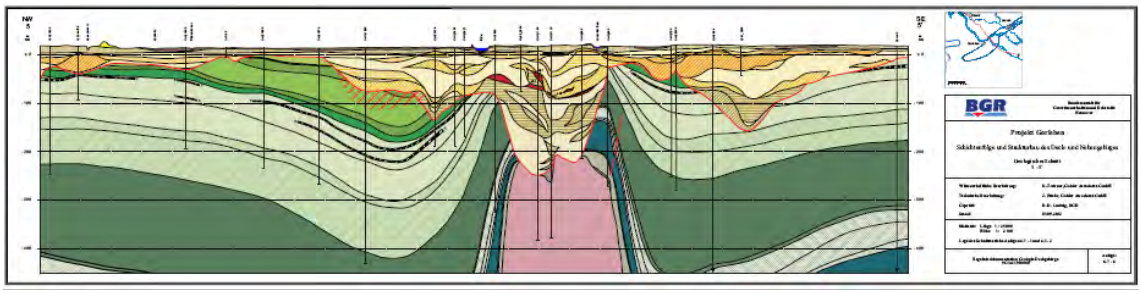


Abb. 23 Projekt Gorleben: Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- und Nebengebirges des Salzstockes, Geologischer Schnitt, 5 - 5' /ZIR 03/

So wurde beispielsweise im Rahmen der übertägigen geologischen Erkundung des Salzstockes Gorleben von 1979 bis 1998 eine Vielzahl von Bohrungen abgeteuft. Die Geländeuntersuchungen erstreckten sich im Wesentlichen über zwei Bohrkampagnen: Im Untersuchungsgebiet Gorleben-Süd wurden von 1979 bis 1985 insgesamt 219 Aufschlussbohrungen niedergebracht, im Untersuchungsgebiet Dömitz-Lenzen zwischen 1996 und 1998 insgesamt 62 Aufschlussbohrungen (Abb. 23, Abb. 24). Insgesamt wurden 281 Projektbohrungen realisiert. Weitere 175 Bohrungen sind sog. Fremdboh-

rungen, die für die geologischen und strukturgeologischen Interpretationen zusätzlich ausgewertet wurden.

Bohrungen enthalten primäre Daten über den geologischen Untergrund und geben punktuell exakte Auskunft über die Abfolge und Eigenschaften der Gesteinsschichten. Sie dienen daher vor allem den Geowissenschaftlern als Grundlage für die Bearbeitung angewandter und wissenschaftlicher Fragestellungen.

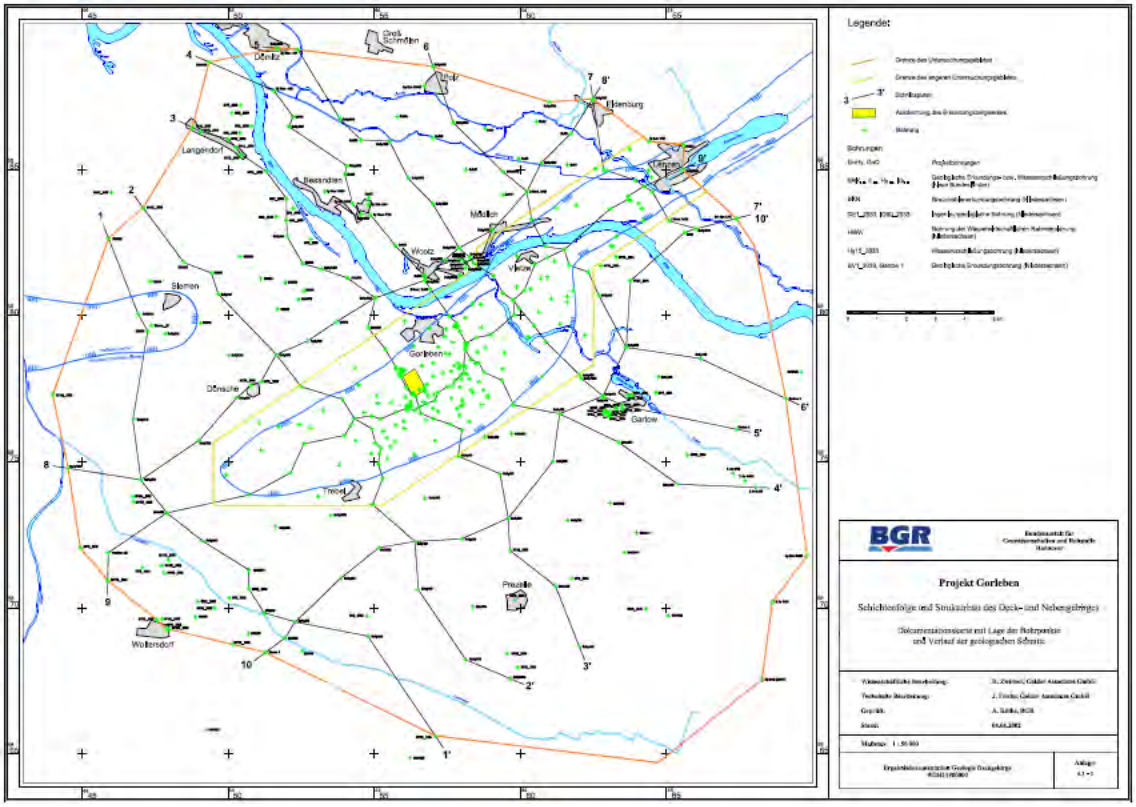


Abb. 24 Projekt Gorleben: Dokumentationskarte mit Lage der Bohrpunkte und Verlauf der geologischen Schnitte, Maßstab (im Original) 1:50.000 /ZIR 03/

Die zur Verfügung stehenden Bohrverfahren sind sehr vielfältig, basieren aber auf wenigen grundlegenden Prinzipien. Grundsätzlich wird zwischen drehenden und schlagenden Bohrverfahren unterschieden (Tab. 7).

Tab. 7 Bohrverfahren - Übersicht (nach /BEN 84/)

Drehende Bohrverfahren	Schlagende Bohrverfahren
Drehbohren mit Spülung	Seil-Freifallbohren
- Druckspülbohren	Hammerbohren

- Saugspülbohren - Kernbohren	Rammkernbohren
	Schlauchkernbohren
Drehbohren ohne Spülung	

Bei drehenden Bohrverfahren trägt ein rotierender Bohrkopf Gestein ab. Der Bohrvorgang wird häufig durch Spülen unterstützt. So wird beim Druckspülbohren Spülflüssigkeit durch das Bohrgestänge in den Untergrund gedrückt und transportiert dann außerhalb des Bohrgestänges Bohrgut nach oben. Beim Saugspülbohren dagegen werden Spülflüssigkeit und Bohrgut durch das Bohrgestänge abgesaugt. Die Spülflüssigkeit kommt hier von außerhalb des Bohrgestänges. Beide Verfahren liefern so genannte Spülproben (klein gemahlene Gesteinsbruchstücke), die lediglich eine grobe Zuordnung zu lithologischen Einheiten sowie Tiefenzuordnung erlauben. Beim Kernbohren dagegen wird ein Bohrkern, der von der Bohrkrone freigebohrt wurde, im hohlen Bohrgestänge aufgenommen und steht für nachfolgende Laboruntersuchungen zur Verfügung (Abb. 25, Abb. 26).

Abb. 25 Bohrgerät für Drehbohren, im Vordergrund Kernrohr (links); Kernkisten mit Bohrkernen (rechts), unterschiedliche geologische Einheiten lassen sich hier beispielsweise schon aufgrund ihrer Farbe differenzieren

Bei schlagenden Bohrverfahren wird der Bohrkopf schlagweise in den Untergrund getrieben. Beim Seil-Freifallbohren werden der Bohrkopf und Gestänge wiederholt an einem Seil hinaufgezogen und fallengelassen. Beim Hammerbohren wird ein Bohrkopf,

der so genannte Bohrhammer, mit hoher Schlagfrequenz durch hydraulischen Druck in den Untergrund getrieben. Auch mit schlagenden Bohrverfahren lassen sich Bohrkerne gewinnen: Beim Rammkernbohren wird ein Rohr in den Boden geschlagen, das anschließend gefüllt herausgezogen wird. Eine Erweiterung dieses Verfahrens ist das Schlauchkernbohren, hierbei wird der von einem Schlagrohr freigelegte Bohrkern in ein Kunststoffrohr geschoben.

Besonderen technischen Aufwand erfordert die Gewinnung von wenig gestörten bzw. orientierten Kernen, mit deren Hilfe beispielsweise die genaue Lage einer Schichtung bzw. einer Trennfläche ermittelt werden kann.

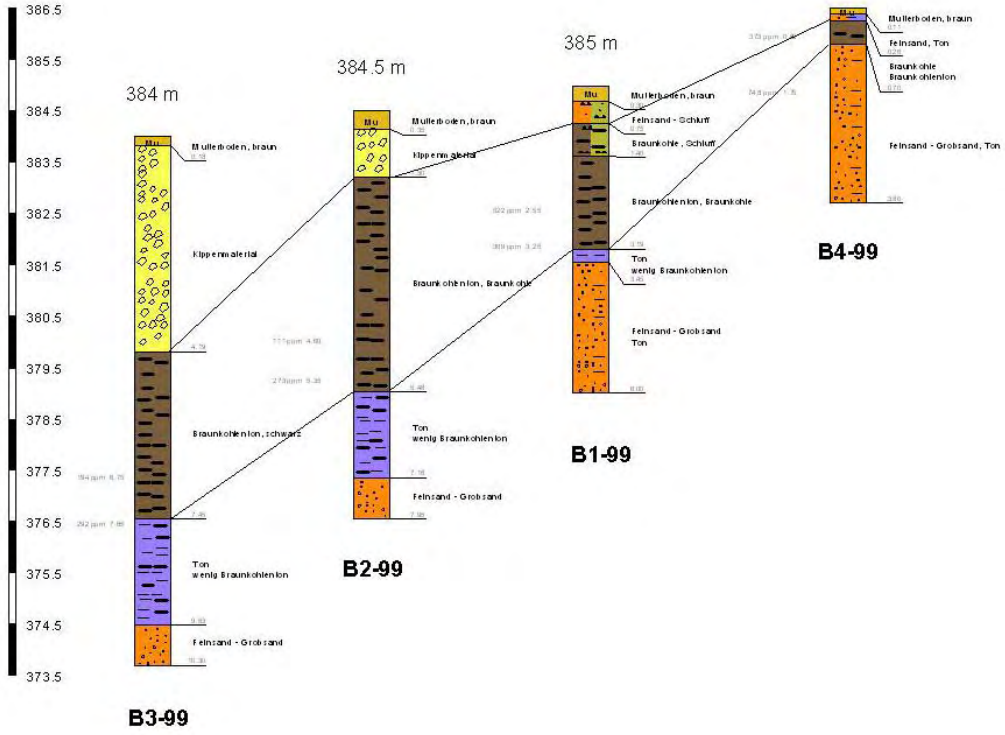


Abb. 26 Aus Kernbohrungen gewonnene Informationen zur Lithologie in einem Untersuchungsgebiet und Korrelation der Informationen zur Entwicklung einer 2D-Profilebene. Für die Entwicklung einer räumlichen Vorstellung der geologischen Körper (3D-Modell) sind zusätzliche (Bohr-) Informationen erforderlich, die in einer Ebene senkrecht zur obigen Profilebene liegen

Neben der Information über Lithologie und Schichtenabfolge sowie Gewinnung von Kernproben werden Bohrungen auch zur Anwendung verschiedener Bohrlochmessungen abgeteuft bzw. genutzt. Darüber hinaus können Bohrungen bei Bedarf auch zu

Grundwasser-Messstellen ausgebaut bzw. umgerüstet werden. Schächte stellen in diesem Zusammenhang besonders groß dimensionierte Bohrungen dar, deren Wände direkt kartiert werden können (Abb. 27)

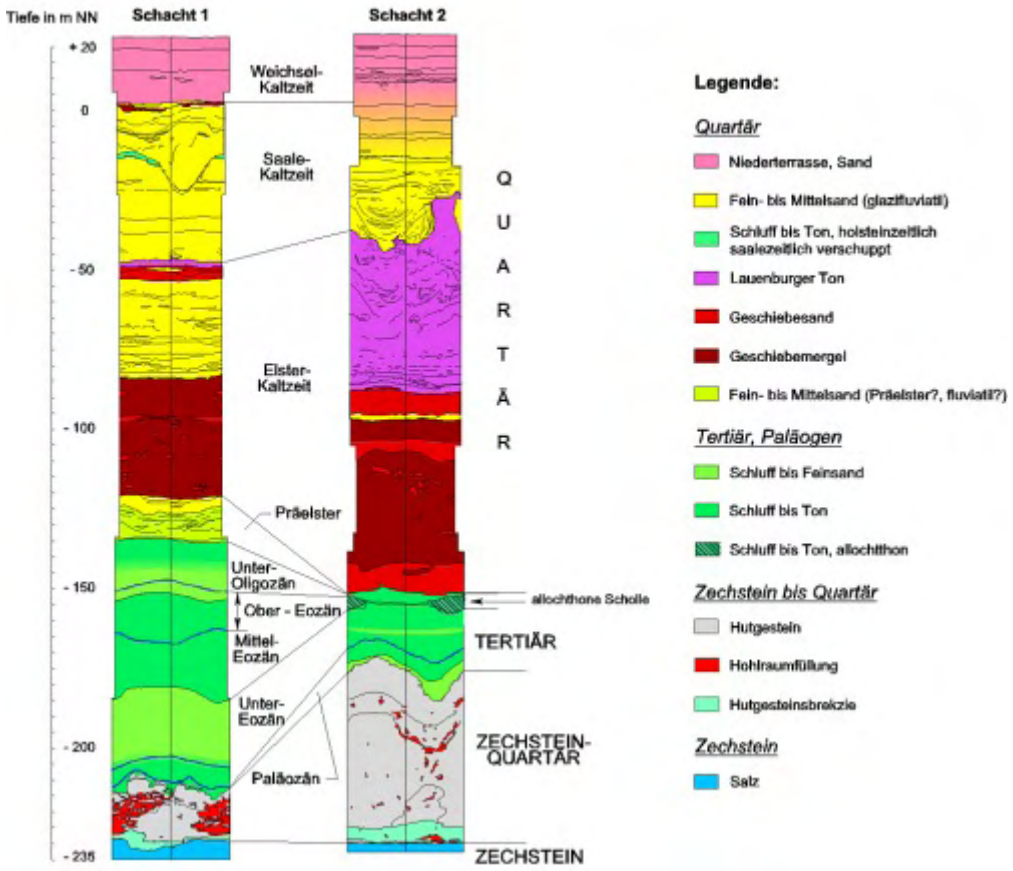


Abb. 27 Vereinfachte Stoßkartierung der Schächte Gorleben 1 und 2 /BGR 08/

Besondere Aspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle

Neben der Bereitstellung von unverzichtbaren Informationen zum Aufbau und zur Zusammensetzung eines geologischen Körpers stellen Bohrungen aber auch immer einen Eingriff in das geologische Gesamtsystem dar. Im Extremfall können Bohrungen beispielsweise eine geologische Barriere - lokal und zeitlich begrenzt - in ihrer Wirksamkeit beeinträchtigen, indem sie hydraulische Verbindungen zwischen unterschiedlichen Schichten schaffen. Bereits vorhandene bzw. im Rahmen einer Standorterkundung konzipierte Bohrungen müssen deshalb - sofern das Wirtsgestein oder umgebende / überlagernde geologische Barrieren betroffen sind - hinsichtlich ihrer potenziellen Auswirkungen auf das Isolationsvermögens eines Endlagers bewertet werden. Bei Bedarf sind dann beispielsweise geeignete Verfüll-/Abdichtmaßnahmen zu realisieren.

2.2 Geophysikalische Untersuchungen

Geophysikalische Untersuchungsmethoden werden zur Erkundung des Untergrundes eingesetzt. Die dabei angewandten Messverfahren sind geeignet, relevante physikalische Parameter von der Oberfläche aus zu ermitteln, ohne in den Untergrund einzudringen. Eine Ausnahme bilden die geophysikalischen Bohrlochmessungen, bei denen die Notwendigkeit besteht, den zu untersuchenden Untergrundbereich über Bohrungen zu erschließen.

Aufgabe der geophysikalischen Messmethoden ist es, ein räumliches Modell des Untergrundes zu erstellen /KNÖ 97/. Dazu gehören u. a. die Bestimmung der räumlichen Ausdehnung geologischer Strukturen sowie die Ermittlung von Schichten, Verwerfungen, Störungszonen und Kluftzonen.

Eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz geophysikalischer Methoden besteht darin, dass sich die jeweiligen zu ermittelnden physikalischen Materialparameter der einzelnen Bereiche des Untergrunds, wie z. B. seismische Geschwindigkeiten, Resistivitäten, Dichten und Magnetisierung, in ausreichendem Maße unterscheiden.

Für die geophysikalische Erkundung steht eine Vielzahl von Messverfahren zur Verfügung, die jede für sich auf die Bestimmung einzelner Materialparameter abzielt. Für eine gesicherte Aussage ist in der Regel die Kombination unterschiedlicher, speziell auf die Fragestellung abgestimmter Verfahren notwendig.

Neben den geophysikalischen Messverfahren, die von der Oberfläche aus eingesetzt werden und keinen Aufschluss des Untergrundes benötigen, werden zur gezielten Ermittlung der geologischen und strukturellen Beschaffenheit des Gebirges im Umfeld eines potenziellen Endlagerstandortes geophysikalische Bohrlochmessungen durchgeführt. Bei diesen Bohrlochmessungen kommen spezielle, für den Einsatz in Bohrungen modifizierte geophysikalische Messverfahren zur Anwendung, die ebenfalls darauf abzielen, die Materialparameter des Untergrundes zu ermitteln. Da hierbei die Parameter in unmittelbarer Nähe der geologischen Formation, d. h. in situ, bestimmt werden können, geht die Aussagefähigkeit über die der Oberflächengeophysik hinaus; derartige Verfahren sind deshalb ein wichtiges Mittel zur Beurteilung der Eignung eines Standortes für die Errichtung eines Endlagers. Wie bei der Oberflächengeophysik ist es aber

auch hier notwendig, einzelne Messverfahren abgestimmt auf die jeweilige Zielsetzung zu kombinieren.

Nachfolgend wird auf relevante geophysikalische Methoden bezüglich ihrer Zielsetzung und Messverfahren sowie deren prinzipiellen Auswertung im Einzelnen eingegangen, wobei zwischen den von der Erdoberfläche ausgeführten geophysikalischen Verfahren und den in Bohrlöchern angewandten Methoden (Bohrlochgeophysik) unterschieden wird.

2.2.1 Seismik

Bei einer Erschütterung eines ideal elastischen Körpers breiten sich in diesem Körper seismische Wellen aus. Die auftretenden elastischen Deformationen können zu einer Volumenänderung, wie Kompression oder Dilatation, und einer reinen Formänderung, einer Scherung, führen. Eine an einem Punkt hervorgerufene Deformation pflanzt sich in Form einer Raumwelle, als Kompressions- und Scherwellen, sowie als Oberflächenwellen fort, wobei die Kompressionswellen in einem Medium eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit als die Scherwellen aufweisen /HAA 58/, /PAR 75/.

