



BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Messmethoden für übertägige Erkundungsprogramme gemäß StandAG (MessEr)

Vorhaben 4717Fo1202

AUFTRAGNEHMER:IN

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

Ingo Kock
Thorsten Faß
Klaus Fischer-Appelt
Gerd Frieling
Jürgen Larue
Wolfram Wartenberg



Messmethoden für übertägige Erkundungsprogramme gemäß StandAG (MessEr)

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autor:innen. Das BASE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer:in wieder und muss nicht mit der des BASE übereinstimmen.

BASE-009/21

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2021110529626

Berlin, November 2021

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Auftragnehmer:in
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH, Köln

Ingo Kock
Thorsten Faß
Klaus Fischer-Appelt
Gerd Frieling
Jürgen Larue
Wolfram Wartenberg

030 184321-0
www.base.bund.de

Erscheinungsdatum: November 2021

Messmethoden für übertägige
Erkundungsprogramme ge-
mäß StandAG (MessEr)

Abschlussbericht

Ingo Kock
Thorsten Faß
Klaus Fischer-Appelt
Gerd Frieling
Jürgen Larue
Wolfram Wartenberg

Juli 2020
FKZ 4717F01202

Anmerkung:

Dieser Bericht wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Auftrag des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE; seit 01.01.2020: Bundesamt für die Sicherheit in der nuklearen Entsorgung [BASE]) im Rahmen des Vorhabens 4717F01202 erstellt.

Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Messmethoden, Messverfahren, Standortauswahlgesetz, Erkundung, übertägig

Kurzfassung

In diesem Bericht erfolgt eine vergleichende Darstellung von Messmethoden für die übertägige Erkundung von den im Standortauswahlgesetz (StandAG) definierten Endlagerbereichen. Die im StandAG genannten Wirtsgesteine, Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl werden dabei berücksichtigt, ebenso wie nationale und internationale Programme für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. Außerdem werden die Grenzen und Unsicherheiten der einzelnen Messmethoden erläutert und potenzieller Bedarf an Forschung und Entwicklung benannt.

Wesentliche Teile des Berichts sind ein tabellarischer Überblick der Messmethoden sowie detaillierte Einzeldarstellungen der Messmethoden. Außerdem wird ein Abgleich der zu erkundenden Parameter und Messgrößen, welche sich aus dem StandAG ergeben, mit den zuvor dargestellten Methoden durchgeführt. Es ist nicht Aufgabe und Ziel des Dokuments auf Basis des StandAG ein übertägiges Erkundungsprogramm für bestimmte Wirtsgesteine vorzuschlagen. Vielmehr soll der folgende Abgleich Möglichkeiten aufzeigen, die zur Erkundung eines potenziellen Endlagerstandorts in Frage kommen.

Abstract

In this report, a comparative characterization of exploration methods from the surface with special regard to nuclear waste disposal is presented. In view of the current German legislation, the site selection act (StandAG), all host rocks, criteria and requirements mentioned therein are considered. Special consideration has been applied to the repository domains defined in the site selection act, as well as to national and international exploration programs regarding nuclear waste disposal. Furthermore, limitations and uncertainties of the respective methods are explained and the potential for future research and development is examined.

Main parts of the report are an overview and a detailed characterization of exploration methods. Furthermore, the StandAG yields parameters and measurands which are matched to the previously characterized methods. It is not this report's objective to propose an exploration program for a site investigation. Instead, the aim is to illustrate a range of possibilities to investigate a potential site for a nuclear repository..

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
2	Zusammenstellung der nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik in Betracht kommenden Messmethoden.....	15
2.1	Einführung in die Zusammenstellung	15
2.2	Kategorisierung der Methoden.....	15
3	Einzeldarstellung von Messmethoden zur übertägigen Erkundung.....	27
4	Flächenhaft	31
4.1	Geländeuntersuchungen der Oberfläche	31
4.1.1	Geologische Kartierung	31
4.1.1.1	Datenblatt	31
4.1.1.2	Gemessene Parameter und zu erwartender Erkenntnisgewinn.....	31
4.1.1.3	Technische Ausführung	33
4.1.1.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	35
4.1.1.5	Aufwand	35
4.1.1.6	Kombinationsmöglichkeiten der Kartierung mit anderen Methoden....	36
4.1.1.7	Alternative Methoden.....	36
4.1.1.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	36
4.1.2	Fernerkundung	38
4.1.2.1	Datenblatt	38
4.1.2.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	38
4.1.2.3	Technische Ausführung	39
4.1.2.3.1	Fotografische Systeme (Luft- und Satellitenbilder).....	41
4.1.2.3.2	LIDAR.....	42
4.1.2.3.3	Radar-Systeme.....	43

4.1.2.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	44
4.1.2.5	Aufwand	45
4.1.2.6	Kombinationsmöglichkeiten der Fernerkundung mit anderen Methoden	47
4.1.2.7	Alternative Methoden	47
4.1.2.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen	48
4.2	Untersuchungen des Untergrunds	50
4.2.1	Seismik	50
4.2.1.1	Datenblatt	50
4.2.1.2	Gemessene Parameter und zu erwartender Erkenntnisgewinn	50
4.2.1.3	Technische Ausführung	51
4.2.1.3.1	Reflexionsseismische Messungen	52
4.2.1.3.2	Refraktionsseismische Messungen	53
4.2.1.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	54
4.2.1.5	Aufwand	55
4.2.1.6	Kombinationsmöglichkeiten der Seismik mit anderen Methoden	56
4.2.1.7	Alternative Methoden	57
4.2.1.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen	57
4.2.2	Gravimetrie	58
4.2.2.1	Datenblatt	58
4.2.2.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	59
4.2.2.3	Technische Ausführung	60
4.2.2.3.1	Aerogravimetrie und Bodenmessungen	62
4.2.2.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	63
4.2.2.5	Aufwand	64
4.2.2.6	Kombinationsmöglichkeiten der Gravimetrie mit anderen Methoden ..	64
4.2.2.7	Alternative Methoden	65

4.2.2.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	65
4.2.3	Geomagnetik	67
4.2.3.1	Datenblatt	67
4.2.3.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	67
4.2.3.3	Technische Ausführung	68
4.2.3.3.1	Bodenmessung.....	69
4.2.3.3.2	Aeromagnetik	69
4.2.3.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	70
4.2.3.5	Aufwand	70
4.2.3.6	Kombinationsmöglichkeiten der Magnetik mit anderen Methoden.....	71
4.2.3.7	Alternative Methoden.....	71
4.2.3.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	72
4.2.4	Geoelektrik	73
4.2.4.1	Datenblatt	73
4.2.4.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	73
4.2.4.3	Technische Ausführung	74
4.2.4.3.1	Eigenpotenzial-Methode (SP)	74
4.2.4.3.2	Gleichstromgeoelektrik	75
4.2.4.3.3	Induzierte Polarisation / Spektral Induzierte Polarisation (IP/SIP)	76
4.2.4.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	77
4.2.4.5	Aufwand	78
4.2.4.6	Kombinationsmöglichkeiten der Geoelektrik mit anderen Methoden ..	79
4.2.4.7	Alternative Methoden.....	79
4.2.4.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	79
4.2.5	Elektromagnetik.....	80
4.2.5.1	Datenblatt	80
4.2.5.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	81

4.2.5.3	Technische Ausführung	81
4.2.5.3.1	Künstlich erzeugte elektromagnetische Felder.....	82
4.2.5.3.2	Magnetotellurik	84
4.2.5.3.3	Kernspinresonanzspektroskopie	84
4.2.5.3.4	Bodenradar.....	85
4.2.5.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	85
4.2.5.5	Aufwand	86
4.2.5.6	Kombinationsmöglichkeiten	87
4.2.5.7	Alternative Methoden.....	87
4.2.5.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	87
4.2.6	Radiometrie	89
4.2.6.1	Datenblatt	89
4.2.6.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	89
4.2.6.3	Technische Ausführung	90
4.2.6.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	90
4.2.6.5	Aufwand	92
4.2.6.6	Kombinationsmöglichkeiten der Radiometrie mit anderen Methoden	92
4.2.6.7	Alternative Methoden.....	93
4.2.6.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	93
5	Punktuell	95
5.1	Bohrungsaufschluss	96
5.1.1	Sondierungen	96
5.1.1.1	Datenblatt.....	96
5.1.1.2	Gemessene Parameter und zu erwartender Erkenntnisgewinn.....	97
5.1.1.3	Technische Ausführung	97
5.1.1.3.1	Rammkernsondierungen.....	98
5.1.1.3.2	Drucksondierungen.....	99

5.1.1.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	99
5.1.1.5	Aufwand	99
5.1.1.6	Kombinationsmöglichkeiten von Sondierungen mit anderen Methoden	100
5.1.1.7	Alternative Methoden	100
5.1.1.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen von Sondierungen	100
5.1.2	Tiefbohrungen	101
5.1.2.1	Datenblatt	101
5.1.2.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	102
5.1.2.3	Technische Ausführung	104
5.1.2.3.1	Spülung und Bohrklein	105
5.1.2.3.2	Kernbohrungen	106
5.1.2.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	107
5.1.2.5	Aufwand	108
5.1.2.6	Kombinationsmöglichkeiten von Kernbohrungen mit anderen Methoden	109
5.1.2.7	Alternative Methoden	109
5.1.2.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen	109
5.2	Bohrlochmessungen und -tests	111
5.2.1	Datenblatt	111
5.2.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	112
5.2.3	Technische Ausführung	113
5.2.3.1	Akustische und seismische Messverfahren	114
5.2.3.1.1	Laufzeitmessungen	115
5.2.3.1.2	Bohrlochseismik	116
5.2.3.2	Gravimetrische Messverfahren	117
5.2.3.3	Elektrische Messverfahren	117
5.2.3.3.1	Widerstands/Leifähigkeitsmessungen	118

5.2.3.3.2	Potentialmessungen	120
5.2.3.3.3	Ausbreitungsmessungen	120
5.2.3.4	Elektromagnetische und magnetische Messverfahren	121
5.2.3.4.1	Magnetische Messungen	121
5.2.3.4.2	Kernspinresonanzspektroskopie	121
5.2.3.4.3	Bohrlochradar	122
5.2.3.5	Radiometrische Messverfahren	123
5.2.3.5.1	Natürliche Radioaktivität	123
5.2.3.5.2	Sonden mit ionisierender Strahlung	124
5.2.3.6	Optische Messverfahren	125
5.2.3.6.1	Abbildungen der Bohrlochwand	125
5.2.3.6.2	Optische Sensoren	126
5.2.3.7	Geomechanische Messverfahren	126
5.2.3.7.1	Bohrlochdurchmesser	127
5.2.3.7.2	Tests im Bohrloch	127
5.2.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	128
5.2.5	Aufwand	131
5.2.6	Kombinationsmöglichkeiten von Bohrlochmessungen und -tests mit anderen Methoden.....	131
5.2.7	Alternative Methoden	132
5.2.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	132
6	Labor	135
6.1	Petrografie und Mineralogie.....	136
6.1.1	Datenblatt	136
6.1.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	136
6.1.3	Technische Ausführung	138
6.1.3.1	Lichtmikroskopie	138
6.1.3.1.1	Polarisationsmikroskopische Untersuchungen im Durchlicht und Auflicht.....	138

6.1.3.1.2	Vitrinitreflexion	139
6.1.3.2	Elektronenmikroskopie.....	139
6.1.3.3	Lumineszenz	141
6.1.3.3.1	Thermolumineszenz und optisch stimulierte Lumineszenz.....	141
6.1.3.3.2	Fotolumineszenz.....	141
6.1.3.3.3	Kathodolumineszenz	142
6.1.3.4	Spektroskopie.....	142
6.1.3.4.1	Reflexions-/Transmissionsspektroskopie	142
6.1.3.4.2	Fluoreszenzspektroskopie	143
6.1.3.5	Röntgendiffraktometrie.....	143
6.1.3.6	Gasvolumetrische Analysen (Scheibler-Methode).....	144
6.1.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	144
6.1.5	Aufwand	145
6.1.6	Kombinationsmöglichkeiten der Petrografie mit anderen Methoden.	145
6.1.7	Alternative Methoden.....	146
6.1.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	146
6.2	Boden- und Felsmechanik	148
6.2.1	Datenblatt	148
6.2.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	149
6.2.3	Technische Ausführung	150
6.2.3.1	Kornanalysen.....	150
6.2.3.2	Pyknometrie.....	151
6.2.3.3	Porosimetrie	152
6.2.3.3.1	Gasadsorptionsmethoden.....	152
6.2.3.3.2	Quecksilberdruckporosimetrie.....	152
6.2.3.4	Mechanik	153
6.2.3.4.1	Druckversuche.....	155
6.2.3.4.2	Zugversuche.....	158
6.2.3.4.3	Scherversuche.....	158
6.2.3.4.4	Quelldruckversuche	159

6.2.3.4.5	Kriechversuche	160
6.2.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	161
6.2.5	Aufwand	162
6.2.6	Kombinationsmöglichkeiten der Boden- und Felsmechanik mit anderen Methoden	162
6.2.7	Alternative Methoden	163
6.2.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen	163
6.3	Petrophysik	165
6.3.1	Datenblatt	165
6.3.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	166
6.3.3	Technische Ausführung	167
6.3.3.1	Akustik	168
6.3.3.1.1	Ultraschall	168
6.3.3.1.2	Schwingungs- und Modalanalyse	169
6.3.3.2	Elektrik	169
6.3.3.3	Elektromagnetik	170
6.3.3.3.1	Kernspinresonanzspektroskopie	170
6.3.3.3.2	Magnetische Suszeptibilität	170
6.3.3.4	Radiometrie	171
6.3.3.4.1	Röntgen-Computertomographie (CT)	171
6.3.3.4.2	Gammaspektrometrie	171
6.3.3.5	Optische Foto- und Scanverfahren	172
6.3.3.6	Thermische Untersuchungen	172
6.3.3.6.1	Messverfahren zu thermischen Leitfähigkeiten	173
6.3.3.6.2	Kalorimetrie	174
6.3.3.6.3	Thermische Dilatometer	174
6.3.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode	175
6.3.5	Aufwand	175
6.3.6	Kombinationsmöglichkeiten der Petrophysik mit anderen Methoden	176

6.3.7	Alternative Methoden.....	176
6.3.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	176
6.4	Geochemie	177
6.4.1	Datenblatt	177
6.4.2	Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse	178
6.4.3	Technische Ausführung	179
6.4.3.1	Gaschromatographie	179
6.4.3.2	Massenspektrometrie	180
6.4.3.2.1	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (engl. "inductively Coupled Plasma", ICP-MS)	182
6.4.3.3	Atomabsorptions-Spektrometrie (AAS)	183
6.4.3.4	Rock-Eval-Pyrolyse	185
6.4.4	Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen ..	186
6.4.5	Aufwand	187
6.4.6	Kombinationsmöglichkeiten der geochemischen Analysen mit anderen Methoden	187
6.4.7	Alternative Methoden.....	188
6.4.8	Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen.....	188
7	Darstellung von Messmethoden zur Erfüllung der Anforderungen gemäß StandAG.....	191
7.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	191
7.1.1	Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 25 StandAG).....	192
7.2	Identifikation der Messgrößen und Abgleich mit den Messmethoden	192
7.2.1	Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG	193
7.2.2	Mindestanforderungen nach § 23 StandAG	195
7.2.3	Geowissenschaftliche Abwägungskriterien nach § 24 StandAG	197
7.2.3.1	Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper nach Anlage 2 StandAG	197

7.2.3.2	Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit nach Anlage 3 StandAG	202
7.2.3.3	Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse nach Anlage 4 StandAG	206
7.2.3.4	Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften nach Anlage 5 StandAG	207
7.2.3.5	Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten nach Anlage 6 StandAG	210
7.2.3.6	Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit nach Anlage 8 StandAG	213
7.2.3.7	Kriterium zur Bewertung des Schutzes des ewG durch das Gebirge nach Anlage 11 StandAG	214
7.3	Tabellarische Darstellung zur Gesamteinschätzung der Messmethoden zur Erfüllung der Anforderungen gemäß StandAG..	219
8	Zusammenfassung	225
9	Abkürzungsverzeichnis.....	228
10	Glossar (englisch-deutsch).....	230
11	Literatur	237
12	Abbildungsverzeichnis.....	267
13	Tabellenverzeichnis.....	269

1 Einleitung

Am 09.04.2018 wurde die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE; seit 01.01.2020: Bundesamt für die Sicherheit in der nuklearen Entsorgung [BASE]) beauftragt, eine vergleichende Darstellung von Messmethoden für die übertägige Erkundung von den in § 2 des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (im Folgenden: StandAG) /STA 17/ definierten Endlagerbereichen vorzunehmen. Das Vorhaben wurde von der GRS im Zeitraum 09.04.2018 bis 31.03.2019 bearbeitet. Die im StandAG genannten Wirtsgesteine, Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl werden dabei berücksichtigt, ebenso wie nationale und internationale Programme für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. Außerdem werden die Grenzen und Unsicherheiten der einzelnen Messmethoden erläutert und potenzieller Bedarf an Forschung und Entwicklung benannt.

Den nationalen Rahmen für die Standortsuche in Deutschland gibt das StandAG /STA 17/ vor, aber auch international wurden Rahmenbedingungen für eine Standortauswahl (engl.: „siting“) publiziert. Zu nennen sind hier beispielsweise der Specific Safety Guide SSG-14 /IAEA 11a/ der Internationalen Atom Energie Organisation (IAEA), die Safety Requirements /IAEA 06/, die Specific Safety Requirements /IAEA 11b/. Die Publikationen der IAEA beschreiben einen groben Rahmen für eine Standortauswahl, werden aber im Hinblick auf tatsächliche Messmethoden oder –verfahren nicht konkret, so dass aus diesen Publikationen keine direkten Informationen in das Vorhaben eingehen.

In den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse des Vorhabens dargestellt. In Kapitel 2 ist ein Überblick der Messmethoden dargestellt, die nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik (Mai 2018) für die übertägige Erkundung in Betracht kommen. Die Zusammenstellung des Überblicks erfolgt in tabellarischer Form. Die Messmethoden sind in der tabellarischen Übersicht (Tab. 2.1) so geordnet und kategorisiert (in „Flächenhaft“, „Punktuell“ und „Labor“), dass sich aus dieser Struktur eine Gliederung ergibt, welche den detaillierten Einzeldarstellungen der Messmethoden zu Grunde liegt. Die Einzeldarstellung der Messmethoden ist in mehrere Kapitel aufgeteilt: Kapitel 3 gibt eine kurze Einführung in die Einzeldarstellung während die Darstellung selbst in den Kapiteln 4 bis 6 (Kapitel 4: „Flächenhaft“, Kapitel 5: „Punktuell“ und Kapitel 6: „Labor“) erfolgt. In Kapitel 7 ist beschrieben, welche zu erkundenden Parameter und Messgrößen sich aus dem StandAG ergeben und mit welchen der in Kapitel 4 bis 6 dargestellten Methoden

diese ermittelt werden können. In Kapitel 8 erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Deutschsprachige Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis aufgelistet, englischsprachige Abkürzungen sind in einem Glossar separat erläutert.

Messmethoden, mit denen rein hydrologische, hydrogeologische und/oder hydrogeochemische Eigenschaften des Untergrunds erkundet werden, werden im Schlussbericht zum Vorhaben „Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren (übErStand)“ (FKZ 4717003) beschrieben.

Außerdem sei an dieser Stelle betont, dass im Rahmen dieses Vorhabens und in diesem Bericht kein Vorschlag für ein Erkundungsprogramm erfolgt.

2 Zusammenstellung der nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik in Betracht kommenden Messmethoden

2.1 Einführung in die Zusammenstellung

In diesem Kapitel ist in tabellarischer Form (siehe Tab. 2.1) ein kurzer Überblick über die Messmethoden dargestellt, mit welchen üblicherweise die geologische Erkundung des Untergrunds von über Tage durchgeführt wird. Der Fokus liegt dabei auf einer möglichst vollständigen Auflistung von Methoden, die allgemein auf die geologische Erkundung des Untergrunds abzielen. Darunter ist zunächst die Erfassung der Gesteins- und Mineralzusammensetzung (Petrografie, Lithologie, Petrologie) des Untergrunds zu verstehen. Des Weiteren darunter zu verstehen ist die Erkundung der Struktur des Untergrunds (Strukturgeologie, Falten- und Bruchtektonik), also der Lage der geologischen Einheiten und ihrer Störung und Faltung. Messmethoden, welche dies in regionalem, lokalem oder auch mikroskopischem Maßstab leisten, werden in den nächsten Kapiteln (Kapitel 2 bis 6) dargestellt.

Messmethoden, mit denen rein hydrologische, hydrogeologische und/oder hydrogeochemische Eigenschaften des Untergrunds erkundet werden, sind nicht Gegenstand dieses Vorhabens. Diese Methoden werden im Schlussbericht zum Vorhaben „Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren (übErStand)“ (FKZ 4717003) beschrieben. Für einzelne Messmethoden ist dabei eine Abgrenzung nicht immer scharf vorzunehmen, im Zweifel haben die Messmethoden in beiden Vorhaben Eingang gefunden.

In diesem Überblick ist der aktuelle (Mai 2018) Stand von Wissenschaft und Technik eingegangen, dieser wird in den Kapiteln 4 bis 6 dokumentiert und am Schluss des Berichts referenziert.

2.2 Kategorisierung der Methoden

Die Messmethoden lassen sich grundsätzlich auf verschiedene Art und Weise kategorisieren. Zum zentralen Begriff der „Messmethode“ und allgemein zu den Grundlagen der Messtechnik existiert die DIN 1319-1 /DIN 95a/. Auf die hier in Tab. 2.1 dargestellte Kategorisierung der Messmethoden wurde diese Norm zumindest teilweise angewendet

(siehe Ausführungen im nächsten Absatz). Trotzdem ist die hier genutzte Kategorisierung der Messmethoden nicht als absolut zu verstehen, sondern soll in erster Linie dazu dienen, die Messmethoden in einer übersichtlichen Art und Weise zu ordnen und später in den Kapiteln 4 bis 6 detaillierter darzustellen. Deshalb sind auch viele andere Möglichkeiten der Kategorisierung oder Klassifikation denkbar und auch in der Literatur zu finden.

In diesem Bericht werden die Methoden zunächst grob in die Kategorien „Flächenhaft“, „Punktuell“ sowie „Labor“ eingeteilt. Darunter erfolgt eine Verfeinerung in weitere Unterkategorien, in welcher die Verfahren im Wesentlichen hinsichtlich ihres Untersuchungsgegenstandes (wie zum Beispiel „Oberfläche“, „Untergrund“, „Bohrungsaufschluss“) unterteilt werden. Die dritte Unterkategorie beschreibt stichwortartig – in Anlehnung an die DIN 1319-1 /DIN 95a/ – das „Messprinzip“, also die wissenschaftliche Grundlage eines Messverfahrens. Der Begriff der „Messmethode“ ist nach DIN 1319-1 eine „spezielle, vom Messprinzip unabhängige Art des Vorgehens bei der Messung“. Ebenso ist nach dieser Norm das sogenannte „Messverfahren“ die praktische Anwendung eines Messprinzips und einer Messmethode. Insofern spiegelt die nachfolgende weitere Unterkategorie „Messmethode/Messverfahren“, auch wesentliche Aspekte der Messverfahren wider.

Außerdem erfolgt in der Tab. 2.1 ein Verweis auf das Kapitel, in welchem die Messmethode im Detail beschrieben ist sowie eine Kurzdarstellung der beabsichtigten Erkenntnisse beziehungsweise Parameter, die Ziel der Messung sind. Im Ergebnis entsprechen wesentliche Teile (die Spalten „Messprinzip“ sowie „Messverfahren/Messmethode“) der Tabelle der DIN 1319-1. Eine ausschließlich auf der DIN 1319-1 basierte Darstellungsform würde die Lesbarkeit stark einschränken und erschien deshalb nicht sinnvoll.

Tab. 2.1 Zusammenstellung von Messmethoden zur überträgigen Erkundung

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Flächenhaft	Geländeuntersuchungen an der Oberfläche	Geologische Kartierung	<ul style="list-style-type: none"> • Visuell (Lupe), Maßband • Geologenhammer, Pürckhauer • Geologenkompass, GNSS • Lesesteine 	4.1.1	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie, Fazies und Struktur der Geländeoberfläche und des Untergrunds • Geologie, Tektonik, Altersbestimmung, Stratigraphie, Paläolandschaftsrekonstruktion, Natur-Risiko (zum Beispiel Rutschungen, Felsstürze), industrielle Abbauflächen • Paläogeographie
		Fernerkundung	<ul style="list-style-type: none"> • Fotografische Systeme (Luftbilder und Satellitenbilder) • LIDAR • Radar-Systeme 	4.1.2	<ul style="list-style-type: none"> • Geologie, Morphologie und Strukturgeologie
	Untersuchungen des Untergrundes	Seismik	<ul style="list-style-type: none"> • Reflexion • Refraktion 	4.2.1	<ul style="list-style-type: none"> • 2D- oder 3D-Interpretation der Untergrundstruktur • Bestimmung der Festgesteinstiefe • Tiefenlage von Schichtgrenzen
		Gravimetrie	<ul style="list-style-type: none"> • Bodenmessung • Aerogravimetrie 	4.2.2	<ul style="list-style-type: none"> • Struktur des Untergrunds, großräumig und regional
		Geomagnetik	<ul style="list-style-type: none"> • Aeromagnetik • Bodenmessung 	4.2.3	<ul style="list-style-type: none"> • Struktur des Untergrunds, großräumig und regional

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Flächenhaft	Untersuchungen des Untergrundes	Geoelektrik	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenpotenzial (EP/SP) • Gleichstromgeoelektrik • (Spektral) Induzierte Polarisation (IP/SIP) 	4.2.4	<ul style="list-style-type: none"> • Exploration von Erzvorkommen • Detektion von Tonschichten • Hydraulische Parameter • Erkundung von Lockersedimenten • Grundwasserspiegel
		Elektromagnetik	<ul style="list-style-type: none"> • Künstlich erzeugte EM Felder, beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> ○ Tilt Angle ○ Phasenverschiebung (Phase Measuring) ○ Transienten-Elektromagnetik (Time-Domain Electromagnetic Surveying (TDEM/TEM)) 	4.2.5 bzw. 4.2.5.3.1	<ul style="list-style-type: none"> • Geologische Körper bzw. Strukturen, zum Teil oberflächennah
			<ul style="list-style-type: none"> • Magnetotellurik 	4.2.5 bzw. 4.2.5.3.2	<ul style="list-style-type: none"> • Geologische Körper bzw. Strukturen
			<ul style="list-style-type: none"> • Kernspinresonanzspektroskopie (Nuclear Magnetic Resonance (NMR)) 	4.2.5 bzw. 4.2.5.3.3	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächennahe geologische Körper bzw. Strukturen
			<ul style="list-style-type: none"> • Bodenradar (Radio Detection and Ranging): <ul style="list-style-type: none"> ○ Elektromagnetische Reflexion (EMR) bzw. Ground Penetrating Radar (GPR) 	4.2.5 bzw. 4.2.5.3.4	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächennahe geologische Körper bzw. Strukturen

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Flächenhaft	Untersuchungen des Untergrunds	Radiometrie	<ul style="list-style-type: none"> • Integrale Strahlungsmessung • Spektrale Strahlungsmessung (α-, β-, γ-Spektrometrie) • ^{222}Rn Emanation 	4.2.6	<ul style="list-style-type: none"> • Energiespektrum • natürliche Radioaktivität • Lithologie, Störungen
Punktuell	Bohrungsaufschluss	Oberflächennahe Sondierung	<ul style="list-style-type: none"> • Rammkernsondierungen • Drucksondierungen 	5.1.1	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächennahe Lithologie • untergrundmechanische Eigenschaften (Bindigkeit, Schwerfestigkeit) • Stratigraphie, Lagerungsdichte
		Tiefbohrung	<ul style="list-style-type: none"> • Feldaufnahme und feldgeologische Analytik der Kerne • Feldaufnahme des Bohrkleins und feldgeologische Analytik der Spülung • Fotografische Dokumentation 	5.1.2	<ul style="list-style-type: none"> • Petrografie/Lithologie, Stratigrafie, Gefüge • Chemische Zusammensetzung der Formationswässer
	Bohrlochmessungen	Akustik	<ul style="list-style-type: none"> • Laufzeitmessungen <ul style="list-style-type: none"> ○ Kompressions- und Scherwellen ○ Kohärenz-Laufzeitmessung (Slowness-Time-Coherence, STC) ○ Scherwellen-Anisotropie (shear anisotropy bzw. cross-dipole) ○ Acoustic Tele Viewer (ATV) 	5.2.3.1 bzw. 5.2.3.1.1	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie und mechanische Eigenschaften • Struktur und Gefüge im Nahbereich des Bohrlochs (Klüfte, Trennflächen, Porosität) • Kalibration der flächenhaften Seismik

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Punktuell	Bohrlochmessungen	Akustik	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochseismik <ul style="list-style-type: none"> ○ Vertical seismic profile (VSP) ○ Cross-Hole 	5.2.3.1 bzw. 5.2.3.1.2	<ul style="list-style-type: none"> • 2D/3D Struktur des Untergrunds • Seismische Tomographie • Korrelation zu flächenhafter Seismik
		Gravimetrie	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochgravimeter 	5.2.3.2	<ul style="list-style-type: none"> • Dichte und Korrelation zu flächenhafter Gravimetrie
		Elektrik	<ul style="list-style-type: none"> • Widerstands-/ Leitfähigkeitsmessungen <ul style="list-style-type: none"> ○ Mikroelektroden, azimutale Messungen ○ Formation Micro Scanner, Formation Micro Imager • Induktionsmessungen 	5.2.3.3 bzw. 5.2.3.3.1	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie • hydraulische Eigenschaften • Gefüge (Abbilder der Bohrlochwand) • Porosität • Messung der dielektrischen Eigenschaften • Unterscheidung zwischen Wasser und Kohlenwasserstoffen im Porenraum
			<ul style="list-style-type: none"> • Potentialmessungen 	5.2.3.3 bzw. 5.2.3.3.2	
			<ul style="list-style-type: none"> • Ausbreitungsmessungen 	5.2.3.3 bzw. 5.2.3.3.3	
		Elektromagnetik	<ul style="list-style-type: none"> • Magnetische Messungen 	5.2.3.4 bzw. 5.2.3.4.1	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie
			<ul style="list-style-type: none"> • Kernspinresonanzspektroskopie (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 	5.2.3.4 bzw. 5.2.3.4.2	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität • Porenstruktur

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Punktuell	Bohrlochmessungen	Elektromagnetik	<ul style="list-style-type: none"> • Radar 	5.2.3.4 bzw. 5.2.3.4.3	<ul style="list-style-type: none"> • 2D/3D Struktur des Untergrunds • Tomographie
		Radiometrie	<ul style="list-style-type: none"> • Natürliche Radioaktivität <ul style="list-style-type: none"> ○ Natürliche Gamma-Strahlung (Natural Gamma-Ray, NGR) ○ Spektrale Gamma-Strahlung (Spectral Gamma-Ray, SGR) 	5.2.3.5 bzw. 5.2.3.5.1	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie • Wasser- und/oder Kohlenwasserstoffgehalt • Radionuklidgehalt • Dichte
			<ul style="list-style-type: none"> • Sonden mit ionisierender Strahlung <ul style="list-style-type: none"> ○ Gamma-Gamma Log ○ Photoelektrischer Faktor (PEF) ○ Neutron Log ○ Gepulste Verfahren 	5.2.3.5 bzw. 5.2.3.5.2	
		Optik	<ul style="list-style-type: none"> • Abbildungen der Bohrlochwand <ul style="list-style-type: none"> ○ Optical Tele Viewer (OTV) 	5.2.3.6 bzw. 5.2.3.6.1	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie und Gefüge (Schichtgrenzen, Klüfte und Trennflächen)
			<ul style="list-style-type: none"> • Optische Sensoren 	5.2.3.6 bzw. 5.2.3.6.2	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur
Geomechanik	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochdurchmesser bzw. -form (Caliper) 	5.2.3.7 bzw. 5.2.3.7.1	<ul style="list-style-type: none"> • Spannungsfeld 		

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Punktuell	Bohrlochmessungen	Geomechanik	<ul style="list-style-type: none"> • Tests im Bohrloch <ul style="list-style-type: none"> ○ Dilatometermessungen ○ Overcoring • Hydraulisches Fracking zur Spannungsmessung 	5.2.3.7 bzw. 5.2.3.7.2	<ul style="list-style-type: none"> • Spannungsfeld • Elastische Parameter (Moduln, zum Beispiel E-modul, etc.) des Gesteins, Gesteinsfestigkeiten
Labor	Petrografie	Lichtmikroskopie	<ul style="list-style-type: none"> • Polarisationsmikroskopische Untersuchung im Durchlicht und Auflicht • Vitrinitreflexion 	6.1.3.1	<ul style="list-style-type: none"> • Modalanalyse: Mineralgehalt, Mineralart • Porosität, Porenraumermittlung • Anzahl und Art der Mikrofossilien Kornbestand • Anteil von organischem Material, Inkohlungsgrad
		Elektronenmikroskopie	<ul style="list-style-type: none"> • Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) • Transmissions-Elektronen-Mikroskop (TEM) 	6.1.3.2	<ul style="list-style-type: none"> • Mineralogie, Modalanalyse
		Lumineszenz	<ul style="list-style-type: none"> • Thermolumineszenz und optische Lumineszenz (OSL) • Fotolumineszenz • Kathodolumineszenz 	6.1.3.3	<ul style="list-style-type: none"> • Datierung (Sedimentations-, Abkühlungs-, Kristallisations- bzw. Umlagerungsalter) • Modalanalyse • Analyse der Kristallchemie • Mineralbildung und -umwandlung
		Spektroskopie	<ul style="list-style-type: none"> • Reflexions-/Transmissionsspektroskopie • Fluoreszenzspektroskopie 	6.1.3.4	<ul style="list-style-type: none"> • Mineralogie • Modalanalyse

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Labor	Petrografie	Röntgen	<ul style="list-style-type: none"> • Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD) 	6.1.3.5	<ul style="list-style-type: none"> • Kristallstrukturen • Modalanalyse • Zusammensetzung und Winkligkeit von Mineralen • Verteilung, Textur und Porosität von Mineralen
		Gasvolumetrie	<ul style="list-style-type: none"> • Scheibler Methode 	6.1.3.6	<ul style="list-style-type: none"> • Karbonatgehalt
	Boden- und Felsmechanik	Kornanalysen	<ul style="list-style-type: none"> • Sieb- und Schlämmanalysen • Sedimentationsanalysen • Laser-Partikelanalyse 	6.2.3.1	<ul style="list-style-type: none"> • Korngrößenverteilung • Gesteinsklassifikation
		Pyknometrie	<ul style="list-style-type: none"> • Flüssigkeits- oder Gaspyknometrie 	6.2.3.2	<ul style="list-style-type: none"> • Dichte
		Porosimetrie	<ul style="list-style-type: none"> • Gasadsorptionsmethoden 	6.2.3.3 bzw. 6.2.3.3.1	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität • spezifische Oberfläche
			<ul style="list-style-type: none"> • Quecksilberdruckporosimetrie 	6.2.3.3 bzw. 6.2.3.3.2	<ul style="list-style-type: none"> • Effektive (durchströmbare) Porosität • spezifische Oberfläche
	Mechanik	<ul style="list-style-type: none"> • Druckversuche <ul style="list-style-type: none"> ○ Rückprallhammer ○ Ödometer ○ Punktlastversuch 	6.2.3.4	<ul style="list-style-type: none"> • Elastische Moduln • Festigkeiten • Quelleigenschaften 	

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter		
Labor	Boden- und Felsmechanik	Mechanik	<ul style="list-style-type: none"> ○ Einaxiale Versuche ○ Triaxiale Versuche • Zugversuche <ul style="list-style-type: none"> ○ Haftzugversuch ○ Spaltzugversuche • Scherversuche <ul style="list-style-type: none"> ○ Rahmenscherversuch ○ Kreisringscherversuch • Quelldruckversuche • Kriechversuche 	6.2.3.4	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitabhängiges Deformationsverhalten 		
	Petrophysik	Akustik		<ul style="list-style-type: none"> • Ultraschallmessungen 	6.3.3.1 bzw. 6.3.3.1.1	<ul style="list-style-type: none"> • dynamische elastische Moduln • dreidimensionales inneres Abbild der Probe • Schädigungsparameter des Gesteins 	
				<ul style="list-style-type: none"> • Schwingungs- und Modalanalyse 	6.3.3.1 bzw. 6.3.3.1.2	<ul style="list-style-type: none"> • dynamische elastische Moduln • Schädigungsparameter des Gesteins 	
		Elektrik			<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Leitfähigkeit bzw. Widerstand 	6.3.3.2	<ul style="list-style-type: none"> • Formationswiderstand • Porosität
					Elektromagnetik		<ul style="list-style-type: none"> • Kernspinresonanzspektroskopie (NMR)

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Labor	Petrophysik	Elektromagnetik	<ul style="list-style-type: none"> Magnetische Suszeptibilität 	6.3.3.3	<ul style="list-style-type: none"> Gehalt von magnetischen Mineralen Mittels der Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität entstehen, Rückschlüsse auf das Gefüge
		Radiometrie	<ul style="list-style-type: none"> Röntgen-Computertomographie (CT) 	6.3.3.4 bzw. 6.3.3.4.1	<ul style="list-style-type: none"> Porosität, Porenraumanalyse Berechnung und Visualisierung der Permeabilität, Porendruck und Migrationsraten Quantifizierung von Fluidphasen und ihrer Verteilung Visualisierung von Rissmustern, Mikrostrukturen (beispielsweise Kreuzschichtungen und Laminierungen) und potenziellen Migrationspfaden für Fluide Interpretation von mechanischen, dynamischen elastischen, elektrischen und Permeabilitätsanisotropien
			<ul style="list-style-type: none"> Gammastrahlungsspektrometrie 	6.3.3.4 bzw. 6.3.3.4.2	<ul style="list-style-type: none"> Korrelation mit Bohrlochmessungen Lithologie Radionuklidgehalt eines Gesteins
		Optik	<ul style="list-style-type: none"> Fotografie Scanner 	6.3.3.5	<ul style="list-style-type: none"> Dokumentation der Kerne und des Kerngewinns Visualisierung von KW-Gehalt oder der Dreidimensionalität der Probe

Kategorie	Untersuchungsgegenstand	Messprinzip	Messmethode oder Messverfahren	Kapitel	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Labor	Petrophysik	Thermische Untersuchungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wärme- und Temperaturleitung <ul style="list-style-type: none"> ○ Thermal Conductivity Scanner ○ Laser oder Light Flash-Methode (LFA) • Wärmekapazität <ul style="list-style-type: none"> ○ Kalorimetrie • Wärmeausdehnung <ul style="list-style-type: none"> ○ Dilatometrie 	6.3.3.6	<ul style="list-style-type: none"> • Wärme- und Temperaturleitfähigkeitskoeffizient • Spezifische Wärmekapazität • Wärmeausdehnungskoeffizient
	Geochemie	Organische und anorganische Analytik	<ul style="list-style-type: none"> • Gaschromatographie (GC) • Massenspektrometrie (MS) • Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) • Rock-Eval-Pyrolyse 	6.4.3	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammensetzung von organischen Substanzgemischen • Halogenkohlenwasserstoffe (zum Beispiel CKW, FCKW) • gasförmige organische Verbindungen • anorganische Verbindungen, Elemente und Isotope • Qualitative und quantitative Bestimmung von Metallen und Halbmetallen • Zusammensetzung von Kerogen • Reifegradbestimmung von Erdölen bei der Kohlenwasserstoffexploration

3 Einzeldarstellung von Messmethoden zur übertägigen Erkundung

In den Kapiteln 4 bis 6 werden die Messprinzipien und -methoden aus Kapitel 2.2 (Tab. 2.1) näher erläutert.

Jedes Messprinzip wird zu Beginn der Kapitel als Überblick durch ein kurzes Datenblatt charakterisiert, welches die wesentlichen Eigenschaften der darauffolgenden näheren Beschreibung bezogen auf die Erkundung des Untergrunds zusammenfasst. Am Schluss dieser Kapitel werden tabellarisch auf weiterführende Literatur verwiesen und kurz wesentliche Punkte des Stands von Wissenschaft und Technik wiedergegeben.

Innerhalb der einzelnen Kapitel zu den Messprinzipien und -methoden wird auf wesentliche Aspekte eingegangen. Diese sind:

1. Gemessene Parameter und zu erwartender Erkenntnisgewinn

Hier wird kurz dargestellt welche Parameter tatsächlich gemessen werden und welche Erkenntnis aus geowissenschaftlicher Sicht damit erzielt werden kann. Teilweise ist es erforderlich, kurz auf naturwissenschaftliche Grundlagen einzugehen.

2. Technische Ausführung

Hier werden als Überblick eine technische Beschreibung gegeben sowie der Ablauf einer Messung erläutert. Außerdem werden gegebenenfalls Details zur Auswertung der Messung beschrieben. Generell kann eine Auswertung qualitativ oder quantitativ erfolgen. Eine qualitative Aussage kann zum Beispiel sein, dass eine geologische Formation an einer Lokation vorhanden ist. Eine quantitative Aussage dagegen kann Information über Teufe oder Mächtigkeit enthalten, ist also weitergehend als eine qualitative Aussage anzusehen.

Dieser Abschnitt kann – je nachdem, ob eine weitere Unterteilung erforderlich ist – mehrere Unterkapitel zur technischen Ausführung enthalten. Hier werden die Messmethoden aus Tab. 2.1 (Spalte „Messmethode oder /Messverfahren“) technisch erläutert. Teilweise findet auch eine detailliertere Beschreibung des Erkenntnisgewinns statt, wenn dies erforderlich ist.

3. Aussagekraft, Grenzen und einschränkende Randbedingungen der Methode

Hier wird erläutert, wie geeignet eine Methode zur Erkundung des geologischen Untergrunds ist, wo diesbezüglich ihre Grenzen liegen und was Einflussfaktoren und Randbedingungen sind, die eine Messung beeinflussen können.

4. Aufwand

In diesem Abschnitt werden Faktoren beziehungsweise Risiken beschrieben, welche

- den Zeitbedarf vom Beginn der praktischen Durchführung bis zum Vorliegen der ausgewerteten Ergebnisse,
- den Organisationsbedarf zur Durchführung der Methode sowie
- den Kostenrahmen zur Durchführung der Methode beeinflussen.

Dabei wird immer davon ausgegangen, dass Datenakquisition, -auswertung und -interpretation so geplant werden, dass ein qualitätsgesicherter Ablauf gegeben ist. Planungsfehler werden deshalb an dieser Stelle nicht mit einbezogen.

5. Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Methoden

Oftmals lässt sich durch eine Kombination von Methoden die Aussagekraft der Messungen verbessern oder auch verifizieren. Auf diesen Aspekt wird hier eingegangen.

6. Alternative Methoden

Falls man mit einer anderen Methode als der beschriebenen zu einer ähnlichen oder gleichen Erkenntnis kommen kann, ist dies in diesem Kapitel beschrieben.

7. Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu/Weiterentwicklungen

Hier wird wiedergegeben, welche Neu- oder Weiterentwicklungen in Zukunft möglicherweise erwartbar sind oder welche Themen gerade im Fokus bzgl. der Messmethode/des Messprinzips stehen.

Zusätzlich werden tabellarisch wichtige Lehrbücher, Weblinks oder sonstige wichtige Informationen aufgelistet, insbesondere in welchen Ländern das Messprinzip bereits zur Exploration/Untersuchung von Endlagerstandorten angewendet wurde.

In der überblicksartigen Darstellung (Kapitel 2) und der folgenden Beschreibung der Messmethoden in den Kapiteln 4–6 werden im Detail Erkenntnisinteressen und gemessene Parameter der jeweiligen Messmethoden erklärt. Es wird nur teilweise (nämlich in

den jeweiligen Unterkapiteln zur Kombination von Methoden) darauf eingegangen, wie das übergeordnete Ziel, die Standorterkundung, durch die Anwendung der verschiedenen Methoden erreicht wird: Alle Messmethoden werden in unterschiedlicher Kombination dazu eingesetzt, ein möglichst widerspruchsfreies geowissenschaftliches Modell des Untergrunds herzuleiten. Der Prozess der Modellentwicklung ist nicht standardisierbar, erfordert den Einsatz von Fachkräften verschiedenster geowissenschaftlicher Disziplinen und erfolgt dabei integrativ unter Nutzung aller vorhandenen Daten. Der Modellbildungsprozess ist abhängig von vielen Faktoren, unter anderem vom zu erkundenden Standort selbst (siehe zum Beispiel /MUN 03/). Das bedeutet, dass der Einsatz der Erkundungsmethoden von Standort zu Standort variiert und über den Einsatz von Methoden teilweise auch erst entschieden werden kann, während die Erkundung bereits im Gange ist. Deshalb erfolgt im Rahmen dieses Vorhabens und in diesem Bericht kein Vorschlag für ein Erkundungsprogramm.

4 Flächenhaft

In der Kategorie *Flächenhaft* werden Methoden beschrieben, die entweder direkt an der Erdoberfläche oder aus der Luft durchgeführt werden. Ziel der Untersuchungen ist es, durch Messungen an der Oberfläche, eine dreidimensionale Vorstellung über den Untergrund zu gewinnen. Keine der unter dieser Kategorie beschriebenen Untersuchungen beeinflusst einen potenziellen Endlagerstandort oder seine nähere Umgebung negativ.

4.1 Geländeuntersuchungen der Oberfläche

4.1.1 Geologische Kartierung

4.1.1.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Geologische Kartierung	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none">• Kartierung mittels Begehung (Aufnahme, Klassifizierung und Orientierung im Gelände): Visuell (Lupe), Geologenhammer, Maßband, Geologenkompass, Pürckhauer, GNSS, Lesesteine
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Geologie, Tektonik, Altersbestimmung, Stratigraphie, Lithologie, Paläolandschaftsrekonstruktion, Fazies, Natur-Risiko, industrielle Abbauflächen
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none">• Grundlegend wichtige bis weitreichende Erkenntnisse
Aufwand	<ul style="list-style-type: none">• Aufenthalte im Gelände über einen längeren Zeitraum hinweg notwendig (jahreszeitenübergreifend)
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Erforderlich: Die Topographische Karte des zu untersuchenden Gebietes• Petrografische Untersuchungen• Fernerkundung liefert Zusatzinformationen
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none">• In der Regel keine• In schwer zugänglichen Gebieten in Abhängigkeit von der Topographie annähernd die Fernerkundung
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Vegetation, Geländere relief, Hydrologie

4.1.1.2 Gemessene Parameter und zu erwartender Erkenntnisgewinn

Mente et malleo – mit Geist und Hammer – ist nicht nur der Wahlspruch der klassischen Geodisziplinen, er beschreibt auch sehr gut, dass eine flächenhafte Kartierung der geologischen Aufschlussverhältnisse ein grundlegendes Verständnis der Gesteine *sensu lato* – im weiten Sinne – voraussetzt. Die geologische Kartierung repräsentiert eine der

klassischen geologischen Grundlagenarbeiten und greift auf eine Fülle an Methoden (Dokumentation im Feldbuch, Feldkarte, Geländeskizze, Profilskizze, Profilaufnahme mit Lithologie/Struktur/Gefüge, Probenahme), Messverfahren (Streichen/Einfallen, Schichtmächtigkeiten, Fossilienbestimmung, Paläoströmungsrichtungen), Daten (Schichtlagerung, Klüftrosen, Korngrößen, Alterszuordnung anhand von Leitfossilien, magnetische Orientierung) und Beobachtungen (Verlauf von Schichtgrenzen, Quellaustritte, Deformation von Schichten, Störungsverlauf, Faziesvergesellschaftungen, Metamorphosegrad) zurück. Sie ist Teil der geologischen Landesaufnahme der Geologischen Dienste der Bundesländer und bildet häufig die Grundlage für weiterführende Planungen wie beispielsweise die Erstellung von Erkundungskonzepten.

Zeichnungen, Skizzen und Karten kennzeichnen seit Jahrhunderten für den Menschen bedeutsame Orte und Beobachtungen. Im digitalen Zeitalter haben Grafiken Zeichnungen ersetzt und manuell gefertigte beziehungsweise gedruckte Karten sind digital erfasst. Leistungsstarke Hardware ermöglicht dreidimensionale Simulationsrechnungen, die dem interpretatorischen Ansatz einer Geländeskizze scheinbar überlegen sind. Fernerkundungsmethoden liefern eine Vielzahl an Daten, die eine Geländeaufnahme nahezu überflüssig erscheinen lassen. Und doch ist die Geländearbeit mit Feldbuch, Hammer und Lupe das maßgebende Messprinzip, um Primärdaten zu erfassen und miteinander in Beziehung zu setzen.

Die Aussagekraft einer geologischen Karte ist sehr hoch und liefert grundlegend wichtige bis weitreichende Erkenntnisse. Die Grundkarte stellt die Verbreitung der Gesteinseinheiten an der Oberfläche und im oberflächennahen Bereich eines fest umrissenen Arbeitsgebietes dar. Lithologische Einheiten und Faziesverteilung werden bei der Kartierung definiert. Die geologischen Verhältnisse im Untergrund werden in Profilschnitten veranschaulicht und ihre strukturellen Zusammenhänge verbildlicht. Schriftliche Erläuterungen zur Karte (zumeist im Taschenbuchformat) vertiefen die kartiergebietspezifischen Angaben ausführlich – unter anderem zu Inhalten wie regionalgeologischer Überblick (inklusive Geographie), räumliches Referenzsystem, Erd- und Landschaftsgeschichte, Gesteinsbeschreibung, Stratigraphie, Genese und Tektonik. Beikarten, die für das Kartiergebiet von besonderer Aussagekraft sind, ergänzen die Karte und ihre schriftlichen Erläuterungen und verbildlichen auf diesem Wege weitere Kartierschwerpunkte wie zum Beispiel:

- Karte ohne quartäre Bildungen (abgedeckte Karte, die insbesondere die durch quartäre Ablagerungen maskierten Störungs- und Lagerungsverhältnisse verdeutlicht),
- Quartär (Quartärbasiskarte),

- Aufschluss- und Bohrpunktkarte,
- Strukturkarte,
- Schutzwürdige Geotope,
- Rohstoff- und Energiepotenziale,
- Hydrogeologie,
- Baugrund (ingenieurgeologische und geotechnische Kennzeichnung der Homogenbereiche),
- Geophysik,
- Archäologie,
- Geogefahren (bspw. Subrosion, Massenbewegungen, Überflutungsbereiche).

Zusätzlich zu den Beikarten können geologische Säulenprofile, Mächtigkeitstabellen beziehungsweise -karten und geologische Raummodelle wesentliche Informationen liefern. Laboruntersuchungen von Gesteins- und Bohrkernproben sowie Fernerkundungsdaten ergänzen die Daten der Geländeaufnahme.

4.1.1.3 Technische Ausführung

Am Beginn der Kartierung stehen die Vorbereitungen der Geländekampagne (rechtliche und technische Rahmenbedingungen) und die sachliche Kenntnisstandsanalyse (ältere Kartierungen, existierende Berichte, durchgeführte Messungen). Grundlage der geologischen Kartenaufnahme ist die aktuelle topographische Karte im Maßstab 1:25.000 (TK25, Messtischblatt), die für die Kartierung auf einen Maßstab von 1:10.000 vergrößert wird. Im Gelände dient diese Karte in Papierform als Feldkarte, in die alle Daten mit Farbcodierung, Schraffuren und Signaturen eingetragen werden. Besonderheiten, Messwerte, Koordinaten, Aufschlussverhältnisse und Skizzen werden im Feldbuch festgehalten. Zudem werden Proben im weiteren Sinne genommen (bspw. Handstücke, Fossilien, Minerale). Zwecks Gesteinsansprache werden als Grundwerkzeug Hammer, Lupe, Geologenkompass und Salzsäure (HCl 10 %) mitgeführt. Bei schlechten Aufschlussverhältnissen und großer flächenhafter Ausdehnung von Lockergesteinen (Le-sesteinkartierung) dient der Pürckhauer der Ausgangsgesteinsbestimmung (Ein-Meter Schlitzsonde wird mit Hammer manuell in den Untergrund gerammt). Ergänzende feld-

spezifische Beobachtungen ermöglichen eine Gesteinseinstufung indirekt über beispielsweise die Vegetationsindizes (zum Beispiel pH-Wert) und die Ausgestaltung der geomorphologischen Indizes (zum Beispiel Stufenlandschaft).

Bevor die eigentliche Geländebegehung stattfindet ist es erforderlich, sich in der Umgebung des Kartiergebiets einen Überblick über die Regionalgeologie zu verschaffen und sich in die typischen Gesteine, Schichtfolgen und Fazieswechsel einzuarbeiten. Die Orientierung im Gelände erfolgt sowohl mit Karte und Kompass als auch mit satellitengestützten Positionssystemen. Die Angaben, die einer guten topographischen Karte zu entnehmen sind, liefern zumeist eine ausreichende Positionsbestimmung. Auf einer TK25 werden beispielsweise unterschieden:

- Raumplanung: Straßen, Schienen, Gebäude, Grenzen, Reservate, Brachflächen
- Hydrographie: Seen, Flussläufe, Moorgebiete, Küstenbereiche
- Relief: Berge, Täler, Hänge, Vertiefungen
- Vegetation: Bewaldete Gebiete, Freiflächen, Weinanbau, Plantagen.

Exakte Koordinaten liefern globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) wie GPS (im Speziellen auch Differential-GPS) und Galileo (einziges GNSS unter ziviler Kontrolle, 2016 in Betrieb genommen, Endausbau ist für 2020 vorgesehen).

Kartiert werden die von der Deutschen Stratigraphischen Kommission beschlossenen stratigraphischen Gliederungen und ihre jeweilige Abgrenzung zueinander. Messreihen im Gelände ermöglichen zudem eine Projektion der stratigraphischen Verbreitung in die Tiefe. Auch die Verwitterungsrinde beziehungsweise das Lockergestein des Anstehenden, der sogenannte Regolith, wird bei der Kartierung berücksichtigt. Zusätzlich zur Erhebung belastbarer Daten – die eigentliche Hauptaufgabe der Kartierung – liefert die geologische Kartierung eine Fülle an Beobachtungsdaten und zusätzlichen Informationen, die für interpretatorische Ansätze verschiedener Disziplinen als wertvoll eingeschätzt werden. So ist beispielsweise ein wichtiges Hilfsmittel in der Rekonstruktion der Landschaftsgeschichte die Analyse von Regolithvorkommen, die Rückschlüsse auf paläoklimatische Gegebenheiten erlaubt. In der Explorationsindustrie liefert die Regolithanalyse bedeutsame Daten zur Lokalisierung von Lagerstätten wie beispielweise Metallvorkommen, seltene Erden, Edelsteine und technisch verwertbare Tone.

Als Produkt steht am Ende die geologische Karte (mit quartären Deckschichten beziehungsweise abgedeckt) sowie geologische Profilschnitte (mit Lage der Schnittlinien) inklusive einer Darstellung der projizierten Bohrungen und gegebenenfalls seismischer Profile. Zumindest eine strukturgeologische Karte (Isolinienkarte der relevanten Lagerungswerte) und eine Ausarbeitung zu den Besonderheiten des Kartiergebiets sind der erstellten Grundkarte beigelegt. Alle Ergebnisse werden in einem Kartierbericht festgehalten. Sämtliche mit der geologischen Karte in Zusammenhang stehende Daten werden heutzutage digital erfasst und in GIS (Geographisches Informationssystem) räumlich lagetreu zueinander dargestellt.

4.1.1.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Die geologische Karte mit Beikarten, Profilzeichnungen und schriftlichen Erläuterungen dient industriellen Zweigen wie beispielsweise der Bauindustrie (Quarzsand, Gips), der Explorationsindustrie (sedimentäre Mutter- und Speichergesteine), der chemischen Industrie (Evaporite, Phosphorite), der metallverarbeitenden Industrie (Erze, Kohle) und der Abfallwirtschaft (Sedimente) als Datenbasis. Zudem wird sie beispielhaft herangezogen zur Beurteilung des Baugrunds, der Wasserführung (der Schichten) und der Verbreitung wirtschaftlich brauchbarer Locker- und Festgesteine. Im Risikomanagement der Naturgefahren kann mithilfe der Karteninformationen die potenzielle Reichweite von Umweltschäden sowie die Schutzfunktion des Untergrunds besser eingeschätzt werden. Die Grenzen der Aussagekraft liegen im Maßstab der Karte begründet.

Einschränkende Randbedingungen bei der Erstellung einer geologischen Karte sind besonders vegetationsreiche, nahezu undurchdringliche Gebiete sowie Gebiete mit steilem, unzugänglichem Geländere relief und Gebiete mit Wasser- beziehungsweise konstanter Eisbedeckung. Unzugängliche Felsformationen werden durch Weiterentwicklungen im Bereich der Fernerkundung (bspw. höhere Auflösung, neue Satelliten) besser kartographiert werden können. Indirekten Einfluss auf die hydrologischen Faktoren hat potenziell die Entwicklung des Klimas durch anhaltende Trocken- und Hitzeperioden.

4.1.1.5 Aufwand

Der zeitliche Aufwand ist sehr hoch, da allein schon die organisatorischen Maßnahmen sowie die Kenntnisstandsanalyse im Vorfeld der Kartierung einen bedeutsamen Arbeitsaufwand darstellen. Zudem empfiehlt es sich in unseren Breitengraden, die Kartierzeiten im Gelände auf das Frühjahr und auf den Herbst zu legen, da eine gute Sicht auf das

Anstehende und Zugang zu den Kartiereinheiten gewährleistet sein sollten. In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung muss oftmals eine Geländeaufnahme zwecks Qualitätssicherung im darauffolgenden Jahr wiederholt werden. Die Zusammenfassung der Kartierergebnisse und die daraus gewonnenen Erkenntnisse, die Laboranalyse und die Digitalisierung der Daten erfordert weiterhin einen beträchtlichen zeitlichen Aufwand.

4.1.1.6 Kombinationsmöglichkeiten der Kartierung mit anderen Methoden

Punktuelle Informationen aus Laboranalysen sowie aus Bohrdaten (geologisch und geophysikalisch) ergänzen geologische Karteninformationen ebenso wie Datensätze aus anderen flächenhaften Untersuchungsmethoden. Bei der geologischen Kartierung stellt bereits im Vorfeld der Geländeaufnahme eine gute Datenakquise die Weichen für potenziell geeignete Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Methoden. Beispielsweise bietet das Digitale Geländemodell (DGM) mit seiner dreidimensionalen Darstellung des Geländes sehr gute Möglichkeiten, die digitalen geologischen Informationen auch in der vertikalen Projektion darzustellen.

4.1.1.7 Alternative Methoden

In schwer zugänglichen Gebieten ariden Klimas ist eine probate alternative Methode die photogrammetrische Interpretation des Geländes (Fernerkundung, Kapitel 4.1.2). Luftbildaufnahmen werden hierbei stereoskopisch analysiert, stehen aber in Abhängigkeit zumindest zu vereinzelt bekannten Zusatzinformationen zur Geologie des Kartiergebiets. Bei diesem Verfahren werden insbesondere Lineamente, Topographie und Gewässernetz genutzt, um geologische Grenzen, tektonische Elemente, Schichtlagerung und geomorphologische Elemente zu kartieren. Ähnlich finden Satellitenaufnahmen Anwendung.

4.1.1.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Die Neuauflage einer geologischen Kartierung ist auch heutzutage noch vielerorts von Interesse. Allerdings macht es die Anwendung der geographischen Informationssysteme (GIS) möglich, dass, vergleichbare Standortbedingungen vorausgesetzt, Datensätze aus bereits kartierten Gebieten für Prognosen auf Gebiete mit lückenhaften Daten übertragen werden. Mit zunehmender Digitalisierung der geologischen Altdaten nimmt die Nutzung dieser neu zusammengetragenen Erkenntnisse einen wachsenden Stellenwert

im Vergleich zu Revisionskartierungen ein. In Tab. 4.1 sind wesentliche weiterführende Informationen zur geologischen Kartierung und zu geologischen Karten dargestellt.

Tab. 4.1 Weiterführende Informationen zu geologischen Kartierungen

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Geologische Kartieranleitung – Allgemeine Grundlagen /BGR 02/ • Symbolschlüssel Geologie /LBEG 17/ • Karte, Riß, Profil und Nordrichtung – I. Grundlagen und Bezugssysteme /CTH 82/ • Geologie im Gelände /MCC 15/ • Gesteinsbestimmung im Gelände /VIN 11/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Kartenserververzeichnis der Staatlichen Geologischen Dienste /SGD 18a/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • BDG (Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler) • DVGeo (Dachverband der Geowissenschaften) • DGGV (Deutsche Geologische Gesellschaft – Geologische Vereinigung) • DEUQUA (Deutsche Quartärvereinigung) • DMG (Deutsche Mineralogische Gesellschaft) • OGV (Oberrheinischer Geologischer Verein – Gesellschaft für Regionalgeologie) • PalGes (Paläontologische Gesellschaft)
Zuständige Behörden	<ul style="list-style-type: none"> • Geologische Landesämter bzw. Staatliche Geologische Dienste /SGD 18b/ • Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) • Katasterämter
Internationale (inklusive geplante) Anwendung geologischer Kartierungen bzw. geologischer Karten im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Belgien /VAN 14/ • Finnland /AAL 16/ • Frankreich /AND 16a/ • Japan /NUMO 04a/ • Kanada /VAN 13/ • Niederlande /GEE 14/ • Schweden /HAR 13/ • Schweiz /GAU 02/ • UK /RWM 16/ • USA /DAY 98/

4.1.2 Fernerkundung

4.1.2.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Fernerkundung	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none">• Luft- und Satellitenbilder• LIDAR• Radar-Systeme
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Geologie, Morphologie und Strukturgeologie
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none">• Wenige Ergebnisse bezogen auf Lithologie und Untergrund
Aufwand	<ul style="list-style-type: none">• Kaum personeller oder technischer Aufwand
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Notwendig, um Lithologie und Untergrund zu charakterisieren
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Geologische Kartierung
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Im Rahmen der geologischen Erkundung eher für Gebiete mit Relief geeignet• Vegetation

4.1.2.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Die Fernerkundung (engl. „remote sensing“) ist, nach DIN 18716 („Photogrammetrie und Fernerkundung“) /DIN 17/, die „Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen von entfernten Objekten ohne direkten Kontakt mit diesen durch Messung und Interpretation von reflektierter und emittierter elektromagnetischer Strahlung“. Neben der Norm DIN 18716 befasst sich auch die DIN 18740 „Photogrammetrische Produkte“ mit der Fernerkundung. In dieser DIN sind sowohl die Begriffe als auch detaillierte Anforderungen an das Produkt (Luft- oder Satellitenbild; digitale Höhenmodelle) definiert und Anforderungen an die digitalen Kameras geregelt. Das Ziel der Fernerkundung ist die Beobachtung der Erdoberfläche hinsichtlich ihrer Beschaffenheit und der auf ihr ablaufenden Prozesse auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen.

Die geologischen Anwendungsbereiche der Fernerkundung umfassen:

- Das Erkennen von geomorphologischen Formen, Gewässernetzen und Lineamenten (wie zum Beispiel großräumigen Störungszonen oder sogenannten Härtlingszügen), die zur geologischen und/oder geotektonischen Kartierung verwendet werden können („Fotogeologie“).

- Das Erfassen eines dreidimensionalen Eindrucks der Morphologie, welches die sogenannte Stereoskopie ermöglicht. Dabei werden zwei Bilder, die leicht versetzt aufgenommen wurden, durch ein sogenanntes Stereoskop betrachtet und ein dreidimensionaler Eindruck entsteht.
- Die Erstellung von sogenannten „digitalen Geländemodellen“ (DGM). Ein DGM ist ein dreidimensionales Abbild des Geländes in dem nicht nur die Fläche, sondern auch die Höhe digital erfasst wird.
- Das Erkennen von Geländebewegungen. Dies wird durch wiederholte Messungen der gleichen Lokationen in bestimmten zeitlichen Abständen beziehungsweise durch kontinuierliche Messungen am gleichen Ort erreicht.
- Die Exploration von mineralischen Rohstoffen, sofern die Lagerstätte selbst oder Anzeichen für eine Lagerstätte an der Oberfläche sichtbar sind.

4.1.2.3 Technische Ausführung

Im Wesentlichen unterscheidet man in der Fernerkundung zwischen den Sensoren, also den tatsächlichen Aufnahmesystemen (siehe unten), und den sogenannten Plattformen oder Trägersystemen, welche diese Sensoren transportieren /BMBF 02/. Plattformen und Trägersysteme sind zum Beispiel

- Satelliten (Flughöhe ca. 500 bis 37.000 km)
- Flugzeuge (Flughöhe 100 bis 10.000 m)
- Hubschrauber (Flughöhe 10er bis 100er m)
- Ballons (Flughöhe bis Stratosphäre: ca. 37 km) und
- Drohnen (je nach Größe unterschiedliche Höhen).

Je nach Fläche des zu untersuchenden Zielgebiets kann eine bestimmte Plattform (Satellit, Flugzeug, Drohne) sinnvoll sein.

An Bord der Trägersysteme können sowohl analoge als auch digitale Sensoren genutzt werden. Die Nutzung von analogen Sensoren ist zu Gunsten von digitalen Sensoren stark zurückgegangen. Ebenfalls unterscheidet man zwischen passiven und aktiven Sensoren. Passive Sensoren registrieren die von der Erdoberfläche reflektierte oder

ausgesandte Strahlung (siehe Abb. 4.1 oben). Im Gegensatz dazu senden aktive Sensoren selbst Strahlungsenergie aus; die reflektierte Strahlung wird detektiert (siehe Abb. 4.1 unten).

Unabhängig davon, ob es sich bei den verwendeten Sensoren um analoge oder digitale und passive oder aktive handelt, besitzen diese eine unterschiedliche physikalische Auflösung. Man kann zwischen unterschiedlichen Arten der Auflösung unterscheiden:

- Die flächenhafte Auflösung (auch räumliche oder geometrische Auflösung genannt) beschreibt den möglichen Detaillierungsgrad eines Sensors bei flächenhaften Aufnahmen. Es gibt verschiedene Arten, die flächenhafte Auflösung einer Aufnahme zu beschreiben. Beispielsweise kann man für die digitalen fotografischen Systeme (siehe unten) bestimmen, welcher Fläche ein Pixel in der Realität entspricht. Flächenhafte Auflösungen für Satellitenaufnahmen liegen heute im Bereich zwischen wenigen Zentimetern und Kilometern pro Pixel /SIE 15/, /BMBF 02/.
- Die Höhenauflösung ist für die Erstellung von DGM wichtig. Diese sagt aus, welche Höhenunterschiede (in Abhängigkeit von anderen Faktoren wie Flughöhe, Spektralbereich, etc.) das Messsystem erfassen kann. Moderne Höhenauflösungen können im Bereich von wenigen cm bis dm liegen. Ein Beispiel (Schwarzwald) für eine vergleichende Auswertung hinsichtlich der geologischen Interpretation von mehreren Datensätzen digitaler Geländedaten zeigt /MEI 18/.

Daneben gibt es weitere Auflösungen, die – bis auf die zeitliche Auflösung (siehe unten) – im Wesentlichen technischer Natur sind und im Folgenden kurz beschrieben werden:

- Spektrale Auflösung: Aufnahmesysteme können unterschiedliche Spektralbereiche nutzen und in verschiedenen sogenannten Kanälen separat aufnehmen (multispektral). Eine hohe spektrale Auflösung bedeutet, dass der Spektralbereich schmal ist /SIE 15/ und einzelne Objekte besser erkannt werden. Wenn der Spektralbereich jeweils sehr schmal ist, spricht man von hyperspektral. Spektrale Auflösungen werden in m angegeben.
- Radiometrische Auflösung: Helligkeitsunterschiede werden von den Sensorsystemen in unterschiedlicher Qualität erfasst. Nach /SIE 15/ gibt die radiometrische Auflösung an, „wie gut Helligkeitsunterschiede in einer Aufnahme wahrgenommen werden können“. Die radiometrische Auflösung wird in Bit angegeben.
- Zeitliche Auflösung: Dies ist die Rate der Wiederholung in welcher eine Plattform ein bestimmtes Gebiet befliegt.

Die Auswertung der erfassten Daten erfolgt heute automatisiert und computergestützt, zur geowissenschaftlichen Interpretation ist ausgebildetes Fachpersonal notwendig.

In den folgenden drei Kapiteln 4.1.2.3.1, 4.1.2.3.2 sowie 4.1.2.3.3 werden die drei Messmethoden der Fernerkundung (Fotografische Systeme, LIDAR und Radar) näher erläutert.

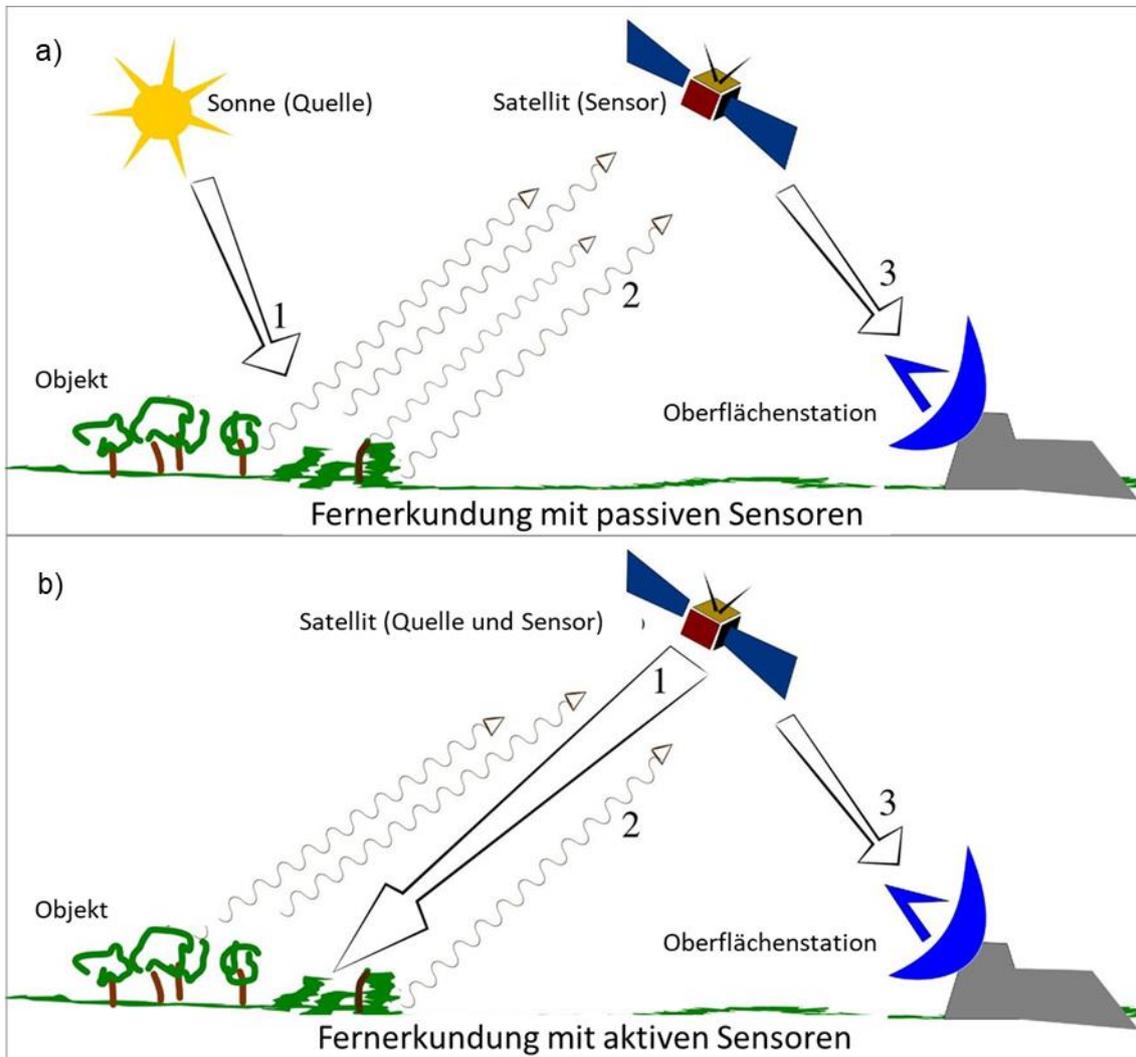


Abb. 4.1 Prinzip der satellitengestützten Fernerkundung mit a) passiven oder b) aktiven Sensoren, geändert nach /ARK 18/

1: Signal der Quelle, 2: Reflektiertes Signal des Untersuchungsgegenstands, 3: Signal vom Empfänger zur Aufnahmestation

4.1.2.3.1 Fotografische Systeme (Luft- und Satellitenbilder)

Klassisch werden für die fotogeologische Erkundung Luftbilder verwendet, die mit der Entwicklung der Fotografie einhergehen (ursprünglich analog, heute zumeist digital). Dies waren zunächst Schwarz/Weiß beziehungsweise Graustufenbilder, dann auch

Farbbilder. Charakteristisch ist, dass die Fotos möglichst verzerrungsfrei und maßstabsgetreu sein sollen. Diese Fotos werden dann als Orthofotos bezeichnet. Zur Auswertung wurde früh die Stereoskopie (siehe oben) verwendet. Die Wissenschaft der Auswertung von Luft- und Satellitenbildern wird als Fotogrammetrie bezeichnet.

