



BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren (übErStand)

Vorhaben 4717Fo1201

AUFTRAGNEHMER:IN

Brenk Systemplanung GmbH, Aachen

Kirsten Haneke (Brenk Systemplanung GmbH)

Bettina Starke (CDM Smith Consult GmbH)

Dr. Andreas Schuck (GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH)

Martin Goldsworthy

José B. Pateiro Fernández (Brenk Systemplanung GmbH)

Christoph Pieper (CDM Smith Consult GmbH)



Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren (übErStand)

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-008/21

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2021110329460

Berlin, November 2021

Impressum

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

BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Auftragnehmer:in
Brenk Systemplanung GmbH, Aachen

Kirsten Haneke (Brenk Systemplanung GmbH)
Bettina Starke (CDM Smith Consult GmbH)
Dr. Andreas Schuck (GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH)
Martin Goldsworthy
José B. Pateiro Fernández (Brenk Systemplanung GmbH)
Christoph Pieper (CDM Smith Consult GmbH)

030 184321-0
www.base.bund.de

Erscheinungsdatum: November 2021

Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren („übErStand“)

Endbericht

BS-Projekt-Nr. 1712-08
Vorhaben: 4717F01201

erstellt im Auftrag des

Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)
Krausenstr. 17-18
10117 Berlin

durch die

Brenk Systemplanung GmbH
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

Aachen, 04.12.2019

Anmerkung:

Dieser Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers (BS) wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (BfE) übereinstimmen.

AUTOREN

Dieser Bericht wurde von folgenden Bearbeitern erstellt:

- Kirsten Haneke, M.Sc. (Brenk Systemplanung GmbH)
- Dr.-Ing. Bettina Starke (CDM Smith Consult GmbH)
- Dr. Andreas Schuck (GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH)
- Martin Goldsworthy, M.Sc.
- Dr.-Ing. José B. Pateiro Fernández (Brenk Systemplanung GmbH)
- Dr.-Ing. Christoph Pieper (CDM Smith Consult GmbH)

Es wird versichert, dass dieser Bericht nach bestem Wissen und Gewissen, unparteiisch und ohne Ergebnisweisung angefertigt worden ist.

ERSTELLUNG, PRÜFUNG UND FREIGABE

erstellt	geprüft	freigegeben
Projektleiter	Geschäftsbereichsleiter	Geschäftsführung

INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

Kurzzusammenfassung	13
Abstract	13
1. Einleitung	14
1.1. Veranlassung	14
1.2. Untersuchungsumfang des Vorhabens	16
1.3. Vorgehensweise.....	19
2. Darstellung relevanter Kriterien und Anforderungen aus dem StandAG ..	21
2.1. Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG)	21
2.2. Mindestanforderungen (§ 23 StandAG)	23
2.3. Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 24 StandAG)	24
3. Relevante Messgrößen zu transportrelevanten Gesteinseigenschaften ...	36
3.1. Abstandsgeschwindigkeit.....	36
3.2. Gebirgsdurchlässigkeit.....	38
3.3. Effektiver Diffusionskoeffizient	40
3.4. Porosität des Gesteins	43
3.5. Verfestigungsgrad (Tongestein).....	45
3.6. Hydraulischer Gradient	45
3.7. Tortuosität	46
4. Relevante Messgrößen zur Hydrogeochemie.....	47
4.1. Haupt- und Spurenelemente des Fluides.....	47
4.2. pH-Wert des Fluides	49
4.3. E _h -Wert des Fluides.....	50
4.4. Gehalt Kolloide und Komplexbildner im Fluid.....	51
4.5. Karbonatgehalt.....	52
4.6. Isotopenzusammensetzung der tiefen Grundwässer	52
4.7. Viskosität des Fluides (dynamisch, kinematisch)	53
4.8. Dichte des Fluides.....	54
4.9. Ionenstärke	55
4.10. Elektrische Leitfähigkeit/Salinität.....	56
4.11. Sorptions- oder Verteilungskoeffizient (K_d -Wert) für Radionuklide.....	56
5. Messmethoden zur Bestimmung transportrelevanter Gesteinseigenschaften	59
5.1. Geohydraulische Messmethoden.....	60
5.2. Geophysikalische Messmethoden.....	95
5.3. Laboruntersuchungen	175

6. Messmethoden zur Hydrogeochemie	186
6.1. Messmethoden im Feld	187
6.2. Messmethoden im Labor	188
7. Gegenüberstellung und Vergleich geeigneter Messmethoden.....	202
7.1. Bewertung von Messmethoden zur Bestimmung transportrelevanter Gesteinseigenschaften.....	202
7.2. Bewertung von Messmethoden zur Bestimmung hydrogeochemischer Messgrößen	210
7.3. Erfahrungen aus der bisherigen und aktuellen Endlagerforschung.....	213
7.4. Eingeschränkte Erfassungsmöglichkeiten bei übertägiger Erkundung.....	216
8. Orientierungsrahmen für die übertägige Standorterkundung	220
8.1. Inhalte des Orientierungsrahmens	220
8.2. Anforderungen an die Dokumentation und Qualitätssicherung	222
8.3. Ableitung von Kriterien zur Beurteilung der Qualität und Quantität der Messwerte.....	229
8.4. Einflussfaktoren auf die Kriterien zur Auswahl geeigneter Messmethoden.....	231
8.5. Einflussfaktoren auf die Kriterien zur Auswahl der Messnetzdichten und zeitlichen Messintervalle	237
8.6. Notwendigkeit einer schrittweisen übertägigen Erkundung.....	239
9. Zusammenfassung	242
10. Literaturverzeichnis.....	245
Anhang	263

TABELLENVERZEICHNIS

Seite:

Tabelle 4-1:	Klassifikation von Salzlösungen aus Kali- und Steinsalzbergwerken (verändert nach Bohn (2013)).....	48
Tabelle 5-1:	Zusammenstellung geohydraulischer Messmethoden zur übertägigen Erkundung, verändert nach Appel & Habler (2001) und Brassler et al. (2008).....	61
Tabelle 5-2:	Zusammenstellung der erforderlichen Voraussetzungen für geohydraulische Bohrlochmethoden.	62
Tabelle 5-3:	Gegenüberstellung einzelner geophysikalischer Messmethoden und der wirksamen petrophysikalischen Messwerte (nach Schön (1996)).....	96
Tabelle 5-4:	Übersicht typischer oberflächengeophysikalischer Messmethoden für hydrologische und hydrogeologische Fragestellungen.	97
Tabelle 5-5:	Übersicht typischer geophysikalischer Bohrlochmessmethoden für hydrologische und hydrogeologische Fragestellungen.	135
Tabelle 5-6:	Anwendungsmöglichkeiten ausgewählter geophysikalischer Messmethoden in Bezug auf die Verrohrung und Bohrlochfüllung (+: Messung ohne Einschränkungen möglich, *: Messung mit Einschränkungen möglich, - : Messung nicht möglich).....	139
Tabelle 5-7:	Mittlerer zufälliger Fehler ausgewählter bohrlochgeophysikalischer Messwerte und der daraus abgeleiteten Messgrößen (nach Fricke und Schön (1999)).....	140
Tabelle 6-1:	Übersicht der wesentlichen Vor- und Nachteile gängiger Messmethoden der Spektroskopie und Spektrometrie.....	191
Tabelle 6-2:	Übersicht der wesentlichen Vor- und Nachteile gängiger Messmethoden der Chromatographie.....	194
Tabelle 7-1:	Geohydraulische Messmethoden: Zuordnung und Bewertung der Eignung zur Bestimmung relevanter Messgrößen.	206
Tabelle 7-2:	Geophysikalische Messmethoden: Zuordnung und Bewertung der Eignung zur Bestimmung relevanter Messgrößen.	207
Tabelle 7-3:	Bohrlochgeophysikalische Messmethoden: Zuordnung und Bewertung der Eignung zur Bestimmung relevanter Messgrößen.	208
Tabelle 7-4:	Laboruntersuchungen: Zuordnung und Bewertung der Eignung zur Bestimmung transportrelevanter Messgrößen.	209
Tabelle 7-5:	Hydrochemische Messmethoden: Zuordnung und Bewertung der Eignung zur Bestimmung relevanter Messgrößen.	212
Tabelle 8-1:	Wasserinhaltsstoffe, welche durch die Probennahme in ihrer Konzentration (nicht) beeinflusst werden.....	228
Tabelle 8-2:	Kriterien zur Beurteilung der Qualität und Quantität von Messwerten.	230
Tabelle 8-3:	Geeignete Messmethoden als Basis für den Orientierungsrahmen.	234

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Seite:

Abbildung 1-1: Verfahrensablauf der Standortauswahl eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle (verändert nach BMUB (2017)).	15
Abbildung 1-2: Zusammenhang zwischen Hydrologie, Hydrogeologie und Hydrogeochemie.	17
Abbildung 3-1: Zusammenhang zwischen der Größe des betrachteten Gebiets und der longitudinalen Dispersivität (nach Gelhar et al. (1983)).	42
Abbildung 3-2: Dreiphasenmodell des Bodens (schematisch).	43
Abbildung 4-1: Schema zu den Grundbegriffen der Sorption (verändert nach Kümmel & Wolch (1990)).	57
Abbildung 5-1: Schema eines Pumpversuches im gespannten Grundwasserleiter (Quelle: DIN EN ISO 22282-4).	66
Abbildung 5-2: Grafische Auswertung eines Pumpversuches nach Cooper-Jacob (verändert nach DIN EN ISO 22282-4).	67
Abbildung 5-3: Bohrloch-Testequipment für Slug-, Drill-Stem und Pulse-Tests am Beispiel einer Doppelpackeranordnung (nach Hekel et al. (2012)).	72
Abbildung 5-4: Typkurven nach Cooper et al. (1967) für Slug-Tests (Hekel 1994).	76
Abbildung 5-5: Messergebnisse (links) und Auswertung eines Pulse-Tests (rechts) (nach Hekel & Odenwald (2012)).	80
Abbildung 5-6: Vergleich von Porositäten, die in der Bohrung Soultz-sous-Forêts im Granit mit verschiedenen Bohrlochmessmethoden ermittelt wurden (Frese et al. 2000).	134
Abbildung 5-7: Gamma-Messungen, links schematische Darstellung des Sondenaufbaus; rechts Varianten der Messverfahren (aus Fricke und Schön 1999).	141
Abbildung 5-8: Gamma-Gamma-Dichte Log, links schematische Darstellung des Sondenaufbaus; rechts Kalibrierkurve für zwei Sondenspacings (Fricke und Schön 1999).	144
Abbildung 5-9: Neutron-Neutron Log, links schematische Darstellung des Sondenaufbaus; rechts Kalibriereinrichtung für Neutronsonden mit tonfreien Kalksteinen bekannter Porositäten (API-Calibration Pit, Houston) aus Fricke & Schön (1999).	148
Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der NMR-Messungen. Links: Relaxationskurve mit vorrangig wirksamen Wasseranteilen; rechts: Ergebnis der Inversion in Form einer T2-Verteilung mit Zuordnung zu Wasseranteilen (1 - tongebundenes Wasser, 2 – kapillar gebundenes Wasser, 3 – frei bewegliches Wasser bzw. Fluide) (Fricke und Schön 1999).	151
Abbildung 5-11: Zusammenhang zwischen Abklingzeit und Porosität. Die Fläche unterhalb der T2-Verteilung ist ein Maß für die Porosität (Coates et al. 1999).	152
Abbildung 5-12: Schematische Darstellung der mit elektrischen Bohrlochmessmethoden erfassten Bereiche (nach Rider 1996).	158

Abbildung 5-13: Zweispulen-Induktionslogsonde, links Aufbau der Sonde, rechts schematischer Verlauf der radialen Sondenempfindlichkeit (Fricke & Schön 1999).....	162
Abbildung 5-14: Akustiklogmessung. Zwei-Empfänger-Sonde mit schematisch dargestellter Ausbreitung der Wellen (links) und Wellenbilder (Tönnies 1991) an zwei Empfängern (rechts) (Fricke und Schön 1999).	167
Abbildung 5-15: Schematische Darstellung des Durchströmungsversuches (Quelle: DIN 18120-1).....	177
Abbildung 8-1: Vorschlag zum schematischen Ablauf der übertägigen Erkundung von hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen zur Beurteilung nach §§ 22 – 24 StandAG.....	241

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AAS	Atomabsorptionsspektroskopie
ABF	Akustischer Bohrlochfernseher
Abs.	Absatz
AES	Atomemissionsspektrometrie
AFS	Atomfluoreszenzspektrometrie
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AMT	Audio-Magnetotellurik
AP	Arbeitspaket
API	American Petroleum Institute
AVO	Amplitude versus Offset
BfE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BHTV	Borehole Televiwer
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (<i>jetzt: BMU</i>)
BS	Brenk Systemplanung GmbH
BVI	<i>Bulk Volume Irreducible</i> (Volumenanteil des gebundenen Wassers in der Formation)
BVM	<i>Bulk Volume Movable</i> (Volumenanteil des freien Wassers in der Formation)
CBL	Cement Bond Log
CDM Smith	CDM Smith Consult GmbH
CSAMT	Controlled Source Audio-Magnetellurik
DC	Dünnschichtchromatographie
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EM	Elektromagnetik
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
EXAFS	<i>Extended X-ray Absorption Fine Structure</i>
FKZ	Förderkennzeichen
GC	Gaschromatographie
GGL	GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH
GR	Gamma Log
GRS	spektrales Gamma Log