Die Seismik ist das wichtigste Erkundungsverfahren der Geophysik. Die Aufgabe der Seismik besteht darin, Informationen über den strukturellen und lithologischen Aufbau der Gesteinsschichten des Untergrundes zu liefern. Hierbei wird der Verlauf seismischer Wellen beim Auftreffen auf Grenzflächen, z. B. Schichtgrenzen zwischen zwei unterschiedlichen Gesteinstypen, ermittelt. Aus den Laufzeiten der Wellen und den jeweiligen gesteinstypischen seismischen Geschwindigkeiten können Teufe, Lage sowie Neigung von Schichten, Verwerfungen, Störungen und Kluftzonen bestimmt werden. Weiterhin sind Aussagen über die Schichtmächtigkeiten möglich /HAA 58/, /TEL 90/, /MIL 78/, /MIL 87/, /MEI 77/, /KNÖ 97/, /BEB 97/. Eine Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz seismischer Verfahren besteht darin, dass die seismischen Geschwindigkeiten der einzelnen Schichten mit der Tiefe zunehmen.

Für die Auswertung der seismischen Messungen zur Erstellung eines Tiefenlinienplans ist die Kenntnis der seismischen Geschwindigkeiten (Schalllaufzeiten) der Gesteinsformationen notwendig. Sie können zum einen an Bohrkernen im Labor oder zum andern aus gezielten bohrlochseismischen Messungen gewonnen werden.

Verfahren

Bei der Seismik wird zwischen der Reflexions- und der Refraktionsseismik unterschieden. In Abb. 28 ist das Prinzip beider Verfahren dargestellt. Die von Grenzschichten reflektierten Signale bei den von der Erdoberfläche aus durchgeführten seismischen Messungen können allerdings nur dann gut an der Erdoberfläche abgebildet werden, wenn die Neigung der Grenzschichten nicht zu steil ist. In solchen Fällen kann es vorkommen, dass die von der Oberfläche ausgeführten Verfahren keine ausreichenden Detailinformationen liefern. In derartigen Fällen kann der Einsatz der Bohrlochseismik angezeigt sein /KNÖ 97/.

Neben den für die seismischen Untersuchungen interessierenden refraktierten und reflektierten Wellen treten auch Oberflächenwellen unterschiedlicher Typen (Rayleighwelle, Lovewelle) auf, die aber aufgrund ihrer geringen Energie nicht zur Erkundung des tieferen Untergrundes beitragen und auf technischem Wege unterdrückt werden /HAA 58/. Bei oberflächennahen Erkundungen können allerdings Oberflächenwellen z. B. zur Auffindung von Störungen, die sich in geringen Tiefen befinden, beitragen. In diesem Zusammenhang ist noch die direkte Welle zu nennen, die sich nach erfolgter seismischer Erregung mit der seismischen Geschwindigkeit der obersten Schicht ausbreitet und somit Informationen über die Geschwindigkeit des Schichtpakets liefert.

In Abb. 28 wird das Prinzip der in der Seismik hauptsächlich angewandten Verfahren der Refraktions- und der Reflektionsmethode näher erläutert.

Refraktionsseismik

Die Refraktionsseismik wird zur Ermittlung der Tiefe einer Schichtgrenze sowie der seismischen Geschwindigkeit dieser Schichten angewandt, so dass Aussagen über die Struktur des Untergrundes getroffen werden können. Das Verfahren der Refraktionsseismik beruht auf der Ausbreitung einer refraktierten Welle, der so genannten Kopf- oder Mintropwelle, entlang der Grenzfläche zwischen Schichten unterschiedlicher seismischer Impedanzen. Die seismische Impedanz I, auch Schallhärte genannt, ist durch das Produkt der Dichte der einzelnen Schichten ρ und deren seismischen Geschwindigkeit v definiert, gemäß:

$$I = \rho \cdot v$$

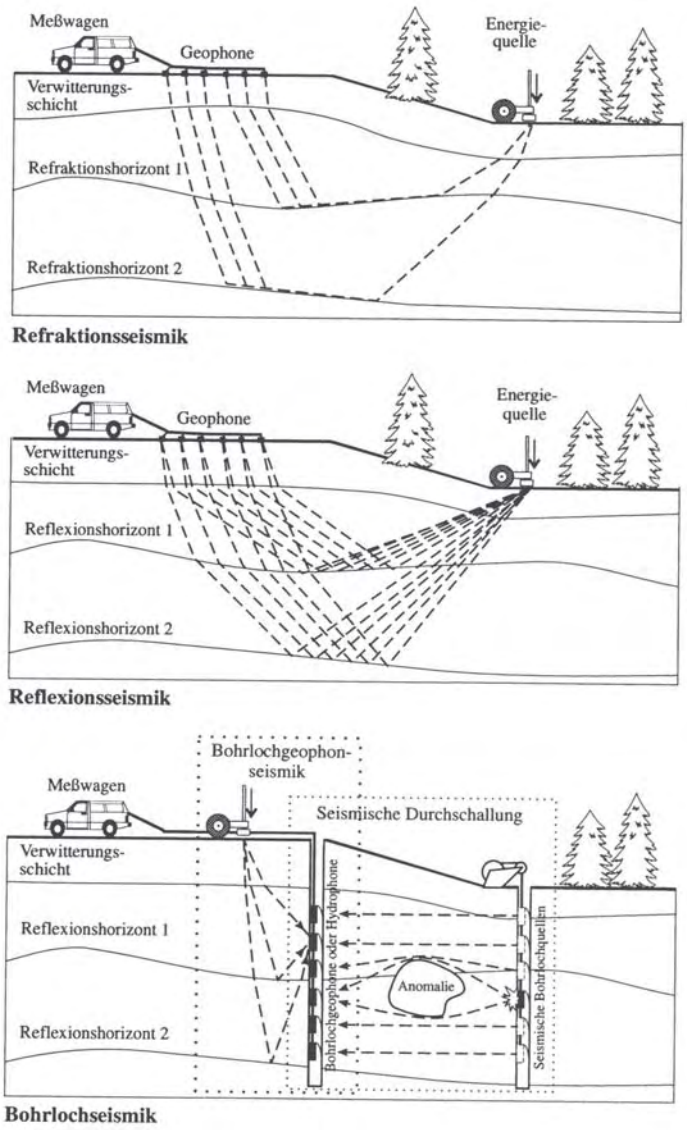


Abb. 28 Prinzip seismischer Messverfahren /KNÖ 97/

Voraussetzung für das Auftreten von Kopfwellen ist, dass die Impedanz der unteren Schicht größer ist als die Impedanz der oberen Schicht. Das ist in der Regel gegeben, wenn die Geschwindigkeit in der unteren Schicht größer ist als die der oberen Schicht. In Abb. 29 ist das Prinzip der Strahlenverläufe bei der Refraktionsseismik dargestellt.

Damit erfolgt die Ausbreitung der Kopfwelle mit der Geschwindigkeit der unteren Schicht /KNÖ 97/. Während der Ausbreitung entlang der Schichtgrenze strahlt die Welle Energie an die Oberfläche ab, die mittels Aufnehmern (Geophonen) an der Oberfläche registriert wird. Refraktierte Wellen treten im Seismogramm erst ab einer bestimmten kritischen Entfernung auf. Da diese sich mit der höheren Geschwindigkeit der unteren Schicht ausbreiten, überholt die Kopfwelle ab der Überholdistanz die direkte Welle,

die sich mit der langsameren Geschwindigkeit der oberen Schicht bewegt. Unterhalb der kritischen Entfernung, d. h. in der Nähe der Anregungsquelle tritt als erstes die direkte Welle auf. Bei der Refraktionsseismik werden die Geophone in größeren Abständen aufgestellt.

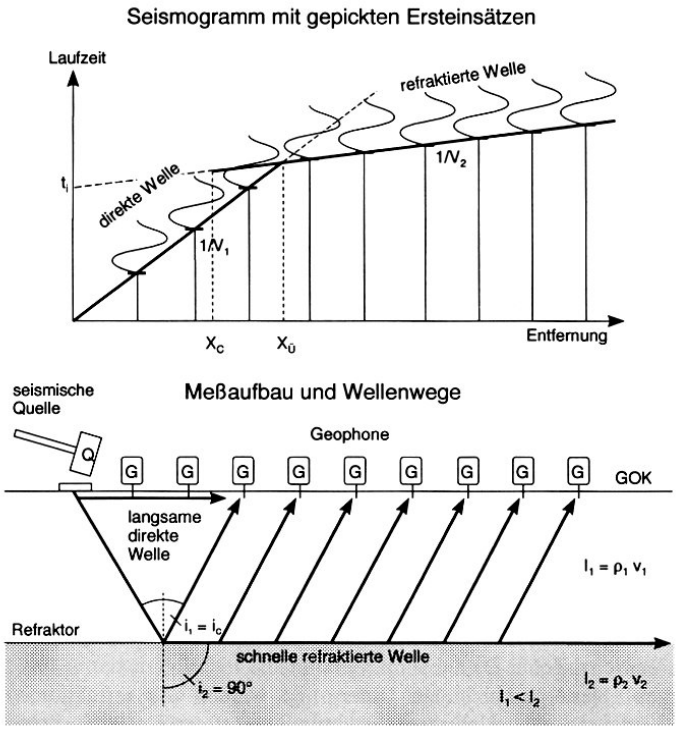


Abb. 29 Prinzipdarstellung der Refraktionsseismik. $I_{1,2}$: Impedanzen der 1. und 2. Schicht, $v_{1,2}$: seismische Geschwindigkeiten der 1. und 2. Schicht, $\rho_{1,2}$: Dichten der 1. und 2. Schicht, i_c: kritischer Winkel (Grenzwinkel der Totalreflexion), x_c: kritische Entfernung, $x_ü$: Überholdistanz /KNÖ 97/, /GGU 90/

Um insbesondere bei geneigten oder gekrümmten Schichtverläufen sowie bei lateralen Geschwindigkeitsänderungen die seismischen Geschwindigkeiten ermitteln zu können ist es notwendig, am Ende der Auslage eine zusätzliche Anregung vorzunehmen (Gegenschussverfahren) /KNÖ 97/, /MIL 87/. Aus den hieraus bestimmten Scheingeschwindigkeiten lässt sich die tatsächliche Geschwindigkeit ermitteln.

In Abb. 30 ist ein Beispiel eines Dreischichtfalls dargestellt, wie er sich in einem Seismogramm einer Refraktionsmessung mit Schuss und Gegenschuss widerspiegelt. Auf den ersten drei Geophonspuren zeichnet sich die oberflächennahe Schicht beim

Schuss und beim Gegenschuss nur in der ersten Geophonspur ab. Bei ca. 120 m ist beim Schuss der Ersteinsatz einer Zwischenschicht zu erkennen, die sich beim Gegenschuss als Knick bei ca. 100 m bemerkbar macht. Der zweite Refraktor weist beim Schuss eine wesentlich höhere Scheingeschwindigkeit und somit auch eine höhere Interzeptzeit auf als beim Gegenschuss. Das bedeutet, dass dieser Refraktor steiler ansteigt /BEB 97/.

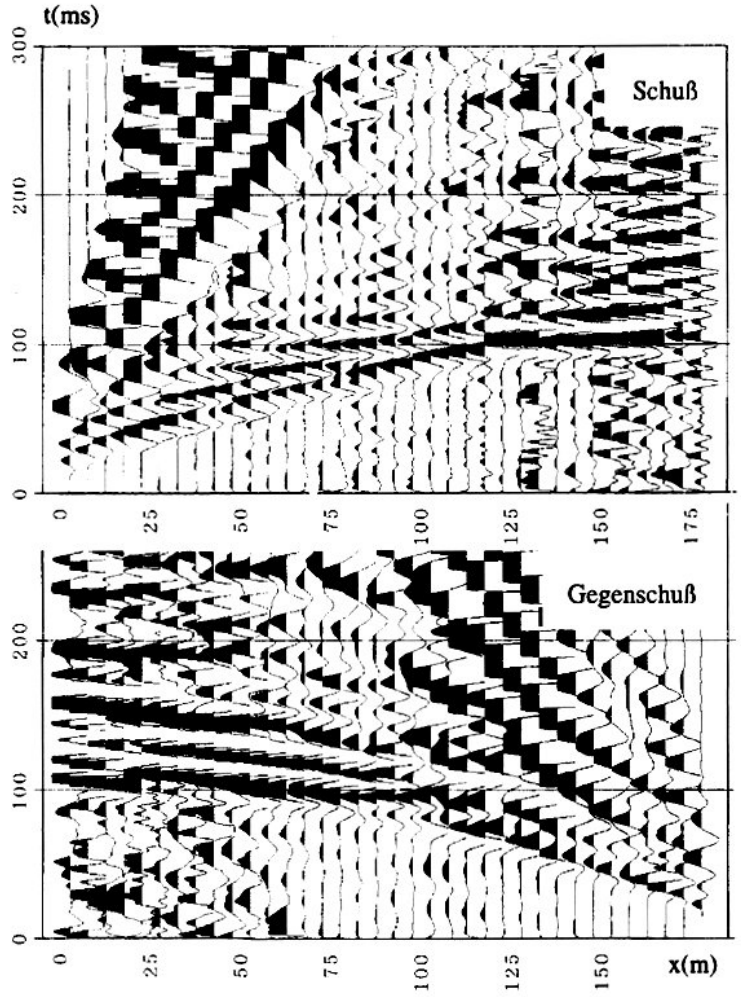


Abb. 30 Seismogramme einer Refraktionsmessung. Beispiel eines Dreischichtfalls /BEB 97/

Reflexionsseismik

Bei der Reflexionsseismik, die am häufigsten angewendet wird, werden die in den Untergrund gesandten elastischen Wellen an Schallhärtegrenzen (Reflexionshorizonten, z. B. Schichtgrenzen) reflektiert und an die Oberfläche zurückgesandt. Bei der Reflexionsseismik ist zwischen Kompressions- und Scherwellen zu unterscheiden, wobei die

Kompressionswellen eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit aufweisen als die Scherwellen. Kompressions- und Scherwellen werden auch als Longitudinal- bzw. Transversalwellen bezeichnet. Scherwellen können sowohl horizontal als auch vertikal zur Ebene der Ausbreitungsrichtung polarisiert sein, wobei es unter bestimmten Bedingungen zu Umpolarisierungen kommen kann.

Im Gegensatz zur Refraktionsseismik sind die Abstände der Geophone vom Schusspunkt bei der Reflexionsseismik geringer, um zu gewährleisten, dass es sich bei den registrierten Signalen auch um Reflexionen handelt /HAA 58/.

Normalerweise werden die Quelle und die Empfänger (Geophone) in einer Linie angeordnet (2-D-Reflexionsseismik). Die prinzipielle Aufstellung bei der 2-D-Seismik ist in Abb. 31 wiedergegeben.

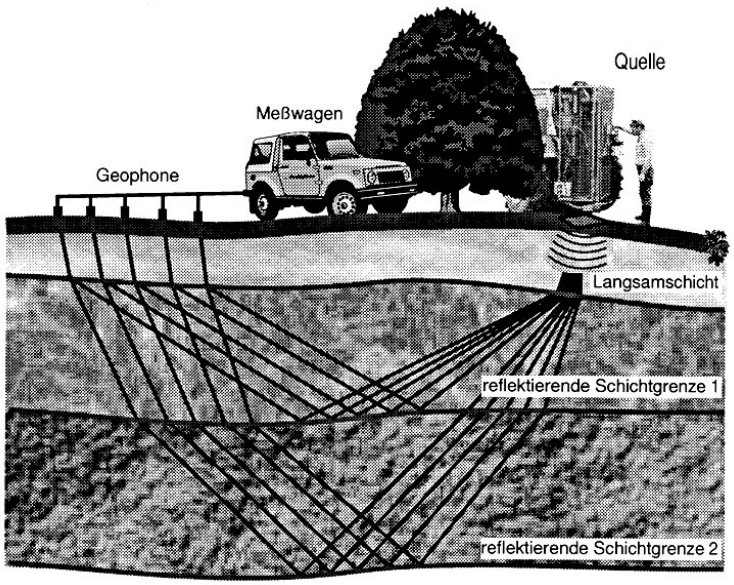


Abb. 31 Prinzip der 2-D-Reflexionsseismik /KNÖ 97/

Für eine detailliertere Erkundung des Untergrundes, insbesondere bei komplizierteren Strukturen, reichen die zweidimensionalen Messungen nicht aus. Um Zweideutigkeiten und Fehlinterpretationen, wie sie bei den 2-D-Messungen auftreten können, auszuschließen, sowie zur Darstellung der räumlichen Struktur des Untergrunds, werden aufwendige 3-D-reflexionsseismische Messungen vorgenommen /KNÖ 97/, /MIL 87/. Wie in Abb. 32 dargestellt, werden an der Oberfläche Geophone in gleichmäßigen flächenhaften Rastern angeordnet, wobei das zu untersuchende Areal in Streifen, die na-

cheinander seismisch vermessen werden, aufgeteilt wird. Die so ermittelten Daten werden in einem 3-D-Prozess ausgewertet.

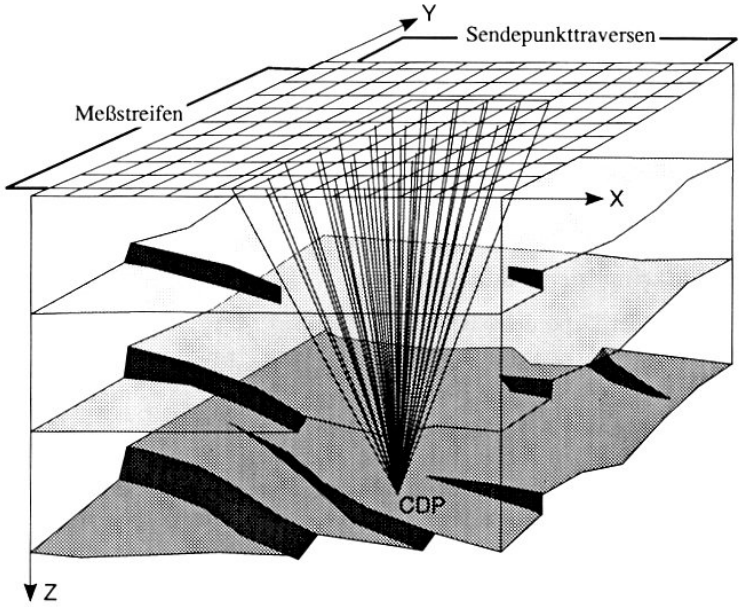


Abb. 32 Prinzip der 3-D-Reflexionsseismik (CDP: Common Data Point) /KNÖ 97/, /PRA 82/

Eine Schwierigkeit besteht darin, den Einsatz einer reflektierten Welle zu erkennen, da sie sich aus dem Störpegel der direkten Wellen meist nur schwach hervorhebt. Mit einem speziellen Datenauswerteverfahren besteht die Möglichkeit, die reflektierten Wellen herauszufiltern. Um allgemein die durch die Eigenschaften des Schwingungssystems Boden/Geophon hervorgerufenen Verzerrungen des eigentlichen Nutzsignals so weit als möglich zu beseitigen, werden Bündelungen von Geophonen, Stapelungen und andere technische Maßnahmen angewandt. Für nähere Erläuterungen wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (z. B. /MIL 87/, /KNÖ 97/, /BEB 97/, /TEL 90/, /MIL 78/, /MEI 77/).