Neben der Fotografie aus großer Entfernung kommen auch Kameras zum Einsatz, die mehr als das sichtbare Spektrum des Lichts ausnutzen können. Insbesondere der nahe am sichtbaren und der kurzwellige infrarote Bereich des Lichts (engl. „visible near infrared“ und „short wave infrared“, abgekürzt VNIR beziehungsweise SWIR) spielen in der Fernerkundung eine größere Rolle, da sie für Analysen der Vegetation genutzt werden können.

Bei der Thermalfernerkundung werden in der Befliegung digitale Thermalkameras verwendet, die die von der Erdoberfläche emittierte elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 8 und 14 μm (Mikrometer) digital registrieren. Die Auswertung liefert Hinweise unter anderem zu kleinräumigen Süßwasservorkommen in salinaren beziehungsweise brackigen Umgebungen und Erdwärmeaustritte in gasförmiger (zum Beispiel Fumarolen) beziehungsweise flüssiger Form (zum Beispiel heiße Quellen).

4.1.2.3.2 LIDAR

Für die Früherkennung von Geländeänderungen in frühesten Stadien eignet sich insbesondere das LIDAR-Verfahren. LIDAR steht für engl. „light detection and ranging“ und wird im deutschen auch als Laser-Abtastsystem bezeichnet. Andere Begriffe sind aus dem englischen Sprachgebrauch „Laserscanning“ oder „Airborne Laser Scanner“ (ALS) /PRO 14/. Durch eine Befliegung können damit Reliefanomalien, die Geländeabsenkungen in frühesten Entwicklungsstadien anzeigen, erfasst werden. Dies gilt auch für Flächen, die Vegetation aufweisen, da die Laserwellen des Scannersystems sowohl vertikal als auch schräg von der Plattform emittiert werden. Somit können bei zum Beispiel bewaldeten Gebieten sowohl die Höhe des Blätterdachs als auch das Gelände selbst kartiert werden.

Charakteristisch bei diesen Abtast- beziehungsweise Scannersystemen ist, dass im Gegensatz zu fotografischen Systemen Flächenelemente (in der Größe der flächenhaften Auflösung, Pixel) gleichzeitig aufgenommen und erst danach zu einem Bild zusammengesetzt werden.

4.1.2.3.3 Radar-Systeme

Die Systeme der Mikrowellenfernerkundung (engl. „radio detection and ranging“, Radar) unterscheiden sich vor allem in der Wellenlänge und der deshalb genutzten Aufnahmetechnik von den bisher beschriebenen Aufnahmeverfahren. Ihre Anwendungen für geologische Fragestellungen liegen aufgrund der Rückstreuung und Reflexion des Radars beziehungsweise der Variationsmöglichkeit der Eindringtiefe (zum Beispiel durch Bewaldung) in der Erkennung von Lineamenten, Oberflächenstrukturen und Oberflächendeformationen (Bodenkartierung zur Erfassung von möglichen neotektonischen oder nicht-tektonischen Gebirgsbewegungen, zum Beispiel Rutschungen) /PRO 14/.

Die aufgenommenen Daten dienen gleichzeitig zur Erfassung digitaler Geländemodelle. Im Wesentlichen lassen sich drei Systeme unterscheiden:

- Das sogenannte RAR (aus dem engl. „Real Aperture Radar“, also Radar mit echter Apertur),
- SAR, (engl. „Synthetic Apertur Radar“, also Radar mit synthetischer Apertur) und
- InSAR, („Interferometric SAR“, also das Interferometrische SAR).

Bei dem RAR-Verfahren bleibt baulich bedingt die Größe des Sende- und Empfangsteils (die Apertur) des Geräts immer gleich, während beim SAR-Verfahren der Effekt genutzt wird, dass sich das Trägersystem bei der Detektion schon fortbewegt hat. Durch exakte Berechnungen der Eigenschaften des detektierten Signals wird die Größe des Sende- und Empfangsteils künstlich vergrößert. Für das InSAR-Verfahren werden Phasenunterschiede der empfangenen Signale genutzt. Für dieses System werden mindestens zwei Antennen benötigt, deren Abstand einige Dezimeter beträgt.

Mit der Abtastung der Erdoberfläche mittels des Radars (Radiowellen in Kurz- oder Mikrowellenbereich) in unterschiedlichen Wellenlängen lassen sich räumlich hochauflösende (im Meter-Bereich) Bilddaten und Datenprodukte herstellen. Das Radar ist nicht so hochauflösend wie das LIDAR (Dezimeter-Bereich). Der Vorteil ist, dass die Radiowellen des Radars vergleichsweise geringer als Lichtwellen des LIDAR durch die Atmosphäre (Staub, Nebel) gedämpft werden.

4.1.2.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Je nach gewünschter Erkenntnis beziehungsweise Aussage werden die oben genannten Methoden der Fernerkundung eingesetzt. Allen Methoden ist gemeinsam, dass direkte Aussagen nur die Oberfläche betreffen. Aussagen über den tieferen Untergrund sind rein interpretativ, der Nutzen der Methode zur geowissenschaftlichen Erkundung in der Tiefe ist deshalb insgesamt begrenzt.

Im Hinblick auf die Anwendungsbereiche (siehe Kapitel 4.1.1.2) können die Methoden im Allgemeinen (beziehungsweise je nach Fragestellung) unabhängig von Gesteinsarten verwendet werden. Eine Gesteinsbestimmung selbst ist damit allerdings nicht beziehungsweise nur bedingt möglich. Aufgrund morphologischer Unterschiede infolge unterschiedlichen Verwitterungs-/Erosionsverhaltens der Gesteine lassen sich im Allgemeinen lediglich harte und weiche Gesteine differenzieren. Das bedeutet, dass härtere Gesteine wegen ihrer höheren Beständigkeit gegenüber Erosion und Verwitterung durch ausgeprägte Geländeformen und Strukturen deutlich hervorgehoben werden. Das Erkennen von Lineamenten, wie zum Beispiel an der Oberfläche ausstreichende Störungen, ergibt sich ebenfalls häufig durch besondere Geländestrukturen oder deren Versatz.

Für eine direkte geowissenschaftliche Auswertung (zum Beispiel Kartierung von Störungszonen an der Oberfläche) ist es von Vorteil, wenn an der Oberfläche keine oder nur wenig Vegetation vorhanden ist. In Gebieten mit Vegetation, zum Beispiel stark bewaldeten Gebieten, kann eine geowissenschaftliche Auswertung oft allenfalls indirekt (zum Beispiel über das Gewässernetz) erfolgen.

Je nach Fragestellung und Anwendungsbereich wirken sich Einsatzorte in der Ebene beziehungsweise in geologischen Beckenstrukturen aus, die mit rezenten mächtigen Lockergesteins-Sedimenten bedeckt sein können, welche weder morphologische (Gelände-)Strukturen noch Lineamente wie Störungen erkennen lassen. Auch eine starke Nutzung durch den Menschen, etwa durch Besiedlung, Landwirtschaft und Industrie kann dazu führen, dass Methoden der geowissenschaftlichen Fernerkundung für diese Gebiete nicht oder weniger geeignet sind.

Gute Randbedingungen sind demnach in Gebieten mit an der Oberfläche ausstreichendem festem Gestein und in Gebieten mit geringer Bedeckung durch Lockergesteine und/oder Vegetation beziehungsweise Besiedlung für eine Anwendung von Fernerkundung gegeben. Es kann sinnvoll sein, eine Fernerkundung mit geowissenschaftlicher

Zielsetzung in den Wintermonaten durchzuführen, da die Bedeckung durch Vegetation dann weniger störend ist. Dies hat insgesamt Einfluss auf den Zeitbedarf.

Bei den Methoden der Fernerkundung handelt es sich um zerstörungsfreie Methoden, die auf den Untergrund keinerlei Auswirkungen haben.

4.1.2.5 Aufwand

In Deutschland finden regelmäßige Befliegungen zu unterschiedlichen Zwecken statt. Zuständig sind die verschiedenen Vermessungsbehörden der Kommunen (zum Beispiel Katasterämter), der Länder (Landesvermessungsämter) oder des Bundes (Bundesamt für Geodäsie und Kartografie). Der Bearbeitungsstand und die Verfügbarkeit der Daten sind je nach Bundesland sehr unterschiedlich. Beispielsweise lassen sich in Nordrhein-Westfalen multispektrale Luftbilder (auch Infrarot) in einer Auflösung von 1 cm pro Pixel als verzerrungsfreie und maßstabsgetreue sogenannte Orthofotos von jedem Bürger jederzeit online ohne Gebühren abrufen. Das gilt auch für digitale Geländemodelle in einer Auflösung von 1 m /BEZ 18/ (siehe Abb. 4.2). Im Gegensatz dazu ist es zum Beispiel in Niedersachsen /LGLN 18/ notwendig, einen Datenträger zu bestellen; für die Daten selbst wird eine Gebühr pro km² erhoben.

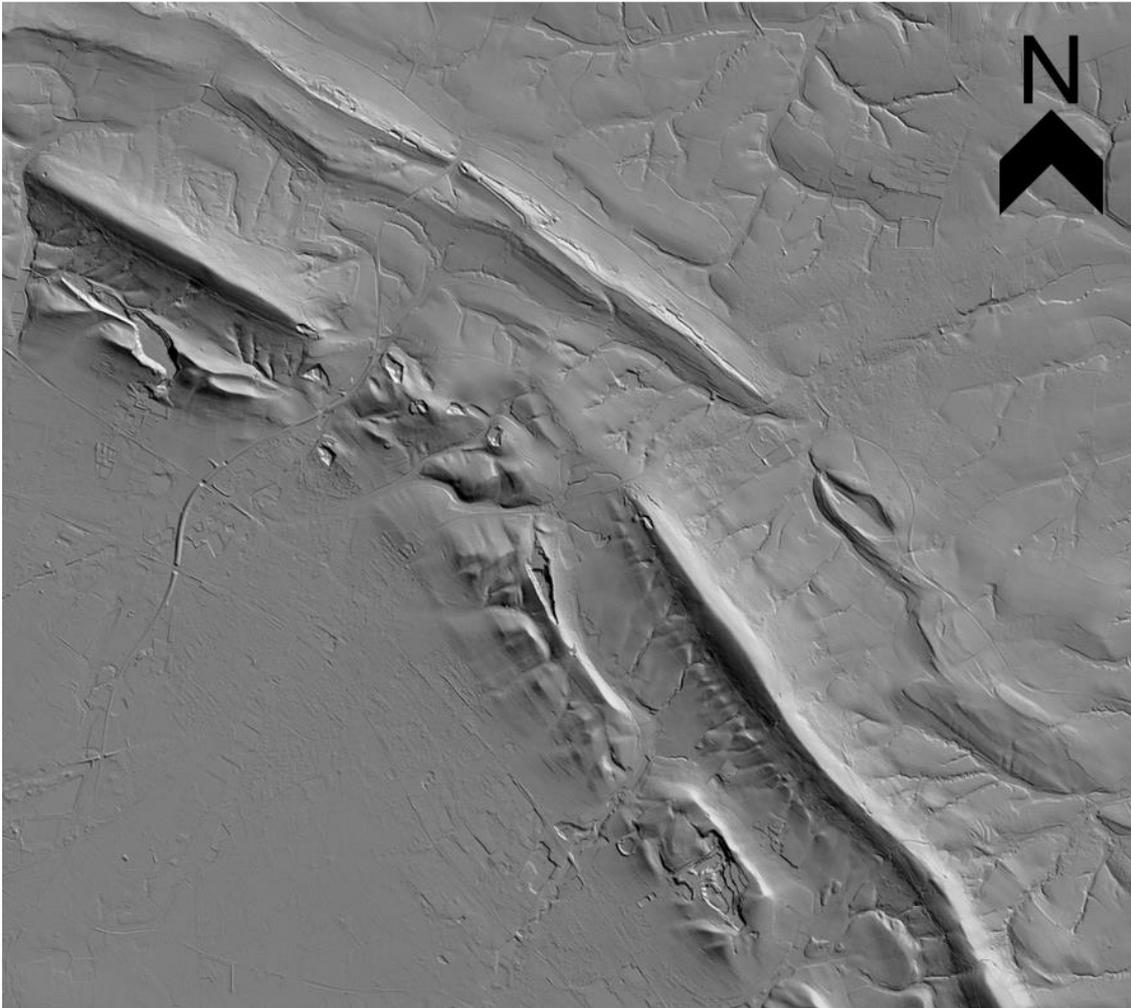


Abb. 4.2 Beispiel eines digitalen Geländemodells (DGM) von /BEZ 18/. Ein markanter Höhenzug (von Südosten in die Bildmitte hineinragend) wird durch ein Störungssystem unterbrochen und setzt sich dann fort (in Richtung Nord-west).

Je nach Ziel und Zweck der Erkundung reichen möglicherweise die bei den genannten Einrichtungen vorhandenen Daten aus, so dass das Vorliegen von Daten sich positiv auf die Zeitplanung und den Kostenbedarf des Erkundungsprogramms auswirken kann. Bei Neuerhebungen von Daten sind die Kosten von der Größe und der Anzahl der zu befliegenden Gebiete abhängig. Unabhängig davon, ob Daten neu erhoben werden oder bereits vorliegen, wäre eine geowissenschaftliche Auswertung der Daten in jedem Fall erforderlich und dementsprechend in jedem Fall für den Zeit-, Kosten- und Organisationsbedarf zu berücksichtigen.

Das Risiko eines stark erhöhten Kosten- oder Zeitaufwands durch den erforderlichen Organisationsbedarf ist insgesamt als gering zu beurteilen. Die Befliegung unterliegt strengen Vorschriften und der Regulierung durch unterschiedliche Behörden, die im Vorfeld beachtet werden müssen. Jedoch ist für eine Befliegung die Genehmigung der

Grundstückseigentümer nicht erforderlich, was den Vorteil hat, dass dadurch keine Zeit-, Kosten- und auch Qualitätseinbußen entstehen.

4.1.2.6 Kombinationsmöglichkeiten der Fernerkundung mit anderen Methoden

Da die Fernerkundung in Abhängigkeit der zu wählenden Messmethoden und deren Abhängigkeiten (Morphologie, Vegetation usw.) lediglich Strukturen an der Oberfläche aufzeigen kann und keine (direkten) Informationen über den Untergrund liefert, ist für eine belastbare Aussage beziehungsweise Interpretation bezüglich der geowissenschaftlichen Situation die Fernerkundung allein nicht ausreichend. Eine Kombination beziehungsweise ein Abgleich oder eine Verifizierung mit vorhandenen geologischen Karten ist erforderlich. Der Abgleich mit einer möglicherweise veralteten geologischen Karte und aktuellen modernen Daten aus der Fernerkundung kann genutzt werden, um festzustellen, an welchen Orten möglicherweise eine neue geologische Kartierung teilweise erforderlich ist. Aktuelle geologische Kartenblätter Deutschlands stammen teilweise noch aus den 70er Jahren und obwohl die Geologie selbst sich nicht geändert hat, können durch moderne Fernerkundungsmethoden zum Beispiel Lineamente über größere Strecken verfolgt werden.

Die Kombination mit anderen Erkundungsmethoden, die in die Tiefe eindringen, wie zum Beispiel Seismik oder Bohrungen ist grundsätzlich möglich und zielführend. Geologische Strukturen, die an der Oberfläche erkennbar sind, können mit einer Seismik korreliert und so im Untergrund weiterverfolgt werden. Die Korrelation von Fernerkundungsdaten und Bohrungen erfolgt oftmals für den flachen Untergrund, beispielsweise im Rahmen von hydrogeologischen Fragestellungen (etwa in /TAM 04/).

4.1.2.7 Alternative Methoden

Im Prinzip lassen sich zahlreiche Erkenntnisse, die mittels Fernerkundung gewonnen werden können, auch mit anderen Methoden ermitteln. Geowissenschaftliche Erkenntnisse an der Oberfläche werden durch Kartierungen gewonnen (siehe Kapitel 4.1.1). Eine geologische Kartierung ist, auf die zu erkundende Fläche bezogen, wesentlich zeitintensiver. Ein Kostenvergleich hängt aufgrund verschiedener Faktoren (Fläche, Zielstellung, Art des Auftragnehmers, Morphologie, Zugänglichkeit etc.) vom Einzelfall ab.

4.1.2.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Für die Fernerkundung ist umfassende weiterführende Literatur mit weiteren Erläuterungen und Erfahrungen in verschiedenen Anwendungsbereichen vorhanden. Die Fernerkundung wurde auch bereits international für Endlagerprojekte angewendet. Ein Überblick für weiterführende Informationen ist in Tab. 4.2 dargestellt.

Neuere Entwicklungen und der Stand von Wissenschaft und Technik lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Während die 1990er und 2000er Jahre durch den Durchbruch des LIDAR-Verfahrens gekennzeichnet waren, sind neuere Entwicklungen der Fernerkundung vor allem im Bereich des Einsatzes von Drohnen zu finden (engl. „unmanned aerial vehicles“ beziehungsweise „systems“, UAV beziehungsweise UAS). Diese lassen sich im Prinzip mit allen Arten von Sensoren ausstatten. Aktuell befasst sich eine Spezialausgabe von „Sensors“ /TOR 18/ mit den neuesten Entwicklungen diesbezüglich: Der Einsatz von Drohnen kann als Stand der Technik angesehen werden.
- Zurzeit wird unter anderem an der Weiterentwicklung von Sensoren für Drohnen sowie dem sogenannten Prozessieren (engl. Processing“), also der automatisierten Auswertung der Daten mit Hochleistungsrechnern (HPC für engl. „high performance computing“) gearbeitet /PEP 18/, /TOR 18/.

Tab. 4.2 Weiterführende Informationen zur Fernerkundung

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Photogrammetrie und Fernerkundung /HEI 17/ • Remote Sensing and Image Interpretation /LIL 15/ • Remote Sensing for Geoscientists /PRO 14/ • Einführung in die Fernerkundung /ALB 13/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Online Portal SEOS-Projekt (SEOS = Science Education through Earth Observation for High Schools) /SIE 15/, /REU 12/ • Online Portal geoinformation.net von 2002 /BMBF 02/

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. • Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS) • ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (ISSN: 0924-2716), Elsevier Verlag • PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science (ISSN: 1432-8364 bzw. 2363-7145), Springer Science Verlag • Remote Sensing of Environment (ISSN: 0034-4257), Elsevier Verlag • Transactions on Geoscience and Remote Sensing (ISSN: 0196-2892), IEEE Verlag • Sensors (ISSN 1424-8220), MDPI Verlag • Remote Sensing (ISSN 2072-4292), MDPI Verlag • International Journal of Remote Sensing (ISSN: 0143-1161 bzw. 1366-5901), TandF Verlag • Remote Sensing Letters (ISSN: 2150-704X bzw. 2150-7058), TandF Verlag • European Journal of Remote Sensing (ISSN: 2279-7254), TandF Verlag
Zuständige Behörden	<ul style="list-style-type: none"> • Bundesamt für Kartografie und Geodäsie • Landesvermessungsämter • Katasterämter
Internationale Anwendung (inklusive geplante) der Fernerkundung im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Finnland: /POS 99/ • Frankreich: In /AND 01/ ist ein kurzer Überblick über die Erkundung gegeben, Fernerkundung ist nicht aufgeführt. • Kanada: /VAN 13/ • Russland: /DIC 08/ • Schweden: /BER 06/ • Schweiz: /GAU 10/, • USA: /SCH 82/

4.2 Untersuchungen des Untergrunds

4.2.1 Seismik

4.2.1.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Seismik	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none">• Refraktion• Reflexion
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• 2D- oder 3D-Interpretation der Untergrundstruktur• Bestimmung der Festgesteinstiefe• Tiefenlage von Schichtgrenzen
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none">• Insgesamt sehr hoch, aber abhängig von zahlreichen Faktoren (insbesondere von der Auflösung des Impedanz-Kontrasts und der Anpassung technischer Filter)
Aufwand	<ul style="list-style-type: none">• Planungsaufwand, Vorbereitungen zeit- und personalintensiv (Recherche, Genehmigungen, etc.); zeitlicher, technischer und personeller Aufwand im Gelände
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Erforderlich: Der Abgleich von Bohrinformationen mit Seismik (Einhängen von Bohrungen in seismische Profilschnitte)
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Bedingt in Abhängigkeit der Aufgabenstellung, im Flachbereich: Georadar
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Strukturelle Parameter abhängig von Impedanz-Kontrast

4.2.1.2 Gemessene Parameter und zu erwartender Erkenntnisgewinn

Seismische Wellen zählen zu den Raumwellen und durchschallen den Erkundungsbereich auf direktem Weg oder aber sie werden gebrochen (Refraktion), gebeugt (Diffraktion) oder widergespiegelt (Reflexion).

In Abhängigkeit von der Umsetzung der Messkampagne im Gelände sowie von den Verarbeitungs- und Analysemethoden die Berücksichtigung finden, wird mithilfe von künstlich erzeugten seismischen Wellen ein mehr oder weniger detailliertes dreidimensionales Schnittbild des Bereichs unterhalb der gemessenen Fläche erzeugt. Je nach Aufgabenstellung stehen unterschiedliche Aufzeichnungen im Fokus. Entsprechend stark variieren die ausgewerteten Ergebnisse in Auflösung und Teufe und finden Anwendung für Fragestellungen im bodennahen Bereich bis hin zum Erdkruste-Erdmantel Übergang.

Hierbei bleibt sowohl für flachseismische als auch für tiefenseismische Bereiche das Prinzip der grundlegenden seismischen Phänomene dasselbe: Dort, wo die gemessenen Daten auf eine Änderung der Impedanz – dem Produkt aus seismischer Geschwindigkeit und Dichte – im Messbereich zurückgehen, wird ein seismischer Reflektor visualisiert. Da die Ursache für einen so dargestellten Impedanz-Kontrast verschiedenen Ursprungs sein kann (bspw. lithologische Schichtgrenze, Gasvorkommen) und als Folge dessen die Interpretation der Seismik um andersartige Messinformationen ergänzt werden muss, werden seismische Verfahren auch als indirekte Messverfahren bezeichnet. Bezogen auf die Darstellung geologischer Lagerungsverhältnisse und ihrer Strukturen sind seismische Messverfahren ein äußerst probates Erkundungsmittel und stellen insbesondere in Kombination mit Bohrinformationen ein unumgängliches und seit Jahrzehnten bewährtes Messprinzip dar.

4.2.1.3 Technische Ausführung

Seismische Messverfahren bieten über das künstliche und kontrollierte Aussenden von Schallwellen die Möglichkeit, Rückschlüsse auf den Aufbau des Untergrundes zu ziehen. Die Aufzeichnung der Untergrundechos wird an der Erdoberfläche durch Geophone gewährleistet, die die Signale in elektrische Impulse umwandeln (siehe Abb. 4.3). Die Impulse werden in digitaler Form umgeschrieben, wobei verschiedene Filter Anwendung finden, sodass letztendlich ein Schnittbild des geologischen Untergrunds unterhalb des gemessenen Bereichs erzeugt wird.

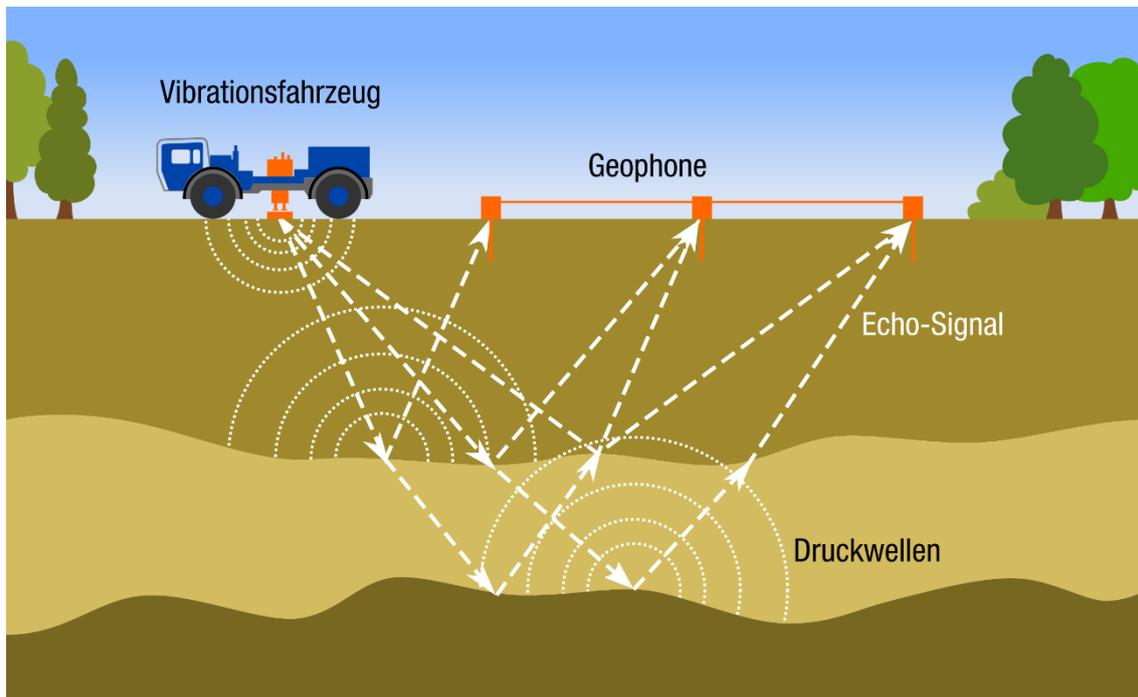


Abb. 4.3 Vereinfachte Darstellung eines seismischen Messverfahrens, bei dem an der Erdoberfläche seismische Vibrationsfahrzeuge zum Einsatz kommen.

4.2.1.3.1 Reflexionsseismische Messungen

Die Reflexionsseismik ist ein Verfahren, bei dem entweder nah an der Erdoberfläche Sprengsätze gezündet und somit Stoßwellen erzeugt (impulsive Energiequelle) oder bei dem direkt an der Oberfläche mithilfe eines seismischen Vibrators beziehungsweise Rüttlers Schwingungen initiiert werden (nicht-impulsive Energiequelle). Die künstlich erzeugten Schallwellen können in Abhängigkeit von den physikalischen Unterschieden an den Grenzflächen der geologischen Einheiten, wie beispielsweise unterschiedlicher geologischer Schichten, sowohl in Ausbreitungsrichtung als auch nach Energiegehalt charakterisiert werden. Die Raumwellen, die in Primär-/Longitudinalwellen (P-Wellen, in Ausbreitungsrichtung schwingend) und Sekundär-/Transversalwellen (S-Wellen, quer zur Ausbreitungsrichtung schwingend) unterteilt werden, werden an der Geländeoberkante von Geophonen (Erdmikrofonen) aufgezeichnet, zu verschiedenen Kanälen zusammengefasst und digital umgewandelt und analysiert. Hierbei werden die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Frequenzen von P- und S-Wellen genutzt. Üblicherweise findet bei der reflexionsseismischen Methodik die P-Wellenseismik Anwendung. Für spezifische Fragestellungen, wie beispielsweise denen der Störungsstruktur oder des höheren Auflösungsvermögens bei geringmächtigen Wechsellaagerungen, werden Scherwellen-/S-Wellenmesskampagnen gefahren. Für die P- und S-Wellenmesskampagnen bedarf es unterschiedlicher Analysetechniken.

Die Laufzeit der an den Grenzflächen reflektierten Wellen-Signale wird als „two-way-time“ (TWT) gemessen, also vom Zeitpunkt des Quellsignals über den Moment der Widerspiegelung bis zur Ankunft des Echos am Messpunkt, dem Geophon. Stärke und Form des Laufzeitsignals lassen Rückschlüsse über die Beschaffenheit des geologischen Untergrundes zu. Im Gelände erfolgt eine erste Analyse der Reflexionsmethode; die genaue Auswertung erfolgt nach intensiver Prozessierung der Daten. Im Seismogramm werden diese Daten visualisiert und markante Grenzflächen (seismische Horizonte) identifiziert. Die Konvertierung der Seismogramme von TWT [m/s] in Tiefe unter Geländeoberkante [m] richtet sich nach einem vorab definierten Bezugshorizont aus.

Mehrere, auf einer Linie angeordnete Geophone ergeben einen vertikal verlaufenden, zweidimensionalen seismischen Profilschnitt (2D-Seismik). Durch Kombination mehrerer benachbarter 2D-Seismogramme wird ein dreidimensionales Bild erzeugt (welches einem sog. zweieinhalbdimensionalen Datenmodell – 2,5D – entspricht).

Eine weitere Möglichkeit, den Untergrund dreidimensional darzustellen, bietet die 3D-Seismik mit ihrer polygonalen Anordnung der Geophone an der Erdoberfläche (echtes 3D-Datenmodell). Die Güte der seismischen Erfassung ist in beiden Fällen abhängig von der günstigen Anordnung der Geophone im Verhältnis zur geologischen Struktur, die es zu untersuchen gilt – eine ausreichende Quantität der seismischen Quellen und Messungen vorausgesetzt.

Ob mit 2D- oder mit 3D-Technik, eine Korrelation der geologischen Informationen mit den Horizonten der seismischen Profile ist nicht trivial. Bei Anwendung der 2D-Seismik wird die Qualitätssicherung der seismischen Gesamtaufnahme bestenfalls durch gitterartig angeordnete, sich kreuzende Profilschnitte erzielt.

4.2.1.3.2 Refraktionsseismische Messungen

Die Refraktionsseismik macht sich die Laufzeiten der refraktierten Welle zu Nutze und nimmt die Primäreinsatzzeiten der an den Geophonen ankommenden seismischen Wellen auf (direkte Welle, refraktierte Welle).

Verwendung findet die Refraktionsseismik insbesondere bei der Bestimmung der Festgesteinstiefe beziehungsweise bei der Ermittlung der Tiefe von besonderen Schichtgrenzen (Refraktoren) wie beispielsweise des Übergangs von anstehendem Gebirge zu auflagernden, aufgelockerten Gebirgseinheiten beziehungsweise zur Verwitterungsschicht.

Voraussetzung hierfür ist die gesteinspezifische höhere Wellengeschwindigkeit der tieferliegenden Gesteinseinheiten. Hierbei breiten sich die gebrochenen (refraktierten) Raumwellen entlang der Grenzschicht aus und überholen die direkten und reflektierten Wellen an einem bestimmten Punkt, dem Crossover-Punkt. Aus der Geometrie der refraktierten Welle lässt sich auf die Tiefe der Grenzschicht Locker- zu Festgestein schließen.

Weitere Anwendung findet die Refraktionsseismik in der klassischen Ingenieurgeologie im oberflächennahen Untergrundbereich, da nahe der Geländeoberkante eine reflexionsseismische Interpretation der Messergebnisse durch die künstlich erzeugten Oberflächenwellen erschwert würde. So wird beispielsweise mithilfe der Refraktionsseismik bei Fragestellungen zu Übertagedeponien der Übergang von Lockergestein zu Festgestein nachgehalten.

4.2.1.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Seismische Messverfahren dürfen zum Kernbereich der Untergrunduntersuchungen und insbesondere der angewandten Geophysik gezählt werden und bilden einen wesentlichen Bestandteil der Analysemethoden in der Explorationsindustrie. Entsprechend viel Aufwand ist in die Weiterentwicklung der Messmethodik eingeflossen und stark differenziert ist ihr heutiger Anwendungsbereich:

- Exploration von Kohlenwasserstoffen
- Bergbau
- Forschung und Wissenschaft
- Aufbau der Erdkruste und des Erdmantels
- Bestimmung von Festgesteinstiefen, geologischen Schichtwechselln, Verwitterungszonen
- Erkundung von Störungsmustern
- Identifikation von Dolinen
- Ermittlung der Bodentragfähigkeit
- Technische Prüfung von Bauwerken/Bauteilen

Eindeutig einschränkende Randbedingung ist bei dem Prinzip der seismischen Messungen die materialabhängige Geschwindigkeit der Schallwellen. Für eine erfolgreiche Interpretation der Verfahrensergebnisse muss ein ausreichender Impedanz-Kontrast vorliegen – oder anders ausgedrückt: Nur, wenn Unterschiede in der Laufzeit seismischer Wellen gemessen werden, ist eine Visualisierung seismischer Reflektoren möglich. Dies bedingt auch die Tatsache, dass die angewandte Seismik bei unterschiedlichen Gesteinstypen eine unterschiedliche Erkenntnisqualität bezüglich der internen Strukturen bewirkt. Besonders innerhalb eines homogenen Gesteinskörpers sind eindeutige Einschränkungen hinsichtlich der Darstellung des gesteinspezifischen Aufbaus zu beobachten (beispielsweise im Granit oder im Salz). Bei geringem Impedanz-Kontrast kann eine Verbesserung der Visualisierungsmöglichkeiten durch eine 3D-Seismik erzielt werden.

4.2.1.5 Aufwand

Die seismischen Messverfahren zählen zu den bodengestützten Anwendungen. Ihr Zeit- und Organisationsbedarf wird insgesamt als hoch eingestuft. Grundlegende vorbereitende Maßnahmen umfassen beispielsweise:

- Vorauswertung auf der Grundlage verfügbarer Pläne (bspw. Bebauung, Leitungen) und Karten (bspw. Topographie, Geologie, Hydrogeologie, Historie),
- Planung (inklusive Genehmigungs- und Bewilligungsverfahren der Behörden und Gemeinden; zudem zu berücksichtigen bspw. naturschutzrechtliche Auflagen und Nutzungsrechte von Grundeigentum),
- Vorexkursion (planerische Erkundung und Ansprache des zu vermessenden Geländes) sowie
- Vorbereitende Arbeiten im Gelände (bspw. Vermessung, gegebenenfalls Einsatz Kampfmittelräumdienst, Markierung, Auslegen der Geophone).

Der Messaufwand im Gelände ist moderat und steht in Abhängigkeit zur Ausprägung der Geomorphologie, des Gewässernetzes, der Pflanzendecke und der Bebauung. Auch die Messkonfiguration steht bei der Durchführung der Geländekampagne in Abhängigkeit zur Beschaffenheit der Geländeoberfläche. Hierbei ist der Ablauf der Methode insbesondere geprägt durch die:

- Durchführung der Messkampagne mithilfe von Vibrationslastwagen oder kleinen Sprengungen im Oberflächenbereich (Erzeugung von Schwingungen und gesteinspezifischen Echos im Untergrund),

- Aufzeichnung der Signale (fahrzeuggebunden, autarke, GPS-gesteuerte Messstationen / Geophone kabellos beziehungsweise kabelgebunden),
- Erste Auswertung und digitale Verarbeitung der Messungen.

Die projektabschließende Prozessierung und Auswertung der Daten erfolgt geowissenschaftlich interdisziplinär und ist an speziell für die Seismik entwickelte Software gebunden.

Seismische Messungen bieten in einem non-destruktiven Verfahren die Möglichkeit, den Aufbau des Untergrundgebirges tomographisch darzustellen. Die Auflösungsschärfe der entsprechenden Seismogramme hängt hierbei von den angewendeten Messverfahren ab (beispielsweise kleinmaßstäbliche Mikroseismik). Eine echte dreidimensionale Abbildung der Untergrundverhältnisse wird nur durch Anwendung der 3D-Seismik erreicht. Gekennzeichnet ist die 3D-Seismik im Vergleich zur 2D-Seismik durch einen weitaus höheren Material- und Kostenaufwand und durch eine andersartige Anordnung der Geophone an der Erdoberfläche (rasterförmig, polygonal beziehungsweise näherungsweise kreisförmig und nicht linear).

4.2.1.6 Kombinationsmöglichkeiten der Seismik mit anderen Methoden

Obgleich seismische Messverfahren in ihren Interpretationsaussagemöglichkeiten auf eine jahrzehntelange Entwicklung zurückgreifen und heutzutage herausragend visualisiert werden können, stehen sie nach wie vor in Abhängigkeit zu weiteren Untergrundinformationen. Die Kombination mit Daten, die auf direktem Wege erlangt werden, ist unabdingbar – hierbei liefern beispielsweise geologische Profile und Bohrungen die notwendigen Informationen für seismische Profilschnitte beziehungsweise seismische Tomogramme.

Verifiziert wird eine Vorab-Interpretation der seismischen Profile anhand von geologischen Kartier- und Aufschlussaussagen der Geländeoberfläche und ihre in die Tiefe erfolgten Projektionen. Eine genaue Korrelation erfolgt anhand von Bohrungen, die im Wirkungsbereich der seismischen Profile abgeteuft wurden: Ihre exakte geographische Position wird in den seismischen Profilen graphisch dargestellt – anders ausgedrückt, werden sie zur Veranschaulichung in die seismischen Profile „eingehängt“. Die in den Bohrinformationen enthaltenen markanten Schichtgrenzen werden lagetreu von Meter unter Geländeoberkante (GOK) in two-way-time (TWT) umgerechnet und in die seismischen Profile übertragen. Die auf direktem Weg gemessenen geologischen Teufenwerte

werden den markanten seismischen Reflektoren zugeordnet und als seismische Horizonte bestätigt. Somit wird eine spezifische Übertragung von tiefengeologischen Gesteinseinheiten zu seismischen Horizonten gewährleistet. Darüber hinaus können so geologische Störungsstrukturen auf den seismischen Profilen dargestellt werden.

4.2.1.7 Alternative Methoden

Nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik haben seismische Messungen ein Alleinstellungsmerkmal, wenn es um die raumgreifende Darstellung des strukturellen geologischen Untergrundes bei möglichst hohem Detaillierungsgrad geht. Alternativ zu den seismischen Messungen – und hier insbesondere zur Reflexionsseismik – gibt es keine Messverfahren, die gleichwertig aussagekräftig eingesetzt werden könnten.

Lediglich im oberflächennahen Bereich bietet, bedingt in Abhängigkeit der Aufgabenstellung, die Anwendung des Georadars eine alternative Methode.

4.2.1.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Die technische Umsetzung der 3D-Seismik ist der zweidimensionalen Reflexionsseismik vom Grundsatz her gleichgestellt. Die rasante Weiterentwicklung leistungsstarker Computer hat sich besonders auf die digitale Datenverarbeitung und somit insbesondere auf die 3D-seismischen Kampagnen ausgewirkt, die ein hohes Maß an Speicherkapazität einfordern. Dank großer Arbeitsspeicher und schneller Rechenprozessoren findet somit trotz höherer Kosten die 3D-Seismik vermehrt Anwendung. Auch haben leistungsstarke Computer Einfluss auf den generellen Ansatz der Messkampagne – war man in der Vergangenheit bemüht, zunächst das Bild des tieferen geologischen Untergrundes anhand von Bohrungen grob zu definieren und die Seismik zu nutzen, um die Informationen im Raum verfolgen zu können, so kann man heutzutage rechnergestützt ein dreidimensionales Bild generieren und dieses im Anschluss an die seismische Kampagne anhand von Bohrungen verifizieren. Zudem wird zunehmend die 3D-Seismik im Vorfeld einer Bohrkampagne genutzt, um die Erfolgchancen einer abzuteufenden Bohrung verbessern zu können. Weiterführende Information zur Seismik sind in Tab. 4.3 dargestellt.

Tab. 4.3 Weiterführende Informationen zur Seismik

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagen der angewandten Geophysik /CLA 18/ • Seismic Hydrocarbon Exploration /ALS 17/ • Geophysik /KNÖ 05/ • An introduction to geophysical exploration /KEA 02/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Fachinformationssystem Geophysik /LEI 18/ • Grundlagen der Geophysik /DAH 15/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Deutsche Geophysikalische Gesellschaft • European Geosciences Union • Society of Exploration Geophysicists
Zuständige Behörden	<ul style="list-style-type: none"> • Geologische Landesämter bzw. Staatliche Geologische Dienste (SGD) • Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Internationale Anwendung der Seismik im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Frankreich: /AND 01/ • Finnland: /ELO 98/, /RAS 06/ • Großbritannien: /NDA 11/, /NDA 16/ • Kanada : /VAN 13/ • Russland : /DIC 08/ • Schweden: /SKB 00/, /EMI 18/ • Schweiz: /GAU 10/

4.2.2 Gravimetrie

4.2.2.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Gravimetrie	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none"> • Aerogravimetrie • Bodenmessung
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Gesteinsverteilung und Struktur des Untergrunds, lokale bis regionale Skala
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none"> • Zur erstmaligen Erkundung eines Gebiets gute Aussagekraft zur groben Struktur eines geologischen Körpers • Zur detaillierten Erkundung in großen Teufen nicht geeignet
Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer personeller, technischer und zeitlicher Aufwand bei Bodenmessung • Größerer personeller und technischer Aufwand bei Aerogravimetrie

Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Notwendig zur Interpretation/Verifikation, da keine lithologische Information erfasst wird • Kombination mit Seismik oder Bohrung
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Andere Potentialmethoden wie Magnetik, Elektromagnetik oder Elektrik • Seismik
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Keine bezüglich des Gesteinstyps, jedoch durch geologische/strukturelle Gesamtsituation

4.2.2.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Das Schwerfeld der Erde ist nicht homogen, sondern wird durch die Dichte- beziehungsweise Masseunterschiede der Gesteine beeinflusst. Die Dichte auch einzelner Gesteine ist unterschiedlich und unterliegt einer Bandbreite. Beispielsweise haben Steinsalzformationen eine durchschnittliche Dichte von ca. 2160 kg/m³, die Dichte von Granit liegt deutlich höher, im Bereich von 2650 kg/m³. Die Dichte von Tonstein, die sich im Bereich von 2300 kg/m³ – 2700 kg/m³ bewegt, hängt deutlich von der Verfestigung ab, also zum Beispiel auch von der Tiefe, auf welcher sich der Tonstein befindet oder befindet hat.

Die Dichte-Inhomogenitäten sind durch die Messung der Schwere auf allen Skalen detektierbar, die Schweremessungen werden als Gravimetrie bezeichnet. Aus den Dichte-Inhomogenitäten können Rückschlüsse auf die Verteilung der Gesteine im Untergrund gezogen werden, so dass die Struktur des Untergrunds sowohl lokal (Meter bis Kilometer) als auch regional (mehrere Zehner-Kilometer) und großräumig (mehrere hundert Kilometer) untersucht wird. Insbesondere wird die Gravimetrie lokal zur Erkundung von Hohlräumen eingesetzt, beispielsweise in Gebieten mit starker Verkarstung zur Baugrunduntersuchung. Die Exploration zu wirtschaftlichen Zwecken und wissenschaftliche Untersuchungen sind weitere Einsatzgebiete. Deutlich davon zu unterscheiden sind Vermessungen des Schwerfeldes der Erde, welche dem Themenfeld der Geodäsie und nicht der geowissenschaftlichen Erkundung zuzuordnen sind.

Die Messinstrumente, die sogenannten Gravimeter, messen die Schwerebeschleunigung (auch Gravitationsbeschleunigung oder auch Erdbeschleunigung genannt) an einem Ort. Die Schwerebeschleunigung wird in m/s² gemessen. Da sich die Messungen jedoch in einem Bereich befinden, der grob einem Millionstel der SI-Einheit entspricht, findet man weitaus häufiger nach wie vor die c.g.s (centimetre gram second)-Einheit „Milligal“ („Gal“ für Galilei) wobei 1 Milligal 10⁻³ cm/s² entspricht. Die durchschnittliche

Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$ entsprechen aufgerundet auf 10 m/s^2 somit ca. 1000 Gal.

Das Messprinzip der Gravimetrie selbst beruht auf dem Gesetz der Massenanziehung zweier Körper, also dem Newtonschen Gravitationsgesetz. Es sind zwei methodische Ansätze zu unterscheiden: Die Messung der absoluten Schwerebeschleunigung und die Messung der relativen Schwere. Die Messung der absoluten Schwere ist sehr aufwendig und wird an ausgewählten Stationen mit unterschiedlichen Verfahren vom Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) durchgeführt. Diese Messungen werden im Weiteren nicht näher beschrieben. Im Rahmen der geowissenschaftlichen Exploration werden in der Regel relative Schweremessungen genutzt. Das bedeutet, dass ausgehend von einem Referenzwert der Unterschied der Schwere in einer Region oder Lokalität bestimmt wird.

4.2.2.3 Technische Ausführung

Die Schweremessungen werden mit Hilfe von Gravimetern an Land, auf dem Wasser und in der Luft durchgeführt. Gängige Gravimeter sind zum Beispiel das LaCoste-Romberg- oder das Worden-Gravimeter. Die Messung selbst erfolgt über ein modifiziertes Prinzip der Federwaage. Dabei wird an einem einarmigen Hebel durch eine Masse ein Drehmoment erzeugt, das durch eine oberhalb des Hebels angebrachte elastische Feder kompensiert wird. Diese Änderung der Federlänge steht im direkten Zusammenhang mit der Schwereänderung.

Es ist sinnvoll, eine gravimetrische Messung vor Beginn der eigentlichen Messung an einem Ort mit bekannter absoluter Schwere zu kalibrieren um einen Referenzwert zu schaffen. In regelmäßigen Abständen muss am Ort des Referenzwerts mehrmals gemessen werden um verschiedene systematische Fehlerquellen (zum Beispiel Gravimetergang-Korrektur oder Gezeitenkorrektur, siehe unten) für eine Gravimetermessung zu berücksichtigen und aus den tatsächlichen Schwereunterschieden herausrechnen zu können.

Bei der Auswertung gravimetrischer Messungen soll die zu interpretierende Schwere nur die Dichteverteilung im Untergrund widerspiegeln. Es existieren allerdings zahlreiche Faktoren welche die Messung beeinflussen, so dass die beobachtete Messung in der Regel mehreren Korrekturen unterzogen werden muss /KEA 02/, /BUR 92/. Neben den sogenannten Korrekturen werden ebenfalls die sogenannten Reduktionen durchgeführt. Die tatsächliche Herleitung der Reduktionen ist in der Regel sehr komplex, deswegen

werden sie hier nur in aller Kürze wiedergegeben. In manchen Publikationen (auch englischen) werden die Begriffe Korrekturen und Reduktionen teils synonym verwendet. Die Reduktionen sind:

- Topografische Reduktion (engl. „terrain correction“): Der Einfluss des Geländes (zum Beispiel Täler und Anhöhen) im Umfeld der Messung hat Einfluss auf den Messwert. Je genauer das Gelände bekannt ist (zum Beispiel als sogenanntes DGM, siehe Kapitel 4.1.2) desto genauer gelingt diese Reduktion.
- Breitenreduktion (engl. „latitude correction“): Durch die Rotation der Erde und da die Erde keine perfekte Kugel ist, variiert die Schwere mit dem Breitengrad.
- Bouguer-Reduktion (engl. „Bouguer correction“): Diese Reduktion hat einen komplexen Hintergrund /KEA 02/, /BUR 92/ und berücksichtigt bekannte großräumige Dichteschwankungen, etwa das Vorhandensein von Meeren oder Gebirgen.
- Freiluft-Reduktion (engl. „free air correction“): Diese Korrektur wird angewendet, um einen potenziellen Höhenunterschied zwischen der Höhe am Ort der Messung und einer Messung einer idealisierten Kugel (der Erde) auszugleichen.

Die Korrekturen sind:

- Gravimeter-Gang-Korrektur (engl. „drift correction“): Die hochempfindlichen Messinstrumente können sich zum Beispiel durch Erwärmung/Abkühlung im Tagesverlauf etwas verstellen.
- Gezeitenkorrektur (engl. „tidal correction“): Die Gravitation von Mond und Sonne, welche die Gezeiten verursacht, hat einen messbaren Einfluss, der berücksichtigt werden muss.

Im Ergebnis steht nach Abzug dieser Korrekturen und Reduktionen die sogenannte Schwere. Wie oben gesagt ist im Rahmen der Erkundung ausschließlich die lokale/regionale Variation der Schwere aufgrund von Dichte- beziehungsweise Masseunterschieden von Interesse. Deshalb wird, nachdem alle Korrekturen und Reduktionen angewendet wurden, auch die sogenannte Normalschwere subtrahiert. Die Normalschwere ist die Schwere, die für eine perfekte Kugel am Ort gemessen werden würde. Übrig bleibt eine sogenannte Schwere-„Anomalie“, üblicherweise auch Bouguer-Anomalie genannt, die in Praxis die größte Bedeutung hat /WOL 03/. Die berechneten Bouguer-Anomalien für jeden Messpunkt können im Profil als Messkurve oder in Kartenform als Isolinienplan dargestellt werden.

4.2.2.3.1 Aerogravimetrie und Bodenmessungen

Messungen der Schwere am Boden werden mit tragbaren Gravimetern (siehe Abb. 4.3) durchgeführt, die am jeweiligen Messpunkt zunächst exakt vertikal ausgerichtet werden. Bei älteren Geräten erfolgt dies mittels einer Libelle (ähnlich wie bei einer Wasserwaage), neuere Geräte haben eine digitale Anzeige. Ausgerichtet wird ein Gravimeter beispielsweise mit den Stellschrauben am montierten Dreibein (siehe Abb. 4.3).

Zusätzlich zur eigentlichen Messung muss auch eine Positions- und eine Höhenbestimmung erfolgen. Diese kann klassisch mit Kompass und topografischen Karten oder mit modernen Methoden wie dem sogenannten GPS (engl. „Global Positioning System“ /KUM 02/) erfolgen.



Abb. 4.3 Foto eines tragbaren Gravimeters (nach /SAN 18/)

Gravimetrische Messungen aus der Luft (Aerogravimetrie) mit üblichen Trägerplattformen wie Flugzeugen oder Hubschrauber stellen an die Messtechnik große Herausforderungen. Durch Vibrationen wird beispielsweise das empfindliche Messsystem gestört. Auch positive oder negative Beschleunigungen haben Auswirkungen auf das Messsystem. Deshalb werden während einer Befliegung die Beschleunigung und auch die Flughöhe sehr genau gemessen und ebenfalls für die Korrektur der eigentlichen Messwerte genutzt.

4.2.2.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Mit gravimetrischen Messungen werden die Dichte-Inhomogenitäten im Untergrund kartiert, die aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen der Gesteine entstehen. Ein direkter Zusammenhang zwischen der gravimetrischen Messung und der Bestimmung der Lithologie und der Struktur des Untergrunds ist nicht zweifelsfrei möglich. Ergänzende Messungen (siehe Kapitel 4.2.2.6) sind notwendig um Lithologie und die Struktur des Untergrunds zu bestimmen.

Hervorzuheben ist, dass die Gravimetrie an der Oberfläche im Prinzip auf einem großen Skalenbereich (vom dm bis hunderte km) eingesetzt werden kann. Eine Einschränkung ist jedoch, dass eine starke regionale Schwereanomalie, die weiter entfernt ist (beispielsweise ein Intrusionskörper), eine schwächere lokale Anomalie sozusagen „überdecken“ kann.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass bei lokalen gravimetrischen Untersuchungen am Boden Strukturen und Dichte-Inhomogenitäten im Teufenbereich von einigen Metern bis Zehnermetern detektiert werden können. Aerogravimetrie ist in der Lage deutlich größere Teufen im km-Bereich abzudecken, dann werden jedoch keine kleinräumigen Strukturen entdeckt werden können.

Aerogravimetrie wird tendenziell dort zur Erkundung eingesetzt, wo über den Untergrund nur wenig bekannt ist und eine große Fläche für eine Übersicht erkundet werden soll. Auch wird sie eingesetzt um beispielsweise das Ausmaß einer bekannten großräumigen Inhomogenität oder eine am Boden unzugängliche Fläche näher zu erkunden. Bodenmessungen eignen sich zum Beispiel zur Erkundung einer begrenzten Fläche, die gut zugänglich ist, beispielsweise zur Erkundung von konventionellen Deponien /KNÖ 05/.

Die Gravimetrie eignet sich im Prinzip für alle Gesteinstypen. Allerdings bestimmt die geologische Situation, wie eindeutig das Ergebnis einer gravimetrischen Messung hinsichtlich der Gesteinsverteilung im Untergrund interpretiert werden kann. Beispielsweise erscheint in den Messungen ein einzelner Salzstock, da Steinsalz eine deutlich geringere Dichte als das Umgebungsgestein hat, als eine negative Schwereanomalie. Im Gegensatz dazu erscheint ein regionaler Block aus Granit oder Gneis aufgrund der deutlich höheren Dichte als positive Anomalie. Geologische Situationen, in welchen eine großräumige Schichtung vorhanden ist, die allenfalls von Störungen ohne nennenswerten Versatz durchzogen ist, würden in einer gravimetrischen Messung keine Anomalie zeigen.

Wenn die geologische Situation komplexer ist, beispielweise wenn Störungen oder Falten die geologische Gesamtsituationen im tiefen Untergrund prägen, ist die Interpretation der Schwereanomalien deutlich schwieriger. Das liegt auch daran, dass die geologische Interpretation einer gemessenen Schwereanomalie stets eine Herausforderung ist. Der Grund ist, dass sich jede gemessene Anomalie mit einer sehr großen (unendlichen) Zahl von Dichte-Inhomogenitäten erklären lässt /KEA 02/. In der Literatur ist dies als „Inverses Problem der Gravimetrie“ bekannt und betrifft in diesem Sinne auch die weiteren Messmethoden, die – wie die Gravimetrie auch – sogenannte Potenzialmessungen sind (zum Beispiel Magnetik, Geoelektrik). Das bedeutet, dass für jede gemessene Schwereanomalie mehrere Lösungen, also mehrere Interpretationen der Geologie, möglich sind. Deshalb ist für die Interpretation von gravimetrischen Daten stets erfahrenes und ausgebildetes Fachpersonal notwendig. Die Kombination mit anderen Methoden ist ebenfalls notwendig (siehe Kapitel 4.2.2.6).

4.2.2.5 Aufwand

Je nach Zielrichtung beziehungsweise Zielteufe sind sowohl gravimetrische Bodenmessungen als auch aerogravimetrische Messungen mit moderatem Personal- beziehungsweise Ressourcenaufwand möglich. Da sowohl die Messung der Höhe als auch die Schweremessung selbst durchgeführt und im Anschluss die Messung interpretiert werden muss, werden nach /KNÖ 05/ ca. 6 Personen und ebenso viele Geräte für eine Bodenmessung benötigt. Der Aufwand für Aerogravimetrie wird wegen der erforderlichen Piloten und anderen Personals für die Trägersysteme (Flugzeug, Hubschrauber) als höher eingeschätzt.

Für Bodenmessungen müssen gegebenenfalls Genehmigungen von Grundstückseigentümern eingeholt werden, nach /BAU 18/ ist jedoch ein Vorteil der Gravimetrie, dass keine weiteren Genehmigungen zur Anwendung erforderlich sind. Die Befliegung unterliegt strengen Vorschriften und der Regulierung durch unterschiedliche Behörden, die im Vorfeld beachtet werden müssen. Jedoch ist für eine Befliegung die Genehmigung der Grundstückseigentümer nicht erforderlich, was den Vorteil hat, dass dadurch keine Zeit-, Kosten- und auch Qualitätseinbußen entstehen.

4.2.2.6 Kombinationsmöglichkeiten der Gravimetrie mit anderen Methoden

Die Gravimetrie ist für eine belastbare Aussage beziehungsweise Interpretation bezüglich der geowissenschaftlichen Situation im Untergrund allein nicht ausreichend. Eine

Kombination beziehungsweise ein Abgleich oder eine Verifizierung mit weiteren Messmethoden, welche den Untergrund in seiner Struktur und Lithologie punktuell (Bohrung) oder flächenhaft (Seismik) besser charakterisieren, ist erforderlich. Die Anwendung einer Seismik erfolgt in der Regel nach der Gravimetrie, wenn bei gravimetrischen Untersuchungen festgestellt wurde, dass eine weitere (detailliertere) Erkundung erforderlich ist.

Detektierte großräumige Inhomogenitäten (beispielsweise die tatsächliche obere Begrenzung einer Salzstruktur) können beispielsweise mit den verfügbaren Messmethoden in einer Bohrung verifiziert werden. Auch die Tatsache, dass keine gravimetrische Anomalie gefunden wurde, was auf einen homogenen beziehungsweise einfachen Aufbau des Untergrunds hindeutet, kann mit einer Bohrung verifiziert werden. Auch eine Seismik kann zur Verifikation der gravimetrischen Messung verwendet werden, zum Beispiel um die umlaufende Begrenzung einer geologischen Struktur eindeutiger zu kartieren.

4.2.2.7 Alternative Methoden

Ähnliche Resultate wie die Gravimetrie können auch weitere Potentialmethoden liefern, die sich auf ähnlichem Skalenniveau bewegen, wie einzelne Methoden der Geomagnetik (siehe Kapitel 4.2.3), der Geoelektrik (siehe Kapitel 4.2.4) oder der Elektromagnetik (siehe Kapitel 4.2.5). Je nach den in diesen Kapiteln beschriebenen Randbedingungen sind die Erkenntnisse dieser alternativen Methoden mit den Erkenntnissen der Gravimetrie vergleichbar.

Eine Alternative, die in der Regel eindeutigere Ergebnisse hinsichtlich der Untergrundstruktur liefert ist die Seismik. In Kapitel 4.1.1.6 wurde bereits die Seismik als Mittel zur Verifikation angeführt. Diese Methode bedeutet aber einen zeitlichen, personellen und kostenintensiveren Mehraufwand.

4.2.2.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Für die Gravimetrie ist umfassende weiterführende Literatur vorhanden, das Messprinzip wurde auch bereits international für Endlagerprojekte angewendet. Ein Überblick für weiterführende Information ist in Tab. 4.4 dargestellt. Bei einer Online-Suche ist zu beachten, dass mit „Gravimetrie“ (engl. „gravimetry“) ebenfalls eine Untersuchungsmethode im Rahmen der chemischen Analyse beschrieben wird, die nichts mit der hier beschriebenen Methode gemein hat.

Für die Gravimetrie stehen technologische Weiterentwicklungen nicht im Fokus der aktuellen Forschung. Die Anzahl der Tagungsbeiträge auf den Tagungen der Amerikanischen Geophysikalischen Vereinigung (American Geophysical Union, AGU) und der Europäischen Geowissenschaftlichen Vereinigung (European Geosciences Union, EGU) ist eher gering. Eine spezialisierte Fachzeitschrift oder Fachgesellschaft ausschließlich für Gravimetrie existiert nicht.

Im Fokus von Forschung und Entwicklung steht die Anwendung von gravimetrischen Satellitendaten (ein Stichwort hier ist das Satellitensystem „GRACE“) auf verschiedene Themen wie Vergletscherung oder Meeresspiegelschwankungen. Auch die Anwendung der Gravimetrie auf klassische Themen wie die Untersuchung von Verkarstungsgebieten oder tektonisch interessanten Gebieten, ist bei einer Recherche zu Forschung und Entwicklung zu finden, wird an dieser Stelle aber nicht weiter berücksichtigt.

Tab. 4.4 Weiterführende Informationen zur Gravimetrie

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagen der angewandten Geophysik /CLA 18/ • Geophysik /KNÖ 05/ • An introduction to geophysical exploration /KEA 02/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Fachinformationssystem Geophysik /LEI 18/ • Grundlagen der Geophysik /DAH 15/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Deutsche Geophysikalische Gesellschaft • European Geosciences Union • Society of Exploration Geophysicists
Zuständige Behörden	<ul style="list-style-type: none"> • Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) • Geologische Landesämter
Internationale Anwendung (inklusive geplante) der Gravimetrie im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • England /NIR 97/ • Finnland /MCE 00/ • Kanada /DAV 94/, /TOM 95/ • Schweden /AAR 03/ • Schweiz: /THU 94/, /KLI 84/ • USA /OLE 02/, /BAR 83/

4.2.3 Geomagnetik

4.2.3.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Geomagnetik	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none">• Aeromagnetik• Bodenmessung
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Struktur des Untergrunds, großräumig und regional
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none">• 2D geomagnetische Karten, bei Kombination mit Bohrlochgeophysik sind 3D Aussagen möglich
Aufwand	<ul style="list-style-type: none">• Zeitlich hoher Aufwand bei Bodenmessungen;• Geringerer Aufwand und besseres Aufwand/Kosten/Nutzen-Verhältnis bei Aeromagnetik
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Elektromagnetik, Geoelektrik, Gravimetrie, geologische Kartierung, Bohrlochgeophysik
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Gravimetrie, Elektromagnetik, Seismik
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Teufenabhängige Gesteinsparameter können nur indirekt bestimmt werden. Inverses Problem, Anfällig für Störfelder.

4.2.3.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Mit der Geomagnetik können geologische Strukturen auf Grundlage von Anomalien im Erdmagnetfeld untersucht werden. Solche Anomalien können sich aus den magnetischen Eigenschaften der Gesteine ergeben. Obwohl die meisten gesteinsbildenden Minerale nicht magnetisch sind, enthalten manche Gesteinsarten genügend magnetische Minerale um signifikante magnetische Anomalien zu erzeugen /KEA 02/. Aus lokalen oder regionalen Anomalien des Erdmagnetfeldes können Rückschlüsse auf die Ausbildung und Abgrenzung geologischer Strukturen und Störungszonen geschlossen werden, insbesondere bei kristallinen Gesteinen /KNÖ 05/. Die magnetischen Eigenschaften dieser Strukturen müssen sich jedoch vom Nebengestein unterscheiden /BRA 08a/. Geomagnetische Untersuchungen können sowohl boden- als auch luftgestützt durchgeführt werden. Insbesondere die luftgestützte Anwendung macht aufgrund der Geschwindigkeit in der Durchführung und eines günstigen Kosten/Nutzen-Faktors die Methode attraktiv /KEA 02/.

Das auf der Erde natürlich vorhandene Magnetfeld verändert sich über die Zeit nur sehr langsam (Jahre bis Jahrzehnte). Dieses natürliche Magnetfeld (Hauptmagnetfeld) wird überlagert von sich schneller verändernden Magnetfeldern (Variationsfelder), die ihren Ursprung außerhalb des Erdkörpers haben. Zu diesen (globalen) Anteilen des erdmagnetischen Feldes kommt ein zeitlich nahezu konstantes Anomalienfeld hinzu, welches

eine unterschiedliche Magnetisierung von Bestandteilen der oberen Erdkruste widerspiegelt. Ursache dieses Anomalienfeldes sind unter anderem geologische Strukturen /KNÖ 05/.

Ziel bei der Anwendung geomagnetischer Methoden ist es, den Anteil des Anomalienfeldes zu erfassen, indem Haupt- und Variationsmagnetfeld eliminiert werden. Gemessen wird also die Intensität (Stärke) des Magnetfeldes. Hierbei wird zwischen absoluten und relativen Intensitätsmessungen unterschieden /BRA 08a/. Die magnetische Totalintensität wird als magnetische Flussdichte in nT (Nano-Tesla) angegeben, wobei $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T} = 10^{-9} \text{ V}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ entspricht. Sie ist abhängig von der geografischen Lage (Länge und Breite) des Messpunktes.

4.2.3.3 Technische Ausführung

Vor einer Messkampagne erfolgt in der Regel eine Festlegung und gegebenenfalls, insbesondere bei Bodenmessungen, eine geodätische Einmessung von Messprofilen. Für die Messung der Intensität des Magnetfeldes werden elektronische Magnetometer wie Saturationskern-, Fluxgate-, Protonen-, Cäsiummagnetometer oder Förstersonden verwendet. Mechanische Magnetometer wie magnetische Feldwaagen oder Torsionsmagnetometer werden auch eingesetzt, entsprechen jedoch nicht mehr dem Stand der Technik. Gemessen wird vom Land und Schiff aus oder aeromagnetisch durch Überfliegen in geringer aber gleichmäßiger Höhe /BRA 08a/, /KNÖ 05/, /KEA 02/, wobei die Flughöhe von der gewünschten Auflösung abhängt. Bei lokalen Erkundungen zum Beispiel zur Erkundung von Erzlagerstätten oder kleinräumigeren geologischen Strukturen können dies Flughöhen von 25 m bis 40 m über Gelände sein, bei Übersichts- oder regionalen Erkundungen auch mehrere 1000 m Flughöhe /ARN 04/. Bei speziellen Fragestellungen, wie zum Beispiel der Detektion von Kampfmittelresten und entsprechenden Geländebedingungen, sind auch Flughöhen von 2 m über Gelände möglich /DOL 06/. Auch unbemannte Fluggeräte (engl. „Small Unmanned Aerial Vehicles“, SUAV, Drohnen) werden zunehmend mit kompakter geophysikalischer Sensorik und Digitalelektronik als Trägersystem eingesetzt /DOL 06/.

Die Feldabweichungen des gemessenen Magnetfeldes vom globalen erdmagnetischen Referenzfeld (Anomalien) werden in geomagnetischen Karten dargestellt. Die magnetischen Anomalien sind überwiegend durch die magnetischen Materialeigenschaften der oberen Erdkruste bedingt. Geomagnetische Karten und gegebenenfalls Modellrechnungen für zwei- oder dreidimensionale Körper geben mit den darin aufgezeichneten Anomalien Hinweise auf die Ursache der Anomalie. Hierdurch kann dann zum Beispiel auf

die Gesteinslagerung im Untergrund sowie auf Störungszonen geschlossen werden /KNÖ 05/.

4.2.3.3.1 Bodenmessung

Bodenmessungen werden üblicherweise über relativ kleinen Geländeeinheiten mit einem vorher definierten Untersuchungsziel durchgeführt /KEA 02/. Nach /KNÖ 05/ sollte die Geländesituation vorher bekannt sein. Anschließend müssen Parameter und Geräte für die Feldarbeit ausgewählt und festgelegt werden. Wichtige Parameter sind hier zum Beispiel Lage und Größe des Untersuchungsgebietes, Lage, Abstand und Orientierung der Messprofile und Messpunkte sowie die Berücksichtigung von Störquellen wie Wasser-, Gas-, Strom- oder Telekommunikationsleitungen, Eisenbahnschienen etc.. Generell hat die Vermeidung von Störfeldern eine große Bedeutung. Messgröße und Messgenauigkeit müssen ebenso festgelegt werden wie der Abstand der Sensoren von der Erdoberfläche und der Standort einer Basisstation. Die Größe des Messgebietes sollte hierbei derart gewählt werden, dass auch das Haupt- und Variationsmagnetfeld erfasst werden können, damit diese vom Anomaliefeld sicher unterschieden werden können. Die Messprofile sollten senkrecht zum Streichen der geologischen Einheiten angelegt werden. Profil- und Messpunktabstand sind sensible Größen und sollten durch fachkundiges Personal festgelegt werden.

4.2.3.3.2 Aeromagnetik

Aeromagnetische Messungen stellen den derzeitigen Stand der Technik dar /DEA 18/. Sie werden mit Flugzeug oder Hubschrauber durchgeführt, an denen eine geeignete Messtechnik befestigt wird. Mittlerweile werden hierbei auch SUAV verwendet. In der Aeromagnetik werden meist Protonen- oder Cäsium-Magnetometer verwendet /DOL 06/. Diese können entweder fest am Fluggerät installiert sein (sogenannte „Stinger“) oder in Form eines aerodynamischen Körpers (sogenannter „Bird“) über ein Seil mit dem Fluggerät verbunden sein (Schleppsonde). Zur genauen Positionsbestimmung werden D-GPS und Laserhöhenscans verwendet. Auch bei aeromagnetischen Messkampagnen müssen das Untersuchungsziel sowie die entsprechenden Parameter (siehe Kapitel 4.2.3.3.1) festgelegt werden. Der Abstand der abzufliegenden äquidistanten Messprofile wirkt sich hierbei auf die Auflösung und die notwendige Flughöhe aus (siehe Kapitel 4.2.3.3). Bei überregionalen magnetischen Kartierungen kann der Profilabstand zum Teil 2 km und die Flughöhe mehrere Kilometer betragen. Bei der Lagerstättenuche ist ein höheres räumliches Auflösungsvermögen erforderlich; der Profilabstand kann hier etwa 200 m betragen bei einer Flughöhe zwischen 30 und 150 m

/ARN 04/. Ebenfalls muss auch hier darauf geachtet werden, dass die magnetischen Effekte des Luftfahrzeuges die Messung nicht beeinflussen /KEA 02/.

4.2.3.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Bei der Aufarbeitung und Auswertung der erhobenen Datensätze ist auf eine sorgfältige und gewissenhafte Datenreduktion zu achten. Es müssen geeignete Auswerteverfahren verwendet werden. Alle magnetischen Signale und Beobachtungen, die nicht auf die magnetischen Effekte des zu untersuchenden Untergrundes zurückzuführen sind, müssen entfernt beziehungsweise berücksichtigt werden. Dies können zum Beispiel zeitliche Schwankungen des Erdmagnetfeldes oder Einflüsse magnetischer Stürme oder künstlicher elektromagnetischer Felder sein /KEA 02/; aber auch Störquellen wie elektrifizierte Eisenbahnlinien, Hochspannungsleitungen, Stahlgittermasten etc. sind zu berücksichtigen /KNÖ 05/. Da das magnetische Feld abhängig von der geografischen Länge und Breite ist, muss ein regionaler Gradient bei der Auswertung ebenfalls berücksichtigt werden /KEA 02/.

Sedimentgesteine sind in der Regel nicht-magnetisch, es sei denn, sie weisen einen hohen Gehalt des Minerals Magnetit auf. Magnetische Anomalien über Sedimentgesteinen weisen daher meist auf unterlagernde intrusive oder metamorphe Gesteine oder Intrusionen hin /KEA 02/.

Zur vorbereitenden Erkundung der geologischen Gegebenheiten des Untergrundes werden häufig verschiedene geophysikalische Messmethoden eingesetzt. Teufenabhängige Gesteinseigenschaften können jedoch nur indirekt bestimmt werden. Häufig wird hierzu eine Kombination mit anderen Messmethoden (zum Beispiel Bohrlochmethoden) notwendig.

4.2.3.5 Aufwand

Der Aufwand zur Durchführung einer geomagnetischen Erkundung hängt von der gewählten Methode ab. Aeromagnetische Messungen sind deutlich schneller und kostengünstiger als bodengestützte Messungen durchzuführen. Nach /KEA 02/ sind die Kosten für aeromagnetische Messungen um bis zu 40 % pro Profilkilometer günstiger als bodengestützte Messungen. Bodengestützte Messungen haben zudem einen höheren organisatorischen Aufwand im Vorfeld. Neben dem benötigten Personal ist die Messgeometrie (Anzahl und Abstand der Messpunkte und -profile) genau festzulegen und zu

befolgen, wobei auch die Zugänglichkeit des Geländes einen Zeit- und Kostenfaktor darstellt. Gegebenenfalls müssen im Vorfeld Betretungsgenehmigungen eingeholt werden. /KNÖ 05/ gibt einen Überblick über den personellen, technischen und zeitlichen Aufwand einer Geländekampagne. Vor der Messkampagne erfolgt bei Bodenmessungen oft eine geodätische Einmessung von Messprofilen. Hierdurch wird bei Bodenmessungen eine doppelte Begehung des zu untersuchenden Gebietes notwendig, was insbesondere bei schwierigen Geländebedingungen zu einem hohen Zeitaufwand führen kann /DOL 06/. Auch aeromagnetische Messungen müssen im Vorfeld detailliert geplant und entsprechende Fluggenehmigungen eingeholt werden. Jedoch kann ein erheblich größeres Gebiet in einer Messkampagne erfasst werden. Zugänglichkeit und Geländesituation spielen hierbei naturgemäß jedoch keine besondere Rolle, so dass auch unwegsames Gelände kein Hindernis darstellt. Aeromagnetische Geländeerkundungen sind im Vergleich zu Bodenmessungen von der Vegetation unabhängiger, schneller durchzuführen und deutlich kostengünstiger. Größere, auch schwerer zugängliche Gebiete können hiermit in kürzerer Zeit erkundet werden, ohne kostenintensive Untersuchungs-/Messmannschaften ins Gelände zu schicken. Aerogeomagnetik ist daher die Standardmethode bei der geomagnetischen Erkundung /KEA 02/.