HI	<i>Hydrogen index</i> (Wasserstoffindex)
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie
IC	Ionen(austausch)chromatographie
ICP	induktiv-gekoppeltes Plasma
ILd	Inductionlog (deep)
IP	Induzierte Polarisierung
LC	Flüssigchromatographie
LIBD	Laser-induzierte Breakdown-Detektion
LL	Laterolog
LLd	Laterolog (deep)
MEMS	Mikroelektromechanische Systeme
MessEr	Messmethoden für übertägige Erkundungsprogramme gemäß StandAG
ML	MicroLog
MLL	Microlaterolog
MS	Massenspektrometrie
MT	Magnetotellurik
NAA	Neutronenaktivierungsanalyse
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NMR	Kernspinresonanzspektroskopie
OPTV	optischer Bohrlochfernseher
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RMT	Radiomagnetotellurik
SFC	überkritische Fluidchromatographie
SIP	Spektrale Induzierte Polarisierung
SL	Spülungsleitfähigkeitslog
SNMR	<i>Surface Nuclear Magnetic Resonance</i> (Oberflächen-Nuklear-Magnetische Resonanz)
SQUID	<i>Superconducting Quantum Interference Device</i> (supraleitende Quanteninterferenzeinheit)
StandAG	Standortauswahlgesetz
TDS	<i>Total Dissolved Solid</i> (Summe der vollständig gelösten Feststoffe im Wasser)
TEM	Transiente-Elektromagnetik

übErStand	Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren
VSP	vertikalseismische Profilierung
W+T	(Stand von) Wissenschaft und Technik
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WD	Wasserdruck(test)
XANES	<i>X-ray Absorption Near-Edge Structure Spectroscopy</i>
XAS	Röntgenabsorptionsspektroskopie

SYMBOLVERZEICHNIS

A	Fläche	[m ²]
BVI	Volumenanteil des gebundenen Wassers in der Formation (<i>Bulk Volume Irreducible</i>)	[1]
BVM	Volumenanteil des freien Wassers in der Formation (<i>Bulk Volume Movable</i>)	[1]
C	Formationsabhängige Konstante ($C \approx 10$)	[1]
c(HCl)	Konzentration der Salzsäure	[mol·l ⁻¹]
c(Na ₂ CO ₂)	Konzentration der Natriumkarbonat-Lösung	[mol·l ⁻¹]
c _i	Stoffmengenkonzentration (Molarität)	[mol·L ⁻¹]
C _l	gelöste Konzentration in flüssiger Phase	[mol·m ⁻³]
C _s	sorbierte Konzentration an fester Phase	[mol·kg ⁻¹]
$\frac{\partial c_i}{\partial x}$	Konzentrationsgradient des Stoffes <i>i</i> in x-Richtung	[kg·m ⁻³]
D _m *	effektiver molekularer Diffusionskoeffizient	[m ² ·s ⁻¹]
D _{m,i}	effektiver molekularer Diffusionskoeffizient der Komponente <i>i</i>	[m ² ·s ⁻¹]
F	Formationsfaktor	[1]
g	Erdbeschleunigung	[m·s ⁻²]
H _i	Wasserstoffindex	[1]
H _{i, Matrix}	Wasserstoffindex der Gesteinsmatrix	[1]
H _{i, Poreninhalt}	Wasserstoffindex des Poreninhalts	[1]
h _m	Mächtigkeit des durchströmten Bereiches	[m]
h _p	hydraulische Druckhöhe	[m]
Δh _p	Druckhöhenunterschied	[m]
i	hydraulischer Gradient	[1]
I	Ionenstärke	[mol·L ⁻¹]
I _{NG}	Impulsrate Neutron-Gamma Log	[cps]
I _{NN}	Impulsrate Neutron-Neutron Log	[cps]
J _i	Diffusionsstromdichte der Komponente <i>i</i>	[kg·s ⁻¹]
K	Durchlässigkeits-/Permeabilitätskoeffizient	[m ²]
K	Permeabilitätskoeffizient	[m ²]
K _d	Sorptionskoeffizient	[m ³ ·kg ⁻¹]
k _f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m·s ⁻¹]
l	Fließlänge	[m]
m	Zementationsexponent	[1]

m_a	Auftriebsgewicht (einer Gesteinsprobe)	[kg]
m_d	Trockengewicht (einer Gesteinsprobe)	[kg]
m_w	Nassgewicht (einer Gesteinsprobe)	[kg]
n	Gesamtporosität	[1]
$n(\text{HCl})$	Stoffmenge der Salzsäure	[mol]
$n(\text{Na}_2\text{CO}_3)$	Stoffmenge der Natriumkarbonat-Lösung	[mol]
n_e	effektive Porosität	[1]
n_e^*	diffusionswirksame Porosität	[1]
n_i	Stoffmenge der Komponente i	[mol]
n_{korr}	tonkorrigierte Porosität	[1]
n_{NN}	Neutronporosität	[1]
n_{sat}	Sättigungsexponent	[1]
p_0	initialer Druck	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}]$
p_{max}	maximaler Druck	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}]$
p_w	Porenwasserdruck	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}]$
Q	Durchflussrate	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
R	spezifischer Widerstand des Gesteins	$[\Omega\text{m}]$
R_s	spezifischer Widerstand des gesättigten Gesteins	$[\Omega\text{m}]$
R_w	spezifischer Widerstand des Porenwassers	$[\Omega\text{m}]$
S	Speicherkoeffizient	[1]
S_{sp}	spezifischer Speicherkoeffizient	$[\text{m}^{-1}]$
S_w	Sättigungsgrad	[1]
T	Transmissivität	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
t	Zeit	[s]
Δt	Laufzeit	[s]
$V(\text{HCl})$	Volumen der Salzsäure	[l]
$V(\text{Na}_2\text{CO}_3)$	Volumen der Natriumkarbonat-Lösung	[l]
v_a	Abstandsgeschwindigkeit	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
V_{GW}	Volumeneinheit des Grundwasserraumes	$[\text{m}^3]$
V_i	Volumenanteile der einzelnen Bestandteile	[1]
$V_{k,p}$	Kompressionswellengeschwindigkeit im Porenfluid	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
$V_{k,m}$	Kompressionswellengeschwindigkeit in der Gesteinsmatrix	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
V_P	P-Wellengeschwindigkeit	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
$V_{p,\text{eff}}$	durchflusswirksames (effektives) Porenvolumen	$[\text{m}^3]$

$V_{p,ges}$	Gesamtporenvolumen	$[m^3]$
v_r	Geschwindigkeit des retardierten Stoffes	$[m \cdot s^{-1}]$
V_{Rein}	Reinvolumen (einer Gesteinsprobe)	$[m^3]$
V_{Roh}	Rohvolumen (einer Gesteinsprobe)	$[m^3]$
v_s	S-Wellengeschwindigkeit	$[m \cdot s^{-1}]$
V_{Sh}	Tongehalt	[1]
v_x	Filtergeschwindigkeit in x-Richtung	$[m \cdot s^{-1}]$
ΔV_w	gespeichertes Wasservolumen	$[m^3]$
\vec{v}	Vektor der Filtergeschwindigkeit	$[m \cdot s^{-1}]$
z	Piezometrische Höhe	[m]
z_i	Wertigkeit des Ions i	[1]
α	Dispersivität	[m]
α_L	longitudinale Dispersivität	[m]
α_T	transversale Dispersivität	[m]
γ_i	Aktivitätskoeffizient	[1]
ε	Dielektrizitätszahl	$[F \cdot m^{-1}]$
θ	Benetzungswinkel	$[^\circ]$
μ	Dynamische Viskosität	$[kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$
ρ_b	(Trocken-)Dichte des Gesteins	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_{cl}	Dichte des Tones	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_{ma}	Dichte der tonfreien Gesteinsmatrix	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_s	Korn(roh)dichte des Gesteins	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_w	Dichte von Wasser	$[kg \cdot m^{-3}]$
σ	elektrische Leitfähigkeit	$[S \cdot m^{-1}]$
τ	Tortuosität	[1]
Φ_{Hg}	Oberflächenspannung (Quecksilber)	$[N \cdot m^{-1}]$

Kurzzusammenfassung

Gemäß § 15 Abs. 4 Standortauswahlgesetz (StandAG) ist es Aufgabe des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE), die Prüfung und Festlegung der von der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) als Vorhabenträgerin vorgeschlagenen standortbezogenen Erkundungsprogramme zur übertägigen Erkundung für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standortregionen durchzuführen. Hierfür wird im Rahmen des vorliegenden Berichts auf Basis der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 22 - 24 StandAG in Verbindung mit den Anlagen 1 bis 11) eine Übersicht der zu ermittelnden Messgrößen und der dafür in Betracht kommenden Messmethoden erstellt. Die wesentlichen Inhalte sowie die mögliche Strukturierung einer übertägigen Erkundung nach Stand von Wissenschaft und Technik zur vollständigen Erfassung der hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Eigenschaften von Standortregionen werden in Form eines Orientierungsrahmens dargestellt. Dieser enthält eine umfassende Zusammenstellung zu den hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Aspekten der Standorterkundung, den Anforderungen an die Dokumentation und Qualitätssicherung, die Auswahl geeigneter Messmethoden sowie die Wahl der Messnetzdichten und zeitlichen Messintervalle und kann daher als Unterstützung bei der Bewertung von Vorschlägen zu übertägigen Erkundungsprogrammen von Standortregionen dienen.

Abstract

Pursuant to § 15 (4) StandAG (Repository Site Selection Act), it is the task of the Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (BfE) to examine and then specify the site-related surface exploration programmes proposed by the federally-owned company *Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH* (BGE). BGE is the project implementer for the surface exploration of the site regions selected under the Federal Act. Within the present report an orientation framework is prepared based on the exclusion criteria, minimum requirements and geoscientific comparative evaluation criteria (§ 22 - 24 StandAG in conjunction with Annexes 1 to 11). This orientation framework considers the parameters to be determined, the measurement methods and the content and structure of a surface investigation programme in accordance with the state of the art in science and technology regarding the hydrological, hydrogeological and hydrogeochemical properties of the site regions. The orientation framework contains a comprehensive compilation of the hydrological, hydrogeological and hydrogeochemical aspects of a site region investigation, the requirements for documentation and quality assurance, the selection of suitable measurement methods as well as the choice of measurement network densities and measurement intervals and can therefore serve as a support in the evaluation of proposals for surface exploration programmes of site regions.

1. Einleitung

1.1. Veranlassung

In Deutschland sollen alle Arten im Inland verursachter radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden (BMUB 2017). Für die Auswahl des Endlagerstandorts für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle trat am 27. Juli 2013 das „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ (Standortauswahlgesetz – StandAG) in Kraft.

Zur Vorbereitung des Standortauswahlverfahrens und auf Grundlage des StandAG mit Bearbeitungsstand vom Juli 2013 wurde die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (Endlagerkommission) berufen, welche im Juli 2016 den Abschlussbericht „Verantwortung für die Zukunft – ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandorts“ (Kommission 2016) veröffentlicht hat. Eine Hauptaufgabe der Kommission war es, über Empfehlungen die Regeln und Vorschriften für ein Standortauswahlverfahren zu prüfen und zu bestätigen, zu verändern oder neu zu entwickeln. Auf der Grundlage des o. g. Abschlussberichtes der Endlagerkommission wurde das StandAG mit Beschluss des Bundestages vom 5. Mai 2017 in der zweiten novellierten Fassung als „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ (Standortauswahlgesetz – StandAG) (StandAG 2017).

Das übergeordnete Ziel des Standortauswahlverfahrens ist im nachfolgend zitierten § 1 Abs. 2 StandAG (StandAG 2017) wie folgt beschrieben:

§ 1 Abs. 2 StandAG:

„Mit dem Standortauswahlverfahren soll in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung nach § 9a Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt werden.“

Das StandAG legt die einzelnen Verfahrensschritte fest, welche bis zur Standortentscheidung durchgeführt werden müssen. Das Auswahlverfahren wird hierbei, wie von der Endlagerkommission empfohlen, dreistufig angelegt (s. Abbildung 1-1):

Auf Basis der von den zuständigen Behörden des Bundes und der Länder zur Verfügung gestellten geologischen Daten startet das Auswahlverfahren für die Ermittlung der Teilgebiete nach § 13 StandAG zunächst mit der Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG) auf das gesamte Bundesgebiet und der anschließenden Prüfung der verbleibenden Gebiete auf Einhaltung der Mindestanforderungen (§ 23 StandAG). Aus den damit identifizierten Gebieten werden nach Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24 StandAG) mögliche Teilgebiete ermittelt. Im weiteren Verlauf werden nach repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und erneuter Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24 StandAG) sowie gegebenenfalls der Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 25 StandAG) günstige Standortregionen ermittelt und für diese vom Vorhabenträger, der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), übertägige Erkundungsprogramme erarbeitet und dem Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) vorgeschlagen. Das BfE prüft die Vorschläge des Vorhabenträgers und legt für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standortregionen die Erkundungsprogramme fest.

Nach Festlegung der Standortregionen werden diese übertägig auf Grundlage der standortbezogenen Erkundungsprogramme erkundet (§ 16 Abs. 1 StandAG). Die Erkundungsergebnisse dienen als Grundlage für weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen der einzelnen Standortregionen sowie für sozioökonomische Potenzialanalysen. Im Ergebnis dessen werden unter erneuter Anwendung der Ausschlusskriterien, der Mindestanforderungen und der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§§ 22 - 24 StandAG) Standorte vorgeschlagen, welche in der Folge untertägig untersucht werden sollen. Für diese Standorte sind außerdem Prüfkriterien und untertägige Erkundungsprogramme zu erarbeiten, die eine Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen sowie die Durchführung der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ermöglichen.