Um aussagefähiges Datenmaterial zu erhalten, werden spezielle Schusspunkt-Geophon-Anordnungen verwendet. Hier ist die Einfachüberdeckung bzw. Zentralaufstellung zu nennen, die bis vor einigen Jahren eingesetzt wurde (Abb. 33, a). Die heute gebräuchlichere Anordnung ist die Mehrfachüberdeckung (Abb. 33, b). Bei der Mehrfachüberdeckung werden die Erreger- und die Geophonpositionen so gewählt, dass von einem Reflexionspunkt ausgehende seismische Strahlen verschiedener Strahlenwege aufgenommen werden können /MIL 87/, /MEI 77/.

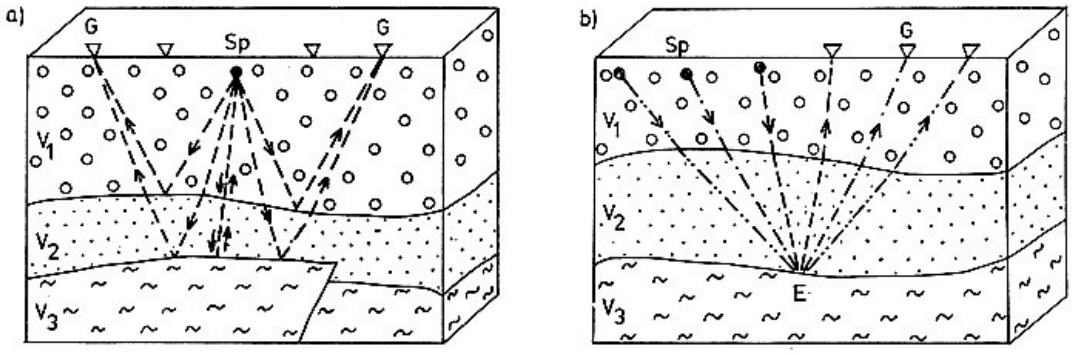


Abb. 33 Prinzip der Anordnung von Reflexionsmessungen - a) Einfachüberdeckung, Zentralaufstellung, b) Mehrfachüberdeckung. G: Geophon, Sp: Schusspunkt, v_1, v_2, v_3: Schichtgeschwindigkeiten /MEI 77/

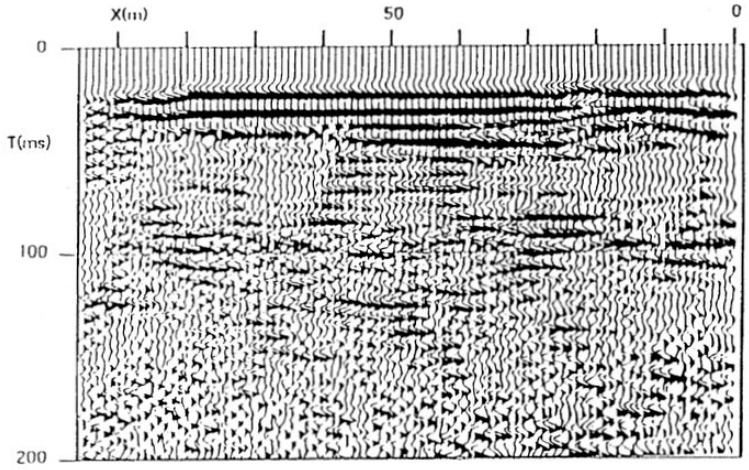


Abb. 34 Seismogramm am Beispiel einer reflexionsseismischen Stapelsektion /BEB 97/

Die Reflexionsseismik liefert, wie bereits oben aufgeführt, insbesondere Aussagen über Schichtverläufe, Schichtgrenzen, Verwerfungen, Störungen und Kluft- sowie Auflockerungszonen /KNÖ 97/.

Abb. 34 zeigt ein Beispiel eines Seismogramms, wie es sich nach Aufbereitung der Daten einer reflexionsseismischen Messung darstellt. Deutlich sind die Grenzschichten zu erkennen, die sich durch ihre Reflexionseinsätze ergeben. Die seismischen Laufzeiten von der Oberfläche senkrecht zum Reflektor und zurück sind auf der senkrechten Achse aufgetragen. Die tatsächlichen Teufen der Schichten können dann über die seismischen Geschwindigkeiten berechnet werden /BEB 97/.

Oberflächenwellenseismik

Neben den oben beschriebenen Raumwellen entstehen bei der Anregung seismischer Energie Oberflächenwellen, die sich je nach der Schwingungsrichtung des Untergrundes bezogen auf die Ausbreitungsrichtung der Wellen in die Rayleigh- und Love-Wellen unterteilt lassen. Bei den Rayleigh-Wellen schwingt der Untergrund vertikal und in Ausbreitungsrichtung, während bei der Love-Welle die Schwingungen senkrecht und horizontal zur Ausbreitungsrichtung erfolgen (s. Abb. 35) /KNÖ 97/. Die Oberflächenwellen mit großer Amplitude, die sich bei der Tiefenerkundung als Störung auswirkend und daher unterdrückt werden, können allerdings für oberflächennahe Erkundungen genutzt werden.

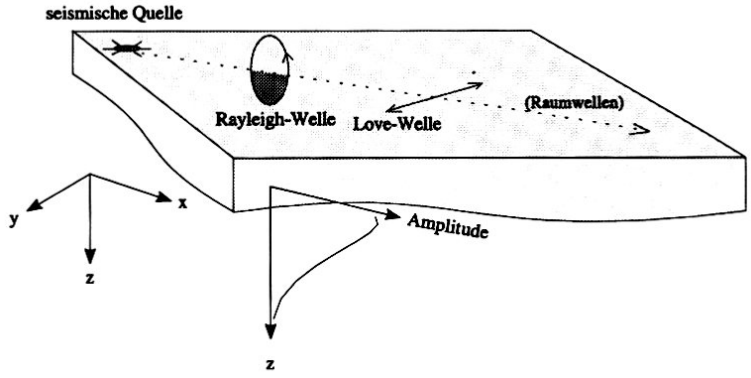


Abb. 35 Ausbreitung von Oberflächenwellen /KNÖ 97/

Aufgrund der geringen Eindringtiefe eignet sich die Oberflächenwellenseismik zur Erkundung von übertägigen Deponien und zur Auffindung oberflächennaher Störungen sowie zur Beurteilung der Homogenität des Untergrundes. Für Aussagen über die Beschaffenheit des Untergrundes in Tiefen, die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle von Bedeutung sind, ist die Oberflächenwellenseismik deshalb nicht geeignet.

Bohrlochseismik

Oberflächenseismische Messungen sind sehr gut zur Erkundung der Untergrundstruktur geeignet. Eine Einschränkung in der Aussagefähigkeit ist gegeben, wenn die Neigung der Grenzschichten zu steil ist. Weiterhin können oberflächennahe Lockergesteinsschichten die Feinauflösung aufgrund zu hoher Energieverluste durch Adsorption stark vermindern. Um unter diesen Voraussetzungen dennoch Aussagen über den Untergrund zu erhalten, kann die Bohrlochseismik eingesetzt werden. Hiermit können In-

formationen u. a. über die seismischen Geschwindigkeiten der zu untersuchenden Schichten und/oder über Parameter zur Beurteilung geotechnischer Eigenschaften der Schichten, wie z. B. den Kompressions- und den Schermodul, gewonnen werden /KNÖ 97/.

Bohrlochseismische Messungen werden in einem Bohrloch oder in unterschiedlichen Bohrungen vorgenommen. Die Messanordnung beim Einbohrlochverfahren entspricht grundsätzlich der der Oberflächenseismik, wobei berücksichtigt werden muss, dass sich die Quellen und die Empfänger in einem Vollraum und nicht mehr in einem Halbraum befinden /KNÖ 97/.

Bei der Paralleldurchschallung werden in einer Bohrung die seismischen Quellen und in der anderen Bohrung die Empfänger jeweils in der gleichen Tiefe installiert. Die Laufzeiten der P- und S-Wellen werden an dem der Quelle gegenüberliegenden Empfänger registriert. Mit Kenntnis des Abstandes zwischen Quelle und Empfänger lassen sich die P- und S- Geschwindigkeits-Tiefen-Kurven ermitteln.

Ein weiteres Verfahren, für das mehrere Bohrlöcher erforderlich sind, ist die Tomographie, die insbesondere geeignet ist, Inhomogenitäten durch Einlagerungen, natürliche Schichtung etc. in ihrer räumlichen Lage darzustellen. Hierbei wird der zu untersuchende Bereich aus allen Richtungen der Ebenen durchschallt. Für die Auswertung werden Inversionsrechnungen vorgenommen, bei denen der Untersuchungsbereich in kleine Elemente diskretisiert wird, denen unterschiedliche Materialeigenschaftswerte zugewiesen werden. Die aus diesen Modellen errechneten Laufzeiten werden mit den gemessenen Gesamtlaufzeiten verglichen und die Materialeigenschaftswerte der einzelnen Elemente so lange angepasst, bis die beste Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des Modells und der Messungen erreicht wird /KNÖ 97/.

Beim Vertical Seismic Profiling (VSP) werden eine seismische Quelle fest an einem Punkt installiert und ein seismischer Aufnehmer im Bohrloch in festen Tiefenintervallen versetzt /KNÖ 97/. Dieses Verfahren eignet sich sehr gut zur Ermittlung der Intervallgeschwindigkeiten der jeweiligen Gesteinsschichten. Im Vergleich zu den von der Oberfläche ausgeführten Messungen können mit dem VSP-Verfahren höhere Auflösungen erreicht werden. Die VSP-Messungen sind somit eine gute Ergänzung zu den Oberflächenmessungen. Beim Einsatz des VSP-Verfahrens bei der Erkundung eines Endlagers ist darauf zu achten, dass die potenziellen Wirtsgesteinsformationen durch die notwendigen Bohrungen nicht nachhaltig gestört werden. So ist es z. B. unbedingt

zu vermeiden, eine durch das Abteufen der Bohrungen bedingte Verbindung zwischen grundwasserführenden Schichten und dem Wirtsgestein herzustellen oder über dem Wirtsgestein befindliche abdichtende Schichten zu stören.

Signalerzeugung, seismische Quellen

Zur Durchführung seismischer Untersuchungen ist es zunächst notwendig, gezielt seismische Wellen im Untergrund hervorzurufen. Die zur Signalerzeugung benötigten seismischen Quellen werden je nach Aufgabenstellung an der Erdoberfläche, in Bohrlöchern oder unter Wasser eingesetzt.

Die Quellen lassen sich je nach Typ der Raumwelle, die erzeugt werden soll, in P-Wellen- und S-Wellen-Quellen einteilen /KNÖ 97/. In diesem Zusammenhang wird von P-Wellen- bzw. S-Wellen-Anregung gesprochen. Abb. 36 zeigt das Prinzip zur Anregung von P- und S-Wellen, hier speziell von horizontal polarisierten SH-Wellen. In Abb. 37 sind die prinzipiellen Quellen zur Erzeugung seismischer Wellen dargestellt.

Bei der Signalerzeugung wird zwischen Impuls-Quellen und Vibroseis-Quellen unterschieden. Bei den Impuls-Quellen handelt es sich um Signale hoher Energie mit kurzer Dauer, zu denen u. a. sprengstoffgebundene Quellen (Sprengseismik) sowie sprengstofflose Quellen (z. B. Fallgewichte, Hammerschlag) zählen. Bei der Bohrlochseismik kommen auch sogenannte Sparker zum Einsatz, bei denen durch eine elektrische Bogenentladung zwischen zwei Elektroden in (Salz-)Wasser durch den pulsartigen hohen Stromfluss eine schlagartige Verdampfung des Wassers mit Bildung einer Dampfblase, von der eine Schockwelle ausgeht, hervorgerufen wird.

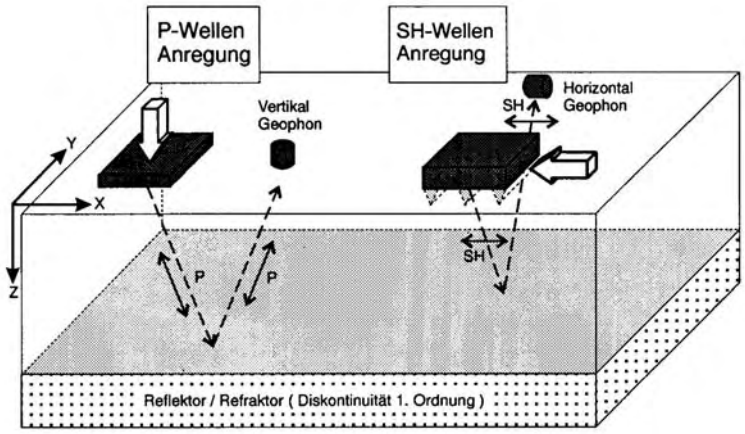


Abb. 36 Prinzip der Anregung von P-Wellen (Kompressionswellen) und S-Wellen (Scherwellen). Die Pfeile geben die Schwingungsrichtung an /KNÖ 97/

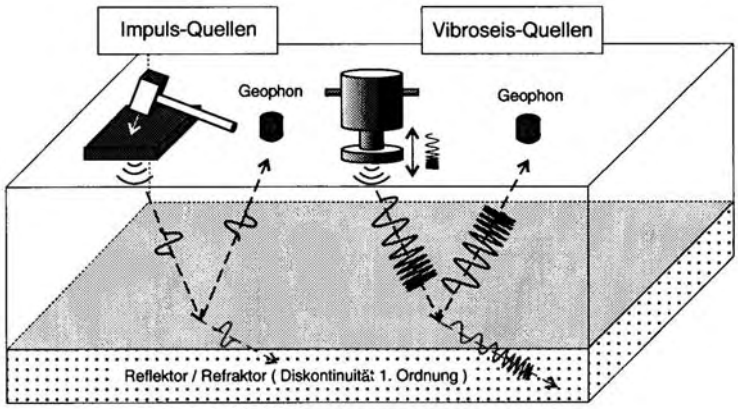


Abb. 37 Prinzip der Erzeugung seismischer Wellen durch Impulsquellen und Vibroseis-Verfahren /KNÖ 97/

Vibroseisquellen sind durch ein zeitlich begrenztes kontinuierliches Signal mit relativ niedriger Leistung charakterisiert. Hierbei wird eine Platte hydraulisch mit einer Vorlast auf den Erdboden gedrückt und in sinusförmige Schwingungen mit zunehmender oder abnehmender Frequenz versetzt. Das Signal (Sweep) ist wählbar. Die Dauer des Sweeps bestimmt die in den Boden abgegebene Energie. Beim Vibroseisverfahren ist eine zusätzliche Datenaufbereitung notwendig. Hierbei werden die im Feld registrierten Vibrogramme in so genannte Korrelogramme umgewandelt, die mit Seismogrammen von Impulsquellen vergleichbar sind /KNÖ 97/.

In Abb. 38 sind, je nach Art der Raumwellen, die Möglichkeiten zur Erzeugung von P-Wellen und S-Wellen, unter Berücksichtigung der einzelnen Quellentypen und Verfahren für flachseismische Untersuchungen, d. h. bis zu Tiefen von mehreren hundert Metern, zusammengefasst.

Seismische Aufnehmer (Geophone):

Zur Erfassung der durch die Abstrahlung seismischer Energie hervorgerufenen Bodenbewegungen werden spezielle Erschütterungsaufnehmer (Geophone) nach dem elektrodynamischen Prinzip eingesetzt. Hierbei wird durch die Bewegung einer Spule in einem permanenten Magnetfeld eine elektrische Spannung in der Spule induziert, die gemessen werden kann. Die induzierte Spannung ist von der Bewegungsgeschwindigkeit der Spule abhängig und ist umso größer, je höher die Relativgeschwindigkeit der Spule gegenüber dem Magnetfeld ist.

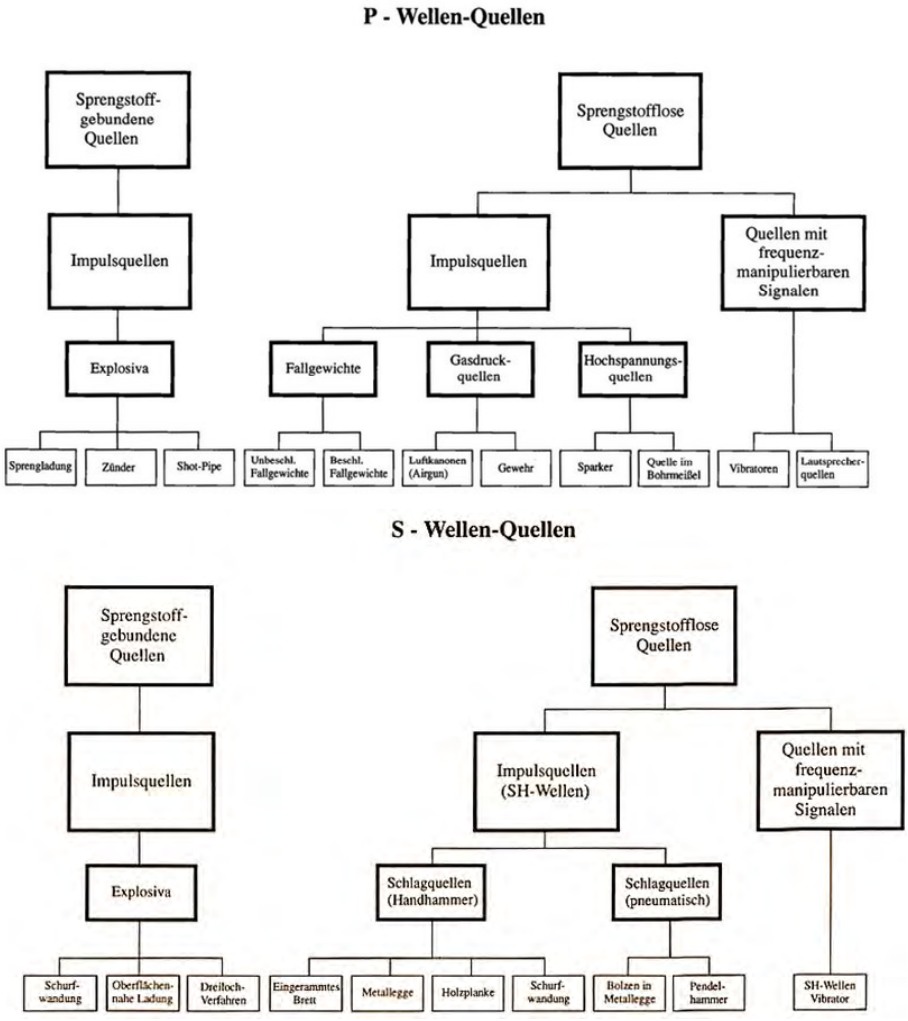


Abb. 38 P- und S-Wellen-Quellen zur Energieanregung bei flachseismischen Untersuchungen /KNÖ 97/

In Abb. 39 ist der Aufbau eines Geophons, das speziell für die Bestimmung der Vertikalkomponenten der Bodenbewegungen verwendet wird, dargestellt. Bei diesem Geophontyp umschließt die durch Federn in der Mittellage aufgehängte Spule einen Permanentmagneten. Beim Schwingen der Spule im Magnetfeld wird eine Spannung in der Spule erzeugt, die in einem definierten Auslenkungsbereich (hier: $\pm 0{,}1$ mm) der Schwinggeschwindigkeit proportional ist.