4.2.3.6 Kombinationsmöglichkeiten der Magnetik mit anderen Methoden

Geomagnetische Messungen werden oft mit anderen geophysikalischen Methoden kombiniert. Insbesondere bei luftgestützten Messkampagnen zur geophysikalischen Erkundung werden oft auch elektromagnetische Erkundungsverfahren sowie teilweise auch gravimetrische Verfahren mit eingesetzt /KEA 02/. In Kombination mit geophysikalischen Bohrlochmessungen können 3D-Auswertungen durchgeführt und somit genauere Aussagen über die Lage geologischer Körper im Raum getroffen werden. Die Kombination geomagnetischer Erkundungen mit durch geologischer Kartierung gewonnenen Erkenntnissen ist im Vorfeld der Messkampagnenplanung notwendig /KEA 02/.

Geomagnetische Erkundungsmethoden können ebenfalls mit anderen geophysikalischen Methoden wie Geoelektrik, Elektromagnetik und Gravimetrie kombiniert werden, womit die Aussagesicherheit erhöht werden kann.

4.2.3.7 Alternative Methoden

Zahlreiche Erkenntnisse, die mittels Geomagnetik gewonnen werden können, lassen sich auch mit anderen Methoden ermitteln, insbesondere anderen geophysikalischen,

flächenhaften Erkundungsmethoden wie Gravimetrie und Elektromagnetik (siehe Kapitel 4.2.2 bzw. 4.2.5). Diese werden zum Teil auch gleichzeitig eingesetzt. Auch seismische Methoden können, flächenhaft eingesetzt (siehe Kapitel 4.2.1), ähnliche Erkenntnisse liefern. Geowissenschaftliche Erkenntnisse an der Oberfläche werden zudem durch Kartierungen gewonnen (siehe Kapitel 4.1.1).

4.2.3.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Für die Geomagnetik ist umfassende weiterführende Literatur vorhanden, die Methode wurde auch bereits international für Endlagerprojekte angewendet. Der Überblick ist in Tab. 4.5 dargestellt.

Neuere Entwicklungen und der Stand von Wissenschaft und Technik betreffen insbesondere die verwendete Messtechnik und die Auswerte- und Darstellungsalgorithmen.

Tab. 4.5 Weiterführende Informationen zur Geomagnetik

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • The Applicability of Geoelectrical Methods in Pre-Investigation for Construction in Rock /DAN 11/ • An Introduction into Applied and Environmental Geophysics /REY 11/ • Geophysik /KNÖ 05/ • An Introduction to geophysical exploration /KEA 02/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Fachinformationssystem Geophysik /LEI 18/ • Grundlagen der Geophysik /DAH 15/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Journal of Applied Geophysics (ISSN: 0143-1161 bzw. 1366-5901), TandF Verlag • Geophysics (ISSN: 0016-8033), Society of Exploration Geophysicists • Geophysical Journal International (ISSN: 0956-540X), Oxford University Press • Exploration Geophysics (ISSN: 0812-3985), CSIRO Publishing • International Journal of Remote Sensing (ISSN: 0143-1161 bzw. 1366-5901), TandF Verlag
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • Das geologische Endlagersystem: Gebirgsverhalten und Erkundungsmethoden /BRA 08a/
Internationale (inklusive geplante) Anwendung der Geomagnetik im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Finnland: /RAS 06/ • Schweden: /SKB 00/, • UK: /NDA 11/, /NDA 16/

4.2.4 Geoelektrik

4.2.4.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Geoelektrik	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none">• Eigenpotenzial• Gleichstromgeoelektrik• Induzierte Polarisation/Spektral induzierte Polarisation (IP/SIP)
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Exploration von Erzvorkommen• Detektion von Tonschichten• Hydraulische Parameter von Sedimenten• Erkundung von Lockersedimenten• Grundwasserspiegel
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none">• Weitestgehend qualitative Aussagen• Quantitative Aussagen sind jedoch möglich
Aufwand	<ul style="list-style-type: none">• Geringer technischer und hoher personeller Aufwand erforderlich
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Notwendig• Geologische Kartierung, Radiometrie, Magnetik, Elektromagnetik, Fernerkundung
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Seismik, Magnetik, Elektromagnetik
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Deutliche Unterschiede in den zu messenden Parametern des zu untersuchenden Untergrundes notwendig

4.2.4.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Unter Geoelektrik werden in der Regel eine Reihe von elektrischen und elektromagnetischen Messmethoden zusammengefasst, die zur Erkundung der räumlichen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit beziehungsweise des spezifischen elektrischen Widerstandes (Resistivität), der Polarisations-eigenschaften, der Beobachtung natürlicher elektrischer Felder sowie der Ermittlung von Strukturen mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften angewendet werden können /BRA 08a/. In diesem Kapitel werden zunächst geoelektrische Messmethoden beschrieben. Elektromagnetische Verfahren werden in Kapitel 4.2.5 erläutert.

Geoelektrische Verfahren sind durch die Messung natürlicher Gleichstromfelder (Eigenpotenzialmessungen) mittels künstlich in den Untergrund eingespeisten Gleichstroms (Gleichstromgeoelektrik) und durch die Verwendung künstlich erzeugter, niedrigerfrequenter Wechselstromfelder (induzierte Polarisation) charakterisiert /BRA 08a/. Gemessen werden hierbei die Parameter elektrische Leitfähigkeit, beziehungsweise spezifischer

Widerstand. Die aufgeführten Verfahren sind klassische Methoden der Explorationsgeophysik. Angewandt werden diese beispielsweise zur Exploration von Erzvorkommen, zur Detektion von Tonschichten, zur Bestimmung der hydraulischen Parameter von Sedimenten, zur Erkundung von Lockersedimenten und zur Bestimmung von Grundwasserspiegeln.

4.2.4.3 Technische Ausführung

Mit geoelektrischen Methoden wird die Reaktion des Untergrundes auf die Induktion eines elektrischen Stroms (Gleichstrom oder niedrigfrequenter Wechselstrom) ermittelt. Zur Durchführung werden je nach Methode unterschiedliche Anordnungen von Elektroden benötigt, die durch Kabel miteinander verbunden sind, sowie die zugehörige Messtechnik und geeignete Stromerzeuger (Generatoren). Die Elektroden können im zu untersuchenden Gebiet hierbei statisch in Form von Elektroden-Arrays entlang von vorher definierten Profillinien angeordnet sein oder mit einer statischen und einer mobilen Elektrode, die auf Profilen über das Untersuchungsgebiet bewegt wird (Wandersonde) /BRA 08a/. Geoelektrische Methoden in der Flächenerkundung benötigen Bodenkontakt. Je nach Methode und Untersuchungsziel kann der Abstand zwischen den Elektroden fest oder variabel sein. Der Abstand zwischen den Elektroden kann hierbei bis zu 300 m betragen /KEA 02/.

4.2.4.3.1 Eigenpotenzial-Methode (SP)

Die Eigenpotenzialmethode (engl. „self-potential, spontaneous potential“, SP) nutzt elektrische, an der Erdoberfläche messbare Gleichstromfelder, die auf elektrochemischen oder elektrokinetischen Prozessen beruhen /BRA 08a/, /KEA 02/. Auf solche Weise entstandene Gleichstromfelder treten üblicherweise in Zusammenhang mit Lagerstätten bestehend aus metallischen Verbindungen (vorwiegend Sulfide), Magnetit oder Graphit auf /KEA 02/. Die elektrochemischen Vorgänge beruhen dabei hauptsächlich auf dem Vorhandensein von Redox-Potenzialen oder Diffusions- und Membranpotenzialen. Bei 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 eine Sondenanordnung (engl. „array“) an Stelle der einzelnen bewegten Sonde aufgebaut werden /BRA 08a/.

Eigenpotenzialmessungen können im Bergbau unter anderem zur Erkundung von Störungszonen, von Erzlagerstätten, zur Lokalisierung von metallischen Ablagerungen sowie zur Bestimmung von Wasserwegsamkeiten eingesetzt werden /KNÖ 05/ .

Die Eigenpotenzialmethode gehört zu den einfachsten und kostengünstigsten Verfahren zur Erkundung des geologischen Untergrunds. Die Aussagetiefen liegen bei einigen Zehnermetern. /KEA 02/.

4.2.4.3.2 Gleichstromgeoelektrik

Bei der Gleichstromgeoelektrik (engl. „resistivity method“) wird ein elektrischer Strom bekannter Stromstärke (Gleichstrom oder niederfrequenter Wechselstrom) über Stromelektroden in den Boden eingespeist, die zugehörige Spannung gemessen und der scheinbare spezifische Widerstand berechnet. Durch die Einspeisung elektrischen Stroms wird ein durch die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes beeinflusstes Potenzialfeld aufgebaut, dessen Potentialdifferenzen zwischen den Elektroden an der Oberfläche gemessen werden /BRA 08a/. Abweichungen von den erwarteten Potentialdifferenzen bei einem gleichförmigen, homogenen Untergrund geben Informationen über die elektrischen Eigenschaften von Inhomogenitäten im Untergrund. Hierdurch kann mittels geeigneter Auswerteverfahren auf das Vorhandensein sowie Form und Lage von leitenden Schichten im Untergrund geschlossen werden. Sie eignen sich daher zur Erkundung und Abgrenzung lithologischer Einheiten sowie zum Nachweis von Kluft- und Störungszonen im Gesteinskörper /KNÖ 05/.

Das Verfahren macht sich die Eigenschaft zunutze, dass unterschiedliche Minerale und damit unterschiedliche Gesteine, Strom in unterschiedlichem Maße leiten /KEA 02/. Wichtige Leitfähigkeitsmechanismen sind hierbei die elektrische und die elektrolytische Leitfähigkeit. Die elektrische Leitfähigkeit tritt hierbei in erster Linie bei metallhaltigen Gesteinen, wie zum Beispiel Erzen auf, wohingegen die elektrolytische Leitfähigkeit durch einen Elektrolyten im Porenraum eines Gesteins mit nicht leitender Matrix bedingt ist /BRA 08a/. Mit geeigneten Messanordnungen können diese Unterschiede gemessen werden und müssen dann entsprechend interpretiert werden.

Die zur Messung verwendeten Stromelektroden können in unterschiedlicher Weise angeordnet werden. Prinzipiell können hierbei die Abstände zwischen den Elektroden gleich gehalten (Wenner-Anordnung) oder vergrößert werden (Schlumberger-Anordnung). Die Elektroden sind durch Kabel verbunden und werden entlang von Profilen im Untersuchungsgebiet ausgelegt. Die Wenner-Anordnung eignet sich insbesondere um

bei einer Kartierung qualitative Aussagen über den Untergrund zu erlangen, während sich die Schlumberger-Anordnung auch zu Tiefensondierung eignet, da sich durch eine Vergrößerung der Abstände zwischen den Elektroden eine größere Eindringtiefe erreichen lässt. Mit entsprechenden Auswerteverfahren sind so auch quantitative Aussagen zur Widerstandsverteilung in der Tiefe möglich /BRA 08a/. Als Faustregel für die Wenner- und Schlumberger-Anordnung gilt, dass die Eindringtiefe in etwa einem Viertel bis zur Hälfte eines Elektrodenabstands entspricht.

Bei der Widerstandstomografie, einer Kombination aus Kartierung und Tiefensondierung, handelt es sich um ein Verfahren zur Ermittlung der räumlichen Widerstandsverteilung /BRA 08a/.

Die Stärke der Arbeitsströme kann, leistungs- und geräteabhängig, zwischen 1 mA und > 10 A variieren. Die maximale Stromstärke ist in der Regel durch die verwendeten Leitungsquerschnitte begrenzt.

Die maximale Eindringtiefe ist begrenzt durch die maximale Stromstärke, die in den Untergrund eingespeist werden kann und durch die physikalische Begrenzung der Profil- und Kabellängen. Die Eindringtiefe der Gleichstromgeoelektrik ist daher in der Regel nicht höher als 1 km.

4.2.4.3.3 Induzierte Polarisation / Spektral Induzierte Polarisation (IP/SIP)

Unterbricht man bei einer Elektrodenanordnung, wie man sie bei der Gleichstromgeoelektrik verwendet, abrupt die Einspeisung eines Gleichstroms in den Untergrund, so fällt die Spannung zwischen den Potentialelektroden nicht sofort auf einen Nullwert zurück. Zunächst fällt die Spannung stark ab, dann jedoch verflacht die abfallende Spannungskurve und es dauert oft mehrere Sekunden, bis ein Nullwert erreicht wird. Ein ähnliches Phänomen wird beobachtet, wenn der Strom eingeschaltet wird. Nach einem schnellen Anstieg steigt die Spannung erst allmählich über ein (diskretes) Zeitintervall auf einen stationären Wert an. Der Untergrund wirkt somit als ein Kondensator und speichert elektrische Ladung, wird also durch eine induzierte Spannung elektrisch polarisiert /KEA 02/. Nach Abschalten des Stroms kommt es dann zu einer Entladung, bei der auch die Polarisation wieder aufgehoben wird.

Bei der Spektral Induzierten Polarisation (SIP) verwendet man anstelle einer Gleichstromquelle eine variable niederfrequente Wechselstromquelle. Hier zeigt sich, dass der

gemessene, scheinbare spezifische Widerstand des Untergrunds mit zunehmender Frequenz abnimmt und somit eine Abhängigkeit von der Frequenz besteht. Grund hierfür ist, dass die Kapazität des Bodens den Durchgang von Gleichströmen hemmt, jedoch mit zunehmender Frequenz die Effizienz der Übertragung von Wechselströmen steigt /KEA 02/, /KEM 12/, /ATT 13/. Eine Einspeisung von frequenzabhängigem Wechselstrom verursacht also eine Ladungstrennung. Die dadurch herbeigeführte Polarisation im Gestein führt zu einer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Gemessen wird hierbei die Impedanz. Der Betrag und die Phase der Impedanz sind dabei frequenzabhängig und gesteinspezifisch.

Die kapazitive Eigenschaft des Untergrundes bewirkt also sowohl den vorübergehenden Abfall einer Restspannung als auch die Änderung des scheinbaren spezifischen Widerstands als eine Funktion der Frequenz. Beides sind Effekte des gleichen Phänomens im Zeit- und Frequenzbereich und können durch eine Fourier-Transformation miteinander verknüpft werden. Diese beiden Erscheinungsformen der Kapazitätseigenschaft des Bodens liefern zwei verschiedene Untersuchungsmethoden für die Untersuchung des Effekts. Die Messung einer abklingenden Spannung über ein bestimmtes Zeitintervall ist als IP-Vermessung im Zeitbereich (Time Domain IP) bekannt. Die Messung des scheinbaren spezifischen Widerstands bei zwei oder mehr niedrigen Wechselstromfrequenzen ist als Frequenzbereichs-IP-Vermessung (Spektral Induzierte Polarisation, SIP) bekannt /KEA 02/.

Die IP-Methode erlaubt Aussagen über Leitfähigkeit und innere Oberfläche spezifischer geologischer Körper im Untergrund. Die SIP-Methode ist zudem abhängig von den Porenraumeigenschaften. Der Einfluss von Sättigung und Porosität ist noch Gegenstand der Forschung. Hauptanwendungsgebiete für IP/SIP-Methoden sind zum Beispiel 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 /BRA 08a/.

4.2.4.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Geoelektrische Methoden werden international seit langem standardmäßig bei der geologischen Erkundung insbesondere im wirtschaftlichen Bereich (Prospektion), aber auch im wissenschaftlichen Bereich eingesetzt. In Abhängigkeit der eingesetzten Methode

sind qualitative Aussagen über oberflächennahe Bereiche bis zu mehreren Zehnermetern Tiefe möglich. Oberflächliche Schichten mit hoher Leitfähigkeit (wasserhaltige Tone, graphithaltige Lithologie) können allerdings tiefer liegende Leiter maskieren. Quantitative Aussagen sind jedoch auch möglich, bedingen dann aber einen hohen und komplexen Auswerteaufwand /KEA 02/. Durch Variation der Elektrodenabstände lassen sich auch Messtiefen bis 1000 m erreichen (Gleichstromgeoelektrik).

Um aussagekräftige Auswertungen der gewonnenen Daten durchzuführen sind in der Regel computergestützte Verfahren notwendig, bei denen geeignete, jedoch komplexe, Auswertelgorithmen verwendet werden. Bei der Interpretation der erhaltenen Daten wird auf Modellvorstellungen der elektrischen Reaktion bekannter geologischer Einheiten und Strukturen zurückgegriffen, jedoch ist die Interpretation nicht immer eindeutig. Geologische und geophysikalische Fachkompetenz und Erfahrung in der Interpretation entsprechender Daten ist daher ebenso notwendig wie die Verknüpfung mit anderen geophysikalischen und geologischen Erkundungsmethoden.

4.2.4.5 Aufwand

Die beschriebenen geoelektrischen Methoden zur Untersuchung des Untergrundes benötigen Bodenkontakt und werden daher bodengestützt angewendet. Über das Untersuchungsgebiet werden entsprechende Profillinien angelegt entlang deren die geoelektrischen Methoden mit geeigneten Sondenkonfigurationen ausgelegt werden. Für die bodengestützten Aufnahmen müssen gegebenenfalls Genehmigungen von Grundstückseigentümern eingeholt werden. Der Aufwand an technischen Ressourcen ist überschaubar, allerdings nicht unerheblich. Bodengestützte elektrische Messungen werden in der Regel von mehreren Personen durchgeführt. Die Messkonfiguration bestehen zum Teil aus tragbaren Komponenten, teilweise werden auch Fahrzeuge oder eine Kombination von stationären und mobilen Gerätschaften eingesetzt. Entsprechende Messausrüstung ist im Fachhandel erhältlich.

Die Eigenpotenzial-Methode (SP) ist eine schnelle und günstig durchzuführende Methode, die nur einen geringen Aufwand an Ausrüstung benötigt und daher geeignet ist oberflächennahe Übersichtserkundungen durchzuführen /KEA 02/.

Die IP/SIP-Methode sowie die Gleichstrom-Methode benötigen im Gelände einen deutlich höheren Aufwand. Der Messfortschritt ist relativ langsam, was einen höheren Kostenaufwand als bei den meisten anderen bodengestützten geophysikalischen Methoden nach sich zieht /KEA 02/.

Für die Auswertung der Daten braucht es entsprechende Fachkenntnisse und spezialisierte Software.

4.2.4.6 Kombinationsmöglichkeiten der Geoelektrik mit anderen Methoden

Geoelektrische Erkundungsmethoden werden oft mit Methoden der Radiometrie, Magnetik, Elektromagnetik, Fernerkundung und geologischer Kartierung kombiniert, wobei magnetische und elektromagnetische geophysikalische Verfahren ähnliche Parameter liefern. Durch die Verknüpfung mit Bohrlochmessungen, insbesondere mit elektrischen Verfahren im Bohrloch, können 3D-Darstellungen erzeugt werden und Dateninterpretationen verifiziert werden.

4.2.4.7 Alternative Methoden

Erkenntnisse, die mittels elektrischer Verfahren ermittelt wurden, können oft auch durch seismische (siehe Kapitel 4.2.1) oder auch durch die in Kapitel 4.2.4.6 genannten Methoden erlangt werden. Zwar werden mit seismischen Verfahren andere Parameter bestimmt, die Ergebnisse beider Verfahren stimmen aber häufig überein, da eine Änderung der elektrischen Leitfähigkeit (Wassergehalt, Erz) häufig auch eine Änderung der seismischen Impedanz bewirkt (siehe Kapitel 4.2.1).

4.2.4.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Für die Elektrik ist umfassende weiterführende Literatur vorhanden, die Methode wurde auch bereits international für Endlagerprojekte angewendet. Der Überblick ist in Tab. 4.6 dargestellt.

Neuere Entwicklungen und der Stand von Wissenschaft und Technik lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Weiter- und Neuentwicklungen bei geoelektrischen Verfahren beschäftigen sich unter anderem mit der Verbesserung der räumlichen und zeitlichen Erfassung dynamischer Prozesse, zum Beispiel zur Beschreibung der Skalen- und methodenübergreifende Erkundung zur Verbesserung der Parametrisierung von Untergrundmodellen oder der hochauflösenden Charakterisierung sedimentologischer Strukturen /LEI 18/.
- Verbesserung der Messtechnik und Auswerteverfahren

Tab. 4.6 Weiterführende Informationen zur Geoelektrik

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • The Applicability of Geoelectrical Methods in Pre-Investigation for Construction in Rock /DAN 11/ • An Introduction into Applied and Environmental Geophysics /REY 11/ • Geophysik /KNÖ 05/ • An Introduction to geophysical exploration /KEA 02/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Fachinformationssystem Geophysik /LEI 18/ • Grundlagen der Geophysik /DAH 15/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Journal of Applied Geophysics (ISSN: 0143-1161 bzw. 1366-5901), TandF Verlag • Geophysics (ISSN: 0016-8033), Society of Exploration Geophysicists • Geophysical Journal International (ISSN: 0956-540X), Oxford University Press • Exploration Geophysics (ISSN: 0812-3985), CSIRO Publishing
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • Das geologische Endlagersystem: Gebirgsverhalten und Erkundungsmethoden /BRA 08a/
Internationale (inklusive geplante) Anwendung der Geoelektrik im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • IAEA: /IAEA 86/ • Kanada: /NUC 13/ • Schweden: /SKB 00/ • Schweiz: /BFE 08/ • USA: /KAR 07/ • UK: /NDA 11/

4.2.5 Elektromagnetik

4.2.5.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Elektromagnetik	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none"> • Künstlich erzeugte elektromagnetische Felder • Magnetotellurik • Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) • Radar
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Geologie, Lithologie und Störungen, überwiegend oberflächennah, je nach Methode bis mehrere km Tiefe
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertung erfordert hohe Fachkenntnisse, Verknüpfung mit anderen geophysikalischen Erkundungsmethoden notwendig
Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Bei geländegestützter Anwendung hoher Personal- und Materialaufwand

Kurzcharakterisierung Elektromagnetik	
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Notwendig • Geologische Kartierung, Radiometrie, Magnetik, Elektrik, Fernerkundung
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Seismik, Magnetik, Elektrik
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Deutliche Unterschiede in den zu messenden Parametern des zu untersuchenden Untergrundes notwendig

4.2.5.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Elektromagnetische Methoden in der geophysikalischen Erkundung nutzen die elektrische Leitfähigkeit beziehungsweise die Unterschiede in der Verteilung und Ausbreitung elektromagnetischer Felder im Untergrund. Sie basieren auf der Wechselwirkung zwischen künstlich erzeugten und natürlichen elektromagnetischen Feldern und werden zum Beispiel in /KEA 02/ beschrieben.

Angewandt werden diese Methoden beispielsweise zur Untersuchung der Geologie und Lithologie sowie von Störungen. Der Einsatzbereich ist überwiegend oberflächennah, je nach Methode sind teilweise aber auch Aussagen bis in mehrere Kilometer Tiefe möglich.

4.2.5.3 Technische Ausführung

Mit elektromagnetischen Methoden wird die Reaktion des Untergrundes auf die Induktion künstlich erzeugter elektromagnetischer Felder ermittelt. Ein über einen Transmitter erzeugtes primäres elektromagnetisches Feld wird in Abhängigkeit von den elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Untergrundes in diesem modifiziert. Das so erzeugte sekundäre elektromagnetische Feld unterscheidet sich in Amplitude und Phase vom primären Feld. Über einen Receiver, der die unterschiedlichen Feldgrößen beider Felder empfängt, kann die Differenz zwischen primärem und sekundärem Feld bildgebend dargestellt werden. Diese Differenz ist abhängig von den elektromagnetischen Eigenschaften des Untergrundes und kann Informationen über Geometrie und Eigenschaften des untersuchten Bereiches geben.

Für die Anwendung solcher Verfahren ist ein Bodenkontakt in der Regel nicht erforderlich. Elektromagnetische Untersuchungen/Erkundungen können daher meist deutlich

schneller durchgeführt werden als zum Beispiel reine elektrische Verfahren. Insbesondere können Transmitter und Receiver bei elektromagnetischen Verfahren luftgestützt mittels Hubschrauber oder Flugzeug eingesetzt werden.

Die Eindringtiefe eines elektromagnetischen Feldes ist abhängig von seiner Frequenz und der elektrischen Leitfähigkeit des zu untersuchenden Mediums. Die Feldstärke nimmt mit zunehmender Eindringtiefe ab, die Amplitude exponentiell mit der Tiefe. Daher kann über die Variation der Frequenz des erzeugten elektromagnetischen Feldes die Eindringtiefe auf die gewünschte Tiefe des zu untersuchenden Bereiches eingestellt werden. Die maximale Eindringtiefe eines so erzeugten elektromagnetischen Feldes liegt in der Größenordnung um 500 m, da sehr niedrige Frequenzen schwierig zu erzeugen sind /KEA 02/. Eine Ausnahme stellen hierbei magnetotellurische Methoden dar (siehe Kapitel 4.2.5.3.2), bei denen Erkundungstiefen von mehreren Kilometern bis hin zum Bereich der Erdkruste erreicht werden können.

Die so erzeugten elektromagnetischen Felder können auf unterschiedliche Weise detektiert beziehungsweise abgebildet werden. Am einfachsten geschieht dies mittels einer Spule mit mehreren hundert Kupferdraht-Windungen. Über einen mit dieser Spule verbundenen Verstärker kann ein Signal erzeugt werden, dessen maximale Stärke erreicht wird, wenn die Fläche der Spule im rechten Winkel zur Richtung des aufzunehmenden elektromagnetischen Feldes steht. Grundprinzip hierfür ist, dass die Amplitude der Wechselspannung, die in der Spule durch ein elektromagnetisches Feld induziert wird, proportional zu der Komponente des elektromagnetischen Feldes ist, das senkrecht zur Spulenebene steht. Wird die Spulenebene in Richtung des ankommenden Feldes ausgerichtet, erreicht die Signalstärke ein Minimum. Das erzeugte Messsignal kann akustisch über einen Kopfhörer ausgegeben werden. Moderne Methoden bedienen sich elektronischer, computergestützter Auswertelgorithmen.

4.2.5.3.1 Künstlich erzeugte elektromagnetische Felder

Tilt-Angle (engl. für Kippwinkel)

Bei Nutzung der Signale von primärem und sekundärem elektromagnetischem Feld kann die Überlagerung beider Felder als resultierendes Feld in Form von Vektoren dargestellt werden, die ein Ellipsoid aufspannen. Über die Bestimmung der Abweichung dessen Hauptachse von der Horizontalen können Aussagen über die räumliche Lage des untersuchten Bereiches gemacht werden. Elektromagnetische Messmethoden, die sich dieses Prinzips bedienen, werden unter dem englischen Begriff „tilt-angle methods“

oder „dip-angle methods“ (also in etwa übersetzbar als Kippwinkel-Methoden) zusammengefasst. Hierzu zählen zum Beispiel die VLF (engl. für „very low frequency“) und AFMAG (engl. für „audio frequency magnetic field“) Methode. Tilt-angle Methoden sind aufgrund der einfachen Methodik und der relativ geringen Kosten weit verbreitet, liefern allerdings nur sehr wenige quantitative Informationen über den untersuchten Bereich. Die Eindringtiefe liegt bei nicht mehr als 75 m (VLF) /SOU 07/.

Phase Measuring Systems (engl. für Messung der Phasenverschiebung)

Anspruchsvollere Methoden bedienen sich unter anderem der Bestimmung des Verhältnisses zwischen Phase und Amplitude des primären, sekundären und resultierenden elektromagnetischen Feldes. Das durch einen Leiter im Untergrund produzierte sekundäre elektromagnetische Feld zeigt eine Phasenverschiebung um einen Phasenwinkel. Einige Messsysteme, vor allem luftgestützt verwendete, bestimmen ausschließlich diesen Phasenwinkel. Typischerweise bestehen bodengestützte Messkonfigurationen aus einem Transmitter und einem Receiver (Durchmesser der Spulen ca. 1 m) die mit einem 30–100 m langen Kabel verbunden sind. An dem Transmitter ist ein mobiler Wechselstromgenerator angeschlossen; der Receiver ist mit Kompensator und Dekomposer (Bestandteile der Messelektronik zur Detektierung der Phasenverschiebung) bestückt. Traversen werden mit dieser Messkonfiguration im Gelände senkrecht zum geologischen Streichen angelegt. Detektiert wird die Änderung der elektromagnetischen Leitfähigkeit geologischer Einheiten über die Phasenverschiebung elektromagnetischer Felder. Die maximale Messtiefe hier beträgt ungefähr die Hälfte der Distanz zwischen Transmitter und Receiver. Kritisch bei dieser Methode ist die Genauigkeit bei Ausrichtung und Abstand der Transmitter- und Receiver-Spulen, da schon kleine prozentuale Abweichungen in Abstand und Neigung merkbare Abweichungen der Phasenmessungen produzieren können.

Transientenelektromagnetik (TEM oder engl. Time-Domain Electromagnetic Surveying, TDEM)

Die Time-Domain Electromagnetic Surveying (auch Transientenelektromagnetik, TEM) Methode nutzt im Gegensatz zu den bereits erwähnten elektromagnetischen Methoden keine kontinuierlichen elektromagnetischen Felder, sondern gepulste Felder. Ein primäres elektromagnetisches Feld wird hierbei nicht kontinuierlich aufrechterhalten, sondern induziert über eine Serie von Impulsen ein sekundäres elektromagnetisches Feld im Untersuchungsbereich. Über das zeitliche (Abkling-)Verhalten dieses Sekundärfeldes lässt sich auf Unterschiede in den Leitfähigkeiten im Untersuchungsbereich schließen. Nach

einer Serie von Impulsen wird in einer Ruhephase daher jeweils die zeitliche Veränderung der Amplitude des induzierten sekundären elektromagnetischen Feldes gemessen. Bei dieser Methode kann der Transmitter auch als Receiver verwendet werden. Eine luftgestützte Anwendung ist möglich.

4.2.5.3.2 Magnetotellurik

Magnetotellurische Verfahren sind passive Verfahren zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit im untersuchten Bereich und werden zum Beispiel in /VOZ 93/ oder /KEA 02/ beschrieben. Sie nutzen die natürlichen, innerhalb und außerhalb der Erde vorkommenden Magnetfelder (magnetotellurische Felder). Diese induzieren im leitfähigen Erdinneren (Erdkruste und oberer Erdmantel) Wirbelströme, die wiederum ein sekundäres elektromagnetisches Feld erzeugen. Als anregende Quellen können hierbei neben natürlichen Quellen wie den Stromsystemen der Ionosphäre und Magnetosphäre auch künstliche Quellen wie zum Beispiel Lang- und Längstwellensender (Radiomagnetotellurik) /VOZ 93/ verwendet werden. Gemessen werden magnetotellurische Felder an der Erdoberfläche mittels Induktionsspulen oder Fluxgate-Magnetometern, indem Variationen in den horizontalen Komponenten des magnetotellurischen Feldes gemessen werden. Hierdurch können Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit im zu untersuchenden Bereich festgestellt und dadurch Unterschiede in den geologischen Strukturen im Untersuchungsbereich erkannt werden. Magnetotellurische Verfahren können Erkundungstiefen vom Meter- bis Kilometerbereich, bis hin in den oberen Erdmantel, abdecken. Die Eindringtiefe ist hierbei abhängig von der Frequenz und dem elektrischen Widerstand des Substrates.

4.2.5.3.3 Kernspinresonanzspektroskopie

Mit der Kernspinresonanzspektroskopie (engl. „nuclear magnetic resonance method“, NMR), hier speziell der „near-surface nuclear magnetic resonance method“ (SNMR) werden direkt Eigenschaften der Wassermoleküle (der Kernspin der Protonen), auf atomarer Ebene bestimmt. Die NMR-Methodik wird unter anderem in /BEH 15/ ausführlich beschrieben. Das zugrundeliegende Messprinzip ist vergleichbar mit anderen elektromagnetischen Messverfahren. Eine Kabelspule an der Oberfläche dient als Transmitter und Receiver. Durch einen gepulsten Wechselstrom wird ein elektromagnetisches Feld erzeugt, das die Protonenspins aus ihrer Gleichgewichtslage gegenüber dem Erdmagnetfeld auslenkt. Nach Abschaltung des Transmitters kehren die Protonenspins in ihre Gleichgewichtslage zurück und induzieren eine Spannung, die über den Receiver gemessen

wird. Das gemessene Signal steht im Verhältnis zum Gesamtwassergehalt und zur Porengröße im untersuchten Bereich. Unterschiedliche Erkundungstiefen werden über die Variation der Stromstärke erreicht. Die maximale Eindringtiefe ist abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des untersuchten Bereiches und der Stärke des eingesetzten Impulses und liegt typischerweise im Bereich der ersten 100 m unterhalb der Geländeoberkante.

4.2.5.3.4 Bodenradar

Bodenradar (auch Georadar, engl. „ground penetrating radar“, GPR) ist eine geophysikalische Erkundungsmethode, bei der mit hochfrequenten elektromagnetischen Wellen Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit und den dielektrischen Eigenschaften (relative Permittivität) durch Reflexion des Radarimpulses festgestellt werden können. Durch die Bestimmung von Reflexionseigenschaften im untersuchten Bereich ist die Methodik ähnlich der Reflexionsseismik (siehe Kapitel 4.2.1.3.1). In der Luft breiten sich Radar-Wellen mit einer Geschwindigkeit nahe der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit aus. In Materie werden Radar-Wellen abgebremst. Geschwindigkeitsbestimmend ist hier die dielektrische Leitfähigkeit. Die dielektrische Konstante von Wasser liegt bei ca. 80, trockenes Substrat hat eine dielektrische Konstante von ca. 4 bis 8; demzufolge sind wasserhaltige geologische Körper ein stärkerer Reflektor als gering wasserhaltige. Die Eindringtiefe der Radar-Impulse liegt im Bereich von 20 m, bei idealen Bedingungen (geringe elektrische Leitfähigkeit) auch höher. Die Signalverarbeitungsmethoden sind ähnlich der Reflexionsseismik (siehe Kapitel 4.2.1.3.1).

4.2.5.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Elektromagnetische Methoden werden international seit langem standardmäßig bei der geologischen Erkundung, insbesondere im wirtschaftlichen Bereich (Prospektion), aber auch im wissenschaftlichen Bereich eingesetzt. Um aussagekräftige Auswertungen der gewonnenen Daten durchzuführen sind in der Regel computergestützte Verfahren notwendig, bei denen geeignete, jedoch komplexe Auswertalgorithmen verwendet werden. Bei der Interpretation der erhaltenen Daten wird auf Modellvorstellungen der elektromagnetischen Reaktion bekannter geologischer Einheiten und Strukturen zurückgegriffen. Geologische und geophysikalische Fachkompetenz und Erfahrung in der Interpretation entsprechender Daten sind daher ebenso notwendig, wie die Verknüpfung mit anderen geophysikalischen und geologischen Erkundungsmethoden.

Die Reichweite beziehungsweise Eindringtiefe bei induzierten Feldern ist begrenzt durch den Frequenzbereich, der mit der gewählten Messmethodik erzeugt werden kann. Werden künstlich erzeugte Felder verwendet, so ist die Eindringtiefe beschränkt auf ca. 500 m bei bodengestützten Untersuchungen und ca. 50 m bei luftgestützten /KEA 02/. Bei Bodenradar beträgt die Eindringtiefe ca. 20 m. Bei Verwendung der Transienten-elektromagnetik (TDEM, TEM) können jedoch auch bis zu 1000 m Tiefe Eindringtiefe erreicht werden /SCH 11/, bei der Magnetotellurik sogar noch größere Tiefen. Oberflächliche Schichten mit hoher Leitfähigkeit (wasserhaltige Tone, graphithaltige Lithologie) können jedoch tiefer liegende Leiter maskieren. Ebenso können Bereiche mit hoher Leitfähigkeit, wie wasser- oder fluidgesättigte Körper oder Scherzonen, die Messwerte beeinflussen /KEA 02/.

Eigenschaften wie Erkundungstiefe, Auflösungsvermögen und Empfindlichkeit sind abhängig von den Leitfähigkeitsverhältnissen im Untergrund und Parametern der Sende- und Empfängerkomponenten, wie zum Beispiel der Anordnung der Sende- und Empfangsspulen /KNÖ 05/. Weitere Störquellen, die zu Beeinträchtigungen der Messungen führen können, sind – ähnlich wie bei der Geomagnetik – zum Beispiel Hochspannungsleitungen, Wasser-, Strom-, Telefonleitungen, Metallschienen, Fahrzeuge und andere metallische Komponenten im Untersuchungsgebiet sowie Sendeeinrichtungen (Sender, Mobilfunk, Radar, etc.) /KNÖ 05/.

Bei Verwendung natürlicher elektromagnetischer Felder (Magnetotellurik) kann die Reichweite der Methode bis mehrere Kilometer Tiefe /KEA 02/ betragen.

4.2.5.5 Aufwand

Elektromagnetische Untersuchungen des Untergrundes können sowohl bodengestützt als auch luftgestützt durchgeführt werden. Für bodengestützte elektromagnetische Aufnahmen müssen gegebenenfalls Genehmigungen von Grundstückseigentümern eingeholt werden. Der Aufwand an technischen Ressourcen ist überschaubar, allerdings nicht unerheblich. Bodengestützte elektromagnetische Messungen werden in der Regel von mehreren Personen durchgeführt. Die Messkonfiguration besteht zum Teil aus tragbaren Komponenten, teilweise werden auch Fahrzeuge oder eine Kombination von stationären und mobilen Gerätschaften eingesetzt. Entsprechende Messausrüstung ist im Fachhandel erhältlich.

Für die luftgestützte Elektromagnetik (AeroEM) müssen Hubschrauber oder Flugzeuge mit den entsprechenden Messinstrumenten ausgestattet werden. Hierbei müssen für die

Befliegungen entsprechende Genehmigungen eingeholt werden. Zur Auswertung der Daten braucht es entsprechende Fachkenntnisse und spezialisierte Software.

4.2.5.6 Kombinationsmöglichkeiten

Elektromagnetische Erkundungsmethoden werden oft mit Methoden der Radiometrie, Magnetik, Elektrik, Fernerkundung und geologischer Kartierung kombiniert, wobei magnetische und elektrische geophysikalische Verfahren ähnliche Parameter liefern. Radiometrische Methoden, insbesondere hier Gammaspektrometrie, werden oft bei einer luftgestützten Erkundung kombiniert. Durch die Verknüpfung mit Bohrlochmessungen, insbesondere mit elektromagnetischen Verfahren im Bohrloch, können 3D-Darstellungen erzeugt werden und Dateninterpretationen verifiziert werden.

4.2.5.7 Alternative Methoden

Erkenntnisse, die mittels elektromagnetischer Verfahren ermittelt wurden, können oft auch durch seismische (siehe Kapitel 4.2.1) oder auch durch die in Kapitel 4.2.5.6 genannten Methoden erlangt werden.

4.2.5.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Für die Elektromagnetik ist umfassende weiterführende Literatur vorhanden, die Methode wurde auch bereits international für Endlagerprojekte angewendet. Ein Überblick ist in Tab. 4.7 dargestellt.

Technische Weiterentwicklungen betreffen insbesondere die Transmitter- und Empfängersysteme (zum Beispiel Sendeleistung, Abmessungen, Gewicht, etc.) sowie die Sensorsysteme und Auswertemethoden, insbesondere Datenverarbeitung und -auswertung. Einen Überblick über den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik gibt zum Beispiel /DUN 17/.

Tab. 4.7 Weiterführende Informationen zur Elektromagnetik

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • An Introduction into Applied and Environmental Geophysics /REY 11/ • Geophysik /KNÖ 05/ • An Introduction to geophysical exploration /KEA 02/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Fachinformationssystem Geophysik /LEI 18/ • Grundlagen der Geophysik /DAH 15/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Journal of Applied Geophysics (ISSN: 0143-1161 bzw. 1366-5901), TandF Verlag • Geophysics (ISSN: 0016-8033), Society of Exploration Geophysicists • Geophysical Journal International (ISSN: 0956-540X), Oxford University Press • Exploration Geophysics (ISSN: 0812-3985), CSIRO Publishing • International Journal of Remote Sensing (ISSN: 0143-1161 bzw. 1366-5901), TandF Verlag
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • Das geologische Endlagersystem: Gebirgsverhalten und Erkundungsmethoden /BRA 08a/
Internationale (inklusive geplante) Anwendung der Elektromagnetik im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Schweden: /SKB 00/ • Finnland: /ELO 98/, /RAS 06/ • Schweden: /SKB 00/ • Großbritannien: /NDA 11/, /NDA 16/

4.2.6 Radiometrie

4.2.6.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Radiometrie	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none">• Integrale Strahlungsmessung• Spektrale Strahlungsmessung (α-, β-, γ-Spektrometrie)• ^{222}Rn Emanation
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Geologie, Lithologie und Störungen
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none">• Oberflächennahe Geologie
Aufwand	<ul style="list-style-type: none">• Geringer technischer und personeller Aufwand bei bodengestützter Radiometrie• Im Vergleich zu Bodenmessungen etwas höherer technischer und personeller Aufwand bei luftgestützter Radiometrie und bodengestützten Radon-Emanationsmessungen
Kombination mit anderen Verfahren	<ul style="list-style-type: none">• Notwendig• Magnetische/elektromagnetische Verfahren, geochemisch/radiochemische Verfahren, geologische Kartierung, Fernerkundung
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Flächenhafte Informationen über die natürliche Radioaktivität von Gesteinen und Böden sind nicht durch andere Verfahren zu erhalten
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Keine tiefenabhängige Bestimmung der Geologie möglich• Bestimmung in der Regel nur von anstehenden geologischen Einheiten oder Körpern möglich

4.2.6.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Radiometrische Methoden in der geophysikalischen Erkundung nutzen die unterschiedlich starke natürliche Radioaktivität von Gesteinen und Böden. Nahezu alle Gesteine und Böden enthalten natürliche Radioisotope in unterschiedlichen Gehalten. Basierend auf diesem Prinzip können anhand der Konzentration radioaktiver Elemente in den Gesteinen und Böden eines untersuchten Gebietes Aussagen über geologische Gegebenheiten in einem Untersuchungsgebiet getroffen werden. Radiometrische Methoden werden zum Beispiel in der Prospektion von Uranerz-Lagerstätten, in der Erdölprospektion aber auch in der Bestimmung von Gesteinsgrenzen und tektonischen Störungen eingesetzt (zum Beispiel /FAß 00/). Den größten Anteil der in Gesteinen und Böden vorkommenden natürlichen Radioaktivität liefern die Zerfallsreihen von Uran (^{238}U), Thorium (^{232}Th) sowie das radioaktive Isotop ^{40}K . Die Mutter- und Tochternuklide dieser Zerfallsreihen sind

Bestandteil zahlreicher gesteinsbildender Minerale und kommen demnach in unterschiedlichen Konzentrationen je nach Gesteinsart vor. Insbesondere kristalline Gesteine (zum Beispiel Granite, Pegmatite und Gneise) beinhalten aufgrund ihrer Genese höhere Anteile Uran- und Thorium-haltiger Minerale. Gemessen wird die Energie der emittierten α -, β -, oder γ -Strahlung, anhand derer die Radionuklide identifiziert werden können.

4.2.6.3 Technische Ausführung

Als Messtechnik kommen im Wesentlichen integrale oder spektrale Strahlungsmessungen zum Einsatz. Das zugrundeliegende Messprinzip integraler Messmethoden ist, dass in einem Detektor die einfallende Zerfallsenergie aus α -, β -, oder γ -Zerfall in Impulse umgewandelt wird. Die Impulsanzahl ist hierbei proportional der Zerfallsenergie. Integrale Strahlungsmessungen geben Informationen über die gemessene Gesamtenergie und lassen somit qualitative Aussagen über die untersuchte Geologie zu.

Bei der spektralen Strahlungsmessung werden die charakteristischen Energiespektren der Zerfallsenergien über geeignete Detektoren (meist Szintillationszähler oder Halbleiterdetektoren) gemessen und in Strom- beziehungsweise Spannungsimpulse übersetzt. Die Impulshöhen können dann dem für die jeweiligen Radionuklide spezifischen Energiebereich zugeordnet werden, womit quantitative Aussagen über den Radionuklidgehalt getroffen werden können.

Zu den integralen Methoden zählen unter anderem Geiger-Müller Zähler, zu den spektralen Methoden Szintillationszähler und γ -Spektrometer. Integrale Messtechniken wie Geiger-Müller Zähler sind durch ihr auf dem β -Zerfall basierendem Messprinzip weitgehend auf bodengestützte Erkundungen (ground-surveys) beschränkt, während szintillations- und spektrometrische Verfahren auch luftgestützt (Flugzeug, Hubschrauber) verwendet werden können /KEA 02/.

Radon-Emanation wird mit Szintillationsmessverfahren nachgewiesen indem der α -Zerfall von ^{222}Rn nach ^{218}Po in einer Bodenluftprobe bestimmt wird /MIK 02/.

4.2.6.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Radiometrische Methoden in der geologischen Erkundung eignen sich im Wesentlichen zur geologischen Kartierung. Über die Bestimmung der Radioisotope von Kalium, Uran und Thorium, die in so gut wie allen Gesteinstypen vorkommen, können unterschiedliche

Gesteinstypen voneinander unterschieden werden. β - und γ -spektrometrische Verfahren detektieren in der Anwendung in der Regel die β - oder γ -Signatur der oberen Bodenschichten (bis ca. 1 m). Aufgrund der geringen Reichweite von β -Strahlen können β -spektrometrische Verfahren nur bodengestützt durchgeführt werden, während γ -spektrometrische Verfahren aufgrund der höheren Reichweite der γ -Strahlung auch per Flugzeug oder Hubschrauber durchgeführt werden können, um größere Areale, insbesondere mit kristalliner Geologie, zu erkunden. Da Spektrometer γ -Strahlung durch bis zu 1 m mächtige Bodenschichten detektieren können, ist die radiometrische Bestimmung des Untergrundes beschränkt auf direkt anstehendes Gestein. Dies kann auch durch mächtigere Bodenschichten überdeckt sein, sofern es sich hierbei um das Verwitterungsprodukt des anstehenden Gesteinskörpers handelt, welches aus den gleichen Ausgangsmineralen besteht. Das bedeutet allerdings, dass tief liegende Gesteinskörper, die durch geologische Einheiten mit geringeren Gehalten an Radioisotopen oder auch mit deutlich abweichenden Gehalten überlagert werden, durch die beschriebenen radiometrischen Methoden nicht identifiziert werden können. Nicht alle geologischen Einheiten unterscheiden sich eindeutig in ihrer radiometrischen Signatur, so dass in der Regel ergänzende Mess- und Untersuchungsverfahren verwendet werden.

^{222}Rn , welches mittels Radon-Emanationsmessung über α -Zerfall von ^{222}Rn nach ^{218}Po gemessen wird, kann sich als einziges gasförmiges und nahezu inertes Element (Edelgas) der ^{238}U -Zerfallsreihe durch Migration (Advektion und Diffusion) von seinem Entstehungsort in Gesteinen und Böden entfernen und sich in der Bodenluft ansammeln. Solche Ansammlungen (Radon-Anomalien) können zum Beispiel über tektonischen Störungen entstehen. Verwerfungen, Zerrüttungszonen, Spalten und Klüfte bilden Zonen erhöhter Wegsamkeiten im geologischen Untergrund, in denen Radon zur Oberfläche migrieren oder passiv mit anderen Trägermedien wie Bodengasen, Fluiden oder zirkulierenden Grundwässern (CO_2 , CH_4 , H_2O) gerichtet transportiert werden kann /AMM 89/, /KEM 93/. Da über Störungen Radon auch über weitere Strecken transportiert werden kann, können hiermit auch tiefer liegende Radon-Quellen (zum Beispiel Erzkörper oder Lagerstätten) detektiert werden.

Bei den zur oberflächlichen Erkundung des Untergrundes anwendbaren Methoden der Radiometrie handelt es sich um zerstörungsfreie Methoden, die auf den Untergrund keinerlei Auswirkungen haben. Einzig bei der spektralen Radon-Emanationsmethode sind Sondierungen im oberen Bodenbereich (1 bis 2 m) notwendig. Informationen über die natürliche Radioaktivität von Gesteinen und Böden sind nicht durch andere Verfahren zu erhalten.

4.2.6.5 Aufwand

In Deutschland führt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) seit 2007 das Projekt D-AERO (Deutschlandweite Aerogeophysik-Befliegung zur Kartierung des nahen Untergrundes und seiner Oberfläche) durch /BGR 18a/. Hierbei werden mittels Helikopterbefliegung neben elektromagnetischen und magnetischen auch radiometrische Verfahren (γ -Spektrometrie) eingesetzt. Derzeit befindet sich das Projekt in der Auswertephase. Die bestehenden Datensätze, die sich auch bereits in einem Fachinformationssystem befinden (FIS-Geophysik LIAG /LEI 18/) sollen hierbei verfügbar gemacht werden.

Für die luftgestützte Radiometrie müssen Hubschrauber oder Flugzeuge mit den entsprechenden Messinstrumenten ausgestattet werden. Für Befliegungen müssen entsprechende Genehmigungen eingeholt werden. Für die Auswertung der Daten braucht es entsprechende Fachkenntnisse. Aerogamma-Messungen werden, neben der BGR, auch von spezialisierten Ingenieurbüros angeboten.

Für bodengestützte radiometrische Aufnahmen müssen gegebenenfalls Genehmigungen von Grundstückseigentümern eingeholt werden. Der Aufwand an technischen Ressourcen (gegenüber beispielsweise luftgestützten Messungen) ist eher gering. Entsprechende Mesgeräte sind im Fachhandel erhältlich und können von einer Person per Hand getragen werden.

Der Aufwand für Radon-Emanationsmessungen ist im Vergleich zu den vorgenannten bodengestützten Methoden etwas höher. Neben dem Setzen von 1 m bis 2 m tiefen Sondierungsbohrungen können die zu untersuchenden Proben erst nach ca. 3 Stunden Wartezeit, in der sich das radioaktive Gleichgewicht zwischen Radon und seinen Folgeprodukten eingestellt hat, gemessen werden.

4.2.6.6 Kombinationsmöglichkeiten der Radiometrie mit anderen Methoden

Radiometrische Methoden in der geophysikalischen Erkundung werden oft zusammen mit magnetischen und elektromagnetischen Methoden verwendet /KEA 02/ um eine größere Bandbreite an Informationen zu erhalten. Zur Interpretation der Daten ist es meist notwendig auch geochemische oder radiochemische Verfahren einzusetzen, um beispielsweise anhand von Gesteins- oder Bodenproben den Radionuklidgehalt zu bestimmen. Hiermit kann für das Untersuchungsgebiet die spezifische Radionuklidsignatur unterschiedlicher Gesteine oder Böden bestimmt werden.

4.2.6.7 Alternative Methoden

Prinzipiell lassen sich die Erkenntnisse aus der Radiometrie auch mit anderen Methoden ermitteln. Aussagen über Vorkommen, Ausdehnung und Lage geologischer Körper liefern auch andere, oberflächennah einsetzbare Methoden wie Magnetik, Elektromagnetik, Gravimetrie, Seismik sowie geologische Kartierungen oder Methoden der Fernerkundung. Aussagen über die Radionuklidsignatur der untersuchten geologischen Einheiten oder geologischen Körper lassen sich jedoch nur durch radiometrische Methoden erlangen.

4.2.6.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Für die Radiometrie als geophysikalische Erkundungsmethode ist umfassende weiterführende Literatur vorhanden (siehe Tab. 4.8).

Während luftgestützte Gamma-Spektrometrie bereits seit mehreren Dekaden Stand der Technik ist, sind, wie bei der Fernerkundung (siehe Kapitel 4.1.2.8), neuere Entwicklungen insbesondere im Bereich des Einsatzes von Drohnen (engl. „unmanned aerial systems“, UAS) und in der Weiterentwicklung der Detektoren und Auswertetechniken zu finden. Eine Zusammenstellung aktueller und neuer Entwicklungen hierzu gibt /CON 16/.

Tab. 4.8 Weiterführende Informationen zur Radiometrie

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Radiation detection and measurement /KNO 10/ • Guidelines for radio-elemental mapping using gamma-ray spectrometry /IAEA 03/ • An introduction into Geophysical Exploration /KEA 02/ • Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry /GUN 97/ • Umweltradioaktivität /SIE 96/ • A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys /GRA 95/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • TELLUS Project /DFE 18/, /APP 08/ • D-AERO Projekt /BGR 18a/ • Die Radonkarte Deutschlands /BGR 18b/ • Geoportal des BfS /BfS 18/

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Journal of Applied Geophysics (ISSN: 0143-1161 bzw. 1366-5901), TandF Verlag • Journal of Environmental Radioactivity (ISSN: 0265-931X), Elsevier Verlag • Exploration Geophysics (ISSN: 0812-3985), CSIRO Publishing • International Journal of Remote Sensing (ISSN: 0143-1161 bzw. 1366-5901), TandF Verlag
Behörden bzw. Informationssysteme	<ul style="list-style-type: none"> • IAEA • Fachinformationssystem Geophysik /LEI 18/
Internationale (inklusive geplante) Anwendung der Radiometrie im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Finnland: /ANT 99/, /RAS 06/ • Schweden: /SKB 00/ • Schweiz: /AMM 89/ • UK: /NDA 11/, /NDA 16/

5 Punktuell

Im Gegensatz zu den flächenhaften Untersuchungsmethoden beinhalten punktuelle Untersuchungsmethoden das Eindringen von Messwerkzeugen in den Untergrund. Dies wird in der Regel durch Bohrungen oder Sondierungen erreicht, die durch den Gewinn von Gesteinsmaterial und dessen erste geologische Charakterisierung am Bohrort selbst eine Messmethode darstellen. Des Weiteren kann das entstandene Bohrloch genutzt werden, um weitere Messungen im Bohrloch mittels Sonden oder anderen Messgeräten durchzuführen.

Es existieren zahlreiche Methoden Bohrungen in den Untergrund abzuteufen, um geologische Information zu gewinnen. Welche Art von Methode dabei genutzt wird, hängt im Wesentlichen von der Teufe ab, die mit der Bohrung erzielt werden soll. An dieser Stelle wird nur auf einige grundlegende Aspekte eingegangen. Tiefgehende Information zu Bohrverfahren sind unter anderem in /AUS 96/ zu finden. Im weiteren Verlauf der Erläuterungen werden auch die englischsprachigen Fachbegriffe erwähnt, denn diese sind oftmals auch in Deutschland in Gebrauch.

Es gibt keine klare Abgrenzung zwischen „oberflächennahen“ Sondierungen und „tiefen“ Bohrungen, dennoch erscheint es zweckmäßig diese beiden Rubriken im Weiteren zu nutzen. Letztlich ist ein wesentlicher Unterschied der Aufwand, der betrieben werden muss, um Informationen aus dem Untergrund zu gewinnen.

Die unter dieser Kategorie beschriebenen Untersuchungen können einen potenziellen Endlagerstandort oder seine nähere Umgebung negativ beeinflussen: Eine Bohrung beeinflusst die Unverritztheit des Gebirges in der näheren Umgebung (dm bis m) des Bohrlochs. Je nach Art und Zweck der Bohrung lassen sich die Bohrlöcher nach Abschluss der Arbeiten in unterschiedlichen Qualitätsstufen verfüllen und rückbauen.

5.1 Bohrungsaufschluss

5.1.1 Sondierungen

5.1.1.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Sondierungen	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none">• Rammkernsondierung: Feldgeologische Kernanalyse (beispielsweise Lithologie, Haptik, Farbgebung, Geruchsanalyse), Probenahme vor Ort, Fotodokumentation• Drucksondierung: Feldgeophysikalische Analyse (beispielsweise Spitzendruck, Mantelreibung, Porenwasserdruck, Temperatur), Probenahme vor Ort
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Lithologischer Überblick• Schichtlagerung, Lagerungsdichte• Bindigkeit des Bodens• Bodenmechanische Angaben
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none">• Vor allem für den Lockergesteinsbereich und die Verwitterungsrinde des geologischen Untergrunds bezieht
Aufwand	<ul style="list-style-type: none">• Sehr kostengünstiges, technisch einfaches und wenig personalintensives Bohrverfahren
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Geologische Kartierung• Flachbereichs-/Mikroseismik• Laboranalytik (bspw. Scherversuche, Altersbestimmung, Schadstoffbelastung)• Gegebenenfalls Bohrlochmessung• Eine Kombination zwischen geophysikalischen und lithologischen Erkenntnissen steht in Abhängigkeit zur gewünschten Aussageanforderung
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Vibrocore-Gerät (zumeist bis zu 6 m Teufe)• Rammkernbohrung, gegebenenfalls Schneckenbohrung• Aufschluss, Schurf• Untersuchungsschacht / -stollen
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Aussagekraft steht in Abhängigkeit zur Bindigkeit des Bodens• Gesteinsfestigkeit• Gegebenenfalls gestörte Probengewinnung

5.1.1.2 Gemessene Parameter und zu erwartender Erkenntnisgewinn

Informationen, die die ersten wenigen Meter (oder Zehnermeter) unterhalb der Tagesoberfläche betreffen, werden oft im Rahmen von Baugrund- oder Altlastenuntersuchungen benötigt. Dafür werden einfache Verfahren genutzt wie sie in im Folgenden beschrieben werden.

Eine zuverlässige und wirtschaftliche Methode zur geowissenschaftlichen Erkundung des oberflächennahen Untergrunds stellen im Lockergesteinsbereich beziehungsweise in der Verwitterungszone die geotechnischen Sondierungen dar. Sie liefern grundlegende Erkenntnisse über die geologischen Verhältnisse und sedimentmechanische Eigenschaften. Sondierungen zählen zu den Bohrverfahren, die besonders im Bereich der Baugeologie und des Bauingenieurwesens Anwendung finden. Sie liefern geospezifische Erkenntnisse im Skalenbereich von einem Meter bis mehrere Zehner-Meter unterhalb der Geländeoberkante (GOK). Die Beschreibung des Anstehenden erfolgt an Bohrkernen beziehungsweise an Boden- und Gesteinsproben, die nach DIN-Norm (siehe unten) eine Klassifizierung von Boden und Fels ermöglicht.

Geotechnische Sondierungen dienen der Verdichtung des existierenden geologischen Aufschlussnetzes und können zudem unter anderem zu Bodenluft- und Grundwassermessungen genutzt werden. Obgleich Sondierungen lediglich punktuelle Informationen über die Beschaffenheit des Untergrunds liefern, repräsentieren diese kostengünstigen Bohrverfahren eine beständig verwendete Methode zur Probengewinnung. Sie liefern bei geringem maschinellen Aufwand Erkenntnisse über die Schichtenfolge des Untergrunds, seine Kornzusammensetzung und Bindigkeit sowie grundlegende Informationen zur geochemischen, geophysikalischen und hydrogeologischen Beschaffenheit.

5.1.1.3 Technische Ausführung

Die Bohrkernanalytik und die repräsentative Entnahme von Boden- und Gesteinsproben sind ein wichtiger Bestandteil geowissenschaftlicher Untersuchungen. Ihr zugrunde liegen DIN-Normen, die eine qualitätssichernde, korrekte Probenansprache regeln. Folgend werden die bedeutendsten genannt:

- DIN EN ISO 22475-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung -Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen, Teil 1, Technische Grundlagen der Ausführung (ISO 22475-1: 2006) /DIN 07/.

- DIN EN ISO 14688-1:2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung /DIN 18/.
- DIN EN ISO 14689:2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels (ISO 14689:2017) /DIN 16a/.

Sondierungen lassen sich in zwei unterschiedliche Anwendungen unterteilen: (i) Rammkern- und (ii) Drucksondierung. Die Auswahl des Sondierungsverfahrens und seine technische Umsetzung richtet sich nach den Verhältnissen vor Ort (Oberflächenbeschaffenheit/Untergrundsituation) sowie nach vorgegebener Aufgabenstellung, Aufschlusstiefe und Art der Beprobung.

5.1.1.3.1 Rammkernsondierungen

Rammkernsondierungen zählen zu den Kleinbohrungen und werden in der Regel mit einem Durchmesser von 36, 50, 80 bis zu 100 mm durchgeführt. Die Bohrkampagnen können mit Raupensondierfahrzeugen gefahren werden, die sowohl als Ramme als auch als Zieheinheit fungieren. Zumeist kommen jedoch zerlegbare Einheiten zum Einsatz, bestehend aus einem Abbruchhammer (Ramme), dem Schlagkopf (Übertragung Schlagenergie auf Sonde) und der Sonde, die das durchteufte Material aufnimmt, sowie dem Ziehgerät (manuell/hydraulisch) und dem Ziehgestänge. Die Sonden werden üblicherweise in ein und zwei Meter Länge geliefert, so dass der Bohrkern in der Regel einen oder maximal zwei Meter lang ist. Für Teufen größer als ein beziehungsweise zwei Meter dient das Ziehgestänge als Verlängerung des Bohrstrangs. Das Gestänge ist jeweils einen Meter lang und wird mithilfe von Gewindebolzen zwischen Schlagkopf und Sonde geschraubt. Da es von kleinerem Durchmesser als die Sonde ist, übt es keinen zusätzlichen Reibungswiderstand aus.

Am gewählten Bohransatzpunkt wird die Sonde aufgrund der Schlag- und Vibrationswirkung der Ramme bis zum unteren Ende des Schlagkopfes in den Untergrund gerammt. Die Sonde selbst ist hohl, zumeist an einer Seite geschlitzt und weist am unteren Ende eine ringförmige Schneide auf, die das Untergrundmaterial aussticht und den Hohlraum der Sonde füllt. Sogenannte Kernfänger, die am Übergang von Sonde zu Schneide sitzen, reduzieren möglichen Kernverlust während des Ziehvorgangs. Nachdem der Bohrstrang gezogen wurde, dient der Schlitz der Sonde der fachgerechten Ansprache des erbohrten Untergrunds sowie der Probenahme. Je nach Anforderungen können vor dem Bohrvorgang in die Sonde auch sogenannte „Liner“ (engl. für Mantelrohr; zumeist PVC-Rohre) eingeführt werden, die den Bohrkern aufnehmen und konservieren und die

zudem eine umfangreichere Untersuchung des Kerns im Labor ermöglichen (beispielsweise OSL-Datierung, Kapitel 6.1.3.3.1, mittels blickdichter Liner); in diesem Fall werden Sonden ohne Schlitz bevorzugt.

5.1.1.3.2 Drucksondierungen

Drucksondierungen sind geophysikalische Sondierungen, die eine Messspitze am unteren Ende eines verlängerbaren Gestänges mit konstanter Geschwindigkeit in den Boden drücken. Gemessen werden während des Sondierungsvorgangs der Spitzendruck und die Mantelreibung. Aus beiden Parametern lassen sich Rückschlüsse über Sedimentbeziehungsweise Bodenart und ihrer Lagerungsdichte ziehen. Weitere Spezialsondierespitzen liefern Daten zu Porenwasserdruck beziehungsweise zu Temperatur. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern die Datengrundlage zur Berechnung bodenphysikalischer Parameter wie beispielsweise Reibungswinkel und Scherfestigkeit.

Auch beim Abteufen von Drucksonden können im Vortrieb Proben im Innern der Sonde gefangen und somit später ausgewertet werden.

5.1.1.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Obwohl die Auswertung einer Sondierung sich lediglich auf die Verwitterungsrinde bzw. den Lockergesteinsbereich des geologischen Untergrunds bezieht, lassen sich Rückschlüsse auf den Festgesteinsbereich ziehen. Somit kann die Aussagekraft von Sondierungen durchaus repräsentativ für den nicht durchteuften Bereich des geologischen Untergrunds sein. Zudem zeichnet sich diese Methode durch ihren deutlich mobilen Einsatzcharakter aus. Als einschränkende Randbedingungen sind eindeutig zu benennen (i) die Bindigkeit des Untergrundmaterials sowie (ii) die begrenzte Einsatztiefe der Sondierung aufgrund der Reibungsverluste mit zunehmender Tiefe. Die Qualität der Probenerkenntnisse steht in Zusammenhang mit den ortsspezifischen geologischen und hydrogeologischen Untergrundverhältnissen. Der fachgerechte Umgang mit der Probe sowie das eingesetzte Entnahmegesetz beeinflussen darüber hinaus das Ergebnis.

5.1.1.5 Aufwand

Sondierungen zählen zu den Trockenbohrverfahren, die unverrohrt – das heißt ohne die Verwendung eines Schutzrohres – abgeteuft werden. Die Bohrsonde selbst steht somit in direktem Kontakt zum Anstehenden im Untergrund. Als entsprechend gering ist der Aufwand zu bezeichnen, den dieses Verfahren für die arbeitstechnische Umsetzung,

den Erkenntnisgewinn vor Ort sowie für die Probenentnahme und -auswertung darstellt. Ein deutlicher Vorteil der Sondierungsverfahren ist das gute Kosten-Nutzen-Verhältnis gemessen am geringen technischen Aufwand. Welche technischen Ressourcen Einsatz finden, welches Personal benötigt wird und wie hoch die Kostenkalkulation anzusetzen ist, hängt von der Aufgabenstellung ab.

5.1.1.6 Kombinationsmöglichkeiten von Sondierungen mit anderen Methoden

Auch im oberflächennahen Untersuchungsumfeld werden Bohrungen und Sondierungen genutzt, um in seismische Profile (Flachbereichsseismik, Mikroseismik) eingehängt zu werden und entsprechend geophysikalische Informationen mit geologischen Primärdaten zu kombinieren.

Dort, wo es die Untergrundverhältnisse zulassen, können die Bohrlöcher der abgeteufelten Sondierungen für Bodenluftmessungen genutzt werden (beispielsweise Radongehalt, Permeabilitätsmessung).

Auch werden kleinere Grundwassermessstellen oder Brunnen mithilfe von geotechnischen Sondierungen eingerichtet.

5.1.1.7 Alternative Methoden

Besonders in Untergrundgebieten mit geringer Kohäsion, mit erhöhtem Kiesanteil oder hohem Gesteinsaufkommen eignen sich Schürfe und Gräben für einen grundlegenden Erkenntnisgewinn. Oberflächennahen Probenanforderungen von geringer Mächtigkeit (wenige Zentimeter bis Dezimeterbereich) können mit Ausstechzylindern begegnet werden. Bei schlechter Bindigkeit des Untergrundmaterials stellen verrohrte Kleinbohrungen eine Alternative dar. In wenig verfestigten, holozänen Küstensedimenten findet stellenweise bis zu einer Teufe von maximal 6 m das Vibrocore-Bohrverfahren Anwendung.

5.1.1.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen von Sondierungen

Weiterentwicklungen in Bezug auf Rammkernsondierungen zielen insbesondere auf einen besseren Kerngewinn ab und betreffen vor allem den Einsatz der Kernfänger am unteren Ende der Sonde, beziehungsweise im Bereich der Spitze. Das Design dieses Kernfängers soll zum einen das Kernmaterial ungestört passieren lassen, zum anderen

einem potenziellen Kernverlust beim Ziehvorgang vermeiden. Weiterführende Informationen sind in Tab. 5.1 dargestellt.

Tab. 5.1 Weiterführende Informationen zu Sondierungen

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Coring Methods and Systems /ASH 18/ • Symbolschlüssel Geologie /LBEG 17/ • Drilling /AUS 96/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Recommended Practices for Core Analysis (1998) /API 98/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen)	<ul style="list-style-type: none"> • BDG (Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler) • DGGV (Deutsche Geologische Gesellschaft – Geologische Vereinigung) • DGGT (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik)
Wesentliche Normen	<ul style="list-style-type: none"> • DIN EN ISO 14688-1 /DIN 18/ • DIN EN ISO 14689 /DIN 16a/ • DIN EN ISO 22475-1 /DIN 07/
Zuständige Behörden	<ul style="list-style-type: none"> • Geologische Landesämter • Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Internationale (inklusive geplante) Anwendung von Sondierungen im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Finnland: /POS 12/ • Schweden /WER 06/ • Schweiz /NAG 14/ • USA /ANG 94/

5.1.2 Tiefbohrungen

5.1.2.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Tiefbohrungen	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none"> • Feldaufnahme und feldgeologische Analytik der Kerne • Feldaufnahme und feldgeologische Analytik des Bohrkleins (Cuttings) • Chemische Analytik der Spülflüssigkeit • Fotografische Dokumentation

Kurzcharakterisierung Tiefbohrungen	
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Petrografie/Lithologie, Stratigrafie • Gefüge, Gefügestand (zum Beispiel Klüfte, Störungen, Wegsamkeiten, offen, verheilt, etc.) • Schichtenverzeichnisse • Bohrparameter • Chemische Zusammensetzung der Formationswässer, Gasgehalt
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none"> • sehr hoch: Identifikation von Lithologie, Struktur und Gefüge
Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • sehr hoch: sowohl personal-, zeit-, und kostenintensiv
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht erforderlich, wird in der Regel zur Kalibrierung/Verifikation anderer Methoden genutzt. • Möglich mit zahlreichen anderen Methoden: Flächenhaft, Bohrlochmessungen, Labormethoden
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht vorhanden
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Das Gestein wird perforiert • Aussagekraft abhängig vom Kerngewinn

5.1.2.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Für Tiefbohrungen wird je nach Anforderung und gewünschter Teufe das Schlagbohrverfahren (engl. „percussion drilling“) oder das sogenannte „Rotary“-Bohren (Rotationsbohrverfahren) genutzt. Beide Verfahren können auch in Kombination miteinander verwendet werden. Beim Schlagbohrverfahren wird der Meißel hydraulisch oder pneumatisch mit einem Hammer vorangetrieben. Bei dem Rotationsbohrverfahren wird der Meißel, der sich am Ende des Bohrgestänges befindet, durch das Bohrgestänge in Drehung versetzt und zerkleinert das Gestein. Im Rahmen der Erkundung sind bei Tiefbohrungen folgende zwei Aspekte relevant:

- Eine Flüssigkeit (die Spülflüssigkeit) bringt das zerkleinerte Gestein (das Bohrklein, engl. „cuttings“) wieder an die Tagesoberfläche. Spülflüssigkeit und Bohrklein werden analysiert.
- Beim Bohren können sogenannte Bohrkerne (engl. „cores“) gewonnen werden. Diese Bohrkerne sind Gesteinsproben die überragend weiter untersucht werden.

Das durch die Spülflüssigkeit (engl. „mud“) zu Tage geförderte Bohrklein (Bruchstücke des erbohrten Gesteins, engl. „cuttings“) wird analysiert. Dabei wird das Bohrklein petrografisch/lithologisch charakterisiert, in der Regel auch unter Verwendung eines Mikro-

skops /SCH 16/. Durch enthaltene Fossilien ist teilweise auch eine stratigrafische Zuordnung möglich. Ebenfalls analysiert wird die wieder zu Tage geförderte Flüssigkeit („Bohrschlamm“). Dabei wird unter anderem geprüft, welche Flüssigkeiten (zum Beispiel Kohlenwasserstoffe) aus dem Gestein in der Bohrflüssigkeit vorhanden sind /AUS 96/. Eine chemische Analyse findet für die Spülflüssigkeit vorwiegend mit dem Ziel statt festzustellen, welche Gase (zum Beispiel Kohlenwasserstoffe, H₂S, etc.) vorhanden sind /AUS 96/, /SCH 16/. Außerhalb der Kohlenwasserstoffexploration werden damit in der Regel technische Ziele im Rahmen der Bohrtätigkeit verfolgt und keine geowissenschaftlichen Fragestellungen untersucht. Während der Bohrung werden zusätzlich Daten und Bohrparameter im Bohrloch erfasst (zum Beispiel Druck oder Bohrfortschritt, engl. „rate of penetration“), die vor allem bei der Teufenzuordnung eine Rolle spielen /ABL 12/.