Für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standorte erfolgt die untertägige Erkundung nach Maßgabe der durch das BfE festzulegenden Erkundungsprogramme und Prüfkriterien. Die Ergebnisse der Erkundung fließen in umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen ein. Auf Basis dessen findet eine erneute Anwendung der Ausschlusskriterien, der Mindestanforderungen und der geowissenschaftlichen und planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (§§ 22 – 25 StandAG) statt. Die möglichen Standorte werden untereinander abwägend verglichen mit dem Ziel, den Standort mit bestmöglicher Sicherheit gemäß § 1 Abs. 2 StandAG zu finden. Der Vorhabenträger erstellt außerdem Unterlagen für die Umweltverträglichkeitsprüfung und übermittelt diese zusammen mit den Standortvorschlägen einschließlich des Standortvergleichs an das BfE. Das BfE prüft die Standortvorschläge und -vergleiche und übermittelt dann einen abschließenden und begründeten Standortvorschlag an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Dieser Standortauswahl wird abgeschlossen mit der Festlegung des Endlagerstandortes

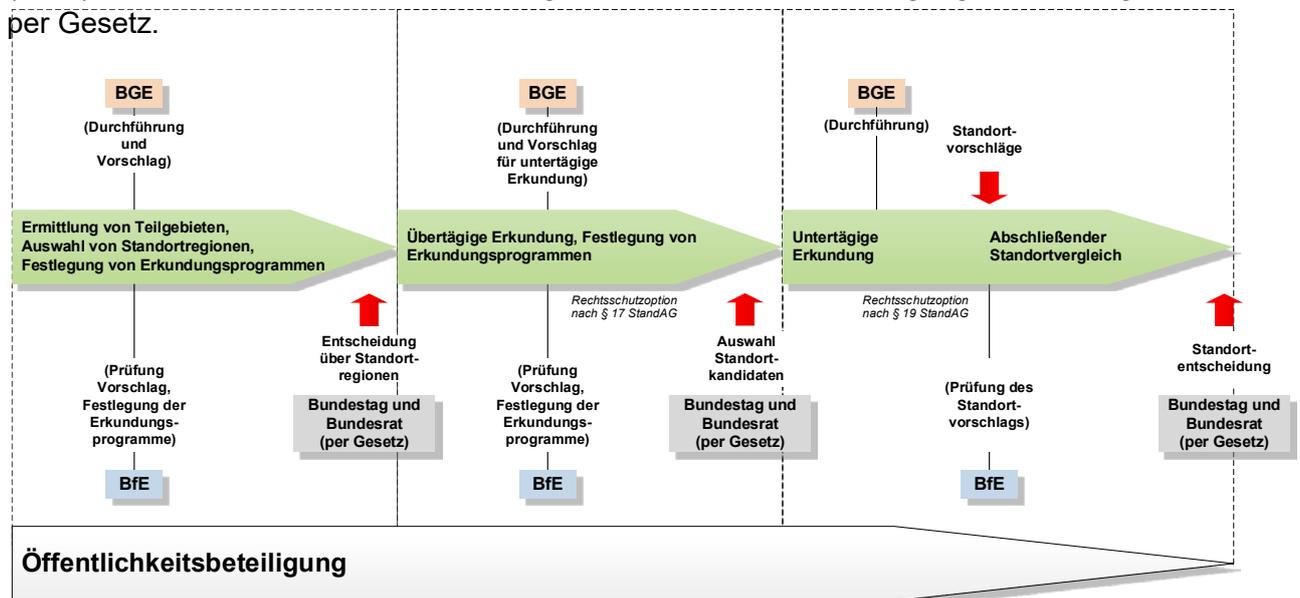


Abbildung 1-1: Verfahrensablauf der Standortauswahl eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle (verändert nach BMUB (2017)).

Vor dem Hintergrund der Aufgaben des BfE nach § 4 Abs. 1 StandAG, insbesondere § 15 Abs. 4 StandAG, wurden im Dezember 2017 vom BfE zwei Ausschreibungen veröffentlicht, welche im Ergebnis jeweils eine vergleichende Darstellung von Messmethoden für die übertägige Erkundung vorzunehmen haben:

1. *„Messmethoden für übertägige Erkundungsprogramme gemäß StandAG („MessEr“)* (FKZ: 4717F01202):
Die hierin beschriebenen Arbeiten beschränken sich auf die Darstellung und Beschreibung von Messmethoden geologischer Sachverhalte zur übertägigen Erkundung von Standortregionen und die Zuordnung dieser Messmethoden zu den jeweiligen Anforderungen und Kriterien aus dem StandAG.
2. *„Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren („übErStand“)* (FKZ: 4717F01201):
Die Bearbeitung dieses Vorhabens beschränkt sich auf die Messgrößen, welche sich aus den Anforderungen und Kriterien, die sich für die übertägige Erkundung hydrologischer, hydrogeologischer und hydrogeochemischer Eigenschaften von Standortregionen aus dem StandAG ergeben, sowie auf die Beschreibung zugehöriger Messmethoden nach Stand von W+T.

Das im Rahmen des übErStand-Vorhabens durchzuführende Arbeitsprogramm wird in die folgenden Arbeitsschritte unterteilt:

Schritt 1: Ableitung der hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen übertägiger Erkundungsprogramme

- Systematische Darstellung der relevanten Stellen im StandAG
- Herleitung der zu erfassenden Messgrößen

Schritt 2: Beschreibung von Messmethoden zur Bestimmung der identifizierten Messgrößen

Schritt 3: Einordnung und Ableitung eines Orientierungsrahmens

Ziel dieses Vorhabens ist es, zunächst die relevanten Messgrößen und darauf aufbauend diejenigen Methoden der übertägigen Erkundung nach Stand von W+T zusammenzustellen, welche zur Bestimmung der hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Eigenschaften von Standortregionen erforderlich sind. Für die ermittelten hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen ist anschließend ein Orientierungsrahmen für die geeigneten Messmethoden, Messnetzdichten und Messintervalle der übertägigen Messungen nach aktuellem Stand von W+T zu erarbeiten. Dieser ist dabei anhand der zusammengestellten Daten und Ergebnisse aus den vorangegangenen Arbeitsschritten sowie auf Grundlage der im StandAG vorgegebenen und für dieses Vorhaben relevanten Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen sowie auf Grundlage der geowissenschaftlichen und planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien zu erstellen.

1.2. Untersuchungsumfang des Vorhabens

In einem ersten Arbeitsschritt wurden zunächst die Anforderungen und Kriterien herausgearbeitet, welche im Rahmen dieses Vorhabens für die weitere Zusammenstellung und Herleitung von Messgrößen aus dem StandAG relevant sind. Das „übErStand“-Projekt konzentriert sich hierbei auf die Beschreibung sämtlicher transportrelevanter Eigenschaften der Gesteine (z. B. Permeabilität und Sorption) sowie auf Fluidbewegungen und die Hydrochemie. Diejenigen Kriterien und Anforderungen, welche nicht dem „übErStand“-Projekt zugeordnet sind und die Darstellung und Beschreibung von Messmethoden bzgl. geologischer Sachverhalte zur übertägigen Erkundung von Standortregionen beinhalten, werden im Rahmen des „MessEr“-Vorhabens betrachtet.

Eine scharfe thematische Abgrenzung zwischen Geologie und Hydrogeologie ist hierbei nicht immer möglich, insbesondere dann nicht, wenn geologisch relevante Prozesse unmittelbaren Einfluss auf die Permeabilität des Gesteins haben (s. z. B. Anlage 6 des StandAG: „Rückbildbarkeit

von Rissen“). Auch die Messgrößen zur Ausweisung eines potenziellen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches sind thematisch nicht nur dem „übErStand“-Vorhaben zuzuordnen.

Folgende Festlegungen und Randbedingungen wurden für die Bearbeitung dieses Vorhabens zugrunde gelegt:

a) *Beschränkung auf hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Messgrößen:*

In Abgrenzung zu den geologischen Sachverhalten wird sich im Rahmen dieses Vorhabens auf die hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen beschränkt. Diese sollen im Rahmen der übertägigen Erkundung eine vollständige Darstellung der Grundwasserverhältnisse (auch für das Deckgebirge, d. h. die Gesteinsschichten, welche das Wirtsgestein bis zur Oberfläche überlagern sowie des Nebengebirges, d. h. den Gesteinsschichten, die sich seitlich außerhalb der Wirtsgesteine befinden) unter Berücksichtigung der hydraulischen (transportrelevanten) Eigenschaften der Grundwasserleiter und -geringleiter sowie eine vollständige Darstellung der Grundwasserbeschaffenheit ermöglichen.

Die Grundbegriffe zu den Themen Hydrologie, Hydrogeologie und Hydrogeochemie finden sich u. a. in den Normblättern DIN 4049-1 (1992), DIN 4049-2 (1990) und DIN 4049-3 (1994) definiert.

Die **Hydrologie** ist gemäß DIN 4049-1 (1992) die Wissenschaft vom Wasser, seinen Erscheinungsformen auf und unter der Landoberfläche sowie in den Küstengewässern.

Die **Hydrogeologie** ist ein Arbeitsgebiet der Geologie sowie der Hydrologie und befasst sich mit den Eigenschaften des Wassers in Hohlräumen der Lithosphäre sowie den Wechselwirkungen des Wassers mit dem Gestein (DIN 4049-1 1992).

Die **Hydrogeochemie** ist ein Teil der Hydrogeologie, welcher sich mit der chemischen Zusammensetzung des Wassers im Untergrund sowie den Wechselwirkungen des Wassers mit dem Gestein beschäftigt. Die Begriffe zur Grundwasserbeschaffenheit sind in DIN 4049-3 (1994) definiert.

In Abbildung 1-2 sind die Zusammenhänge der einzelnen Teilgebiete sowie ein Auszug der wichtigsten zu erfassenden Themengebiete zur Beschreibung von hydrogeologischen Einheiten dargestellt.

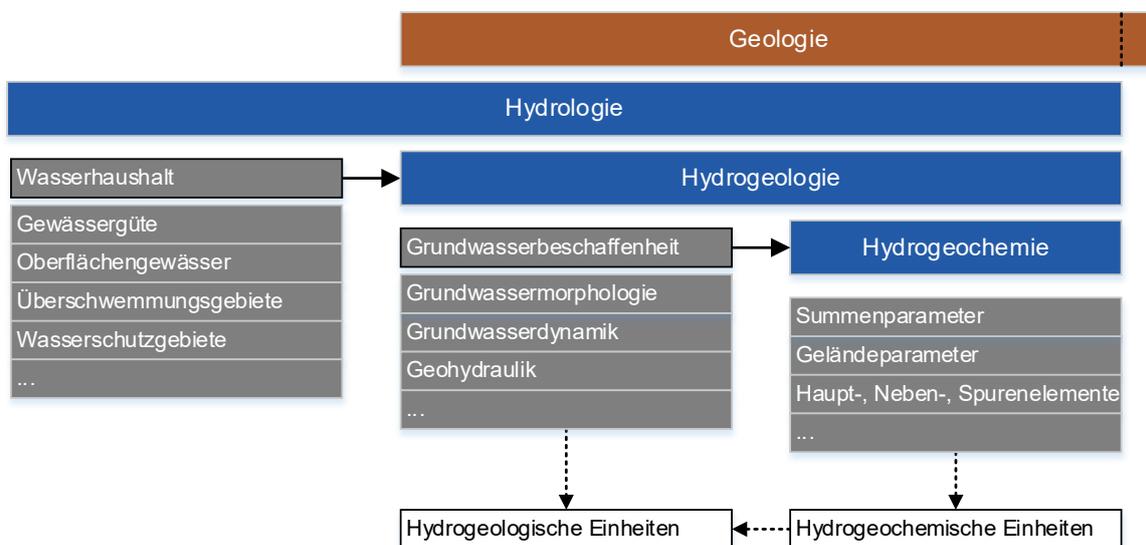


Abbildung 1-2: Zusammenhang zwischen Hydrologie, Hydrogeologie und Hydrogeochemie.

b) *Beschränkung auf übermäßige Messmethoden zu den Messgrößen:*

Zu den übermäßigen Messmethoden werden sämtliche Messmethoden gezählt, welche von oberhalb der Erdoberfläche durchgeführt werden können, ohne einen bergbaulichen Ausbau (Schächte, Strecken, Stollen) zu benötigen. Diese übermäßigen Methoden umfassen allgemein

- von über Tage abgeteufte Erkundungsbohrungen,
- hydrogeologische/hydraulische Feldmethoden,
- geophysikalische Messmethoden,
- die Erfassung von meteorologischen Daten,
- Laborversuche und -analysen sowie
- Grundwassermonitoring und -beprobung.

Untertägige Messmethoden (z. B. die Auffahrung von Strecken oder Methoden bzw. In-situ-Versuche, die von untertägigen Einrichtungen aus durchgeführt werden) sowie Methoden, welche die Bewertung von Recherchearbeiten und Erfahrungsberichten umfassen, sind nicht Gegenstand dieses Vorhabens.

c) *Unterscheidung in gesteinsspezifische Messgrößen:*

Messmethoden können gesteinsspezifisch sein. Aufgrund der Vorfestlegung des StandAG auf drei Wirtsgesteine kann bei jedem Erkundungsprogramm mindestens eines dieser Gesteine Untersuchungsbestandteil sein. Zu den Wirtsgesteinen werden gemäß § 1 Abs. 3 StandAG (StandAG 2017) Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein gezählt. Eine Definition des Überbegriffs Kristallingestein ist im StandAG (2017) nicht vorgegeben und zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch Gegenstand aktueller Diskussion. Dem Kristallingestein werden u. a. in Jobmann et al. (2016) metamorphe und magmatische Gesteine zugeordnet. Im vorliegenden Bericht wird diese überbegriffliche Auslegung zum Kristallingestein daher ebenfalls verwendet.

d) *Bewertung nach dem aktuellen Stand von W+T:*

Als Arbeitsgrundlage zur Beschreibung der Messmethoden und Zuordnung zu den Messgrößen wird der aktuelle Stand von W+T mit Stand von August 2018 zugrunde gelegt.