Zur Ermittlung von Horizontalkomponenten werden Geophone mit einem um 90° gedrehten horizontalen Spulensystem eingesetzt /KNÖ 97/. Geophone dienen zur Ermittlung der Laufzeiten zwischen der Anregungsquelle und den Positionen, an denen die Geophone aufgestellt sind. Bei Untersuchungen im Wasser werden so genannte Hydrophone verwendet, die mit Piezo-Druckaufnehmern ausgestattet sind. Es ist auch

möglich, die dreidimensionale Bodenbewegung durch ein vertikales und zwei orthogonale horizontale Geophone zu ermitteln (Dreikomponenten-Geophon).

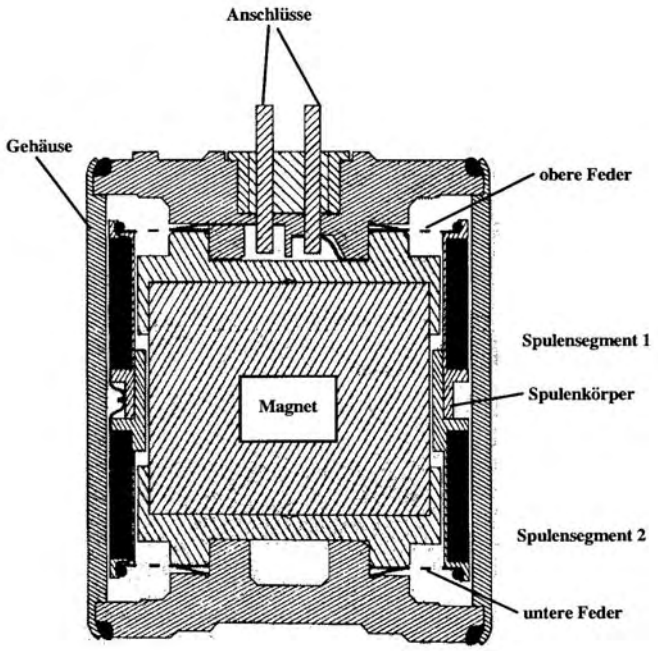


Abb. 39 Prinzipaufbau eines Geophons (Typ SM4, Fa. Sensor Neverland) /KNÖ 97/

Einschränkungen bei untertägiger Erkundung

Zur übertägigen Erkundung von Endlagern sind die seismischen Verfahren in der oben beschriebenen Form einsetzbar. Im Gegensatz zur übertägigen Erkundung, bei der im Allgemeinen Untersuchungsgebiete größerer Ausdehnung und Tiefe betrachtet werden, sind untertägige Untersuchungen eher auf kleinräumige Bereiche beschränkt.

Bei der untertägigen Erkundung ist insbesondere bei der Signalerzeugung, d. h. bei der Auswahl der seismischen Quellen, darauf zu achten, dass keine Schädigungen der umgebenden Wirtsgesteinsformation hervorgerufen werden. Somit ist den sprengstofflosen Verfahren der Vorzug gegeben. Hierzu zählen die Erzeugung seismischer Wellen durch Fallgewichte, Schlagquellen (z. B. Hammerschlag) und Gasdruckquellen (z. B. Airgun). Bei der Erwägung des Einsatzes von vibrationsseismischen Verfahren ist die Größe der in Frage kommenden Signalerzeuger zu beachten. Die Signalaufnahme mittels Geophonen sowie die Datenverarbeitung und die Auswertemethoden unterscheiden sich prinzipiell nicht von der übertägigen Seismik.

2.2.2 Geoelektrik

Die Geoelektrik umfasst nach /KNÖ 97/ eine ganze Reihe von elektrischen und elektromagnetischen Messmethoden, die zur Erkundung der räumlichen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit bzw. der Resistivität (spezifischer elektrischer Widerstand), der Polarisationseigenschaften, der Ermittlung von Strukturen mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften sowie der Beobachtung natürlicher elektrischer Felder angewendet werden können. Die wichtigsten dieser Methoden sind dabei folgende:

- Eigenpotenzialmethode
- Gleichstromgeoelektrik
- Induzierte Polarisation
- Elektromagnetisches Zweispulen-Verfahren
- Bodenradar

Weitere Spezifizierungen sind in der Fachliteratur dargestellt (z. B. /HAA 58/, /BEB 97/, /MIL 78/, /MIL 85/, /TEL 90/, /KNÖ 97/, /PAR 75/).

Verfahren

Die oben aufgeführten Verfahren sind charakterisiert durch die Messung natürlicher Gleichstromfelder (Eigenpotenzialmessungen), durch künstlich in den Untergrund eingespeisten Gleichstrom (Gleichstromgeoelektrik) sowie durch den Einsatz künstlich erzeugter elektrischer Wechselfelder (induzierte Polarisation, elektromagnetisches Zweispulen-Verfahren). Im Folgenden werden die einzelnen Methoden näher erläutert.

Eigenpotenzialmethode

Eigenpotenziale (EP) oder self-potentials (SP) sind elektrische Gleichstromfelder, die auf elektrochemischen und elektrokinetischen Prozessen beruhen und an der Erdoberfläche messbar sind. Unter den elektrokinetischen Prozessen sind die durch Fließvorgänge im Untergrund hervorgerufenen Strömungspotenziale zu verstehen. Als elektrochemische Vorgänge sind hauptsächlich die Entstehung von Redoxpotenzialen zu nennen sowie die Ausbildung von Diffusions- und Membranpotenzialen, wobei die Redoxpotenziale höher ausfallen als die Strömungs-, Diffusions- und Membranpotenziale

/KNÖ 97/. Nach /MIL 85/ treten natürliche Eigenpotenziale vorwiegend an sulfidischen Erzkörpern sowie in der Nähe graphitischer Gesteine auf.

Bei den Eigenpotenzialmessungen werden zwei unpolarisierbare Sonden eingesetzt. Eine der Sonden befindet sich in einem elektrisch ungestörten Gebirgsbereich als Bezugspunkt. Die andere Elektrode wird auf Profilen über das Untersuchungsgebiet bewegt (Wandersonde). Als Alternative kann auch ein Sondenarray an Stelle der einzelnen bewegten Sonde aufgebaut werden. In Abb. 40 sind die möglichen Messprinzipien bei der Eigenpotenzialmethode dargestellt.

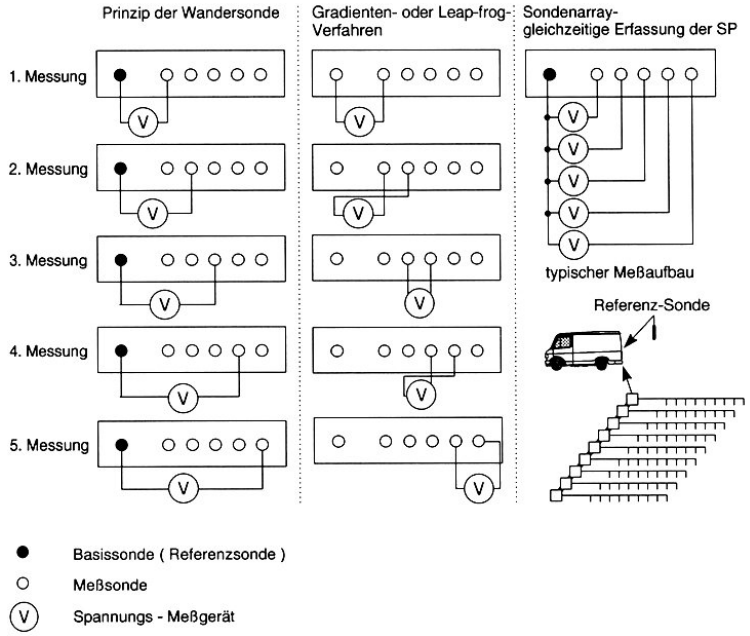


Abb. 40 Beispiele von Messprinzipien bei der Eigenpotenzialmethode /KNÖ 97/

Die gemessen Eigenpotenzialwerte werden als Linien gleicher Potenzialdifferenzen gegen den Bezugspunkt dargestellt /KNÖ 97/. Als unpolarisierbare Sonden (Elektroden) werden Kupfer-/Kupfersulfatsonden, die am häufigsten verwendet werden sowie Silber-/Silberchlorid-Sonden und Blei-/Bleichlorid-Sonden eingesetzt. Abb. 41 zeigt ein Beispiel einer unpolarisierbaren Kupfer-/Kupfersulfatsonde.

Eigenpotenzialmessungen können im Bergbau u. a. zur Erkundung von Störungszonen, von Erzlagerstätten, zur Lokalisierung von metallischen Ablagerungen sowie zur Bestimmung von Wasserwegsamkeiten eingesetzt werden /MIL 87/, /KNÖ 97/.

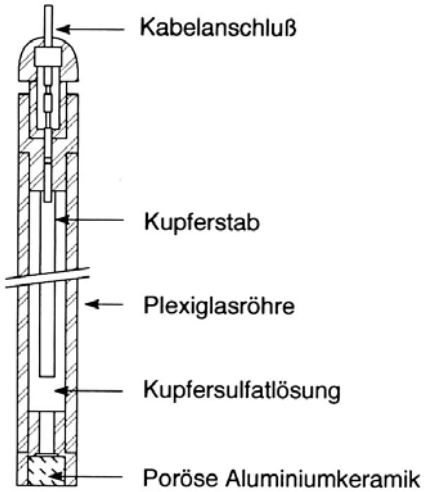


Abb. 41 Prinzip einer unpolarisierbaren Kupfer-/Kupfersulfatsonde /KNÖ 97/

Gleichstromgeoelektrik

Während bei dem Eigenpotenzialverfahren elektrische Felder, die durch physikochemische Prozesse im Untergrund entstehen, genutzt werden, wird bei der Gleichstromgeoelektrik ein elektrischer Strom in den Boden eingespeist. Hierdurch baut sich ein durch die Leitfähigkeit des Untergrundes beeinflusstes Potenzialfeld auf. Abb. 42 zeigt das grundsätzliche Messverfahren mit den Stromlinien- und Potenziallinienverläufen. Über die Stromelektroden A und B wird ein elektrischer Strom in den Untergrund eingespeist, an den Elektroden M und N werden die Potenzialdifferenzen gemessen. Bei diesem Messverfahren wird ein Gleichstrom oder ein niederfrequenter Wechselstrom eingesetzt.

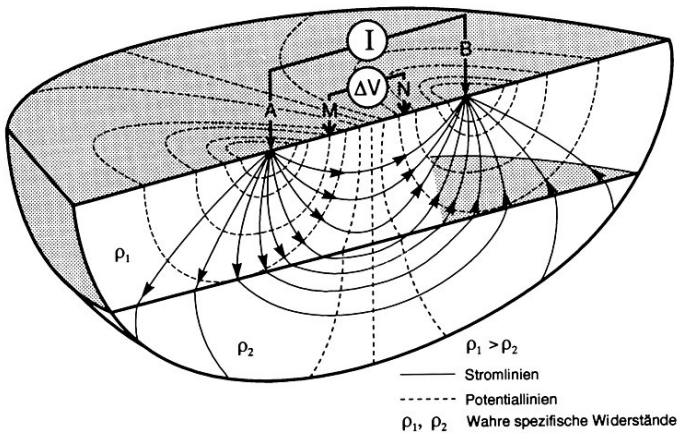


Abb. 42 Prinzipdarstellung der Widerstandsmessung nach einer Vierpunktanordnung mit Stromlinien- und Potenziallinienverlauf /KNÖ 97/

Ausgehend von einer punktförmigen Stromquelle I wird ein Potenzial V in der Entfernung r erzeugt. Das Potenzial an diesem Punkt ergibt sich unter Einbeziehung des Ohmschen Gesetzes für einen Halbraum mit konstanter Resistivität zu /KNÖ 97/:

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

mit:

ρ : Resistivität (spezifischer Widerstand) $[\Omega \cdot m]$
V : Potenzial [V]
I : elektrischer Strom [A]
r : Abstand [m]

Von den wichtigsten elektrischen Leitfähigkeitsmechanismen eines Gesteins sind die elektronische und die elektrolytische Leitfähigkeit zu nennen. Die elektronische Leitfähigkeit tritt in erster Linie bei metallhaltigen Gesteinen, wie z. B. Erzen auf, wohingegen die elektrolytische Leitfähigkeit durch einen Elektrolyten im Porenraum eines Gesteins mit nicht leitender Matrix bedingt ist. Die Resistivität eines mit Elektrolyt gesättigten oder teilgesättigten Gesteins, d. h. dessen spezifischer Widerstand, wird nach der Formel von Archie /KNÖ 97/ in Abhängigkeit von der Porosität, der Resistivität des Elektrolyten sowie der Sättigung beschrieben:

$$\rho_0 = \frac{a}{\Phi^m} \cdot \rho_w \cdot S^{-n}$$

mit:

ρ_0 : Resistivität des mit Elektrolyt gesättigten Gesteins $[\Omega \cdot m]$
ρ_w : Resistivität des Elektrolyten $[\Omega \cdot m]$
Φ : Porosität
S : Sättigungsgrad
a : Proportionalitätsfaktor
m : Zementationsexponent
n : Sättigungsexponent

Bei sehr tonhaltigen Formationen und bei gering konzentrierten Elektrolyten ist die Grenzflächenleitfähigkeit mit einzubeziehen.

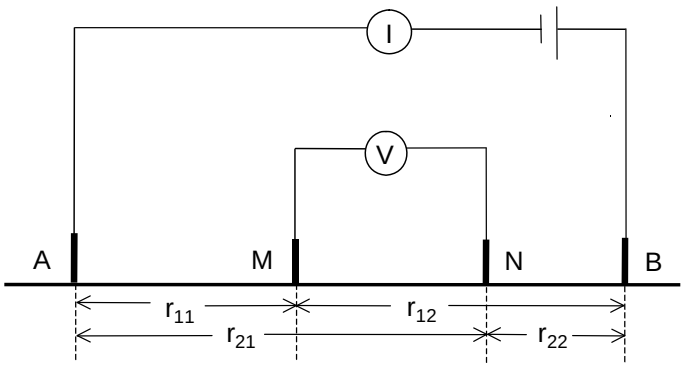


Abb. 43 Schematische Messanordnung eines 4-Elektrodenarrays

In Abb. 43 ist eine schematische Darstellung einer Vierpunktanordnung mit den zugehörigen Elektrodenabständen dargestellt. Für eine beliebige Vierpunktanordnung errechnet sich die Resistivität (spezifischer Widerstand) gemäß:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}}\right) - \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}}\right)} = \frac{\Delta V}{I} \cdot K$$

mit:

ρ:	Resistivität (spezifischer Widerstand) [$\Omega \cdot m$]
ΔV:	Potenzialdifferenz [V]
I:	elektrischer Strom [A]
K:	Geometriefaktor [m]
r_{11} bis r_{22}:	Abstände der Elektroden [m]

K stellt einen charakteristischen Geometriefaktor für verschiedene Elektrodenkonfigurationen dar. Aufgrund der Inhomogenität des Untergrundes werden die Ergebnisse der Widerstandsmessung als scheinbare Resistivitäten (scheinbare spezifische Widerstände) bezeichnet.

In Abb. 44 sind unterschiedliche Messanordnungen dargestellt. Die bekanntesten und gebräuchlichsten Anordnungen sind die nach Wenner und Schlumberger. Diese beiden Konfigurationen unterscheiden sich darin, dass bei der Wenner-Anordnung die Abstände der Elektroden äquidistant sind. Bei der Schlumberger-Anordnung hingegen ist der Abstand der Elektroden zur Potenzialmessung M und N klein gegenüber dem Abstand der Stromelektroden A und B.

Die Anwendung der Messmethodik unterteilt sich in die Kartierung, die Tiefensondierung und die Widerstandstomographie. Bei der Kartierung wird eine Elektrodenauslage über das zu untersuchende Gebiet versetzt, ohne die Abstände der Elektroden zu verändern. Sie eignet sich speziell für qualitative Aussagen über den Untergrund.

Die Tiefensondierung zeichnet sich im Gegensatz zur Kartierung dadurch aus, dass an einem Messort die Abstände der Elektroden vergrößert werden. Dadurch wird erreicht, dass größere Tiefen des Untergrundes erkundet werden können. Mit entsprechenden Auswerteverfahren sind dann auch quantitative Aussagen zur Widerstandsverteilung in der Tiefe möglich.

Bei der Widerstandstomographie handelt es sich um ein Verfahren zur Ermittlung der räumlichen Widerstandsverteilung. Dieses Verfahren kann somit als eine Kombination von Kartierung und Tiefensondierung aufgefasst werden. Das Untersuchungsgebiet wird in flächenhafte Messarrays aufgeteilt. Bei diesen Multielektrodenanordnungen oder Profilnetzen /KNÖ 97/ können die Strom- und Spannungsdipole auf unterschiedlichen Profilen liegen. Mittels eines auf die Fragestellung abgestimmten, prozessorgesteuerten Messablaufs werden mehrfach überdeckte Potenzialmessungen vorgenommen, wobei der Dipol-Dipol-Anordnung meist der Vorrang gegeben wird.

Gleichstromgeoelektrische Messungen eignen sich u. a. zur Bestimmung der Lage und Mächtigkeit von leitenden Schichten im Untergrund (z. B. Grundwasserleiter, Lösungsvorkommen im Salzgestein etc.), zur Erkundung und Abgrenzung lithologischer Einheiten sowie zum Nachweis von Kluft- und Störungszonen im Gesteinskörper /KNÖ 97/.

Induzierte Polarisation

Bei der induzierten Polarisation wird die Frequenzabhängigkeit der Resistivität der Gesteine bestimmt und ermöglicht so die Nutzung eines weiteren gesteinsabhängigen Materialkennwerts. Die induzierte Polarisation lässt sich zum einen auf die elektrochemischen Effekte bei der elektrolytischen Leitfähigkeit und bei der Elektronenleitung bei erzhaltigen Gesteinen, d. h. bei Elektronenleitern, und zum anderen auf eine unterschiedliche freie Beweglichkeit von Ionen in Elektrolyten im Porenraum eines Gesteins zurückführen. Die dabei auftretenden Prozesse werden als Elektrodenpolarisation und Membranpolarisation bezeichnet (s. Abb. 45). Die Auslagen entsprechen denen der Vierpunktanordnungen bei der Gleichstromgeoelektrik. Die Messungen können im Zeitbereich (Zeitbereichs-IP, Puls-IP), hierbei wird das Abklingen der Spannung nach

erfolgter Stromeinspeisung beobachtet, oder im Frequenzbereich (Frequenzbereichs-IP), bei der die Amplitude der resultierenden Spannung bei den einzelnen Frequenzen betrachtet wird, vorgenommen werden /KNÖ 97/.

Für das Entstehen einer induzierten Polarisation muss das Modell nach Archie (siehe oben) unter Berücksichtigung der Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht an der Oberfläche des Gesteins sowie der Porenraumstruktur und Art der sie ausfüllenden Ionen in der Elektrolytlösung erweitert werden.

Die Hauptanwendungsgebiete sind nach /KNÖ 97/ u. a. der Nachweis von Störungszonen mit kluftgebundenen Mineralisationen, die lithologische Gliederung von Festgesteinen, die Abgrenzung von tonig/schluffigen zu sandig/kiesigen Untergründen sowie die Lokalisierung von metallischen Bestandteilen im Untergrund.