Insgesamt hat sich für die gesamte Methode der Analyse des Bohrkerns und des Bohrschlammes der englische Begriff des „mud logging“ durchgesetzt, für den es keine direkte deutsche Entsprechung gibt.

Kernbohrungen liefern direkte Erkenntnisse über die zu erkundende geologische Einheit, da Gesteinsmaterial aus der jeweiligen Teufe an die Tagesoberfläche gefördert wird. Im Gelände muss eine Bohrkernansprache (erste optische Gesteinscharakterisierung) erfolgen, die mit technischen und administrativen Daten in einem Protokoll dokumentiert wird. Für Tiefbohrungen sind in der Regel nur technische und administrative Dokumentationen vorgeschrieben sowie die allgemeine Pflicht das Gebirge geologisch zu bestimmen und die Proben (Kerne) aufzubewahren (zum Beispiel für Niedersachsen /LAN 06/). Die korrekte Dokumentation der Bohrkernaufnahme, insbesondere bezogen auf die untersuchte Teufe, ist essenziell für die weitere Bearbeitung im Labor.

Im Prinzip ähnelt die geologische Aufnahme eines Kerns der Gesteinsansprache während einer Kartierung. Wesentlich sind:

- Petrografie/Lithologie: Klassifikation der Gesteinsart und Genese des Gesteins. Dies ergibt sich aus dem beobachtbaren Mineralbestand und/oder der Mineral- beziehungsweise Korngröße und dem Mineral- beziehungsweise Korngefüge.
- Gefüge: Das strukturgeologische Erscheinungsbild von Trennflächen und Lineamenten, wie etwa Schichtung, Schieferung, Scherflächen und Klüftung. Zur Charakterisierung von Trennflächen gehören Raumlage beziehungsweise Orientierung, Öffnungsweite, Ausfällungen beziehungsweise Füllungen dieser Trennflächen (Störungsmylonite oder hydrothermale Ausfällungen). Zum Gefüge gehört ebenfalls die beobachtbare Porenstruktur beziehungsweise Porosität.

- Stratigrafie: Einordnung in einen zeitlichen Horizont der Erdgeschichte, dazu können zum Beispiel Schichtung und Fossilgehalt etc. genutzt werden.

5.1.2.3 Technische Ausführung

Technische Prozeduren am Ort der Bohrung sind vielfältig und komplex, eine Beschreibung aller administrativen (Genehmigungen etc.) und technischen (Gerätetechnik etc.) Maßnahmen, die notwendig sind einen Bohrplatz für eine Tiefbohrung einzurichten, würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen. Hier wird sich auf die Beschreibung der technischen Details beschränkt, die zum Verständnis der Ausführung der eigentlichen Messung beziehungsweise Beobachtung notwendig sind.

Die Durchmesser einer Tiefbohrung werden üblicherweise in Zoll (engl. „inch“, 1 inch entsprechen ca. 2,54 cm) angegeben und variieren stark. Aus Gründen der Stabilität – und bei Bohrungen zur Gewinnung von Kohlenwasserstoffen auch aus anderen Gründen – werden Bohrlöcher oftmals verrohrt. Dies geschieht Schritt für Schritt während des Bohrfortschritts, was bedeutet, dass der Durchmesser der Bohrung teleskopartig mit der Teufe geringer wird. Anfangsdurchmesser können beispielsweise zwischen 12 und 30 Zoll liegen, kleine Enddurchmesser können im Bereich von 4-6 Zoll liegen.

Mittels moderner Techniken können von einem Standort mehrere Bohrungen abgeteuft werden. Dazu wird die Bohrung ab einer bestimmten Teufe in eine andere Richtung abgelenkt (Richtbohrung, engl. „directional drilling“). Eine Bohrung muss also nicht unbedingt vertikal, sondern kann in einem Winkel durchgeführt werden. Auch horizontale Bohrungen sind möglich, teilweise auch über sehr große (kilometerlange) Strecken. Um diesen Vorgang immer genauer durchführen zu können, werden moderne technische Verfahren eingesetzt und weiterentwickelt. Zum einen kann (und muss) die Position des Bohrkopfs zu jedem Zeitpunkt sehr genau bekannt sein, zum anderen müssen Techniken existieren, die es ermöglichen den Bohrkopf abzulenken, auch wenn das Bohrgestänge sich bei der Ablenkung nicht weiterdrehen kann. Dazu wurden beispielsweise sogenannte „mud motors“ entwickelt. Außerdem muss die Genauigkeit der Ablenkung möglichst hoch sein. Die Entwicklung der Technik dazu umfasste mehrere Jahrzehnte. Heute wird die Erfassung von Messdaten im Bohrloch (also zum Beispiel Position des Bohrkopfes), die zum genauen Abteufen der gerichteten Bohrung erforderlichen sind, unter dem Begriff MWD „Measurement While Drilling“ (also Messen während des Bohrens) zusammengefasst. Teilweise geschieht dies schon automatisiert, aber im Regelfall wird die Bohrung sehr genau von der Tagesoberfläche überwacht und gesteuert. Dazu ist es notwendig die Daten, die im Bohrloch erhoben werden, an die Tagesoberfläche zu

senden. Dies geschieht entweder durch „mud pulses“, also Druckveränderungen der Spülflüssigkeit oder durch elektromagnetische Telemetrie. Wenn die Spülflüssigkeit und das Bohrklein die Tagesoberfläche erreichen, können bereits einige Untersuchungen durchgeführt werden (Kapitel 5.1.2.3.1).

Die Abgrenzung von „MWD“ zu dem weiter unten im Text (Kapitel 5.2) erklärten „LWD“ ist in der Literatur nicht immer klar definiert und beide Begriffe werden oftmals synonym verwendet. Im Rahmen dieses Berichts wird „MWD“ nur für die notwendige Datenerfassung für die (gerichtete) Bohrung selbst verwendet. Dagegen wird an dieser Stelle „LWD“ nur für Messungen zur Untersuchung von Gesteinsformationen genutzt.

5.1.2.3.1 Spülung und Bohrklein

Die Spülflüssigkeit wird unter hohem Druck durch das Bohrgestänge gepresst. Die Flüssigkeit ist mit verschiedenen Zusätzen (zum Beispiel Bentonit, Baryt oder Kunststoffen) versehen. Diese Flüssigkeit erfüllt in modernen Bohrverfahren zahlreiche Funktionen wie Kühlung und Schmierung des Meißels, mechanische Stabilisierung des Bohrlochs, Korrosionsverhinderung des Gestänges, etc. Der Rückfluss findet dabei in der Regel zwischen Bohrlochwand (Gestein) und äußerem Bohrgestänge statt (engl. „standard circulation“). Eine umgekehrte Konfiguration, also Einstrom zwischen Gestänge und Wand und Rückfluss durch das Gestänge (engl. „reverse circulation“) ist auch anzutreffen. Wenn sich das Bohrklein an der Bohrlochwand festsetzt, spricht man von einem „mud cake“ oder von der „mud cake zone“, später durchzuführende Bohrlochmessungen (siehe unten) können dadurch behindert werden. Im Rahmen von Messungen im Bohrloch (siehe unten) ist ebenfalls zu beachten, dass die Spülflüssigkeit bis zu einem gewissen Grad in das Umgebungsgestein eindringen kann, dies ist die sogenannte „flushed zone“.

Zur Untersuchung des Bohrkleins sind ein oder mehrere Spezialisten erforderlich, die vor Ort das Bohrklein charakterisieren. Das Resultat der geologischen Charakterisierung des Bohrkleins wird in der Regel als Illustration dargestellt, in welcher für die entsprechenden Teufenbereiche der Anteil der Gesteinsart farbig kodiert ist, ein Beispiel wird in /SCH 16/ gezeigt. Neben dieser lithologischen Spalte sind die entsprechenden Messwerte der Untersuchungen der Spülflüssigkeit dargestellt /SCH 16/. Dazu kommen – falls vorhanden – die Ergebnisse von Kernbohrungen (Kapitel 5.1.2.3.2) und von Bohrlochmessungen und -tests (Kapitel 5.2).

Neben der geologischen Charakterisierung des Bohrkleins erfolgt auch eine chemische Analytik am Bohrort selbst. Diese Analytik erfüllt vor allem technische Zwecke. Dazu ist es notwendig, Geräte wie beispielsweise zum Auffangen der mit der Spülflüssigkeit geförderten Gase, zu verwenden.

5.1.2.3.2 Kernbohrungen

Bohrkerne werden gewonnen, indem eine spezielle Art von Meißel genutzt wird, der im Bohrloch das Gestein nicht vollständig zertrümmert. Der Meißel hat dazu mittig eine Aussparung, durch welche intaktes Gesteinsmaterial mittig im Bohrloch stehen bleibt und sukzessive durch den Meißel hindurch in das Gestänge hineinragt. Wenn das Gestänge gezogen wird, gelangen auch die zylinderförmigen Bohrkerne an die Oberfläche. Je nach Festigkeit und Struktur des Gesteins haben diese Bohrkerne eine unterschiedliche Qualität und werden auch mit deutlich unterschiedlicher Quantität geborgen, dabei bedeutet der „Kerngewinn“ die Ausbeute von Gesteinsmaterial im Verhältnis zur erbohrten Länge.

Nachdem die Kerne nach über Tage gelangt sind, werden sie in 1 m (bzw. 3 Fuß, engl.: ft) lange Stücke zerteilt und – wenn keine besonderen Konservierungsmaßnahmen getroffen werden müssen – in Kisten verpackt und fotografisch dokumentiert. Im Detail sind zahlreiche weitere Maßnahmen (zum Beispiel Konservierung, etc.) zum Umgang mit Kernen durchführbar, die aber hier nicht weiter beschrieben werden. Eine gegebenenfalls erforderliche Konservierung erfolgt nach der ersten feldgeologischen Aufnahme. Die feldgeologische Aufnahme selbst erfolgt durch reine Beobachtung des Feldgeologen.

Die verpackten Kerne werden im Labor weiteren Messungen unterzogen, diese Messmethoden werden in Kapitel 6 beschrieben. Im Prinzip ist es möglich, auch am Ort der Bohrung eine umfangreiche geologische Analytik, die der im Labor gleicht, zu betreiben, jedoch wird dies in aktuellen Publikationen /API 98/, /MCP 15/ nicht, beziehungsweise nach /MCP 15/ nur unter besonderen, nicht näher ausgeführten, technischen oder wirtschaftlichen Umständen, empfohlen. Die Untersuchungsmethoden, die am Ort der Bohrung stattfinden, wären die gleichen wie im Labor. Nach der feldgeologischen Aufnahme eines Kerns werden Sektionen des Kerns für Routine- und Spezialuntersuchungen im Labor markiert.

Das Resultat der geologischen Charakterisierung der Kerne wird in der Regel als Illustration dargestellt, in welcher für die entsprechenden Teufenbereiche die Gesteinsart (Li-

thologie) farbig kodiert ist, oder auch bereits eine Zuordnung zur Stratigrafie vorgenommen wurde, falls dies erwünscht/möglich ist (beispielsweise in blau für Gesteine des Jura). Dies kann gegebenenfalls die Ergebnisse der Spülbohrung ersetzen oder ergänzen. Zusätzlich sind in der Regel die Ergebnisse der Bohrlochmessungen und -tests (Kapitel 5.2) dargestellt.

5.1.2.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Die Aussagekraft von Tiefbohrungen ist insgesamt sehr hoch und die einzige Methode, die ohne ergänzende Anwendung weiterer Methoden eine verlässliche Charakterisierung der Lithologie in der Teufe ermöglicht. Dies gilt insbesondere für die Aussagekraft von Kernen. Die Aussagekraft der Analyse des Bohrkleins von Spülbohrungen ist hoch, jedoch deutlich niedriger als die Charakterisierung von Kernen (bei Kernbohrungen).

Die Aussagekraft hinsichtlich der strukturgeologischen Eigenschaften ist bei Kernbohrungen sehr hoch, insbesondere dann, wenn die Kerne orientiert erbohrt wurden, so dass Einfallrichtung und -winkel der Lineamente bekannt ist. Dies gilt ebenso für die Einordnung der Kerne in einen stratigrafischen Kontext.

Die Grenzen von Untersuchungen an Bohrkernmaterial sind deutlich abhängig vom Kerngewinn. Der Kerngewinn kann aus verschiedenen Gründen schlechter werden, beispielsweise wenn durch eine stark tektonisch zerrüttete Zone gebohrt wird. Es kann dann nicht nur keine Zuordnung der Lithologie stattfinden, sondern in den meisten Fällen fällt oder schiebt sich der Kern im Gestänge zusammen, so dass auch keine verlässliche Teufenzuordnung möglich ist. Je schlechter der Kerngewinn, desto weniger aussagefähig ist damit die Bohrkernansprache insgesamt.

Eine Teufenzuordnung durch die Analyse des Bohrkleins ist möglich, aber nicht so genau wie bei einer Kernbohrung mit hohem Kerngewinn. Die Ursache liegt darin, dass die Spülflüssigkeit, die über Tage charakterisiert wird, mit dem Bohrklein die Wegstrecke zur Tagesoberfläche zurückgelegt hat und durchmischt wurde. Dadurch kann unterschiedliches Gesteinsmaterial aus verschiedenen Schichten gleichzeitig vorhanden sein. Dazu wird das Bohrklein nicht kontinuierlich, sondern beispielsweise nur intervallweise (im Meter-Bereich) analysiert.

Wenn im Bohrloch bei offenen Trennflächen oder Hohlräumen die Spülung beziehungsweise das Bohrklein nicht vollständig an die Oberfläche transportiert wird, entstehen sogenannte Spülungsverluste. In diesen Fällen wird auch bei der Bohrklein- und Spülungsanalyse eine Teufenzuordnung ver- oder behindert.

5.1.2.5 Aufwand

Der Aufwand für eine Tiefbohrung ist bereits sehr hoch, der zusätzliche Aufwand für eine Kernbohrung steigert diesen Aufwand nochmals, sowohl was den Zeit-, Kosten- und Personalbedarf betrifft. Neben dem Fachpersonal zur Ausführung der Bohrung ist für die geowissenschaftlichen Untersuchungen an Kernen und Bohrklein erfahrenes Personal nötig. Insgesamt spielen für den Aufwand im Detail verschiedene Faktoren eine Rolle, beispielsweise:

- Kernstrecke (gesamte oder nur ein Teil der Bohrung wird gekernt),
- Kernverfahren,
- Schnelligkeit des Bohrfortschritts (Abhängigkeit vom Gesteinstyp) sowie
- Materialverschleiß der Bohrwerkzeuge (Abhängigkeit vom Gesteinstyp).

Das Risiko, dass bei Bohrungen und insbesondere bei Kernbohrungen eine Zeit- oder Kostensteigerung entsteht, ist demnach relativ hoch. Dieses Risiko erhöht sich, wenn mehrere Bohrungen gleichzeitig geplant sind. Bohrgeräte und Personal müssen in ausreichender Zahl (auch zur Auswertung und Interpretation) zur Verfügung stehen.

Weitere Faktoren, die das Risiko von Kosten- und/oder Zeitsteigerungen beeinflussen sind unter anderem:

- Kontakt zu schutzwürdigen Gütern (zum Beispiel Landschaftsschutzgebiete, Bodendenkmäler)
- Emissionen (Lärm, Abgase, etc.)
- Abstandsregelungen
- Genehmigungen (Eigentümer der Grundstücke, etc.)
- Entschädigungszahlungen (zum Beispiel bei Ernteausschlag von betroffenen Landwirten).

5.1.2.6 Kombinationsmöglichkeiten von Kernbohrungen mit anderen Methoden

Tiefbohrungen werden in der Regel mit vielen verschiedenen Methoden (zum Beispiel Seismik, geophysikalische Bohrlochmessungen) kombiniert. Dies geschieht in der Regel, um die jeweils andere Methode zu kalibrieren und zu verifizieren. Eine Kalibrierung erfolgt bei der Seismik zum Beispiel für die Teufenlage der detektierten Schichten oder auch Störungen. Im Rahmen von bohrlochgeophysikalischen Messungen erfolgt eine Zuordnung der gemessenen Parameter (akustisch, elektrisch, etc.) zu den charakterisierten Kernen, diese Zuordnung kann zur Kalibration der Teufenzuordnung der Lithologie und Extrapolation der Lithologie für Teilbereiche der Bohrung mit geringem oder keinem Kerngewinn genutzt werden.

5.1.2.7 Alternative Methoden

Eine Methode, die alternativ zu Tiefbohrungen zu Ergebnissen mit ähnlicher Aussagekraft führt, existiert nicht. Wenn mehrere Bohrungen abgeteuft werden, kann es u. U. ausreichen, die Ergebnisse aus einer gekernten Bohrung mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen auf andere Bohrungen in der Region zu übertragen.

5.1.2.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Für Tiefbohrungen ist umfassende weiterführende Literatur mit weiteren Erläuterungen und Erfahrungen in verschiedenen Anwendungsbereichen vorhanden. In der Literatur steht in der Regel der technische Aspekt, also der Nutzen für den Bohrprozess, im Vordergrund. Ein Überblick für weiterführende Informationen ist in Tab. 5.2 dargestellt.

Weiterentwicklungen in Bezug auf die Spülung betreffen hauptsächlich den Bereich der Sensor- oder Messtechnik im Bohrloch. So wurden in den letzten Jahren immer genauere Drucksensoren oder auch bessere Geräte zur Durchströmungsbestimmung der Spülflüssigkeit (engl. Flowmeter), entwickelt /ABL 12/. Diese Entwicklung zielt auf die genauere Bestimmung der Teufe, aus der das Bohrklein bzw. die Spülflüssigkeit stammen, ab.

Weiterentwicklungen in Bezug auf Kernbohrungen betreffen in erster Linie den technologischen Aspekt der Kerngewinnung selbst. Beispielsweise hat nach /ASH 18/ die zunehmende Explorationstätigkeit der Rohstoffkonzerne in sogenannten Schiefergas-Lagerstätten (im engl. wird oft der Begriff „unconventional reservoirs“ verwendet) zur

Weiterentwicklung von Kernverrohrungssystemen geführt, die abgestimmt auf die jeweilige Gesteinsformation sind. Außerdem wird für Kohlenwasserstoff-Lagerstätten vermehrt ein Bohrverfahren verwendet, bei welchem Kerne auch gewonnen werden können, wenn der Bohrbetrieb weitergeht (engl. „Wireline Continuous Coring“). Ebenfalls können Bohrlochmessungen bereits auch während des Kernens durchgeführt werden.

Diese Weiterentwicklungen zielen hauptsächlich auf Kostensenkungen und Effizienzsteigerungen während des Bohrens beziehungsweise Kernens ab. Die eigentliche geologische Untersuchung des Kerns ist davon unberührt.

Tab. 5.2 Weiterführende Informationen zu Tiefbohrungen

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Coring Methods and Systems /ASH 18/ • Auf Jagd im Untergrund /REI 15/ • Core Analysis /MCP 15/ • Drilling /AUS 96/ • Tiefbohrtechnik /HAT 91/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Mud Logging /SPE 18a/ • Defining Mud Logging /SCH 16/ • Defining Coring /SCH 17/ • Recommended Practices for Core Analysis /API 98/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Society of Petroleum Engineers (SPE) • International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) • International Association of Drilling Contractors (IADC) • Society of Exploration Geophysicists
Zuständige Behörden	<ul style="list-style-type: none"> • Bergämter der Bundesländer
Internationale (inklusive geplante) Anwendung von Kernbohrungen im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Belgien /BER 13/, /LAB 08/ • Finnland /AAL 16/, /RAU 05/ • Frankreich /AND 16b/ • Japan /NUMO 16/ • Kanada /NWMO 16a/, /NWMO 16b/ • Schweden /SKB 00/ • Schweiz /NAG 18/ • USA /NEL 14/

5.2 Bohrlochmessungen und -tests

5.2.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Bohrlochmessungen und -tests	
Messmethoden	<p><u>Akustische und seismische Messverfahren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Laufzeitmessungen • Bohrlochseismik <p><u>Gravimetrische Messverfahren</u></p> <p><u>Elektrische Messverfahren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Widerstands-/Leitfähigkeitsmessungen • Potentialmessungen • Ausbreitungsmessungen <p><u>Elektromagnetische und magnetische Messverfahren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Magnetische Messungen • Kernspinresonanzspektroskopie • Bohrlochradar <p><u>Radiometrische Messverfahren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Natürliche Radioaktivität • Sonden mit ionisierender Strahlung • Gepulste Neutronen/Gamma-Messung <p><u>Optische Messverfahren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Abbildungen der Bohrlochwand • Optische Sensoren <p><u>Geomechanische Verfahren und Tests:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Messungen • Tests im Bohrloch
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie • Korrelation Lithologie/Stratigraphie • Struktur und Gefüge (Trennflächen, Diskontinuitäten, etc.) im Nah- und Fernbereich des Bohrlochs • Bohrlochform und -verlauf • Elastische Moduln, Gesteinsfestigkeit, Spannungsfeld • Porosität, Porenraumverteilung und -struktur • Wasser- und/oder Kohlenwasserstoffgehalt • Dichte, Temperatur
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none"> • Kombination der Methoden erlaubt weitreichende Erkenntnisse
Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Personalintensiv, technische aufwändig • Der Aufwand hängt von Faktoren wie zum Beispiel Bohrlochteufe und verwendeten Sonden ab

Kurzcharakterisierung Bohrlochmessungen und -tests	
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Korrelation mit weiteren Bohrungen/Kernbohrungen • Gesteinsphysikalische Labormessungen • Boden- und Felsmechanik im Labor • Seismik, Gravimetrie, Geomagnetik, Geoelektrik, Elektromagnetik, Radiometrie
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Kernbohrungen in Kombination mit Laboruntersuchungen
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Aussagekraft abhängig von den eingesetzten Sonden und ihrer Kombination

5.2.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Es existieren zahlreiche Methoden, mit denen innerhalb eines Bohrlochs Messungen durchgeführt werden und die Erkenntnisse über das Gestein liefern können. Die meisten dieser Methoden sind der sogenannten Bohrlochgeophysik oder Bohrlochmessungen zuzuordnen. Nach /KOC 03/ sind Bohrlochmessungen kontinuierliche, teufenabhängige Aufzeichnungen von gesteinsphysikalischen, chemischen und mechanischen Parametern einer Gesteinsformation in einem Bohrloch. Diese Aufzeichnungen werden zur Identifizierung und Charakterisierung von Gesteinsformationen genutzt. Andere Methoden haben eher den Charakter von Bohrlochtests, die zwar an verschiedenen Positionen im Bohrloch durchgeführt werden, aber nicht der Definition von kontinuierlichen Messungen entsprechen. Dies wird in der Beschreibung der technischen Ausführung gegebenenfalls erwähnt.

Die Messprinzipien von Bohrlochmessungen und -tests entsprechen weitgehend denen, wie sie bereits für die flächenhaften Untersuchungen (Kapitel 4) dargestellt wurden. Deshalb können mit Bohrlochmessungen und -tests zahlreiche Parameter untersucht, quantitativ bestimmt und eine große Bandbreite von Erkenntnissen gewonnen werden. Aufgrund der Vielzahl der Messverfahren werden an dieser Stelle die Messverfahren und die gewonnenen Erkenntnisse tabellarisch gegenübergestellt (siehe Tab. 5.3). Außerdem wird auch im Rahmen der technischen Ausführung im nächsten Kapitel auf die gemessenen Parameter, Messgrößen und den potenziellen Erkenntnisgewinn eingegangen, da eine schematische Trennung zwischen der Beschreibung hochspezialisierter Messsysteme und den Messgrößen an dieser Stelle nicht sinnvoll erschien.

Tab. 5.3 Gegenüberstellung von Bohrlochmessungen und -tests und zu gewinnender Erkenntnis

Messverfahren	Erkenntnis oder gemessener Parameter
<ul style="list-style-type: none"> • Laufzeitmessungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie und mechanische Eigenschaften • Struktur und Gefüge (Klüfte, Trennflächen, Porosität) • Kalibration der flächenhaften Seismik
<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochseismik 	<ul style="list-style-type: none"> • 2D oder 3D erfasste Struktur des Untergrunds • Seismische Tomographie • Korrelation zu flächenhafter Seismik
<ul style="list-style-type: none"> • Gravimetrische Messverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Dichte und Korrelation zu flächenhafter Gravimetrie
<ul style="list-style-type: none"> • Widerstands- und Leitfähigkeitsmessungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie • Gefüge (Abbilder der Bohrlochwand)
<ul style="list-style-type: none"> • Potentialmessungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität
<ul style="list-style-type: none"> • Ausbreitungsmessungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Messung der dielektrischen Eigenschaften • Unterscheidung zwischen Wasser und Kohlenwasserstoffen im Porenraum
<ul style="list-style-type: none"> • Magnetische Messungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie
<ul style="list-style-type: none"> • Kernspinresonanzspektroskopie 	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie • Porosität, Porenstruktur
<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochradar 	<ul style="list-style-type: none"> • 2D oder 3D Struktur des Untergrunds • Tomographie
<ul style="list-style-type: none"> • Natürliche Radioaktivität 	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie • Radionuklidgehalt
<ul style="list-style-type: none"> • Sonden mit ionisierender Strahlung 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasser- und/oder Kohlenwasserstoffgehalt • Dichte
<ul style="list-style-type: none"> • Abbildungen der Bohrlochwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie und Gefüge (Schichtgrenzen, Klüfte und Trennflächen)
<ul style="list-style-type: none"> • Optische Sensoren 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur
<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochdurchmesser 	<ul style="list-style-type: none"> • Spannungsfeld
<ul style="list-style-type: none"> • Tests im Bohrloch 	<ul style="list-style-type: none"> • Elastische Parameter (Moduln, zum Beispiel E-Modul, etc.) des Gesteins • Gesteinsfestigkeiten

5.2.3 Technische Ausführung

Bei der Durchführung der kontinuierlichen Bohrlochmessungen (im Gegensatz zu den Bohrlochtests) mittels Sonden kann unterschieden werden zwischen Messungen, die im

Anschluss an das Bohren der einzelnen Abschnitte durchgeführt werden und Messungen, die parallel zum Bohren, das heißt während des Bohrens erfolgen. Im allgemeinen Sprachgebrauch haben sich für das Verfahren die englischen Begriffe durchgesetzt. Die entstehungsgeschichtlich ältere Variante der Bohrlochmessungen ist das sogenannte „Wireline-Logging“. Dabei werden die Messsonden (engl. „Tools“) in verschiedenen Kombinationen zusammengefasst (engl. „Tool Strings“) und an einem Kabel ins Bohrloch abgelassen. Standardmäßig wird beim Heraufziehen der Sonden gemessen /ALS 17/. In Abhängigkeit der Messsonde können Messungen sowohl im nicht verrohrten Bohrloch (engl. „open hole“) als auch im verrohrten Bohrloch (engl. „cased hole“) durchgeführt werden. Eine jüngere Variante von Bohrlochmessungen ist das sogenannte „Logging While Drilling“ (LWD, deutsch in etwa: „Messen beim Bohren“). Wie der Name bereits sagt, werden dabei die Bohrlochmessdaten während des Bohrens erhoben. Hierbei sind die Sonden beziehungsweise Messinstrumente Teil der Bohrlochgarnitur (engl. „Bottom Hole Assembly“, BHA) im Bereich über dem Bohrlochkopf. Teilweise dient aber sogar der Bohrmeißel als Teil der Sonde (zum Beispiel „Resistivity at the bit“, RAB, deutsch in etwa: „Widerstand am Meißel“).

Unabhängig davon, ob die Bohrlochmessungen als „Wireline-“ oder „LWD-“ Messungen durchgeführt werden, gibt es zahlreiche Messverfahren und auch zahlreiche Messsonden, die verwendet werden. Hier wird vernachlässigt, ob das Messprinzip beim Wireline-Logging oder LWD angewendet wird. Die Messprinzipien entsprechen dabei weitgehend denen, wie sie bereits für die flächenhaften Untersuchungen des Untergrunds (Kapitel 4.2) dargestellt wurden. Dabei werden gegebenenfalls auch gängige Abkürzungen der einzelnen Methoden genannt. Teilweise gehen diese Abkürzungen auch auf die Sonde zurück, mit der erstmals ein Prinzip angewendet wurde und von einem Hersteller zuerst verwendet wurde. Falls eine solche Abkürzung hier genutzt wird, soll dies in keiner Weise den einen oder anderen Hersteller herausstellen. Falls die Methode nicht dem Logging zuzuordnen ist, wird dies erwähnt.

5.2.3.1 Akustische und seismische Messverfahren

Das Messprinzip akustischer und seismischer Messungen im Bohrloch ähnelt dem der Oberflächenseismik: Schallwellen werden ausgesandt und verlaufen durch das Gebirge hindurch bis zu einem Sensor, der die eintreffenden Schallwellen detektiert und das zurückkehrende Signal zeitabhängig aufzeichnet. Die gemessenen Schallwellen können aufgrund unterschiedlicher Ausbreitungsarten sowie ihrer Reflexions- und Refraktions-eigenschaften voneinander unterschieden werden. Eine detaillierte Ausführung würde an dieser Stelle zu weit führen, zahlreiche Lehrbücher wie /KEA 02/, /KNÖ 05/, /LIU 17/,

/ELL 10/ widmen sich dieser Thematik. Abhängig von der spezifischen technischen Ausführung (siehe unten) sind mittels einer detaillierten Analyse unterschiedliche Erkenntnisse möglich, welche die Lithologie, die mechanischen Eigenschaften sowie die Struktur und das Gefüge (zum Beispiel Klüfte) im Nahbereich (bis mehrere Meter) und auch im Fernbereich (bis mehrere 10 oder 100 Meter) des Bohrlochs erfassen können (Tomographie). Hochauflösende akustische Abbildungen der Bohrlochwand werden an dieser Stelle ebenfalls zu den akustischen Messungen gezählt.

Wesentlich an akustischen Bohrlochmessungen ist, dass sich entweder die Quelle, der Empfänger oder sowohl Empfänger und Sender des seismischen Signals in einem Bohrloch befinden. Dabei unterscheidet sich die Zielsetzung der Verfahren: Messungen, in denen sich Sender und Empfänger in nur einem Bohrloch befinden haben zum Ziel, die Umgebung des Bohrlochs zu untersuchen. Dabei werden über die Messung der Laufzeit Erkenntnisse über die elastischen Moduln, die Festigkeit und auch über die Permeabilität gewonnen.

Messungen, bei denen sich entweder Sender oder Empfänger außerhalb des Bohrlochs oder verteilt auf mehrere Bohrlöcher befinden, haben die Untersuchung eines großräumigen Gesteinskörpers zum Ziel, also die Untersuchung der Struktur des Umgebungsbeziehungsweise überlagernden Gesteins.

5.2.3.1.1 Laufzeitmessungen

Einfache akustische Messungen sind Laufzeitmessungen (engl. „transit time“, „slowness“) der Schallwelle im Gestein (engl. „sonic log“). Dabei wird von einem Sender an einer Sonde ein akustisches Signal gesendet und an einem oder mehreren (in der Regel zwei) Empfängern, die sich ebenfalls an der Sonde befinden, gemessen, wann dieses Signal detektiert wird. Um Effekte der Bohrspülung oder einer im Bohrloch schräg stehenden Messsonde auszugleichen, werden die Messungen in zwei Richtungen durchgeführt. Deshalb sind an beiden Enden der Sonde Sender/Empfänger-Paare angebracht. Bei dieser Konfiguration spricht man von BHC (engl. „borehole compensated“)-Messung beziehungsweise Sonden. Ausgehend von dieser einfachen Sondenkonfiguration sind zahlreiche weitere Konfigurationen denkbar, wie eine Erhöhung der Anzahl der Sender/Empfänger oder Variationen der Länge der Sonde. Die Empfänger selbst wurden ebenfalls weiterentwickelt, so dass auch die unterschiedlichen Arten von akustischen/seismischen Wellen /ELL 10/ detektiert werden können.

Eine wichtige Weiterentwicklung und heute Standard sind komplexe Sender/Empfänger Anordnungen (engl. „arrays“) in der Sonde. Diese erlauben es, Analysen des Laufzeitverhaltens und der Phasenverschiebungen der seismischen Welle durchzuführen, sogenannte STC (engl. „slowness-time-coherence“) Signalverarbeitung. Auch die Nutzung von Sendern/Empfängern, die als Dipole fungieren und die Analyse von komplexen seismischen Wellen erlauben, gehört heute zu den Standard-Verfahren. Sogenannte „crossed-dipole tools“ ermöglichen heute die Erfassung von Anisotropien im Gestein, die beispielweise durch eine vorherrschende Lagerung von Mineralen oder auch durch unterschiedliche horizontale Spannungen verursacht werden.

Neben den erwähnten Sendern/Empfängern werden auch Ultraschall-Systeme verwendet. Solch eine Sonde wird im Bohrloch rotiert. Beim Rotieren und gleichzeitiger Messung kann damit ein Abbild der Bohrlochwand erzeugt werden. Die deutsche Bezeichnung für diese Art Sonden ist „akustischer Bohrlochfernseher“, gebräuchliche Abkürzungen sind UBI (engl. „ultrasonic borehole imager“) oder BHTV (engl. „borehole televiewer“). Die Abbildung der Bohrlochwand kann zur Bestimmung der Struktur und des Gefüges (Klüftung, Schichtung, etc.) genutzt werden. Die Auswertung erfolgt heute unter der Verwendung von Bilderkennungssoftware.

Zu erwähnen, aber mit geringem Nutzen für die Untersuchung des Umgebungsgesteins, sind Methoden, die sich vorwiegend Untersuchungen der Bohrlochausführung oder der Verrohrung widmen und keine Bedeutung im Sinne der Erkundung haben. Dies sind zum Beispiel das sogenannte „cement bond log“ (CBL) oder das VDL (engl. „variable density log“).

5.2.3.1.2 Bohrlochseismik

Bei einer seismischen Untersuchung, die auf der Oberfläche ausgeführt wird, kann es nützlich sein, einen oder mehrere Empfänger (zum Beispiel mehrere Dutzend oder wenige 100) in einem Bohrloch zu positionieren. Diese Methode wird „vertical seismic profiling“ (VSP) genannt und oftmals nicht der Bohrlochgeophysik, sondern der Seismik (Kapitel 4.2.1) zugerechnet /KEA 02/. Der umgekehrte Fall, also die Positionierung der Quelle im Bohrloch und der Empfänger auf der Oberfläche, ist auch möglich. Die Methode des VSP unterscheidet sich nicht wesentlich von der seismischen Methode, die im Kapitel 4.2.1 beschrieben ist. Unter Verwendung eines VSP lässt sich das Ergebnis einer reinen Oberflächenseismik sehr genau teufenbezogen kalibrieren /KEA 02/, /KNÖ 05/.

Bei einer Paralleldurchschallung (engl. „cross hole“) des Gebirges sind Sender und Empfänger in unterschiedlichen Bohrlöchern positioniert /KNÖ 05/. Damit können die elastischen Parameter der zu untersuchenden Formation gut ermittelt werden. Eine Weiterentwicklung ist die Erzeugung einer seismischen Tomographie, die ein flächenhaftes Abbild des Untergrunds zwischen den Bohrlöchern möglich macht. Standardmäßige Anwendungsgebiete sind eher oberflächennahe Bohrungen zur Bestimmung von Baugrundparametern (Paralleldurchschallung) oder Kleinbohrungen innerhalb von Bergwerken zur Erkundung (Tomographie). Ein wichtiger Unterschied zu den Laufzeitmessungen (siehe Kapitel 5.2.3.1.1) ist, dass die Messungen nicht kontinuierlich (im Sinne der Definition von „Logging“, siehe Kapitel 5.2.2) stattfinden, weshalb diese Methoden oft auch nicht der Bohrlochgeophysik zugeordnet werden. Beispielsweise wird beim VSP eine große Anzahl im Bohrloch feststehender Empfänger genutzt, oder ein Empfänger wird für die Zeit der Messung auf einer Position im Bohrloch festgehalten.

5.2.3.2 Gravimetrische Messverfahren

Gravimetrische Messungen im Bohrloch werden in der Literatur zur Bohrlochgeophysik oft nicht beschrieben. Das Messprinzip ist das gleiche wie an der Oberfläche. Mittels einer Sonde, die auf dem Prinzip des Lacoste-Romberg-Gravimeters beruht /ROB 89/, /SCH 18a/ kann die Dichte einer geologischen Formation bestimmt und damit Aufschluss über die Lithologie gewonnen werden. Eine direkte Korrelation mit anderen Dichtemessungen (zum Beispiel Gamma-Gamma-Log, Kapitel 5.2.3.5.2) ist ebenfalls möglich. Der Vorteil der Sonde ist, dass die Dichte direkt gemessen wird /ROB 89/, allerdings ist die Zeitspanne die benötigt wird, um die Sonde einzusetzen, länger als bei anderen Verfahren. Ähnlich wie beim VSP (Kapitel 5.2.3.1.2) muss auch hier die Sonde eine Zeit lang (mehrere Minuten) an einem Ort feststehen, währenddessen die Messung durchgeführt wird.

5.2.3.3 Elektrische Messverfahren

Unter elektrischen Messungen werden die Messungen des elektrischen Widerstands und Messungen des Eigenpotentials der unterschiedlichen Gesteine zusammengefasst /ELL 10/, aus denen sich Rückschlüsse auf die Lithologie ergeben. Je nach Quelle und/oder Autor werden Induktionsmessungen der Elektromagnetik zugeordnet (zum Beispiel /KNÖ 05/), in der vorliegenden Aufstellung werden sie jedoch zur Elektrizität gezählt. Ebenso werden hier hochfrequente elektrische Ausbreitungsmessungen dargestellt. Auch hochauflösende Messungen des elektrischen Widerstands, welche ein Abbild der

Bohrlochwand ergeben, werden in der Regel zu den elektrischen Verfahren gezählt. Mittels elektrischer Messungen können Lithologie, hydraulische Eigenschaften sowie Struktur und Gefüge von geologischen Formationen im Bohrloch erkannt werden /ELL 10/.

5.2.3.3.1 Widerstands/Leitfähigkeitsmessungen

Der elektrische Widerstand (engl. „electrical resistivity“) einer Formation oder sein Kehrwert die elektrische Leitfähigkeit (engl. „electrical conductivity“) können mit vielen verschiedenen Messinstrumenten gemessen werden. Im Prinzip wird aus einer oder mehrerer Elektroden Strom in das Bohrloch oder direkt auf die Bohrlochwand geleitet. An entfernteren Messelektroden wird der Spannungsabfall gemessen. Über das Ohm'sche Gesetz kann dann der elektrische Widerstand bestimmt werden. Der Unterschied der Messmethoden liegt in den unterschiedlichen Konfigurationen der genutzten Elektroden. Im Ergebnis zeigen diese unterschiedlichen Konfigurationen dann unterschiedliche Eindringtiefen, unterschiedliches Auflösungsvermögen und besitzen insgesamt eine unterschiedliche Aussagekraft. Dabei haben die unterschiedlichen Konfigurationen auch in der gemeinsamen Interpretation einen hohen Nutzen. Beispielsweise gibt es Konfigurationen, die eine gute vertikale Auflösung haben, also auch dünne Schichten detektieren könnten. Diese Konfiguration ist dann oftmals sehr stark durch die Eigenschaften der verwendeten Spülflüssigkeit oder des „mud cakes“ beeinflusst. Im Gegensatz dazu zeigt ein großer Elektrodenabstand weniger Einfluss durch die Spülung. Diese Konfiguration hat eine höhere Eindringtiefe, aber ein geringeres Auflösungsvermögen.

Wesentliche Konfigurationen, die zu nennen sind, sind die „Normal Log“-Konfiguration und die fokussierten „Laterolog“-Konfiguration. Letzteres ist ein Verfahren, in dem der Strom nahezu horizontal in das Gestein geleitet wird. Eine häufig zu findende Konfiguration ist eine Sonde mit zwei Laterolog-Einheiten, eine mit hoher Eindringtiefe (engl. „Laterolog deep“, LLD) und eine mit niedriger Eindringtiefe (engl. „Laterolog shallow“, LLS). Diese Sonde wird dann „Dual Laterolog“ (DLL) genannt. Weiterentwicklungen des Laterologs sind hochauflösende Laterologs, die auch bildgebende Verfahren nutzen und die sogenannten azimuthalen Laterologs oder auch „dipmeter logs“ bei welchen, durch mehrere von der Sonde ausgehende „Arme“, mehrere Messungen im Bohrloch durchgeführt werden /ELL 10/, /LIU 17/, /KNÖ 05/.

Eine weitere wichtige Konfiguration ist das sogenannte „Microlog“ oder „Wall-resistivity-Log“. Hier liegen die Elektroden sehr nah beieinander und werden während der Messung stark an die Bohrlochwand gepresst. Die Eindringtiefe ist deshalb gering und, falls ein „mud cake“ vorhanden ist, werden im Wesentlichen dessen Eigenschaften gemessen.

Die Messung kann dann später verwendet werden, um den Einfluss der Spülung aus den weiteren Widerstandsmessungen herauszurechnen. Um die Elektroden an die Bohrlochwand zu pressen, wurden sie im Laufe der Weiterentwicklung der Sonden zunächst auf einer Unterlage angebracht, die mit einem „Arm“ aus der Sonde herausragte. Dies führte zum Konzept der azimuthalen Messungen, also Sonden mit mehreren Armen, die gleichzeitig aus der Sonde ragen und an verschiedenen Stellen im Bohrloch messen. So kann beispielsweise die Lage (geologisch: das „Streichen“ und „Einfallen“) von geologischen Strukturen (Schichten und Klüften) im Bohrloch gemessen werden. Diese Art von Sonden werden auch „Dipmeter“ (von englisch „dip“ für das „Einfallen“) genannt /ELL 10/, /LIU 17/.

Eine wichtige andere Konfiguration und konsequente Weiterentwicklung misst zwar den elektrischen Widerstand, kann aufgrund ihrer hohen Auflösung aber auch zu den bildgebenden Messverfahren gerechnet werden. Je nach Mess-Unternehmen beziehungsweise Sondenhersteller variiert der Name dieser Sonde („FMS“, „FMI“, „Imager“). Im Prinzip misst man den elektrischen Widerstand an der Bohrlochwand mit hoher Auflösung. Die Sonde besteht aus mehreren (zum Beispiel vier oder sechs) orthogonal zum Bohrstrang ausgerichteten Armen, die mit zahlreichen (zum Beispiel 16 oder 24) Mikroelektroden ausgestattet sind. Diese Elektroden berühren direkt die Bohrlochwand und messen dort den spezifischen elektrischen Widerstand. Die Widerstandsdaten werden in Farb- oder Grauwerte umgerechnet. Durch die hohe Auflösung von ca. 5 mm erhält man ein detailliertes Abbild der Bohrlochwand, in dem man beispielsweise Klüftung erkennen kann. Zusätzlich ist in der Sonde ein Magnetometer installiert, sodass die Orientierung der Sonde bekannt ist. Außerdem wird mit den Armen der Bohrlochdurchmesser (Kaliber) bestimmt. Die Auswertung erfolgt heute unter der Verwendung von Bilderkennungssoftware.

Eine weitere Methode, welche genutzt werden kann, wenn die Spülflüssigkeit nichtleitend oder eine Verrohrung aus Kunststoff vorhanden ist, ist das sogenannte Induktions-Log (engl. „induction log“). Dabei wird mittels einer Spule ein elektrisches Feld (ca. 20 kHz) erzeugt, welches ein sekundäres Feld im Gestein induziert. Dieses sekundäre Feld wird mit einer Empfängerspule gemessen und der scheinbare Widerstand wird dadurch ermittelt. In einer einfachen Konfiguration zeigen sich lithologische Grenzen nicht besonders scharf. Komplexere Sondenkonfigurationen mit mehreren Spulen können diesen Nachteil ausgleichen. Heute gibt es komplexe hochauflösende Methoden (engl. high resolution induction“, HRI), ebenso wie Methoden die komplexe, mehrfache Sensor-Anordnungen nutzen (engl. „multi-array inductions“) /ELL 10/.

5.2.3.3.2 Potentialmessungen

Die Messung des Eigenpotentials (engl. „self-potential-log“ oder auch „spontaneous-potential-log“, SP-log) einer Formation wird durch zwei Messelektroden durchgeführt: Eine der Elektroden befindet sich im Bohrloch und eine an der Oberfläche. Bei dieser Messung wird sich die Leitfähigkeit der Spülflüssigkeit zu Nutze gemacht: Im porösen Material (wie etwa Sandstein) ist die Spülflüssigkeit weiter in das Gestein eingedrungen als beispielsweise im Tonstein. Dazu ist im Tonstein in der Regel ein Fluid mit einer anderen Ionenkonzentration als in der Spülflüssigkeit vorhanden. Der eigentlich stattfindende Konzentrationsausgleich wird durch einen elektrochemischen Effekt, der elektrolytischen Polarisation /KEA 02/, behindert. Dadurch kommt es genau an der Schichtgrenze zwischen dem porösen und nicht porösen Material zu einer messbaren Potentialdifferenz.

Wie bei Oberflächenmessungen auch (Kapitel 4.2.4.3.3) fällt bei der Unterbrechung einer Widerstandsmessung die angelegte Spannung nicht sofort auf den Nullwert zurück, der Abfall kann mehrere Sekunden dauern. Das Gestein wirkt demnach als eine Art Kondensator. Dieser Effekt ist auf verschiedene Prozesse der Polarisation im Gestein zurückzuführen. Dementsprechend wird die Messung beziehungsweise Aufzeichnung des Effekts als induzierte Polarisationsmessung (engl. „induced polarization log“, IP-Log) bezeichnet. Das IP-Logging wird in der Kohlenwasserstoff-Exploration eher selten angewendet, denn – wie oben bereits erwähnt – kann der Polarisationseffekt mehrere Sekunden zum Abklingen benötigen, was bei einer kontinuierlichen Messung (die in der Regel bei konstanter Geschwindigkeit beim Heraufziehen der Sonden stattfindet) hinderlich ist. Weiterhin ist die Interpretation eines IP-Logs oftmals weniger eindeutig als die einer konventionellen Widerstandsmessung /KEA 02/.

5.2.3.3.3 Ausbreitungsmessungen

Ausbreitungsmessungen (engl. „propagation methods“) sind sehr komplexe Messungen der elektrischen Eigenschaften einer Formation. Diese Messungen werden auch als Messungen der dielektrischen (also schwach- oder nichtleitenden) Eigenschaften bezeichnet /ELL 10/. Dabei werden Phasen- und Amplitudenveränderungen des elektrischen Signals aufgezeichnet. Notwendig dazu sind sehr aufwändige Sondenanordnungen. Auch die Interpretation ist aufwändig, und setzt häufig die Erstellung von 3D-Modellen voraus /ELL 10/. Die Anwendung dieser Methode liegt hauptsächlich darin, dass sehr gut zwischen dem Vorhandensein von Wasser und Kohlenwasserstoffen unterschieden werden kann, was für die Kohlenwasserstoff-Exploration von großem Interesse ist.

5.2.3.4 Elektromagnetische und magnetische Messverfahren

Zu den magnetischen Messungen im Bohrloch werden an dieser Stelle die Messung des Paläomagnetfelds und der magnetischen Suszeptibilität im Gestein gezählt. Erstere ist von wissenschaftlichem Interesse, mit letzterer kann der Gehalt an magnetisierbaren Bestandteilen beziehungsweise Mineralen einer Formation ermittelt werden /SPE 18b/. Zu den elektromagnetischen Messungen gehört die Kernspinresonanzspektroskopie, mit welcher der Wasserstoffgehalt einer Formation gemessen und in der Konsequenz der Wasser- beziehungsweise Kohlenwasserstoffgehalt bestimmt und auch die Porosität abgeschätzt werden kann /ELL 10/, /LIU 17/. Auch gibt es elektromagnetische Reflexionsmessungen (Radarmessungen) im Bohrloch, die ähnlich wie akustische Messungen Aussagen über Struktur und Gefüge im Nah- und Fernbereich des erlauben. Induktive Bohrlochmessverfahren sind den elektrischen Verfahren zugeordnet worden, da mit diesen die elektrischen Eigenschaften einer Formation gemessen werden (siehe Kapitel 5.2.3.3.1).

5.2.3.4.1 Magnetische Messungen

Im Rahmen von magnetischen Messungen sind zwei Themenfelder zu betrachten: Erstens kann in Gesteinen das Magnetfeld der Erde, welches bei der Entstehung dieser Gesteine vorhanden war, durch die Magnetisierung der Minerale beziehungsweise der Ausrichtung magnetischer Bestandteile im Sediment festgehalten werden /SPE 18b/. Dieser Aspekt ist geowissenschaftlich interessant und wird auch regelmäßig im Rahmen von großen internationalen Forschungsprojekten (wie dem sogenannten International Ocean Discovery Program /IODP 18/, vormals Ocean Drilling Programm) untersucht. Große Bedeutung kann dieser Aspekt für die Datierung von Gesteinen erlangen.

Das zweite Themenfeld ist die Messung der magnetischen Suszeptibilität, also der Magnetisierbarkeit eines Gesteins. Diese Magnetisierbarkeit hängt hauptsächlich von dem Anteil an eisenhaltigen Mineralen (wie z. B. Magnetit, Hämatit, etc.) im Gestein ab. Entsprechend ist diese Methode für die Erz- und Mineralexploration und für wissenschaftliche Untersuchungen von Interesse /SPE 18b/.

5.2.3.4.2 Kernspinresonanzspektroskopie

Wie auch an der Oberfläche wird im Bohrloch mittels der Kernspinresonanzspektroskopie (engl. „nuclear magnetic resonance“, NMR) der Kernspin der Protonen zunächst durch ein Magnetfeld verändert und dann die Relaxation in den Anfangszustand durch

Messinstrumente beobachtet und aufgezeichnet. Das in der Medizin gebräuchliche „MRT“ beruht auf dem gleichen Prinzip. Die komplexen kernphysikalischen Grundlagen der NMR sind sehr umfangreich und im Überblick in /ELL 10/, /BEH 15/ beschrieben. Das Prinzip der magnetischen Resonanz ist länger bekannt (ca. 1900), jedoch konnte es nicht in verlässliche Messkonfigurationen umgesetzt werden, da die Einflüsse der Bohrung und der Messinstrumente selbst zu groß waren, als das eine verlässliche Messung möglich war. Erst in den 1980er Jahren schritt die technische Entwicklung so voran, dass Mitte der 90er Jahren etwa gleichzeitig von verschiedenen Firmen verlässliche Sonden entwickelt werden konnten. Die Sonden selbst erzeugen ein sehr starkes permanentes Magnetfeld, welches einen Bereich im Bohrloch um die Sonde herum abdeckt. Zusätzlich wird ein zweites, gepulstes Magnetfeld erzeugt, welches den Kernspin der Protonen ändert. Die Relaxation des Spins in das erste Magnetfeld kann dann gemessen werden. Mit dieser Methode können mit Hilfe vieler Auswertemethoden zahlreiche Eigenschaften der Formation bestimmt werden. Dies sind zum Beispiel Porosität, Porengröße und -verteilung, Wasservolumen, Abschätzungen der Permeabilität und Benetzbarkeit sowie Typisierung der vorhandenen Fluide (zum Beispiel Kohlenwasserstoffe).

5.2.3.4.3 Bohrlochradar

Obwohl Radarmessungen auf elektromagnetischen Wellen basieren, lässt sich für manche Aspekte eine Analogie zu akustischen Messungen im Bohrloch herstellen. Radarmessungen im Bohrloch erlauben, in Abhängigkeit der genutzten Frequenz, Aussagen über Struktur und Gefüge im Nah- und Fernbereich des Bohrlochs (Meter bis wenige 10 Meter). In Analogie zu seismischen Messungen im Bohrloch sind auch „crossed-hole“-Messungen möglich.

Im Gegensatz zu Radarmessungen an der Oberfläche (Kapitel 4.2.5.3.4) ist die komplizierte Sende- und Empfangseinrichtung der Zylinderform der Sonde angepasst und befindet sich während der Messung in einem eng begrenzten Bohrloch. Dies und auch der metallische Kabelstrang, an dem die Sonde befestigt ist, hat einen deutlichen Einfluss auf das resultierende gemessene Radarsignal. Die Auswertung umfasst deshalb bereits eine Modellierung des Sende- und Empfangssystems, auch ohne externe Einflüsse einer tatsächlichen Messung /SLO 10/.

Eine große Herausforderung bei der Auswertung von Radardaten im Bohrloch ist die Zuordnung der gemessenen Signale in eine Raumrichtung, da die Sender eine komplexe

Abstrahlcharakteristik aufweisen. Zu diesem Zweck werden immer komplexere Antennensysteme und Auswerteroutinen entwickelt /SLO 10/. Letztere erfordern die Nutzung von Hochleistungsrechnern.

5.2.3.5 Radiometrische Messverfahren

Radiometrische Messungen im Bohrloch unterscheiden sich teilweise von äquivalenten Messungen an der Oberfläche: Sowohl an der Oberfläche als auch im Bohrloch wird die natürliche Radioaktivität eines Gesteins gemessen, so dass aus diesen Messungen Rückschlüsse über die Lithologie gewonnen werden können. Der Radionuklidgehalt kann über komplexe Rechenverfahren abgeschätzt werden. Im Gegensatz zu den Messungen an der Oberfläche werden im Bohrloch aber auch Sonden genutzt, die selbst ionisierende Strahlung (in der Regel Neutronen- oder Gammastrahlung) aussenden. Daraus lassen sich Rückschlüsse über die Lithologie, den Wasser- beziehungsweise Kohlenwasserstoffgehalt und auch über die Dichte und Porosität einer Gesteinsformation ziehen /ELL 10/, /KEA 02/, /LIU 17/ /KNÖ 05/. Im Wesentlichen werden vier Methoden unterschieden, die im Folgenden beschrieben werden.

5.2.3.5.1 Natürliche Radioaktivität

Natürliche Gamma-Strahlung (engl. „Natural Gamma Ray“, NGR oder GR)

Natürlich vorkommende Minerale, wie Tonminerale, Glimmer, Feldspäte etc., enthalten in der Regel zu einem geringen Anteil die Isotope ^{40}K , ^{238}U und ^{232}Th und deren Tochternuklide. Die resultierende Gammastrahlung wird integral mit einer Sonde gemessen. Der Aufbau einer Sonde zur Messung der natürlichen Gamma-Strahlung ist relativ simpel. Notwendig ist lediglich ein Detektor, der die Aktivität misst. In der Regel werden dafür sogenannte Szintillationsdetektoren genutzt, die die Energie der Gammastrahlung in elektrische Impulse umwandeln.

Daraus kann dann – bei Sedimentgesteinen – der Tongehalt einer Formation ermittelt werden. Die Methode kann auch für Kalium-reiche Salzminerale (zum Beispiel Sylvinit) eingesetzt werden, in kristallinen Gesteinen (vulkanisch, magmatisch oder metamorph) kann damit auch die Unterscheidung zwischen Kalium-reichen und -armen Feldspäten durchgeführt werden. Die Gammastrahlung wird in API-Einheiten (= American Petroleum Institut) angegeben. Dabei ist 1 API definiert als 1/200 der Abweichung zwischen zwei Gammastrahlungsaktivitäten einer künstlichen Referenz-Tonformation der Universität in Houston, USA /ELL 10/, /LIU 17/, /KNÖ 05/.

Spektrale Gamma-Strahlung (engl. „Spectral Gamma Ray“, SGR oder CGR)

Diesem Messansatz liegen die gleichen physikalischen Grundlagen zu Grunde wie dem NGR-Log. Die Sonde ist so weiterentwickelt, dass zwischen den einzelnen natürlichen Radionukliden unterschieden werden kann: das Spektrum der Gammastrahlung wird gemessen. Das Spektrum ermöglicht nun weitere Interpretationen: Mit komplexen Algorithmen kann aus dem Messsignal der quantitative Anteil der Radionuklide im Gestein bestimmt werden. Für die Gesteinsidentifikation ist aber nicht unbedingt der absolute Anteil an Radionukliden wichtig, sondern das Verhältnis zueinander: Da beispielweise in der Kohlenwasserstoff-Industrie die Detektion von Tonschichten wichtig ist, kann nun aus dem ermittelten NGR-Log der ^{238}U -Anteil herausgerechnet werden. Da Uran in der Regel in Tongestein kaum vorhanden ist, kann aus dem resultierenden sogenannten CGR-Log Tonstein besser identifiziert werden. Außerdem können auch weitere Analysen (zum Beispiel die Kombination mit Widerstandsmessungen) oder sogenannte Cross-plots, in welchen der Anteil der Gammastrahlung der einzelnen Radionuklide gegenübergestellt wird, bei der Identifikation der Lithologie helfen.

5.2.3.5.2 Sonden mit ionisierender Strahlung

Gamma-Gamma-Verfahren (engl. „Gamma-Gamma Log“ oder „Gamma-ray rock-density log“, RHOB oder auch LDL/LDT)

Aus einer radioaktiven Quelle (häufig ^{137}Cs) wird Gammastrahlung ausgesendet. Die Gammastrahlung unterliegt im Gestein unter anderem dem sogenannten Compton-Effekt und dem photoelektrischen Effekt (P_e). Der Compton-Effekt bewirkt eine Streuung der hochenergetischen Gammastrahlung an den Elektronen in der Formation. Der photoelektrische Effekt ist die Absorption der niedrigenergetischen Gammastrahlung am Festkörper. Der Compton-Effekt korreliert sehr gut mit der Gesteinsdichte, der photoelektrische Effekt korreliert sehr gut mit der Ordnungszahl der Atome und damit mit den vorhandenen Elementen. Mit der Detektion der resultierenden Gammastrahlung lassen sich demnach Aussagen zur Gesteinsdichte und Porosität („Gamma-Gamma-Dichte“) sowie durch das P_e -Log zur Zusammensetzung, also zur Lithologie, treffen.

Neutronenverfahren (engl. „Neutron-gamma-ray log“ oder „Neutron porosity“, NPHI oder auch GNT, SNP, CNL)

Aus einer Sonde werden Neutronen in das umgebende Gestein emittiert (zum Beispiel durch einen Pu-Be Emitter). Diese Neutronen werden in der Gesteinsformation an Atom-

kernen gestreut, verlieren dabei an Energie und werden dann absorbiert. Mit zwei Detektoren an der Sonde wird die Konzentration von zunächst abgebremsten und sodann zurückgestreuten Neutronen gemessen. Am stärksten abgebremst werden Neutronen, wenn sie mit Wasserstoffkernen (Protonen) zusammenstoßen, die annähernd so viel Masse besitzen wie die Neutronen selbst. Demnach wird der Wasserstoffgehalt der Formation gemessen. In Abhängigkeit vom Gesteinsmaterial (die Neutronenporosität ist ursprünglich für tonfreie Kalksteine kalibriert) ist dies ein Maß für fluidgefüllten Porenraum oder auch ein Indikator für das Vorhandensein von Tonmineralen und hydroxidhaltigen Mineralen sowie Kohlenwasserstoffen.

Gepulste Verfahren (engl. „Pulsed Neutron Lifetime“ oder „thermal die away/thermal decay“ sowie „induced gamma ray spectroscopy“)

Bei diesen Sonden werden ebenfalls Neutronen emittiert, allerdings nicht kontinuierlich, sondern in kurzer Zeit mit hoher Menge. Diese Neutronen werden in der Gesteinsformation absorbiert. Bei der Absorption wird Energie in Form von Gammastrahlung freigesetzt. Diese Energie kann man in Beziehung zum absorbierenden Material setzen. So lässt sich aufgrund der gemessenen Energie gut zwischen verschiedenen Flüssigkeiten unterscheiden (zum Beispiel zwischen Kohlenwasserstoffen und salinaren Tiefenwässern). Wenn man nicht nur die Gesamtenergie, sondern das gesamte Spektrum misst, ist man in der Lage unterschiedliche chemische Elemente zu detektieren und so Rückschlüsse auf die Lithologie ziehen.

5.2.3.6 Optische Messverfahren

Optische Messungen im Bohrloch umfassen zum einen die Verwendung von Kamerasystemen, die ein Bild der Bohrlochwand aufzeichnen und mit deren Hilfe Aussagen über die Lithologie und das Gefüge an der Bohrlochwand getroffen werden können. Zum anderen sind dies aber auch Methoden, die Glasfaser-Technologien nutzen (engl. „fiberoptics“), um die Temperatur im Bohrloch zu messen /HUR 94/, /KNÖ 05/.

5.2.3.6.1 Abbildungen der Bohrlochwand

Abbildungen der Bohrlochwand können durch verschiedene Verfahren erzeugt werden. Die akustischen und elektrischen Verfahren, die durch eine Umrechnung der tatsächlich gemessenen Parameter ein Abbild erzeugen, werden im Kapitel 5.2.3.1 beziehungsweise Kapitel 5.2.3.3 behandelt. Neben diesen Methoden existieren Bohrlochsonden, die durch fotografische und Video-Kameras tatsächliche Lichtbilder der Bohrlochwand

liefern /PRE 99/. Die Nutzung dieser Systeme (engl. „optical televiewer“) wird vor allem dadurch eingeschränkt, dass eine durchsichtige Bohrspülung beziehungsweise ein luft- oder gasgefülltes Bohrloch erforderlich ist. Hauptsächlich werden diese optischen Systeme in der Regel in verrohrten Bohrungen verwendet, die zur Produktion von Kohlenwasserstoffen genutzt werden /PRE 99/ oder zur Inspektion im oberflächennahen Brunnenbau in offenen Bohrungen /KNÖ 05/. Die Verwendung zur tiefen geowissenschaftlichen Erkundung ist selten, zur oberflächennahen hydrogeologischen Erkundung häufiger. Anwendungsbereiche sind die Bestimmung der lithologischen Schichtgrenzen und die Untersuchung von Struktur und Gefüge (zum Beispiel Klüfte und Trennflächen). Die Auswertung erfolgt heute unter der Verwendung von Bilderkennungssoftware.

5.2.3.6.2 Optische Sensoren

Optische Sensortechnik ist durch die Entwicklung der Glasfaser-Technologie (engl. „fibre-optics“) maßgeblich bestimmt worden. Strenggenommen sind diese Methoden nicht dem Logging, sondern oftmals eher dem Monitoring, also der ständigen Überwachung von Bohrlöchern zuzuordnen. Im Unterschied zum Logging verbleiben diese Sensoren im Bohrloch /LIE 14/. Eine Ausnahme stellt die Messung der Temperatur dar, allerdings ist auch bei dieser Messung ein Unterschied zur üblichen Vorgehensweise bei Bohrlöchlmessungen vorhanden. Die Messung der Temperatur kann gleichzeitig über das gesamte Glasfaserkabel erfolgen, so dass die Messung nicht während des Absenkens oder des Herausziehens stattfindet.

5.2.3.7 Geomechanische Messverfahren

Das Ziel geomechanischer Messungen im Bohrloch ist die Erfassung des Spannungsfelds am Bohrort und die Bestimmung der elastischen Parameter (Moduln) einer Formation. Dies kann beispielsweise über Messungen der Bohrlochform und -stabilität sowie durch verschiedene Tests im Bohrloch erfolgen. Beispielsweise kann ein hydraulischer Druck auf eine Formation aufgebracht und geprüft werden, unter welchem Druck in der Formation ein Riss entsteht („Fracking“, „Hydro-Fracking“) /LIU 17/, /KNÖ 05/. An dieser Stelle wird auch das Überbohren (engl. „over-coring“) zu den Bohrlochmessmethoden gezählt. Eine Zuordnung zum Kernbohrungen (Kapitel 5.1.2.3.2) wäre im Prinzip auch möglich. Ein wichtiger Bereich der Geomechanik ist die Bestimmung der elastischen Parameter einer Gesteinsformation. Im Rahmen von kontinuierlichen Bohrlochmessungen können diese Parameter mit den bereits beschriebenen akustischen Messungen (Kapitel 5.2.3.1) ermittelt werden und werden deshalb an dieser Stelle nicht erneut behandelt.

5.2.3.7.1 Bohrlochdurchmesser

Neben der Bestimmung der elastischen Parameter einer Gesteinsformation sind Methoden von Interesse, die es ermöglichen Informationen über die Spannungsverteilung in der Erde zu gewinnen. Vereinfacht gesagt, bestimmt diese Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Gesteinsfestigkeit die mögliche Deformation des Gesteins. Von Interesse sind dabei die Größe und die Richtung dieser Spannungen.

Eine einfache und dennoch wichtige Methode um die Richtung der zwei horizontal wirkenden Spannungen zu bestimmen, ist die Messung des Bohrlochdurchmessers, das sogenannte Kaliber (engl. „Caliper“) /LIU 17/. Mit einer Sonde, die zwei, idealerweise aber vier oder sechs Arme umfasst, wird der Durchmesser des Bohrlochs bestimmt. Falls Sonden zum Einsatz kommen, die im Rahmen anderer Messungen bereits mehrere Arme an die Bohrlochwand pressen (zum Beispiel FMS oder FMI, Kapitel 5.2.3.3.1), wird das Kaliber simultan ebenfalls gemessen. Die Form des Bohrlochs ergibt bei bekannter Orientierung der Bohrlochsonde Aufschluss über die Richtung und die relative Größe der Spannung. Bei einem kreisrunden Bohrloch sind die Horizontalspannungen gleich beziehungsweise die Gesteinsfestigkeit sehr hoch und die Richtungen können nicht bestimmt werden. Bei einem ellipsenförmigen Bohrloch, ohne bereits existierende Störungen oder Klüfte, ist in der Regel der kürzere Durchmesser die Richtung der relativ größeren horizontalen Spannung, der lange Durchmesser die Richtung der relativ kleineren horizontalen Spannung /LIU 17/. Die Form eines Bohrlochs entspricht allerdings nur selten einer perfekten Ellipse, oftmals sind Bohrlochausbrüche (engl. „breakouts“) vorhanden, also Sektionen, in welchen die Bohrlochwand weggebrochen ist. Auch anzutreffen sind – teilweise in Kombination mit Bohrlochausbrüchen – das Ausspülen von weichen Gesteinsformationen in der Bohrlochwand (engl. „washouts“). Eine Analyse des Caliper zusammen mit der Bildanalyse aus den bildgebenden Methoden (zum Beispiel FMS oder FMI, Kapitel 5.2.3.3.1) kann ebenfalls zur Richtungs- und relativen Größenbestimmung der horizontalen Spannungen verwendet werden /STE 12/.

5.2.3.7.2 Tests im Bohrloch

Weitere Messungen, mit denen die Spannungsverteilung im Gebirge und elastische Parameter des Gebirges bestimmt werden können, sind keine klassischen Logging-Methoden, sondern Tests, die im Bohrloch durchgeführt werden.

Dilatometer

Für Dilatometer-Tests wird eine Sonde in ein Bohrloch hinabgelassen. Das Volumen der Sonde wird mit einem vorgegebenen Druck in mehreren Zyklen hydraulisch erhöht und wieder verringert, so dass die Sonde einen Druck auf die Bohrlochwand auf- und wieder abbaut. Gleichzeitig wird die Verformung des Bohrlochs gemessen. Druck und Deformation werden aufgezeichnet, so dass sich aus diesen Daten die elastischen Parameter einer Gesteinsformation berechnen lassen.

Überbohren (engl. „Overcoring“)

Bei der Methode des sogenannten Überbohrens wird in einem Bohrloch ein schmales Bohrloch mit geringer Tiefe erbohrt und ein Verformungsmessgerät (engl. „strain gauge“) installiert. Danach wird um dieses schmalere Bohrloch ein größeres Bohrloch mit einem Kern erbohrt. Im Kern sind somit das Gestein inklusive des schmaleren Bohrlochs und Deformationsmessgerät vorhanden. Dadurch, dass der Kern nun vom Rest des Gesteins mechanisch entkoppelt ist, wird sich der Kern verformen. Diese Deformation wird gemessen und es können so Rückschlüsse auf das Spannungsfeld gewonnen werden. Wenn die elastischen Parameter des Gesteins bekannt sind, lassen sich die Spannungen berechnen /FEC 18/, /HAK 06/, /STE 12/.

Bei Hydraulic-Fracturing-Tests /PRI 18/ wird in einem durch sogenannte Packer hydraulisch abgetrennten Bereich eines Bohrlochs in mehreren Zyklen ein hydraulischer Druck so aufgebracht, dass im Gestein Risse entstehen oder bereits bestehende Risse erneut beziehungsweise weiter geöffnet werden. Aus dem notwendigen Druck kann die minimale horizontale Spannung berechnet werden. Aus der Raumlage dieser Risse, die wiederum mit bereits beschriebenen Methoden ermittelt wird (zum Beispiel FMS oder FMI, Kapitel 5.2.3.3.1), können dann die Richtungen der beiden horizontalen Spannungen berechnet werden. Für Bohrlöcher, die sowohl verrohrt, perforiert oder auch unverrohrt sein können, werden seitens der Kohlenwasserstoff-Industrie weitere, sehr ähnliche Tests wie die sogenannten Mini-Frac Tests, Step-Rate Tests, Step-Down Tests oder Leak-Off Tests genutzt, die ebenfalls Aufschluss über die Spannungsrichtungen und -magnitude /SMI 15/ geben.

5.2.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Die Aussagekraft von Bohrlochmessungen und -tests ist insgesamt sehr hoch. Deshalb gehören vor allem die geophysikalischen Bohrlochmessungen (also das Logging) zu den

Standardverfahren, die nach oder (beim LWD) während des Bohrens genutzt werden. Anzumerken ist, dass sich diese Aussage auf die gleichzeitige Verwendung mehrerer Sonden bezieht. Die Aussagekraft einer Einzelmessung kann unter ungünstigen Messbedingungen gering sein und wird erst durch die Kombination mehrerer Sonden sehr hoch. In der Praxis werden deshalb und vor allem aus Gründen der Kosten- und Zeiterparnis mehrere Sonden (engl. „Tools“) zu sogenannten „Tool-Strings“ zusammengefasst, die mehrere Meter lang sein können. Die Planung einer Logging-Kampagne wird bereits abgestimmt auf das zu erwartende Gestein und die gewünschten Erkenntnisse. Der Einsatz von spezialisierten Fachkräften ist erforderlich. Dies spiegelt sich auch in der Auswertung der Daten wieder: Die Interpretation der Messungen erfolgt als Ganzes und erfordert ebenfalls den Einsatz hochspezialisierter Fachkräfte. In der Kohlenwasserstoff-Industrie wird diese Interpretation als „Formation Evaluation“ bezeichnet, mit dem Ziel, mit Hilfe aller verfügbaren Informationen zu einer Einschätzung bzgl. der Kohlenwasserstoffhöffigkeit zu kommen.

Die Aussagekraft der verschiedenen und einzeln durchgeführten Tests im Bohrloch (zum Beispiel Geomechanik) und der speziellen Einzelsonden (zum Beispiel Radar), die nicht dem Standard-Logging zuzuordnen sind, ist bei einer erfolgreich durchgeführten Messung hoch und wird hinsichtlich einer klar umrissenen, einzelnen Fragestellung (zum Beispiel Orientierung der Spannungen) durchgeführt, während das standardisierte Logging ganz allgemein darauf abzielt, den Untergrund geologisch zu erkunden. Insbesondere bei Bohrungen mit niedrigem Kerngewinn können dann aus diesen Messungen Rückschlüsse auf die Geologie innerhalb des Bohrlochs gezogen werden.

Sowohl bei der Planung als auch bei der Interpretation spielen die Auflösung und die Eindringtiefe der verwendeten Sonden eine Rolle. Jede Sonde basiert auf unterschiedlichen Messprinzipien und beinhaltet damit unterschiedliche Eindringtiefen. Wichtig ist, dass die Auflösung sowohl von der Geschwindigkeit der Sonden im Bohrloch beim Herausziehen oder Herablassen abhängt als auch von den Sensoren der Sonde selbst. Bei einigen Sonden ist eine hohe Sensorauflösung mit geringer Eindringtiefe beabsichtigt (zum Beispiel FMS oder FMI, Kapitel 5.2.3.3.1). Die Eindringtiefe einer Messung ist von vielen Einflussfaktoren abhängig und liegt deshalb in einem Wertebereich. In Tab. 5.4 sind die unterschiedlichen Bereiche der Eindringtiefe und ihre Einflussfaktoren für die unterschiedlichen Messverfahren angegeben.