Die für dieses Vorhaben in §§ 22 - 25 StandAG und in Abgrenzung zum „MessEr“-Vorhaben (s. Abschnitt 1.1) ermittelten relevanten Kriterien und Anforderungen in Verbindung mit den Anlagen 1 bis 11 des StandAG sind nachfolgend zusammengestellt.

i. Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG)

- Grundwasseralter

ii. Mindestanforderungen (§ 23 StandAG)

- Gebirgsdurchlässigkeit
- Erhalt der Barrierewirkung

iii. Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 24 StandAG)

- Anlage 1: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper:
 - Indikator „Potenzialbringer“ bei Tongestein.
- Anlage 4: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

- Anlage 6: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten:
 - Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit,
 - Rückbildbarkeit von Rissen.
- Anlage 7: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung
- Anlage 9: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- Anlage 10: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse
- Anlage 11: Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge:
 - Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge.

iv. Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 25 StandAG)

Gemäß § 14 Abs. 1 StandAG (StandAG 2017) sind die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nicht Bestandteil der übertägigen Erkundungsprogramme, sondern dienen dem „Vergleich zwischen Gebieten [...], die unter Sicherheitsaspekten als gleichwertig zu betrachten sind“ (§ 25 Abs. 1 StandAG), sofern eine Eingrenzung durch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nicht bereits schon erfolgt oder nicht möglich ist. Zusätzlicher Erkundungsbedarf ergibt sich aus den planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nicht, somit sind die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien in Verbindung mit Anlage 12 des StandAG im Rahmen dieses Vorhabens nicht Bestandteil der hier durchgeführten weiteren Untersuchung.

1.3. Vorgehensweise

Gemäß dem Arbeitsprogramm (s. Abschnitt 1.1) sollen zunächst die relevanten Messgrößen aus dem StandAG abgeleitet werden. Um im Rahmen der weiteren Arbeiten zur Beschreibung der Messmethoden eine präzisere Differenzierung zwischen den zu messenden Größen und den daraus gewonnenen Informationen treffen zu können, werden im Rahmen dieses Vorhabens die folgenden Begriffe verwendet:

- Die **Messgröße** ist die physikalische Größe, der die Messung gilt und wird durch die jeweilige Messvorschrift festgelegt.
- Der **Messwert** ist ein konkreter, entsprechend der Messvorschrift gemessener und einheitenbezogener Zahlenwert der Messgröße.
- Das **Messergebnis** ist der direkt oder indirekt aus einem oder mehreren Messwerten abgeleitete (und somit mit Ungewissheiten behaftete) Schätzwert der Messgröße.

In Kapitel 3 und 4 erfolgt entsprechend der in Kapitel 2 dargestellten relevanten Bewertungsgrößen aus dem StandAG eine Ableitung und Beschreibung der zugehörigen Messgrößen zur übertägigen Erkundung der hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Eigenschaften. Diese Messgrößen ergeben sich entweder direkt aus den Bewertungsgrößen des StandAG oder werden daraus abgeleitet.

In Kapitel 5 und 6 erfolgt eine Darstellung der übertägigen Messmethoden nach aktuellem Stand von W+T für die ermittelten hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen.

Die Messmethoden zur Bestimmung transportrelevanter Gesteinseigenschaften werden in Kapitel 5 beschrieben und umfassen die geohydraulischen und geophysikalischen Messmethoden sowie Laboruntersuchungen.

Messmethoden zur Bestimmung relevanter hydrogeochemischer Messgrößen werden in Kapitel 6 aufgeführt und berücksichtigen sowohl Messmethoden im Feld (sog. „Vor-Ort-Parameter“) sowie Laboranalysen. Hierbei werden, sofern vorhanden, neben den nationalen auch die international relevanten Erfahrungen und Erkenntnisse bezüglich der übertägigen Erkundungsprogramme im Endlagerbereich herangezogen. Diese Beschreibung der Messmethoden ermöglicht eine Übersicht über die Anwendbarkeit und zeigt die Grenzen der Methoden sowie die jeweiligen Vor- und Nachteile auf.

In Kapitel 7 erfolgt eine Gegenüberstellung und ein Vergleich der Methoden, welche für die übertägigen Erkundungsprogramme infrage kommen.

In Kapitel 8 wird auf Basis der relevanten Messgrößen und dargestellten Messmethoden ein Orientierungsrahmen für die Erkundung von Standortregionen aufgestellt. Dieser enthält Informationen zu den Anforderungen an die Dokumentation und Qualitätssicherung im Rahmen der übertägigen Erkundung, den übertägigen Messmethoden, Messnetzdichten und zeitlichen Messintervallen und kann bei der Bewertung von Vorschlägen zu übertägigen Erkundungsprogrammen potenzieller Standortregionen herangezogen werden.

2. Darstellung relevanter Kriterien und Anforderungen aus dem StandAG

In den nachfolgenden Abschnitten werden alle für dieses Vorhaben als relevant eingestuft Kriterien und Anforderungen aus dem StandAG systematisch dargestellt und erläutert.

In einem ersten Schritt werden Begriffe, die im StandAG nicht eindeutig definiert werden, aufgeführt und ein aus Sicht der Autoren sinnvoller Auslegungsvorschlag für diese Begriffe gemacht. Dies ist erforderlich, um eine vollständige Ableitung der relevanten Messgrößen aus den Kriterien und Anforderungen durchführen zu können. Hierfür wird, neben der Fachliteratur, auch der Bericht der Endlagerkommission (Kommission 2016) herangezogen, da dieser als Grundlage für die Novellierung des StandAG in seiner derzeitige rechtsgültigen Fassung (StandAG 2017) diene.

Die Sicherheitsuntersuchungen sowie die Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) sind nicht Bestandteil des „übErStand“-Projektes, da die entsprechende Verordnung zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch in Bearbeitung ist und weitere, sich daraus ergebende Anforderungen und Kriterien erst außerhalb der Laufzeit dieses Projektes bekannt gegeben werden.

2.1. Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG)

Nachfolgend wird das für dieses Vorhaben relevante Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ näher erläutert.

Ausschlusskriterium: Grundwasseralter (§ 22 Abs. 2 Nr. 6 StandAG)

In den Gebirgsbereichen, die als einschlusswirksamer Gebirgsbereich oder Einlagerungsbereich in Betracht kommen, sind junge Grundwässer nachgewiesen worden (StandAG 2017).

Erläuterung:

Das Grundwasseralter stellt einen Zeitraum vom Zeitpunkt der Grundwasserneubildung, d. h. dem Zeitpunkt, an dem zuletzt Kontakt mit der Atmosphäre bestanden hat, bis zum Zeitpunkt der Probenahme dar. Je kleiner dieser Zeitraum ist, desto aktiver nimmt das Grundwasser am hydrologischen Kreislauf teil, was auf erhöhte Grundwasserbewegungen bzw. geringe Verweilzeiten schließen lässt (Pinneker 1992).

Nimmt das Grundwasser aktiv am hydrologischen Kreislauf teil, d. h. überwiegt der advective Stofftransport den diffusiven, wird es nachweislich beeinflusst durch Niederschlagsversickerung. Dieser Nachweis erfolgt über die Bestimmung der Isotopenzusammensetzungen als Indikatoren für die Verweilzeit, z. B.:

- Tritium: bis 100 Jahre,
- Kohlenstoff-14: 1.000 bis einige 10.000 Jahre und
- Helium-Argon-Verhältnis: $\sim 10^6$ Jahre.

Als Bewertungsgrundlage werden im Bericht der Endlagerkommission (Kommission 2016) sowie in der Gesetzesbegründung (Deutscher Bundestag 2017) die Konzentrationen der Isotope Tritium und Kohlenstoff-14 im Grundwasser angegeben. Das Ausschlusskriterium „junge Grundwässer“ gilt gemäß Kommission (2016) als nicht erfüllt, solange im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) Tritium und Kohlenstoff-14 nicht in Konzentrationen über dem natürlichen Hintergrund nachgewiesen werden können. Gemäß AkEnd (2002) darf das Grundwasser im Wirtsgestein und im einschlusswirksamen Gebirgsbereich hingegen kein Tritium und Kohlenstoff-14 enthalten, da dies Hinweise auf Grundwässer mit einem Alter von Jahrzehnten bis einigen wenigen Jahrzeh-

tausenden gibt. Die Erfüllung dieses Kriteriums führt dazu, dass der Standort nicht aus dem Verfahren ausgeschlossen wird, wird jedoch auch nicht als hinreichender Beleg für ein hohes Grundwasseralter angesehen (AkEnd 2002).

Die mittels Tritium- und Kohlenstoff-14-Konzentrationen errechneten Grundwasseralter müssen daher in jedem Fall validiert und gegebenenfalls auf weitere geochemische und isotopenhydrogeologische Hinweise überprüft werden wie im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Kommission 2016) empfohlen.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

i. junge Grundwässer:

Im StandAG wird nicht näher definiert, ab wann Grundwässer als „jung“ einzustufen sind. Dies kann bei einer zu breiten Interpretation von „jungen“ Grundwässern (z. B. bis 1 Mio. Jahre) möglicherweise zu einem Ausschluss der meisten, potenziell geeigneten Standortregionen führen.

Um den geforderten sicheren Einschluss von 1 Mio. Jahre (Schutzziel gemäß StandAG (2017)) zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass das Grundwasser im Bereich des ewG oder des Einlagerungsbereiches geringe Fließgeschwindigkeiten (und damit hohe Verweilzeiten) aufweist und der Stofftransport aus dem ewG heraus derart langsam abläuft, dass dieses Schutzziel eingehalten wird. Eine zielführende Auslegung des Begriffes „junge Grundwässer“ ist nach Auffassung der Autoren daher im Wesentlichen über die Verweilzeit und damit über die geforderte Abstandsgeschwindigkeit von $1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ gemäß Anlage 1 StandAG des Grundwassers möglich, deren Bestimmung im Rahmen der Prüfung der gewissenschaftlichen Abwägungskriterien vorgenommen wird.

Hierbei ist außerdem zu beachten, dass Grundwässer i. d. R. Mischwässer darstellen. Innerhalb eines Grundwasserkörpers können aufgrund von natürlichen Inhomogenitäten der Gesteinshorizonte bzw. des Sedimentaufbaus starke Unterschiede im Grundwasseralter bestehen. Je hydraulisch wirksamer die Gesteinshorizonte auch in vertikaler Richtung sind, desto verstärkter bilden sich mit zunehmender Tiefe Mischwässer verschiedenen Alters. Die kleinste ermittelte Verweilzeit sollte daher zur weiteren Bewertung des Ausschlusskriteriums herangezogen werden.

ii. Einlagerungsbereich:

Die Ausdehnung des „Einlagerungsbereiches“ im Falle eines Endlagersystems, das auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht, ist standortabhängig und kann im StandAG nicht hinreichend genau spezifiziert werden. Dies wird jedoch relevant, wenn die Messnetzdichte im Rahmen der übertägigen Erkundung festgelegt werden muss. Das Ausschlusskriterium „junge Grundwässer“ ist im Falle eines Endlagersystems, das auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht, somit zu Beginn des Standortauswahlverfahrens ggf. noch nicht bewertbar. Die Eignung eines solchen Endlagersystems als Endlagerstandort kann erst beurteilt werden, sobald ein technisches Endlagerkonzept vorliegt.

2.2. Mindestanforderungen (§ 23 StandAG)

Ein Gebiet ist nur für als Endlagerstandort geeignet, wenn alle Mindestanforderungen in diesem Gebiet erfüllt sind. Nachfolgend werden die beiden für dieses Vorhaben relevanten Mindestanforderungen „Gebirgsdurchlässigkeit“ und „Erhalt der Barrierewirkung“ näher erläutert.

1. Mindestanforderung: Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG)

In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit weniger als $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ betragen. Sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ zugeordnet werden kann. Die Erfüllung des Kriteriums kann auch durch den Einlagerungsbereich überlagernde Schichten nachgewiesen werden (StandAG 2017).

Erläuterung:

Die Gebirgsdurchlässigkeit setzt sich zusammen aus der Durchlässigkeit des Gesteinskörpers (durchflusswirksamer Porenraum bzw. effektive Porosität, Tortuosität) sowie aus der Durchlässigkeit des Trennflächengefüges (z. B. Klüfte, Störungen).

In Abhängigkeit der Gesteinszusammensetzung und Gesteinsfolge und deren tektonischer Überprägung kann die Gesteinsdurchlässigkeit große Inhomogenitäten und Anisotropien innerhalb einer Standortregion aufweisen.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

Keine.

2. Mindestanforderung: Erhalt der Barrierewirkung (§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG)

Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen (StandAG 2017).

Erläuterung:

Erste Erkenntnisse zur Barrierewirkung des ewG liefern beispielsweise die vorhandenen geologischen Karten, Schichtenverzeichnisse aus Bohrungen sowie bekannte und bereits kartierte Störungszonen. Nach § 23 Abs. 3 StandAG gilt die Mindestanforderung an den Erhalt der Barrierewirkung in allen Phasen des Auswahlverfahrens zunächst als erfüllt, solange die Sichtung und Auswertung der bereits vorhandenen Datenlage keine Hinweise darauf liefern, dass die Integrität des ewG im Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre in Frage gestellt werden kann. Hierdurch wird vermieden, dass Gebiete bereits im Vorfeld aus dem Verfahren ausgeschlossen werden, für die bisher nur wenige Daten vorliegen. Detaillierte Informationen zur Bewertung der Integrität des ewG werden zum großen Teil somit erst die Ergebnisse der Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und der Sicherheitsanalysen liefern.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

Keine.