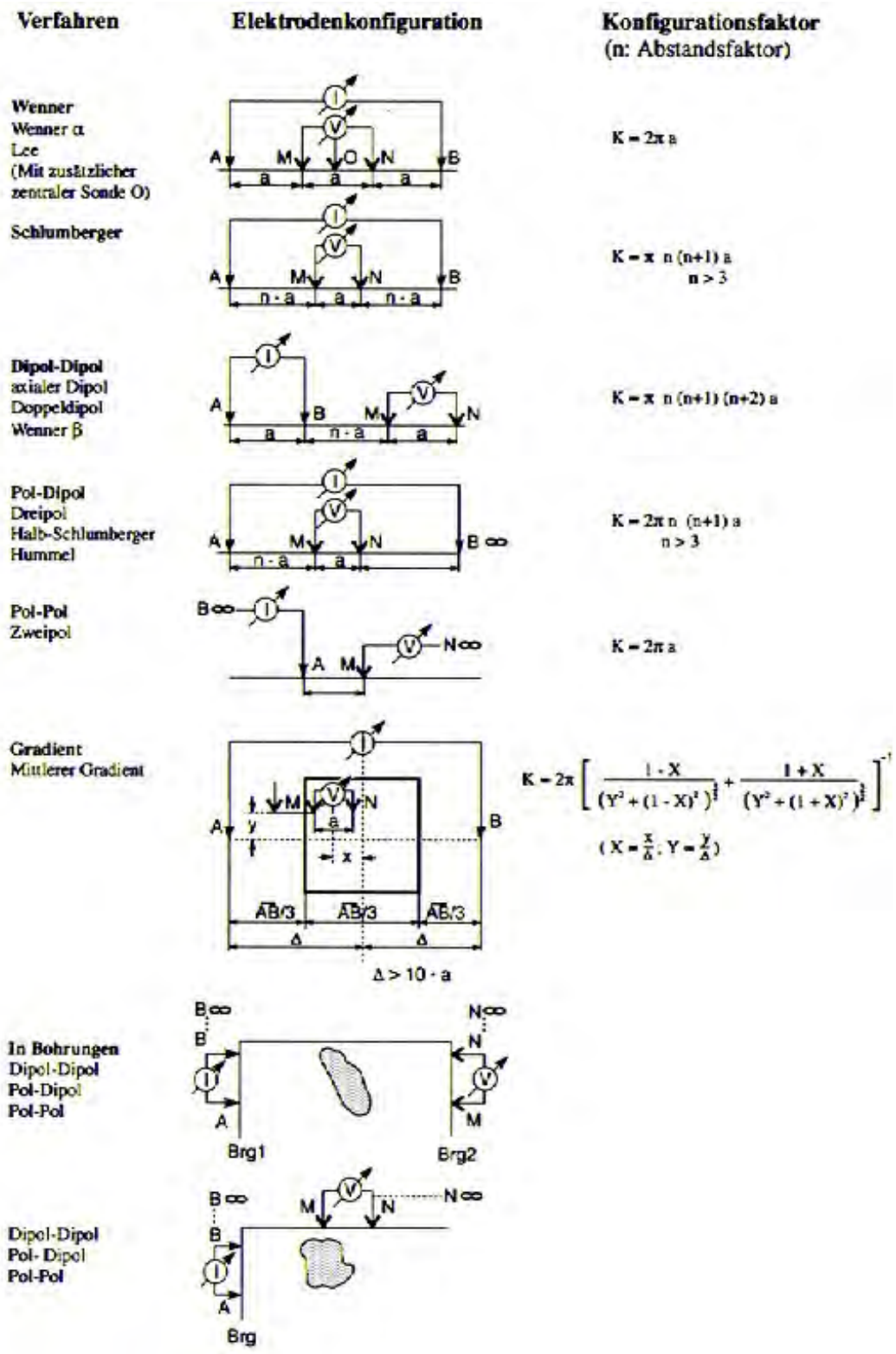


Abb. 44 Zusammenstellung unterschiedlicher Messanordnungen bei der Gleichstromgeoelektrik mit zugehörigem Geometriefaktor K /KNÖ 97/

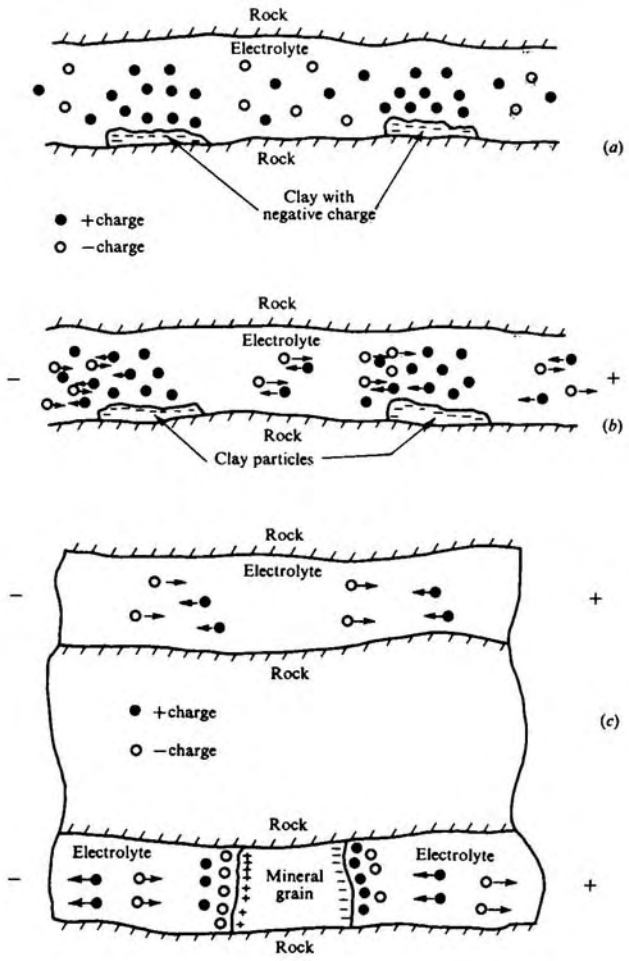


Abb. 45 Prinzipdarstellung der Membran- und der Elektrodenpolarisation.
(a) Normale Verteilung der Ionen im Porenraum eines porösen Mediums, (b) Membranpolarisation unter Einfluss einer äußeren elektrischen Spannung, (c) elektrolytischer Fluss in der oberen Pore und Elektrodenpolarisation in der unteren Pore /TEL 90/

Elektromagnetisches Zweispulen-Verfahren

Wie die elektrischen Methoden allgemein, dienen auch die elektromagnetischen Verfahren zur Erkundung von Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund. Sie können gebunden an die Erdoberfläche, in Form von Bohrlochmessungen oder vom Flugzeug aus (airborne) vorgenommen werden.

Bei dem elektromagnetischen Zweispulen-Verfahren wird von einer Senderspule ein elektromagnetisches Wechselfeld (Primärfeld) in den Untergrund eingespeist. Das Magnetfeld ruft im leitenden Störkörper aufgrund von Induktion ein Wirbelstromfeld hervor. Das sich dadurch ausbildende, die Anomalie charakterisierende sekundäre

Magnetfeld überlagert das Primärfeld der Senderspule und das resultierende magnetische Gesamtfeld wird in der Empfängerspule registriert (Abb. 46). Für die Messungen wird ein sinusförmiger Wechselstrom im Frequenzbereich von 100 - 60.000 Hz eingesetzt /KNÖ 97/.

Die elektromagnetischen Verfahren werden sowohl zur Kartierung als auch zur Tiefensondierung eingesetzt. Während bei der Kartierung zur Ortung lateraler Leitfähigkeitsänderungen eine Messanordnung über das Messgelände bewegt wird, die aus Sender- und Empfängerspule mit festem Abstand zueinander und ggf. mit unterschiedlichen Frequenzen besteht, kann die Tiefensondierung durch Änderung des Abstands zwischen Sender- und Empfängerspule sowie durch Variation der Frequenz erfolgen. Abb. 47 zeigt die unterschiedlichen Messanordnungen beim Zweispulen-Verfahren /KNÖ 97/.

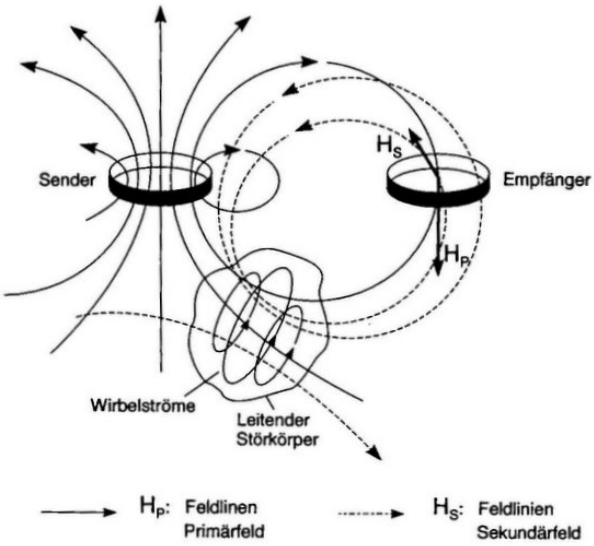


Abb. 46 Prinzipdarstellung des elektromagnetischen Induktionsverfahrens /KNÖ 97, /MIL 85/

Ausführliche Betrachtungen zu den theoretischen Hintergründen sowie den einzelnen Mess- und Auswerte-/Darstellungsverfahren und zur Anwendbarkeit sind u. a. in /MIL 85/, /TEL 90/, /KNÖ 97/ und /BEB 97/ beschrieben.

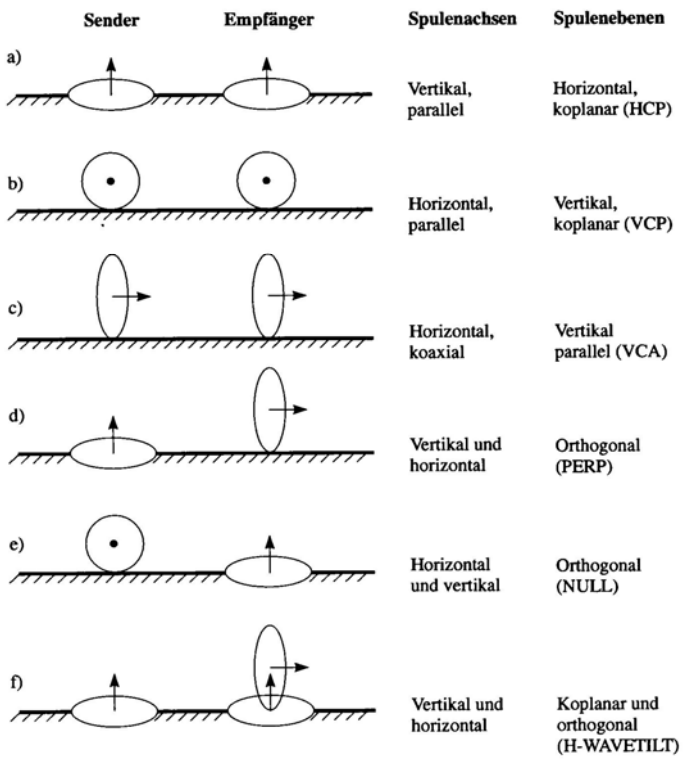


Abb. 47 Mögliche Messanordnungen beim elektromagnetischen Zweispulen-Verfahren /KNÖ 97/

Bodenradar

Das Bodenradar eignet sich zur Untersuchung der Struktur des Untergrundes, insbesondere auch im Hinblick auf den Nachweis von Klüften und Störungen im Festgestein. Weiterhin kann es zur Erkennung der Lage von Grundwasseroberflächen in Sand, Kies und Sandstein sowie zur Ortung von z. B. Tonlinsen eingesetzt werden /KNÖ 97/.

Beim Bodenradar, auch Georadar (Ground Penetrating/Probing Radar: GPR) genannt, handelt es sich um ein elektromagnetisches Impulsverfahren, das in seinen Grundlagen der Reflexionsseismik sowie den Sonar- und Radarmessungen zur Entfernungsermittlung ähnelt. In Abb. 48 ist die prinzipielle Messanordnung dargestellt. Von einem Sender aus werden kurze elektromagnetische Impulse in den Untergrund eingespeist, die z. B. an Schichtgrenzen oder der Oberfläche eines Grundwasserhorizontes reflektiert bzw. an im Untergrund befindlichen Objekten gestreut (Diffraktion) werden. Die zurückgesandten Signale werden am Empfänger registriert. Der Sender und der Empfänger bestehen aus breitbandigen Dipolantennen, die zu Ankopplung dem Boden angenähert oder auf ihn aufgelegt werden /KNÖ 97/.

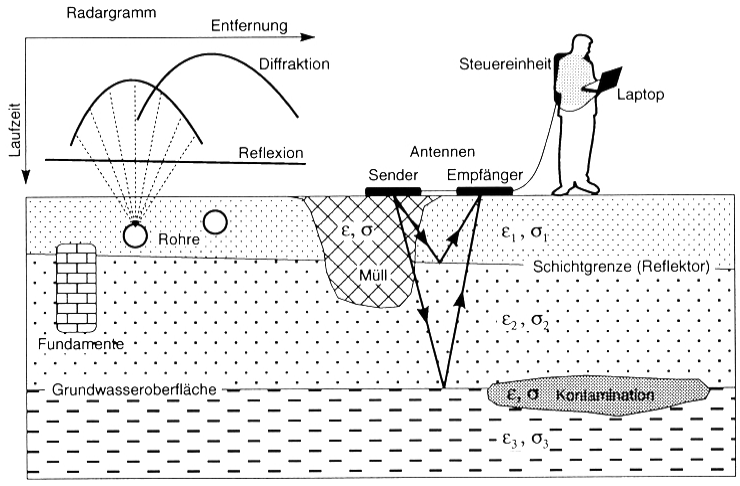


Abb. 48 Prinzipdarstellung der Messung mittels Bodenradar /KNÖ 97/

Voraussetzung für die Reflexion und die Diffraktion ist ein ausreichender Kontrast der elektrischen Materialeigenschaften des Untergrundes, insbesondere der Dielektrizitätskonstanten (ε) und der Leitfähigkeiten (σ). Die verwendeten Frequenzen liegen im Allgemeinen im Bereich von 10 – 100 MHz /KNÖ 97/.

Die entscheidenden Vorteile dieses Verfahrens liegen in der zerstörungsfreien Anwendung und in dem Umstand, dass sehr hohe vertikale und horizontale Auflösungen erzielt werden können.

2.2.3 Gravimetrie

Die Methode beruht auf dem Prinzip der Massenanziehung (Gravitation). Mittels gravimetrischer Messverfahren können durch die Bestimmung lokaler Abweichungen vom normalen Schwerefeld Rückschlüsse auf Lage, Tiefe und Ausbildung einer geologischen Struktur aufgrund eines Dichteunterschieds zum umgebenden Nebengebirge gezogen werden. Bei der gravimetrischen Erkundung handelt es sich im Allgemeinen um eine Relativmessung, d. h. nur die Schwereanomalien Δg sind von Interesse. Da das Gravitationsfeld sowohl von der örtlichen Lage des Messpunktes (geographische Höhe und Breite) als auch von zeitlichen Änderungen (Gezeiten, Säkularvariationen) und unregelmäßigen Massenverteilungen (z. B. Senken, Täler, Berge) beeinflusst wird, sind Korrekturen (Reduktionen) des gemessenen Schwerewertes notwendig /MIL 78/. Zudem müssen gerätebedingte Gangkorrekturen an den Messwerten vorgenommen werden. Weiterhin wird mit der sogenannten Bouguer-Reduktion δg_B die Wirkung der

zwischen dem Mess- und Bezugsniveau liegenden Gesteinsschicht berücksichtigt. Mittels dieser Reduktionen wird die sogenannte Bouguer-Anomalie $\Delta g_0^{//'}$ berechnet, die eine aussagefähige Abbildung der Untergrundstrukturen erlaubt. Die Bouguer-Anomalie setzt sich somit aus den folgenden Größen zusammen /KNÖ 97/, /MIL 78/, /PAR 75/:

$$\Delta g_0^{//} = \Delta g - \gamma_0 - \delta g_F - \delta g_B + \delta g_R$$

mit:

$\Delta g_0^{//'}$	Bouguer-Anomalie
Δg	gemessener Schwerewert (gezeitenkorrigiert)
γ_0	Normalschwere
δg_F	Freiluftreduktion
δg_B	Bouguer-Reduktion
δg_R	topographische Reduktion.

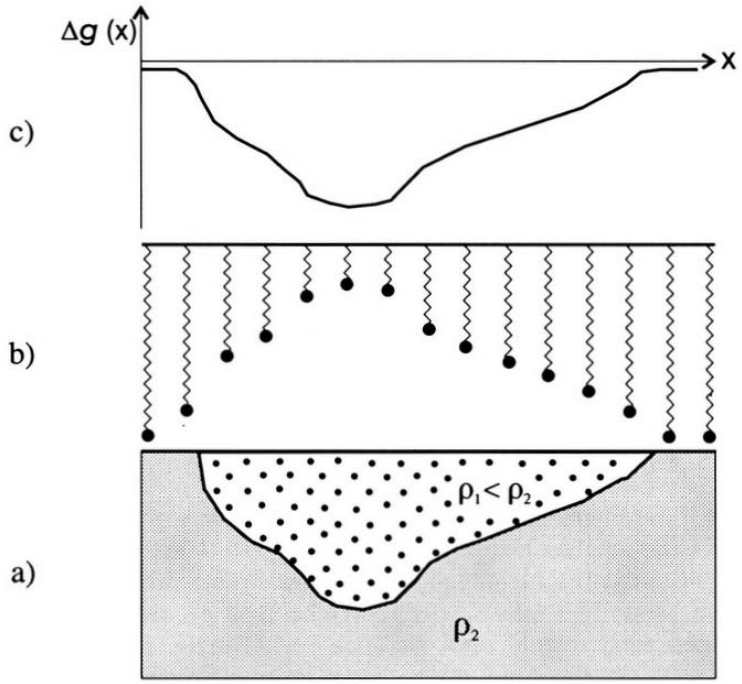


Abb. 49 Prinzipdarstellung der gravimetrischen Messmethode /KNÖ 97/

Das Prinzip der Messung beruht auf der Massenanziehung. Hierbei wird die durch eine Änderung der Schwere bewirkte Anziehung einer Masse, die an einer Feder befestigt ist, durch die elastische Gegenkraft der Feder ausgeglichen, was zu einer Änderung der Federlänge führt (Abb. 49). Diese Längenänderung ist ein Maß für die auf die Mas-

se einwirkende Schwere. Die theoretischen Grundlagen des Messprinzips sind in der einschlägigen Literatur ausführlich dargestellt /TEL 90/, /MIL 84/, /KNÖ 97/, /BEB 97/. Der Messwert hat die Dimension einer Beschleunigung und wird im Falle der Gravimetrie in Gal angegeben, wobei 1 Gal = 10^{-2} m/s^2 entspricht. Die Auswertung erfolgt mittels Modellrechnungen in Form einer Vorwärtsmodellierung.