Tab. 5.4 Eindringtiefe und ihre Einflussgrößen auf die Messmethoden

Messverfahren	Ungefährer Bereich der Eindringtiefe	Einflussgrößen (unter anderem)
<ul style="list-style-type: none"> • Laufzeitmessungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrere Zentimeter 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität • Porenfluid • Tongehalt • Gefüge (zum Beispiel Klüfte) • kaum sensitiv auf Bohrlochdurchmesser
<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochseismik 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrere 10er Meter bis Kilometer 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesteinsfestigkeit (Lockergesteine wirken dämpfend)
<ul style="list-style-type: none"> • Gravimetrische Messverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Messung eines Feldes; Eindringtiefe nicht anwendbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitiv auf weitere entfernte große Massen
<ul style="list-style-type: none"> • Widerstands- und Leitfähigkeitsmessungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zentimeter bis Dezimeter 	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochgröße • Bohrspülung • Porenfluid • Tongehalt
<ul style="list-style-type: none"> • Potentialmessungen 		
<ul style="list-style-type: none"> • Ausbreitungsmessungen 		
<ul style="list-style-type: none"> • Magnetische Messungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Messung eines Feldes, Eindringtiefe nicht anwendbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrspülung • Sondenmaterial • Erdmagnetfeld
<ul style="list-style-type: none"> • Kernspinspektroskopie (NMR) 		
<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochradar 	<ul style="list-style-type: none"> • Zehnermeter bis Kilometer 	<ul style="list-style-type: none"> • Art des Gesteins
<ul style="list-style-type: none"> • Natürliche Radioaktivität 	<ul style="list-style-type: none"> • Zentimeter bis Dezimeter 	<ul style="list-style-type: none"> • „mud-cake“ • Bohrlochausbrüche
<ul style="list-style-type: none"> • Sonden mit ionisierender Strahlung 		
<ul style="list-style-type: none"> • Abbildungen der Bohrlochwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Direkt an der Bohrlochwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrspülung
<ul style="list-style-type: none"> • Optische Sensoren 	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Messung am Ort 	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrspülung
<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochdurchmesser 	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochausbrüche
<ul style="list-style-type: none"> • Tests in Bohrlöchern 	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Messung am Ort 	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochausbrüche

5.2.5 Aufwand

Der Aufwand für eine Bohrung ist bereits sehr hoch, der zusätzliche Aufwand für Bohrlochmessungen und -tests steigert diesen nochmals. Insgesamt ist der Aufwand für Personal, Geräte und die damit verbundenen Kosten variabel und hängt von zahlreichen Faktoren ab /KNÖ 05/:

- Messprogramm (also verwendete Sonden und durchgeführte Tests),
- Anzahl der durchgeführten Teufenfahrten (Absenken und Herausziehen),
- Teufe des Bohrlochs (Kosten pro gemessenem Meter),
- Technische Aufwendungen, zum Beispiel geneigte Bohrungen und Sonderwünsche sowie
- Interpretation für einzelne Bohrung oder für mehrere Bohrungen um oder an einem Objekt.

5.2.6 Kombinationsmöglichkeiten von Bohrlochmessungen und -tests mit anderen Methoden

Wie bereits erwähnt ist zur Interpretation der Bohrlochmessungen die Kombination der Messverfahren unerlässlich, da einzelne Messergebnisse für die Korrektur anderer Messungen erforderlich sind. Die Aussagekraft einer einzelnen Sondenmessung wird durch die Kombination mit den Resultaten anderer Messungen deutlich aussagekräftiger.

Die Kombination von Bohrlochmessungen und gewonnenen Kernen kann dazu genutzt werden, die gemessenen Daten anhand der Kerne zu kalibrieren und zu verifizieren. Das ermöglicht insbesondere eine verbesserte Zuordnung der Lithologie für Bohrungen, in denen wenig beziehungsweise nicht gekernt wurde. Bei Bohrungen, in denen ungeplant nur ein geringer Kerngewinn vorlag oder nur abschnittsweise gekernt wurde, können Bohrlochmessungen wichtige ergänzende Erkenntnisse liefern.

Eine weitere wichtige Kombinationsmöglichkeit, die in der Regel auch Anwendung findet, ist die Kalibration mit gesteinsphysikalischen Messungen sowie boden- und felsmechanischen Untersuchungen im Labor. Dort werden analog zu Messungen im Bohrloch sehr ähnliche, zum Beispiel akustische und elektrische Messungen an Bohrkernen durchgeführt, so dass die im Labor gemessenen Werte mit den in-situ gemessenen Werten verglichen werden können. Auch dazu sind gekernte Bohrungen notwendig. Messungen und Versuche an Kernen werden in Kapitel 6 beschrieben.

Die Kombination von Bohrlochmessungen mit flächenhaften, seismischen Methoden kann zur Kalibration und Verifikation der Teufenlage von Lithologie und Struktur des Untergrunds genutzt werden.

5.2.7 Alternative Methoden

Eine Alternative zu Bohrlochmessungen und -tests existiert nur in Form von vollständig gekernten Bohrungen und den damit verbundenen Laboruntersuchungen, die einen insgesamt erhöhten Aufwand im Vergleich zu Untersuchungen im Bohrloch bedeuten. Der Vorteil von Bohrlochmessungen und -tests ist, dass die Daten in-situ erhoben werden.

5.2.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Für Untersuchungen in Bohrlöchern ist unterschiedlichste Literatur aus verschiedenen Themenbereichen der Geowissenschaften vorhanden. Ein Themenbereich ist die klassische Bohrlochgeophysik, also das „Logging“. Ein weiterer Themenbereich fällt eher in den Bereich der Ingenieurgeologie (zum Beispiel geomechanische Tests). Daneben gibt es weiterführende Literatur für spezielle Bohrlochsonden, die aber selten oder gar nicht in Lehrbuchform vorliegen. Diese Abgrenzung spiegelt sich auch in der Zusammenstellung der verschiedenen Fachgesellschaften wieder. Ein Überblick für weiterführende Informationen ist in Tab. 5.5 dargestellt.

Die grundlegendste Weiterentwicklung, die das gesamte Verfahren von Bohrlochuntersuchungen beeinflusst hat, war der Fortschritt des Logging-While-Drilling (LWD)-Verfahrens in den 80er und 90er Jahren des 20. Jahrhunderts. Der Einsatz von LWD-Verfahren kann aus mehreren Gründen sinnvoll sein. Ein Grund ist, eine mögliche Kosten- oder auch Zeitersparnis bei den sehr aufwändigen Bohrlochmessungen zu erreichen. Andere Gründe sind technischer Art, beispielsweise dann, wenn mit Bohrlochausbrüchen zu rechnen ist oder wenn das Bohrloch zu stark abgelenkt ist, so dass möglicherweise kein Wireline-Logging durchgeführt werden kann.

Daneben ist die Entwicklung vom Fortschritt einzelner Messmethoden (wie der NMR) und der Weiterentwicklung der Sensortechnik geprägt. Bei letzterem zeigt sich ein Trend zur Verwendung von Glasfasertechnik zur Telemetrie von Bohrlochdaten /HEN 17/. An neueren Techniken, wie der Übertragung durch feste Kabel in den Bohrwerkzeugen und Bohrgestängen, oder der Anwendung der spektral induzierten Polarisierung im Bohrloch (SIP, siehe auch Kapitel 4.2.4.3.3), wird geforscht.

Im Rahmen der Interpretation von Bohrlochmessungen und -tests kann auch hier ein Trend zur automatisierten und computergestützten Auswertung beobachtet werden. Teilweise werden dabei Werkzeuge eingesetzt, die die qualitative Bewertung von Daten erleichtern (zum Beispiel Bilderkennungssoftware bei FMS). Teilweise ist aber auch die Anwendung von komplexen dreidimensionalen Modellen erforderlich, um eine Auswertung durchführen zu können (zum Beispiel Bohrlochradar).

Tab. 5.5 Weiterführende Informationen zu Bohrlochmessungen und -tests

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels /FEC 18/ • Ingenieurgeologie /PRI 18/ • Principles and Applications of Well Logging /LIU 17/ • Hydraulic Fracturing /SMI 15/ • Ingenieurgeologie /GEN 15/ • Well Logging for Earth Scientists /ELL 10/ • Geophysik /KNÖ 05/ • Praktische Bohrlochgeophysik /FRI 99/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • PetroWiki /SPE 18c/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG) • Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) • International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) • International Ocean Discovery Program (IODP) • International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM) • Leibniz Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) • Society of Exploration Geophysicists (SEG) • Society of Petroleum Engineers (SPE) • Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)
Zuständige Behörden	<ul style="list-style-type: none"> • Bergämter der Bundesländer
Internationale (inklusive geplante) Anwendung von Bohrlochmessungen und -tests im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Belgien /VAN 14/ • Finnland /LAT 05/ • Frankreich /MAR 07/ • Japan /NUMO 13/ • Kanada /NWMO 16a/, /NWMO 16b/ • Schweden /SKB 00/ • Schweiz /NAG 01/, /NAG 18/ • USA /NEL 14/

6 Labor

Zur Charakterisierung der Gesteinseigenschaften werden weitere Untersuchungen an den Bohrkernen selbst, an Proben (sogenannte „Plugs“) aus den Bohrkernen oder gegebenenfalls auch am Bohrklein im Labor durchgeführt. Die hier behandelten (vergleiche Kapitel 2.1) Laboruntersuchungen umfassen petrografische, boden- und felsmechanische, petrophysikalische und geochemische Verfahren zur Untersuchung der Gesteinseigenschaften. Die Messungen an Bohrkernen werden zudem zur Verifizierung beziehungsweise Korrelation insbesondere von einigen (zum Beispiel elektrischen) Untersuchungsergebnissen der Bohrlochmessungen herangezogen.

Bei der Ermittlung von Gesteinseigenschaften an Bohrkernen besteht die Gefahr, dass die Proben irreversible Deformationen durch die Entnahme erfahren haben und/oder die in-situ-Bedingungen durch die Lagerung (Oxidation, Wasserverlust, Austrocknung, schichtparalleler Zerfall etc.) verändert sind. Gegebenenfalls müssen während der Bohrung Maßnahmen zur Konservierung der Kerne erfolgen, so dass diese für Laboruntersuchungen weitgehend unverändert und unbeeinflusst zur Verfügung stehen.

Im Rahmen geowissenschaftlicher Laboruntersuchungen stellt sich generell die Frage nach der sogenannten Skalierbarkeit, das heißt der Übertragbarkeit von Laboruntersuchungen auf die geologische Situation in-situ, also dem Ort, an dem das Gestein tatsächlich vorhanden ist.

Für die Laboruntersuchungen sind Proben erforderlich, die aus erbohrten Kernen gewonnen werden. Eine Bohrung beeinflusst die Unverritzttheit des Gebirges in der näheren Umgebung (dm bis m) des Bohrlochs (siehe Kapitel 5). Keine der Laboruntersuchungen beeinflusst einen potenziellen Endlagerstandort oder seine nähere Umgebung negativ.

6.1 Petrografie und Mineralogie

6.1.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Petrografie und Mineralogie	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none">• Lichtmikroskopie• Elektronenmikroskopie• Lumineszenz<ul style="list-style-type: none">○ Thermolumineszenz○ Fotolumineszenz○ Kathodenlumineszenz• Spektroskopie<ul style="list-style-type: none">○ Reflexions-/Transmissionsspektroskopie○ Fluoreszenzspektroskopie• Röntgendiffraktometrie• Gasvolumetrie
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Qualitative und quantitative mineralische Zusammensetzung der Gesteine• Lithologie/Gesteinsart
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none">• Einzelmessungen haben nur bedingte Aussagekraft für eine gesamte Gesteinsformation, für einzelne Proben ist die Aussagekraft der Untersuchung hoch• Für die Übertragbarkeit auf in-situ Bedingungen sind Faktoren wie Repräsentativität und Skalierbarkeit zu berücksichtigen
Aufwand	<ul style="list-style-type: none">• Die erforderliche Bohrung ist zeit-, kosten- und personalintensiv• Zum Teil aufwendige Probenvorbereitung notwendig
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Gesteinsansprache bei der Kartierung und am Bohrungsaufschluss• Bohrlochmessungen• Boden- und felsmechanische Messverfahren
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none">• Nur qualitative Methoden, die eine Einschätzung und eine Einordnung bzgl. der Gesteinsklassifikation und Modalanalyse erlauben (zum Beispiel feldgeologische und Bohrloch-/Bohrkernbeschreibungen)
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Anzahl der möglichen Messungen: Methoden sind teilweise zerstörungsfrei, so dass die Proben unter Umständen nur einmal genutzt werden können• Repräsentativität der Proben

6.1.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Die Petrografie im Labor gehört zu den klassischen Methoden der Geowissenschaften. In Analogie zur geologischen Kartierung im Feld oder zur Bohrkern-/Bohrkleinansprache

werden die Gesteine in ihrer Struktur und Textur, also in ihrer Zusammensetzung und ihrem Gefüge näher charakterisiert und bestimmt. Gegenüber der qualitativ beschreibenden feldgeologischen Aufnahme im Gelände oder am Bohrort ermöglicht die quantitative petrografische Analyse des Gesteins eine eindeutige Zuordnung zur Gesteinsart. Quantitative Analysen (Körner, Minerale, Porenraum, Mikrofossilien) können durch automatisierte Bildbearbeitungs- oder klassische Zählmethoden unter Anwendung der mikroskopischen Messverfahren erfolgen. Die quantitative Ermittlung des Mineralbestands wird als Modalanalyse bezeichnet, hier sind Verwechslungen mit der Modalanalyse der Petrophysik (Kapitel 6.3) möglich.

Aufgrund der Vielzahl der einzelnen zur Petrografie zugehörigen Messverfahren sind in Tab. 6.1 die in den Unterkapiteln der technischen Ausführung näher beleuchteten Messverfahren und der gemessene Parameter beziehungsweise der Erkenntnisgewinn gegenübergestellt.

Tab. 6.1 Gegenüberstellung von petrografischen Messverfahren und potenziell zu gewinnender Erkenntnis

Messverfahren	Erkenntnis oder gemessener Parameter
<ul style="list-style-type: none"> • Polarisationsmikroskopische Untersuchung im Durchlicht und Auflicht 	<ul style="list-style-type: none"> • Modalanalyse: Mineralgehalt, Mineralart • Porosität, Porenraumermittlung • Anzahl und Art der Mikrofossilien • Kornbestand
<ul style="list-style-type: none"> • Vitritreflexion 	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil von organischem Material, Inkohlungsgrad
<ul style="list-style-type: none"> • Elektronenmikroskopie 	<ul style="list-style-type: none"> • Mineralogie, Modalanalyse
<ul style="list-style-type: none"> • Thermolumineszenz und optisch stimulierte Lumineszenz (OSL) 	<ul style="list-style-type: none"> • Datierung (Sedimentations-, Abkühlungs-, Kristallisations- bzw. Umlagerungsalter)
<ul style="list-style-type: none"> • Fotolumineszenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Modalanalyse
<ul style="list-style-type: none"> • Kathodolumineszenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Modalanalyse • Analyse der Kristallchemie • Mineralbildung und -umwandlung (Alteration)
<ul style="list-style-type: none"> • Reflexions-/Transmissionsspektroskopie 	<ul style="list-style-type: none"> • Modalanalyse
<ul style="list-style-type: none"> • Fluoreszenzspektroskopie 	<ul style="list-style-type: none"> • Modalanalyse

Messverfahren	Erkenntnis oder gemessener Parameter
<ul style="list-style-type: none"> • Röntgendiffraktometrie 	<ul style="list-style-type: none"> • Kristallstrukturen • Modalanalyse • Zusammensetzung und Winkligkeit von Mineralen • Verteilung, Textur und Porosität von Mineralen
<ul style="list-style-type: none"> • Gasvolumetrische Analyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Karbonatgehalt

6.1.3 Technische Ausführung

Die Vielzahl der petrografischen und mineralogischen Messmethoden macht es notwendig, die technische Ausführung der Methoden detailliert in weiteren Unterkapiteln zu betrachten.

6.1.3.1 Lichtmikroskopie

6.1.3.1.1 Polarisationsmikroskopische Untersuchungen im Durchlicht und Auflicht

Die polarisationsmikroskopische Untersuchung von Mineralen, Gesteinen, Erzen und Fossilien im Durchlicht und Auflicht (zum Beispiel /RAI 11/, /SPE 00a) ist eine klassische mineralogische/geowissenschaftliche Untersuchungsmethode. Sie ermöglicht es, feste Substanzen (kristallin, amorph, Körner, Mikrofossilien) mit relativ hoher Ortsauflösung in ihrem Aggregatverband meist sicher zu identifizieren, ihre Zusammensetzungen abzuschätzen (beziehungsweise durch geeignete Zählmethoden zu quantifizieren) und darüber hinaus aus den Gefügemerkmalen des Materials (Struktur, Textur, Phasenbestand, Phasenbeziehungen, Reaktionstexturen etc.) wichtige Hinweise auf dessen Bildungsgeschichte abzuleiten. Gemessen werden mit einem Polarisationsmikroskop hierbei die optischen Eigenschaften der Kristalle, unter anderem zum Beispiel Lichtbrechung, Doppelbrechung, Reflexion, Dispersion, Absorption, Pleochroismus, etc., wofür spezielle technische Zusatzeinrichtungen verwendet werden. Für die Durchlichtmikroskopie werden meist Dünnschliffe mit einer Dicke von 20 bis 30 µm (Mikrometer) aus Gesteinen, Mineralen oder Kristallen hergestellt und auf einem Glasobjektträger unter dem Polarisationsmikroskop untersucht. Es können jedoch auch feinkörnige Substanzen zur optischen Untersuchung auf Glasobjektträgern in Flüssigkeiten mit bekanntem Brechungsquotienten untersucht werden. Polarisationsmikroskopische Untersuchungen können zeitaufwendige und teurere Analysen (RDA, RFA, AAS, siehe unten) teilweise ersetzen oder gegebenenfalls ergänzen. Sie gelangen jedoch an Grenzen, wenn zum Beispiel die

chemische Zusammensetzung komplexer Mischphasen genau bestimmt werden muss oder die Feinkörnigkeit des Materials eine Bestimmung der einzelnen Phasen nicht mehr zulässt. Auch Aussagen über die Struktur des Porenraums lassen sich mittels Dünnschliffen und Mikroskopie im Durchlicht treffen /BRA 08b/.

Lichtundurchlässige (opake) Minerale wie zum Beispiel Erzminerale, Metalle oder opake Kristalle können unter dem Lichtmikroskop als polierte Anschliffe im Auflicht mit reflektierendem Licht untersucht werden. Insbesondere bei der Erz- und Kohlenmikroskopie wird eine solche Auflicht-/Reflexionsmikroskopie angewendet. Auch für die Auflichtmikroskopie werden in der Regel Dünnschliffpräparate hergestellt, die dann qualitativ (Kornform, Farbe, Reflexionsvermögen, Isotropie/Anisotropie, relative Härte) und quantitativ (Vickers-Härte, spektrales Reflexionsvermögen) untersucht werden können. Ziel ist hier in der Regel eine eindeutige Diagnose der zu untersuchenden Minerale zu erhalten /CRA 94/, /SPE 00b/.

Eine große Anzahl optischer Untersuchungen an Dünnschliffpräparaten und Erzanschliffen lässt sich automatisiert mit entsprechenden Geräten zur Bildanalyse durchführen (zum Beispiel /MŁY 13/). Hierzu zählen beispielsweise die komplette qualitative und quantitative Mineralphasenanalyse, die Ermittlung der Mineralzusammensetzung, Korngrößenanalysen, Rundungs- und Sphärizitätsuntersuchungen /SPE 00b/.

6.1.3.1.2 Vitritreflexion

Die Methode der Vitritreflexion nutzt aus, dass sich bestimmte organische Materialien (sogenannte Mazerale) unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen (also letztlich während der Verfestigung der Gesteine mit zunehmender Teufe) mikroskopisch besonders verhalten: Je höher die Druck- und Temperaturbedingungen für das Gestein gewesen sind, desto stärker reflektieren diese Mazerale das Licht, das auf sie fällt. Der Reflexionsgrad kann gemessen werden. Damit kann im Umkehrschluss bestimmt werden, welchen die Druck- und Temperaturbedingungen das Gestein ausgesetzt war. Aus technischer Sicht ist diese Methode eine Auflicht-Methode, gegebenenfalls kann auch polarisiertes Licht verwendet werden.

6.1.3.2 Elektronenmikroskopie

Die Elektronenmikroskopie ermöglicht gegenüber der Lichtmikroskopie deutlich höhere Auflösungen und damit einhergehend eine stärkere Vergrößerung. Es können zwei Arten von Elektronenmikroskopen unterschieden werden. Dies sind das Transmissions-

Elektronen-Mikroskop (TEM) und das Raster-Elektronen-Mikroskop (REM, engl. „scanning electron microscope“, SEM). Beide basieren messtechnisch auf unterschiedlichen Prinzipien und erfordern jeweils eine unterschiedliche Vorbereitung der zu untersuchenden Proben. Das TEM ähnelt von seinem Aufbau her dem klassischen Lichtmikroskop, vereinfacht gesagt wird der Probenkörper mittels Elektronen „durchleuchtet“. Beim REM dagegen wird der Probenkörper eher „abgetastet“, so dass eine mit dem REM auch eine dreidimensionale Oberflächenstruktur abgebildet werden kann. Mit beiden Verfahren ist man in der Lage, einzelne Kristalle und Poren auf der nm-Skala sichtbar zu machen (siehe Abb. 6.1), wobei nach /CUR 13/ die Auflösung von einem TEM höher ist.

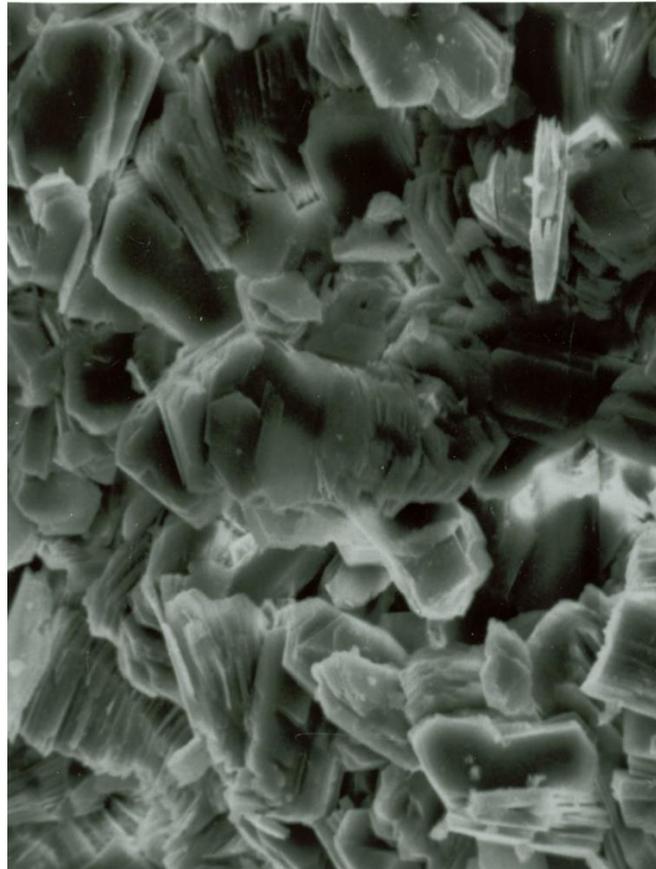


Abb. 6.1 Beispiel einer Rasterelektronenmikroskop (REM - Aufnahme eines Tones mit dem Tonmineral Kaolinit (nach /USGS 83/, genauer Maßstab unbekannt). Jedes einzelne Plättchen ist ein Kaolin-Mineral.

Da die zu untersuchende Probe störende Oberflächenunebenheiten aufweisen kann, werden auch sogenannte Ionenfräswerkzeuge (engl. „Focussed Ion Beam“, FIB) mit REM-Geräten gekoppelt, die die Herstellung von polierten Querschnitten für die hochauflösende REM-Bildgebung von Poren bis hin zum Nanometer-Bereich ermöglichen /JOS 12/.

6.1.3.3 Lumineszenz

Lumineszenz bezeichnet die Emission von elektromagnetischer Strahlung (zum Beispiel sichtbarem Licht) eines Materials nach vorheriger Anregung durch Energieabsorption /GÖT 02/. Wenn die Energie, die absorbiert wird, selbst als elektromagnetische Strahlung einer bestimmten Wellenlänge vorlag, ist die Wellenlänge des emittierten Lichts länger als die der absorbierten Strahlung, also energieärmer. Sehr kurze Lumineszenz wird als Fluoreszenz, etwas länger (bis zu Sekunden) dauernde Lumineszenz als Phosphoreszenz bezeichnet.

6.1.3.3.1 Thermolumineszenz und optisch stimulierte Lumineszenz

Datierungen nach dem Prinzip der Lumineszenz-Methode ermöglichen die Altersbestimmung von klastischen Sedimenten und sind entsprechend unabhängig von organogenen Bestandteilen der Proben. Grundsätzlich werden zwei Arten von Lumineszenz-Datierungen unterschieden:

- Thermolumineszenz (TL: Stimulation durch Hitzeeinwirkung)
- Optisch Stimulierte Lumineszenz (OSL: Stimulation durch Licht)

Infrarotstrahlung findet bei der OSL Anwendung in der Stimulation von Feldspäten, während die Quarzkörner eines Probenmaterials durch blaues Licht stimuliert werden. Generell datiert die optisch stimulierte Lumineszenz den Zeitpunkt der letzten Tageslicht-Exposition eines Mineralkorns im Verlauf seiner Sedimentationsgeschichte. Dieses kann den Augenblick der Ablagerung, des Transportes oder beispielsweise der Erosion widerspiegeln. Bei fortlaufender Sedimentation konserviert das Mineralkorn den Moment der letzten Exposition bis zum dem Zeitpunkt, an dem das Mineralkorn dem Tageslicht erneut ausgesetzt wird (also für die Datierung der Zeitpunkt der Stimulation im Labor). Geeignet ist die Altersbestimmung mithilfe der OSL-Methode für Sedimente zwischen wenigen Jahren (Zehnerjahren) bis maximal 500.000 Jahren.

6.1.3.3.2 Fotolumineszenz

Die Fotolumineszenz (häufiger: Photolumineszenz) bezeichnet als Oberbegriff in der Mineralogie die Phänomene der Lumineszenz bei Anregung durch Licht, häufig mit UV-Licht /SCH 18b/. Dabei weisen einige Minerale ein charakteristisches Spektrum auf, so dass sie mit spektrometrischen Methoden unterscheidbar sind. Die meisten Minerale weisen keine Fotolumineszenz auf /SCH 18b/, so dass diese Methode als quantitative Methode nicht weit verbreitet ist.

6.1.3.3.3 Kathodolumineszenz

Bei der Kathodolumineszenz-Methode treffen in einer Vakuumkammer Elektronen auf eine Gesteinsoberfläche, so dass die Minerale zur Lumineszenz angeregt werden. Üblicherweise ist die Kathodolumineszenz mit der Mikroskopie gekoppelt um den Effekt zu beobachten. Die Kopplung mit einem Lichtmikroskop wird dann als Kathodolumineszenzmikroskop bezeichnet, die Kopplung mit einem Elektronenmikroskop wird als Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMS) bezeichnet. Diese Methoden werden in der Mineralogie sehr häufig eingesetzt. Nach /GÖT 02/ sind wichtige Einsatzbereiche die Identifizierung und Quantifizierung verschiedener Mineralphasen in Gesteinen, die Analyse der Kristallchemie, die mikrostrukturelle Charakterisierung von Gesteinen sowie die Rekonstruktion von Prozessen der Mineralbildung und -umwandlung (Alteration).

6.1.3.4 Spektroskopie

In der Petrografie werden unterschiedliche spektroskopische Methoden genutzt. Dazu gehören die Reflexions- beziehungsweise Transmissionsspektroskopie und die Fluoreszenzspektroskopie.

6.1.3.4.1 Reflexions-/Transmissionsspektroskopie

Diese Methoden nutzen die natürliche Eigenschaft von Materialien elektromagnetische Strahlung bestimmter Wellenlängen unterschiedlich stark zu absorbieren beziehungsweise zu reflektieren /SCH 04a/. Das Spektrum eines Gesteins beziehungsweise Minerals, welches entweder durch die Messung der Reflexion oder Transmission bestimmt wird, besitzt Merkmale, die eine Aussage über die mineralogische beziehungsweise chemische Zusammensetzung erlauben. Unterschiedliche Mechanismen auf atomarer Skala, deren Darstellung an dieser Stelle zu weit ginge, verursachen die Merkmale dieses Spektrums und sind auch abhängig von der Anregung, also der Lichtquelle. Häufig findet sich der Wellenlängenbereich der Lichtquelle als Kürzel im Namen der speziellen spektroskopischen Methode. Einen kurzen Überblick über spektroskopische Methoden und deren Einsatzbereich gibt /MAR 15/. Die Untersuchung der spektralen Eigenschaften von Mineralen und Gesteinen erfolgt in den Spektralbereichen des sichtbaren (VIS), des infraroten (IR) und des ultravioletten (UV) Lichts. Kombinationen wie UV/VIS oder das Kürzel NIR für den kurzwelligen Bereich des infraroten Lichts sind ebenfalls anzutreffen. Die sogenannte Raman-Spektroskopie nutzt monochromatisches Licht (Laser) mit unterschiedlichen Wellenlängen. Die sogenannte Mößbauer-Spektroskopie nutzt Gamma-Strahlung und kann zur Detektion von insbesondere Eisen- und Zinn-haltigen

Mineralen/Erzen genutzt werden. Das häufig anzutreffende Kürzel FT (zum Beispiel bei FTIR-Spektroskopie) steht für Fourier-Transformation und bezeichnet einen Teil der heute üblichen Auswertemethode mittels eines sogenannten Interferometers und der erforderlichen Umrechnung des Messergebnisses mittels einer Fourier-Transformation.

6.1.3.4.2 Fluoreszenzspektroskopie

Bei der Fluoreszenzspektroskopie wird sich der Effekt der Lumineszenz (siehe oben) von Materialien zu Nutze gemacht. Das Spektrum des vom untersuchten Material ausgesandten Lichts ist materialspezifisch. Bei der Röntgenfluoreszenzspektroskopie oder auch Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, engl. „X-ray fluorescence spectroscopy“, XRF) wird Röntgenstrahlung zur Anregung des Materials genutzt. Die Röntgenstrahlen werden absorbiert. Diese Methode kann bei Gesteinen, Mineralien und Flüssigkeiten angewendet werden. Die zu analysierenden Proben werden oft gemahlen, zu Tabletten gepresst und analysiert. Im Prinzip kann sie aber zerstörungsfrei auf alle glatten Oberflächen angewendet werden.

6.1.3.5 Röntgendiffraktometrie

Die Röntgenpulverdiffraktometrie (RDA) ist eine Standardmethode zur Charakterisierung der Mineralzusammensetzung von Gesteinen. Die Proben müssen vor der Analyse zu einem Pulver zermahlen und entsprechend aufbereitet werden. Mit Hilfe dieser Methode können die Minerale identifiziert (qualitative Phasenanalyse) und das Gestein in seiner Mineralzusammensetzung quantifiziert (quantitative Phasenanalyse) werden.

Mit der Methode der Röntgendiffraktometrie (engl. „X-Ray Diffraction“, XRD, ausführlich beschrieben unter anderem in /SPI 09/, /BIR 09/) werden die Gittereigenschaften der Kristalle in Gesteins- oder Bodenproben untersucht. Röntgenstrahlung (also elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von ca. 10^{-8} bis 10^{-13} m) liegt in einem ähnlichen Größenbereich wie die Atomabstände in Kristallgittern. Durch unterschiedliche Brechung und Reflexion der Röntgenstrahlen (Bragg'sche Gleichung) an den Kristallstrukturen kann die Mineralzusammensetzung einer Probe durch die Messung der Netzebenenabstände untersucht werden. Durch einen Vergleich der mit dem Röntgendiffraktometer erhaltenen Daten mit einer Datenbank, in der die entsprechenden Daten aller bekannten Minerale verzeichnet sind, lässt sich die spezifische Mineralzusammensetzung der untersuchten Probe ermitteln.

6.1.3.6 Gasvolumetrische Analysen (Scheibler-Methode)

Die gasvolumetrische Analyse nach Scheibler ist eine standardisierte Methode zur Bestimmung des Karbonatgehaltes von Boden- oder aufgemahlene Gesteinsproben. Ihre Anwendung wird unter anderem in der DIN 18 129 /DIN 11a/ beschrieben. Dabei wird das Volumen des bei der Reaktion der Probe mit Salzsäure freigesetzten Kohlendioxids in einem Gasometer gemessen. In Kenntnis der Reaktionsgleichung von Karbonat und Salzsäure (Kalk-Kohlensäure Gleichgewicht) kann aus dem Volumen des freigesetzten Kohlendioxidgases der Massegehalt an Karbonat der Bodenprobe bestimmt werden. Eine rechnergestützte Methode zur Bestimmung des Gesamtkarbonatgehaltes wurde von /KLO 94/ entwickelt und mittlerweile weiterentwickelt.

6.1.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Bezogen auf eine einzelne Analyse ist die Aussagekraft der petrografischen Untersuchungen hoch. Für eine einzelne Probe kann mit den beschriebenen Methoden das zu untersuchende Gestein sehr genau (quantitativ) bzgl. des Korn-, Mineral und Mikrofossilienbestands charakterisiert werden. Bezogen auf eine Gesamtaussage bzgl. einer Formation hat eine einzelne Messung potenziell nur geringe Aussagekraft. Hier stellt sich die Frage, ob oder wie sehr eine zu untersuchende Probe repräsentativ für die gesamte Gesteinsformation ist. Falls eine Vielzahl von Proben verfügbar ist, oder belegt werden kann, dass ein hohes Maß an Repräsentativität vorliegt, können auch wenige Messungen eine hohe Aussagekraft aufweisen.

Bei der Aussagekraft von Labormessungen stellt sich die Frage, inwieweit sich die Erkenntnisse, die im Labor für eine kleine Probe gewonnen wurden auch auf das Gestein in-situ übertragen lassen (die sogenannte „Skalierbarkeit“), auch wenn diese Probe repräsentativ für eine Formation sein sollte. Diese Frage der Skalierbarkeit hat besondere Bedeutung für die Petrophysik und für die Boden- und Felsmechanik, für die Petrografie spielt sie eine untergeordnete Rolle.

Besondere Wichtigkeit erlangt die Petrografie bei der Korrelation von Formationen an mehreren Lokationen, zum Beispiel falls an mehreren Bohrungen Kerne gewonnen wurden. Hier können laterale Änderungen (Korn-, Mineral und Mikrofossilienbestand) in der Formation quantifiziert werden.

Petrografische Methoden sind nur teilweise zerstörungsfrei. Wenn Methoden angewendet werden, bei denen der Probenkörper zerstört (zum Beispiel für Dünnschliffe zersägt)

wird, sind die Proben in der Regel nicht für weitere Versuche/Methoden nutzbar. Andererseits sind für petrografische Methoden in der Regel nur kleine Probenmengen erforderlich. Insgesamt ist deshalb die Anzahl der zu untersuchenden Proben eine einschränkende Randbedingung.

6.1.5 Aufwand

Bei vielen der beschriebenen Methoden ist der Aufwand insgesamt hoch. Üblicherweise müssen die zu untersuchenden Proben für jede Messung auf unterschiedliche Art und Weise vorbereitet werden, zum Beispiel durch die Entnahme von kleineren Probenkörpern aus den Kernen, Trocknung, Sägen, Schleifen, Polieren, Mahlen, etc.. Diese Vorbereitung muss ebenfalls dokumentiert werden. Auf den Portalseiten der Staatlichen Geologischen Dienste /SGD 18b/ sind Verzeichnisse vorhanden, die zeigen welche Maßnahmen gegebenenfalls durchgeführt werden können. Zur Vorbereitung der Proben ist qualifiziertes Fachpersonal notwendig. Insbesondere lichtmikroskopische Methoden gehören zu Standardverfahren bei der petrografischen Analyse von Gesteinen.

Die Anschaffung der Messgeräte und deren Instandhaltung sind kostenintensiv. Diese Geräte können ebenfalls nur von ausgebildetem Fachpersonal bedient werden. Für petrographische Untersuchungen sind spezialisierte Unternehmen oder auch Institute an Universitäten erforderlich.

Für petrografische Untersuchungen kann es gegebenenfalls erforderlich sein, am Ort der Bohrung umfangreiche Konservierungsmaßnahmen für die erbohrten Kerne vorzuhalten.

6.1.6 Kombinationsmöglichkeiten der Petrografie mit anderen Methoden

Petrografische Methoden ergänzen die qualitative geologische Aufnahme im Feld (Kapitel 4.1.1), am Bohrungsaufschluss (Kapitel 5.1) und im Bohrloch (Kapitel 5.2) um den quantitativen Aspekt. Damit bilden diese Methoden die Grundlage einer quantitativen und eindeutigen Gesteinsklassifikation und die Interpretationsbasis für alle weiteren Untersuchungen. Da die Petrografie eine sicherere Identifizierung von Korngröße und -verteilung, Mineralbestand und Mikrofossilbestand möglich macht, erfolgt auf dieser Basis eine eindeutige Zuordnung der jeweiligen Lithologie zu den Ergebnissen aus verschiedenen weiteren Laboruntersuchungen. Zusätzlich können beispielsweise Methoden der Boden- und Felsmechanik (wie Kornanalysen, Kapitel 6.2.3.1) mit der Petrografie kombiniert werden, um Untersuchungsergebnisse beider Methoden jeweils zu verifizieren.

6.1.7 Alternative Methoden

Quantitative Methoden, die einen Ersatz für die beschriebenen Methoden bilden, sind nicht vorhanden. Qualitative Methoden, die eine Einschätzung und eine Einordnung bzgl. der Gesteinsklassifikation und Modalanalyse erlauben, sind die feldgeologischen Beschreibungen bei einer geologischen Kartierung (Kapitel 4.1.1), am Bohrungsaufschluss (Kapitel 5.1) sowie von die Ergebnisse von Messungen im Bohrloch (Kapitel 5.2).

6.1.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Die Petrografie als Wissenschaft profitierte im 20. Jahrhundert von technischen Weiterentwicklungen wie der Elektronenmikroskopie und der Spektroskopie. Zurzeit werden Entwicklungen der sogenannten Kryoelektronenmikroskopie (Nobelpreis für Chemie 2017) auch für Gesteine angewendet. Gerade weil die Petrografie als Grundlage der Gesteinsklassifikation dient, gibt es keine Fachgesellschaft oder Zeitschrift, die sich ausschließlich mit ihr befasst. Fachgesellschaften und Zeitschriften konzentrieren sich auf die Petrologie, also der Wissenschaft von der Entstehung und Herkunft der Gesteine, dazu liefert die Petrografie die Basis und das Handwerkszeug. Insofern sind in Tab. 6.2 auch Referenzen zur Petrologie erfasst.

Tab. 6.2 Weiterführende Informationen zu Petrografie im Labor

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Minerale und Gesteine /MAR 15/ • Gesteinskunde /SEB 14/ • Bodenkundliches Praktikum /BLU 11/ • Leitfaden zur Dünnschliffmikroskopie /RAI 11/ • Moderne Röntgenbeugung /SPI 09/ • Thin film analysis by X-Ray scattering /BIR 09/ • Ore microscopy and ore petrography /CRA 94/ • Anleitung zur Erzmikroskopie /MUE 89/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Mineralienatlas /SCH 18b/ • Lexikon der Geowissenschaften /SPE 00c/

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Deutsche Mineralogische Gesellschaft (DMG) • International Mineralogical Association (IMA) • Journal of Petrology (Verlag Oxford Academic) • Petrology (Verlag Springer Science) • Journal of Sedimentary Research (Verlag GSW Publishers) • Computers & Geosciences (Elsevier)
Zuständige Behörden	<ul style="list-style-type: none"> • Staatliche Geologische Dienste (2018) /SGD 18b/
Internationale Anwendung der Petrografie im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Belgien /CRA 04/, /VAN 14/ • Finnland /GEH 07/ • Japan /OTA 11/ • Kanada /CRU 17/ • Schweden /SKB 00/ • Schweiz /NAG 01/, /NAG 18/ • UK /NDA 11/ • USA /NEL 14/

6.2 Boden- und Felsmechanik

6.2.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Boden- und Felsmechanik	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none"> • Kornanalysen • Pyknometrie • Porosimetrie <ul style="list-style-type: none"> ○ Gasadsorption ○ Quecksilberdruckporosimetrie • Mechanik <ul style="list-style-type: none"> ○ Druckversuche ○ Zugversuche ○ Scherversuche ○ Quelldruckversuche ○ Kriechversuche
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Korngröße und -verteilung • Dichte • Porosität • Spezifische Oberfläche • Gesteinsfestigkeiten • Elastische Parameter (Moduln) • Quelleigenschaften • Zeitabhängiges Deformationsverhalten
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von der Anzahl der durchgeführten Messungen; Einzelmessungen haben nur bedingte Aussagekraft für eine gesamte Gesteinsformation
Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Die erforderliche Bohrung ist zeit-, kosten- und personalintensiv • Der Aufwand hängt stark von der einzelnen Methode ab
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Notwendige Grundlage: Kernbohrungen • Bohrlochmessungen und -tests, Petrophysik
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Petrophysik, Bohrlochmessungen und -tests • Für einzelne Aspekte (zum Beispiel Korngröße) Petrografie
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der möglichen Messungen: Methoden sind nicht zerstörungsfrei, so dass die Proben nur einmal genutzt werden können • Repräsentativität der Proben • Ortsspezifische Unterschiede bei der gleichen Lithologie

6.2.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Unter boden- und felsmechanischen Untersuchungen werden die Methoden beschrieben, mit denen Aussagen zur Gesteinsfestigkeit und zu elastischen Parametern (den sogenannten Moduln) sowie eng verwandten Parametern wie Dichte, Korngröße und Porosität getroffen werden können. Letztgenannte Parameter können oftmals direkt oder indirekt durch eine Messung bestimmt werden, während die Ermittlung der Moduln indirekt über Berechnungen erfolgen muss, deren Basis einfache und komplexe Versuche an Gesteinskörpern sind.

Viele der im Folgenden kurz beschriebenen Untersuchungen gehören zum Bereich der Ingenieurgeologie und Geotechnik und liegen damit an der Schnittstelle zwischen den Geowissenschaften und dem Bauingenieurwesen. Für viele dieser Methoden existieren Normen oder Empfehlungen. An dieser Stelle sei besonders auf die DIN 1997-2 „Geotechnische Bemessung“ welche Teil des Eurocode 7 /DIN 11b/ ist, sowie die dazu ergänzende DIN 4020 „Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke“, verwiesen. Für Böden, die beispielsweise im Rahmen von Altlastenuntersuchungen analytisch betrachtet werden, sind in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung /BBV 99/ weitere Regeln getroffen.

Aufgrund der Vielzahl der einzelnen zu Boden- und Felsmechanik zugehörigen Verfahren sind in Tab. 6.3 die in den Unterkapiteln der technischen Ausführung näher beleuchteten Messverfahren und der gemessene Parameter beziehungsweise der Erkenntnisgewinn gegenübergestellt.

Tab. 6.3 Gegenüberstellung von boden- und felsmechanischen Messverfahren und potenziell zu gewinnender Erkenntnis

Messverfahren	Erkenntnis oder gemessener Parameter
Sieb- und Schlämmanalysen, Sedimentationsanalysen, Laser-Partikelanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Korngröße, Kornverteilung • Gesteinsklassifikation
Flüssigkeits- oder Gaspyknometrie	<ul style="list-style-type: none"> • Dichte
Gasadsorptionsmethoden	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität • spezifische Oberfläche
Quecksilberdruckporosimetrie	<ul style="list-style-type: none"> • effektive (durchströmbare) Porosität • spezifische Oberfläche
<ul style="list-style-type: none"> • Druckversuche <ul style="list-style-type: none"> ○ Rückprallhammer ○ Ödometer 	<ul style="list-style-type: none"> • Elastische Moduln • Festigkeiten

Messverfahren	Erkenntnis oder gemessener Parameter
<ul style="list-style-type: none"> ○ Punktlastversuch ○ Einaxiale Versuche ○ Triaxiale Versuche • Zugversuche <ul style="list-style-type: none"> ○ Haftzugversuch ○ Spaltzugversuche • Scherversuche <ul style="list-style-type: none"> ○ Rahmenscherversuch ○ Kreisringscherversuch 	
Quelldruckversuche	<ul style="list-style-type: none"> • Quelleigenschaften
Kriechversuche	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitabhängiges Deformationsverhalten

6.2.3 Technische Ausführung

Auch im Rahmen der Boden- und Felsmechanik existiert eine Vielzahl von Messmethoden, die aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit in einzelnen folgenden Unterkapiteln beschrieben werden.

Zahlreiche in der Literatur beschriebene – und alltäglich gebrauchte Methoden – sind der Baugrunduntersuchung von Lockergesteinen an der Erdoberfläche zuzuschreiben. Diese sind nicht Gegenstand dieser Zusammenstellung. Trotzdem sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass diese Methoden in Lehrbüchern zur Ingenieurgeologie und Geotechnik wie /FEC 18/, /PRI 18/ ausführlich behandelt werden.

6.2.3.1 Kornanalysen

Kornanalysen umfassen die Analysen der Korngröße und der Kornverteilung und sind nach /PRI 18/ ein Maßstab für die Einteilung und Benennung der mineralischen Lockergesteine. Diese Parameter werden mit Siebanalysen und für Korngrößen unter 0,125 mm mit Sedimentations- beziehungsweise Schlämmanalysen in einem mit Wasser gefüllten Fallrohr mittels der Absinkgeschwindigkeit bestimmt (Aräometerverfahren). Die Darstellung erfolgt durch sogenannte Körnungs- oder Sieblinien (siehe Abb. 6.2). Für die Durchführung dieser Methoden sind gegebenenfalls weitere Vorbereitungsmaßnahmen, wie Trocknung in einem Ofen oder die vorhergehende Abtrennung des organischen Anteils (zum Beispiel Humus), erforderlich. Die Versuche lassen sich auch an bereits verfestigten Sedimentgesteinen durchführen, diese müssen vorher mechanisch zertrümmert werden. Die Analysen unterliegen der DIN 17892 (Geotechnische Erkundung und Untersuchung) /DIN 16b/.

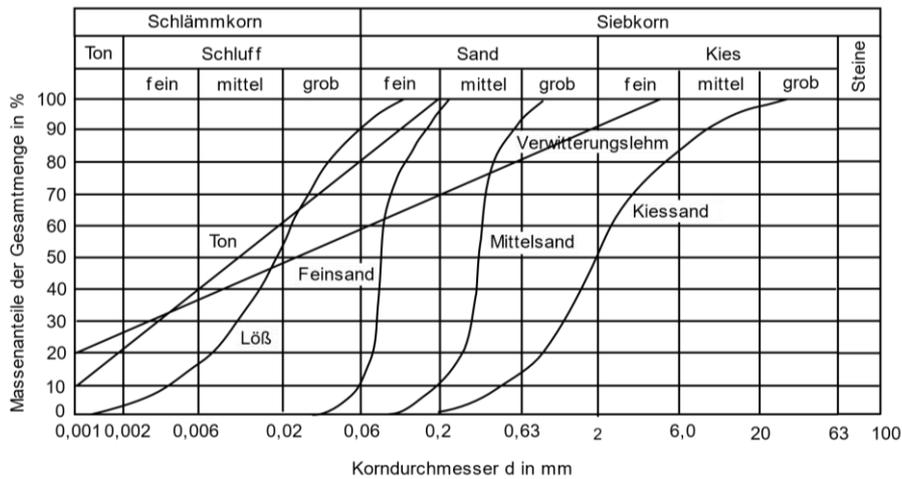


Abb. 6.2 Körnungs- bzw. Sieblinien verschiedener Bodenarten /PÖS 08/

Neben den oben genannten Methoden werden in /MCP 15/ noch weitere, moderne Messmethoden beschrieben:

- Bei der Bildanalyse wird jedes Korn im Probenkörper digitalfotografisch erfasst und mittels einer automatisierten Bildanalyse-Software die Kornverteilung bestimmt.
- Bei der akustischen Spektroskopie werden Körner, die sich in einer Flüssigkeit befinden mittels Ultraschall analysiert.

Neben diesen, nach /MCP 15/ eher selten angewendeten Methoden, wird die Methode der Laser-Partikelgrößenanalyse häufig angewendet. Gegenüber der Siebanalyse kann die Probenmenge deutlich kleiner sein, allerdings muss sichergestellt werden, dass die Probe für das betreffende Gestein repräsentativ ist. Bei dieser Methode wird die Probe in eine Lösung verbracht und ein Laserstrahl auf die Suspension gerichtet. Der Laserstrahl wird gestreut und durch ein Linsensystem auf Detektoren geleitet, die in bestimmten Winkeln angebracht sind. Je kleiner die Partikelgröße ist, desto weiter wird der Laserstrahl gestreut.

6.2.3.2 Pyknometrie

Die Dichte kann mit der sogenannten Pyknometermethode bestimmt werden /PRI 18/, /DIN 16b/. Das Pyknometer ist ein geeichtes Glasgefäß, in das ein präzise reproduzierbares Flüssigkeits- beziehungsweise Gasvolumen gefüllt werden kann.

Das Messprinzip beruht auf der Verdrängung der im Gefäß befindlichen Flüssigkeit. Dabei wird erst das leere beziehungsweise das mit Flüssigkeit gefüllte Gefäß gewogen und

dann ein gewisses Volumen des Feststoffes in das Gefäß gegeben. Nach der Wägung kann die Dichte der Befüllung errechnet werden.

Eine weitere Möglichkeit der Dichtebestimmung besteht darin, das Volumen einer Probe über Gas-Verdrängung zu bestimmen (zum Beispiel He-Pyknometrie). Durch Messung der Gasmenge in einer leeren und mit einer Probe bestückten Probenkammer wird das Probenvolumen genau berechenbar.

6.2.3.3 Porosimetrie

6.2.3.3.1 Gasadsorptionsmethoden

Gasadsorptionsmethoden werden zur Bestimmung der inneren Porenoberfläche von porösen Feststoffen eingesetzt. Das Standardverfahren ist die sogenannte BET-Messung, benannt nach Entwicklern Brunauer, Emmett und Teller /BRU 38/, welches in der DIN 9277 /DIN 95b/ festgelegt ist. Das Messprinzip basiert darauf, dass ein Inertgas (in der Regel Stickstoff, N₂) eine in einem luftdicht abgeschlossenen Glaskolben befindliche Gesteinsprobe umspült. Nach einer Abkühlung (zum Beispiel durch flüssigen Stickstoff) auf -196 °C erfolgen die Unterschreitung des Sättigungsdampfdruckes und die Adsorption der Moleküle des Inertgases in mehrlagiger Konfiguration auf der Porenoberfläche des Probekörpers. Gemessen wird der um den Betrag der in der Probe adsorbierten Gasmenge verminderte Druck des Messgases im Glaskolben. Die Menge des adsorbierten Gases wird nach der BET-Isotherme mit der gesamten Oberfläche der Probe (äußere Oberfläche und innere Porenoberfläche) korreliert. Auf diese Weise wird die spezifische Oberfläche der Probe in der Dimension m²·g⁻¹ ermittelt. Die Auflösungsgenauigkeit reicht bis in den Mikroporenbereich mit Durchmessern von wenigen nm. Das BET-Verfahren eignet sich daher auch für vergleichsweise dichte Gesteine wie Tonstein und Steinsalz. Aus der spezifischen Oberfläche kann auch die Gesamtporosität des untersuchten Gesteinskörpers ermittelt werden. Jedoch liefert das BET-Verfahren im Gegensatz zur Quecksilberdruckporosimetrie keinen Aufschluss über die Porenradienverteilung. Dies bedeutet, dass die effektive Porosität, das heißt der Porenraumanteil, der advektiv durchströmbar ist, durch das BET-Verfahren nicht ermittelt werden kann.

6.2.3.3.2 Quecksilberdruckporosimetrie

Quecksilberdruckporosimetrie ist die Standardmethode zur Ermittlung der Porenradienverteilung in einer porösen Feststoffprobe. Erfasst werden Porendurchmesser im Bereich von ca. 200 nm bis in den Bereich weniger Nanometer. Damit eignet sich die

Quecksilberdruckporosimetrie auch für vergleichsweise dichte Gesteine wie Tonstein und Steinsalz. Das Messprinzip basiert auf dem stufenweisen Einpressen einer nicht benetzenden Flüssigkeit in den Porenraum der Probe. Als Messmedium wird Quecksilber verwendet, welches einen Kontaktwinkel zu dem Feststoff größer 90° (ca. 140°) aufweist und damit nicht durch Kapillarkräfte, sondern nur durch von außen auf die Probe aufgebrauchten Druck in die Porenräume der Probe gelangen kann. Für die Messung wird die physikalische Gesetzmäßigkeit genutzt, wonach der aufgebrauchte Druck umgekehrt proportional zum jeweils durchdrungenen Porenradius ist. Dies bedeutet, dass mit steigendem Druck p immer kleinere Porenradien r von Quecksilber erfüllt werden.

Auch die Probendichte und die spezifische Oberfläche lassen sich durch Quecksilberdruckporosimetrie bestimmen. Im Gegensatz zum BET-Verfahren ist es möglich, die hydraulisch durchströmbare (effektive) Porosität zu ermitteln. Häufig werden Quecksilberdruckporosimetrie und BET-Messungen kombiniert. Der Vorteil der BET-Messung gegenüber der Quecksilberdruckporosimetrie ist, dass die Probe unverändert weiteren Messungen unterzogen werden kann, während die Probe nach einer quecksilberdruckporosimetrischen Messung durch im Porenraum verbliebenes Quecksilber kontaminiert ist und fachgerecht entsorgt werden muss. Insofern sind BET-Messungen an einer Probe stets vor quecksilberdruckporosimetrischen Messungen durchzuführen.

6.2.3.4 Mechanik

Nach /PRI 18/ wird unter Festigkeit die Fähigkeit eines Materials verstanden, Schub-, Druck- oder Zugspannungen zu ertragen und einen neuen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Bei unverfestigten Gesteinen, ingenieurgeologisch als „Böden“ bezeichnet, kommt es unter Druckbelastung nach /PRI 18/ praktisch zu keinen Grenzzuständen. Bei Scher- oder Schubbelastungen hingegen kommt es bei Erreichen der Festigkeitsgrenze entweder zu plötzlichem Versagen (spröder Bruch) oder zur bruchlosen Verformung (duktilen Fließen). Auch die Zugbelastung hat bei Böden praktisch keine Bedeutung. Bei unverfestigten Gesteinen ist mit Gesteinsfestigkeit deshalb meist die Scherfestigkeit gemeint. Dies ist das Maximum der Spannung, wenn Verformung ohne weitere Spannungserhöhung voranschreitet. Bei festen Gesteinen sind hingegen alle unterschiedlichen Festigkeiten von Bedeutung. Je nach Belastungsart wird dann von Scher-, Druck- oder Zugfestigkeit gesprochen. Verschiedene Kennwerte werden benutzt, um die Festigkeit näher zu definieren. Diese sind zum Beispiel nach /PRI 18/:

- Einaxiale Druckfestigkeit,
- Dreiaxiale Druckfestigkeit,

- Scherfestigkeit, Restscherfestigkeit,
- Zugfestigkeit,
- Reibungswinkel,
- Kohäsion.

Bei der Analyse und Interpretation von Gesteinsfestigkeiten ist es wichtig, unter welchen Bedingungen die Laborversuche stattgefunden haben. Neben dem Versuchsaufbau spielen die Temperatur und das Vorhandensein von Wasser (insbesondere Porenwasser) eine große Rolle. Dies wird bei der Beschreibung der Messmethoden nicht weiter berücksichtigt, ist aber bei der Betrachtung des geomechanischen Gesamtzustands von erheblicher Bedeutung. Falls bei den beschriebenen Versuchen Porenwasser vorhanden ist, gibt es zwei Möglichkeiten diese Versuche durchzuführen:

1. Das Porenwasser kann während des Versuchs abfließen. Dies wird als „drainiert“ bezeichnet.
2. Das Porenwasser kann während des Versuchs nicht abfließen. Dies wird als undrainiert bezeichnet.

Wenn ein Gestein die Festigkeitsgrenze erreicht hat, verformt es sich, wie oben bereits erwähnt, spröde oder duktil. Das Verformungsverhalten kann durch verschiedene Gesetze („Stoffgesetze“, „Materialgesetze“, engl. „constitutive laws/relations“) beschrieben werden. Um diese Gesetze für ein Gestein anwenden zu können, werden Parameter benötigt, die für jedes Gestein und oft auch jeden Probenkörper individuell sind. Diese Parameter sind die sogenannten Moduln, sie sind die Kennwerte für das Verformungsverhalten /PRI 18/. Die wichtigsten dieser Moduln sind:

- Poissonzahl ν (engl. „Poisson’s ratio“),
- Elastizitätsmodul, E-Modul E (engl. „Young’s modulus“),
- Kompressionsmodul K (engl. „bulk modulus“),
- Schubmodul, Schermodul G (engl. „shear modulus“),
- Erste Lamé-Konstante λ (engl. „Lamé’s first parameter“).

In /PRI 18/ sind weitere Moduln beschrieben.

Ziel zahlreicher geomechanischer Versuche ist es, die Moduln und Kennwerte zu ermitteln, um sie als Eingangsparameter für geomechanische Stabilitätsberechnungen zu benutzen. Im Folgenden werden die wichtigsten Versuche beschrieben, die in /PRI 18/, /MCP 15/ in größerer Detailtiefe dargestellt sind. Neben diesen existieren einige spezielle Tests, die bestimmte Phänomene untersuchen, etwa sogenannte Abplatzversuche oder Versuche mit hohlen, dickwandigen Gesteinszylindern (engl. „thick wall cylinder tests“). Diese speziellen Versuche werden hier mit zwei Ausnahmen nicht beschrieben. Die Ausnahmen sind Quelldruckversuche und Kriechversuche, die für die Ermittlung von Kennwerten für das spezielle geomechanische Verhalten von Tonstein beziehungsweise Salz wichtig sind (zur Ermittlung der Kennwerte von Kristallin sind, soweit bekannt, keine weiteren speziellen Versuche notwendig). Insgesamt wird an dieser Stelle nicht die detaillierte Auswertung beschrieben, die erforderlich ist um die Moduln und Kennwerte aus den Versuchen zu berechnen. Dazu sei hier ebenfalls auf /PRI 18/, /MCP 15/ verwiesen.

6.2.3.4.1 Druckversuche

Rückprallhammer

Mit einem Rückprallhammer (auch: Schmidt-Betonprüfhammer) /PRI 18/ kann schnell die Druckfestigkeit eines Werkstoffs überprüft werden. Durch eine gespannte Feder wird ein Schlagbolzen beschleunigt und prallt auf die Probe. Der Bolzen prallt, je nach Härte und Festigkeit des Gesteins, unterschiedlich stark zurück. Dies wird auf der Skala angezeigt und kann mit entsprechenden Tabellen in eine Druckfestigkeit übertragen werden.



Abb. 6.3 Ein Rückprallhammer (nach /ARJ 13/)

Ödometerversuch

In einem sogenannten Ödometergerät (oder auch KD-Gerät) /PRI 18/ wird das Kompressionsmodul bestimmt. Eine Probe wird mit unterschiedlichen Belastungen in eine Richtung komprimiert (zusammengedrückt) während die seitliche Verformung behindert wird (siehe Abb. 6.4). Die Verformung und die zur Verformung notwendige Belastung wird kontinuierlich aufgezeichnet, so dass das Kompressionsmodul berechnet werden kann.



Abb. 6.4 Drei Ödometer auf einer Trägervorrichtung (nach /ŠOB 12/)

Uniaxialer Druckversuch, einaxialer Druckversuch

Für diesen Versuch zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit (engl. „uniaxial compressive strength“) /PRI 18/ wird eine Gesteinsprobe (in der Regel in Zylinderform) zwischen zwei Metallplatten gespannt. Die Metallplatten werden dann mittels einer Servo-Vorrichtung aufeinander zubewegt. Der aufgebrachte Druck wird kontinuierlich aufgezeichnet, bis das Gestein sich verformt und/oder zerbricht.

Punktlastmethode

Die Punktlastmethode ähnelt vom Aufbau her dem uniaxialen Druckversuch /PRI 18/. Es wird ebenfalls die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt. Im Gegensatz dazu ist die Probe jedoch nicht zwischen zwei Platten gespannt, sondern zwischen zwei spitzen Kegeln.

Dreiaxialer Druckversuch, triaxialer Druckversuch

Dieser Versuch (engl. „triaxial test“, siehe Abb. 6.5) /PRI 18/ ist eine Erweiterung des uniaxialen Versuchs, um die Poissonzahl und das E-Modul zu bestimmen. Hier sind um die Probe eine Manschette oder ein Mantel angebracht, der es erlaubt einen Druck auch seitlich auf die Probe zu bringen. Charakteristisch für diesen Test ist, dass – entgegen dem Namen – der Druck auf den Seiten überall gleich ist (der sogenannte Manteldruck). Auch bei diesem Versuch werden die obere und untere Metallplatte aufeinander zu bewegt, so dass der Probenkörper sich verformt und/oder zerbricht.

Die Versuche werden mit einer in Stufen erfolgenden Änderung des Manteldrucks durchgeführt. Damit wird die Festigkeit des Gesteins in Abhängigkeit vom Manteldruck gemessen.



Abb. 6.5 Beispiel eines triaxialen Versuchsstands

Echter Dreiaxialer Druckversuch

Im Gegensatz zu den vorgenannten Versuchen ist hier ein quaderförmiger Probenkörper notwendig. Bei diesem Versuch (engl. „true triaxial test“) kann zum Beispiel durch Metallplatten in alle drei Raumrichtungen ein unterschiedlicher Druck aufgebracht werden. Dieser Versuch ist deutlich komplexer als die vorher beschriebenen, kann aber als einziger Versuch alle gewünschten Spannungszustände produzieren /CRI 98/. Nutzbringend ist dieser Versuch insbesondere für anisotrope Materialien, wie zum Beispiel Tonstein.

6.2.3.4.2 Zugversuche

Einfacher Zugversuch/Haftzugversuch

Bei einem einfachen Zugversuch (engl. „tensile strength test“) /MCP 15/ wird die Zugfestigkeit eines Materials bestimmt. Dazu wird ein Probenzylinder an beiden Enden an Stahlplatten befestigt, zum Beispiel durch Mörtel oder Klebstoff. Auf die Stahlplatten wird dann eine Belastung so aufgebracht, dass der Körper auseinandergezogen wird, ohne dass er gebogen wird. Damit wird die Zugfestigkeit direkt bestimmt.

Spaltzugversuch

Bei diesem Versuch handelt es sich um einen Kompressionsversuch mittels einer Belastung auf der gekrümmten Seite eines scheibenförmigen Zylinders (engl. „brazilian test“). Die Zugfestigkeit wird somit indirekt bestimmt und muss mittels empirischer Ansätze und Korrekturverfahren /PRI 18/ berechnet werden.

6.2.3.4.3 Scherversuche

Rahmenscherversuch

Nach /KOC 07/, /PRI 18/ wird die Probe beim sogenannten Rahmenscherversuch (engl. „direct shear test“) in einen Rahmen eingebaut. Auf die Probe wird ein vorgegebener Druck aufgebracht, bei Lockergesteinen führt dieser zunächst zur Konsolidierung, so dass sich das Volumen verkleinert. Dann wird senkrecht zum wirkenden Druck der obere Teil des Rahmens mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit zur Seite bewegt. Die Probe wird deshalb an einer vorgegebenen Position gesichert und die Scherfestigkeit kann bestimmt werden.

Kreisringscherversuch

Der Kreisringscherversuch (engl. „ring shear test“) /KOC 07/, /PRI 18/ ist eine Erweiterung des Rahmenscherversuchs. Die Probe wird in einem Kreisring eingebracht und ebenfalls mit einem vorgegebenen Druck belastet. Der obere Teil des Rahmens wird mit konstanter Geschwindigkeit gedreht. Der Vorteil des Kreisringscherversuchs ist die Möglichkeit, sehr große Verformungen zu erreichen, so dass neben der Scherfestigkeit auch die sogenannte Restscherfestigkeit ermittelt werden kann, die besonders für das Verformungsverhalten von Lockergesteinen wichtig ist.

6.2.3.4.4 Quelldruckversuche

Tone und Tonsteine verfügen in Abhängigkeit von ihrem Gehalt an quellfähigen Tonmineralen der Smektit-Gruppe (zum Beispiel Montmorillonit) über die Fähigkeit bei Wasseraufnahme zu quellen. Bei der Quellung findet eine Volumenzunahme statt. Wenn die quellbedingte Ausdehnung eines Tones oder Tonsteins infolge allseitiger Einspannung (zum Beispiel im Gebirgsverband) behindert wird, kommt es zum Quelldruckaufbau. Die entstehenden Quelldrücke liegen in der Größenordnung von 0,2 bis 2,0 MN/m² /PRI 18/.

Für die Beurteilung der Barriereigenschaften von Tonsteinen ist die Quellfähigkeit insofern wichtig, als dass sie ein Maß für die Selbstheilungseigenschaften des Tonsteins sind. Beispielsweise können so (je nach den Spannungszuständen im Gebirge) entstandene Klüfte wieder verschlossen werden. Ebenfalls relevant sind die Quelleigenschaften bei Bentonit, einem Smektit-reichen Tonstein, der als Abdichtungsmaterial bei Verschlusskonzepten für Endlagersysteme im Tonstein oder Kristallin vorgesehen ist.

Der Aufbau von Quelldruckmessgeräten unterscheidet sich, unter anderem je nachdem, ob der Quelldruck oder die Quelldehnung ermittelt werden soll.

Beispielhaft für die Vielzahl gebräuchlicher Versuchsanordnungen soll hier der Aufbau, an einer von der GRS entwickelten Messzelle für Quelldruckversuche, beschrieben werden (Abb. 6.6).

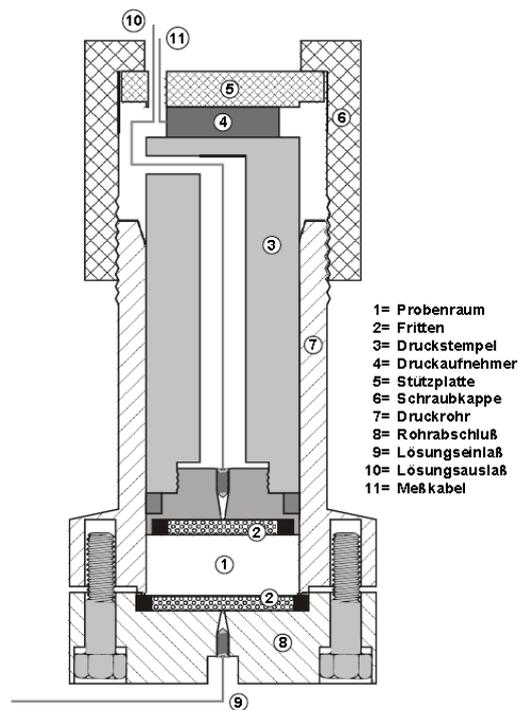


Abb. 6.6 Aufbau der GRS-Quelldruckmesszelle, aus /HER 06/

Die Probe (1) befindet sich in einer verformungssteifen Einzelmesszelle und ist so eingespannt, dass bei einer quelldruckbedingten Volumenänderung die Ausdehnung nur nach oben erfolgen kann. Sie weist einen Probeninnendurchmesser von 50 mm auf und ihre Höhe beträgt 25–30 mm. Während des Versuchs wird die Probe von unten nach oben unter Druck mit Wasser oder Salzlösung (Fluid) durchströmt. Sogenannte Fritten (2), feinporige Keramikfilter, sorgen für eine gleichmäßige Beaufschlagung der Probe.

Der nach oben wirkende Quelldruck wird über einen Druckstempel (3) auf einen Druckaufnehmer (4) übertragen. Im Druckaufnehmer wird ein, der anliegenden Druckhöhe proportionales elektrisches Signal erzeugt, welches von einem Datenakquisitionsgerät registriert und digitalisiert wird. Weiterhin werden die ein- beziehungsweise ausgetretenen Fluidmengen und der angelegte Fluidmengendruck gemessen. Im Ergebnis erhält man den Gesamtquelldruck in Abhängigkeit vom, auf die Probe wirkenden, Flüssigkeitsdruck.

6.2.3.4.5 Kriechversuche

Steinsalz – und in geringerem Maße auch Tonstein – zeigt unter konstanter Belastung ein zeit- und temperaturabhängiges Deformationsverhalten. Dieses Deformationsverhalten wird als Kriechen bezeichnet und führt dazu, dass sich das Gestein auch ohne Änderung der mechanischen Belastung verformen kann. Das Kriechverhalten kann in drei

Phasen (primäres, sekundäres, tertiäres Kriechen) gegliedert werden. Die tertiäre Kriechphase führt schließlich auch zur bruchhaften Verformung, dem sogenannten Kriechbruch. Einen umfangreichen Überblick über Kriechprozesse, Labortests und geo-mechanisches Verhalten gibt /CRI 98/.

Für die Untersuchung des Kriechverhaltens müssen keine vollständig anderen als die bereits beschriebenen Versuchsmethoden angewendet werden. In der Regel wird ein triaxialer Druckversuch verwendet, der unter besonderen Rahmenbedingungen angewendet wird. Diese Rahmenbedingungen umfassen insbesondere den zeitlichen Faktor. Für jede zu messende Probe wird ein Versuchsprogramm konzipiert, welches in mehreren Schritten jeweils zunächst eine Änderung der Druckbelastung beinhaltet. Im Anschluss an die Änderung der Druckbelastung erfolgt eine lange (Tage oder Wochen dauernde) Beobachtungsphase der Verformung des Probenkörpers. Bei zunehmender Belastung und entsprechend langer Beobachtung kann damit das Kriechverhalten der Proben bis zum Kriechbruch beurteilt werden.

6.2.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Die Aussagekraft einer einzelnen boden- beziehungsweise felsmechanischen Messung ist, bezogen auf die Charakterisierung einer gesamten Gesteinsformation, gering. Um die Kennwerte, wie zum Beispiel Gesteinsfestigkeit oder Moduln, für ein Gestein zu bestimmen, sind zahlreiche Messungen mit einer Methode und mehreren Proben erforderlich. Der Grund ist, dass die Kennwerte keine allgemeingültigen festen Größen sind, sondern immer in einem gesteinspezifischen Bereich liegen. Insofern kann für jeden Kennwert immer nur ein Wertebereich angegeben werden. Bei der Gewinnung der Proben sollte Sorge getragen werden, dass die Proben repräsentativ für das Gestein oder den Bohrabschnitt sind, für den die Kennwerte ermittelt werden sollen. Aus einer Bohrung von über Tage kann nur eine begrenzte Anzahl von Probenkörpern gewonnen werden. Diese Proben müssen auf zahlreiche unterschiedliche Laboruntersuchungen aufgeteilt werden, die unter Umständen nicht zerstörungsfrei sind, so dass jede Probe nur einmal genutzt werden kann. Die Aussagekraft von Laboruntersuchungen aus Kernmaterial insgesamt wird deshalb als moderat eingestuft. Die Anzahl der boden- und felsmechanischen Untersuchungen ist demnach bei Untersuchungen, denen eine Auffahrung vorausgeht (zum Beispiel Tunnelbau, Bergwerksauffahrung) deutlich höher und aussagekräftiger.

Die gemessenen beziehungsweise zu bestimmenden Kennwerte hängen sehr stark von der ortsspezifischen Lithologie sowie strukturgeologischen Entwicklung ab. Das bedeutet beispielsweise, dass sich Steinsalzproben unterschiedlicher Lokationen geomechanisch zwar ähnlich, aber nicht identisch verhalten. Dementsprechend kann für jede Lokation und jedes Gestein ein eigener Satz an Kennwerten ermittelt werden.

Im Rahmen geowissenschaftlicher Laboruntersuchungen stellt sich generell die Frage nach der sogenannten Skalierbarkeit, das heißt der Übertragbarkeit von Laboruntersuchungen auf die geologische Situation in-situ, also dem Ort, an dem das Gestein tatsächlich vorhanden ist.