2.3. Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 24 StandAG)

Im Folgenden werden die unter Abschnitt 1.2 ermittelten relevanten Kriterien für dieses Vorhaben aus den Anlagen 1, 2, 4, 6, 7 und 9 bis 11 des StandAG jeweils beschrieben und hinsichtlich ungenauer oder unvollständiger Begriffsdefinitionen untersucht.

Anlage 1 des StandAG

Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Das Kriterium gliedert sich gemäß StandAG (2017) in die folgenden vier bewertungsrelevanten Eigenschaften und dazugehörigen Bewertungsgrößen.

1. bewertungsrelevante Eigenschaft: Grundwasserströmung.

Bewertungsgröße(n): Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
$< 0,1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$	$0,1 - 1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$	$> 1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$

Erläuterung:

Die Abstandsgeschwindigkeit beeinflusst die Transportzeiten der Radionuklide mit dem Grundwasser. Sie muss so gering sein, dass sie, unter Berücksichtigung der übrigen Abwägungskriterien, zu dem geforderten sicheren Einschluss von 1 Mio. Jahre beiträgt.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

Keine.

2. bewertungsrelevante Eigenschaft: Grundwasserangebot.

Bewertungsgröße(n): Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
$< 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$10^{-12} - 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$> 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Erläuterung:

Ein geringes Grundwasserangebot im ewG begrenzt den Zutritt an Lösungen im Einlagerungsbereich und somit auch die Korrosion der Abfallbehälter (Kommission 2016).

Die als Bewertungsgröße festgelegte charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit setzt sich aus der Durchlässigkeit des Gesteinskörpers (durchflusswirksamer Porenraum bzw. effektive Porosität) sowie des Trennflächengefüges (z. B. Klüfte, Störungen) zusammen. Als „charakteristisch“ ist hierbei ein begrenzter Wertebereich anzusehen, der für den jeweils betrachteten Gesteinstyp als repräsentativ gilt. Diese Wertebereiche stammen aus Messungen, die im Rahmen der übertägigen Erkundung von Standortregionen durchzuführen sind.

Im StandAG werden die Wertebereiche in den jeweiligen Wertungsgruppen vorgegeben. In Abhängigkeit der Gesteinsart und -abfolge und der tektonischen Überprägung kann die Gebirgsdurchlässigkeit allerdings lokal große Inhomogenitäten und Anisotropien innerhalb einer Standortregion aufweisen. Diese Einflussfaktoren sind daher bei der Bewertung der Gebirgsdurchlässigkeit zu berücksichtigen.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

- i. Der Begriff „Grundwasserangebot“ ist kein wissenschaftlicher Terminus und wird in StandAG (2017), Deutscher Bundestag (2017), Kommission (2016) und AkEnd (2002) auch nicht näher definiert.
Es wird angenommen, dass unter „Grundwasserangebot“ das „Grundwasserdargebot“ und somit darunter gemäß DIN 4049-1 (1992) die Summe aller positiven Bilanzglieder (Niederschlag, unterirdische Abflussrate) der Wasserbilanz für einen bestimmten Grundwasserabschnitt in Abhängigkeit von der Gebirgsdurchlässigkeit zu verstehen ist.
- ii. Als Bewertungsgröße wird im StandAG die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit mit konkreten Wertungsgruppen genannt. Zusätzlich zu der Gebirgsdurchlässigkeit sind für das Grundwasserdargebot jedoch auch der hydraulische Gradient sowie das zur Verfügung stehende Grundwasservolumen im Einzugsgebiet des Grundwasserkörpers entscheidend. Insbesondere im Hinblick auf die bewertungsrelevante Eigenschaft „Potenzialbringer“ bei Tongestein (Anlage 2 StandAG) ist der hydraulische Gradient (siehe Abschnitt 3.6) eine wichtige Messgröße bei der Bewertung der Durchströmung des ewG.

3. bewertungsrelevante Eigenschaft: Diffusionsgeschwindigkeit

Bewertungsgröße(n): Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
$< 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$10^{-11} - 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$> 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Erläuterung:

Die Diffusionsgeschwindigkeit der Radionuklide beeinflusst deren Migrationszeit durch den Endlagerbereich und den ewG. Damit die Migrationszeiten der Radionuklide möglichst dem geforderten Isolationszeitraum von 1 Mio. Jahre entsprechen können, muss die Ausdehnung des ewG auf die Diffusionsgeschwindigkeit der Radionuklide abgestimmt werden (Kommission 2016).

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

Keine.

4. bewertungsrelevante Eigenschaft: Diffusionsgeschwindigkeit bei Tongestein.

Bewertungsgröße(n):

- a) Absolute Porosität,
- b) Verfestigungsgrad.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
a) < 20 %	a) 20 % - 40 %	a) > 40 %
b) Tongestein	b) fester Ton	b) halbfester Ton

Erläuterung:

Tongestein ist ein Sedimentgestein, welches durch seine unterschiedlichen Phasen der Genese, von der Verwitterung von Festgesteinen, dem Transport und der Ablagerung sowie darauf folgender erneuter Verfestigung des abgetragenen Materials, lokal sehr heterogen ausgeprägte Eigenschaften in seiner mineralogischen Zusammensetzung, Textur und dem Verfestigungsgrad aufweisen kann (Lux et al. 2018).

Bei Tongestein nehmen die Diffusionsgeschwindigkeit und der effektive Diffusionskoeffizient sowie die absolute Porosität mit zunehmendem Verfestigungsgrad des Gesteins generell ab. Wie in Kommission (2016) dargestellt, sind die für die absolute Porosität festgelegten Grenzen zwischen den drei Wertungsgruppen nur als näherungsweise gültige Angaben zu interpretieren, welche nicht für alle Tongesteinsformationen zutreffend sind. Da der effektive Diffusionskoeffizient vom Porenvolumen des Gesteins abhängig ist, können die absolute Porosität bzw. der Verfestigungsgrad zu Beginn des Standortauswahlverfahrens als Indikator für die Diffusionsgeschwindigkeit herangezogen werden (Kommission 2016).

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

Keine.

Anlage 2 des StandAG

Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper.

Das Kriterium gliedert sich gemäß StandAG (2017) in die folgende bewertungsrelevante Eigenschaft und dazugehörige Bewertungsgröße.

1. bewertungsrelevante Eigenschaft: Indikator „Potenzialbringer“ bei Tongestein.

Bewertungsgröße(n): Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, welche die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein/einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden.	-	Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein/einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden.

Erläuterung:

Als „Potenzialbringer“ werden hydraulisch wirksame Gesteinsschichten definiert, welche die Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG ermöglichen können (Kommission 2016).

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

- i. Im StandAG werden die Begriffe und Unterscheidungen „Nachbarschaft“ und „unmittelbare Nachbarschaft“ in den Wertungsgruppen „günstig“ bzw. „ungünstig“ nicht näher definiert. Die Bezeichnung „unmittelbare Nachbarschaft“ lässt somit keine genaue Definition der Entfernung zu, ab welcher der Potenzialbringer den geforderten sicheren Einschluss negativ beeinflussen kann.

Nach Ansicht der Autoren sollte zur Erfüllung der Wertungsgruppe „günstig“ der Abstand von Potenzialbringern zum ewG daher so groß sein, dass keine Überschreitung der Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers im ewG von $1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ gemäß dem Kriterium in § 24 Anlage 1 zu erwarten ist und der geforderte Isolationszeitraum von 1 Mio. Jahre somit eingehalten werden kann.

- ii. Im StandAG wird der Potenzialbringer nur auf das Wirtsgestein Tongestein beschränkt. Unter der Annahme, dass für Kristallingestein die gleichen Anforderungen an die Permeabilität gelten, sollte die Berücksichtigung des Potenzialbringers nach Ansicht der Autoren nicht nur auf die Umgebung des Wirtsgesteins Tongestein beschränkt, sondern auch für Kristallingestein berücksichtigt werden. Im intakten Steinsalz findet keine Grundwasserbewegung statt, die durch „Potenzialbringer“ im Deck- oder Nebengestein induziert oder verstärkt werden könnte.
- iii. Als „weniger günstig“ wird im StandAG das Vorhandensein von Grundwasserleitern in Nachbarschaft zum Wirtsgestein/einschlusswirksamen Gebirgsbereich bewertet. Ein Grundwasserleiter ist gemäß DIN 4049-3 (1994) definiert als „Gesteinskörper, der geeignet ist, Grundwasser weiterzuleiten“. Der Begriff „Grundwasserleiter“ ist im StandAG für die gegenständliche Aufgabenstellung im Standortauswahlverfahren nicht hinreichend eingegrenzt, da die in der Standardliteratur angegebenen typischen Durchlässigkeiten für Grundwasserleiter mit $\geq 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (AD-HOC-AG 1997) erheblich höher sind (Faktor 100.000) als die in § 23 StandAG geforderte Gebirgsdurchlässigkeit von $< 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in den Gebirgsbereichen, die als ewG oder Einlagerungsbereich in Betracht kommen und die in der Standardliteratur üblicherweise als Grundwassergeringleiter bezeichnet werden. Die Bezeichnung „Grundwasserleiter“ mit einer per Definition deutlich höheren Durchlässigkeit gegenüber der geforderten Gebirgsdurchlässigkeit kann somit zu einer Unterschätzung des Potenzialbringers führen.

Um auf der einen Seite mögliche Potenzialbringer nicht zu unterschätzen und andererseits eine genauere Abwägung durch quantitative Kriterien durchführen zu können, wäre aus Sicht der Autoren eine Auslegung der einzelnen Wertungsgruppen wie folgt möglich:

- Wertungsgruppe „günstig“: keine Gesteinsschichten mit hydraulischer Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in angrenzender Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ewG vorhanden (entsprechend § 24 StandAG, Anlage 1).
- Wertungsgruppe „bedingt günstig“: Gesteinsschichten mit hydraulischer Gebirgsdurchlässigkeit von $10^{-12} - 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in angrenzender Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ewG vorhanden.

- Wertungsgruppe „ungünstig“: Gesteinsschichten mit hydraulischer Gebirgsdurchlässigkeit $> 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in angrenzender Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ewG vorhanden (entsprechend der Definition in AD-HOC-AG (1997) für Grundwasserleiter).

Anlage 4 des StandAG

Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse.

Das Kriterium gliedert sich gemäß StandAG (2017) in die folgende bewertungsrelevante Eigenschaft und dazugehörige Bewertungsgröße.

1. bewertungsrelevante Eigenschaft: Änderung der wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale.

Bewertungsgröße(n): Relevantes Betrachtungsmerkmal „Gebirgsdurchlässigkeit“.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	ungünstig
Seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung.	Seit mehr als einer Million, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung.	Innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung.

Erläuterung:

Die für die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale sollen sich in der Vergangenheit über möglichst lange Zeiträume nicht wesentlich verändert haben (StandAG 2017). Indikatoren für die langfristige Stabilität der sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale sind die Zeitspannen, in welchen sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, räumliche „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des ewG nicht wesentlich verändert haben (StandAG 2017). Im Gegensatz zu den Anlagen 1 bis 3 des StandAG, welche den Ist-Zustand charakterisieren sollen, ist dieses Kriterium im Rahmen einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose unter Berücksichtigung der Ergebnisse verschiedener Messmethoden zu bewerten.

Die für das Vorhaben relevante Bewertungsgröße ist die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG. Ob eine Veränderung der Gebirgsdurchlässigkeit in der Vergangenheit, z. B. durch Eisauflast in einer Kaltzeit stattgefunden hat, lässt sich anhand der vorliegenden stratigrafischen und tektonischen Verhältnisse bewerten. Hieraus können beispielsweise die Zeiträume der Entstehung von Klüften durch tektonische oder diagenetische Prozesse abgeleitet werden.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

Im StandAG wird nicht näher definiert, welche Veränderungen der Gebirgsdurchlässigkeit als „nicht wesentlich“ einzustufen sind. Hierfür kann nach Auffassung der Autoren die Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG herangezogen werden, wonach die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG $< 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sein muss.

Als „wesentlich“ wäre nach Ansicht der Autoren eine Änderung in der Gebirgsdurchlässigkeit dann zu verzeichnen, wenn sich die Wertungsgruppe für die Bewertungsgröße „charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ gemäß § 24 Anlage 1 geändert hat.

Anlage 6 des StandAG

Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten.

Das Kriterium gliedert sich gemäß StandAG (2017) in die folgende bewertungsrelevante Eigenschaft und die dazugehörigen Bewertungsgrößen auf:

1. bewertungsrelevante Eigenschaft: Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit.

Bewertungsgröße(n):

- a) Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit.
- b) Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen.
- c) Duktilität des Gesteins.
- d) Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung.
- e) Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung.
- f) Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
a) < 10	a) 10 - 100	a) > 100
b) Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.	b) Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	b) Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend geringdurchlässig identifiziert.
c) Duktil/plastisch-viskos ausgeprägt.	c) Spröde-duktil bis elastovisko-plastisch wenig ausgeprägt.	c) Spröde, linear-elastisch.
d) Die Risssschließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	d) Die Risssschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringern in Verbindung mit sekundären Mechanismen, zum Beispiel Quelldeformationen.	d) Die Risssschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).
e) Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich.	e) -	e) Rissverheilung nur durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation).