Folgende Aufgaben können u. a. durch Gravimetrie gelöst werden (nach: /MIL 78/):

- Nachweis verdeckter Störungen
- Ermittlung unterirdischer Hohlräume
- Ermittlung der Mächtigkeit und Ausdehnung von Deckgebirgsschichten
- Reliefbestimmung und Gliederung des verdeckten Grundgebirges
- Erkundung von Erosionsstrukturen
- Anlage und Kontrolle unterirdischer Speicher.

Abb. 50 zeigt zwei typische Gravimeter mit vereinfachter Darstellung des Messprinzips. Mit diesen Geräten werden statische Messungen an der Erdoberfläche (Landmessungen) und in Bohrlöchern vorgenommen. Dynamische Systeme, wie das Saitengravimeter haben für Landmessungen noch keine Anwendung gefunden /MIL 84/.

Das Prinzip einer Gravimetermessung ist in Abb. 51 am Beispiel der Deponie Langhennersdorf dargestellt /KNÖ 97/.

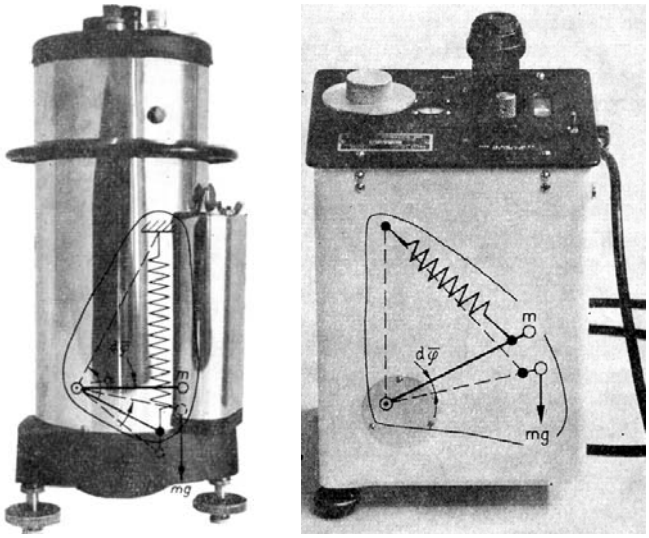


Abb. 50 Worden-Gravimeter (links) und La Coste-Romberg-Gravimeter (rechts) mit vereinfachtem Messprinzip /MIL 84/

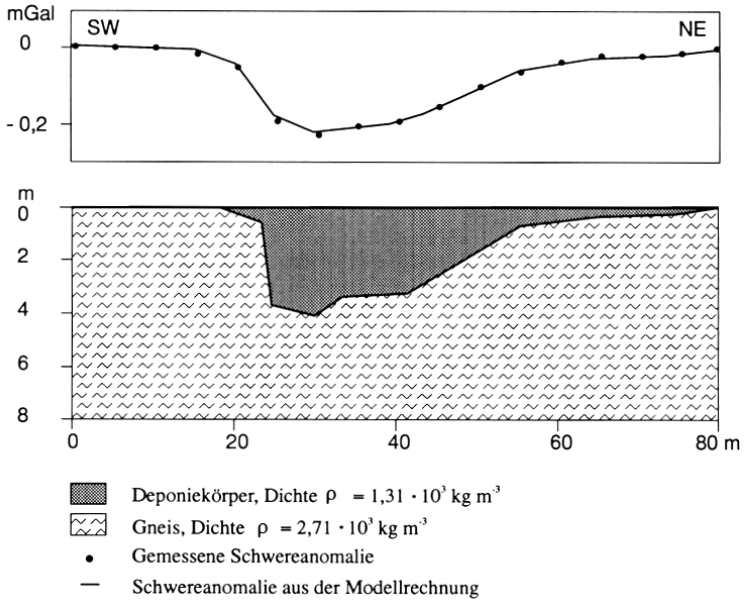


Abb. 51 Beispiel einer Schweremessung und Profilrechnung zur Dichtebestimmung an der Deponie Langhennersdorf /KNÖ 97/

2.2.4 Magnetik

Mittels der Geomagnetik werden lokale oder regionale Anomalien des Erdmagnetfeldes ermittelt. Hieraus können u. a. Rückschlüsse auf Abgrenzung und Ausbildung geologischer Strukturen, die sich durch unterschiedliche magnetische Eigenschaften vom Nebengestein unterscheiden, gezogen werden. Die Magnetik eignet sich weiterhin zur

tektonischen Analyse im Kristallin und Rotliegenden sowie für lokale Untersuchungen von magnetisch wirksamen Einlagerungen wie z. B. Magnetit, Eisenerzen, Basalt, Diabas /MIL 78/. Neben Angaben zur Art der magnetischen Anomalie kann auch eine Aussage zur Tiefe des jeweiligen Störkörpers getroffen werden.

Bergbau-spezifische Anwendungen sind u. a. der Nachweis von Hohlräumen mit magnetisch wirksamen Inventar sowie die Ermittlung von Störungszonen /MIL 78/.

Messverfahren/Messgeräte

Bei der Geomagnetik wird zwischen absoluten und relativen Intensitätsmessungen unterschieden. Die Intensität ist u. a. abhängig von der magnetischen Suszeptibilität und dem Volumen der Anomalie /MIL 78/. In Abb. 52 ist das Prinzip des geomagnetischen Messverfahrens dargestellt.

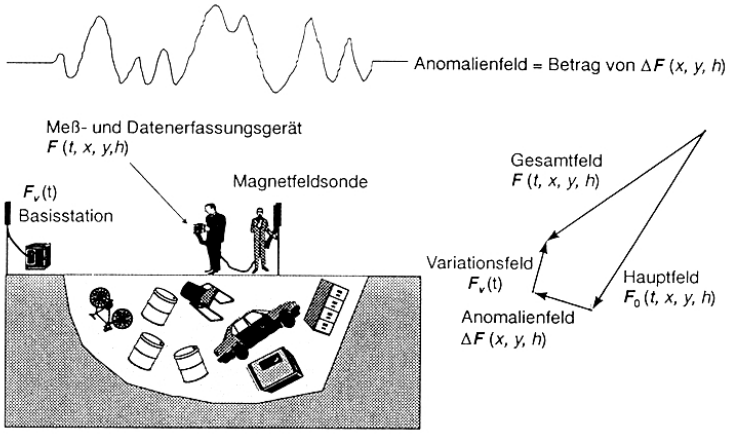


Abb. 52 Prinzipdarstellung der geomagnetischen Methode /KNÖ 97/

Zur Bestimmung der magnetischen Felder und ihrer Komponenten werden mechanisch-optische Magnetometer (Feldwaagen) sowie Fluxgatemagnetometer (Förster-Sonde, Saturationskernmagnetometer) eingesetzt. Protonenmagnetometer (Kernpräzisionsmagnetometer) messen die Totalintensität des Magnetfeldes /KNÖ 97/ /MIL 84/. Die Messungen können an der Erdoberfläche sowie vom Hubschrauber bzw. vom Flugzeug aus vorgenommen werden /BEB 97/, /TEL 90/.

2.2.5 Bohrlochgeophysik

Die „Bohrlochgeophysik“ stellt eines der wichtigsten Verfahren zur Erkundung des Untergrundes dar. Einige der von der Oberfläche aus einsetzbaren geophysikalischen Messverfahren können auch in Bohrlöchern angewendet werden. Die Lokationen der Bohrungen sowie deren Teufen werden nach den Ergebnissen der geologischen und geophysikalischen Oberflächenerkundungen ausgewählt und geplant.

Zur Messung werden Sonden meist in Kombination mehrerer Sondentypen/Verfahren in ein Bohrloch abgelassen. Gemessen wird je nach Verfahren an einer Stelle in der Bohrung oder je nach Gegebenheit während des Einfahrens, aber meist während des Ausfahrens aus der Bohrung.

Abb. 53 zeigt das Prinzip einer Bohrlochmessung; in Abb. 54 ist eine Auswahl der wichtigsten Bohrlochmessverfahren zusammengestellt.

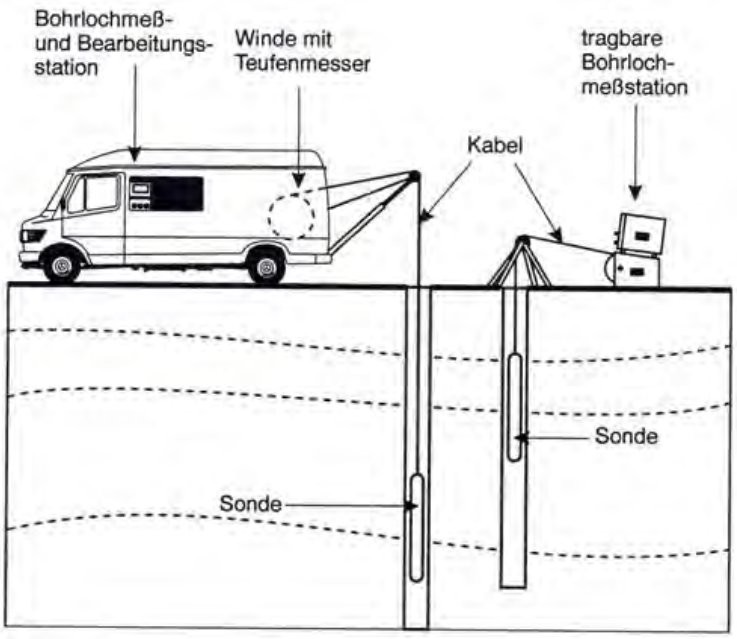


Abb. 53 Prinzip geophysikalischer Bohrlochmessungen /KNÖ 97/

Bei der Untersuchung einer potenziellen Endlagerformation ist eine Störung der in Frage kommenden Untergrundbereiche (z. B. durch Bohrungen) zu vermeiden, da damit die Gefahr verbunden wäre, dass dadurch künstliche Wegsamkeiten für Wässer aus wasserführenden Horizonten geschaffen werden.

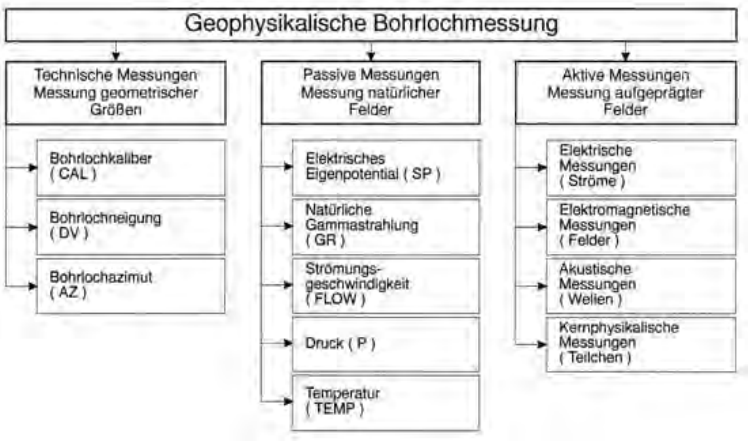


Abb. 54 Übersicht der geophysikalischen Bohrlochmessverfahren /KNÖ 97/

Im Folgenden ist aufgeführt, für welche Fragestellungen Bohrlochmessungen verwendet werden können /KNÖ 97/, /TEL 90/, /SER 84/:

- Dichte der Formationen
- Porositäten
- Wassergehalte/Porenraumfüllung
- Probennahme von Formationswasser (fluid sampling)
- Gesteinsprobennahme (rock sampling, sidewall sampling)
- Bestimmung von Schichtenabfolge, Schichtgrenzen, Textur, Klüfte, räumlicher Lage von Klüften Schichtmächtigkeiten, Lage und Orientierung der Schichten, des Einfallens, Streichens, der Lithologie
- Temperaturen
- Aussagen über mechanische Stabilität (Indiz: Ausbruchszonen beim Bohren, Kalibermessung)
- Erstellung geologischer/lithologischer Profile durch Korrelation mehrerer Messungen in verschiedenen Bohrungen (Mächtigkeit, Homogenität, Ausbreitung).

Die Abb. 55 bis Abb. 58 geben einen Überblick über die einzelnen Messverfahren, geordnet nach deren physikalischen Grundlagen.

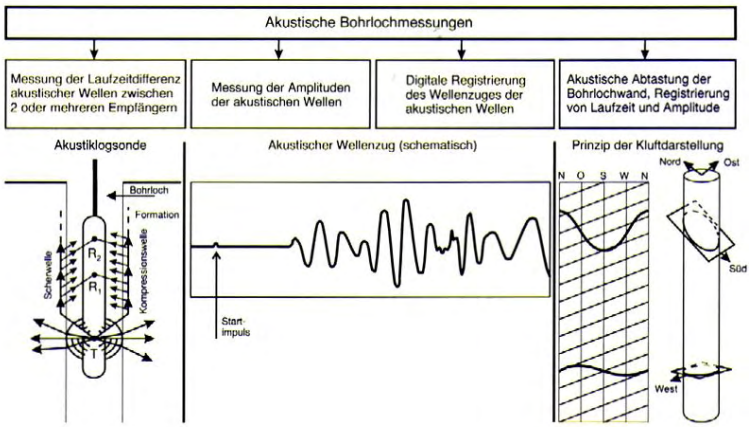


Abb. 55 Prinzip der akustischen Messverfahren; T = Sender (Transmitter), R_1 und R_2 = Empfänger (Receiver) /KNÖ 97/

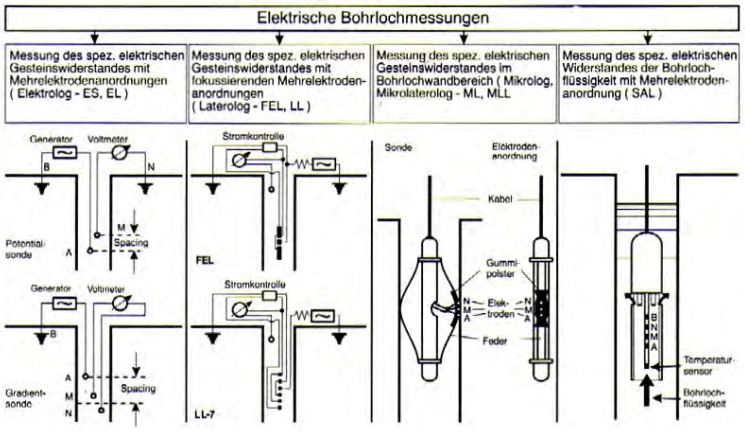


Abb. 56 Prinzip der elektrischen Messverfahren; A und B = Stromelektroden, M und N = Spannungsmesselektroden /KNÖ 97/

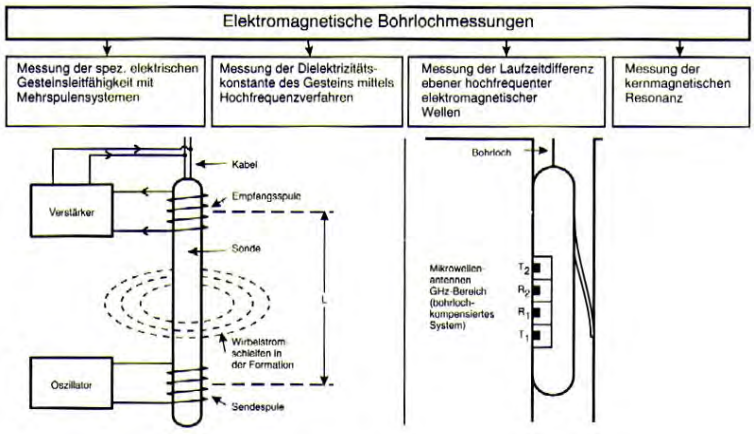


Abb. 57 Prinzip der elektromagnetischen Messverfahren; T_1 und T_2 = Sender (Transmitter), R_1 und R_2 = Empfänger (Receiver), L = Abstand zwischen Sender und Empfänger /KNÖ 97/

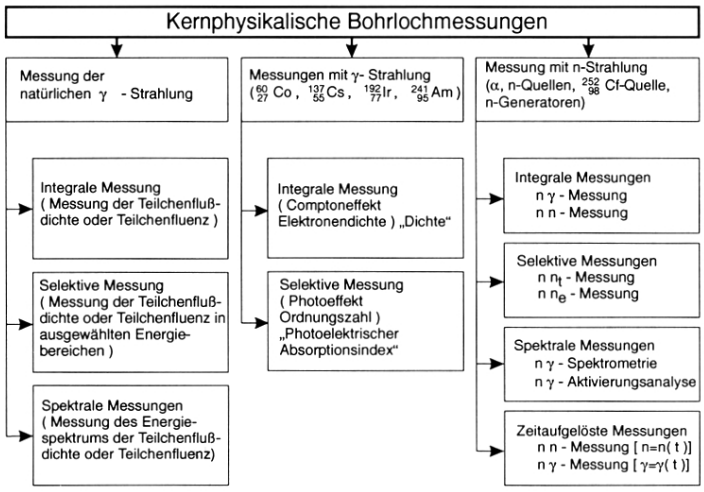


Abb. 58 Zusammenstellung der kernphysikalischen Messverfahren; γ = Gamma, n = Neutron, n_t = thermische Neutronen, n_e = epithermische Neutronen /KNÖ 97/

Die hier aufgeführten Verfahren stellen eine Auswahl dar und geben einen Überblick über die grundsätzlichen Möglichkeiten des Einsatzes in Bohrungen. Insgesamt ist festzustellen, dass je nach Fragestellung insbesondere im Hinblick auf die Auflösung und die Eindringtiefen die Abstände (Spacing) der Sender/Empfänger-Kombinationen bzw. die Elektrodenkonfigurationen angepasst werden. Um gesicherte Interpretationen der Messungen vornehmen zu können, ist es in der Regel notwendig, eine Kombination einzelner Verfahren einzusetzen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

Zur Visualisierung der Bohrlochwand kann die Bohrung mit einer Bohrlochkamera befahren werden. Obwohl es sich hierbei um keine geophysikalische Methode handelt, sei dieses Verfahren an dieser Stelle erwähnt.

2.3 Hydrogeologische Untersuchungen

2.3.1 Zielsetzung hydrogeologischer Untersuchungen

Hydrogeologische Untersuchungen dienen in erster Linie folgenden - miteinander in Wechselbeziehung stehenden - Zielsetzungen /IAE 99/:

- Verständnis des gesamten Grundwasser-Fließregimes und des chemischen Milieus

- Bereitstellung notwendiger Input-Daten zur Berücksichtigung der Grundwasserströmung im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen
- Bereitstellung von Daten zu hydraulischen und hydrochemischen Grundwasserverhältnissen im Hinblick auf Erkundung und Errichtung eines Endlagers

Im Einzelnen bedeutet dies die Berücksichtigung der in Tab. 8 zusammengestellten Aspekte.