Bei den meisten der in Kapitel 6.2.3 dargestellten Methoden zur Boden- und Felsmechanik handelt es sich um Methoden, die den Probekörper zerstören beziehungsweise eine Zerstörung zur Analyse erforderlich machen. Danach sind die Proben in der Regel nicht für weitere Versuche/Methoden nutzbar. Insgesamt ist deshalb die Anzahl der zu untersuchenden Proben eine einschränkende Randbedingung.

6.2.5 Aufwand

Im Rahmen der übertägigen Erkundung ist der Aufwand zur Gewinnung von Kernproben für Laboruntersuchungen sehr hoch. Im Gegensatz dazu ist der Aufwand für die Herstellung der Proben und die zahlreichen standardisierten Versuche und Tests gering. Es existieren viele Ingenieurbüros, die diese Tests mit geringem Personal- und Kostenaufwand durchführen können.

Einzelne Versuche und Tests, wie etwa Kriech- oder Quelldruckversuche, benötigen dagegen vergleichsweise hohen Personal- und Kostenaufwand. Vor allem Kriechversuche benötigen viel Zeit und belegen über Wochen einen Versuchsstand.

Zur Durchführung aller Versuche ist qualifiziertes Personal (Labortechniker, Bauingenieure, Geologen) notwendig.

6.2.6 Kombinationsmöglichkeiten der Boden- und Felsmechanik mit anderen Methoden

Boden- und felsmechanische Messungen können mit zahlreichen anderen Messmethoden kombiniert werden. Insbesondere können diese Versuche zur quantitativen Kalibrierung und Verifikation von Bohrlochmessungen und -tests in Bohrlöchern (Kapitel 5.2) genutzt werden. Qualitativ können die Kornanalysen und Porositätsanalysen mit der

geologischen Aufnahme beim Bohrungsaufschluss (Kapitel 5.1.1 und 5.1.2) oder den quantitativen Methoden der Petrografie verglichen und so jeweils die Messergebnisse verifiziert werden. Petrophysikalische Messungen (Kapitel 6.3) lassen sich ebenfalls mit boden- und felsmechanischen Methoden kombinieren, beziehungsweise können diese auch ersetzen (siehe Kapitel 6.2.7).

6.2.7 Alternative Methoden

Für zahlreiche der beschriebenen Methoden sind Alternativen verfügbar. Zur Kornanalyse und zur Bestimmung der Porosität lassen sich beispielsweise auch mikroskopische Methoden (Kapitel 6.1) anwenden. Zur Ermittlung der gesteinspezifischen Moduln können petrophysikalische Methoden (Akustik, Kapitel 6.3) angewendet werden. Die petrophysikalischen Methoden haben den Vorteil, dass sie hinsichtlich des Probenkörpers zerstörungsfrei genutzt werden können.

6.2.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Für boden- und felsmechanische Untersuchungen ist eine sehr große Menge Literatur vorhanden, da diese Methoden zu den klassischen Themenbereichen der Ingenieurgeologie und der Geotechnik gehören. Diese Zuordnung spiegelt sich auch in den Fachgesellschaften wieder, in welchen zum Beispiel die Bereiche der Baugrunduntersuchung oder des Tunnelbaus einen deutlich größeren Schwerpunkt als die Endlagerung radioaktiver Abfälle bilden. Der Überblick über Konferenzen, der in Tab. 6.4 dargestellt ist, ist deshalb bewusst auf den Rahmen der Endlagerung fokussiert.

Aktuelles Thema in der Boden- und Felsmechanik mit Bezug zur Endlagerung ist zurzeit vor allem die sogenannte Perkolations an Salzgesteinen, die eine wissenschaftliche Kontroverse darstellt. Hier sei zusammenfassend auf die Darstellung der DAEF (Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerung) verwiesen, die für die Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfälle eine Stellungnahme verfasst hat /DAEF 16/.

Tab. 6.4 Weiterführende Informationen zu Boden- und Felsmechanik im Labor

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels /FEC 18/ • Ingenieurgeologie /PRI 18/ • Ingenieurgeologie /GEN 15/ • Core Analysis: A best practice guide /MCP 15/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • Geotechdata.info /KOL 18/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) • International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) • International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM) • Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Elsevier Verlag
Einschlägige Konferenzen	<ul style="list-style-type: none"> • Geomechanik-Kolloquium, jährlich im November, abwechselnd in Freiberg und Leipzig • Conference on the Mechanical Behavior of Salt ("Saltmech"); alle 2-3 Jahre an wechselnden Orten • Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement; alle 2 Jahre an wechselnden Orten
Internationale (inklusive geplante) Anwendung der Boden- und Felsmechanik im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Belgien /DEN 11/ • Finnland /POS 12/ • Frankreich /CON 18/ • Japan /NUMO 04b/ • Kanada /NWMO 16a/, /NWMO 16b/ • Schweden /SKB 00/ • Schweiz /NAG 01/ • USA /TIL 84/

6.3 Petrophysik

6.3.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Petrophysik	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none"> • Akustik <ul style="list-style-type: none"> ○ Ultraschall ○ Schwingungs- und Modalanalyse • Elektrik • Elektromagnetik <ul style="list-style-type: none"> ○ Kernspinresonanzspektroskopie ○ Magnetische Suszeptibilität • Radiometrie <ul style="list-style-type: none"> ○ Röntgen ○ Gammaskopie • Optik • Thermische Untersuchungen <ul style="list-style-type: none"> ○ Wärme- und Temperaturleitung ○ Wärmekapazität ○ Wärmeausdehnung
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie • Elastische Kennwerte (Moduln) • Schädigungsparameter des Gesteins • Elektrische Leitfähigkeit des Gesteins • Porosität, Porenverteilung • Wärme- und Temperatur-Kennwerte (Leitfähigkeit, Kapazität, Ausdehnung)
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von der Anzahl der durchgeführten Messungen; Einzelmessungen haben nur bedingte Aussagekraft für eine gesamte Gesteinsformation
Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Die erforderliche Bohrung ist zeit-, kosten- und personalintensiv • Auch davon abhängig, ob es sich um Einzelmessungen oder Scannermessungen handelt, insgesamt moderater Aufwand
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Erfolgt standardmäßig mit Bohrlochmessungen (Logging) • Mit Seismik sowie Boden- und Felsmechanik möglich
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Für Einzelmessungen sind teilweise Alternativen vorhanden (zum Beispiel Akustik)
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Gegebenenfalls Konservierung von Bohrkernen erforderlich • Anzahl der möglichen Messungen: Methoden sind teilweise nicht zerstörungsfrei, so dass die Proben nur einmal genutzt werden können • Repräsentativität der Proben

6.3.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Die Untersuchungsmethoden der Petro- beziehungsweise Gesteinsphysik werden dazu genutzt, physikalische Eigenschaften eines Probenkörpers zu bestimmen, um daraus Rückschlüsse auf geowissenschaftliche Eigenschaften der Probe zu ziehen. Die Methoden sind eng verwandt mit den entsprechenden Methoden, die an der Oberfläche beziehungsweise im Bohrloch verwendet werden. Speziell Petrophysik und Bohrlochgeophysik sind eng miteinander verzahnt /MCP 15/, teilweise wird die Bohrlochgeophysik auch unter dem Begriff Petrophysik subsummiert.

Entsprechend der Vielfalt der verwendeten Methoden sind auch die zu erwartenden Erkenntnisse vielfältig und ergänzen die Oberflächengeophysik und Bohrlochgeophysik auf der Skala einer Gesteinsprobe.

Aufgrund der Vielzahl der einzelnen zur Petrophysik zugehörigen Verfahren sind in Tab. 6.5 die in den Unterkapiteln der technischen Ausführung näher beleuchteten Messverfahren und der gemessene Parameter beziehungsweise der Erkenntnisgewinn gegenübergestellt.

Tab. 6.5 Gegenüberstellung von petrophysikalischen Messverfahren und potenziell zu gewinnender Erkenntnis

Messverfahren	Erkenntnis oder gemessener Parameter
<ul style="list-style-type: none"> • Ultraschall <ul style="list-style-type: none"> ○ Impuls-Laufzeit-Messungen ○ Ultraschall-Tomografie ○ Schallemissionsanalyse (SEA) 	<ul style="list-style-type: none"> • dynamische elastische Moduln • dreidimensionales inneres Abbild der Probe • Schädigungsparameter des Gesteins
<ul style="list-style-type: none"> • Schwingungs- und Modalanalyse 	<ul style="list-style-type: none"> • dynamische elastische Moduln • Schädigungsparameter des Gesteins
<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Leitfähigkeit bzw. Widerstand 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität
<ul style="list-style-type: none"> • Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität, Porengrößen und -verteilung
<ul style="list-style-type: none"> • Magnetische Suszeptibilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Gehalt von magnetischen Mineralen • Mittels der Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität sind Rückschlüsse auf das Gefüge möglich

Messverfahren	Erkenntnis oder gemessener Parameter
<ul style="list-style-type: none"> • Röntgen-Computertomographie (CT) 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität, Porenraumanalyse • Berechnung und Visualisierung der Permeabilität, Porendruck und Migrationsraten • Quantifizierung von Fluidphasen und ihrer Verteilung • Visualisierung von Rissmustern, Mikrostrukturen (beispielsweise Kreuzschichtungen und Laminierungen) und potenziellen Migrationspfaden für Fluide, daraus Interpretation von mechanischen, dynamischen elastischen, elektrischen und Permeabilitätsanisotropien /JOS 12/.
<ul style="list-style-type: none"> • Gammaskpektrometrie 	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie • Radionuklidgehalt eines Gesteins
<ul style="list-style-type: none"> • Optische Foto- und Scanverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Dokumentation der Kerne und des Kerngewinns • Visualisierung von KW-Gehalt oder der Dreidimensionalität der Probe
<ul style="list-style-type: none"> • Messverfahren zu Leitfähigkeiten <ul style="list-style-type: none"> ○ Thermische Scanner Systeme ○ Thermische Halb- und Vollraumsonden ○ Thermische Ein- oder Zweiplattenmethode 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärme- und Temperaturleitfähigkeit
<ul style="list-style-type: none"> • Kalorimetrie 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmekapazität
<ul style="list-style-type: none"> • Thermische Dilatometer 	<ul style="list-style-type: none"> • Linearer und volumetrischer Ausdehnungskoeffizient

6.3.3 Technische Ausführung

Im Folgenden wird die technische Ausführung (Tests und Versuche) der Methoden beschrieben. Dabei wird auf jede Methode einzelnen eingegangen. Im Labor ist es oftmals so, dass diese Untersuchungen mit einem Gerät durchgeführt werden, an welchem die unterschiedlichen Sensoren befestigt sind („Multi Sensor Core Logger“). Der zu untersuchende Kern – beziehungsweise die zu untersuchende Probe – wird automatisch an den Sensoren vorbei oder zwischen den Sensoren hindurchgeschoben. In einem vorgegebenen Abstand wird jeweils eine Messung durchgeführt, so dass eine quasi-kontinuierliche Messreihe entsteht. Deshalb wird – analog zum Bohrlochlogging – diese Vorgehensweise als Kern-Logging (beziehungsweise gebräuchlicher in engl. „Core-Logging“) bezeichnet. Wenn optische Messungen durchgeführt oder auch optische Sensoren genutzt werden (zum Beispiel bei Temperaturmessungen) spricht man auch von Kern-Scan (engl. „Core-Scan“).

6.3.3.1 Akustik

6.3.3.1.1 Ultraschall

Impuls-Laufzeit-Messungen

Die einfachste Methode in der Ultraschallprüfung stellt das Impuls-Laufzeit-Verfahren dar /MOS 13/. Bei diesem Verfahren werden zwei Sensoren an einer Gesteinsprobe an gegenüberliegenden Enden platziert. Ein Sensor sendet einen Ultraschallimpuls aus, der gegenüberliegende Sensor registriert das ankommende akustische Signal („Durchschallung“). Es werden die Laufzeiten der unterschiedlichen akustischen Wellenarten gemessen. Aus den Laufzeitgeschwindigkeiten können die dynamische Querdehnungszahl und unter weiterer Berücksichtigung der Gesamtdichte des Probekörpers der dynamische Elastizitätsmodul berechnet werden /BRA 08b/.

Ultraschall-Tomografie

Eine naheliegende Weiterentwicklung der einfachen Ultraschallmessung stellt die Tomografie dar. Dabei werden Impulsgeber und Sensor an vielen verschiedenen gegenüberliegenden Position an der Probe positioniert, so dass man – ähnlich wie bei einer Oberflächenseismik – mit geeigneten Auswerteverfahren ein dreidimensionales Abbild des Inneren der Gesteinsprobe erhält.

Schallemissionsanalyse (SEA)

Es ist möglich, Ultraschalluntersuchungen begleitend während triaxialer Kompressionsversuche durchzuführen. Der Hintergrund dieser Technik ist, dass die Verformung eines Gesteinskörpers oft von deutlichen akustischen Signalen („knacken“), aber auch von für den Menschen nicht direkt hörbaren Signalen begleitet ist. Es wird unterstellt, dass diese Signale ihre Ursache in einer beginnenden (gegebenenfalls nicht unmittelbar sichtbaren) Schädigung des Gesteinskörpers haben. Eine systematische Aufzeichnung dieser Signale gibt demnach Aufschluss darüber, bei welchen mechanischen Belastungen die Schädigung des Gesteinskörpers beginnt. Es ist möglich, mit entsprechender Auswertung auch den Ort der Schädigung zu bestimmen /MAN 11/. Da diese Methode begleitend bei boden- und felsmechanischen Untersuchungen durchgeführt wird, ist sie hinsichtlich des Probenkörpers nicht zerstörungsfrei.

6.3.3.1.2 Schwingungs- und Modalanalyse

Die Schwingungs- und Modalanalyse eines Gesteins ist eine selten angewendete Methode. Sie hat ihren Ursprung in der zerstörungsfreien Untersuchung von Werkstoffen. Nach /MOS 13/ können sich die elastischen Parameter (Moduln) eines Materials durch Schädigung ändern. Diese Änderung macht sich ebenfalls in den Frequenzen einer Probe bemerkbar, die in Schwingungen versetzt wird. Mit Hilfe der Schwingungsfrequenzen können die dynamischen elastischen Moduln bestimmt werden. Nützlich ist diese Analyse vorwiegend, wenn Schädigungsprozesse untersucht werden sollen. Dazu ist es erforderlich diese Analysen sowohl vor als auch nach der Schädigung der Probe anzuwenden. Es sind Verwechslungen mit der Modalanalyse der Petrografie möglich, dort wird die quantitative Ermittlung des Mineralbestands als Modalanalyse bezeichnet (siehe Kapitel 6.1).

6.3.3.2 Elektrik

Elektrische Leitfähigkeit beziehungsweise elektrischer Widerstand

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit, beziehungsweise der Widerstandsverteilung an Bohrkernen lässt Rückschlüsse über die Porosität des Gesteins zu, welche wiederum Auskunft über die Heterogenität des Gesteins gibt. Elektrische Methoden in der petrophysikalischen Gesteinsuntersuchung werden unter anderem in /KNÖ 05/ ausführlich beschrieben. Die elektrische Stromdichte und elektrische Feldstärke sind über die elektrische Leitfähigkeit (Konduktivität) miteinander verbunden; ihr Kehrwert ist der spezifische elektrische Widerstand (Resistivität). Die elektrische Leitfähigkeit setzt sich aus der Leitfähigkeit der Gesteinsmatrix (Matrixleitfähigkeit), der elektrolytischen Leitfähigkeit der Porenflüssigkeit und der Grenzflächenleitfähigkeit an der Grenze Gesteinsmatrix/Porenflüssigkeit zusammen. Mit der Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes wird also eine Basisgröße für die Interpretation geoelektrischer Messungen bestimmt. Der spezifische elektrische Widerstand wird durch verschiedene Einflussgrößen bestimmt, die bei den Messungen zu berücksichtigen sind.

Die Bestimmung des elektrischen Widerstandes an Probenkörpern im Labor erfolgt an definierten Prüfkörpern durch eine Strom- und Spannungsmessung mit Zwei- oder Vierelektrodenmethoden. Hierbei werden die Elektroden auf die Stirnflächen eines planparallel geschnittenen und geschliffenen Probenkörpers gesetzt. Die Probenkörper müssen je nach Material vorher entsprechend behandelt werden. Generell erfolgt die Bestimmung des elektrischen Widerstandes an gesättigten Proben. Die Sättigung wird dabei unter Vakuum-Bedingungen mit einer Elektrolytlösung bekannter Konzentration

hergestellt. An die Elektroden wird dann ein Strom bekannter Stromstärke und Frequenz (in der Regel ein Wechselstrom mit 10 Hz - 100 kHz) angelegt und der Spannungsabfall gemessen. Der spezifische elektrische Widerstand kann dann über die einschlägigen physikalischen Beziehungen berechnet werden.

6.3.3.3 Elektromagnetik

6.3.3.3.1 Kernspinresonanzspektroskopie

Mit der Kernspinresonanzspektroskopie (engl. „nuclear magnetic resonance spectroscopy“, NMR), werden direkt Eigenschaften der Wassermoleküle, speziell der Kernspin (Protonen), auf atomarer Ebene bestimmt. Die NMR-Methodik wird unter anderem in /BEH 15/ ausführlich beschrieben. Nur Atomkerne mit einer ungeraden Anzahl von Protonen oder Neutronen weisen einen Kernspin auf. Wasserstoffkerne bestehen zum Beispiel nur aus einem Proton (^1H), welches in einem NMR-Spektrometer in einem starken Magnetfeld durch hochfrequente Impulse im Radiowellenbereich in einen Spin-Zustand versetzt wird, wodurch ein magnetisches Feld induziert wird. Nach Abschaltung des Impulses kehren die Protonenspins in ihre Gleichgewichtslage zurück und induzieren eine Spannung, die über den Receiver gemessen wird. Das gemessene Signal steht im Verhältnis zum Gesamtwassergehalt, zur Porosität und zur Porengröße im untersuchten Bereich. Mittels moderner Datenauswerteverfahren kann ebenfalls auf die Porengrößenverteilung und den freien sowie den gebundenen Wassergehalt der Probe geschlossen werden.

6.3.3.3.2 Magnetische Suszeptibilität

Die magnetische Suszeptibilität (MS) ist eine materialabhängige Konstante, welche die Magnetisierbarkeit von Materie durch den Einfluss eines externen, temporären Magnetfelds beschreibt. Diese Fähigkeit zur Magnetisierung wird in Gesteinen von den entsprechenden gesteinsbildenden Mineralkomponenten beeinflusst /RUN 13/. Gemessen wird die magnetische Suszeptibilität als Quotient aus der spezifischen Materialsuszeptibilität und der Dichte. Verwendet man die Trockendichte, erhält man zudem eine porositätsabhängige Größe /KNÖ 05/. Im Labor wird die magnetische Suszeptibilität mit handelsüblichen Messgeräten bestimmt, zum Beispiel mit Spulen als Steck-, oder Ringsonden /KNÖ 05/. Bei tektonischer Deformation kann eine Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität entstehen, so dass eine Messung auch Rückschlüsse auf das Gefüge einer Probe erlaubt /WAL 05/.

6.3.3.4 Radiometrie

6.3.3.4.1 Röntgen-Computertomographie (CT)

Mit dem Computertomographie-Verfahren (CT) wird die innere Struktur von Materialien mittels Röntgen-Strahlen zerstörungsfrei untersucht /MCP 15/. Hierbei wird ein dreidimensionaler Datensatz einer Probe erzeugt, indem der Röntgenscanner um die Probe herum rotiert. Detektoren auf der gegenüberliegenden Seite des Scanners (Emitters) messen die Intensität des Röntgenstrahls, der die Probe durchdringt. Hierbei wird der durchschnittliche lineare Dämpfungskoeffizient gemessen, der die Röntgenadsorption der Probe darstellt. Ein geeignetes Computerprogramm wertet die Daten entsprechend aus und erzeugt 2-D Schnittbilder. Für eine 3-D Darstellung können computergestützte zusammenhängende zweidimensionale Bilder im Querschnitt gestapelt werden. CT-Scans werden insbesondere bei Kernen aus geklüfteten Gesteinen, heterogenem/laminierten Sandstein, heterogenen Karbonaten und schwach verfestigten Gesteinsformationen angewendet /MCP 15/. Die Anwendung des Verfahrens auf Bohrkernsowie das Verfahren selber werden ausführlich zum Beispiel in /MCP 15/ beschrieben.

6.3.3.4.2 Gammaspektrometrie

Mit der Gammaspektrometrie wird die natürliche Radioaktivität (emittierte γ -Strahlung) eines Bohrkerns untersucht. Die natürliche γ -Strahlung eines Gesteins wird in der Regel überwiegend durch den radioaktiven Zerfall der Zerfallsreihen von Uran (^{238}U), Thorium (^{232}Th) sowie dem radioaktiven Isotop ^{40}K bestimmt. Hauptzweck der gammaspektrometrischen Untersuchung von Bohrkernen ist die lithologische Untergliederung des durchteuften Gesteins sowie die Korrelation mit Bohrloch-Gammamessungen /MCP 15/. Die Messung der natürlichen Radioisotope kann zudem zur späteren Abgrenzung zu den eingelagerten Radioisotopen in den Abfällen verwendet werden. In Sedimenten korreliert die Radioaktivität zudem meist mit dem Anteil des Tongehaltes aufgrund des erhöhten Kaliumgehaltes und einer hohen Adsorptionsfähigkeit für Thorium und Uran. In kristallinen Gesteinen korreliert sie mit der chemischen Zusammensetzung /SPE 00d/.

Das Messverfahren wird ausführlich zum Beispiel in /LFU 13/ oder /MCP 15/ beschrieben. Bei gammaspektrometrischen Untersuchungen von Bohrkernen werden diese dabei abschnittsweise durch eine röhrenförmige Bleiabschirmung gefahren, die mit einer Szintillationssonde und einer Auswerteeinheit versehen ist. Gemessen wird hierbei die Gesamtanzahl der (Gamma-)Zerfälle (Total-Gamma-Log Verfahren). Beim Spektral-Gamma-Log Verfahren werden die unterschiedlichen Zerfallsenergien von Kalium (K),

Uran (U) und Thorium (Th) gleichzeitig gemessen. Hierzu werden entweder drei verschiedene Detektoren oder ein Detektor mit einem Vielkanalanalysator verwendet. Aus den Messergebnissen wird dann mit einer geeigneten Auswertesoftware die spezifische Aktivität der drei Nuklide berechnet. Der Zeitaufwand hierfür ist jedoch höher als beim Total-Gamma-Log Verfahren.

6.3.3.5 Optische Foto- und Scanverfahren

Ein wichtiger Aspekt optischer Untersuchungen war ursprünglich die Dokumentation der Kerne und des Kerngewinns, besonders da es für manche Laboruntersuchungen erforderlich ist, Kernmaterial zu zerstören. Deshalb wurden Kerne zunächst analog und im Zuge der technischen Weiterentwicklung der Fotografie, digital fotografiert. Heute gibt es automatisierte Systeme, die den Kern kontinuierlich fotografieren, also scannen. Aufgrund der heute verfügbaren hohen Rechenleistung werden diese Scans heute auch zur Auswertung genutzt, auch durch automatisierte Bildanalysesoftware.

Ähnlich wie bei der Fernerkundung kommen nicht nur einfache Systeme zum Einsatz, die das Umgebungslicht nutzen. Geräte, mit denen man heute Kerne scannt, nutzen die unterschiedlichen Frequenzbereiche des Lichts, wie zum Beispiel Infrarot oder UV-Licht. UV-Licht kann beispielsweise genutzt werden, um im Gestein enthaltene Kohlenwasserstoffe sichtbar zu machen. Mit speziellen Infrarotgeräten können auch thermische Untersuchungen durchgeführt werden (Kapitel 6.3.3.6). Moderne Geräte nutzen ein LIDAR-ähnliches (Kapitel 4.1.2.3.2) Verfahren um Kerne dreidimensional mit hoher Auflösung zu vermessen.

An die Geräte sind oftmals weitere Sensoren angebracht, die ebenfalls automatisiert weitere Messungen durchführen können, die den Methoden der Petrografie zuzuordnen sind. Diese Methoden (zum Beispiel Spektroskopie) sind in Kapitel 6.1 beschrieben.

6.3.3.6 Thermische Untersuchungen

Thermische Untersuchungen haben zum Ziel, die Kennwerte zu bestimmen, mit denen das Verhalten von Gesteinen bei Temperaturänderungen beschrieben werden kann. Diese Kennwerte sind die

- Wärme- und Temperaturleitfähigkeit,
- Wärmekapazität und
- Wärmeausdehnungskoeffizient.

Üblicherweise wird bei thermischen Messungen ein sogenannter Standard, also eine Probe, bei der die Kennwerte bereits sehr genau bekannt sind, ebenfalls gemessen. Dies ermöglicht eine Kalibration der eigentlichen Messung.

6.3.3.6.1 Messverfahren zu thermischen Leitfähigkeiten

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein materialspezifischer Koeffizient, der beschreibt, wie gut ein Material Wärme, also thermische Energie, leiten kann. Der Koeffizient selbst ist abhängig von der Temperatur des Gesteins und auch von den Umgebungsdruckbedingungen /JAH 16/. Die Wärmeleitfähigkeit ist von der Temperaturleitfähigkeit zu unterscheiden. Der Koeffizient der Temperaturleitfähigkeit (auch thermische Diffusivität genannt) beschreibt, wie schnell sich die Temperatur in einem Material ändern kann und ist unter anderem abhängig von der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität. Beide Koeffizienten sind abhängig vom Wassergehalt der Probe und können je nach Gestein auch anisotrop sein (zum Beispiel bei Tonstein).

Eine heute übliche Methode zur Messung der Wärmeleitfähigkeit ist ein quasi-kontinuierliches (Abstand im mm-Bereich) Scan-Verfahren (engl. „Thermal Conductivity Scanner“, TCS) /PRI 18/: Ein Bohrkern wird in vorgegebenen Abständen mit einer Wärmequelle abgetastet und mit Infrarot-Sensoren wird die Temperatur des Kerns auf der Seite der Wärmequelle und der gegenüberliegenden Seite gemessen und die Wärmeleitfähigkeit bestimmt.

Weitere Methoden basieren auf der Linien-Quellen-Theorie. Diese sind zum Beispiel Methoden mit Nadelsonden (Vollraumsonden) oder Halbraumsonden /SGD 15/. Bei Vollraumsonden wird eine Sonde in einen Probenkörper gesteckt und erhitzt, bei Halbraumsonden wird die Sonde auf den Probenkörper positioniert und erhitzt. Gleichzeitig wird die Temperaturänderung gemessen und die Wärmeleitfähigkeit kann berechnet werden.

Andere Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit sind Ein- oder Zweiplatten-Methoden, bei denen ein Probenkörper zwischen eine unterschiedliche Anzahl von Heiz- und Kühlplatten positioniert wird. Diese Verfahren werden oft zur Produktkontrolle eingesetzt, die relevante Norm ist die DIN 12939 „Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten“ /DIN 01/.

Die Temperaturleitfähigkeit kann mit der LFA-Methode (Laser oder Light Flash-Methode) gemessen werden. Dabei wird die Prüfkörperunterseite mit Laserpulsen erhitzt, gleichzeitig misst ein Infrarot-Detektor auf der Prüfkörperoberseite den Temperaturanstieg.

Aus der zeitlichen Änderung der Temperatur kann die Temperaturleitfähigkeit ermittelt werden.

6.3.3.6.2 Kalorimetrie

Die Wärmekapazität eines Körpers gibt an, wie viel thermische Energie ein Körper aufnehmen kann. Die Wärmekapazität ist abhängig von der Temperatur des Materials. In der Regel wird dieser Koeffizient als spezifische Wärmekapazität angegeben, dies ist die Wärmekapazität bezogen auf die Masse des Materials und die zugehörige Temperaturerhöhung. Das bedeutet, dass angegeben werden kann, wieviel Energie notwendig ist, um die Temperatur um ein bestimmtes Maß zu erhöhen, beispielsweise, um die Temperatur von 1 kg Wasser um 1 K (Kelvin) zu erhöhen.

Die Messgeräte, mit denen die Wärmekapazität gemessen wird, werden als Kalorimeter bezeichnet. Es gibt einige Varianten von Kalorimetern, die sich im Detail unterscheiden. Wesentlich ist, dass sie aus einem Gefäß bestehen, dessen eigenes thermisches Verhalten genau bekannt ist und idealerweise nur sehr geringe Wärmeverluste aufweist. In diesem Gefäß wird einer Probe eine genau definierte Wärmemenge zugeführt. Dann werden entweder die wieder abgeführte Wärme oder die sich entwickelnden Temperaturen gemessen. Aus diesen Messreihen kann dann die (temperaturabhängige) Wärmekapazität bestimmt werden.

6.3.3.6.3 Thermische Dilatometer

Der Wärmeausdehnungskoeffizient (auch thermischer Ausdehnungskoeffizient) ist ein Materialkennwert, mit dem die Veränderung des Volumens durch Temperaturänderungen beschrieben werden kann. Der Koeffizient selbst ist abhängig von der Temperatur. Unterschieden wird zwischen dem Längenausdehnungskoeffizienten (α) und dem Raumausdehnungskoeffizienten (γ).

Die Ausdehnungskoeffizienten werden mit sogenannten Dilatometern gemessen. Auch bei diesen Geräten werden unterschiedliche Typen verwendet. Je nach Aufwand sind Messungen mit unterschiedlicher Genauigkeit (nach /BÄH 18/ bis in den Nanometer-Bereich) möglich. In einem Dilatometer wird eine Probe erwärmt und die Ausdehnung wird – je nach Gerät – mit unterschiedlichen Verfahren gemessen. Diese Messgeräte ähneln den Messgeräten der Quelldruckversuche (Kapitel 6.2.3.4.4).

6.3.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen der Methode

Die Aussagekraft der einzelnen Messungen ist sehr unterschiedlich. Während bei Messungen an Einzelproben nur eine geringe Aussagekraft für das Gestein vorhanden ist, kann bei den Methoden, die ein Scan-Verfahren verwenden und beispielsweise einen ganzen Kern vermessen, eine hohe Aussagekraft erzielt werden. Bei zerstörungsfreien Messungen kann die Aussagekraft deutlich erhöht werden, wenn mehrmals gemessen wird und ein statistischer Mittel- oder Medianwert bestimmt wird.

Insgesamt gilt auch hier, dass je mehr Messungen für einen Kernabschnitt vorliegen, die Aussagekraft erhöht wird. Zu beachten ist, dass die Kennwerte in der Regel keine konstanten Größen sind, da sie von den Umgebungsbedingungen (Druck, Temperatur, Wassersättigung, etc.) abhängen. Insofern kann für jeden Kennwert immer nur ein Wertebereich angegeben werden, der nur für die bei der jeweiligen Messung vorliegenden Umgebungsbedingung gilt.

Ebenso wie bei boden- und felsmechanischen Untersuchungen muss bei der Gewinnung der Proben Sorge getragen werden, dass die Proben repräsentativ für das Gestein oder den Bohrabschnitt sind.

6.3.5 Aufwand

Im Rahmen der übertägigen Erkundung ist der Aufwand zur Gewinnung von Kernproben für Laboruntersuchungen sehr hoch. Der Aufwand für die zahlreichen Versuche und Tests ist unterschiedlich. Während für akustische, optische und thermische Untersuchungen der Aufwand zur Vorbereitung der Proben eher gering ist, ist für elektrische, elektromagnetische und radiometrische Messungen ein moderater bis hoher Vorbereitungsaufwand erforderlich. Während bei boden- und felsmechanischen Untersuchungen zahlreiche Ingenieurbüros diese Leistung erbringen können, sind für petrophysikalische Untersuchungen deutlich spezialisiertere Unternehmen oder auch Institute an Universitäten erforderlich. Für alle Messungen, auch für die automatischen oder halbautomatischen Untersuchungen mit Scanner-Methoden, ist zur Durchführung qualifiziertes Personal (Labortechniker, Geophysiker, Geologen) notwendig.

Für petrophysikalische Untersuchungen kann es gegebenenfalls erforderlich sein, am Ort der Bohrung umfangreiche Konservierungsmaßnahmen für die erbohrten Kerne vorzuhalten.

6.3.6 Kombinationsmöglichkeiten der Petrophysik mit anderen Methoden

Petrophysikalische Messungen werden standardmäßig mit Bohrlochmessungen und -tests (Kapitel 5.2), insbesondere den bohrlochgeophysikalischen Messungen (Logging), kombiniert. Trotz der Problematik hinsichtlich der Skalierbarkeit und Übertragbarkeit von Labormessungen auf in-situ-Messungen können mit Labormessungen die Ergebnisse der bohrlochgeophysikalischen Messungen verifiziert werden.

Weitere Kombinationsmöglichkeiten bestehen hinsichtlich seismischer Untersuchungen von der Oberfläche (Kapitel 4.2.1) und im Bohrloch (Kapitel 5.2.3.1.2): Die im Labor ermittelten Laufzeitmessungen und elastischen Moduln aus akustischen Untersuchungen können zur Verbesserung der Ergebnisinterpretation dieser Messungen beitragen. Auch der Vergleich und die gegenseitige Verifikation der Ergebnisse von boden- und felsmechanischen Methoden (Kapitel 6.2) und akustischen Laboruntersuchungen (Kapitel 6.3.3.1) ist möglich. Mit beiden Methoden können die elastischen Moduln bestimmt werden.

6.3.7 Alternative Methoden

Alternative Methoden zur Petrophysik sind nur begrenzt vorhanden. Geophysikalische Bohrlochmessungen (Kapitel 5.2) stellen eine Alternative dar, werden jedoch in der Regel mit petrophysikalischen Messungen verifiziert. Einzelne Messungen können durch boden- und felsmechanische Messungen ersetzt werden (zum Beispiel die Ermittlung der geomechanischen Kennwerte), jedoch wird dann die genutzte Probe in der Regel zerstört.

6.3.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Impulse für aktuelle Entwicklungen von petrophysikalischen Methoden liefert vor allem die Kohlenwasserstoffindustrie. Deshalb stehen vor allem verbesserte Methoden zur Auswertung und Interpretation der Porosität, der Permeabilität und der damit zusammenhängenden Analyse des Fluidfluss-Regimes im Gestein im Fokus. Ein Überblick über weiterführende Informationen ist in Tab. 6.6 dargestellt.

Tab. 6.6 Weiterführende Informationen zu Petrophysik im Labor

Art der Information	Referenzen (Auszug)
---------------------	---------------------

Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none"> • Petrophysics /TIA 16/ • Core Analysis /MCP 15/ • Physical Properties of Rocks /SCH 04b/ • Petrophysik /SCH 83/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none"> • PetroWiki /SPE 18c/ • Staatliche Geologische Dienste /SGD 15/
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG) • Deutsche Mineralogische Gesellschaft (DMG) • Society of Exploration Geophysicists (SEG) • Society of Petroleum Engineers (SPE) • Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA) • Petrophysics Journal der SPWLA
Forschungsinstitute	<ul style="list-style-type: none"> • Forschungskollegium Physik des Erdkörpers (FKPE e. V.)
Internationale (inklusive geplante) Anwendung der Petrophysik im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Belgien /CRA 04/, /VAN 14/ • Finnland /GEH 07/ • Japan /OTA 11/ • Kanada /CRU 17/ • Schweden /SKB 00/ • Schweiz /NAG 01/, /NAG 18/, /NAG 85/ • USA /NEL 14/ • UK /NDA 11/

6.4 Geochemie

6.4.1 Datenblatt

Kurzcharakterisierung Geochemie	
Messmethoden	<ul style="list-style-type: none"> • Gaschromatographie (GC) • Massenspektrometrie (MS) • Inductively Coupled Plasma Massenspektrometrie • Atomabsorptions-Spektrometrie (AAS) • Rock-Eval-Pyrolyse
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Art und Konzentration an organischen (GC, Rock-Eval) oder anorganischen (AAS, ICP) Verbindungen • Altersdatierung • Zusammensetzung und Genese von Tonsteinformationen, erdgeschichtliche Temperatureinflüsse
Aussagekraft	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr geringe Stoffmengen nachweisbar (niedrige Nachweisgrenzen)
Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Probenvorbereitung, Durchführung teilautomatisierbar (moderat)

Kurzcharakterisierung Geochemie	
Kombination mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Bei MS-Kopplung mit Trennverfahren (zum Beispiel GC) oder Ionisierungsverfahren (zum Beispiel ICP) notwendig
Alternative Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Allenfalls ältere elementaranalytische Methoden
Einschränkende Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Verfahren erfordern aufwändige Probenaufbereitung, hohe Sorgfalt bei Probenahme, Transport und Lagerung erforderlich

6.4.2 Gemessene Parameter und zu erwartende Erkenntnisse

Die Ergebnisparameter und der zu erwartende Erkenntnisgewinn hängen von der verwendeten Messmethode ab. Allen im Nachfolgenden dargestellten Analyseverfahren gemein ist jedoch, dass Substanzgemische oder Verbindungen aufgetrennt werden und die Konzentrationen der Einzelsubstanzen oder Verbindungsfragmente ermittelt werden. Die vorgestellten Methoden umfassen sowohl organische als auch anorganische Analytik.

Aufgrund der Vielzahl der einzelnen zur Geochemie zugehörigen Verfahren sind in Tab. 6.7 die in den Unterkapiteln der technischen Ausführung näher beleuchteten Messverfahren und der gemessene Parameter beziehungsweise der Erkenntnisgewinn gegenübergestellt.

Tab. 6.7 Gegenüberstellung von geochemischen Messverfahren und potenziell zu gewinnender Erkenntnis

Messverfahren	Erkenntnis oder gemessener Parameter
<ul style="list-style-type: none"> • Gaschromatographie (GC) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammensetzung von organischen Substanzgemischen <ul style="list-style-type: none"> ○ aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX: Benzol, Toluol, Ethylbenzol und die Xylole) ○ aliphatische Kohlenwasserstoffe (n-Alkane, iso-Alkane und Cycloalkane) ○ geradkettige, verzweigte und cyclische-Alkene ○ Halogenkohlenwasserstoffe (zum Beispiel CKW, FCKW)
<ul style="list-style-type: none"> • Massenspektrometrie (MS) mit vorgeschalteten Trennverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • gasförmige organische Verbindungen • anorganische Verbindungen, Elemente und Isotope

Messverfahren	Erkenntnis oder gemessener Parameter
<ul style="list-style-type: none"> Atomabsorptions-Spektrometrie (AAS), Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) 	<ul style="list-style-type: none"> Qualitative und quantitative Bestimmung von Metallen und Halbmetallen.
<ul style="list-style-type: none"> Rock-Eval-Pyrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> Zusammensetzung von Kerogen (unlösbarer Bestandteil organischer Materie in Erdölmuttergesteinen). Reifegradbestimmung von Erdölen bei der Kohlenwasserstoffexploration

6.4.3 Technische Ausführung

6.4.3.1 Gaschromatographie

Mit Hilfe der Gaschromatographie (GC) können gasförmige, flüssige oder gelöste organische Substanzgemische (häufig Kohlenwasserstoffe), die sich verdampfen lassen, in einzelne chemische Verbindungen aufgetrennt werden.

Bei der Gaschromatographie wird dem zu analysierenden Gemisch eine zusätzliche Substanz bekannter Konzentration (Standard) beigelegt. Die in niedrig-siedendem Lösungsmittel gelöste Probe wird im Gaschromatographen in einen Injektor (meistens beheizt auf bis zu 450 °C) durch ein Septum eingespritzt (Abb. 6.7). Die Substanzen werden mit einem inerten Trägergas (meist Stickstoff) in der Trennsäule transportiert, die im GC-Ofen eingebaut ist. Die Säule ist meist eine Quarzglaskapillare (Innendurchmesser von 0,1 bis 0,5 mm, Länge von 10 bis 60 m). Die Quarzglaskapillare ist innen mit einer zähflüssigen Schicht (häufig Organosiloxan-Verbindungen) als stationäre Phase belegt beziehungsweise befüllt. Durch eine stufenweise erhöhte Temperierung der Säule im Ofen des Gaschromatographen werden Stoffgemische getrennt. Hierbei wird der Umstand genutzt, dass die im Probengemisch vorhandenen Verbindungen einerseits unterschiedliche Siedepunkte und andererseits eine unterschiedliche Wechselwirkung mit der Säulenfüllung (stationäre Phase) aufweisen. So steigen zum Beispiel bei Kohlenwasserstoffen die Siedepunkte mit zunehmenden C-H-Kettenlängen an.

In der Säule werden die Einzelverbindungen von der stationären Phase, der Belagschicht der Säule, adsorbiert und dadurch vorübergehend dem Transport entzogen. Damit verbleiben die einzelnen Verbindungen, je nach Polarität und Dampfdruck der einzelnen Gasmoleküle, unterschiedlich lange an der stationären Phase der Säule. Die Verzögerung wird als chromatographische Retention bezeichnet. Hierdurch wird eine ausreichende Auftrennung des Probengemisches für eine Detektion bewirkt.

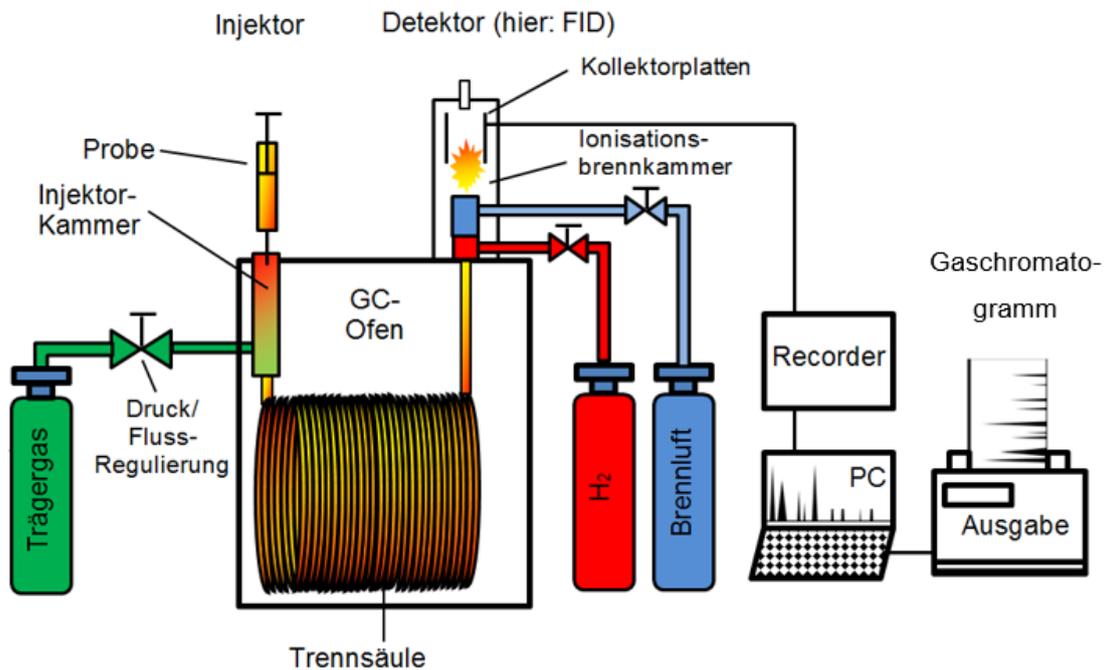


Abb. 6.7 Prinzipieller Aufbau eines Gaschromatographen

Am Ende der Säule befindet sich ein Detektor, der den Austritt der Substanzen aus der Säule registriert und computergestützt auswertet. Es gibt mehrere Detektorarten. Der zu wählende Detektor hängt von der chemischen Beschaffenheit der zu analysierenden Verbindungen ab. So werden zum Beispiel für aliphatische (kettenförmige) Kohlenwasserstoffe Flammenionisationsdetektoren (FID) und für chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) Elektroneneinfangdetektoren (ECD) genutzt. Anstelle dieser Detektoren kann auch ein Massenspektrometer (siehe Kapitel 6.4.3.2) eingesetzt werden. Dargestellt werden die Ergebnisse in Gaschromatogrammen, in denen die zeitabhängige Detektion jeder Einzelverbindung als Peak abgebildet wird. Durch die Einsatzzeit eines Peaks, die spezifisch für die Einzelverbindung ist, kann die Einzelverbindung identifiziert werden. Die Höhe des Peaks (genauer: Fläche unter dem Peak) ist ein Maß für die Konzentration, die unter Nutzung des Standards, dessen Konzentration bekannt ist, quantifiziert werden kann.

6.4.3.2 Massenspektrometrie

Die Massenspektrometrie (MS) dient zur Analyse der Art und Menge von anorganischen, vor allem jedoch organischen Verbindungen. Das Prinzip der Methode besteht darin, aus Atomen oder Molekülen durch geeignete Ionisierungsverfahren Ionen zu erzeugen und diese nach ihrem Verhältnis Masse/Ladung (m/z) zu trennen und diese Fragmente zu

detektieren. Die Ionisierung kann durch verschiedene Verfahren erreicht werden, wie durch die Zufuhr von Energie, zum Beispiel mittels Strahlung (Licht), oder Wärme, Kollision mit Elektronen oder anderen Ionen. Allen Verfahren gemein ist, dass in der Regel die Moleküle in Fragmente mit (Ionen) und ohne Ladung zerlegt werden.

Auch für die Trennung der Ionen bestehen unterschiedliche Verfahren (Sektorfeld-, Quadrupol-, Flugzeit- und Ionenfallenmassenspektrometer).

Bei einem Sektorfeld-Massenspektrometer, dem höchstauflösenden Massenspektrometrieverfahren, werden die Ionen in elektrischen und magnetischen Feldern abgelenkt. Der Radius der Kreisbahnen hängt von der Energie (im elektrischen Feld) und vom Impuls (im magnetischen Feld) der Ionen ab. Dabei werden die schwereren Ionen aufgrund der höheren Massenträgheit weniger stark abgelenkt als die leichteren. Die Masse kann dann durch Kenntnis von Ladung, Energie und Impuls bestimmt werden. Der prinzipielle Aufbau eines Sektorfeld-Massenspektrometers ist in Abb. 6.8 dargestellt

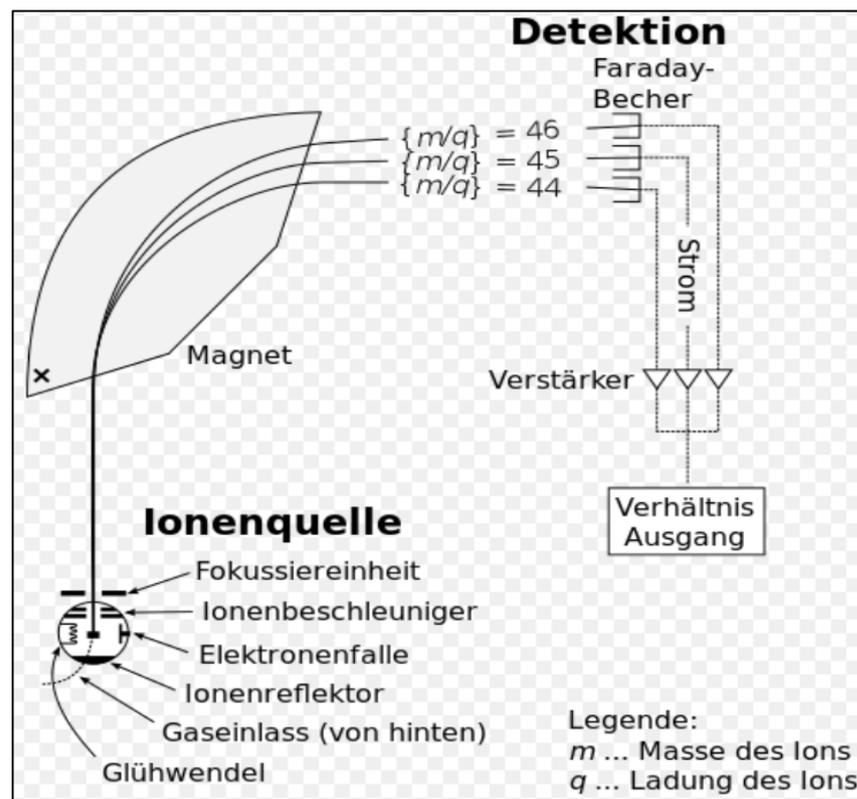


Abb. 6.8 Prinzipieller Aufbau eines Sektorfeld-Massenspektrometers /USGS 09/

Die getrennten Fragmente werden entsprechend ihres Masse-/Ladungsverhältnisses von einem Detektor registriert, der ein elektrisches Signal erzeugt, welches zur Menge der auf den Detektor auftreffenden Ionen proportional ist. Auch bei den Detektoren sind

verschiedene technische Messprinzipien (Photomultiplier, Sekundärelektronen–vervielfacher (SEV) oder Faraday-Auffänger) möglich. Die durch die Detektoren erfassten Peaks ergeben in ihrer Gesamtheit das Massenspektrum, welches mit Hilfe einer computergestützten Registriereinrichtung aufgezeichnet und ausgewertet wird.

Den verschiedenen Peaks eines Massenspektrums lassen sich die molaren Massen der detektierten Moleküle oder ihrer charakteristischen Bruchstücke zuordnen (sogenannte „fingerprints“). Die Identifizierung erfolgt durch den Vergleich mit umfangreichen Datenbanken, in denen die Massenspektren bekannter Verbindungen abgespeichert sind. Aus den detektierten Fragmentierungsmustern können jedoch auch Rückschlüsse auf die Molekülstruktur bislang unbekannter Verbindungen gezogen werden.

Häufig ist die Kombination eines Massenspektrometers mit einem Gaschromatographen, wobei der Gaschromatograph für eine ausreichende Trennung der Substanzgemische sorgt und das Massenspektrometer als Detektor angeschlossen wird. Weitere vorgeschaltete Trennverfahren sind zum Beispiel:

- Hochdruck-Flüssigchromatographie (HPLC, chromatographische Methode mit flüssiger mobiler Phase zur Analyse fester oder flüssiger Stoffgemische),
- Kapillarelektrophorese (CE, auf Elektrophorese basierende analytische Trennmethode),
- Ionenmobilitäts-Spektrometrie (IMS, auf der Bremsung von Ionen durch Kollision mit Gasmolekülen basierende analytische Trennmethode).

Das Einsatzspektrum der Massenspektrometrie ist sehr weit gefasst. Typische Anwendungen liegen neben der Charakterisierung von chemischen Verbindungen, in der Medizin (unter anderem Pharmazie, Doping-Kontrollen bei Sportlern), der Forensik (Analyse von Drogen- oder chemischen Kampfstoff beziehungsweise Sprengstoffspuren) oder der Biochemie. Heutige Massenspektrometer können bezüglich der Analysedauer sehr schnell sein (zum Beispiel bei der sekundenschnellen Detektion von Sprengstoffspuren am Gepäck von Fluggästen bei Sicherheitskontrollen an Flughäfen) und gelten als sehr hochauflösend und zuverlässig.

6.4.3.2.1 Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (engl. “inductively Coupled Plasma“, ICP-MS)

Bei der Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) handelt es sich um eine spezielle Form der Massenspektrometrie, die zur Detektion von anorganischen

Verbindungen und Elementen (zum Beispiel Schwermetalle) mit sehr hoher Empfindlichkeit verwendet wird, wobei induktiv gekoppeltes Plasma zum Einsatz kommt (engl. „inductively coupled plasma“, ICP). Im Probeninjektionssystem (Abb. 6.9) wird durch einen Generator ein hochfrequentes Mikrowellenfeld (HF) erzeugt. In diesem wird ein eingeleitetes Argon-Gas ionisiert, wodurch sich bei Temperaturen von 6.800 bis 10.000 K Plasma (elektrisch leitfähiges Gemisch bestehend aus neutralen und geladenen Teilchen) bildet. In das Plasma wird durch ein Injektionsrohr die Probe mit zusätzlichem Argon eingeblasen und dabei auf ca. 6.800 K erhitzt. Dabei werden sämtliche chemische Verbindungen zerstört und die freien Atome ionisiert.

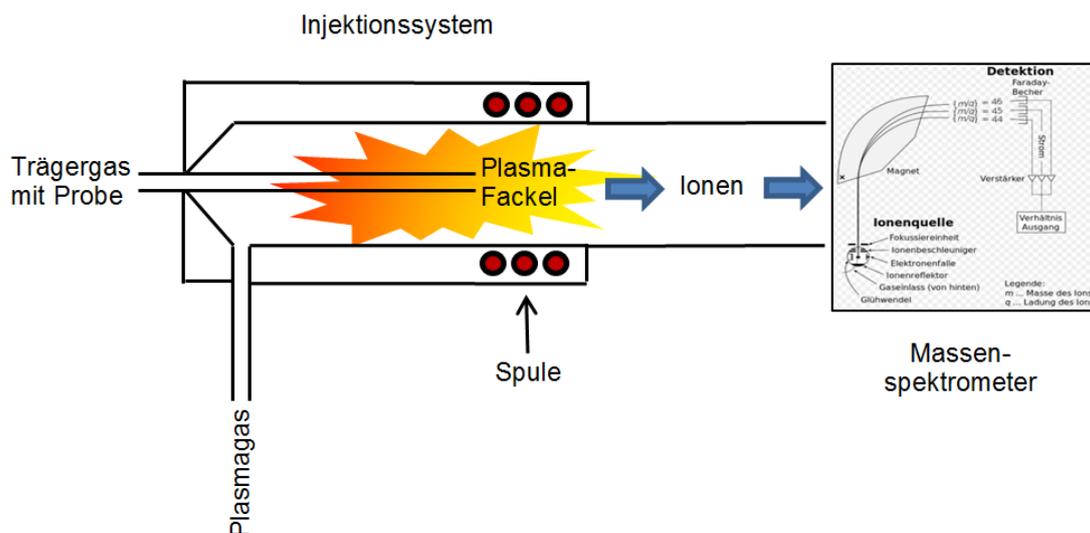


Abb. 6.9 Prinzipaufbau eines ICP-MS

Die entstandenen Ionen werden im Massenspektrometer (Abb. 6.8) entsprechend ihres Masse-/Ladungsverhältnis getrennt und am MS-Detektor erfasst. Mittels ICP-MS können chemische Elemente und Isotope sehr empfindlich detektiert werden (Größenordnung: Nanogramm/l). Flüssige oder gasförmige Proben können direkt in das ICP-MS injiziert werden. Im Fall von Feststoffproben müssen diese entweder erst (zum Beispiel durch Säuren) gelöst oder (zum Beispiel durch Laser-Ablation) verdampft werden. Spezielle Verfahren, wie zum Beispiel Akzeleratormassenspektrometrie oder Festkörpermassenspektrometrie, können teilweise eine noch empfindlichere Detektion ermöglichen.

6.4.3.3 Atomabsorptions-Spektrometrie (AAS)

Mit Hilfe der Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) können halbmetallische und metallische Elemente des Periodensystems qualitativ detektiert und ihre Konzentrationen quantitativ bestimmt werden. Das elementaranalytische Messverfahren beruht auf der elementspezifischen Absorption optischer Strahlung durch freie Atome im Gaszustand,

wobei die Strahlung einer Lichtquelle durch die Wechselwirkung mit den freien Atomen eines Elementes in einem bestimmten Spektralanteil (Linienspektrum) geschwächt wird. Diese Spektrallinien sind typisch für die Art des Elementes, unabhängig von der vorliegenden Verbindung.

Die prinzipielle Funktionsweise der AAS (siehe Abb. 6.10) ist die folgende: Durch eine Lichtquelle (Hohlkathodenlampen, HKL oder neuerdings Xenon-Kurzbogenlampen) wird Strahlung eines bekannten Lichtspektrums ausgesendet. Das Licht trifft auf eine Atomisierungseinheit. Dort wird in den Strahlengang die wässrige Probe zerstäubt, mit Brenngas und Oxidationsmittel vermischt und das entstandene Aerosol zum Beispiel in einer Gasflamme (Flammen-AAS) atomisiert. Neben der Flammen-AAS gibt es noch andere Typen von Atomisierungseinheiten, zum Beispiel die Graphitrohr- oder Hydrid-AAS. Allen gemein ist jedoch, dass die Atome der in der Probe enthaltenen Elemente angeregt werden, wobei aus dem gesamten Lichtspektrum der Hohlkathodenlampe die Linienspektren, die für die in der Probe enthaltenen Elemente charakteristisch sind, abgeschwächt werden.

Das durch die Atomisierung abgeschwächte Lichtspektrum der Lichtquelle wird in einem Detektor (Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) oder zunehmend Halbleiterdetektoren) registriert. Das Lichtsignal wird hier in ein elektrisches Signal verwandelt, das verstärkt und mit Hilfe eines Computers visualisiert und ausgewertet wird. Zur Verbesserung der optischen Detektion ist dem Detektor ein Monochromator in Form eines Gitters mit Austrittsspalt vorgeschaltet. Hierdurch wird eine Spektrallinie eines speziellen Elements ausgewählt und der unerwünschte Anteil der Strahlung ausgelöscht. Dieser teilt somit das aus Lampe und Atomisierungseinheit stammende Licht in sein Spektrum auf und isoliert daraus ein bestimmtes Wellenlängenspektrum, welches zur Messung in den Detektor gelangt.

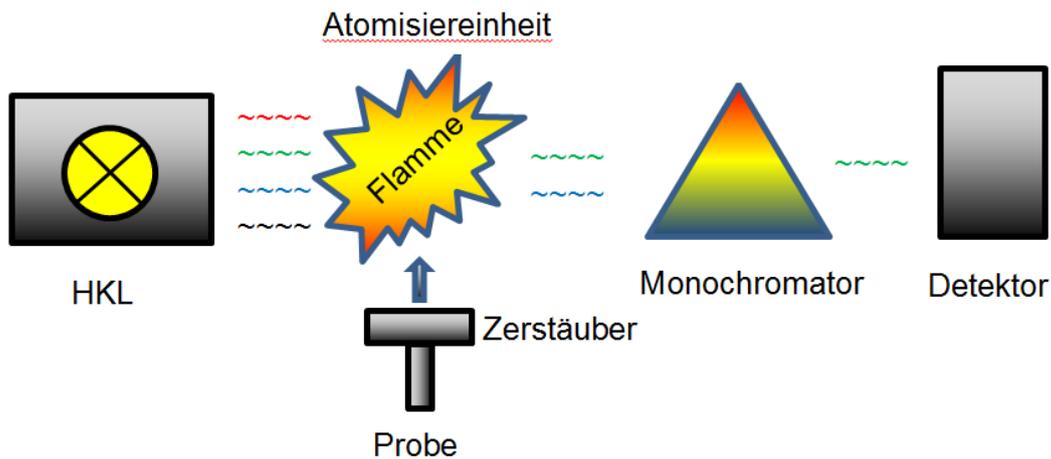


Abb. 6.10 Prinzipaufbau eines Flammen-AAS

Da die abgeschwächten Spektralbereiche für die Elemente charakteristisch sind und das Maß der Abschwächung proportional zur Konzentration der in der Probe enthaltenen Elemente ist, können sowohl die Elemente als auch ihre Konzentration bestimmt werden. Für die Konzentrationsbestimmung ist eine Kalibrierung mit einer Standardsubstanz bekannter Konzentration erforderlich.

6.4.3.4 Rock-Eval-Pyrolyse

Das Potential zur Bildung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen (KW) aus organischen Substanzen der Sedimentgesteine hängt wesentlich von dem Kerogen-Gehalt des Erdölmuttergesteins und dessen Zusammensetzung ab. Die Kerogen-Analyse erfolgt bei der Kohlenwasserstoffexploration häufig durch die Rock-Eval-Pyrolyse /JAH 16/. Unter Pyrolyse versteht man die thermochemische Spaltung organischer Verbindungen.

Im Pyrolyse-Ofen wird die Probe unter Inertgas-Atmosphäre (Stickstoff oder Helium) in einem ersten Schritt auf 300 °C erhitzt. Dabei werden die leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe („HC“, Kettenlängen < 40 Kohlenstoffatome) freigesetzt und durch einen Flammenionisationsdetektor (FID) detektiert (siehe Abb. 6.11). Der registrierte Peak wird als S1-Maximum („Freie KW“ in mg HC/g Gestein) quantifiziert.

Die Probe wird nachfolgend bis auf 650 °C erhitzt und dabei vollständig pyrolysiert. Bei dieser Temperatur finden Crack-Prozesse statt, deren Produkte freigesetzt werden. Die Menge der Kohlenwasserstoffabgabe wird ebenfalls durch den FID aufgezeichnet und das Peak-Maximum als S2 („Öl-Potential“) dargestellt.

Das S3-Maximum kennzeichnet die durch Pyrolyse freisetzbare CO₂- beziehungsweise CO-Menge und wird mittels eines Infrarot-Detektors (IRD) ermittelt.

Danach wird die Probe auf 850 °C erhitzt. Bei der dadurch stattfindenden Oxidation der Probe werden weiterhin CO₂ beziehungsweise CO freigesetzt und als Restkohlenstoff durch den Infrarot-Detektor registriert (S4-Maximum, residual carbon).

Durch die verschiedenen, oben erwähnten S-Werte können zusammen mit anderen Parametern (zum Beispiel der Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff, TOC) Rückschlüsse auf den Typ sowie die Reife, Entstehung und Qualität (zum Beispiel Sauerstoff- und Wasserstoffgehalt des Kerogens) gezogen werden. Dies sind Parameter, die bei der Kohlenwasserstoffexploration eine wichtige Rolle spielen.

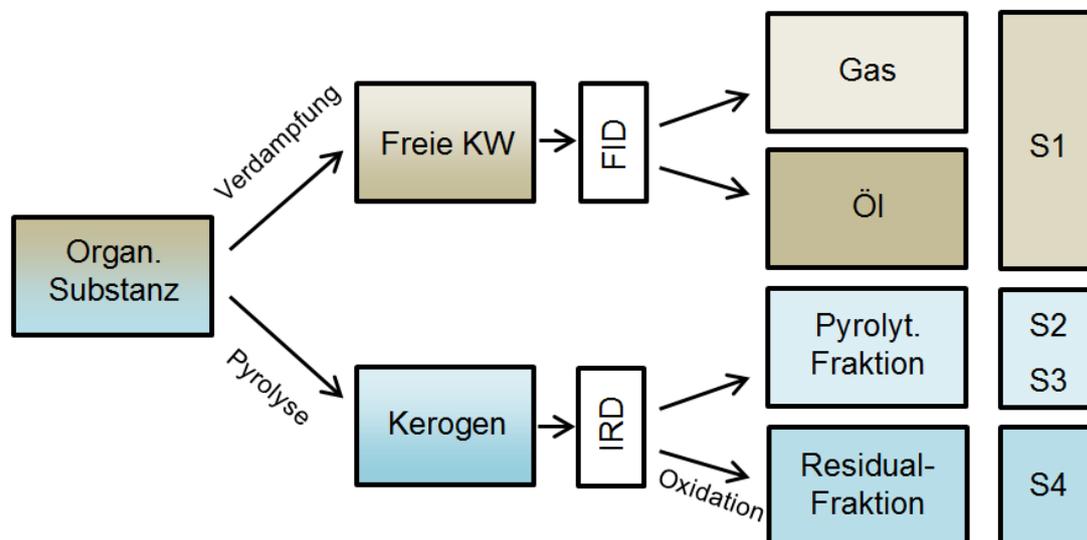


Abb. 6.11 Kohlenwasserstoff-Fraktionierungsschemata bei der Rock-Eval-Pyrolyse

6.4.4 Aussagekraft, Grenzen sowie einschränkende Randbedingungen

Auch im Fall der organischen und anorganischen Analytik gilt, dass die Anzahl der Proben und die räumlich repräsentative Auswahl der Probennahmelokationen die Aussagekraft und Repräsentanz von Messergebnissen für die Charakterisierung einer geologischen Formation bestimmen. Ebenso stellt sich auch hier die Frage nach der Skalierbarkeit, das heißt der Übertragbarkeit von Laboruntersuchungen auf großmaßstäbliche in situ-Verhältnisse. Zusätzlich ist anzumerken, dass auch die Art der Probenahme, der Transport und die Lagerung erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Analyseergebnisse haben.

Bezogen auf die Einzelanalyse ist die Genauigkeit bei Anwendung der im Vorgegangenen dargestellten spektrometrischen und chromatographischen Verfahren sehr hoch. Dies betrifft zum einen die analytische Nachweisgenauigkeit und die Informationen über die chemische Zusammensetzung der untersuchten Substanz. Insofern ist zu prüfen, welche Informationstiefe für die mineralogisch-geochemische Charakterisierung einer Gesteinsformation im erforderlich ist oder ob Summenparameter „Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff“ (engl. „total organic carbon“, TOC) oder „gelöster organischer Kohlenstoff“ (engl. „dissolved organic carbon“, DOC) bereits eine, für eine geowissenschaftliche Charakterisierung ohne Fokus auf beispielweise Kohlenwasserstoff-Exploration ausreichende Aussagekraft aufweisen.

Bei speziellen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Charakterisierung von Gesteinsformationen können die beschriebenen Analyseverfahren jedoch wertvolle Informationen liefern. Dies betrifft beispielsweise die Altersdatierung mit Hilfe der Massenspektrometrie oder die Rock-Eval-Pyrolyse von in Tonstein enthaltener organischer Substanz, welche Aufschluss über die Zusammensetzung und Genese von Tonsteinformationen und erdgeschichtliche Temperatureinflüsse auf diese Gesteine geben kann.

6.4.5 Aufwand

Bei den meisten vorgestellten geochemischen Analyseverfahren besteht der Hauptaufwand in der Probenvorbereitung und in der Bereitstellung der technischen Ausstattung. Die Probenvorbereitung besteht im Regelfall in der Lösung der Probe, gegebenenfalls dem Abtrennen von Verunreinigungen sowie dem Anreichern der Probe auf einen zur Analyse geeigneten Konzentrationsbereich. Hinzu kommt die Dotierung mit einem Standard. Zur Durchführung aller Analysen ist der Einsatz qualifizierten und spezialisierten Personals (Labortechniker) erforderlich. Dagegen läuft die eigentliche Analytik (Auftrennung, Detektion, Messwerterfassung und Auswertung) weitgehend automatisiert ab und der Personalbedarf ist gering.

6.4.6 Kombinationsmöglichkeiten der geochemischen Analysen mit anderen Methoden

Bei den im Vorgegangenen dargestellten Analyseverfahren handelt es sich um heutige Standardmessverfahren, die ausreichend aussagekräftig und genau sind und somit im Regelfall keiner Kombination mit anderen Verfahren bedürfen.

6.4.7 Alternative Methoden

Alternative Methoden zu den genannten spektrometrischen und chromatographischen Verfahren wären im Fall des Nachweises anorganischer Komponenten ältere Nachweismethoden wie Titrations- oder Fotometrieverfahren. Diese zeigen jedoch eine deutlich geringere Empfindlichkeit und bedeuten einen hohen labortechnischen Zeitaufwand. Im Fall der Analytik organischer Substanzen kann es, wie oben erwähnt, je nach Anwendungsfall auch ausreichen, die Summenparameter TOC oder DOC zu ermitteln.

6.4.8 Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik sowie Neu- und/oder Weiterentwicklungen

Bei den im Vorangegangenen vorgestellten Techniken handelt es sich um zum Teil sehr hochauflösende und empfindliche Messverfahren im Bereich der chemischen Analytik. Der Stand der Technik entwickelt sich dabei ständig fort. Die Fortentwicklungen betreffen vor allem die Verringerung der Nachweisgrenzen, die Beschleunigung der Messdauer als auch die Verkleinerung der Abmessungen der Analysegeräte. Beispielsweise ist es heute möglich, mobile Massenspektrometer für kriminaltechnische Untersuchungen oder Sprengstoffanalysen bei Sicherheitskontrollen in Flughäfen einzusetzen. Ständige Fortschritte werden ebenso bei der Erfassung/Digitalisierung von Messgrößen und der Datenauswertung (Post-Processing) erzielt.

Tab. 6.8 Weiterführende Informationen zu Geochemie im Labor

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Lehrbücher	<ul style="list-style-type: none">• Encyclopedia of Geochemistry /WHI 18/• Mass Spectrometry /GRO 17/• Practical Gas Chromatography /DET 14/• Analytical Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry /SCH 99/• Einführung in die HPLC /LIN 96/• Praktikum der Analytischen Geochemie /HEI 90/• Chromatographic Methods /BRA 85/• Massenspektrometrie in der organischen Chemie /REM 77/
Weblinks	<ul style="list-style-type: none">• Entsprechende Wikipedia-Seiten• MyLab International /MLI 18/• Chem-Page /GUM 16/• Alphacrom /ALP 16/• Chemie.de /LUM 18/• Spektrum.de /SPE 14/• GEO-Data /GEO 18/

Art der Information	Referenzen (Auszug)
Spezialisierte Informationen (zum Beispiel Fachgesellschaften, Zeitschriftenreihen, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • International Society for Ion Mobility Spectrometry (ISIMS) • American Society for Mass Spectrometry (ASMS) • Analytical Chemistry (ACS Publications) • Geochimica et Cosmochimica Acta • Journal of Analytical Chemistry • Journal of The American Society for Mass Spectrometry • Chromatographia • International Journal for Ion Mobility Spectrometry
Konferenzen	<ul style="list-style-type: none"> • International Mass Spectrometry Conference IMSC • Chromatography • Mass Spectra
Internationale (inklusive geplante) Anwendung der Geochemie im Rahmen von Endlagerprojekten	<ul style="list-style-type: none"> • Belgien /VAN 14/ (TOC, Rock-Eval-Pyrolyse) • Schweden /SKB 00/ (DOC) • Schweiz /JOH 02/ (DOC)

7 Darstellung von Messmethoden zur Erfüllung der Anforderungen gemäß StandAG

7.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Abschließendes Ziel des Vorhabens ist es, den aus dem StandAG resultierenden Bedarf an Messmethoden zu ermitteln. Zunächst werden dazu die Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien aus dem Standortauswahlgesetz (StandAG) /STA 17/ ausgewertet. Daraus werden die zu messenden Parameter beziehungsweise Messgrößen abgeleitet. Anschließend wird geprüft, ob zu jeder notwendigen Messgröße eine geeignete Messmethode oder eine Kombination von Messmethoden vorliegt. Diese Prüfung erfolgt mittels eines Abgleichs der in Kapitel 4–6 formulierten Detailbeschreibungen einer jeweiligen Messmethode. Der Darstellung des Ist-Zustands aus den vorausgegangenen Kapiteln („Welche Methoden gibt es?“) folgt ein Perspektivwechsel zu der Frage „Welche Methoden werden benötigt?“.

Im Anschluss erfolgt eine vergleichende Darstellung der Messmethoden, die nach der Prüfung (siehe oben) identifiziert wurden. In die Darstellung geht ein, ob und inwieweit für dieselbe Messgröße verschiedene Methoden geeignet sind. Falls dies für eine Messgröße der Fall sein sollte, werden Vor- und Nachteile der Messmethoden abgewogen. An dieser Stelle wird auch die Anwendbarkeit auf unterschiedliche Gesteinstypen mit in den Vergleich einbezogen, so dass auch die Wirtsgesteine nach § 1 Abs. 3 StandAG Berücksichtigung finden.

Nicht mit einbezogen in die Ermittlung der zu messenden Parameter werden, wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, Messmethoden, mit denen rein hydrologische, hydrogeologische und/oder hydrogeochemische Eigenschaften des Untergrunds erkundet werden. Diese Methoden sind Gegenstand des Vorhabens „Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren (übErStand)“ (FKZ 4717003).

Deshalb bleiben auch die Anlagen 1, 7, 9 und 10 zu § 24 StandAG hier vollständig unberücksichtigt. Dagegen sind in einigen Anlagen zu § 24 sowohl geologische als auch hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Aspekte erfasst. Wenn sich diese Aspekte mit denen des Vorhabens „übErStand“ überschneiden, wird dies in der Beschreibung erwähnt. Für das Vorhaben „MessEr“ werden deshalb die Anlage 2 bis 6 sowie 8 und 11 berücksichtigt.

Die zurzeit in Erstellung begriffenen Rechtsverordnungen zu § 26 Abs. 3 StandAG und zu § 27 Abs. 6 StandAG werden im Rahmen des Vorhabens nicht berücksichtigt.