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
f) Bewertung überwiegend „günstig“: Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten.	f) Bewertung überwiegend „bedingt günstig“: Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Fluidwegsamkeiten.	f) Bewertung überwiegend „weniger günstig“: Bildung von dauerhaften sekundären Fluidwegsamkeiten zu erwarten.

Erläuterung:

Zu den Bewertungsgrößen:

- a) Während sich die Gebirgsdurchlässigkeit aus der Durchlässigkeit des Gesteinskörpers (durchflusswirksamer Porenraum bzw. effektive Porosität) sowie des Trennflächengefüges (z. B. Klüfte, Störungen) zusammensetzt, ist die Gesteinsdurchlässigkeit die Durchlässigkeit der ungestörten, ungeklüfteten Gesteinsmatrix. Gemäß Kommission (2016) soll die repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit gleich der Gesteinsdurchlässigkeit sein und die Durchlässigkeit des Trennflächengefüges somit nicht die Durchlässigkeit des Gesteinskörpers übersteigen. Je geringer das Verhältnis dieser beiden Größen ist, desto besser übertragbar ist die Gesteinsdurchlässigkeit, unter Berücksichtigung ihrer Streubreite, auf die zu betrachtende Gebirgsdurchlässigkeit.
- b) Erfahrungen bzw. Erfahrungsberichte basieren auf Literaturstudien zu den zu untersuchenden Gebirgsformationen, es kommen somit für die Bewertung dieser Bewertungsgröße keine Messmethoden zum Einsatz. Die Darstellung der Erfahrungen zur Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen ist daher nicht Gegenstand der weiteren Betrachtung dieses Vorhabens.
- c) Steinsalz kann sich schon bei relativ geringen Drücken und Temperaturen duktil verformen und daher innerhalb des geforderten sicheren Einschlusses von 1 Mio. Jahre als fließfähig angesehen werden. Des Weiteren ist Steinsalz, im Gegensatz zu Tongestein, weniger kompressibel, wodurch sich die Dichte auch in größeren Teufen vergleichsweise weniger stark verändert. Jedoch ist die Duktilität keine hydrologische, hydrogeologische oder hydrogeochemische Messgröße daher nicht Gegenstand der weiteren Betrachtung durch das Vorhaben.
- d) Die Rückbildbarkeit von Rissen erfolgt durch Rückbildung der Sekundärpermeabilität infolge von Risssschließung. Bei Kristallingestein ist die natürliche Rückbildbarkeit von Rissen generell nur in geringem Maße gegeben, während diese insbesondere im Steinsalz, aber auch im Tongestein stärker ausgeprägt ist. Da die Risssschließung im Wesentlichen abhängig ist von den mineralogischen und (geo-)mechanischen Gesteinseigenschaften (wie Kriechrate, Quellverhalten, Deformationsverhalten, Duktilität) und keine hydrologische, hydrogeologische oder hydrogeochemische Messgröße darstellt, ist dieses Kriterium daher nicht Gegenstand der weiteren Betrachtung durch dieses Vorhaben.
- e) Die Rückbildbarkeit von Rissen erfolgt durch die Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung, welche im Wesentlichen durch geochemische Prozesse induziert wird.
- f) Bei der zusammenfassenden qualitativen Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten kommen keine Messmethoden zum Einsatz. Diese Beurteilung ist daher nicht Gegenstand der weiteren Betrachtung durch das Vorhaben.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

Keine.

Anlage 7 des StandAG

Kriterium zur Bewertung der Gasbildung.

Das Kriterium gliedert sich gemäß StandAG (2017) in die folgende bewertungsrelevante Eigenschaft und dazugehörige Bewertungsgröße.

1. bewertungsrelevante Eigenschaft: Gasbildung.

Bewertungsgröße(n): Wasserangebot im Einlagerungsbereich.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	feucht

Erläuterung:

Gasbildung entsteht u. a. durch Korrosion der metallischen Behälter bei Kontakt mit Lösungen, welche im tiefeingeologischen Endlager als frei bewegliches Grundwasser und/oder als immobilisiertes Porenwasser, d. h. im Porenraum des Gesteins eingeschlossenes Fluid, vorliegen kann. Aufgrund des resultierenden Gasdrucks kann die Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren durch Rissbildung beeinträchtigt werden, wenn der Gasdruck den Aufreißdruck (Fracdruck) des Gesteins überschreitet (Kommission 2016).

Die Gasbildung ist abhängig von dem Wasserdargebot im Einlagerungsbereich, welches sich aus der Restfeuchte der radioaktiven Abfälle (welche in den Annahmebedingungen für das Endlager festgelegt werden) und des Verfüllmaterials, dem Sättigungsgrad der Porenluft sowie des zutretenden Grundwassers aus dem ewG ergibt. Auch die mikrobielle Aktivität beeinflusst die Gasbildung im Einlagerungsbereich.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

i. „feucht“, „trocken“:

Die Begriffe „feucht“ und „trocken“ in den Wertungsgruppen der Bewertungsgröße „Wasserangebot im Einlagerungsbereich“ werden im StandAG (2017) sowie in Kommission (2016) weder quantifiziert noch näher beschrieben.

Das Grundwasserdargebot im Einlagerungsbereich wird im Wesentlichen durch den Wassergehalt in den Porenräumen des Gesteins sowie, in Abhängigkeit von der Gebirgsdurchlässigkeit des ewG, durch den Wasserfluss in zusammenhängenden Porenräumen und Klüften beeinflusst. Der Restfeuchtegehalt der Abfälle und des Verfüllmaterials beeinflusst das Grundwasserdargebot ebenfalls, ist aber keine relevante Messgröße im Rahmen dieses Vorhabens (vgl. Abschnitt 1.2) und fließt daher nicht in die weitere Bewertung ein.

Bei einer Bewertung der Diffusion von Wasserdampf in den Porenräumen der Gesteinsmatrix sowie dem Wasserzutritt aus dem ewG können in Abhängigkeit von der Gesteins- bzw. Gebirgsdurchlässigkeit und der effektiven Porosität die Wertungsgruppen hinsichtlich der Anforderungen „trocken“ und „feucht“ wie folgt interpretiert werden:

- Wertungsgruppe „günstig“: Die Gesteinsformation, welche dieser Wertungsgruppe zuzuordnen ist, besitzt sowohl eine sehr geringe Permeabilität als auch effektive Porosität, wodurch kein advektiver Wasserfluss im Porenraum stattfinden kann. Da das

Verdampfen von Porenwasser z. B. aufgrund von Temperaturerhöhung nicht vermieden werden kann, wird die Feuchtigkeit im Einlagerungsbereich somit im Wesentlichen durch die Wasserdampfdiffusion in den Porenräumen beeinflusst. Aus Sicht der Autoren kann unter diesen Bedingungen, in Verbindung mit der geforderten günstigen Gebirgsdurchlässigkeit von $< 10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (entsprechend Anlage 1 des StandAG zu „Grundwasserangebot“) das Gestein als „trocken“ definiert werden.

Wertungsgruppe „bedingt günstig“: Zusätzlich zur Wasserdampfdiffusion im Porenraum kann bei entsprechendem Dargebot zusätzlich Grundwasser in den Einlagerungsbereich zutreten. Dieser Zutritt wird jedoch bei einer Gebirgsdurchlässigkeit $\leq 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ begrenzt durch die abdichtende Funktion des ewG.

- Wertungsgruppe „weniger günstig“: Bei Gebirgsdurchlässigkeiten $> 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wird das Wasserdargebot im Wesentlichen durch den advektiven Wasserfluss im Poren- und Kluftraum bestimmt. Die Diffusion des Wasserdampfes im Porenraum spielt hier nur noch eine untergeordnete Rolle.

Diese Bewertungsgröße ist somit auch im Zusammenhang mit Anlage 1 („Grundwasserangebot“) des StandAG zu betrachten.

ii. Einlagerungsbereich:

Die Ausdehnung des „Einlagerungsbereiches“ für ein Endlagersystem, das auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht, wird im StandAG nicht spezifiziert (vgl. Abschnitt 2.1).

Anlage 9 des StandAG

Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Das Kriterium gliedert sich gemäß StandAG (2017) in die folgende bewertungsrelevante Eigenschaft und dazugehörige Bewertungsgröße.

1. bewertungsrelevante Eigenschaft: Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Bewertungsgröße(n): K_d -Wert für langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor.	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium.	–

Erläuterung:

Gemäß StandAG (2017) sollen die barrierewirksamen Gesteine des ewG gegenüber den langzeitrelevanten Radionukliden ein möglichst hohes Rückhaltevermögen besitzen. Als Indikatoren werden hierfür genannt:

- die Sorptionsfähigkeit der Gesteine beziehungsweise die Sorptionskoeffizienten für die betreffenden Radionuklide,

- ein möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate,
- eine möglichst hohe Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere sowie
- Öffnungsweiten der Gesteinsporen im Nanometerbereich.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

- i. „möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche“

Neben der Sorption an den Oberflächen der Minerale spielen auch solche Wechselwirkungen eine Rolle, wodurch die Radionuklide in die Mineralphasen eingebaut werden (s. Abschnitt 4.11). Dieser Indikator sollte sich daher nach Ansicht der Autoren nicht nur auf die Größe der Oberfläche beschränken, sondern allgemein auf die Fähigkeit der Mineralphasen, Radionuklide an Oberflächen zu sorbieren und in die Mineralstruktur einbauen zu können.

Der Gehalt solcher Mineralphasen ist u. a. stark abhängig von der jeweiligen Gesteinsformation, weshalb hier eine genauere quantitative Vorgabe durch das StandAG auch nicht zielführend wäre.

- ii. „möglichst hohe Ionenstärke des Grundwassers“:

Der Einfluss der Ionenstärke auf die Sorption hängt u. a. stark vom jeweiligen Radionuklid sowie der spezifischen Grundwasserzusammensetzung ab. Bei Tongestein verschieben höhere Ionenstärken das Austauschgleichgewicht und können so die Sorption von Radionukliden an den Oberflächen der Mineralphasen vermindern (Cloet et al. 2014). Bei einwertigen Radionukliden besteht eine lineare, bei zweiwertigen bereits eine quadratische Abhängigkeit des Sorptionskoeffizienten (K_d -Wert) zum inversen Wert der Ionenstärke, d. h. bei Erhöhung der Ionenstärke verringert sich der K_d -Wert und die Löslichkeit der Radionuklide nimmt zudem bei sehr hohen Ionenstärke zu. Die Sorption von Radionukliden muss aber immer zusammen mit der Diffusion betrachtet werden, da mit steigender Ionenstärke die Anionen wiederum vermehrt in die Tonminerale hineindiffundieren können (Cloet et al. 2014). Eine hohe Ionenstärke bewirkt generell eine Abnahme der Stabilität von Kolloiden.

Der Indikator „Ionenstärke“ sollte daher sehr differenziert für das jeweilige Radionuklid und die Gesteinsformation betrachtet werden, da ein hoher Wert sich nicht unter allen Bedingungen günstig auf die Sorptionsmechanismen auswirkt.

Anlage 10 des StandAG

Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse.

Das Kriterium gliedert sich gemäß StandAG (2017) in die folgende bewertungsrelevante Eigenschaft und dazugehörige Bewertungsgröße auf:

1. bewertungsrelevante Eigenschaft: Chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und festen Mineralphasen des ewG.

Bewertungsgröße(n):

- a) ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser,
- b) neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers,
- c) ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers,

- d) ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser und
- e) eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser.

Wertungsgruppe: Keine Einteilung in Wertungsgruppen.

Erläuterung:

Die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und die festen Mineralphasen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen sich auch nach dem Einbringen von Behälter- und Ausbaumaterial positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und das Material technischer und geotechnischer Barrieren chemisch möglichst nicht angreifen (StandAG 2017).

Die Löslichkeit der Radionuklide wird beeinflusst durch das geochemische Milieu (insbesondere durch den pH- und Eh-Wert), sowie die Konzentration an Komplexbildnern und Kolloiden.

In Kommission (2016) wird hervorgehoben, dass aufgrund des gegenwärtigen Kenntnisstandes keine flächendeckenden Aussagen zur Charakterisierung und Beurteilung von Standortregionen und Standorten auf der Basis hydrochemischer Kriterien möglich sind. Die im StandAG genannten Bewertungsgrößen können aber als Indikatoren für günstige hydrochemische Verhältnisse dienen (Kommission 2016). Im Zuge der übertägigen Erkundung werden dann vertiefte Kenntnisse über die hydrogeochemischen Verhältnisse gewonnen.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

Die folgenden Bewertungsgrößen werden im StandAG nicht quantifiziert:

- „ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser“,
- „eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser.“

Der in Anlage 10 verwendete Begriff des „Tiefenwassers“ ist zudem nicht genau definiert, häufig wird hierunter auch „totes“ bzw. „stagnierendes“ Wasser gefasst (Mattheß 1990), also Grundwasser, welches im Gestein eingeschlossen ist und nicht am aktiven Wasserkreislauf teilnehmen kann. Daher sollte dieser Begriff durch „tiefe Grundwässer“ in Abgrenzung zu den oberflächennahen, jungen Grundwässern (s. Abschnitt 2.1) ersetzt werden (Hölting & Coldewey 2012).

Anlage 11 des StandAG

Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge.

Das Kriterium gliedert sich gemäß StandAG (2017) in die folgende bewertungsrelevante Eigenschaft und dazugehörige Bewertungsgröße.

1. bewertungsrelevante Eigenschaft: Schutz des ewG durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion).