Tab. 8 Aspekte hydrogeologischer Untersuchungen (nach /IAE 99/)

Hydrodynamische Aspekte	**Hydrochemische Aspekte**
Evolution des Systems, geodynamische Prozesse	Verteilung von Grundwassertypen im regionalen Grundwasserströmungssystem, Mischungsverhältnisse
Antriebskräfte (z. B. Gravitation, Dichte, Osmose)	Herkunft der Grundwasserkörper (z. B. Lage des Einzugsgebietes, klimatische Bedingungen während der Grundwasserneubildung)
Ausdehnung des Aquifersystems, Beschaffenheit seiner Grenzen	Chemisches Milieu im vorgesehenen Endlagerhorizont, chemische Gleichgewichtsverhältnisse vor Baubeginn
Geometrie der einzelnen Aquifere im Gesamtsystem, Beziehung zu geologischen Einheiten	Grundwasser-Verweilzeiten
Hydraulische Eigenschaften der einzelnen Aquifere (z. B. Transmissivität, hydraulische Durchlässigkeit, Porosität, Kluftdichte und -weite)	Heterogenität aufgrund unterschiedlicher Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen in Klüften und in der Matrix
Art der Grundwasserströmung in den einzelnen Aquiferen (z. B. Beitrag der Matrix, Bedeutung von Klüften und Trennflächen)	Mögliche Störungen des chemischen Systems durch hydrogeologische Untersuchungen von über- bzw. untertage
Anordnung und Trends der Fließeigenschaften (z. B. Teufenabhängigkeit)	
Art der hydraulischen Verbindung zwischen unterschiedlichen Aquiferen	
Beitrag der einzelnen Aquifere zum Gesamtabflussgeschehen	

Bei der Umsetzung dieser Aspekte an einem konkreten Standort ergibt sich daraus der nachfolgende erforderliche Untersuchungsumfang:

- Hydrogeologische Karten und Profile
- Meteorologische Messungen
    - Niederschlag
    - Lufttemperatur
    - Luftdruck
    - Luftfeuchtigkeit
    - Verdunstung
- Bohrungen
    - Geologische Aufschlussbohrungen
    - Hydrogeologische Untersuchungsbohrungen
    - Pegelbohrungen
    - Brunnen
- Abflussmessungen
    - Quellschüttungen
    - Drainagen
    - Vorfluter
- Chemisch-physikalische in situ-Messungen
    - Temperatur
    - Dichte
    - Leitfähigkeit
    - pH-Wert
    - Redoxpotenzial
    - Sauerstoffgehalt
    - Redoxsensitive Elemente
- Durchlässigkeitsuntersuchungen
    - Pumpversuche (PV - z. B. Kurz-PV, Leistungs-PV)
    - Packertests (z. B. Slug-, Puls-, Gestängetest)
    - Einschwingversuche
    - Injektionstests
    - Tracertests / Markierungsversuche
    - Einbohrlochmessungen

Details zu sämtlichen hydrogeologischen Untersuchungsmethoden können aktuellen Lehr- bzw. Handbüchern entnommen werden (z. B. /LAN 04/, /SCR 98/).

2.3.2 Erfahrungen aus der Endlagerforschung

In einer vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) in Auftrag gegebenen Studie /APP 01/ wurden Daten hydrogeologischer Untersuchungen ausgewertet, die überwiegend aus dem Anwendungsbereich Endlagerung "konventioneller" und radioaktiver Abfälle stammen. Ergebnisse von In situ-Untersuchungen in anderen Anwendungsgebieten stehen dagegen entweder nur in sehr geringem Umfang zur Verfügung (Exploration und Erschließung von Kohlenwasserstofflagerstätten) oder enthalten (aus dem Bereich der Wasserwirtschaft) nur äußerst wenige Informationen über die bei der Endlagerung vor allem interessierenden Gesteine mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit, so dass sich eine systematische Auswertung nicht als sinnvoll erwiesen hat.

Untersuchungsorte für hydrogeologische Fragestellungen sind hauptsächlich Tiefbohrungen und Stollen (Tunnel) von Felslabors, in denen verschiedene in situ-Verfahren eingesetzt werden. Bei Tiefbohrungen nehmen Packerversuche eine bedeutende Stellung ein.

Der Erfahrungsstand einzelner Methoden hängt mit deren Anwendungshäufigkeit zusammen. In der folgenden Aufstellung sind hydraulische in situ-Methoden bei den in /APP 01/ untersuchten Standorten in der Reihenfolge ihrer relativen Anwendungshäufigkeit angeführt:

- Einbohrloch-Packerversuche (WD-, Injektions-, Pump-, Slug-, Bail-, Drill-Stem- und Pulse-Tests): Meist werden pro Testlauf mehrere Tests hintereinander geschaltet; es wird mit mehreren Druckstufen, Druckentlastungen und mit konstanter Fließrate oder mit konstantem Druck gearbeitet. Bei besonders geringen hydraulischen Durchlässigkeiten von $k_f < 10^{-7}$ m/s werden vorwiegend Pulse-Tests angewendet.

- Fluid-Logging: Diese Methode kann gut mit Packertests kombiniert werden, um die genaue Tiefenlage von Zu- und Abflusszonen im Bohrloch zu lokalisieren. Sie ist aber auch als Einzelmethode geeignet, um Klufttransmissivitäten zu ermitteln (quantitatives Fluid-Logging).

- Mehrbohrloch-(Packer)Versuche (Interferenztests): Diese Versuche sind wesentlich aufwändiger als Einbohrlochversuche und werden deshalb auch seltener durchgeführt. Dazu zählen Langzeitpumpversuche mit piezometrischer Druckmessung, Packerversuche, bei denen z. B. eine Kluftzone durch mehrere Bohrungen durchteuft

und entsprechend abgepackert wird, und Tracerversuche, die auch als Mehrbohrloch-Packerversuche ausgeführt werden können. Insgesamt erfassen solche Versuche einen größeren Gebirgsbereich (Reichweite, Einflussvolumen) als Einbohrlochversuche.

- Ventilationsversuche: Diese Methode erfordert einen Stollen und lange Versuchszeiten von Wochen bis zu Monaten. Entsprechend selten wird sie angewandt (z. B. Schachtanlage Konrad; Grimsel-Felslabor, Schweiz; Stripa-Felslabor, Schweden). Ventilationsversuche erfassen sehr große Gebirgsbereiche von über 100.000 m^3 und liefern damit sog. Makropermeabilitäten.

2.3.2.1 In situ-Verfahren für hydrogeologische Fragestellungen

Hydraulische Methoden

Bei den hydraulischen Methoden wird mit einem bekannten Signal (positive oder negative Druckänderung) auf ein unbekanntes System, den Aquifer, eingewirkt. Die Reaktion des Systems (Druckabsenkung, Druckanstieg bzw. Wasserspiegelabsenkung, Wasserspiegelanstieg) wird während des Versuchs pro Zeiteinheit aufgezeichnet. Nach Signalende kann auch die Rückkehr des Systems in seinen Gleichgewichtszustand gemessen werden. Bei Langzeitpumpversuchen oder Injektionsversuchen wird die dem Aquifer mitgeteilte Wasserstands- oder Druckänderung über einen längeren Zeitraum beobachtet. Nach /STO 95/ können nur mittels Langzeitpumpversuchen Aussagen über das Strömungsverhalten bzw. das Aquifermodell gemacht werden. Bei allen anderen hydraulischen Tests wird das Modell der Auswertung implizit vorgegeben (meistens ein homogener isotroper Aquifer).

Bei Packertests werden bestimmte Bohrlochabschnitte, meist mit aufblasbaren Gummimanschetten, dicht abgeschlossen. Beim Einfachpackertest wird das Bohrloch in einer bestimmten Tiefe nach oben abgesperrt, die Bohrlochsohle bildet die untere Begrenzung. Werden zwei Packer verwendet, können einzelne Bohrlochintervalle gezielt voneinander isoliert und untersucht werden. Mit Multipackersystemen wird eine ganze Reihe von Bohrlochintervallen gleichzeitig getestet. In die abgepackerten Testintervalle führen eine Druckmessleitung, die den Intervalldruck zu einem Druckmesssystem überträgt und eine Flussleitung, mit der Ausfluss und Injektion von Flüssigkeiten geregelt werden können.

Eine spezielle Methode zur Untersuchung geringpermeabler Gesteine stellt der Ventilationstest dar, bei dem ein untertägiger Streckenabschnitt abgeschottet wird. Eine Klimaanlage bläst trockene Luft in diesen Bereich und saugt feuchte Luft ab. Mit einem Wasserabscheider kann der Wasserzufluss aus den Stollenwandungen in den Stollenhohlraum bestimmt werden. Mit dieser Versuchsanordnung werden großräumige hydraulische Verhältnisse des Gebirges untersucht. Um die so genannte Makropermeabilität zu bestimmen, muss mit zusätzlichen Bohrungen der hydraulische Gradient in der Stollenumgebung bestimmt werden. Einzelne stark schüttende Kluftsysteme können die Gesamtpermeabilität bestimmen. Sie werden gesondert gemessen und ausgewertet /KUL 93/. Für dieses Verfahren eignen sich möglichst homogene Gebirgsbereiche mit geringer Durchlässigkeit.

Das Einflussvolumen ist bei einem Ventilations-Versuch sehr viel größer als bei Packerversuchen in einem Bohrloch. Bei hydraulischen Bohrlochtests beträgt der Einflussbereich meist nur wenige m^3, dagegen können bei einem Ventilationsversuch 100.000 m^3 und mehr erreicht werden.

Tracer-Methoden

Tracerversuche liefern Daten über Abstandsgeschwindigkeiten und Fließwege, die mit anderen Versuchen nicht erhalten werden können. Mit speziellen Packer-Mehrbohrloch-Tracerversuchen können einzelne Kluftzonen über größere Entfernungen verfolgt werden. Da bei Packerversuchen meist mit Porositätsmodellen gearbeitet wird, sind nur Aussagen über Filtergeschwindigkeiten möglich. In klüftigem Gestein, besonders im Kristallin, treten in Kluftzonen oft höhere „wirkliche“ Geschwindigkeiten auf, die aber auf relativ eng begrenzte Volumenbereiche beschränkt sind. Die Messung von Abstandsgeschwindigkeiten mit Tracerversuchen kann dabei zu realistischeren Ergebnissen als andere Untersuchungen führen. Nachteile von Tracerversuchen sind ihr hoher Aufwand (Eingabestelle, Messstellensystem), lange Versuchszeiten (Tage bis Monate) und damit verbundene hohe Kosten.

Bohrlochlogging-Methoden

Bei den Bohrloch-Logging-Verfahren werden geophysikalische Bohrlochsonden, wie sie seit langem in der Erdölindustrie verwendet werden, meist in der Vorerkundungsphase eingesetzt. Sie zeigen tiefenbezogene lithologische Wechsel oder Gefügeunterschiede in der Gesteinsabfolge (z. B. Kaliberlog, Density-Log, Gamma Ray, Microlog).

Mit Flowmeter-Messungen lassen sich Zu- und Abflüsse quantifizieren. Zunehmend an Bedeutung gewinnt das noch recht junge Leitfähigkeits-Fluid-Logging. Dieses Verfahren wurde von der schweizerischen Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) für Standortuntersuchungen entwickelt /TSA 88/. Gekoppelt mit einem Pumpversuch können Transmissivitäten von Zuflusszonen im Bohrloch bis 10^{-10} m^2/s quantitativ bestimmt und gleichzeitig ihre Tiefenlage gemessen werden. Das Verfahren ist kostengünstiger als Packertests. Nachteilig ist, dass nur die Transmissivität von größeren Zuflussbereichen gemessen werden kann. Dazwischen liegende geringer durchlässige Gebirgsbereiche bleiben unberücksichtigt.

In Tab. 9 sind die wichtigsten Verfahren zur in situ-Erhebung hydraulischer Daten zusammengefasst. Die Betrachtung konzentriert sich auf diejenigen Verfahren, die für die Datenerhebung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen besonders geeignet sind. Da die Untersuchungen auf potenziell gering durchlässige Gebirgsbereiche in größeren Tiefenlagen (um ca. 500 m unter Geländeoberfläche) ausgerichtet sind, handelt es sich bei den Untersuchungsorten hauptsächlich um Tiefbohrungen und Stollen (Tunnel) von Felslabors.

Tab. 9 Zusammenstellung hydrogeologischer Untersuchungsverfahren (nach /APP 01/)

Methode	R [m]	EV [m^3]	Messbereiche [m/s]	Aussagen, Parameter
1. Hydraulische Methoden				
1.1 Aquifertests				
Langzeitpumpversuch	10 - >300		k_f 10^{-2} - 10^{-7}	Aquifermodell, Aquiferränder, Anisotropie, D, S
Injektionstest	10 - >100		k_f >10^{-10}	D (S abschätzbar)
1.2 Packertests				
Abpressversuch (WD-Test)	10		k_f 10^{-4} - 10^{-8}	D
Slug- und Bail-Test	1 - 10		k_f 10^{-2} - 10^{-9}, >10^{-10}	D (S unsicher)
Pulse-Test	1		k_f <10^{-7}, 10^{-8} - 10^{-14}	D (für sehr geringe D geeignet, S unsicher)
Drill-Stem-Test	1 - 10		kf 10^{-5} - 10^{-8}, >10^{-10}	D
Pumptest	10 - >100		k_f 10^{-6} - 10^{-8}, (>10^{-9})	D (S abschätzbar)
Squeeze-Test	1		k_f <10^{-7}	D (S unsicher)

Methode	R [m]	EV [m^3]	Mess-bereiche [m/s]	Aussagen, Parameter
Packer-Flowmeter-Logging			T $5*10^{-3}$ - $1*10^{-7}$	D, tiefengenaue Zufluss-, Abflussmessung
Druckerholungstest (Buildup test, Recovery)				
Doppelmantelpacker mit geoelektrischer Messtechnik				
1.3 Weitere hydraulische Bohrlochversuche				
Auffüll-, Hebungs- oder Abpressversuch	1 - 10		k_f 10^{-5} - 10^{-7}	D, S
Gezeitenverfahren		>100.000, oft unbe-kannt		D (grobe Mittelwerte)
Luftdruckmessungen				
1.4 Ventilationsversuch				
Ventilationsversuch		>100.000	k_f bis $>10^{-10}$	D (Makropermeabilität)
2. Tracer-Methoden				
Elektrolytischer Tracer	bis Ein-zugsge-biet			Abstandsgeschwindigkeit, Fließwege, Anisotropie
Sporendrift, Mikropar-tikel	bis Ein-zugsge-biet			Abstandsgeschwindigkeit, Fließwege, Anisotropie, Kluftöffnungsweiten
Aktivierungsanalyti-sches Tracerverfahren				
Injektionstest	10 - >100		k_f $>10^{-10}$	D (S abschätzbar)
Einbohrlochver-dünnungsmethode mit radioaktiven Tracern				
Einbohrlochver-dünnungsmethode mit Uranin als Tracer				
3. Bohrlochlogging-Methoden				
3.1 Mechanische Methoden				
Kaliberlog				Härteunterschiede, Auflo-ckerungszonen
Propeller-Flowmeter			ab 10 mm/s vertikale Strömungs-geschwindig-keit	Grundwasserzuflüsse; Tie-fenlage und Stärke

Methode	R [m]	EV [m^3]	Mess-bereiche [m/s]	Aussagen, Parameter
3.2 Thermische Methoden				
Heat-Pulse Flowmeter			1-100 mm/s vertikale Strömungs-geschwindig-keit	Grundwasserzuflüsse; Tie-fenlage und Stärke, auch für geringe Zuflüsse
Temperatur-Log			ab 0,01°C Temperatur-schwankung	Grundwasserzuflüsse; Tie-fenlage und rel. Stärke
Thermisches Flowme-ter				
3.3 Radioaktive Methoden				
Gamma Ray			bis 0,3 m Schicht-auflösung	Lithologie (Tongehalt)
Density Log	0,15 - 0,2			Lithologie, (Dichteunter-schiede), Porosität, Trenn-flächen
Neutron Log				Gesteinsporosität
3.4 Elektrische Verfahren				
Laterolog	1 - 2			Trennflächen, Schichtgren-zen, Lithologie (Ton/Sand)
Microlog				Trennflächen, Schichten-feinauflösung
Salinometersonde				Zufluss-, Abflusszonen, Tiefenlage
Induction-Log	1			Lithologie (spez. Gebirgs-leitfähigkeit)
Fluid-Logging (quanti-tativ)	10- >100		T 10^{-10}	Lokalisierung von Zufluss-, Abflusszonen, D (Kluft-durchlässigkeit)
3.5 Akustische Verfahren				
Sonicsonde				
Bohrlochteleviewer				
3.6 Optische Verfahren				
Fernsehkamera, Pho-tokamera				

R - Reichweite / EV - Einflussvolumen / k_f - Durchlässigkeitsbeiwert
T - Transmissivität (m^2/s) / D - Durchlässigkeit (k_f, T) / S - Speicherkoeffizient

2.3.2.2 Gebirgsdurchlässigkeit

Tab. 10 gibt einen Überblick über die Bandbreiten von Durchlässigkeitsbeiwerten (k_f-Werte) derjenigen Gesteinstypen, zu denen bereits umfassende Datensätze vorliegen

und ausgewertet worden sind. Dazu gehören die auch in Deutschland verbreiteten und grundsätzlich für die Endlagerung in Frage kommenden Gesteinstypen Ton und Tonstein (zusammengefasst als "Ton/Tonstein"), Mergelstein, Granit und Gneis. Zusätzlich sind Daten für Tuffite vom Standort Sellafield (GB) angegeben. Die unter diesem Begriff zusammengefassten Gesteinstypen kommen nach heutiger Einschätzung in Deutschland nicht in einer für die Endlagerung ausreichenden Mächtigkeit vor /APP 00/. Die Werte sind lediglich zum Vergleich in die Tabelle einbezogen worden. Zum Vergleich dienen auch k_f-Werte von Steinsalz des Gorlebener Salzstocks.

Tab. 10 Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen /APP 01/

Gesteinstyp	**Tiefenbereich (m u. GOK)**	**Anzahl Messwerte**	**Spannweite**	**Mittelwert**	**Medianwert**
			k_f-Werte (m/s)		
Granit	50 - 1.700	600	$2{,}23^{-15}$ - $4{,}00^{-04}$	$1{,}25^{-06}$	$4{,}05^{-08}$
Gneis	15 - 3.370	310	$1{,}00^{-13}$ - $1{,}57^{-05}$	$2{,}98^{-07}$	$2{,}35^{-09}$
Tuffit	480 - 1.520	112	$5{,}00^{-16}$ - $5{,}45^{-06}$	$7{,}27^{-08}$	$1{,}03^{-12}$
Ton/Tonstein	5 - 1.060	591	$5{,}50^{-15}$ - $8{,}45^{-05}$	$3{,}73^{-06}$	$1{,}10^{-06}$
Mergelstein	70 - 1.850	111	$9{,}62^{-14}$ - $1{,}30^{-05}$	$1{,}57^{-07}$	$3{,}46^{-10}$
Steinsalz	900 - 1.000	10	$1{,}20^{-14}$ - $6{,}00^{-13}$	$1{,}46^{-13}$	$1{,}20^{-13}$

Die Durchlässigkeitsbeiwerte für Ton/Tonstein zeigen eine starke Abhängigkeit von der Untersuchungstiefe. Die Mittelwerte für Messungen oberhalb einer Tiefe von 200 m unter Geländeoberfläche liegen - unabhängig vom Standort - zwischen 10^{-5} und 10^{-7} m/s, unterhalb 200 m unter Geländeoberfläche zwischen 10^{-11} und 10^{-13} m/s. Allerdings stehen aus dem tieferen Bereich bislang nur wenige Daten für die Auswertung zur Verfügung. Weniger ausgeprägt ist die Tiefenabhängigkeit bei Gneis. Bei den k_f-Werten für Granit ist keine Abhängigkeit von der Testtiefe, sondern vom Standort bzw. standortabhängigen Gesteinseigenschaften festzustellen. Bei den genannten Gesteinstypen - außer bei Ton/Tonstein - treten relativ hohe Durchlässigkeiten bis in größere Tiefe auf.