7.1.1 Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 25 StandAG)

Bei der Anwendung der planungswissenschaftlichen Kriterien geht es nicht um einen sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen untereinander, sondern um eine Abwägung der Notwendigkeit der Endlagerung als gesellschaftliche Verpflichtung gegenüber bestehenden Schutzgütern, wie zum Beispiel Grundwasservorkommen und anderen unterirdischen Ressourcen oder existierender Bebauung beziehungsweise Naturschutzgebieten sowie Kulturgütern. Die Ausführungen in § 25 StandAG und in der Anlage 12 implizieren, dass diese Schutzgüter bereits existieren, damit in Ausdehnung und Lage bekannt sind und insofern nicht der Exploration bedürfen.

Deshalb werden im Rahmen dieses Vorhabens die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 25 StandAG nicht berücksichtigt.

7.2 Identifikation der Messgrößen und Abgleich mit den Messmethoden

Wie oben erwähnt, werden die zu messenden Parameter beziehungsweise Messgrößen auf Grundlage der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG, abgeleitet. Teilweise ist ein Kriterium oder eine Anforderung bereits als Parameter oder Messgröße im StandAG formuliert. Dann kann dies direkt einem Erkenntnisinteresse, welches in den Kapitel 4 bis 6 formuliert wurde, zugeordnet werden.

In vielen Fällen ist die Ermittlung des zu messenden Parameters beziehungsweise der Messgröße komplexer. In den folgenden jeweiligen Kapiteln zu den Ausschlusskriterien, den Mindestanforderungen und den Abwägungskriterien werden deshalb die genannten Kriterien und insbesondere die sogenannten „Bewertungsgrößen“ und die „Indikatoren“, die in den relevanten Anlagen (siehe Kapitel 7.1) zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG zu finden sind, auf Messgrößen zurückgeführt, die letztlich von Interesse für die Erkundung sind.

In vielen Fällen wird in den genannten Anlagen die bewertungsrelevante Eigenschaft oder die Bewertungsgröße beziehungsweise der Indikator dieser Eigenschaft auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) oder den Endlagerbereich bezogen. Der ewG bzw. Endlagerbereich wird während der Standortauswahlverfahrens näher konkretisiert werden. Deshalb muss die Ermittlung der zu messenden Parameter/Messgrößen,

die sich aus den Anlagen des StandAG für den ewG und den Einlagerungsbereich ergeben, so durchgeführt werden, dass ein Abgleich mit den Messmethoden durchgeführt werden kann. Das bedeutet, dass an dieser Stelle versucht wird, diese zu messenden Parameter/Messgrößen auf einen, hier nicht näher definierbaren zu untersuchenden „Gesteinskörper“ anzuwenden und auch die Messmethoden aus den Kapiteln 4 bis 6 so abzugleichen.

Das vorliegende Dokument kann zu /LAR 10/ und /GOL 09/ als eine thematische Weiterentwicklung verstanden werden, da es erstmals den Bogen von Messmethoden bis hin zu Anforderungen spannt, die auf der gesetzlichen Basis des StandAG fußen. Es ist nicht Aufgabe und Ziel des Dokuments auf Basis des StandAG ein übertägiges Erkundungsprogramm für bestimmte Wirtsgesteine vorzuschlagen. Vielmehr soll der folgende Abgleich Möglichkeiten aufzeigen, die zur Erkundung eines potenziellen Endlagerstandorts in Frage kommen.

7.2.1 Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG

In § 22 StandAG werden insgesamt sechs Ausschlusskriterien benannt. Drei dieser Kriterien, nämlich „großräumige Vertikalbewegungen“, „seismische Aktivität“ und „vulkanische Aktivität“, werden bereits im Rahmen von langfristigen regionalen oder sogar globalen Messungen beobachtet und sind im Rahmen einer separaten Messkampagne im Rahmen des StandAG nicht direkt zugänglich. Diese Messungen werden dem Monitoring, also einem konstanten und langfristigen Beobachten der Erde, durch die geologischen Dienste, den Vermessungsbehörden und verschiedenen Forschungseinrichtungen, zugeordnet. Beispielhaft seien hier die seismologischen Messstationen genannt, die fest installiert an zahlreichen Lokationen in Deutschland vorhanden sind, und mit welchen die seismische Aktivität der Erde beobachtet wird. Es wird somit davon ausgegangen, dass Informationen zu großräumigen Vertikalbewegungen, zur seismischen und vulkanischen Aktivität heute vorliegen bzw. zurzeit erhoben werden.

Drei weitere Kriterien sind die „Aktivität von Störungszonen“, „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ sowie das „Grundwasseralter“.

Mit Bezug zum Kriterium „Aktivität von Störungszonen“ wurde vom BASE das Forschungsvorhaben „Evaluierung des Kenntnisstandes von aktiven Störungszonen in Deutschland (KaStör)“ (FKZ 4717F01301) beauftragt. Aus diesem Ausschlusskriterium folgen Parameter und Messgrößen, die mittels einer Messkampagne ermittelt werden können. Ein wichtiger Parameter ist die Identifikation von Störungszonen und zusätzlich

– auch bei nur grob bekannten Störungen – die Ermittlung ihrer genauen Lokation, ihres Versatzbetrages und ihrer Raumlage. Diese Parameter können durch verschiedene Methoden ermittelt werden. Für Störungszonen, die bis an die Oberfläche reichen, können diese Parameter beispielsweise durch geologische Kartierungen und der Fernerkundung grob erfasst und kartiert werden. Genauer kann die Lokation, der Versatzbetrag und die Raumlage von Störungszonen im Untergrund beispielsweise mit seismischen Messungen detektiert werden, dabei werden für großräumige Störungszonen in der Regel seismische 2D-Messungen genutzt.

Das Grundwasseralter ist ein hydrogeologisches Ausschlusskriterium und ist Gegenstand des Vorhabens „übErStand“ (FKZ 4717003). Die Identifikation der früheren oder gegenwärtigen bergbaulichen Tätigkeit ist kein geowissenschaftliches Erkundungsziel, sondern kann beispielsweise auf Basis der Datenlage in den Bergbehörden erfolgen. Die Identifikation ist somit nicht von Relevanz für das Vorhaben „MessEr“. Frühere oder gegenwärtige bergbaulicher Tätigkeit kann das Gebirge so schädigen, dass negative Auswirkungen auf Spannungszustand oder Permeabilität zu besorgen sind /STA 17/. Die Messung dieser Auswirkungen kann durch geowissenschaftliche Messmethoden erfolgen. Die Auswirkungen entsprechen den Indikatoren, die zum Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften (Kapitel 7.2.3.4) gehören. Deshalb wird der Abgleich mit den Messmethoden in Kapitel 7.2.3.4 beschrieben.

Die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG mit Ausnahme der Kriterien „Grundwasseralter“ und der „Aktivität von Störungszonen“ können damit im Rahmen des Vorhabens „MessEr“ insgesamt durch einen der folgenden Aspekte charakterisiert werden:

- Die Informationen, die zur Prüfung der Ausschlusskriterien „großräumige Vertikalbewegungen“, „seismische Aktivität“ und „vulkanische Aktivität“ benötigt werden, sind einem dezidierten übertägigen Erkundungsprogramms nicht zugänglich, sondern sind dem Monitoring zuzuordnen.
- Die Informationen, die zur Prüfung der Ausschlusskriterien „großräumige Vertikalbewegungen“, „seismische Aktivität“, „vulkanische Aktivität“ und „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ liegen bereits vor.

In Tab. 7.1 sind die Ausschlusskriterien mit ihrer Relevanz für das Vorhaben „MessEr“ und die daraus für das Vorhaben „MessEr“ abgeleiteten Messgrößen dargestellt.

Tab. 7.1 Messgrößen abgeleitet aus § 22 StandAG („Ausschlusskriterien“)

Ausschlusskriterium	Relevanz	Messgröße
Großräumige Vertikalbewegungen	<input type="checkbox"/>	
Aktive Störungszonen	<input checked="" type="checkbox"/>	<ul style="list-style-type: none"> • Identifikation von Störungen • Lokation von Störungen • Versatzbetrag und -richtung
Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit	<input type="checkbox"/>	
Seismische Aktivität	<input type="checkbox"/>	
Vulkanische Aktivität	<input type="checkbox"/>	
Grundwasseralter	★	

: keine Relevanz für „MessEr“; : relevant für „MessEr“; ★: relevant für „übErStand“

7.2.2 Mindestanforderungen nach § 23 StandAG

In § 23 StandAG werden insgesamt fünf Mindestanforderungen benannt:

- Gebirgsdurchlässigkeit
- Mächtigkeit des ewG
- Minimale Teufe des ewG
- Fläche des Endlagers
- Erhalt der Barrierewirkung

Die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ ist eine hydrogeologische Mindestanforderung und gehört somit zum Vorhaben „übErStand“. Nach § 23 StandAG gilt diese Mindestanforderung für den ewG. Insoweit ist auch die Identifikation des ewG von Bedeutung, so dass diese Mindestanforderung ebenfalls für das Vorhaben „MessEr“ relevant ist. Auch die drei Mindestanforderungen „Mächtigkeit des ewG“, „Minimale Teufe des ewG“ sowie „Fläche des Endlagers“ zielen alle auf den ewG ab, der aber zum Zeitpunkt der Erkundung noch nicht abschließend festgelegt ist. Deshalb wird hier, wie in der Einleitung zu Kapitel 7.2 erwähnt, die Ermittlung der Messgrößen und der Abgleich mit den aus Kapitel 2 - 6 bekannten Messmethoden hinsichtlich eines zu untersuchenden Gesteinskörpers durchgeführt.

Die Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ betrifft eine Einschätzung oder auch Prognose, die insbesondere auf Basis der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen erfolgen soll. Insofern beinhaltet diese Mindestanforderung keine direkte Relevanz für die übertägige Erkundung, so dass aus dieser kein zu messender Parameter hervorgeht.

Der zu untersuchende Gesteinskörper muss für die vier genannten Mindestanforderungen hinsichtlich der Teufenlage der Gesteinsschichten und ihrer Ausdehnung, also auch hinsichtlich gegebenenfalls begrenzender Strukturen untersucht werden. Insgesamt ist somit die Erkundung der Struktur des Untergrunds und die Identifikation der lithologischen Abfolge erforderlich.

Der Abgleich der Messmethoden zu den Mindestanforderungen kann analog zu dem Abwägungskriterium „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“ in Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 (Kapitel 7.2.3.1) durchgeführt werden. Die dort genutzten Indikatoren („Barrieremächtigkeit“, „Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch den ewG“, „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG“ und „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit“) sind äquivalent zu den Parametern und Messgrößen, die sich aus den Mindestanforderungen ergeben.

Deshalb sind die Ergebnisse des Abgleichs für die hier betrachteten Mindestanforderungen (siehe Tab. 7.2) die gleichen wie für Anlage 2 StandAG. Da die Anlage 2 StandAG jedoch weiter gehend ist, ist die Diskussion und der Abgleich mit den Messungen im nächsten Kapitel dargestellt. Im Ergebnis können zur Erkundung der resultierenden Messgrößen aus den Mindestanforderungen die flächenhaften Erkundungsmethoden der Seismik (Kapitel 4.2.1) und der Potentialmethoden (Gravimetrie, Geomagnetik, Geoelektrik, Elektromagnetik; siehe Kapitel 4.2.2 bis 4.2.5) sowie als punktuelle Methode die der Tiefbohrung (Kapitel 5.1.2) eingesetzt werden.

Tab. 7.2 Messgrößen abgeleitet aus § 23 StandAG („Mindestanforderungen“)

Mindestanforderung	Relevanz	Messgröße
Gebirgsdurchlässigkeit des ewG	★	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Lithologie/Petrografie
Mächtigkeit des ewG	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Lithologie/Petrografie

Mindestanforderung	Relevanz	Messgröße
Minimale Teufe des ewG	<input checked="" type="checkbox"/>	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Lithologie/Petrografie
Fläche des Endlagers	<input checked="" type="checkbox"/>	<ul style="list-style-type: none"> • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation und Lokation von begrenzenden Strukturen im Untergrund • Lithologie/Petrografie
Erhalt der Barrierewirkung	<input type="checkbox"/>	

: keine Relevanz für „MessEr“; : relevant für „MessEr“; ★: relevant für „übErStand“

7.2.3 Geowissenschaftliche Abwägungskriterien nach § 24 StandAG

7.2.3.1 Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper nach Anlage 2 StandAG

Dieses Kriterium wurde bereits in ähnlicher Weise im Bericht des AKEnd /AKE 02/ („günstige Konfiguration von Wirtsgestein und ewG“) vorgeschlagen. Die zugehörigen Indikatoren sind Teufe, Mächtigkeit, Ausdehnung und Umschließung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Die übertägige Erkundung soll dazu dienen, im Groben definieren zu können, wie der Gesteinskörper als Ganzes aufgebaut ist. Für die Erkundung des Untergrunds müssen also die Teufen aller geologischen Strukturen (Gesteinsschichten, Störungen, etc.), ihre Ausdehnung, ihre interne Homogenität und ihre Raumlage (z. B. Einfallen, Mächtigkeitssänderungen, etc.) im Untergrund ermittelt werden. Der Gesteinskörper wird von weiteren geologischen Strukturen (z. B. Störungen) begrenzt, die identifiziert und mit ihrer genauen Lokation sowie ihres Versatzbetrages und -richtung untersucht werden müssen. Dazu muss ebenfalls eine sichere Identifikation der Lithologie/Petrografie erfolgen. Diese zu messenden Parameter sind äquivalent zu den ermittelten Parametern auf Basis der Mindestanforderungen und auch Ausschlusskriterien (siehe voriges Kapitel).

Der in Anlage 2 StandAG erwähnte „Potenzialbringer“ bei Tonstein lässt sich auch teilweise als zu erkundende Konfiguration des Gesteinskörpers auffassen, bei der lediglich

die spezifischen hydraulischen Eigenschaften nicht Teil dieser Konfiguration sind, sondern gegebenenfalls gesondert erkundet beziehungsweise festgestellt werden müssen. Diese hydrogeologische Anforderung wird dem Vorhaben „übErStand“ zugeordnet.

Um einen Gesteinskörper als Ganzes abzubilden und ein Modell (siehe Kapitel 3) davon zu entwickeln, wie der Untergrund beziehungsweise der zu erkundende Gesteinskörper strukturell aufgebaut ist, liefern punktuelle Methoden (Bohrungen sowie Bohrlochmessungen und -tests) ebenso wenig ausreichende Informationen wie Laboruntersuchungen. Erste Informationen zur Erstellung eines Modells des Untergrundes liefert zunächst einmal die geologische Karte. Diese kann, je nach Bedarf (zum Beispiel bei veralteter Datengrundlage), aktualisiert und/oder im Detail spezifiziert werden. Als weitere Basis für ein Untergrundmodell dienen flächenhafte geophysikalische Erkundungen (siehe Kapitel 4.2). Bei Heranziehung der näheren Informationen dieser Methoden (jeweilige Datenblätter) zeigt sich, dass die Methoden der Gravimetrie, der Geomagnetik, der Elektromagnetik und insbesondere der Seismik Erkenntnisse über den Aufbau des Untergrundes, sowohl großräumig als auch lokal, zu liefern in der Lage sind. Welche Methode hierbei den größten Informationsgehalt zu liefern in der Lage ist, hängt sowohl vom Gesteinstyp als auch von der jeweiligen geologischen Situation, ab.

Tab. 7.3 Messgrößen aus Anlage 2 des StandAG zu § 24

Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Relevanz	Messgröße
Barrierenmächtigkeit [m]	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Lithologie/Petrografie
Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG)	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation und Lokation von begrenzenden Strukturen im Untergrund • Lithologie/Petrografie
Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG [m unter Geländeoberfläche]	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Lithologie/Petrografie
Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation und Lokation von begrenzenden Strukturen im Untergrund • Lithologie/Petrografie
Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischen Potenzial, die die Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG ermöglichen können.	★	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation und Lokation von Strukturen im Untergrund

☐: keine Relevanz für „MessEr“; ☒: relevant für „MessEr“; ★: relevant für „übErStand“

Die Methode der Seismik bietet den Vorteil, dass sie zwar für jedes Gestein einsetzbar ist, allerdings die Aussagekraft (z. B. struktureller Internaufbau) aufgrund der Impedanzabhängigkeit des Messverfahrens durch den zu untersuchenden Gesteinstyp eingeschränkt ist (siehe Kapitel 4.2.1). Zur repräsentativen Erkundung eines flächenhaft großen Gebiets und zur Verifikation der geologischen Karte können seismische 2D-Profile (Reflexionsseismik) erstellt werden, die den Untergrund nicht in seiner ganzen Komple-

xität abbilden können. Eine 3D-Reflexionsseismik dagegen bietet unter idealen Bedingungen die vollständige Abbildung der Struktur des Untergrunds, ist aber durch einen sehr hohen Aufwand gekennzeichnet und somit tendenziell begrenzt auf kleinere Gebiete oder Standorte. Spezielle Fragestellungen, wie etwa die Oberfläche von Festgesteinen unter Lockersedimentbedeckung, können mit refraktionsseismischen Messungen erkundet werden. Einzelne Fragestellungen, wie beispielsweise nach dem Internaufbau von Gesteinskörpern, sind nicht immer uneingeschränkt beantwortbar. Dies betrifft kristalline Gesteine, die innerhalb des Gesteinskörpers in der Regel wenig Impedanzkontraste abbilden. Salzgesteine sind in ähnlicher Weise betroffen, jedoch aufgrund der Tatsache, dass sie zyklisch als Sedimentablagerungen einen stärkeren Wechsel der Impedanzkontraste aufweisen, teilweise besser zu detektieren. Dies ist auch abhängig davon, ob das Salzgestein in flacher oder steiler Lagerung im Untergrund angetroffen wird. In steiler Lagerung lässt sich durch geeignete Auswertemethoden der interne Salzgesteinsaufbau in den Grundzügen oft darstellen.

Die oben (Kapitel 4.2) erwähnten Potenzialmethoden (Gravimetrie, Geomagnetik, Elektromagnetik) sind in ihrer Durchführung wesentlich weniger aufwändig als die Anwendung von Seismik, bieten aber oftmals eine nur eingeschränkte Auflösung. Das bedeutet, dass kleinräumige Detailinformationen nicht detektierbar sind, die groben Ausmaße und Lage eines Gesteinskörpers aber erkannt werden können. Das qualifiziert diese Methoden ebenfalls dazu, wichtige Informationen zur Erkundung zu liefern, allerdings stark eingeschränkt hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für den jeweiligen Gesteinstyp. Für Salzgesteine in steiler Lagerung (zum Beispiel Diapire), die in einen Sedimentkörper aufgestiegen sind oder kristalline Gesteinskörper zeigen die Potenzialmethoden in der Erkundung jeweils deutlich sichtbare (negative beziehungsweise positive) Anomalien auf. Einzelne Diapire oder kristalline Gesteinskörper, die aufgrund ihrer Entstehung oder aufgrund tektonischer Prozesse in mehrere Teile gegliedert sind, lassen sich durch diese Methoden gut voneinander oder vom umgebenden Untergrund abgrenzen. Der hoch aufgelöste Umriss oder der interne Aufbau eines Gesteinskörpers können allerdings nicht ermittelt werden. Für Tonsteininformationen liefern die Potenzialmethoden keine Anomalien, die Rückschlüsse auf dieses Gestein zulassen. Als Nachteil der Potenzialmethoden kann für die Modellbildung des Untergrunds festgestellt werden, dass das Problem der Interpretation (siehe ab Kapitel 4.2.2) solcher Messungen zwingend den Einsatz weiterer Methoden oder die Nutzung bekannter Information über den Untergrund (sogenannter a-priori Informationen) erforderlich macht.

Mit keiner der Methoden der übertragenden Geophysik (Seismik, Potenzialmethoden) kann die Lithologie im Untergrund sicher identifiziert werden. Deshalb besteht die Notwendigkeit, weitere Methoden einzusetzen, um die gewonnenen Erkenntnisse zum Untergrund auszuwerten und abzusichern. Obwohl, wie oben erwähnt, Bohrungen und Laboruntersuchungen allein keine ausreichenden Informationen zur Konfiguration des Gesteinskörpers liefern, sind zumindest Tiefbohrungen unverzichtbar zur eindeutigen Interpretation der Ergebnisse aus flächenhaften Methoden. Denkbar ist zum Beispiel der Einsatz von Kernbohrungen, die gesteinsunabhängig zur Identifikation/Verifikation der Lithologie, der Teufe und der Mächtigkeit der Gesteinshorizonte einsetzbar sind. Zusätzliche Erkenntnisse hinsichtlich der geophysikalischen Eigenschaften der Gesteine können in-situ Bohrlochmessungen liefern, die je nach Gesteinstyp in unterschiedlichen Messkonfigurationen eingesetzt werden können. Ebenfalls ergänzende Informationen liefern Labormessungen an den erbohrten Kernen, beispielsweise können Messungen der Wellengeschwindigkeit an Gesteinen dazu beitragen, dass das Prozessieren und die Interpretation der Seismik verbessert wird.

In /GOL 09/ wurden u. a. *„Methoden und die Zielsetzung der international durchgeführten Erkundungen für bereits errichtete bzw. in Errichtung befindliche Endlager für radioaktive Abfälle im tiefen geologischen Untergrund sowie entsprechende Forschungsmaßnahmen in untertägigen Felslaboratorien (URL's) recherchiert.“* um die Konfiguration des Gesteinskörpers zu erkunden beziehungsweise abzusichern. Dabei wurde mittels sog. „Themenkomplexe“ vorgegangen. Eine Vergleichbarkeit zu diesem Vorhaben ist mit dem „Themenkomplex Regionale Geologie“ in /GOL 09/ möglich. Die Recherche ist in /GOL 09/ detailliert tabellarisch dargestellt. Bei der Auswertung von /GOL 09/ zeigt sich, dass oftmals eine Kombination der oben genannten Messmethoden eingesetzt wurde, so dass (wie in diesem Bericht in Kapitel 3 beschrieben) ein integrativer und iterativer Prozess zur Modellbildung des Untergrunds erfolgte. Dabei kann man beispielsweise sowohl eine zeitlich und räumlich orientierte Abfolge von 2D-Seismik (regional) hin zu 3D-Seismik (lokal) feststellen, als auch eine wirtsgesteinsspezifische Anwendungsabfolge, zum Beispiel wurde für Kristallin zuerst Potenzialmethoden und darauf folgend erst Seismik eingesetzt. Unabhängig vom Wirtsgestein werden Bohrungen regelmäßig und Laboruntersuchungen nur selten eingesetzt

Insgesamt lassen sich damit folgende Schlussfolgerungen zur Untersuchung der Konfiguration des Gesteinskörpers treffen:

- Die geologische Karte (Kapitel 4.1.1) liefert die grundlegenden Informationen zur Standortsuche für jeden Gesteinstyp.

- Die Seismik (Kapitel 4.2.1) kann wichtige Informationen zur Konfiguration des Gesteinskörpers liefern. Sie ist deutlich die am besten entwickelte Methode für flächenhafte und räumliche Interpretationsansätze des geologischen Untergrunds. Für Einzelfragen und den Internaufbau von manchen Gesteinen kann die Seismik nicht beziehungsweise weniger geeignet sein.
- Die Potenzialmethoden (Kapitel 4.2.2 - 4.2.5) können wichtige Informationen zur Konfiguration des Gesteinskörpers liefern, der Informationsgehalt ist jedoch stark abhängig vom Gesteinstyp.
- Bohrungen (Tief- bzw. Kernbohrungen, Kapitel 5.1.2) und Untersuchungen in der Bohrung (Kapitel 5.2) geben Aufschluss über wichtige Informationen zur Konfiguration des Gesteinskörpers. Dies sind einerseits grundlegende Informationen zur Lithologie und Petrografie, die vor allem auch zur Kalibration der Seismik und der Potenzialmethoden dienen.
- Laboruntersuchungen liefern ergänzende Information, die dazu beitragen können, dass die Untersuchung beziehungsweise Interpretation der Messungen zur Konfiguration des Gesteinskörpers verbessert wird.

7.2.3.2 Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit nach Anlage 3 StandAG

Anlage 3 StandAG (siehe Tab. 7.4) bezeichnet das „Kriterium zur räumlichen Charakterisierbarkeit“. Auch hier werden laut StandAG insbesondere die Eigenschaften des vorgesehenen ewG beziehungsweise Einlagerungsbereichs bewertet. Deshalb wird auch für diese Anlage allgemein der zu untersuchende Gesteinskörper betrachtet. Der Begriff „räumliche Charakterisierbarkeit“ wurde bereits im gleichen Sinne vom AKEnd /AKE 02/ verwendet.

Obwohl nicht explizit benannt, kann man davon ausgehen, dass damit insgesamt die Homogenität des Gesteinskörpers von Interesse ist, so dass im Umkehrschluss die Detektion von potenziellen Inhomogenitäten innerhalb eines Gesteinskörpers ein Erkundungsziel ist. Inhomogenitäten können zahlreiche Ursachen haben. Zu bestimmende Eigenschaften oder Parameter des Gesteinskörpers sind beispielsweise Störungen, Klüfte beziehungsweise Kluftnetzwerke oder auch Änderungen der Lithologie beziehungsweise Fazies innerhalb eines Gesteinskörpers (zum Beispiel Sandlinsen in einem Tonstein). Explizit in Anlage 3 StandAG als Parameter benannt sind Störungen, die das Ausmaß der im StandAG sogenannten „tektonischen Überprägung“ indizieren sowie die Gesteinsfazies als Indikator der Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen ewG.

Damit lassen sich die zu untersuchenden Parameter/Messgrößen zwei wesentlichen Aspekten zuordnen: Erstens sollten die Eigenschaften (Häufigkeit von Störungen, Klüftigkeit, Fazies, etc.) des zu charakterisierenden Gesteins und zweitens die räumliche Verteilung (Homogenität) dieser Eigenschaften bestimmt werden.

Tab. 7.4 Messgrößen aus Anlage 3 des StandAG zu § 24

Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Relevanz	Messgröße
Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie/Petrografie • Gesteinseigenschaften <ul style="list-style-type: none"> ○ in-situ oder Labor ○ mechanisch, chemisch, physikalisch
Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation und Lokation von begrenzenden Strukturen im Untergrund
Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation und Lokation von Strukturen im Untergrund • Identifikation, Lokation von Störungen • Häufigkeit von Störungen • Klüftigkeit
Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie/Petrografie • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers

☐: keine Relevanz für „MessEr“; ☒: relevant für „MessEr“; ★: relevant für „übErStand“

Falls die zu untersuchenden Gesteine regional an der Oberfläche zu finden sind, liefert eine großmaßstäbliche geologische Karte bereits wichtige Informationen zu den Eigenschaften der zu untersuchenden Gesteine. Diese Eigenschaften sind in der Regel aller-

dings nicht vollständig äquivalent zu den in-situ-Eigenschaften des Gesteins im Untergrund, lassen sich aber bis zu einem gewissen Grad übertragen. Zur eindeutigen Charakterisierung kann deshalb letztlich eine Kernbohrung mit anschließenden Laboruntersuchungen die notwendigen Informationen bereitstellen. Neben der standardmäßigen petrografischen Identifikation, die bereits am Bohrort erfolgen kann, sind Laboruntersuchungen notwendig, um wichtige Informationen für das Gestein hinsichtlich der Eigenschaften (mechanisch, chemisch, etc.) zu gewinnen. Die Häufigkeit kleinräumiger Störungen und die Klüftigkeit des Gebirges lassen sich mit entsprechenden Bohrlochmessungen (Bohrlochgeophysik: vor allem elektrische, aber auch optische und akustische Bohrlochwandbilder; Kapitel 5.2.3) in der Regel im Bohrloch gut kartieren.

Das StandAG benennt in Anlage 3 (siehe Tab. 7.4) als Bewertungsgröße unspezifisch die „*Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen*“ und die „*Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften*“. Die Gesteinstypen können mit einer petrografischen Untersuchung ermittelt werden. Im StandAG sind als sog. „*Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums*“ die „*charakteristische Eigenschaften*“ des Gesteintyps von Interesse. Die charakteristischen Eigenschaften des Gesteintyps hängen stark vom Kontext ab. Die Ermittlung der charakteristischen Eigenschaften des Gesteins kann auf zwei Arten erfolgen: in-situ durch Untersuchungsmethoden (Bohrlochmessungen und -tests) im Bohrloch und/oder durch Methoden im Labor an den erbohrten Kernen. Aufgrund ihrer Bedeutsamkeit werden in-situ Untersuchungsmethoden im Bohrloch als notwendig eingeschätzt. Die genutzten Methoden im Labor dienen als weitere wichtige Informationen zur Kalibration oder Verifikation der in-situ Methoden.

Die Frage, was genau die „charakteristischen Eigenschaften“ (Transport, Geomechanik, Kohlenwasserstoff-Gehalt, etc.) des Gesteins sind und wie diese im Kontext der Untersuchungen von standortbezogenen übertägigen Erkundungsprogrammen eingegrenzt werden (können), ist an dieser Stelle nicht abschließend beantwortbar, zumal diese charakteristischen Eigenschaften vom Gestein abhängen. Deshalb kann an dieser Stelle kein einzelnes Messprinzip/Messmethode als herausragend zur Ermittlung einer oder mehrerer dieser charakteristischen Eigenschaften benannt werden. Vielmehr wird an dieser Stelle die Gesamtheit der Bohrlochmessungen und -tests als potenziell notwendig und die Gesamtheit der Laboruntersuchungen als potenziell wichtig eingestuft. Dies erfolgt ohne die Intention, daraus eine Forderung nach der Durchführung aller möglichen (in Kapitel 5 und 6 genannten) Bohrlochmessungen und -tests beziehungsweise Laboruntersuchungen abzuleiten.

Zur Ermittlung des zweiten Aspekts, der räumlichen Verteilung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften, liefern je nach Gesteinstyp Seismik und Potenzialmethoden, wie bereits zu Anlage 2 StandAG beschrieben (siehe Kapitel 7.2.3.1), notwendige Erkenntnisse. Deshalb erfolgt hier keine nochmalige Beschreibung. Bei Kenntnis der Konfiguration des Gesteinskörpers kann mehr als eine Tiefbohrung in optimierter Konfiguration um den zu untersuchenden Gesteinskörper herum abgeteuft werden. Dann können jeweils für die Bohrungen Untersuchungen zum Gesteinstyp und der charakteristischen Eigenschaften durchgeführt werden, so dass die Erkenntnisse aus den Bohrungen miteinander korreliert werden können. Ergänzend dazu können weitere Erkenntnisse beispielsweise durch eine sogenannte Cross-Hole Seismik (Kapitel 5.2.3.1.2) gewonnen werden.

Ein Vergleich mit /GOL 09/ zeigt, dass der dort genannte „Themenkomplex Eigenschaften des Wirtsgesteins und des Deckgebirges am Standort“ teilweise vergleichbar zum oben genannten ist, solange es übertägige Untersuchungsmethoden betrifft. In /GOL 09/ wird deutlich, dass – unabhängig vom Wirtsgestein – Untersuchungen an und in der Bohrung (Kernbohrung und „Bohrlochgeophysik“) zur dort beschriebenen „abgeleiteten Erkundung“ gehören. Kombiniert wird dies entweder mit Seismik oder mit Potenzialmethoden, die nach /GOL 09/ für „Kristallin mit mächtiger Bedeckung“ beziehungsweise „Salzgestein in steiler Lagerung“ in Frage kommen. Dazu kommen Laboruntersuchungen, die in Abhängigkeit vom Gesteinstyp unterschiedliche Methoden umfassen.

Insgesamt lassen sich damit folgende Schlussfolgerungen zur räumlichen Charakterisierbarkeit treffen:

- Eine geologische Kartierung kann erste wichtige Informationen zur räumlichen Verteilung der Gesteine, zur Bestimmung des Gesteinstyps und zur Ermittlung der Gesteinseigenschaften geben, sofern die betreffende Formation an der Erdoberfläche vorkommt.
- Bohrungen und Untersuchungen in Bohrungen liefern gesteinsunabhängig wichtige Erkenntnisse zur Bestimmung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften.
- Seismik und Potenzialmethoden liefern in Abhängigkeit vom Gestein wichtige Erkenntnisse zur räumlichen Verteilung und damit zur Übertragbarkeit dieser Eigenschaften.
- Laboruntersuchungen können ergänzende Informationen aufzeigen und zur Verifikation des Gesteinstyps und zur Kalibration der in-situ gemessenen Gesteinseigenschaften dienen.

7.2.3.3 Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse nach Anlage 4 StandAG

Anlage 4 StandAG zielt darauf ab zu bewerten, ob es in der Zukunft zu einer Änderung der geologischen Verhältnisse kommen könnte (siehe Tab. 7.5). Da dieses Kriterium somit eine Prognose betrifft, gibt es keine direkte Möglichkeit einer Messung. Deshalb wird im StandAG für die Kriterien der Anlage 4 davon ausgegangen, dass Eigenschaften des zu untersuchenden Gesteinskörpers, welche sich über lange Zeiträume nicht geändert haben, sich auch in der Zukunft nicht innerhalb kurzer Zeit ändern werden. Der Grundgedanke dahinter ist, dass allgemeine geologische Prozesse in der Vergangenheit auf die gleiche Weise abgelaufen sind, wie sie heute ablaufen und in der Zukunft ablaufen werden. Dies wird das Aktualitätsprinzip der Geowissenschaften genannt.

Tab. 7.5 Messgrößen aus Anlage 4 des StandAG zu § 24

Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Relevanz	Messgröße
Keine wesentlichen Änderungen des Betrachtungsmerkmals „Mächtigkeit“ des ewG	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers
Keine wesentlichen Änderungen des Betrachtungsmerkmals „Ausdehnung“ des ewG	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation und Lokation von begrenzenden Strukturen im Untergrund
Keine wesentlichen Änderungen des Betrachtungsmerkmals „Gebirgsdurchlässigkeit“ des ewG	★	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers

☐: keine Relevanz für „MessEr“; ☒: relevant für „MessEr“; ★: relevant für „übErStand“

Die Betrachtungsmerkmale, auf die die Anlage 4 fokussiert, sind die Mächtigkeit, die Ausdehnung und die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG. Die resultierenden Messgrößen/Parameter und der sich daraus ergebende Abgleich mit den zur Verfügung stehenden Messmethoden sind bereits in den Kapitel 7.2.2, 7.2.3.1 und 7.2.3.2 untersucht worden, so dass an dieser Stelle ausschließlich die Anforderung der Stabilität dieser Merkmale in der Vergangenheit im Fokus steht.

Zur Änderung der Mächtigkeit und der Ausdehnung einer Gesteinsformation kommen zahlreiche Prozesse, wie zum Beispiel tektonische und sedimentäre Prozesse, in Frage. Charakteristisch ist, dass diese Prozesse oftmals mit langen Zeitskalen verbunden sind. Beispielsweise treten tektonische Störungen, der Fluss von hydrothermalen Lösungen durch Klüfte, oder der Fluss von anderen Lösungen durch das Gestein in der Regel nicht plötzlich auf, sondern bilden sich langfristig heraus. Diese Art von Prozessen, die auch die oben genannten Betrachtungsmerkmale betreffen, sind bereits unter den sogenannten Ausschlusskriterien des § 22 StandAG subsumiert, so dass sie hier nicht mehr betrachtet werden. Es stellt sich somit die Frage, welche Prozesse auftreten können, die in geologisch kurzen Zeiträumen die Betrachtungsmerkmale ändern könnten und nicht in den Ausschlusskriterien erfasst sind.

Da tektonische und vulkanische Prozesse bereits in den Ausschlusskriterien erfasst sind, kommen allenfalls (geologisch) kurzfristige sedimentäre Prozesse in Frage. Ein Beispiel dafür können eiszeitliche Prozesse (zum Beispiel Rinnenbildung) sein, die je nach Region und Beschaffenheit des Untergrundes Einwirkzeiten von mehreren 100 m haben könnten. Das Resultat sedimentärer Prozesse ist in einer seismischen Untersuchung genauso wie in einer Bohrung sichtbar und wird im Zuge der Modellbildung des Untergrundes auch zeitlich eingeordnet. Dies gilt ebenfalls für Prozesse, die im Nachweiszeitraum mehrere Male oder kontinuierlich geschehen. Insofern entstehen aus der Anlage 4 StandAG letztlich keine zusätzlichen Messgrößen und Parameter, die nicht bereits mit den oben abgeglichenen Messmethoden erfasst werden.

7.2.3.4 Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften nach Anlage 5 StandAG

Anlage 5 StandAG (siehe Tab. 7.6) zielt auf die „günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften“ des ewG ab, so dass hier entsprechend Kapitel 7.2 ein zu untersuchender Gesteinskörper betrachtet wird. Die „günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften“ bedeuten, dass das Gebirge möglichst wenig dazu neigen soll, eine „mechanisch induzierte Sekundärpermeabilität“ auszubilden. Davon ausgenommen ist eine sogenannte „konturnahe Auflockerungszone“.

Es sind verschiedene Prozesse denkbar, die dazu führen können, dass das Gebirge durchlässiger (also permeabler) wird. Einer dieser Prozesse ist die Bildung einer Auflockerungszone, die um jeden neu gebildeten Hohlraum entsteht, wenn ein Bergwerk aufgefahren wird. Je nach Gestein und Auffahrungsmethode kann diese Auflockerungszone

mehr oder weniger ausgeprägt und das umliegende Gebirge mehr oder weniger geschädigt sein. Diese Zone wird im internationalen Sprachgebrauch als „EDZ“ (engl. „excavation damaged/disturbed zone“, also durch Auffahrung geschädigte/gestörte Zone) bezeichnet. Sie zeigt eine höhere Permeabilität als das unverritzte (unbeschädigte) Gebirge. Die Entstehung dieser Zone kann nicht verhindert werden, das Ausmaß dieser Zone ist allerdings begrenzt auf einige cm, dm oder wenige m.

Wichtige weitere gebirgsmechanische Prozesse, die dazu führen können, dass sich die Durchlässigkeit des Gebirges erhöht, ändern im Wesentlichen den Druck- beziehungsweise Spannungszustand im Gebirge und können so zu einer Riss- oder Mikrorissbildung führen. Diese Risse oder Mikrorisse können potenzielle Wegsamkeiten oder Migrationspfade darstellen. Zu diesen Prozessen gehören beispielsweise ein sich erhöhender Fluidruck (Flüssigkeits- oder Gasdruck) oder die thermische Einwirkung der wärmentwickelnden Abfälle, welche ebenso den Spannungszustand im Gebirge ändern. In der Literatur diskutiert wird außerdem insbesondere für Salzgestein der Mechanismus der sogenannten Perkolation (siehe auch Kapitel 6.2.8).

Die Indikatoren, die im StandAG als Bewertungsgröße angelegt werden, sind einerseits die geomechanische Tragfähigkeit im Rahmen der Bergbautätigkeit und andererseits das Auftreten der induzierten Sekundärpermeabilität. Beide Indikatoren können nicht direkt gemessen werden, ergeben sich aber aus der Messung der geomechanischen und thermischen Kennwerte und entsprechenden modellhaften (zum Beispiel numerischen) Betrachtungen. Die geomechanische Tragfähigkeit ist dabei ein Indikator, der rein aus der bergingenieurstechnischen Sichtweise betrachtet werden kann – und entsprechend dem gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerk (Berggesetz, Bergverordnungen) berücksichtigt werden muss. Das geomechanisch bedingte Auftreten von Sekundärpermeabilität wird entsprechend in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ im Rahmen des Integritätsnachweises berücksichtigt. Demzufolge ist die Ermittlung der geomechanischen Kennwerte des Gebirges für beide Indikatoren notwendig.

Tab. 7.6 Messgrößen aus Anlage 5 des StandAG zu § 24

Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Relevanz	Messgröße
Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßig tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen.	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Geomechanische Gesteinseigenschaften und Kennwerte • Thermische Kennwerte
Um Endlager Hohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Geomechanische Gesteinseigenschaften und Kennwerte • Thermische Kennwerte

☐: keine Relevanz für „MessEr“; ☒: relevant für „MessEr“; ★: relevant für „übErStand“

Für die Ermittlung der Kennwerte sind geomechanische und petrophysikalische (thermische) Versuche erforderlich. Eine Reihe dieser Tests und bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen können in einem Bohrloch durchgeführt werden (siehe Kapitel 5.2). Zu einer umfassenden Charakterisierung sind jedoch Laborversuche an möglichst vielen Gesteinsproben erforderlich. Im Rahmen der übertägigen Erkundung bedeutet dies, dass Kernbohrungen und geomechanische Laborversuche notwendig sind. Die übertägige Erkundung kann somit orientierende Einschätzungen der geomechanischen und thermischen Kennwerte zu den günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften geben. Zur umfassenden Charakterisierung des Gebirges ist die untertägige Erkundung mit intensiver Probenahme notwendig.

Insgesamt lassen sich damit folgende Schlussfolgerungen zur Bewertung der günstigen geomechanischen Eigenschaften treffen:

- Im Rahmen der übertägigen Erkundung können Bohrlochmessungen und -tests erste Einschätzungen zu günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften ermöglichen.
- Zur geomechanischen und petrophysikalischen (thermischen) Charakterisierung sind Laboruntersuchungen erforderlich. Da eine hohe Menge von Proben die Qualität der Einschätzung bei geomechanischen/petrophysikalischen Untersuchungen deutlich erhöht, können Untersuchungen an Kernproben einen guten Beitrag zur Charakterisierung geben. Eine umfassende Charakterisierung ist jedoch erst durch die untertägige Erkundung möglich.

7.2.3.5 Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten nach Anlage 6 StandAG

Auch Anlage 6 StandAG zielt auf die Eigenschaften des ewG ab (siehe Tab. 7.7), so dass wiederum der zu untersuchende Gesteinskörper (siehe Bemerkungen zu Beginn des Kapitels 7.2) betrachtet wird. Die bewertungsrelevanten Eigenschaften und Bewertungsgrößen/Indikatoren dieser Anlage sind sehr heterogen aufgebaut, die meisten dieser Eigenschaften oder Indikatoren sind im Rahmen dieses Vorhabens nicht zu betrachten:

- Das „*Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/Gesteinsdurchlässigkeit*“ ist dem Vorhaben „übErStand“ zuzuordnen.
- Der zweite Indikator „*Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit ...*“ zielt nicht auf die Erkundung, sondern auf existierende geowissenschaftliche Erfahrungen ab.
- Der dritte Indikator „*Duktilität*“ soll nach StandAG nur bei einem Vergleich von Standorten angewendet werden.

Somit verbleiben zwei Indikatoren, bei welchen die Rückbildung von Eigenschaften aufgrund der Risssschließung beziehungsweise -verheilung im Fokus steht. Diese sind einerseits die Rückbildung der Sekundärpermeabilität und andererseits die Rückbildung der geomechanischen Eigenschaften. Die Eigenschaft der Permeabilität ist dem Vorhaben „übErStand“ zuzuordnen, jedoch ist das Phänomen der Risssschließung beziehungsweise -verheilung ein geomechanisches (siehe nächster Absatz), so dass beide Indikatoren im Rahmen des Vorhabens „MessEr“ betrachtet werden.

Die Schließung von Rissen im Gestein kann auf mehrere Weisen geschehen. An dieser Stelle wird aufgrund der näheren Beschreibung in der Wertungsgruppe der Indikatoren in Anlage 6 StandAG davon ausgegangen, dass bei der Risssschließung der geomechanische Aspekt im Fokus steht. Diese Annahme wird auch durch die näheren Beschreibungen in der Wertungsgruppe für den Indikator Rissverheilung unterstützt, der geochemische Prozesse des Gesteins berücksichtigt. Der Begriff der Rissverheilung ist weitergehend als der Begriff der Risssschließung und bedeutet, dass nach einer Rissöffnung sogar der Ursprungszustand des Gesteins wiederhergestellt sein kann. Um beide Prozesse beurteilen zu können, ist die Messung der geomechanischen Eigenschaften des Gesteins erforderlich. Außerdem sind beide Prozesse sehr stark vom Gesteinstyp selbst abhängig und selbst innerhalb eines Gesteinstyps gibt es deutliche, zum Beispiel ortsbezogene, Unterschiede.

Um das Gestein in dieser Hinsicht charakterisieren zu können, sind wie in Kapitel 7.2.3.4 (günstige gebirgsmechanische Eigenschaften) geomechanische Versuche erforderlich. Auch zur Rissverheilung sind keine geochemischen Parameter des Gesteins zu erfassen, denn obwohl geochemische Prozesse die Rissverheilung verursachen, werden diese Eigenschaften insgesamt mit geomechanischen und petrografischen Methoden erfasst. Zur Risssschließung können Tests in Bohrlöchern durchgeführt werden, aber auch hier ist es sinnvoll, wenn zahlreiche dieser Tests durchgeführt werden. Zu bereits geschlossenen Rissen oder Klüften können entsprechende Bohrlochmessungen (Bohrlochgeophysik: vor allem elektrische, aber auch optische und akustische Bohrlochwandbilder; Kapitel 5.2.3) und Untersuchungen an Kernen Ergebnisse liefern. Deshalb ist – analog zu den Ausführungen in Kapitel 7.2.3.4 – die übertägige Erkundung in der Lage orientierende Einschätzungen der geomechanischen Kennwerte zur Risssschließung und Rissverheilung geben. Zur umfassenden Charakterisierung ist eine untertägige Erkundung notwendig.

Tab. 7.7 Messgrößen aus Anlage 6 des StandAG zu § 24

Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Relevanz	Messgröße
Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/Gesteinsdurchlässigkeit	<input type="checkbox"/>	
Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen: Rezente Existenz als wasserlösliches Gestein, fossile Fluideinschlüsse, unterlagernde wasserlösliche Gesteine, unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe, Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken, Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung, Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien	<input type="checkbox"/>	
Duktilität des Gesteins (Anwendung nur bei einem Vergleich von Standorten)	<input type="checkbox"/>	
Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch RissSchließung	★	<ul style="list-style-type: none"> • Geomechanische Gesteinseigenschaften und Kennwerte
Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie/Petrografie • Geomechanische Gesteinseigenschaften und Kennwerte • Klüftigkeit und Kluffüllungen

☐: keine Relevanz für „MessEr“; ☒: relevant für „MessEr“; ★: relevant für „übErStand“

Insgesamt lassen sich damit folgende Schlussfolgerungen zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten treffen:

- Im Rahmen der übertägigen Erkundung können Untersuchungen in Bohrlöchern (Bohrlochwandabbilder und geomechanische Tests) erste Einschätzungen zur RissSchließung und Rissverheilung ermöglichen.
- Zur geomechanischen Charakterisierung sind Untersuchungen an Kernen und Laboruntersuchungen erforderlich. Da eine hohe Menge von Proben die Qualität der Einschätzung bei geomechanischen Untersuchungen deutlich erhöht, können Untersuchungen an Kernproben einen guten Beitrag zur Charakterisierung geben. Eine umfassende Charakterisierung ist jedoch möglicherweise erst durch die untertägige Erkundung möglich.

7.2.3.6 Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit nach Anlage 8 StandAG

Anlage 8 StandAG zielt nicht nur auf den ewG oder den Einlagerungsbereich ab, sondern auf alle Gesteinsformationen, die von den Temperaturveränderungen aufgrund der Einlagerung radioaktiver Abfälle betroffen sind (siehe Tab. 7.8), „so dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen.“. Als wesentlicher Indikator wird die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten genannt.

Die Temperaturstabilität von Gesteinen kann nicht direkt gemessen werden, sie ist abhängig von den Mineralen, aus denen das Gestein zusammengesetzt ist. Jedes Mineral zeigt hinsichtlich der Temperaturstabilität unterschiedliche Eigenschaften. Die Temperaturstabilität eines Minerals stellt außerdem keine scharfe Grenze, sondern einen Übergangsbereich dar. Dies ist Gegenstand von Forschung und Entwicklung, z. B. in /BRA 19/ (siehe auch § 27 Abs. 4 StandAG). Sekundärpermeabilität kann nicht nur durch die Umwandlung von Mineralen entstehen, sondern auch durch die mechanischen Auswirkungen bei Temperaturänderungen. Dieser Aspekt ist bereits für die Anlage 5 StandAG (siehe Kapitel 7.2.3.4, günstige gebirgsmechanische Eigenschaften) berücksichtigt worden und wird an dieser Stelle deshalb nicht weiter behandelt.

Tab. 7.8 Messgrößen aus Anlage 8 des StandAG zu § 24

Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Relevanz	Messgröße
Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung sowie die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie/Petrografie

☐: keine Relevanz für „MessEr“; ☒: relevant für „MessEr“; ★: relevant für „übErStand“

Für den Indikator der Temperaturstabilität ist es von Interesse, aus welchen Mineralen das Gestein besteht, so dass für das übertägige Erkundungsprogramm petrografische und mineralogische Untersuchungen in Frage kommen. Für die petrografischen Untersuchungen ist die Erfassung an der Oberfläche (geologische Kartierung) kein ausreichendes Messverfahren, es kann allenfalls grob aus dem vorliegenden Gesteinstyp abgeschätzt werden, in welchem Rahmen sich die Temperaturstabilität bewegt. Es ist

deshalb erforderlich, dass diese Messungen an Bohrkernen beziehungsweise an aus Bohrkernen gewonnen Proben durchgeführt werden.

Insgesamt lassen sich damit folgende Schlussfolgerungen zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit treffen:

- Im Rahmen der übertägigen Erkundung können Laboruntersuchungen (petrografische Messverfahren) an Bohrkernen wichtige Informationen für eine sichere Identifikation von Mineralen der Gesteine liefern, die Rückschlüsse auf die Temperaturverträglichkeit zulassen.
- Mit Hilfe der petrografischen Ansprache durch geologische Kartierungen kann nur eine grobe Einschätzung der Petrografie und damit der Temperaturverträglichkeit erfolgen.

7.2.3.7 Kriterium zur Bewertung des Schutzes des ewG durch das Gebirge nach Anlage 11 StandAG

In Anlage 11 StandAG steht das den ewG schützende Deckgebirge im Fokus des Kriteriums (siehe Tab. 7.9). Insgesamt werden dazu drei Indikatoren betrachtet. Die ersten beiden Indikatoren befassen sich mit der Verbreitung und Mächtigkeit sowie der Überdeckung von Gesteinen mit bestimmten Eigenschaften. Diese Eigenschaften sind einerseits die „Grundwasserhemmung“ und andererseits die „Erosionshemmung“. Die Erkundung der grundwasserhemmenden Eigenschaft ist dem Vorhaben „übErStand“ zuzuordnen, während Überdeckung, Verbreitung und Mächtigkeit dieses Gesteins dem Vorhaben „MessEr“ zugeordnet werden. Die Erkundung von erosionshemmenden Eigenschaften ist ebenso diesem Vorhaben zuzuordnen. Der dritte Indikator betrifft die Erfassung von strukturellen Komplikationen des Deckgebirges. Beispielhaft werden dort Störungen beziehungsweise Karststrukturen genannt.

Insgesamt treten hier für das Deckgebirge – in Analogie zu Kapitel 7.2.3.1 (Konfiguration der Gesteinskörper) sowie Kapitel 7.2.3.2 (räumliche Charakterisierbarkeit) – dessen Eigenschaften in den Fokus der Erkundung. Das Deckgebirge, welches den ewG schützt, reicht bis an die Tagesoberfläche. Im Gegensatz zu den genannten Analogien ist demnach auch die Erkundung des Untergrunds von Interesse, der eine deutliche geringere Tiefe als der zu erkundende Gesteinskörper aufweist, der als zukünftiger ewG fungieren wird.

Die Definition des Deckgebirges nach StandAG bezeichnet den Teil des Gebirges, der oberhalb des ewG beziehungsweise des Einlagerungsbereiches liegt. Damit ist diese Definition anders als die üblicherweise im geowissenschaftlichen Sinn verwendete Definition als sedimentärer, überlagernder und geschichteter Gesteinskomplex. Da deshalb alle Gesteinstypen (auch nicht sedimentäre wie Kristallingestein) im Rahmen der Erkundung zu berücksichtigen sind, sind die gleichen Messgrößen und damit verbunden die gleichen Erkundungsmethoden wie in Kapitel 7.2.2 (Mindestanforderungen) und 7.2.3.1 (Konfiguration der Gesteinskörper) von Relevanz. Im Unterschied zu den genannten Kapiteln kommen für die Erkundung des strukturellen Aufbaus des oberflächennahen Deckgebirges weitere Messmethoden in Frage. Dies sind

- die Fernerkundung,
- die Gravimetrie (insbesondere für die in der Anlage als Beispiel genannten Karststrukturen),
- geoelektrische Methoden zur Erkundung von oberflächennahen Sedimenten,
- künstlich erzeugte EM-Felder, NMR und Bodenradar zur Erkundung der oberflächennahen geologischen Struktur sowie
- radiometrische Messungen zur Detektion von Störungen.

Für die Gesteinseigenschaften des Deckgebirges sind im Prinzip die gleichen Messgrößen und damit verbunden die gleichen Messmethoden von Bedeutung, die bereits in Kapitel 7.2.3.2 zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit herangezogen wurden. Jedoch ist für das Deckgebirge ausschließlich die Eigenschaft „Erosionshemmung“ relevant. Die Erosion eines Gesteins kann chemisch durch Lösung oder mechanisch durch Wind, Eis oder Wasser geschehen. Insofern ist ein erosionshemmendes Gestein eines, das durch seine Eigenschaften dazu beiträgt, dass die darunter liegenden Gesteine diesen Einflüssen widerstehen können. Dazu sollte das Deckgebirge abgesehen von etwaigen Opferbereichen selbst diesen Einflüssen widerstehen können und zusätzlich undurchlässig für Lösungen beziehungsweise Wasser sein. Die Eigenschaft der Durchlässigkeit gehört thematisch zum Vorhaben „übErStand“.

Die mechanischen und chemischen Eigenschaften des Deckgebirges werden durch die Zusammensetzung der Gesteine und ihre Genese (zum Beispiel Ablagerungsgeschichte) bestimmt. Im Rahmen der Untersuchung von Gesteinseigenschaften ist deshalb der Gesteinstyp mit seiner petrografischen und chemischen Zusammensetzung von Interesse. Ob ein Gestein mechanische oder chemische erosionshemmende Eigenschaften besitzt, lässt sich (falls das Gestein an der Oberfläche vorkommt) auch ohne

detaillierte Untersuchungen gut im Gelände bestimmen, denn diese Gesteine bilden oftmals das geomorphologische Relief aus und sind im Gelände als Aufschlüsse zu finden. Gesteine, die nicht erosionshemmend sind, verwittern leicht und sind im Gelände oftmals schwierig aufzufinden. Gesteinstypen, die ein Relief ausbilden, lassen sich dementsprechend auch mit fernerkundlichen Messmethoden gut im Luftbild verfolgen. Eindeutige Informationen zur petrografischen und chemischen Zusammensetzung lassen sich gesteinsunabhängig durch petrografische und geochemische Analysen feststellen. Insofern sind Kernbohrungen (für die tieferen Bereiche des Deckgebirges) oder flache Bohrungen erforderlich, an die sich Bohrlochmessverfahren und -tests sowie Laboruntersuchungen zur Petrografie und Geochemie an den gewonnenen Gesteinsproben anschließen.

Tab. 7.9 Messgrößen aus Anlage 11 des StandAG zu § 24

Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Relevanz	Messgröße
Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	★	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation und Lokation von Strukturen im Untergrund
Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge • Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation und Lokation von begrenzenden Strukturen im Untergrund • Lithologie/Petrografie • Gesteinseigenschaften <ul style="list-style-type: none"> ○ in-situ oder Labor ○ mechanisch, chemisch, physikalisch
Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG ergeben könnten	☒	<ul style="list-style-type: none"> • Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Räumliche Lage und Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers • Identifikation, Lokation von Störungen • Häufigkeit von Störungen • Identifikation, Lokation von Klüftigkeit • Identifikation, Lokation von Verkarstung

☐: keine Relevanz für „MessEr“; ☒: relevant für „MessEr“; ★: relevant für „übErStand“

Insgesamt lassen sich damit folgende Schlussfolgerungen zur Bewertung für den Schutz des ewG durch das Gebirge treffen:

- Die geologische Karte liefert für Gesteine, die an der Oberfläche ausstreichen Informationen zur Verbreitung, Mächtigkeit, strukturellen Komplikationen und erosionshemmenden Eigenschaften für jeden Gesteinstyp.
- Die Fernerkundung kann ergänzend genutzt werden, um strukturelle Eigenschaften des Deckgebirges an der Erdoberfläche weiträumig zu verfolgen/zu kartieren.
- Die Seismik kann wichtige Informationen zum Deckgebirge liefern. Sie ist deutlich die am besten entwickelte Methode für flächenhafte und räumliche Interpretationsansätze des geologischen Untergrunds. Für Einzelfragen und den Internaufbau von manchen Gesteinen kann die Seismik nicht beziehungsweise weniger geeignet sein.
- Die Potenzialmethoden können wichtige Informationen zur Gesamtkonfiguration des Deckgebirges liefern. Für oberflächennahe Erkundung sind einige Potentialmethoden gut geeignet. Der Informationsgehalt ist jedoch stark abhängig vom Gesteinstyp.
- Bohrungen (Kernbohrungen) und Bohrlochmessungen geben Aufschluss über wichtige Informationen (Lithologie, Gefüge und Struktur), vor allem zur Kalibration der Seismik und der Potenzialmethoden. Tiefe und flache Bohrungen sind notwendig, um Gesteinsproben zu erhalten um damit weiterführende Laboruntersuchungen durchführen zu können.
- Laboruntersuchungen liefern wichtige Information zur erosionshemmenden Eigenschaften des Deckgebirges.

7.3 **Tabellarische Darstellung zur Gesamteinschätzung der Messmethoden zur Erfüllung der Anforderungen gemäß StandAG**

Die folgenden drei Tabellen stellen einen stark vereinfachten Überblick dar, der die wesentlichen Ergebnisse aus dem in Kapitel 7.2 erfolgten Abgleich der Messgrößen aus dem StandAG und den vorgestellten Messmethoden (Kapitel 2 - 6) wiedergibt. In dieser Gesamteinschätzung des Abgleichs können nicht alle Abstufungen, die hinsichtlich der Verwendbarkeit, Eignung, Kombinationsmöglichkeiten, Teufenabhängigkeiten oder sonstigen Einschränkungen von Messmethoden für übertägige Erkundungsprogramme gemacht wurden, wiedergegeben werden. Außerdem sei nochmals darauf hingewiesen, dass dieser Abgleich und die hier dargestellte Übersicht keinen Vorschlag für ein Erkundungsprogramm beinhalten.

In den Tabellen werden Symbole verwendet, die – vereinfacht – die Anwendbarkeit oder auch die Güte des Informationsgehalts wiedergeben, welchen eine Messmethode für die beschriebene Messgröße/Parameter aufweist:

- **Quadratisches Symbol ■:**
In den vorausgegangenen Kapiteln wurde erkannt, dass eine Messmethode für einen zu untersuchenden Parameter beziehungsweise für eine Messgröße in der Regel einen hohen Informationsgehalt aufweist.
- **Kreisförmiges Symbol ●:**
In den vorausgegangenen Kapiteln wurde erkannt, dass eine Messmethode für einen zu untersuchenden Parameter beziehungsweise für eine Messgröße in der Regel einen geringen Informationsgehalt aufweist.
- **Kein Symbol (Buchstabe K):**
In den vorausgegangenen Kapiteln wurde erkannt, dass eine Methode zur Messung der Erkundungsanforderung kaum oder nichts beitragen kann.

Zusätzlich dargestellt wird die Abhängigkeit des Informationsgehalts einer Messmethode vom zu untersuchenden Gestein.

- **Gefülltes Symbol (■ oder ●):**
In den vorausgegangenen Kapiteln wurde erkannt, dass keine oder kaum eine Abhängigkeit des Informationsgehalts der Messmethode vom Gestein vorhanden ist.

- Halb gefülltes Symbol (◐ oder ◑):

In den vorausgegangenen Kapiteln wurde erkannt, dass eine Abhängigkeit des Informationsgehalts der Messmethode vom Gestein vorhanden ist.

- Nicht gefülltes Symbol (◻ oder ◯):

In den vorausgegangenen Kapiteln wurde erkannt, dass eine hohe Abhängigkeit des Informationsgehalts der Messmethode vom Gestein vorhanden ist: Die Methode kann beispielsweise für einen Gesteinstyp ungeeignet sein, für einen andere Gesteinstypen aber geeignet. Informationen zur Gesteinsabhängigkeit der Messmethode finden sich im jeweils angegebenen Kapitel.

Tab. 7.10 Gesamteinschätzung der Messmethoden hinsichtlich der relevanten Messgrößen aus den Anlagen des StandAG, Teil 1: Flächenhaft

Messgröße	Messmethode							
	Untersuchungen an der Oberfläche		Untersuchungen des Untergrunds					
	Geol. Kartierung Kap. 4.1.1	Fernerkundung Kap. 4.1.2	Seismik Kap. 4.2.1	Gravimetrie Kap. 4.2.2	Geomagnetik Kap. 4.2.3	Geoelektrik Kap. 4.2.4	Elektromagnetik Kap. 4.2.5	Radiometrie Kap. 4.2.6
Zu untersuchende Parameter beziehungsweise Erkenntnisinteresse								
Identifikation von Störungen	●	◐	◑	K	K	K	K	○
Lokation von Störungen	●	◐	◑	K	K	K	K	○
Versatzbetrag	●	K	◑	K	K	K	K	K
Teufenlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers	●	K	◑	□	□	□	□	K
Raumlage der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers	●	K	◑	□	□	□	□	K
Ausdehnung der Schichtenfolge bzw. des Gesteinskörpers	●	K	◑	□	□	□	□	K
Häufigkeit von Störungen	●	K	◑	K	K	K	K	K
Klüftigkeit	●	K	◐	K	K	K	K	K
Lithologie	●	K	K	K	K	K	K	○
Petrografie	○	K	K	K	K	K	K	K
Gesteinseigenschaften (zahlreiche, grob charakterisierbar)	●	K	K	K	K	K	K	K

Legende:

■ Hoher Informationsgehalt
Keine/Kaum Gesteinsabhängigkeit

◑ Hoher Informationsgehalt
Teilweise Gesteinsabhängigkeit

□ Hoher Informationsgehalt
Hohe Gesteinsabhängigkeit

● Geringer Informationsgehalt
Keine/Kaum Gesteinsabhängigkeit

◐ Geringer Informationsgehalt
Teilweise Gesteinsabhängigkeit

○ Geringer Informationsgehalt
Hohe Gesteinsabhängigkeit

K Kein/Kaum Informationsgehalt

Tab. 7.11 Gesamteinschätzung der Messmethoden hinsichtlich der relevanten Messgrößen aus den Anlagen des StandAG, Teil 2: Punktuell

Messgröße	Messmethode								
	Bohrungsaufschluss		Bohrlochmessungen						
	Sondierungen Kap. 5.1.1	Kernbohrung Kap. 5.1.2	Akustik Kap. 5.2.3.1	Gravimetrie Kap. 5.2.3.2	Elektrik Kap. 5.2.3.3	Elektromagnetik Kap. 5.2.3.4	Radiometrie Kap. 5.2.3.5	Optik Kap. 5.2.3.6	Geomechanik Kap. 5.2.3.7
Zu untersuchende Parameter beziehungsweise Erkenntnisinteresse									
Kalibration der flächenhaften Methoden	■	■	■	K	■	K	■	●	○
Lithologie	■	■	○	K	○	○	○	○	K
Petrografie	●	●	K	K	K	K	K	K	K
Gesteinseigenschaften (zahlreiche, grob charakterisierbar)	◻	◻	K	K	K	K	K	K	K
Gesteinseigenschaften (spezifisch, siehe jeweiliges Kapitel)	◐	◐	◻	◻	◻	◻	◻	◻	◻
Häufigkeit von kleinräumigen Störungen	●	●	●	K	●	●	K	●	K
Klüftigkeit	●	●	●	K	●	●	K	●	K
Kluffüllungen	●	●	K	K	◐	◐	◐	K	K
Geomechanische Gesteinseigenschaften und Kennwerte	◐	◐	○	K	K	K	K	○	◻

Legende:

■ Hoher Informationsgehalt
Keine/Kaum Gesteinsabhängigkeit

◻ Hoher Informationsgehalt
Teilweise Gesteinsabhängigkeit

◻ Hoher Informationsgehalt
Hohe Gesteinsabhängigkeit

● Geringer Informationsgehalt
Keine/Kaum Gesteinsabhängigkeit

◐ Geringer Informationsgehalt
Teilweise Gesteinsabhängigkeit

○ Geringer Informationsgehalt
Hohe Gesteinsabhängigkeit

K Kein/Kaum Informationsgehalt

Tab. 7.12 Gesamteinschätzung der Messmethoden hinsichtlich der relevanten Messgrößen aus den Anlagen des StandAG, Teil 3: Labor

Messgröße	Messmethode			
	Petrografie Kap. 6.1	Boden- und Felsmechanik Kap. 6.2	Petrophysik Kap. 6.3	Geochemie Kap. 6.4
Zu untersuchende Parameter beziehungsweise Erkenntnisinteresse				
Lithologie	■	K	K	□
Petrografie	■	K	K	□
Chemische Gesteinseigenschaften	K	K	K	□
Physikalische Gesteinseigenschaften	K	■	■	K
Geomechanische Gesteinseigenschaften und Kennwerte	K	◻	○	K
Thermische Gesteinseigenschaften	K	K	■	K
Erosionshemmende Gesteinseigenschaften	●	■	K	●

Legende:

- Hoher Informationsgehalt
Keine/Kaum Gesteinsabhängigkeit
- ◻ Hoher Informationsgehalt
Teilweise Gesteinsabhängigkeit
- Hoher Informationsgehalt
Hohe Gesteinsabhängigkeit
- Geringer Informationsgehalt
Keine/Kaum Gesteinsabhängigkeit
- ◐ Geringer Informationsgehalt
Teilweise Gesteinsabhängigkeit
- Geringer Informationsgehalt
Hohe Gesteinsabhängigkeit
- K Kein/Kaum Informationsgehalt

8 Zusammenfassung

In diesem Bericht sind Messmethoden für die übertägige Erkundung von den in § 2 StandAG /STA 17/ definierten Endlagerbereichen dargestellt. Dazu ist dieser Bericht in drei wesentliche Teile gegliedert. Im ersten Teil erfolgt eine tabellarische Darstellung der verfügbaren Messmethoden (Kapitel 2), im zweiten Teil deren detaillierte Beschreibung (Kapitel 3 bis 6) und im dritten Teil (Kapitel 7) ein Abgleich der Messmethoden mit den Anforderungen aus dem Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). Im Rahmen dieses Vorhabens und in diesem Bericht erfolgt kein Vorschlag für ein Erkundungsprogramm.

In Kapitel 2 sind die Messmethoden im Überblick tabellarisch dargestellt. Dazu werden die Methoden zunächst in die Kategorien „Flächenhaft“, „Punktuell“ sowie „Labor“ eingeteilt. Eine weitere Einteilung erfolgt hinsichtlich ihres Untersuchungsgegenstandes (wie zum Beispiel „Oberfläche“, „Untergrund“, „Bohrungsaufschluss“) sowie – in Anlehnung an die DIN 1319-1 /DIN 95a/ – hinsichtlich des „Messprinzips“, also der wissenschaftlichen Grundlage eines Messverfahrens. Erst in der weiteren Einteilung erfolgt die Nennung der Messmethode/des Messverfahrens (ebenfalls in Anlehnung an die DIN 1319-1 /DIN 95a/). Außerdem ist auf das Kapitel verwiesen, in welchem die Messmethode im Detail beschrieben wird. Zuletzt erfolgt in der Tabelle eine Kurzdarstellung der potenziell mit den einzelnen Messungen ermittelbaren Erkenntnisse beziehungsweise Parameter. Die genutzte Einteilung der Messmethoden ist nicht als absolut zu verstehen, sondern soll dazu dienen, die Messmethoden in einer übersichtlichen Art und Weise zu ordnen.

Kapitel 3 gibt eine Einführung in die detaillierte Darstellung der Messmethoden, die in den Kapiteln 4 (Flächenhaft), 5 (Punktuell) und 6 (Labor) beschrieben werden. Die detaillierte Beschreibung der Messmethoden erfolgt systematisch auf Basis der genutzten Einteilung in der tabellarischen Darstellung. Jedes Messprinzip ist durch ein kurzes Datenblatt charakterisiert, welches die wesentlichen Eigenschaften der darauffolgenden näheren Beschreibung bezogen auf die Erkundung des Untergrunds zusammenfasst. Darauf folgen eine Beschreibung der ermittelbaren Parameter und zu erwartender Erkenntnisse. Die dem Messprinzip zugehörigen Methoden sind in ihrer technischen Ausführung erläutert sowie hinsichtlich ihrer Aussagekraft (ggf. auch wirtsgesteinsabhängige Aussagekraft), Grenzen und einschränkenden Randbedingungen beschrieben. Ebenfalls beschrieben sind Faktoren, die den Aufwand (Zeitbedarf, Personal, Kosten) zur Durchführung einer Messung beeinflussen. Danach sind mögliche Alternativen zur

Messmethode sowie mögliche oder notwendige Kombinationsmöglichkeiten mit der Messmethode dargestellt. Schließlich ist tabellarisch auf weiterführende Literatur verwiesen und wesentliche Punkte des Stands von Wissenschaft und Technik sind wiedergegeben.

In Kapitel 7 erfolgt eine Darstellung von Messmethoden zur Erfüllung der Anforderungen gemäß StandAG. Dazu werden aus den Ausschlusskriterien, den Mindestanforderungen und den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG von über Tage zu erkundende Parameter und Messgrößen identifiziert, die für die Anwendung dieser Anforderungen und Kriterien im Laufe des Standortauswahlverfahrens benötigt werden. Anschließend werden diese zu erkundenden Parameter und Messgrößen mit den Erkenntnisinteressen der zu Verfügung stehenden Messmethoden aus den Kapiteln 4 bis 6 verglichen und geprüft, ob zu jeder – im Sinne des Vorhabens „MessEr“ relevanten – Messgröße eine geeignete Messmethode oder eine Kombination von Messmethoden vorliegt. In den Vergleich geht ein, ob dieselbe Messgröße mit verschiedenen Methoden gemessen werden kann. Die Vor- und Nachteile der Messmethoden werden auch hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf unterschiedliche Gesteinstypen mit einbezogen. So können auch die Wirtsgesteine nach § 1 Abs. 3 StandAG Berücksichtigung in der Darstellung finden.

Die vergleichende Betrachtung der für die übertägige Erkundung gemäß StandAG zu Verfügung stehenden Messmethoden zeigt, dass im Hinblick auf die im StandAG genannten Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die übertägige Erkundung Messmethoden oder Kombinationen von Messmethoden existieren, mit denen die aus den Anlagen 2 bis 6 sowie 8 und 11 StandAG identifizierten Messgrößen erfasst werden können. Dabei ist zu beachten, dass im Vorhaben „MessEr“ folgende Ausschlusskriterien bei dem durchgeführten Abgleich nicht berücksichtigt wurden:

- „großräumige Vertikalbewegungen“,
- „seismische Aktivität“,
- „vulkanische Aktivität“,
- „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“,
- sowie „Grundwasseralter“.

Da gleiche gilt für die folgenden Mindestanforderungen:

- Gebirgsdurchlässigkeit und
- Erhalt der Barrierewirkung.

Die hier nicht berücksichtigten Anlagen 1, 7, 9 und 10 StandAG betreffen hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Eigenschaften des Untergrunds und sind Gegenstand des Vorhabens „Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren (übErStand)“ (FKZ 4717003).

Für die auf Basis der Ausschlusskriterien, der Mindestanforderungen und der Abwägungskriterien des StandAG im MessEr-Vorhaben identifizierten Messgrößen sind die entsprechenden erforderlichen Messmethoden einer übertägigen Erkundung gemäß StandAG prinzipiell verfügbar.