Bewertungsgröße(n): Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge.

Wertungsgruppe:

günstig	bedingt günstig	ungünstig
Mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge.	Flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Überdeckung, flächenhafte, aber lückenhafte bzw. unvollständige Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge.	Fehlende Überdeckung, Fehlen grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge.

Erläuterung:

Nach StandAG (2017) soll das Deckgebirge durch seine Mächtigkeit sowie seinen strukturellen Aufbau und seine Zusammensetzung „möglichst langfristig zum Schutz des ewG gegen direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Vorgänge beitragen“.

Hinweise zu ungenauen/unvollständigen Begriffsdefinitionen im StandAG:

- i. Nicht nur das Deckgebirge, d. h. die Gesteinsschichten, welche den ewG bis zur Oberfläche überlagern, sondern auch das Nebengebirge, d. h. die Gesteinsschichten, die sich seitlich außerhalb des ewG befinden, sollte hinsichtlich der Bewertung des Schutzes des ewG mitberücksichtigt werden.
- ii. Ein Grundwasserhemmer ist in DIN 4049-3 (1994) definiert als „Gesteinskörper, der im Vergleich zum benachbarten Gesteinskörper gering wasserdurchlässig ist. Der Begriff „Grundwasserhemmer“ ist im StandAG für die gegenständliche Aufgabenstellung im Standortauswahlverfahren nicht hinreichend eingegrenzt, da die in der Standardliteratur angegebenen typischen Durchlässigkeiten für Grundwasserhemmer oder -nichtleiter mit $< 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (AD-HOC-AG 1997) erheblich höher sind als die in § 23 StandAG für die geforderte Gebirgsdurchlässigkeit von $< 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (vgl. Anlage 2 des StandAG).
- iii. Das Kriterium gibt keine Quantifizierung vor, ab wann das Gestein die Anforderung „grundwasserhemmend“ zu sein hinreichend erfüllt, um das Schutzziel des geforderten sicheren Einschlusses gemäß StandAG (2017) einzuhalten.
Dieses Kriterium kann nach Auffassung der Autoren erst bei einem Standortvergleich herangezogen werden, wenn die Schutzfunktion des ewG bereits bewertbar ist. Die Anforderung an eine den ewG überlagernde Gesteinsschicht, die Durchströmung mit Grundwasser zu minimieren, richtet sich nach der Durchlässigkeit des Gesteins und der Abstandsgeschwindigkeit. Diese beiden Messgrößen müssen in einer Größenordnung vorliegen, durch welche der geforderte sichere Einschluss erfüllt bzw. weiter verbessert wird.

3. Relevante Messgrößen zu transportrelevanten Gesteinseigenschaften

Die relevanten Messgrößen zu den transportrelevanten Gesteinseigenschaften, welche entsprechend der Ergebnisse aus Kapitel 2 entweder direkt aus den Bewertungsgrößen des StandAG entnommen oder daraus abgeleitet wurden, werden nachfolgend definiert und näher erläutert. Zusätzlich wird eine begründete wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung getroffen hinsichtlich der Notwendigkeit, ob die jeweilige Messgröße grundsätzlich für das entsprechende Wirtsgestein Steinsalz, Tongestein bzw. Kristallingestein (StandAG 2017) zu erheben ist bzw. erhoben werden kann.

3.1. Abstandsgeschwindigkeit

Herleitung aus: Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserströmung“
Anlage 11 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Schutz des ewG“

Definition

Die Abstandsgeschwindigkeit ist definiert als Geschwindigkeit eines Wasserteilchens, welches die Fließstrecke geradlinig, d. h. ohne Berücksichtigung der Fließwegveränderungen durch die Geometrie des durchströmten Porenraumes, in einem porösen Medium zurücklegt (Hölting & Coldewey 2012).

Das allgemeine Strömungsgesetz nach Henry DARCY (1856) wurde für laminare Strömungsverhältnisse in einem porösen Medium entwickelt, in welchen die laminare Strömung in einem vernetzten Porenraum abläuft. Dieser Ansatz ist jedoch bedingt auch für Festgesteine anwendbar, in welchen das Grundwasser im Gegensatz zum Lockergestein über Trennflächen, Klüfte, Scherzonen oder Lösungshohlräume zirkuliert (Karrenberg 1981). Dies setzt jedoch voraus, dass die Anordnung der Klüfte, Spalten und Trennflächen in den Festgesteinen die Gültigkeit des DARCY-Gesetzes nicht wesentlich einschränkt. In der Regel wirken aber nicht die Geometrie der Hohlräume maßgeblich beschränkend, sondern der hydraulische Gradient und die Durchlässigkeit, da bei einem Anstieg dieser beiden Messgrößen das laminare Strömen in ein turbulentes Strömen übergeht. Die Durchströmung von Festgestein erfolgt im Allgemeinen mit langsamen Fließgeschwindigkeiten und kann damit näherungsweise als laminar angesehen werden.

Die allgemeine DARCY-Gleichung lautet:

$$\vec{v} = \frac{K}{\mu} \nabla(p_w - \rho_w g h_p) \quad (3-1)$$

mit

\vec{v}	Vektor der Filtergeschwindigkeit	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
K	Permeabilitätskoeffizient	$[\text{m}^2]$
μ	dynamische Viskosität	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$
p_w	Porenwasserdruck	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}] = [\text{Pa}]$
ρ_w	Dichte von Wasser	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
g	Erdbeschleunigung	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
h_p	hydraulische Druckhöhe	$[\text{m}]$

Die DARCY-Gleichung vereinfacht sich für den eindimensionalen Fall und unter der Annahme, dass die Dichte von Wasser ortsunabhängig ist, zu:

$$v_x = k_f \frac{\Delta h_p}{l} = k_f \cdot i \quad (3-2)$$

mit

v_x	Filtergeschwindigkeit in x-Richtung	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
Δh_p	Druckhöhenunterschied	$[\text{m}]$
l	Fließlänge	$[\text{m}]$
i	hydraulischer Gradient	$[1]$

Die Filtergeschwindigkeit stellt nicht die wahre Geschwindigkeit dar, mit der sich Wasserteilchen bewegen, sondern ist eine über den Querschnitt gemittelte Geschwindigkeit unter der Annahme, dass der Querschnitt voll durchflusswirksam ist (Mattheß 1990):

$$v_x = \frac{Q}{A} \quad (3-3)$$

mit

Q	Wassermenge	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
A	voll durchströmte Querschnittsfläche	$[\text{m}^2]$

Da die Grundwasserströmung aber nur im durchflusswirksamen Porenraum (effektive Porosität n_e) stattfinden kann, wird diese näherungsweise mit Hilfe der **Abstandsgeschwindigkeit** v_a angegeben (Mattheß 1990):

$$v_a = \frac{v_x}{n_e} \quad (3-4)$$

mit

v_a	Abstandsgeschwindigkeit	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
n_e	effektive Porosität	$[1]$

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein	
Tongestein	X	Tongestein kann im Felsverband Klüfte enthalten, welche sich durch geologische Prozesse (z. B. Störungen, Verformung) gebildet haben und meist in stark genetisch überprägten und verfestigten Tongesteinen auftreten (Larue et al. 2010). Der Darcy-Ansatz ist somit auf Tongestein übertragbar und die Abstandsgeschwindigkeit eine relevante und messbare Größe.
Steinsalz	-	Der DARCY-Ansatz wird bei Steinsalz erst nach Überschreitung des hydraulischen Drucks (die sog. Perkolationsschwelle) und Beanspruchungen oberhalb der Dilatanzfestigkeit anwendbar, welcher die Dichtigkeit des Steinsalzes herabsetzt und dadurch eine Öffnung und Vernetzung von Fließwegen ermöglicht. Die Abstandsgeschwindigkeit bei Durchströmung des unverritzten Wirtsgesteinskörpers mit Grundwasser ist somit für Steinsalz keine relevante Messgröße.
Kristallingestein	X	Kristallingestein kann im Felsverband Klüfte enthalten, welche sich z. B. durch geologische Prozesse (z. B. Störungs- und Entlastungszonen, tektonische Hebung, Abkühlungsprozesse) gebildet haben. Der DARCY-Ansatz ist somit eingeschränkt auf das Kristallingestein übertragbar und die Abstandsgeschwindigkeit eine relevante und messbare Größe.

3.2. Gebirgsdurchlässigkeit

Herleitung aus: § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG, Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“
 Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserangebot“
 Anlage 2 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Potenzialbringer“ bei Tongestein

Definition

Die Durchlässigkeit (Permeabilität) eines Stoffes gibt an, wie gut der Fluidfluss in dem entsprechenden Stoff geleitet wird. Es ist ein materialspezifischer Kennwert, der nur von den Eigenschaften des durchströmten Mediums (Geometrie des Porenraumes) abhängt und unabhängig von den Eigenschaften des durchströmenden Fluides ist. Als **Gesteinsdurchlässigkeit** wird die Porendurchlässigkeit der ungestörten, ungeklüfteten Gesteinsmatrix bezeichnet (Hölting & Coldewey 2012).

Im Gegensatz dazu ist die **Gebirgsdurchlässigkeit** die integrale Permeabilität der gesamten Gebirgsformation, welche die Gesteinsmatrix und das Trennflächengefüge einschließt und stark von der Größe des untersuchten Gebirgsvolumens abhängig ist. Während in räumlich eng begrenzten Systemen die gemessene Permeabilität meist geringere Werte aufweist, steigt diese mit der Größe des Untersuchungsgebietes an, da der Einfluss von Klüften als Hauptfließwege zunimmt.

Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps als bewertungsrelevante Eigenschaft zu „Grundwasserangebot“ (Anlage 1 zu § 24 Abs. 3 StandAG) setzt sich aus der Gesteinsdurchlässigkeit sowie der Gebirgsdurchlässigkeit zusammen und leitet sich rechnerisch aus dem DARCY-Gesetz ab (Gl. 3-1) (Mattheß 1990).

Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit weist insbesondere im Kristallingestein eine Skalenabhängigkeit auf, d. h. je nach Proben- bzw. Ausdehnung des Untersuchungsbereiches werden unterschiedliche Werte ermittelt. Aufgrund der Tatsache, dass die Prozesse immer stärker durch die Untergrundheterogenität beeinflusst werden, sind im regionalen Maßstab meist höhere Gebirgsdurchlässigkeiten als bei Labormessungen an Bohrproben zu erwarten.

Die Kenngröße für die Durchlässigkeit ist der **hydraulische Durchlässigkeitsbeiwert** k_f , (k_f -Wert) welcher sich aus dem DARCY-Gesetz ableitet (Gl. 3-1) und als Maß für den reibungsbedingten Energieverlust des Grundwassers bei Durchströmung des Porenraumes unter der Wirkung eines hydraulischen Gradienten gilt (Bahadir et al. 2000). Der k_f -Wert hängt, im Gegensatz zur Permeabilität, von den physikalischen Eigenschaften (dynamische Viskosität μ , Dichte ρ) des durchströmenden Fluides, den Eigenschaften des durchströmten Gesteins (Korngröße, Porenraumfüllung, Verfestigungsgrad) sowie der Erdbeschleunigung g ab (Hölting & Coldewey 2012). Der Durchlässigkeitsbeiwert und die Permeabilität hängen somit wie folgt zusammen:

$$k_f = K \cdot \frac{\rho_w}{\mu} \cdot g \quad (3-5)$$

mit

K	Permeabilität	$[m^2]$
ρ_w	Dichte von Wasser	$[kg \cdot m^{-3}]$
g	Erdbeschleunigung	$[m \cdot s^{-2}]$
μ	Dynamische Viskosität	$[kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$

Die **Transmissivität** T ist das Maß für die Gesamtdurchlässigkeit der durchströmten, grundwasserleitenden Schicht und gibt an, welcher Volumenstrom Q einer Flüssigkeit mit einer definierten dynamischen Viskosität μ durch einen 1 m breiten Querschnitt eines durchströmten Gebirges fließt, der die gesamte Mächtigkeit h_m des durchströmten Gebirges umfasst.

Die Transmissivität ergibt sich aus der Summe der Produkte von k_f -Werten und der Mächtigkeit h_m der durchströmten grundwassererfüllten Schichten (Hölting & Coldewey 2012):

$$T = \sum_{i=1}^n (k_{f_i} \cdot h_{m_i}) \quad (3-6)$$

mit

T	Transmissivität	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
h_m	Mächtigkeit des durchströmten Bereiches	$[m]$

Mit Hilfe der Transmissivität lässt sich die Inhomogenität des durchströmten Gebirges, welches aus Schichtfolgen besteht, somit besser abbilden als mit dem reinen k_f -Wert (Hölting & Coldewey 2012).

Die Einteilung der Durchlässigkeit für Lockergesteine wie Sande und Kiese und grundwasserführende Festgesteine erfolgt in der Standardliteratur (Höiting & Coldewey 2012, Mattheß 2000) sowie in der DIN 18130-1 (1998) (ersetzt durch DIN EN ISO 17892-11 (2019)) vor dem Hintergrund der potenziellen Grundwassererschließung und -gewinnung, weshalb die Einteilung in schwach/gering durchlässige Gesteine im Bereich von 10^{-6} bis $10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. für sehr schwach/gering durchlässige Gesteine im Bereich von 10^{-8} bis $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ liegt. Diese Klassifizierung ist jedoch nicht übertragbar auf die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG für eine geforderte Gebirgsdurchlässigkeit unterhalb von $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (s. auch die Hinweise zu Anlage 2 in Abschnitt 2.3).