Ergebnisse am Beispiel Gorleben

Die tertiären und quartären Deckschichten über dem Gorlebener Salzstock bilden ein bis zu maximal 430 m mächtiges System von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern. Die über dem Salzstock und in den Randsenken verbreitete Schichtenfolge lässt sich hydrogeologisch in ein oberes und ein unteres, durch Grundwassergeringleiter hydraulisch getrenntes Hauptgrundwasserstockwerk gliedern. Prägendes Strukturelement im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben ist die Gorlebener Rinne, in deren zentralen Bereich der sog. Rupelton, der den Salzstock ursprünglich flächenhaft überdeckte, weitgehend erodiert wurde, so dass gut durchlässige Rinnensande in einer Kontaktfläche von mehreren km^2 unmittelbar dem Hutgestein, lokal auch Zechsteinsalzen auflagern (Abb. 59) /KLI 02/.

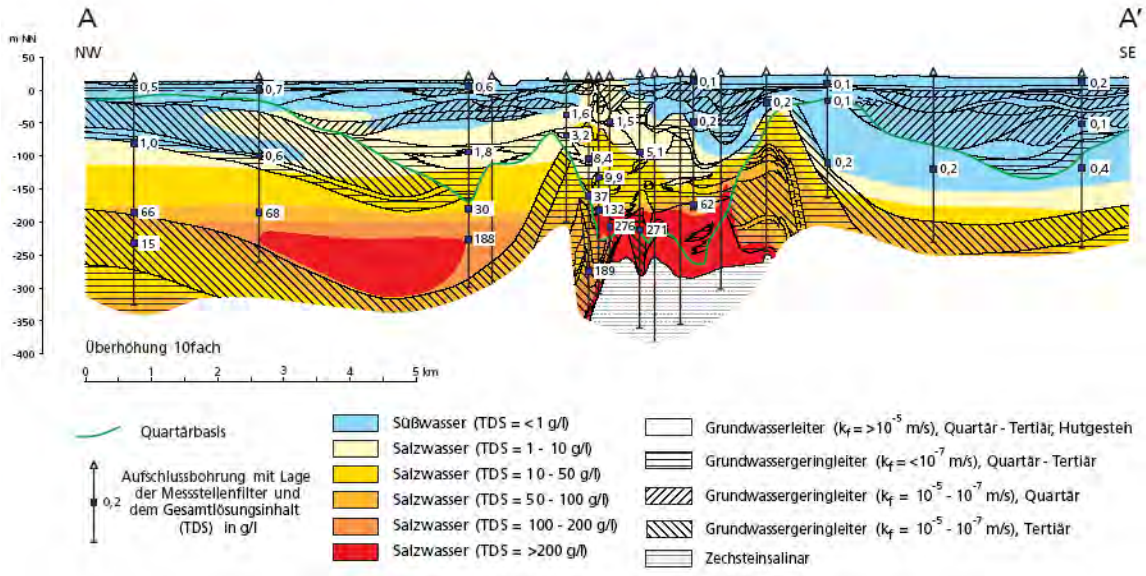


Abb. 59 Hydrogeologischer und hydrochemischer Profilschnitt über den Salzstock von Gorleben /KLI 02/

Schachtanlage Asse

Im Umfeld der Schachtanlage Asse ist in den 1960er bis 1990er Jahren ein umfangreiches hydrogeologisches Forschungsprogramm durchgeführt worden, dessen wesentliche Zielsetzungen und Maßnahmen in Tab. 11 zusammengefasst sind.

Tab. 11 Umfang des hydrogeologischen Forschungsprogrammes Asse (nach /BAT 94/)

Zielsetzung	Maßnahme
Vorhandene hydrologische Aufschlüsse (Quellen, Brunnen, Drainagen, Vorfluter)	Erfassung
Für die radiologische Umgebungsüberwachung und Beweissicherung wichtige Grundwasseraufschlüsse	Auswahl
Hydrologisch wichtige Parameter (Quellschüttung, Abflussmenge, Grundwasserspiegel, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotenzial, Sauerstoffgehalt)	Messung
Hydrochemische Zusammensetzung der Grundwässer und Änderungen im Chemismus	Analyse
Isotopenhydrologische Zusammensetzung von Grund- und Oberflächenwässern (^{3}H, ^{2}H, ^{18}O, ^{13}C, ^{14}C, ^{34}S), Korrektur von Modellaltern	Analyse, Modellierung
Detailkenntnisse über den geologisch-tektonischen Aufbau des Deckgebirges	Spezialkartierungen, geophysikalische Messungen
Hydrogeologische Untersuchungsbohrungen (bis ca. 200 m Tiefe)	Erstellung
Teilbereich für Grundwasserfließmodell	Auswahl
Hydrogeologische Parameter in den Bohrungen (Tiefenprofile von Temperatur, Leitfähigkeit und Dichte)	Messung
Fließbewegung des Grundwassers (Einbohrloch-Methode)	Messung
Grund- und Oberflächenabflüsse (Quellen, Drainagen, Vorfluter)	Erfassung
Grundwasserführung, Durchlässigkeit des Gebirges, hydraulische Verbindungen (Pumpversuche, Einschwingverfahren)	Erkundung
Grundwasserfließwege und -zeiten (Markierungsversuche)	Erkundung
Grundwasser-Fließmodell für die Südwest-Flanke der Asse	Erstellung

Diese Tabelle zeigt auch exemplarisch, mit welchen Methoden bestimmte Parameter gemessen worden sind und welche Grundwasser-bezogenen Messgrößen an einem Standort erforderlich sind.

3 Literatur

(Hinweis: dieses Literaturverzeichnis enthält alle in diesem Anhang zitierte Literatur)

/AAE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd. - Abschlussbericht, Köln, 2002.

/APP 00/ Appel, D.; Kreusch, J.: Günstige Konfiguration des Gesteinskörpers in der geologischen Barriere - ein strukturorientierter Ansatz zur Auswahl von Endlagerstandorten. - Bericht an den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS), 2000.

/APP 01/ Appel, D.; Habler, W.: Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. - Bericht an den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS), 2001. - http://www.akend.de/aktuell/berichte/pdf/appel_habler.pdf (05. Juli 2005).

/BAR 90/ Barsch, H.; Billwitz, K : Geowissenschaftliche Arbeitsmethoden. - Verlag Harri Deutsch, 1990.

/BAT 94/ Batsche, H.; Klarr, K.; v. Stempel, C.: Hydrogeologisches Forschungsprogramm Asse - Abschlußbericht - Textband. - GSF-Institut für Tieflagerung, IfT 4/94, Braunschweig, 1994.

/BAU 08/ Erdfall im Straßenbereich. - http://www.bauingenieur24.de/sharedpics/pics_news/1198_1.jpg (03.07.2008).

/BEB 97/ Beblo, M. (Hrsg.): Umweltgeophysik. - Ernst & Sohn, Berlin, 1997.

/BEN 84/ Bender, F. (Hrsg.): Angewandte Geowissenschaften, Band III. - Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1984.

/BFS 90/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Fortschreibung des zusammenfassenden Zwischenberichtes über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung Gorleben vom Mai 1983. - ET-2/90, 299 S., Salzgitter, 1990.

/BGR 04/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): http://www.bgr.de/b322/index.html?/b322/text/d_morsleb.htm (09.09.2004)

/BGR 08/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Vereinfachtes Rundsichtprofil der Schächte Gorleben 1 u. 2. - http://www.bgr.bund.de/cln_011/nn_324496/DE/Themen/Wasser/Bilder/Was__gorleben__schaechte__g.html (04.06.2008)

/BGR 90/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Übertägige Erkundung des Standortes Gorleben - Zusammenfassender Zwischenbericht. - Archiv-Nr. 108880, Tagebuch-Nr. 12330/91, 369 S., 39 Anlg., Hannover, 1990.

/BRE 01/ Bräuer, V.; Jentzsch, G.: Abgrenzung von Gebieten mit offensichtlich ungünstigen geologischen Verhältnissen. - Bericht an den AkEnd, 2001. - http://www.akend.de/aktuell/berichte/pdf/braeuer_jentzsch.pdf (08.07.2005)

/BUR 92/ Burollet, P. u. a.: Tektonische Übersichtskarte von Deutschland . - http://www.oberrheingraben.de/Tektonik/Tektonik%20Deutschland%20Bilder/TektonischeKarteDeutschland.jpg (08.07.2005) - nach: The European Science Foundation (1992): A Continent Revealed, The European Geotraverse, Atlas Map 1, Tectonics, South Sheet, zusammengestellt von Burollet, P.; Dal Piaz, G.V.; Franke, W.; Trümpy, R., 1992.

/DIN 05/ DIN 4149: 2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. - Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, 2005.

/EIS 91/ Eisbacher, G.H.: Einführung in die Tektonik. - 310 S., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1991.

/GEO 05/ GeoScience-online : Bedeutende Vulkangebiete der letzten 65 Mio. Jahre. - http://www.geo.de/index.php?cmd=redaktion/lernwelten/vp_modul8.htm&header=lw (21.12.2005).

/GFZ 07/ Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ): Die neue deutsche Baunorm DIN 4149 (Fassung 2005) und die Zuordnung von Orten zu den Erdbebenzonen. - http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb53/projects/de/research_projects/previous_projects/seism_zonierung_din4149n/index_seismische_zonierung.html (18.12.2007)

/GGU 90/ Gesellschaft für geophysikalische Untersuchungen mbH (GGU): Refraktionsseismik. - Firmenprospekt, Karlsruhe, 1990.

/GNS 08/ Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS): Endlagerung in Deutschland - Das Projekt Gorleben. - http://www.endlagerung.de/generator.aspx/templateId=renderPopupPicture/id=13512.html (04.06.2008)

/GRU 03/ Grünthal, G.; Wahlström, R.: An earthquake catalogue for central, northern and northwestern Europe based on Mw magnitudes. - GFZ Scientific Technical Report (STR), 42 S., 2003. - http://www.gfz-potsdam.de/bib/pub/str0302/0302.pdf (08.01.2008).

/GRU 07/ Grünthal, G.; Wahlström, R.: A unified database of large European earthquakes. - Eos, Transactions, American Geophysical Union, 88 (6), S. 69-71, 2007.

/HAA 58/ Haalck, H.: Lehrbuch der angewandten Geophysik. Teil II. - Zweite Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1958.

/HER 98/ Herrmann, A.G.; Röthemeyer, H.: Langfristig sichere Deponien - Situation, Grundlagen, Realisierung. - 466 S., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.

/IAE 05/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste. - Draft Safety Requirements No. WS-R-4, DS154, 47 pp., Vienna, 2005.

/IAE 90/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Siting, Design and Construction of a Deep Geological Repository for the Disposal of High Level and Alpha Bearing Wastes. - IAEA-TECDOC-563, 38 pp., Vienna, 1990.

/IAE 99/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Hydrogeological Investigation of Sites for the Geological Disposal of Radioactive Waste. - Technical Reports Series No. 391, 60 pp., Vienna, 1999.

/KLE 03/ Klett-Perthes: Formen der Bruchtektonik. - Terra-Alexander-Datenbank, Klett-Perthes Verlag, Gotha, 2003. - http://www.klett-verlag.de/sixcms_upload/media/100/formen_bruchtektonik.jpg (08.07.2005)

/KLI 02/ Klinge, H.; Köthe, A.; Ludwig, R.-R.; Zwirner, R.: Geologie und Hydrogeologie des Deckgebirges über dem Salzstock Gorleben. - Z. Ang. Geol., 2/2002, S. 7-15, 2002. - http://www.bgr.de/b1hydro/fachbeitraege/c200301/geohydro_gorleben.pdf (15.11.2004).

/KNÖ 97/ Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (Hrsg.): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 3: Geophysik. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1997.

/KÖT 07/ Köthe, A. u. a.: Standortbeschreibung Gorleben, Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72, S. 5-201, Hannover, 2007.

/KRO 67/ Kronberg, P: Photogeologie - Eine Einführung in die geologische Luftbildauswertung. - Clausthaler Tektonische Hefte, 6, 235 S., Clausthal-Zellerfeld, 1967.

/KTA 90/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen. Teil 1: Grundsätze. - Carl Heymanns Verlag, Köln, 1990.

/KUL 93/ Kull, H.; Brewitz, W.; Klarr, K.: Ventilationstest - In situ-Verfahren zur Permeabilitätsbestimmung im Kristallin. - Nagra Technischer Bericht NTB 91-02, Wettingen, 1993.

/LAN 87/ Langbein, R.: The Zechstein sulphates: The state of the art. - in: The Zechstein Facies in Europe, S. 143-188, Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg, 1987.

/LAN 04/ Langguth, H.R.; Voigt, R.: Hydrogeologische Methoden. - 2. Aufl., 1005 S., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.

/LEY 05/ Leydecker, G.: Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 - 2004, Stand: 2005. - http://www.bgr.bund.de/cln_030/nn_457146/DE/Themen/Seismologie/Erdbeben/historisch/germany.html__nnn=true (18.12.2007); Datenfile: http://www.bgr.de/quakecat (18.12.2007).

/LEY 98/ Leydecker, G.; Aichele, H.: The Seismogeographical Regionalisation for Germany: The Prime Example of Third-Level Regionalisation. - Geologisches Jahrbuch, E, S. 85-98, Hannover, 1998.

/LEY 99/ Leydecker, G.; Kopera, J.R.; Rudloff, A.: Abschätzung der Erdbebengefährdung in Gebieten geringer Seismizität am Beispiel eines Standortes in Norddeutschland. - in: Savidis, S.A. (Hrsg.): Entwicklungsstand in Forschung und Praxis auf den Gebieten des Erdbebeningenieurwesens, der Boden- und Baudynamik, DGEB - Publikation Nr. 10, S. 89-97, 1999.

/LIP 98/ Lippmann, J.: Isotopenhydrologische Untersuchungen zum Wasser- und Stofftransport im Gebiet des ERA Morsleben. - Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Naturwissenschaftlich - Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls Universität, Heidelberg, 1998.

/MAE 03/ Mäkinen, J. u. a.: Future height systems in the Nordic countries, their relation to the EVRS2000 and to INSPIRE GIS standards. - Position paper presented to the meeting of the Technical Working Group of the IAG Subcommission for the European Reference Frame (EUREF), Toledo, June 3, 2003.

/MEI 77/ Meissner, R.; Stegena, L.: Studienhefte der angewandten Geophysik. Heft 1: Praxis der seismischen Feldmessung und Auswertung. - Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 1977.

/MES 07/ Meskouris, K. u. a.: Bauwerke und Erdbeben. - 2. Aufl., 493 S., Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007.

/MEY 85/ Meyer, W.: Zur Entstehung der Maare in der Eifel. - Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Band 136, S. 141-155, 1985.

/MIL 78/ Militzer, H.; Schön, J.; Stötzner, U.; Stoll, R.: Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau. - VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978.

/MIL 84/ Militzer, H.; Weber, F. (Hrsg.): Angewandte Geophysik. Band 1: Gravimetrie und Magnetik. - Springer-Verlag, Wien, New York und Akademie-Verlag, Berlin, 1984.

/MIL 85/ Militzer, H.; Weber, F. (Hrsg.): Angewandte Geophysik. Band 2: Geoelektrik – Geothermik – Radiometrie - Aerogeophysik. - Springer-Verlag Wien, New York und Akademie-Verlag, Berlin, 1985.

/MIL 87/ Militzer, H.; Weber, F. (Hrsg.): Angewandte Geophysik. Band 3: Seismik. - Springer-Verlag Wien, New York und Akademie-Verlag, Berlin, 1987.

/MIN 06/ Mineralogisches Museum (Kristalle und Gesteine) der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster: Aus dem Feuer geboren - Vulkane und Vulkanite. - http://www.uni-muenster.de/MineralogieMuseum/vulkane/Vulkan-7.htm (09.01.2006).

/MUE 05/ Mineralogisches Museum (Kristalle und Gesteine) der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster: Die jungen Vulkangebiete der Eifel. -

http://www.uni-muenster.de/MineralogieMuseum/vulkane/Vulkan-2.htm (22.12.2005).

/NPS 08/ National Park Service des U.S. Department of the Interior: Grand Canyon National Park - Photos. - http://www.nps.gov/archive/grca/photos (04.07.2008).

/PAR 75/ Parasnis, D.S.: Methods in Geochemistry and Geophysics 3: Mining Geophysics. - Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 1975.

/PRA 78/ Pratt, H.R. u. a.: Earthquake damage to underground facilities. - DP-1513, DuPont, Savannah River Laboratory, Aiken / South Carolina, 1978.

/PRA 82/ Prakla-Seismos GmbH: Information 35, 3-D-onshore seismics. - Schlumberger Geo-Prakla, Hannover, 1982.

/REG 08/ Regiosurf: Eustasie; Isostasie; Epirogenese. - http://www.regiosurf.net/geographie/geomor/epiroge.htm (03.07.2008).

/SCH 02/ Schäfer, M.; Szymaniak, T.: Geologisch-tektonische Kartierung der Salzstruktur Asse im Subhercynen Becken. - Diplomarbeit Technische Universität Clausthal, Institut für Geologie und Paläontologie, Clausthal-Zellerfeld, 2002.

/SCH 72/ Schmidt-Thomé, P. (Hrsg.): Lehrbuch der allgemeinen Geologie, Band II Tektonik. - 579 S., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1972.

/SCR 98/ Schreiner, M.; Kreysing, K.: Geotechnik Hydrogeologie. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 4, 577 S., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.

/SER 84/ Serra, O.: Fundamentals of well-log interpretation. 1. Acquisition of logging data. - Development in Petroleum Science, 15A, Elsevier, Amsterdam u. a., 1984.

/STO 95/ Stober, I.: Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. - 191 S., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1995.

/TEL 90/ Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E.: Applied Geophysics. - Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

/TSA 88/ Tsang, C.F.; Hufschmied, P.: A borehole fluid conductivity logging method for the determination of fracture inflow parameters. - Nagra Technical Report NTB 88-13, 45 pp., Wettingen, 1988.

/ULM 06/ Ulmer, H.: http://www.geologie.uni-freiburg.de/root/blackboard/karten/kap3/geol_profil3.gif (16.03.2006).

/VUL 06/ Vulkaneifel - Grafiken zur Maarentstehung.- http://www.vulkane.net/vulkane/eifel/grafik.html (09.01.2006).

/WIL 99/ Wilken, H.; Knödel, K.: Handlungsempfehlungen für die Erkundung der geologischen Barriere bei Deponien und Altlasten. - Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bd. 7, 405 S., Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1999.

/WIS 06/ Geologie: Deutschland war ein „Land der Vulkane“. - http://wissenschafts-news.blog.de/index.php/wissenschafts-news?tag=Vulkane - Artikel vom 10.06.2006 (zuletzt aufgerufen: 18.12.2007).

/ZIR 03/ Zirngast, M. u. a.: Projekt Gorleben, Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- und Nebengebirges. - BGR, Tagebuch-Nr. 10825/03, Hannover, 2003.

/ZWI 04/ Zwirner, R.; Zirngast, M.; Köthe, A.: Der Aufbau des Deckgebirges und die Strukturentwicklung des Salzstocks Gorleben. - Z. geol. Wiss., 32 (5/6), S. 327-351, Berlin, 2004.