9 Abkürzungsverzeichnis

2,5D	zweieinhalbdimensional
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
A	Ampere
AAS	Atomabsorptions-Spektrometrie
AeroEM	luftgestützte Elektromagnetik
BASE	Bundesamt für die Sicherheit in der nuklearen Entsorgung
BfE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartografie und Geodäsie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CE	Kapillarelektrophorese
CH ₄	Methan
CKW	chlorierte Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CT	Röntgen-Computertomographie
D-AERO	Deutschlandweite Aerogeophysik
DGM	Digitales Geländemodell
DGPF	Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation
D-GPS	Differential Global Positioning System
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECD	Elektroneneinfangdetektoren
EM	Elektromagnetik
EMR	Elektromagnetische Reflexion
EMS	Elektronenstrahl-Mikrosonde
EN	Europäische Norm
EP	Eigenpotenzial
etc.	und weitere
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FID	Flammenionisationsdetektoren
FIS	Fachinformationssystem
FKZ	Förderkennzeichen, Förderkennzeichen
FT	Fourier-Transformation
GC	Gaschromatographie
GIS	Geographisches Informationssystem
GNSS	Globale Navigationssatellitensysteme
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HCl	Salzsäure
HF	hochfrequent
HKL	Hohlkathodenlampen
HPLC	Hochdruck-Flüssigchromatographie
Hz	Hertz
IAEA	Internationalen Atom Energie Organisation
IP	Induzierte Polarisation
IR	infrarot

IRD	Infrarot-Detektor
ISO	International Organization for Standardization
ISSN	Internationale Standardnummer für fortlaufende Sammelwerke
KD	Kompression-Durchlässigkeit
KHz	Kilohertz
KW	Kohlenwasserstoffe
LFA	Laser oder Light Flash-Methode
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
mA	Milli-Ampere
MRT	Magnetresonanztomographie
MS	Massenspektrometrie, magnetische Suszeptibilität
NIR	Nahinfrarot
nT	nano-Tesla
OSL	optische Lumineszenz
P _e	photoelektrischer Effekt
PEF	Photoelektrischer Faktor
pH	Maß für sauren oder basischen Charakter einer wässrigen Lösung
PVC	Polyvinylchlorid, Polyvinylchlorid
RDA	Röntgenpulverdiffraktometrie
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SEA	Schallemissionsanalyse
SEV	Sekundärelektronenvervielfacher, Sekundärelektronenvervielfacher
SIP	Spektral Induzierte Polarisation
StandAG	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle
TEM	Transienten-Elektromagnetik, Transmissions-Elektronen-Mikroskop
TK25	Topografische Karte, Maßstab 1:25.000
TL	Thermolumineszenz
UV	ultraviolett
VIS	sichtbar

10 Glossar (englisch-deutsch)

Englisch	Abkürzung	Deutsch
Acoustic Tele Viewer	ATV	Akustische Bohrlochabtastung
Airborne Laser Scanner	ALS	Laser-Abtastsystem, luftgestützt
Array		Anordnung (hier technisch genutzt)
Audio Frequency Magnetic Field	AFMAG	Kippwinkel-Methode, die natürlich Audio Signale nutzt
Bottom Hole Assembly	BHA	Bohrlochgarnitur
Bit		Auflösung (bei einer Messung)
Bit		Meißel (bei einer Bohrung)
Bird		Schleppsonde am Flugzeug
Borehole Compensated Log	BHC	Schallwellenmessung im Gestein, korrigiert um verschiedene Effekte
Borehole Televiewer	BHTV	Sonde zur akustischen Bohrlochwandabbildung
Bouger-correction		Bouger-Reduktion
Brazilian test		Spaltzugversuch
Breakout		Bohrlochwandausbruch
Bulk modulus		Kompressionsmodul
Caliper		Kaliber (Durchmesser)
Cased hole		verrohrtes Bohrloch
Cement Bond Log	CBL	akustische Messung bei Produktionsbohrungen
Compensated Neutron Log	CNL	Porositätsmessung im Bohrloch
Constitutive relation/law		Stoffgesetz/Materialgesetz
Core		Kern (Bohrung)
Core-Logging		Kern-Logging
Core-Scan		Kern-Scan
Corrected Gammay Ray log	CGR	Um den Uran-Gehalt korrigiertes „Spectral gammy Ray log“
Cross hole		Paralleldurchschallung zwischen mehreren Bohrlöchern
Crossed dipole tool		Sonde zur komplexen Schallwellenmessung im Gestein
Cuttings		Bohrklein
Dip-angle methods		Kippwinkel - Methode (der Elektromagnetik)

Englisch	Abkürzung	Deutsch
Dipmeter log		Widerstandsmessung im Bohrloch zur Messung des Einfallens
Direct shear test		Rahmenscherversuch
Directional drilling		Richtbohren
Dissolved Organic Carbon	DOC	gelöster organischer Kohlenstoff
Drift correction		Gravimeter-Gang-Korrektur
Drill core		Bohrkern
Dual Laterolog	DLL	Kombination von fokussierten Widerstandsmessungen im Bohrloch
fibre-optics		Glasfaser
Excavation Damaged/Disrupted Zone	EDZ	Auflockerungszone
Fingerprints		Fingerabdruck (bei der Massenspektrometrie gebräuchlicher Begriff)
Flowmeter		Gerät zur Bestimmung der Durchströmung der Bohrspülung
Flushed zone		Bereich in welchem Spülflüssigkeit in das Umgebungsgestein eingedrungen ist
Focussed Ion Beam	FIB	Ionenfräswerkzeug
Formation Micro Imager	FMI	Sonde zur elektrischen Bohrlochwandabbildung
Formation Micro Scanner	FMS	Sonde zur elektrischen Bohrlochwandabbildung
Fracking		reißen, aufreißen
Free air correction		Freiluft-Reduktion
ft		Fuß (Maßeinheit)
Gamma Neutron Tool	GNT	Porositätsmessung im Bohrloch
Gammy Ray log	GR	einfache Messung der natürlich Gamma-Strahlung im Bohrloch
Gamma-ray rock-density log	RHOB	Dichtemessung im Bohrloch
Global Positioning System	GPS	Weltweites satellitengestütztes Positionierungssystem
Gravimetry		Gravimetrie
Ground Penetrating Radar	GPR	Bodenradar, Georadar
Ground survey		bodengestützte Erkundung

Englisch	Abkürzung	Deutsch
High Performance Computing	HPC	Hochleistungsrechnung
High Resolution Induction	HRI	hochauflösende Induktions-Sonde zur Widerstandsmessung
Hydraulic oder hydro-fracking		aufreißen durch hydraulischen Druck
inch		Zoll (Maßeinheit)
Induced Polarization log	IP	Messung der induzierten Polarisation im Bohrloch
induced gamma ray spectroscopy		Spektroskopie der Gammastrahlung, induziert durch thermische Neutronen, gehört zum gepulsten Neutronen Messverfahren (im Bohrloch)
Induction log		Induktions-Sonde zur Widerstandsmessung
Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry	ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
Interferometric SAR	InSAR	Interferometrisches Radar
Lamé's first parameter		Erste Lamé-Konstante
Laserscanning		Laser-Abtast- und Ortungssystem
Laterolog deep	LLD	fokussierte Widerstandsmessung im Bohrloch mit hoher Eindringtiefe
Laterolog shallow	LLS	fokussierte Widerstandsmessung im Bohrloch mit flacher Eindringtiefe
Latitude correction		Breitenreduktion
Light Detection And Ranging	LIDAR	Laser-Abtast- und Ortungssystem
Liner		Kernrohr, Mantelrohr (bei einer Bohrung)
Litho Density Log/Tool)	LDL/LDT	Messung der Gesteinsdichte im Bohrloch, Tool ist die Bezeichnung des Geräts
Logging		kontinuierliche Messungen im Bohrloch
Logging While Drilling	LWD	Messen während des Bohrens (Bohrlochuntersuchung)
Measurement While Drilling	MWD	Messen während des Bohrens (Bohrtätigkeit)
Microlog		Widerstandsmessung im Bohrloch
Mud		Spülflüssigkeit
Mud cake		Bohrklein, welches sich an der Bohrlochwand festgesetzt hat

Englisch	Abkürzung	Deutsch
Mud cake zone		Bereich in welchem sich Bohrklein an der Bohrlochwand festgesetzt hat
Mud logging		Analyse der Bohrspülung und des Bohrkleins
Mud motor		Antriebsunterstützung des Bohrkopfes mit der Spülflüssigkeit
Mud pulse		modulierter Fluss der Bohrspülung um Daten zu übermitteln
Multi-array inductions		komplexe Induktions-Sonde zur Widerstandsmessung
Natural Gammy Ray log	NGR	einfache Messung der natürlich Gamma-Strahlung im Bohrloch
near-surface		oberflächennah
Near-Surface Nuclear Magnetic Resonance method	SNMR	oberflächennahe Kernspinresonanzspektroskopie
Neutron-gammy-ray log, neutron porosity log	NPHI	Porositätsmessung im Bohrloch
Normal log		einfache Widerstandsmessung im Bohrloch
Nuclear Magnetic Resonance	NMR	Kernspinresonanz
Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy		Kernspinresonanzspektroskopie
Open hole		unverrohrtes Bohrloch
Optical Televiwer	OTV	Video-Aufnahme im Bohrloch
over-coring		überbohren
Percussion drilling		Schlagbohrverfahren
Plug, core plug		zylinderförmige Probe aus einem Bohrkern
Poisson's ratio		Poissonzahl
processing		Prozessieren, Auswertung, Weiterverarbeitung
Propagation methods		Ausbreitungsmessungen (elektrisch im Bohrloch)
Pulsed Neutron Lifetime	PNL	Gepulstes Neutronen Messverfahren (im Bohrloch)
Radio detection and ranging	Radar	Kurz- und Mikrowellen Abtast- und Ortungssystem
Rate of penetration		Bohrfortschritt
Real Aperture Radar	RAR	Radar mit echter Apertur
Receiver		Empfänger

Englisch	Abkürzung	Deutsch
Remote sensing		Fernerkundung
Resistivity at the bit	RAB	Widerstandsmessung am Bohrmeißel
Resistivity method		Gleichstromgeoelektrik
Reverse circulation		Rückfluss der Spülflüssigkeit innerhalb des Bohrgestänges
Ring shear test		Kreisringscherversuch
Rotary drilling		Rotationsbohrverfahren
Scanning Electron Microscope	SEM	Raser-Elektronen-Mikroskop
Self-Potential, Spontaneous Potential	SP	Eigenpotenzial
Shear modulus		Schubmodul/Schermodul
Short Wave Infrared	SWIR	kurzwelliges Infrarot
Sidewall Neutron Porosity	SNP	Porositätsmessung im Bohrloch
Siting		Standortauswahl
Slowness		Laufzeit (eines Signals)
Slowness-Time-Coherence	STC	Laufzeit und Phasenverschiebung (eines Signals)
Small Unmanned Aerial Vehicles	SUAV	Drohnen
Sonic log		einfache Schallwellenmessung im Gestein
Spectral Gamma Ray log	SGR	spektrale Messung der natürlichen Gamma-Strahlung im Bohrloch
Spectroscopy		Spektroskopie
Self-Potential, Spontaneous Potential log		Messung des Eigenpotenzials im Bohrloch
Standard circulation		Rückfluss der Spülflüssigkeit außerhalb des Bohrgestänges
Stinger		Fest installierte Sonde am Flugzeug
Synthetic Aperture Radar	SAR	Radar mit synthetischer Apertur
Tensile strength test		einfacher Zugversuch
Terrain correction		Topografische Reduktion
Thermal Conductivity Scanner	TCS	Messung der Wärmeleitfähigkeit
thermal die-away bzw. thermal decay		Thermisches Abklingen, gehört zum gepulsten Neutronen Messverfahren (im Bohrloch)
Thick wall cylinder test		Versuch mit dickwandigen hohlen Gesteinszylindern

Englisch	Abkürzung	Deutsch
Tidal correction		Gezeitenkorrektur
Tilt-angle		Kippwinkel
Tilt-angle methods		Kippwinkel - Methode (der Elektromagnetik)
Time domain IP		IP-Vermessung im Zeitbereich
Time-Domain Electromagnetic surveying	TDEM	Transientenelektromagnetik
Tool		Messsonde
Tool-string		Kombination von Messsonden
Total Organic Carbon	TOC	Gesamtgehalt an organischen Kohlenstoff
Transit time		Laufzeit (eines Signals)
Transmitter		Sender
Triaxial test		Triaxialer Druckversuch
True triaxial test		echter triaxialer Druckversuch
Two-Way-Time	TWT	Signallaufzeit Quelle-Reflektor und zurück
Ultrasonic Borehole Imager	UBI	Sonde zur akustischen Bohrlochwandabbildung
Unconventional reservoir		Schiefergaslagerstätte
Uniaxial Compressive Strength	UCS	uniaxiale Gesteinsfestigkeit
Unmanned Aerial System	UAS	Unbemanntes Luftfahrzeug, Drohne
Unmanned Aerial Vehicle	UAV	Unbemanntes Luftfahrzeug, Drohne
Variable Density Log	VDL	akustische Messung bei Produktionsbohrungen
Vertical Seismic Profiling	VSP	vertikale seismische Untersuchung im Bohrloch
Very Low Frequency method	VLF	Kippwinkel-Methode mit sehr niedriger Frequenz (der Elektromagnetik)
Visible Near Infrared	VNIR	Infrarot nah am sichtbaren Bereich
Wall resistivity log		Widerstandsmessung im Bohrloch, der Bohrlochwand
Washout		Bohrlochwandausspülung
Wireline logging		kontinuierliche Messungen im Bohrloch
Wireline continuous coring		Kernen während des Bohrbetriebs
X-Ray Diffraction	XRD	Röntgenpulverdiffraktometrie

Englisch	Abkürzung	Deutsch
X-Ray Fluorescence Spectroscopy	XRF	Röntgenfluoreszenzspektroskopie
Young's modulus		Elastizitätsmodul

11 **Literatur**

- /AAL 16/ Aaltonen, I., Kosunen, P., Mattila, J., Engström, J., Paananen, M., Paulamäki, S., Front, K., Gehör, S., Kärki, A.: Geology of Olkiluoto. POSIVA, 2016-16, ISBN 987-951-652-244-2, Posiva Oy, August 2016.
- /AAR 03/ Aaro, S.: Regional gravity survey in the Forsmark area, 2002 and 2003. Geological Survey of Sweden, SKB P-03-42, 25 S.: Stockholm, Sweden, 2003.
- /ABL 12/ Ablard, P., Bell Chris, Cook, D., Fornasier, I., Poyet, J.-P., Sharma, S., Fielding, K., Lawton, L., Haines, G., Herkommer, Mark A., McCarthy, K., Radakovic, M., Umar, L.: The Expanding Role of Mud Logging. Oilfield Review, Bd. 24, Nr. 1, 2012.
- /AKE 02/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Hrsg.): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd, Abschlussbericht. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), 260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /ALB 13/ Albertz, J.: Einführung in die Fernerkundung, Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 5. Aufl., ISBN 9783534258635, WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft): Darmstadt, 2013.
- /ALP 16/ AlphaCrom AG: HPLC Grundlagen. 9 S., erreichbar unter <https://www.alphacrom.com/de/datasheets/hplc-grundlagen.pdf>, abgerufen am 26. November 2018.
- /ALS 17/ Alsadi, H. N.: Seismic Hydrocarbon Exploration, 2D and 3D Techniques. Advances in Oil and Gas Exploration & Production, 284 S., ISBN 9783319404356, DOI 10.1007/978-3-319-40436-3, Springer International Publishing: Basel, 2017.
- /AMM 89/ Ammann, M., Schenker, F.: Nachweis von tektonischen Störungen in zwei Bodengas-Profilen in der Nordschweiz. Hrsg.: NAGRA, Nagra Technischer Bericht, 89-25, 70 S., 1989.

- /AND 01/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier 2001 Argile, Rapport de synthèse. 325 S., 2001.
- /AND 16a/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier d'options de sûreté – Partie exploitation (DOS-Expl). CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060/A, 520 S., 8. April 2016.
- /AND 16b/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Andra in Meuse / Haute-Marne. 20 S., November 2016.
- /ANG 94/ Angerer, J. P., Ostler, W. K., Gabbert, W. D., Schultz, B. W.: Secondary plant succession on disturbed sites at Yucca Mountain, Nevada. 87 S., DOI 10.2172/114521, 1994.
- /ANT 99/ Anttila, P., Ahokas, H., Front, K., Hinkkanen, H., Johansson, E., Paulamaki, S., Riekkola, R., Saari, J., Saksa, P., Snellman, M., Wikstrom, L., Ohberg, A.: Final Disposal of Spent Nuclear Fuel in Finnish Bedrock, Olkiluoto Site Rreport. Posiva Oy, Posiva Report, PR 99-10, 206 S., ISBN 951-652-065-0, Juni 1999.
- /API 98/ American Petroleum Institute: Recommended Practices for Core Analysis, RECOMMENDED PRACTICE 40. 236 S.: Washington, DC, USA, 1998.
- /APP 08/ Appleton, J. D., Miles, J. C. H., Green, B. M. R., Larmour, R.: Pilot study of the application of Tellus airborne radiometric and soil geochemical data for radon mapping. Journal of Environmental Radioactivity, Bd. 99, Nr. 10, S. 1687–1697, DOI 10.1016/j.jenvrad.2008.03.011, 2008.
- /ARJ 13/ Arjuncm3: Schmidhammer - Rückprallhammer, From Wikimedia Commons, the free media repository, Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29434095>. Hrsg.: Wikipedia, Stand vom 30. Oktober 2018, erreichbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=181912818>, abgerufen am 14. November 2018.
- /ARK 18/ Arkarjun: Illustration of Remote Sensing, From Wikimedia Commons, the free media repository, By Arkarjun - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://com>

mons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29727605. Hrsg.: Wikimedia Commons, erreichbar unter https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Remote_Sensing_Illustration.jpg, abgerufen am 15. August 2018.

- /ARN 04/ Arndt, R.: Aeromagnetik, Alte Methode - Neue Bilder. In: Deutsche Geophysikalischen Gesellschaft e.V. (Hrsg.): DGG Kolloquium Aerogeophysik. Bd. 2004, S. 45–60: Potsdam, 2004.
- /ASH 18/ Ashena, R., Thonhauser Gerhard: Coring Methods and Systems, A practical guide to downhole rock sampling/coring. ISBN 978-3-319-77732-0, Springer, 2018.
- /ATT 13/ Attwa, M., Günther, T.: Spectral induced polarization measurements for predicting the hydraulic conductivity in sandy aquifers. Hydrology and Earth System Sciences, Bd. 17, Nr. 10, S. 4079–4094, DOI 10.5194/hess-17-4079-2013, 2013.
- /AUS 96/ Australian Drilling Industry Training Committee Ltd.: Drilling, The Manual of Methods, Applications, and Management. ISBN 978-1-56670-242-3, CRC Press, 1996.
- /BÄH 18/ ohne Autor: Dilatometer. 24 S., erreichbar unter https://www.mpa.mw.tum.de/fileadmin/tumwmpa/www/MPA/pdf/Dilatometer_Produktblatt.pdf, abgerufen am 22. November 2018.
- /BAR 83/ Barrows, L. J., Shaffer, S. E., Miller, W. B., Fett, J. D.: Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) Site Gravity Survey and Interpretation. U.S. Department of Energy (DOE), Sandia National Laboratories, SAND82-2922: Albuquerque, New Mexico, 1983.
- /BAU 18/ Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.): Handbuch oberflächennahe Geothermie. Springer eBook Collection : Life Science and Basic Disciplines, 817 S., ISBN 3-662-50306-9, DOI 10.1007/978-3-662-50307-2, Springer Spektrum: Berlin, 2018.

- /BBV 99/ Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) in der Fassung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert 31. Juli 2009 (BGBl. I 2009, S. 2585).
- /BEH 15/ Behroozmand, A. A., Keating, K., Auken, E.: A Review of the Principles and Applications of the NMR Technique for Near-Surface Characterization. *Surveys in Geophysics*, Bd. 36, Nr. 1, S. 27–85, DOI 10.1007/s10712-014-9304-0, 2015.
- /BER 06/ Berglund, J., Nyborg M.: Oskarshamn site investigation, Coordinated presentation of topographic and geophysical lineaments in selected areas, including field assessment - Laxemar area. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), GeoVista AB, P-06-15, 36 S., 2006.
- /BER 13/ Berckmans, A., Boulanger, D., Brassinnes, S., Capouet, M., Depaus, C., Lopez, E. D., Gambi, A., Gens, R., Sillen, X., van Baelen, H., van Geet, M., van Marcke, P., Wacquier, W., Wouters, L., Harvey, L., Wickham, S.: ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if considered as waste. Hrsg.: Jean-Paul Minon, Avenue des Combattants 107A, 1470 Genappe, Belgium, Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS), NIROND-TR, 2013-12 E, 413 S.: Brussels, Belgium, 2013.
- /BEZ 18/ Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW: Digitales Geländemodell mit Schummerung NordOst, <https://www.tim-online.nrw.de/tim-online2/>, Datenlizenz Deutschland - Namensnennung - Version 2.0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0). Land NRW: Köln, 2018.
- /BFE 08/ Bundesamt für Energie (BFE): Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil. 92 S., 2. April 2008.
- /BfS 18/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Geoportal. erreichbar unter <https://www.imis.bfs.de/geoportal>, abgerufen am 20. September 2018.
- /BGR 02/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.): Geologisches Jahrbuch, Geologische Kartieranleitung, Allgemeine Grundlagen.

Reihe G, Band G 9, 4 S., ISBN 978-3-510-95889-4: Stuttgart (Schweizerbart), 2002.

/BGR 18a/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): D-AERO: Deutschlandweite Aerogeophysik-Befliegung zur Kartierung des nahen Untergrundes und seiner Oberfläche - Auswertung. erreichbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Geophysik/Aerogeophysik/Projekte/laufend/D-AERO/Deutschlandweite-Aerogeophysik-Befliegung-D-AERO.html?nn=1555598, abgerufen am 29. August 2018.

/BGR 18b/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Übersicht über die Radonkonzentration in der Bodenluft in einem Meter Tiefe. erreichbar unter <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/boden/radon-karte.html>, abgerufen 20.09.20108.

/BIR 09/ Birkholz, M., Fewster, P. F.: Thin film analysis by X-Ray scattering. 2. Aufl., 356 S., ISBN 9783527310524, Wiley-VCH: Weinheim, 2009.

/BLU 11/ Blume, H.-P., Stahr, K., Leinweber, P.: Bodenkundliches Praktikum, Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Aufl., 255 S., ISBN 978382741553-0, Spektrum Akademischer Verlag: Heidelberg, 2011.

/BMBF 02/ Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): geoinformation.net, Lernmodul 6 Fernerkundung. erreichbar unter www.geoinformation.net, abgerufen am 3. Juli 2018.

/BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.

/BRA 85/ Braithwaite, A., Smith, F. J.: Chromatographic Methods. 414 S., ISBN 978-94-009-4093-2, Springer Netherlands, 1985.

/BRA 08a/ Brassler, T., Herbert, H.-J., Mieke, R.: Anhang Standorterkundung, Das geologische Endlagersystem: Gebirgsverhalten und Erkundungsmethoden.

In: Müller-Lyda, I., Sailer, M.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9783 & 02E9793. GRS-247, ISBN 978-3-939355-22-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Öko-Institut e.V.: Braunschweig / Darmstadt, September 2008.

/BRA 08b/ Brasser, T., Fein, E., Herbert, H.-J., Miehe, R., Müller-Lyda, I., Noseck, U., Schmidt, U., Rübel, A.: Anhang Parameter, Messmethoden und Bedeutung. In: Müller-Lyda, I., Sailer, M.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9783 & 02E9793. GRS-247, ISBN 978-3-939355-22-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Öko-Institut e.V.: Braunschweig / Darmstadt, September 2008.

/BRA 19/ Bracke, G., Hartwig-Thurat, E., Larue, J., Meleshyn, A., Weyand, T.: Untersuchungen zu den "maximalen physikalisch möglichen Temperaturen" gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Hrsg.: Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, urn:nbn:de:0221-2019111520402 / BfE-RESFOR-003/19 / GRS-A-3948, 321 S.: Köln, Januar 2019.

/BRU 38/ Brunauer, S., Emmett, P. H., Teller, E.: Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, Februar 1938, Band 60, Nr. 2, S. 309–319, DOI 10.1021/ja01269a023, 1938.

/BUR 92/ Burger, H. R.: *Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface*. ISBN 9780132967730, Prentice Hall, 1992.

/CLA 18/ Clauser, C.: *Grundlagen der angewandten Geophysik - Seismik, Gravimetrie*. ISBN 978-3-662-55310-7, Springer Spektrum, 2018.

/CON 16/ Connor, D., Martin, P. G., Scott, T. B.: Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems. *International Journal of Remote Sensing*, Bd. 2016, Vol. 37, No. 24, S. 5953–5987, DOI 10.1080/01431161.2016.1252474, 2016.

- /CON 18/ Conil, N., Talandier, J., Djizanne, H., La Vaissière, R. de, Righini-Waz, C., Auvray, C., Morlot, C., Armand, G.: How rock samples can be representative of in situ condition, A case study of Callovo-Oxfordian claystones. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Bd. 10, Nr. 4, S. 613–623, DOI 10.1016/j.jrmge.2018.02.004, 2018.
- /CRA 94/ Craig, J. R., Vaughan, D. J.: *Ore microscopy and ore petrography*. 2. Aufl., 434 S., ISBN 0471551759, Wiley: New York, Chichester, 1994.
- /CRA 04/ Craen, M. de, Wang, L., van Geet, M., Moors, H.: *Geochemistry of Boom Clay pore water at the Mol site*. Hrsg.: SCK CEN, 04/MDC/P-48, 181 S., 2004.
- /CRI 98/ Cristescu, N. D., Hunsche, U.: *Time Effects in Rock Mechanics*. Wiley Series in Materials, Modelling and Computation, 342 S., ISBN 0471955175, Wiley & Sons; John Wiley & Sons: Chichester, West Sussex, 1998.
- /CRU 17/ Cruden, A., Gautschi, A., Smith, R., Stephens Michael: 2017 Report of the NWMO Adaptive Phased Management Geoscientific Review Group (GRG), Preliminary Geoscientific Assessments. Hrsg.: Geoscientific Review Group Report, Bd. 0, Nr. 85, 15 S., DOI 10.14714/CP85.1413, 2017.
- /CTH 82/ Geologisches Institut TU Clausthal (Hrsg.): *Karte, Riß, Profil und Nordrichtung*, 1. Grundlagen und Bezugssysteme. Bd. 18, ISBN 3-87639-018-4, Eilen Pilger: Clausthal-Zellerfeld, 1982.
- /CUR 13/ Curtis, M. E., Ambrose, R. J., Sondergeld, C. H., Rai, C. S.: *Transmission and Scanning Electron Microscopy Investigation of Pore Connectivity of Gas Shales on the Nanoscale*. In: Society of Petroleum Engineers (SPE) (Hrsg.): *North American Unconventional Gas Conference and Exhibition*. The Woodlands, Texas, USA, 01.01.2013 00:00:00, DOI 10.2118/144391-MS, Society of Petroleum Engineers, 2013.
- /DAEF 16/ Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF): *DAEF-Kurzstellungnahme zur Veröffentlichung, "Deformation-assisted fluid percolation in rock salt"*, (erschienen in *Science* am 30.11.2015). 12 S., April 2016.

- /DAH 15/ Dahm, T.: Grundlagen der Geophysik. 338 S., DOI 10.2312/GFZ.2.1.2015.001, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2015.
- /DAN 11/ Danielsen, B. E.: The Applicability of Geoelectrical Methods in Pre-Investigation for Construction in Rock. Engineering Geology, Lund University, BeFo Report, Bd. 108, 92 S., 2011.
- /DAV 94/ Davison, C. C., Brown, A., Everitt, R. A., Gascoyne, M., Kozak, E. T., Lohda, G. S., Martin, C. D., Soonawala, N. M., Stevenson, D. R., Thorne, G. A., Whitaker, S. H.: The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Site Screening and Site Evaluation Technology. Atomic Energy of Canada Limited, AECL-10713, COG-93-3: Manitoba, Canada, 1994.
- /DAY 98/ Day, W. C., Potter, C. J., Sweetkind, D. S., Dickerson Robert P., San Juan, C. A.: Bedrock Geologic Map of the Central Block Area, Yucca Mountain, Nye County, Nevada. Hrsg.: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (USGS), 15 S., 1998.
- /DEA 18/ DEA Group: Gravimetrie, Magnetik, Elektromagnetik, Technologie - Exploration. erreichbar unter www.dea-group.com/de/technologie/exploration/gravimetrie-magnetik-elektromagnetik, abgerufen am 17. Oktober 2018.
- /DEN 11/ Deng, Y. F., Tang, A. M., Cui, Y. J., Nguyen, X. P., Li, X. L., Wouters, L.: Laboratory hydro-mechanical characterisation of Boom Clay at Essen and Mol. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 36, 17-18, S. 1878–1890, DOI 10.1016/j.pce.2011.10.002, 2011.
- /DET 14/ Dettmer-Wilde, K., Engewald, W.: Practical Gas Chromatography, A Comprehensive Reference, A practical reference for making the most out of gas chromatography. 902 S., ISBN 978-3-642-54640-2, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2014.
- /DFE 18/ Department for the Economy, UK: Geological Survey of Northern Ireland Tellus Project, Geophysical Surveys. erreichbar unter <https://www.economy-ni.gov.uk/articles/geophysics>, abgerufen am 29. August 2018.

- /DIC 08/ Dick, O. B., Reistad, O., Hustveit, S., Grepstad, G., Steenhuisen, F.: Nuclear Waste Related Satellite Mapping in Northwest Russia. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXXVII, PartB8.
- /DIN 95a/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1 Grundbegriffe. 1319-1:1995, Beuth Verlag, 1995.
- /DIN 95b/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach dem BET-Verfahren. DIN ISO 9277:1995:1995, 1995.
- /DIN 01/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Dicke Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand. DIN EN 12939:2001-02:2001, Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2001.
- /DIN 07/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen - Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung. DIN EN ISO 22475-1:2007, 5 S., Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2007.
- /DIN 11a/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN 18129:2011-07. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Kalkgehaltsbestimmung:2011-07, Beuth Verlag: Berlin, 2011.
- /DIN 11b/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Handbuch Eurocode 7 - Geotechnische Bemessung, Erkundung und Untersuchung – Von DIN autorisierte konsolidierte Fassung. Normen-Handbuch Eurocodes, Bd. 2, 1. Aufl., 215 S., ISBN 9783410208624, Beuth: Berlin, 2011.
- /DIN 16a/ DIN EN ISO: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels. 14689:2016, 4 S., Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2016.

- /DIN 16b/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 3: Bestimmung der Korndichte. DIN EN ISO 17892-3:2016-07:2016-07, Beuth Verlag GmbH, 2016.
- /DIN 17/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Photogrammetrie und Fernerkundung – Begriffe.2017-06, ICS 01.040.07; 01.040.37; 07.040; 37.040.01, 40 S., Beuth Verlag: Berlin, 2017.
- /DIN 18/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung. 14688-1:2018, 5 S., Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2018.
- /DOL 06/ Doll, W. E., Gamey, T. J., Beard, L. P., Bell, D. T.: Airborne vertical magnetic gradient for near-surface applications. The Leading Edge, Bd. 25, Nr. 1, S. 50–53, DOI 10.1190/1.2164755, 2006.
- /DUN 17/ Duncan, A.: Advances in Ground and Borehole EM Survey Technology to 2017. In: Tschirhart, V., Thomas, M. D. (Hrsg.): Proceedings of Exploration 17: Sixth Decennial International Conference on Mineral Exploration. S. 169–182, 2017.
- /ELL 10/ Ellis, D. V., Singer, J. M.: Well logging for earth scientists. 2. Aufl., 692 S., ISBN 904816947X, Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2010.
- /ELO 98/ Eloranta, E.: Electromagnetic characterization of fractured rock for geological disposal studies of spent nuclear fuel. STUK-YTO-TR, Bd. 145, ISBN 951-712-255-1, STUK: Helsinki, 1998.
- /EMI 18/ Emil Lundberg, Christopher Juhlin, Fengjiao Zhang, Ruth Behrendt: Seismic reflection, refraction and tomography results from 3D seismic data, For-smark. P-17-25, 34 S., 2018.

- /FAß 00/ Faß, T.: Radon- und Thoron-Messungen über einem Quarzgang im Randbereich des Steinwald-Granites südlich Fuchsmühl im Steinwald. Diplomarbeit, 122 S., Geologisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn: Bonn, 2000.
- /FEC 18/ Fecker, E.: Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels. 2. Aufl., 32 S., ISBN 9783662578230, DOI 10.1007/978-3-662-57824-7, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2018.
- /FRI 99/ Fricke, S., Schön, J.: Praktische Bohrlochgeophysik. ISBN 3131183314, Enke Verlag: Stuttgart, 1999.
- /GAU 02/ Gautschi, A., Lambert, A., Zuidema, P.: Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-03, 659 S.: Wetingen, Schweiz, 1. Dezember 2002.
- /GAU 10/ Gautschi, A., Gribi, P., Mayer, G., Holocher, J., Poller, A., Schneider, J., Schnellmann, M., Traber, D., Zuidema, P.: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2, Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 10-01: Wetingen, Oktober 2010.
- /GEE 14/ Geert-Jan Vis, Hanneke Verweij: Geological and geohydrological characterization of the Boom Clay and its overburden. Hrsg.: COVRA, OPERA-PU-TNO411, 86 S., 2014.
- /GEH 07/ Gehör, S., Kärki, A., Paananen, M.: Petrology, Petrophysics and Fracture Mineralogy of the Drill Core Sample OL-KR22 and OL-KR22B. Hrsg.: Posiva Oy, Working Report, 2007-47, 43 S., 2007.
- /GEN 15/ Genske, D. D. (Hrsg.): Ingenieurgeologie. 2. Aufl., 613 S., ISBN 978-3-642-55386-8, DOI 10.1007/978-3-642-55387-5, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG: Berlin, 2015.

- /GEO 18/ GEO-Data GmbH: GEO-data - Rock Eval Pyrolyse. erreichbar unter <http://www.geo-data.de/index.php/de/gd-mp-petroleum-engineering/analytical-services/rock-eval-pyrolyse>, abgerufen am 26. November 2018.
- /GOL 09/ Goldsworthy, M., Seidel, K., Popp, T.: Anforderungen an Methoden und Umfang der über- und untertägigen Erkundung eines Standortes für ein Endlager unter Einbeziehung eines internationalen Vergleichs. Golder Associates GmbH, GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH, Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH, BfS-RESFOR-15-09: Salzgitter, August 2009.
- /GÖT 02/ Götze, J.: Kathodolumineszenz-Mikroskopie und -Spektroskopie in den Geo- und Materialwissenschaften. Mitt. Österr. Miner. Ges., Band 147, 2002.
- /GRA 95/ Grasty, R. L., Minty, B. R. S.: A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys. 1995/60, ISBN 0642223661, Australian Geological Survey Organisation, 1995.
- /GRO 17/ Gross, J. H.: Mass Spectrometry, A Textbook. 201 S., ISBN 9783319543970, DOI 10.1007/978-3-319-54398-7, Springer International Publishing: Basel, 2017.
- /GUM 16/ Gumpendobler, M.: Was ist eigentlich Gaschromatografie (GC)? - Chem-Page.de. erreichbar unter <https://www.chem-page.de/publikationen/gaschromatographie.html>, abgerufen am 26. November 2018.
- /GUN 97/ Gunn, P. J. (Hrsg.): Thematic issue: Airborne magnetic and radiometric surveys. Bd. 1997, Australian Geological Survey Organisation, 1997.
- /HAK 06/ Hakala, M.: Quality Control for Overcoring Stress Measurement Data. Hrsg.: Posiva Oy, 2006-03, 115 S., 2006.
- /HAR 13/ Hartley, L., Roberts, D.: Summary of discrete fracture network modelling as applied to hydrogeology of the Forsmark and Laxemar sites. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Report, R-12-04, April 2013.

- /HAT 91/ Hatzsch, P.: Tiefbohrtechnik. 119 S., ISBN 3432995113, Enke: Stuttgart, 1991.
- /HEI 90/ Heinrichs, H., Herrmann, A. G.: Praktikum der Analytischen Geochemie. 669 S., ISBN 978-3-642-61286-2, Springer Berlin Heidelberg: Berlin Heidelberg, 1990.
- /HEI 17/ Heipke, C. (Hrsg.): Photogrammetrie und Fernerkundung, Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel. Springer Reference Naturwissenschaften, 272 S., ISBN 9783662470930, DOI 10.1007/978-3-662-47094-7, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, s.l., 2017.
- /HEN 17/ Henniges, J., Götz, J., Jousset, P., Lüth, S., Reinsch, T.: New Methods in Geophysical Exploration and Monitoring with DTS and DAS. In: EAGE/DGG (Hrsg.): Workshop 2017. EAGE/DGG Workshop 2017, Potsdam, Germany, Proceedings, DOI 10.3997/2214-4609.201700156, EAGE Publications BVNetherlands, 2017.
- /HER 06/ Herbert, H.-J., Moog, H. C., Meyer, L., Reichelt, C.: Modellentwicklung zur Quellung hochkompaktierter Bentonite, Bentonite im Kontakt mit Lösungen unterschiedlicher Salinität im Temperaturbereich von 25 - 120°C. GRS-211, 103 S., ISBN 3-931995-78-X, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2006.
- /HUR 94/ Hurtig, E., Großwig, S., Jobmann, M., Kühn, K., Marschall, P.: Fibre-optic temperature measurements in shallow boreholes, Experimental application for fluid logging. Geothermics, Bd. 23, Nr. 4, S. 355–364, DOI 10.1016/0375-6505(94)90030-2, 1994.
- /IAEA 86/ International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.): Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes, Proceedings of an International Symposium on the Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes. Hannover, 3. - 7. März 1986, Proceedings Series, 748 S., ISBN 92-0-020286-1, International Atomic Agency: Vienna, 1986.

- /IAEA 03/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA TECDOC Series, Bd. 1363, 179 S., ISBN 92-0-108303-3, 2003.
- /IAEA 06/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste. International Atomic Energy Agency (IAEA), Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), IAEA Safety Standards Series, Safety Requirements No. WS-R-4, ISBN 92-0-105705-9: Vienna, 2006.
- /IAEA 11a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series, Specific Safety Guide No. SSG-14, 124 S., ISBN 978-92-0-111510-2: Vienna, 2011.
- /IAEA 11b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Disposal of Radioactive Waste. IAEA Specific Safety Requirements, SSR-5, 62 S., ISBN 978-92-0-103010-8: Vienna, 2011.
- /IODP 18/ IODP: International Ocean Discovery Program. erreichbar unter <http://www.iodp.org/>, abgerufen am 6. November 2018.
- /JAH 16/ Jahn, S., Mrugalla, S., Stark, L.: Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT), Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis, Ergebnisbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 146 S.: Hannover, 8. Januar 2016.
- /JOH 02/ Johnson, L., Schneider, J., Zuidema, P., Gribi, P., Mayer, G., Smith, P.: Project Opalinus Clay - Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and longlived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-05, 360 S.: Wettingen, 1. Dezember 2002.
- /JOS 12/ Josh, M., Esteban, L., Delle Piane, C., Sarout, J., Dewhurst, D. N., Clennell, M. B.: Laboratory characterisation of shale properties. Journal of Petroleum Science and Engineering, 88-89, S. 107–124, DOI 10.1016/j.petrol.2012.01.023, 2012.

- /KAR 07/ Karasaki, K., Apps, J., Doughty, C., Gwatney, H., Onishi, C. T., Trautz, R., Tsang, C.-F.: Feature Detection, Characterization and Confirmation Methodology, Final Report. 379 S., DOI 10.2172/945944, 2007.
- /KEA 02/ Kearey, P., Brooks, M., Hill, I.: An introduction to geophysical exploration, 3rd Edition. ISBN 0-632-04929-4, Blackwell Publishing Ltd: London, 2002.
- /KEM 93/ Kemski, J.: Radonmessungen in der Bodenluft zur Lokalisierung von Störungen im Neuwieder Becken (Mittelrhein). Bonner geowiss. Schr., Nr. 8, S. 144, 1993.
- /KEM 12/ Kemna, A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L., Williams, K. H., Orozco, A. F., Haegel, F.-H., Hördt, A., Kruschwitz, S., Leroux, V., Titov, K., Zimmermann, E.: An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. Near Surface Geophysics, Bd. 10, Nr. 1957, DOI 10.3997/1873-0604.2012027, 2012.
- /KLI 84/ Klingelé, E., Schwendener, H.: Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Gravimetrische Messungen. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), 81/82: Baden, Schweiz, 1984.
- /KLO 94/ Klosa, D.: Eine rechnergestützte Methode zur Bestimmung des Gesamtkarbonatgehaltes in Sedimenten und Böden. Zeitschrift für Angewandte Geologie, Bd. 40, Nr. 1, S. 18–21, 1994.
- /KNO 10/ Knoll, G. F.: Radiation detection and measurement. 4. Aufl., 830 S., ISBN 9780470131480, Wiley: Hoboken, NJ, 2010.
- /KNÖ 05/ Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. (Hrsg.): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 3, Geophysik. 2. Aufl., 1102 S., ISBN 978-3-540-22275-0, Springer: Berlin, 2005.
- /KOC 03/ Kock, I.: Auswertung und Interpretation von Bohrloch- und Kernmessungen der ODP - Bohrung 1203A zur petrophysikalischen Charakterisierung von

vulkanischen Gesteinen des Detroit Seamounts (Hawaiian-Emperor Seamount-Chain). Diplomarbeit, Angewandte Geophysik, RWTH Aachen: Aachen, 2003.

- /KOC 07/ Kock, I.: Deformation and micromechanics of granular materials in shear zones - investigated with the Discrete Element Method. Dissertation, Universität Bremen: Bremen, 2007.
- /KOL 18/ Koliji, A.: Geotechdata.info - Free database of geotechnical information. 1 S., Stand vom 9. März 2018, erreichbar unter <http://www.geotechdata.info/>, abgerufen am 15. November 2018.
- /KUM 02/ Kumar, S., Moore, K. B.: The Evolution of Global Positioning System (GPS) Technology. Journal of Science Education and Technology, Bd. 11, Nr. 1, S. 59–80, DOI 10.1023/A:1013999415003, 1. März 2002.
- /LAB 08/ Labat, S., Marivoet, J., Wemaere, I., Maes, T.: Essen-1 borehole of the hydro/05neb campaign, Technical aspects and hydrogeological investigations. SCK CEN, ISBN 1782-2335, 2008.
- /LAN 06/ Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen (Tiefbohrverordnung - BVOT -), zuletzt geändert 20. September 2006.
- /LAR 10/ Larue, P.-J., Kock, I., Seher, H.: Projekt VerSi: Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes, Teil 1: Randbedingungen und Anforderungen an einen Tonsteinstandort. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3535/1, 2010.
- /LAT 05/ Lathi, M., Heikinen, E.: Geophysical Borehole logging and Optical Imaging of the Pilot Hole ONK-PH2. Hrsg.: Posiva Oy, Working Report, 2005-4, 70 S., 2005.
- /LBEG 17/ Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG): Symbolschlüssel Geologie, Symbole für die Dokumentation geologischer Feld- und Aufschlussdaten, pdf-Dokument. 4. Aufl., 250 S., ISBN 978-3-510-96851-0: Hannover, Juli 2017.

- /LEI 18/ Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG): Fachinformationssystem Geophysik, Fachportal für geophysikalische Daten. erreichbar unter <https://www.fis-geophysik.de/>, abgerufen am 29. August 2018.
- /LFU 13/ Herrmann, R., Ohlendorf, F.: Radioaktive Stoffe bei Baumaßnahmen, Grundsätze für die Antragstellung beim Umgang mit radioaktiven Stoffen bei Baumaßnahmen. Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Schriftenreihe des LfULG Sachsen, 13/2013, 150 S.: Dresden, 2013.
- /LGLN 18/ Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN): Gebühren für DGM auf Datenträger. Stand vom 15. Januar 2018, erreichbar unter http://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/geodaten_karten/3dgeobasisdaten/dgm/gebuehren-fuer-dgm-daten-51674.html, abgerufen am 7. September 2018.
- /LIE 14/ Liebscher, A., Henniges, J., Lueth, S., Martens, S., Moeller, F., Prevedel, B., Schmidt-Hattenberger, C.: Intelligente Bohrungen zur Exploration, Standortcharakterisierung und Speicherüberwachung. 6 S., DOI 10.2312/GFZ.SYSERDE.04.01.6, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), 2014.
- /LIL 15/ Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W.: Remote sensing and image interpretation. 720 S., ISBN 978-1-118-34328-9, Wiley & Sons: USA, 2015.
- /LIN 96/ Lindsay, S.: Einführung in die HPLC. 265 S., ISBN 978-3-642-64745-1, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 1996.
- /LIU 17/ Liu, H.: Principles and Applications of Well Logging. Springer Geophysics, 2. Aufl., 356 S., ISBN 9783662549773, 2017.
- /LUM 18/ Lumitos GmbH: chemie.de - Das Chemie Fachportal vom Labor bis zum Prozess. erreichbar unter <http://www.chemie.de/>, abgerufen am 26. November 2018.

- /MAN 11/ Manthei, G., Philipp, J., Eisenblätter, J.: Acoustic Emission Measurements in Rock Structures and on Rock Specimens. In: Deutsche Geophysikalischen Gesellschaft e.V. (Hrsg.): DGG Kolloquium Induzierte Seismizität, 71. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft. DGG Kolloquium, Köln, 23. Februar 2011, S. 19–38, 2011.
- /MAR 07/ Marache, A., Riss, J., Denis, A., Yven, B., Trouiller, A.: Identification of homogeneous zones from well logging measurements by statistical tools. In: Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) (Hrsg.): Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement. Lille, 17. - 20. September 2007, S. 39–40: Lille, 2007.
- /MAR 15/ Markl, G., Marks, M.: Minerale und Gesteine, Mineralogie - Petrologie - Geochemie. 3. Aufl., 547 S., ISBN 9783662446270, DOI 10.1007/978-3-662-44628-7, Springer Spektrum: Berlin, 2015.
- /MCC 15/ McCann, T., Valdivia Manchego, M.: Geologie im Gelände, Das Outdoor-Handbuch. ISBN 978-3-8274-2383-2, DOI 10.1007/978-3-8274-2383-2_5, Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- /MCE 00/ McEwen, T., Äikäs, T.: The site selection process for a spent fuel repository in Finland—Summary report. 2000-15, ISBN 951-652-101-0, Posiva Oy: Helsinki, Finland, 2000.
- /MCP 15/ McPhee, C., Reed, J., Zubizarreta, I.: Core analysis, A best practice guide. Developments in petroleum science, volume 64, 829 S., ISBN 9780444636577, Elsevier: Amsterdam, 2015.
- /MEI 18/ Meixner, J., Grimmer, J. C., Becker, A., Schill, E., Kohl, T.: Comparison of different digital elevation models and satellite imagery for lineament analysis, Implications for identification and spatial arrangement of fault zones in crystalline basement rocks of the southern Black Forest (Germany). Journal of Structural Geology, Bd. 108, S. 256–268, DOI 10.1016/j.jsg.2017.11.006, 2018.

- /MIK 02/ Miksova, J., Barnet, I.: Geological support to the National Radon Programme (Czech Republic). Bulletin of the Czech Geological Survey, Bd. 2002, Vol. 77, No. 1, S. 13–22, 2002.
- /MLI 18/ my-lab international: Laboranalysen - Methoden, Messtechniken und Verfahren in der Analytik. erreichbar unter <https://my-lab.com/laboranalysen-methoden-messtechniken-verfahren-analytik/>, abgerufen am 26. November 2018.
- /MŁY 13/ Młynarczuk, M., Górszczyk, A., Ślipek, B.: The application of pattern recognition in the automatic classification of microscopic rock images. Computers and Geosciences, Bd. 60, S. 126–133, DOI 10.1016/j.cageo.2013.07.015, 2013.
- /MOS 13/ Moser, D.: Charakterisierung von Schädigungen in Gesteinen bei Impaktprozessen mit zerstörungsfreier Prüfung. Dissertation, Technischen Universität München: München, 2013.
- /MUE 89/ Muecke, A.: Anleitung zur Erzmikroskopie, Mit einer Einführung in die Erzpetrographie. 187 S., ISBN 3432978618, F. Enke: Stuttgart, 1989.
- /MUN 03/ Munier, R., Stenberg, L., Stanfors, R., Milnes, A. G., Hermanson, J., Triumpf, C.-A.: Geological Site Descriptive Model, A strategy for the model development during site investigations. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-03-07, 113 S., 2003.
- /NAG 85/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Projekt GEWÄHR 1985, Endlager für hochaktive Abfälle, Das System der Sicherheitsbarrieren. Projektberichte GEWÄHR, NGB 85-04, 345 S.: Baden, Januar 1985.
- /NAG 01/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht. Technischer Bericht, 00-01, 328 S.: Wettingen, August 2001.
- /NAG 14/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Standortareal ZNO-6b-Kombi im Planungssperimeter Zürich Nordost für die

Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers Kombi, Planungsstudie, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-29, 97 S.: Wettingen, Schweiz, Mai 2014.

- /NAG 18/ NAGRA: tiefbohrungen für erdwissenschaftliche untersuchungen. Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Themenheft, Nr. 11, 2018.
- /NDA 11/ NDA Nuclear Decommissioning Agency: Geological Disposal, Site characterisation for a geological disposal facility, Status Report: March 2010. NDA Report, NDA/RWMD/057, 217 S., März 2011.
- /NDA 16/ NDA Nuclear Decommissioning Agency: Geological Disposal, Science and Technology Programme. NDA Report, NDA/RWM/112, 128 S., Mai 2016.
- /NEL 14/ Nelson, P. H., Kibler, J. E.: Petrophysical Properties, Mineralogy, Fractures, and Flow Tests in 25 Deep Boreholes at Yucca Mountain, Nevada. Hrsg.: USGS, 2014-1023, 25 S., 2014.
- /NIR 97/ Nirex Limited: Sellafield Geological and Hydrogeological Investigations: The Geological Structure of the Sellafield Site. Hrsg.: United Kingdom Nirex Limited, S/97/007: United Kingdom, 1997.
- /NUC 13/ Nuclear Waste Management Organization (NWMO): Preliminary Assessment for Siting a Deep Geological Repository for Canada's Nuclear Fuel, Findings from Phase One Studies. 157 S., 2013.
- /NUMO 04a/Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) (Hrsg.): Evaluating Site Suitability for a HLW Repository, Scientific Background and Practical Application of NUMO's Siting Factors. NUMO-TR-04-04, 74 S.: Tokyo, August 2004.
- /NUMO 04b/Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO): Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments. NUMO-TR-04-03, 88 S., 2004.

- /NUMO 13/ Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO): Safety of the Geological Disposal Project 2010, Safe Geological Disposal Based on Reliable Technologies. NUMO-TR-13-05, 148 S., 2013.
- /NUMO 16/ Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO): The Underground Investigation Facility (UIF) concept in NUMO's program. TR-15-02, 58 S., 2016.
- /NWMO 16a/ Nuclear Waste Management Organization (NWMO): Preliminary Assessment of potential Suitability, Initial Borehole Drilling and Testing in Central Huron, Huron-Kinloss and South Bruce, Draft for discussion with communities. 2016.
- /NWMO 16b/ Nuclear Waste Management Organization (NWMO): Preliminary Assessment of potential Suitability, Initial Borehole Drilling and Testing in or Near Ignace, Draft for discussion with communities. 2016.
- /OLE 02/ O'Leary, D. W., Mankinen, E. A., Blakely, R. J., Langenheim, V. E., Ponce, D. A.: Aeromagnetic Expression of Buried Basaltic Volcanoes Near Yucca Mountain, Nevada. U.S. Geological Survey (USGS), U.S. Department of Energy (DOE), 2002-020: Nevada, 2002.
- /OTA 11/ Ota, K., Abe, Hironobu, Kunimaru, T.: Horonobe Underground Research Laboratory Project, Synthesis of Phase I Investigations 2001-2005, Volume "Geoscientific ERsearch". Hrsg.: Japan Atomic Energy Agency, 364 S., 2011.
- /PEP 18/ Pepe, A.: Synthetic Aperture Radar (SAR) Technology: New Perspectives Offered by New-Generation and Forthcoming SAR Sensors, Special Issue. Sensors, in Bearbeitung, in Bearbeitung, 2018.
- /POS 99/ Posiva Oy: The final disposal facility for spent nuclear fuel, Environmental impact assessment report. 232 S.: Helsinki, Finland, 1999.
- /POS 12/ Posiva Oy: Olkiluoto Site Description 2011. 1030 S., ISBN 978-951-652-179-7, 2012.

- /PÖS 08/ Pöschl, S.: Diagramm mit Kornverteilungsgraphen verschiedener Bodenarten. erreichbar unter <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kornverteilung.svg>, Stand von 2008.
- /PRE 99/ Prensky, S. E.: Advances in borehole imaging technology and applications. Geological Society, London, Special Publications, Bd. 159, Nr. 1, S. 1–43, DOI 10.1144/GSL.SP.1999.159.01.01, 1999.
- /PRI 18/ Prinz, H., Strauß, R.: Ingenieurgeologie. ISBN 9783662547106, Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- /PRO 14/ Prost, G. L.: Remote sensing for geoscientists, Image analysis and integration. 652 S., ISBN 9781466561748, CRC Press: Boca Raton, Florida, 2014.
- /RAI 11/ Raith, M. M., Raase, P., Reinhardt, J.: Leitfaden zur Dünnschliffmikroskopie. 2011.
- /RAS 06/ Rasilainen, K. (E.): The Finnish Research Programme on Nuclear Waste Management (KYT) 2002-2005, Final Report. Hrsg.: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, VTT Energy, POSIVA, VTT Research Notes, Nr. 2337, 295 S., DOI 10.2172/1007978: Espoo, Finland, 2006.
- /RAU 05/ Rautio, T.: Core Drilling of Deep Borehole OL-KR34 at Olkiluoto in Eurajoki 2005. Working Report, 2005-36, 87 S., 2005.
- /REI 15/ Reich, M.: Auf Jagd im Untergrund, Mit Hightech auf der Suche nach Öl, Gas und Erdwärme. ISBN 978-3-662-46281-2, Springer, 2015.
- /REM 77/ Remane, H.: Massenspektrometrie in der organischen Chemie. 185 S., ISBN 978-3-528-06838-7, Vieweg und Teubner Verlag, 1977.
- /REU 12/ Reuter, R.: SEOS - Earsel's project on science education through earth observation for high schools / SEOS - Projeto EARSeL de educação científica para escolas de ensino médio, através de conhecimentos de observação da terra. Revista Ambiente, Bd. 8, Especial, S. 583–590, DOI 10.5777/ambiente.2012.04.01rc, 2012.

- /REY 11/ Reynolds, J.: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. ISBN 978-0-471-48535-3, Wiley-Blackwell, 2011.
- /ROB 89/ Robbins, S. L.: Borehole Gravimeter Reviews. Hrsg.: USGS, U.S. Geological Survey Circular, Nr. 890, 65 S.: Washington, DC, USA, 1989.
- /RUN 13/ Runge, B. U.: Physikalisches Anfängerpraktikum. Universität Konstanz - Fachbereich Physik: Konstanz, 2013.
- /RWM 16/ Radioactive Waste Management Limited: RWM Technical Note - Geological Disposal: National Geological Screening - Detailed Technical Instructions and Protocols. Hrsg.: Nuclear Decommissioning Authority (NDA), Technical Note no., Nr. 24600903, 143 S., 2016.
- /SAN 18/ Sandeep vats: Autograv CG 5, By User:Sandeep vats [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)], from Wikimedia Commons. erreichbar unter https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/31/Autograv_CG5_P1150838.JPG, abgerufen am 10. September 2018.
- /SCH 82/ Schneider, R., Roseboom E.H. Jr., Robertson, J.B., Stevens, P.R.: U.S: Geological Survey Research in Radioactive Waste Disposal - Fiscal Year 1979. Geological Survey Circular 847, 82 S., 1982.
- /SCH 83/ Schön, J.: Petrophysik, Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen ; 70 Tabellen. 405 S., ISBN 3432929714, Enke: Stuttgart, 1983.
- /SCH 99/ Schlemmer, G.: Analytical Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry, A Laboratory Guide. 286 S., ISBN 978-3-0348-7576-9, Birkhäuser Verlag Basel Switzerland: Basel, 1999.
- /SCH 04a/ Schodlok, M. C.: Quantitative Analysen magmatischer Gesteine mittels reflexionsspektroskopischer Infrarot-Messungen. Dissertation, Universität Potsdam: Potsdam, 2004.

- /SCH 04b/ Schön, J. H., Helbig, K., Treitel, S.: Physical properties of rocks, Fundamentals and principles of petrophysics. Handbook of geophysical exploration Seismic exploration, / ed.: Klaus Helbig and Sven Treitel ; Vol. 18, 1. Aufl., 583 S., ISBN 0080410081, Elsevier: Amsterdam, 2004.
- /SCH 11/ Schaumann, G., Günther, T., Grinat, M., Meyer, R.: Tiefe Erkundung des Leinetal-Störungssystems mit geoelektrischen und elektromagnetischen Messungen, Proceedings of the 24th Schmucker-Weidelt-Kolloquium, Neustadt an der Weinstrae, Germany, September 19-23, 2011. In: Börner, R.-U., Schwalenberg, K. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Schmucker-Weidelt-Kolloquium, Neustadt an der Weinstrasse, 19.-23. September 2011. S. 225–232, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft: Potsdam, 2011.
- /SCH 16/ Schlumberger: The Defining Series: Mud Logging. Oilfield Review, 2016.
- /SCH 17/ Schlumberger: The Defining Series Downhole Coring. Oilfield Review,, Bd. 27, erreichbar unter https://www.slb.com/-/media/Files/resources/oilfield_review/defining_series/Defining-Coring.pdf, abgerufen am 17. Oktober 2018.
- /SCH 18a/ Schlumberger: Borehole gravity meter. Oilfield Glossary, erreichbar unter https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/b/borehole_gravity_meter.aspx, Stand von 2018.
- /SCH 18b/ Schorn, S.: Mineralienatlas - Fossilienatlas. Stand vom 26. November 2018, erreichbar unter <https://www.mineralienatlas.de/index.php>, abgerufen am 26. November 2018.
- /SEB 14/ Sebastian, U.: Gesteinskunde, Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender. 3. Aufl., ISBN 9783642417573, 2014.
- /SGD 15/ Staatliche Geologische Dienste (SGD) (Hrsg.): Ergebnisse des Methoden- und Messgerätevergleichs „Wärmeleitfähigkeitsmessungen“ der Staatlichen Geologischen Dienste, Informationen aus den Bund/Länderarbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste. 149 S.: Hof, Januar 2015.

- /SGD 18a/ Staatliche Geologische Dienste (SGD) (Hrsg.): Infogeo - Kartenserver / Webdienste. erreichbar unter https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/Home/Kartenserver/kartenserver_node.html, abgerufen am 29. November 2018.
- /SGD 18b/ Staatliche Geologische Dienste (SGD) (Hrsg.): Geologische Kartieranleitung, AG Geologie. erreichbar unter <https://portale.wisutec.de/gka/Ziele>, abgerufen am 26. November 2018.
- /SIE 96/ Siehl, A.: Umweltradioaktivität. Geologie und Ökologie im Kontext, 411 S., ISBN 3433018138, 1996.
- /SIE 15/ Siegmund, A., Kollar, I., Siegmund, A.: Einführung in die Fernerkundung. EU, Stand vom 12. März 2015, erreichbar unter <http://www.seos-project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c00-p01.de.html>, abgerufen am 4. Juli 2018.
- /SKB 00/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository. SKB Technical Report, TR-00-20, 115 S., 2000.
- /SLO 10/ Slob, E., Sato, M., Olhoeft, G.: Surface and borehole ground-penetrating-radar developments. GEOPHYSICS, Bd. 75, Nr. 5, S. 75A103–75A120, DOI 10.1190/1.3480619, 2010.
- /SMI 15/ Smith, M. B., Montgomery, C. T.: Hydraulic fracturing. Emerging trends and technologies in petroleum engineering, ISBN 9781466566859, CRC Press Taylor & Francis Group: Boca Raton, 2015.
- /ŠOB 12/ Šobr, M.: oedometer - a device for measuring the uniaxial compressibility of soil. erreichbar unter , Stand von 2012.
- /SOU 07/ Soupios, P., Papadopoulos, N., Papadopoulos, I., Kouli, M., Vallianatos, F., Sarris, A., Manios, T.: Application of integrated methods in mapping waste disposal areas. Environmental Geology, Bd. 53, Nr. 3, S. 661–675, 2007.

- /SPE 00a/ Spektrum Verlag: Polarisationsmikroskopie. Lexikon der Geowissenschaften, erreichbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/polarisationsmikroskopie/12484>, abgerufen am 26. November 2018.
- /SPE 00b/ Spektrum Verlag: Erzmikroskopie. Lexikon der Geowissenschaften, erreichbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/erzmikroskopie/4355>, abgerufen am 26. November 2018.
- /SPE 00c/ Spektrum Verlag: Lexikon der Geowissenschaften. erreichbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/>, abgerufen am 27. November 2018.
- /SPE 00d/ Spektrum Verlag: Gammy-Ray-Log. Lexikon der Geowissenschaften, erreichbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/gamma-ray-log/5368>, abgerufen am 23. November 2018.
- /SPE 14/ Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: Atomabsorptionsspektrometrie. Stand vom 4. Dezember 2014, erreichbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/atomabsorptionsspektrometrie/785>, abgerufen am 26. November 2018.
- /SPE 18a/ Society of Petroleum Engineers (SPE): Mud logging. erreichbar unter https://petrowiki.org/Mud_logging, abgerufen am 29. Oktober 2018.
- /SPE 18b/ Society of Petroleum Engineers (SPE): Downhole magnetic surveys. erreichbar unter https://petrowiki.org/Downhole_magnetic_surveys, abgerufen am 6. November 2018.
- /SPE 18c/ Society of Petroleum Engineers (SPE): PetroWiki. erreichbar unter <https://petrowiki.org/PetroWiki>, abgerufen am 7. November 2018.
- /SPI 09/ Spiess, L., Spiess, L., Behnken, H., Genzel, C., Schwarzer, R., Teichert, G.: Moderne Röntgenbeugung, Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker. Vieweg Studium, 2. Aufl., 564 S., ISBN 9783835101661, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden: Wiesbaden, 2009.

- /STA 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 26, S. 1074-1100), zuletzt geändert 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808–2838).
- /STE 12/ Stephansson, O., Zang, A.: ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation—Part 5, Establishing a Model for the In Situ Stress at a Given Site. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Bd. 45, Nr. 6, S. 955–969, DOI 10.1007/s00603-012-0270-x, 2012.
- /TAM 04/ Tam, V. T., Smedt, F. de, Batelaan, O., Dassargues, A.: Study on the relationship between lineaments and borehole specific capacity in a fractured and karstified limestone area in Vietnam. *Hydrogeology Journal*, Bd. 12, Nr. 6, S. 662–673, DOI 10.1007/s10040-004-0329-1, 2004.
- /THU 94/ Thury, M., Gautschi, A., Mazurek, M., Müller, W. H., Naef, H., Pearson, F. J., Vomvoris, S., Wilson, W.: *Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland, Synthesis of Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme*. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technical Report, 93-01, 471 S., 1994.
- /TIA 16/ Tiab, D., Donaldson, E. C.: *Petrophysics, Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. 4. Aufl., 894 S., ISBN 9780128031889, Elsevier/GPP Gulf Professional Publ: Amsterdam, 2016.
- /TIL 84/ Tillerson, J. R., Nimick, F. B.: *Geoengineering Properties of Potential Repository Units at Yucca Mountain, Southern Nevada*. Hrsg.: SANDIA National Laboratories (SNL), SANDIA Report, SAND84-0221, 121 S., 1984.
- /TOM 95/ Tomsons, D. K., Lodha, G. S., Street, P. J., Auger, J. L. F.: *Bouguer gravity anomaly map and geophysical interpretation of the geometry of the Lac du Bonnet Batholith, Whiteshell Research Area, Southeastern Manitoba*. Atomic Energy of Canada Limited, TR-00633, 1995.
- /TOR 18/ Toro, F. G., Tsourdos, A.: *UAV or Drones for Remote Sensing Applications*, Special Issue. *Sensors*, Bd. 17,18, 2018.

- /USGS 83/ U.S. Geological Survey (USGS): Kaolinite - USGS bws00008.jpg - Wikimedia Commons Credit: U.S. Geological Survey Department of the Interior/USGS U.S. Geological Survey/photo by unkown, Kaolinite fills pore spaces created by dissolution and (or) replacement of framework grains, in sandstone from the Nanushuk Group. Books of Hexagonal kaolinite crystals growing in pore space. Sample 78ACh41, Marmot syncline; magnification, X1340, SEM. Central North Slope, Alaska. Published as Figure 44C in U.S. Geological Survey. Bulletin 1614. 1985. Stand vom 9. November 2018, erreichbar unter https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kaolinite_-_USGS_bws00008.jpg, abgerufen am 22. November 2018.
- /USGS 09/ U.S. Geological Survey (USGS): Massenspektrometer Wikimedia Commons Credit: U.S. Geological Survey Department of the Interior/USGS U.S. Geological Survey/photo by Devon Fyson, geändert von Cepheiden. Stand vom 7. Oktober 2013, erreichbar unter https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Mass_Spectrometer_Schematic_DE.svg, abgerufen am 26. November 2018.
- /VAN 13/ van Zeyl, D. P., Penner, L. A.: Phase 1 Desktop geoscientific Preliminary Assessment, Terrain and Remote Sensing Study, Township of Ignace, Ontario. Nuclear Waste Management Organization (NWMO), APM-REP-06144-0012, 86 S.: Toronto, Ontario, Kanada, 2013.
- /VAN 14/ Vandenberghe, N., Craen, M. de, Wouters, L.: The Boom Clay Geology From sedimentation to present-day occurrence A review. Hrsg.: KONINKLIJK BELGISCH INSTITUUT VOOR NATUURWETENSCHAPPEN, 60-2014, 78 S., 2014.
- /VIN 11/ Roland Vinx: Gesteinsbestimmung im Gelände. 3. Aufl., ISBN 978-3-8274-2748-9, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2011.
- /VOZ 93/ Vozoff, K.: 8. The Magnetotelluric Method. In: Nabighian, M. N. (Hrsg.): Electromagnetic methods in applied geophysics. Investigations in geophysics, Nr. 3, Vol. 2, S. 641–712, ISBN 978-1-56080-022-4, DOI 10.1190/1.9781560802686.ch8, Soc. of Exploration Geophysicists: Tulsa, Okla., 1993.

- /WAL 05/ Wall, H. de: Die Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität - eine Methode zur Gefügeanalyse. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 155, 2-4, S. 287–298, DOI 10.1127/zdgg/155/2005/287, 2005.
- /WER 06/ Werner, K., Lundholm, L., Johansson, P.-O.: Forsmark site investigation - Supplementary drilling and soil sampling, and installation of groundwater monitoring wells, pumping wells and BAT filter tips. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), P-06-89, 57 S., 2006.
- /WHI 18/ White, W. M.: Encyclopedia of Geochemistry, A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth, Encyclopedia of Earth Sciences Series. 1557 S., ISBN 978-3-319-39313-1, Springer, 2018.
- /WOL 03/ Wolfgang, T.: Geodäsie. 2. Aufl., ISBN 3-11-017545-2, De Gruyter Lehrbuch: Berlin, 2003.

12 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 4.1	Prinzip der satellitengestützten Fernerkundung mit a) passiven oder b) aktiven Sensoren, geändert nach /ARK 18/	41
Abb. 4.2	Beispiel eines digitalen Geländemodells (DGM) von /BEZ 18/. Ein markanter Höhenzug (von Südosten in die Bildmitte hineinragend) wird durch ein Störungssystem unterbrochen und setzt sich dann fort (in Richtung Nordwest).	46
Abb. 4.3	Foto eines tragbaren Gravimeters (nach /SAN 18/)	62
Abb. 6.1	Beispiel einer Rasterelektronenmikroskop (REM - Aufnahme eines Tones mit dem Tonmineral Kaolinit (nach /USGS 83/, genauer Maßstab unbekannt). Jedes einzelne Plättchen ist ein Kaolin-Mineral.....	140
Abb. 6.2	Körnungs- bzw. Sieblinien verschiedener Bodenarten /PÖS 08/...	151
Abb. 6.3	Ein Rückprallhammer (nach /ARJ 13/)	155
Abb. 6.4	Drei Ödometer auf einer Trägervorrichtung (nach /ŠOB 12/)	156
Abb. 6.5	Beispiel eines triaxialen Versuchsstands	157
Abb. 6.6	Aufbau der GRS-Quelldruckmesszelle, aus /HER 06/.....	160
Abb. 6.7	Prinzipieller Aufbau eines Gaschromatographen	180
Abb. 6.8	Prinzipieller Aufbau eines Sektorfeld-Massenspektrometers /USGS 09/	181
Abb. 6.9	Prinzipaufbau eines ICP-MS.....	183
Abb. 6.10	Prinzipaufbau eines Flammen-AAS	185
Abb. 6.11	Kohlenwasserstoff-Fraktionierungsschema bei der Rock-Eval-Pyrolyse.....	186

13 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Zusammenstellung von Messmethoden zur übertägigen Erkundung	17
Tab. 4.1	Weiterführende Informationen zu geologischen Kartierungen	37
Tab. 4.2	Weiterführende Informationen zur Fernerkundung.....	48
Tab. 4.3	Weiterführende Informationen zur Seismik	58
Tab. 4.4	Weiterführende Informationen zur Gravimetrie	66
Tab. 4.5	Weiterführende Informationen zur Geomagnetik.....	72
Tab. 4.6	Weiterführende Informationen zur Geoelektrik.....	80
Tab. 4.7	Weiterführende Informationen zur Elektromagnetik	88
Tab. 4.8	Weiterführende Informationen zur Radiometrie.....	93
Tab. 5.1	Weiterführende Informationen zu Sondierungen	101
Tab. 5.2	Weiterführende Informationen zu Tiefbohrungen	110
Tab. 5.3	Gegenüberstellung von Bohrlochmessungen und -tests und zu gewinnender Erkenntnis	113
Tab. 5.4	Eindringtiefe und ihre Einflussgrößen auf die Messmethoden.....	130
Tab. 5.5	Weiterführende Informationen zu Bohrlochmessungen und -tests	133
Tab. 6.1	Gegenüberstellung von petrografischen Messverfahren und potenziell zu gewinnender Erkenntnis.....	137
Tab. 6.2	Weiterführende Informationen zu Petrografie im Labor	146
Tab. 6.3	Gegenüberstellung von boden- und felsmechanischen Messverfahren und potenziell zu gewinnender Erkenntnis.....	149
Tab. 6.4	Weiterführende Informationen zu Boden- und Felsmechanik im Labor	164
Tab. 6.5	Gegenüberstellung von petrophysikalischen Messverfahren und potenziell zu gewinnender Erkenntnis.....	166
Tab. 6.6	Weiterführende Informationen zu Petrophysik im Labor.....	176
Tab. 6.7	Gegenüberstellung von geochemischen Messverfahren und potenziell zu gewinnender Erkenntnis.....	178

Tab. 6.8	Weiterführende Informationen zu Geochemie im Labor	188
Tab. 7.1	Messgrößen abgeleitet aus § 22 StandAG („Ausschlusskriterien“)	195
Tab. 7.2	Messgrößen abgeleitet aus § 23 StandAG („Mindestanforderungen“)	196
Tab. 7.3	Messgrößen aus Anlage 2 des StandAG zu § 24.....	199
Tab. 7.4	Messgrößen aus Anlage 3 des StandAG zu § 24.....	203
Tab. 7.5	Messgrößen aus Anlage 4 des StandAG zu § 24.....	206
Tab. 7.6	Messgrößen aus Anlage 5 des StandAG zu § 24.....	209
Tab. 7.7	Messgrößen aus Anlage 6 des StandAG zu § 24.....	212
Tab. 7.8	Messgrößen aus Anlage 8 des StandAG zu § 24.....	213
Tab. 7.9	Messgrößen aus Anlage 11 des StandAG zu § 24.....	217
Tab. 7.10	Gesamteinschätzung der Messmethoden hinsichtlich der relevanten Messgrößen aus den Anlagen des StandAG, Teil 1: Flächenhaft .	221
Tab. 7.11	Gesamteinschätzung der Messmethoden hinsichtlich der relevanten Messgrößen aus den Anlagen des StandAG, Teil 2: Punktuell	222
Tab. 7.12	Gesamteinschätzung der Messmethoden hinsichtlich der relevanten Messgrößen aus den Anlagen des StandAG, Teil 3: Labor.....	223