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein	
Tongestein	X	Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit ist für Tongestein zu ermitteln.
Steinsalz	X	Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit ist für Steinsalz zu ermitteln. Der unverritzte, ungestörte Salzkörper besitzt eine sehr geringe Permeabilität, mit charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeiten, welche im Bereich von 10^{-20} m^2 angegeben werden (Beauheim & Roberts 2002). Aufgrund der Lagerung/Tektonik können allerdings Heterogenitäten und gestörte/aufgelockerte Bereiche auftreten, sowie innerhalb der Salzformation lagenweise Schichten (z. B. Ton) eingeschaltet sein.
Kristallingestein	X	Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit ist für Kristallingestein zu ermitteln.

3.3. Effektiver Diffusionskoeffizient

Herleitung aus: Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit“

Definition

Bewertungsgröße für die Diffusionsgeschwindigkeit ist der charakteristische effektive Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser bei 25 °C, sowie für Tongesteine zusätzlich die absolute Porosität und der Verfestigungsgrad.

Die Diffusion, oder molekulare Diffusion D_m , ist ein Massetransport, der in einem irreversiblen Prozess vorhandene Konzentrationsgefälle ausgleicht. Nach dem 1. Fick’schen Gesetz für die stationäre Diffusion ist die am Ort x senkrecht durch die Fläche A diffundierende Stoffmenge n pro Zeiteinheit dt proportional dem Konzentrationsgradienten $\frac{dc_i}{dx}$.

$$\frac{dn_i}{dt} \cdot \frac{1}{A} = J_i = -D_{m,i} \cdot \frac{dc_i}{dx} \tag{3-7}$$

mit

n_i	Stoffmenge der Komponente i	[mol]
t	Zeit	[s]
A	Fläche	[m ²]
J_i	Diffusionsstromdichte der Komponente i	[kg·s ⁻¹]
$D_{m,i}$	Diffusionskoeffizient der Komponente i	[m ² ·s ⁻¹]
$\frac{dc_i}{dx}$	Konzentrationsgradient der Komponente i in x-Richtung	[kg·m ⁻³]

Unter Berücksichtigung der orts- und zeitabhängigen Änderung der Stoffmengenkonzentration c_i wird der instationäre Diffusionsvorgang mit Hilfe des 2. Fick'schen Gesetzes beschrieben (Mattheß 2000):

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_{m,i} \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \quad (3-8)$$

Im Lockergestein kann die Diffusion in durchflusswirksamen und miteinander verbundenen Porenkanälen ablaufen. In der Festgesteinsmatrix wird die Diffusion maßgeblich von der Rauigkeit der Kluftoberflächen beeinflusst. Aufgrund dieser Effekte wird der **effektive Diffusionskoeffizient** $D_{m,i}^*$ verwendet, welcher die diffusionswirksame Porosität und Tortuosität berücksichtigt (Mattheß 2000):

$$D_{m,i}^* = D_{m,i} \cdot \frac{n_e^*}{\tau} \quad (3-9)$$

mit

$D_{m,i}^*$	effektiver Diffusionskoeffizient der Komponente i	[m ² ·s ⁻¹]
n_e^*	diffusionswirksame Porosität	[1]
τ	Tortuosität	[1]

In der wasserungesättigten Zone wird der effektive Diffusionskoeffizient zusätzlich durch den Wassergehalt im Porenraum beeinflusst (Mattheß 2000).

In hydrodynamischen Systemen wird die Änderung der Stoffmengenkonzentration außerdem durch die Dispersion beeinflusst und mit Hilfe der hydrodynamischen Dispersion D beschrieben. Das 1. Fick'sche Gesetz ergibt sich in hydrodynamischen Systemen damit wie folgt:

$$D_{m,i}^* = -(D_m + D) \cdot \left(\frac{\partial c_i}{\partial x}\right)_i \quad (3-10)$$

Die hydrodynamische Dispersion setzt sich zusammen aus der molekularen Diffusion und der hydromechanischen Dispersion und bewirkt eine räumliche Aufweitung der Konzentrationsverteilung im Grundwasserleiter. Ursachen hierfür liegen in unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilungen im durchströmten Medium, im Mikrobereich bedingt durch die Porengeometrie (Tortuosität, s. Abschnitt 3.7), im Makrobereich, d. h. mit zunehmender Transportstrecke, auch durch die Korngrößenverteilung und die strukturellen Eigenschaften der grundwasserleitenden Schichten wie z. B. Klüfte oder Mächtigkeit (Hammer 2003). Die hydromechanische Dispersion ist somit, bedingt durch

die Heterogenität der durchströmten Schichten, stark skalenabhängig (s. Abbildung 3-1) und tritt nur dann auf, wenn eine Grundwasserbewegung stattfindet (Mattheß 2000).

Als Maß für die hydromechanische Dispersion dient der Dispersionskoeffizient, welcher von der Grundwassergeschwindigkeit und der geschwindigkeits-unabhängigen Gesteinseigenschaft der Dispersionslänge (Dispersivität) α abhängt. Im Gegensatz zum Diffusionskoeffizienten ist der Dispersionskoeffizient richtungsabhängig (d. h. anisotrop), mit einer longitudinalen (in Fließrichtung, α_L) und transversalen (senkrecht zur Fließrichtung, α_T) Komponente.

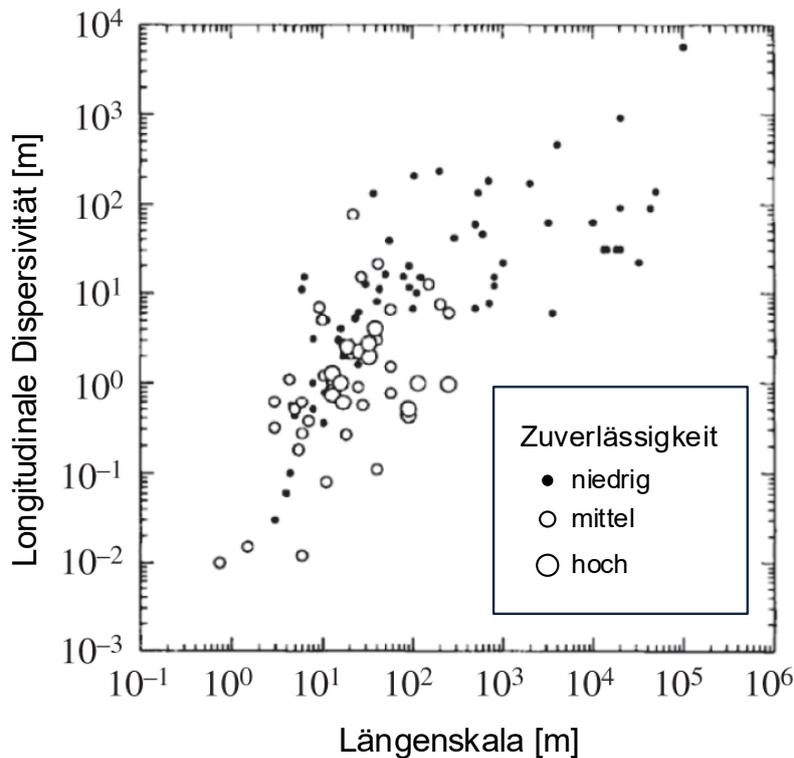


Abbildung 3-1: Zusammenhang zwischen der Größe des betrachteten Gebiets und der longitudinalen Dispersivität (nach Gelhar et al. (1983)).

Während eine Dispersion nur erfolgt, wenn ein hydraulischer Gradient vorliegt, kann eine Diffusion gelöster Stoffe auch dann ablaufen, wenn kein hydraulischer Gradient vorliegt und somit keine Grundwasserströmung stattfindet. Insbesondere bei geologischen Barrieren mit geringer Durchlässigkeit darf der diffusionsgetriebene Stofftransport daher nicht vernachlässigt werden. Demgegenüber kann die Dispersion in Gebirgsbereichen mit sehr geringen Durchlässigkeiten vernachlässigt werden.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein	
Tongestein	X	Der effektive Diffusionskoeffizient ist für Tongestein zu ermitteln, da die Diffusion für Tongestein mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit den dominierenden Transportmechanismus darstellt.
Steinsalz	X	Die Diffusion ist insbesondere im (unverritzten) Steinsalz der Haupttransportmechanismus für Fluide, da in diesem Gestein die effektive Porosität zu gering für einen signifikanten Wasserfluss ist. Der effektive Diffusionskoeffizient ist für Steinsalz zu ermitteln.
Kristallingestein	X	Der effektive Diffusionskoeffizient ist für Kristallingestein zu ermitteln, da die Diffusion für Kristallingestein mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit den dominierenden Transportmechanismus darstellt.

3.4. Porosität des Gesteins

Herleitung aus: Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“

Definition

Der Anteil des Porenvolumens am Gesteinsvolumen, welcher sowohl das gesamte luftgefüllte, als auch das wassergefüllte Porenvolumen umfasst wird als **absolute Porosität** oder Gesamtporosität n bezeichnet (s. Abbildung 3-2).

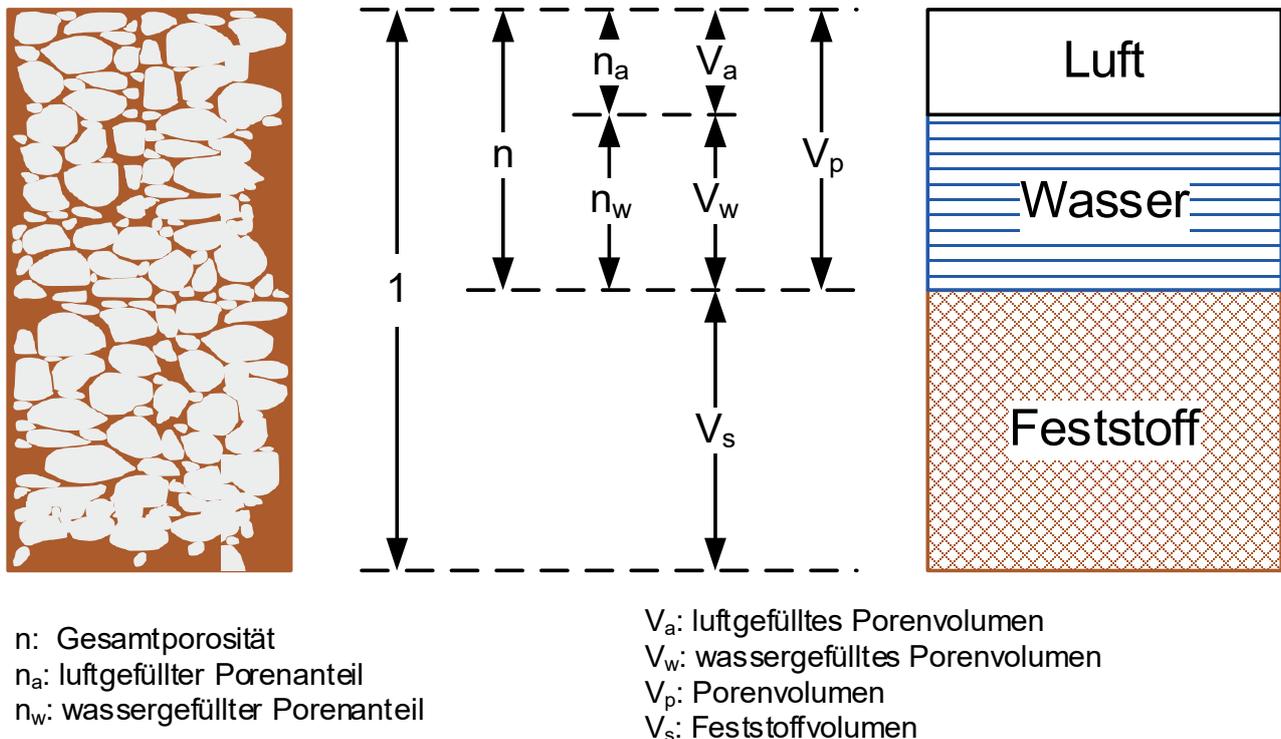


Abbildung 3-2: Dreiphasenmodell des Bodens (schematisch).

Im Gegensatz dazu umfasst die durchflusswirksame oder **effektive Porosität** n_e nur dasjenige Porenvolumen, welches aus untereinander verbundenen Porenräumen besteht und für die Grundwasserströmung zur Verfügung steht. Dieses berechnet sich aus dem Quotienten des durchströmbareren zum Gesamtporenvolumen:

$$n_e = \frac{V_{p,eff}}{V_{p,ges}} \tag{3-11}$$

mit

n_e	effektive Porosität	[1]
$V_{p,eff}$	durchströmbares Porenvolumen	[m ³]
$V_{p,ges}$	Gesamtporenvolumen	[m ³]

Neben der für Wasser durchflusswirksamen, effektiven Porosität ist insbesondere für geringdurchlässigen Tongestein, in welchem kein oder kaum advektiver Transport stattfinden kann, auch eine diffusionswirksame Porosität n_e^* zu unterscheiden. Diese wird bedingt durch die Oberflächenladung der Tonminerale und ist somit abhängig von den Stoffeigenschaften des diffundierenden Radionuklids, da Nukliden, welche diffusiv in den Porenraum eindringen können, mehr Porenvolumen zur Verfügung steht, als solchen, die dazu nicht oder in geringerem Umfang in der Lage sind (Hiltmann & Stribny 1998).

Im Festgestein setzt sich die effektive Porosität aus der Matrixporosität des Gesteins und der Kluftporosität zusammen, wobei der Beitrag der Kluftporosität an der Grundwasserbewegung i.d.R. deutlich höher als derjenige der Matrixporosität ist. Eine Ausnahme können verfestigte Sedimentgesteine, wie z. B. Tongesteine, bilden.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein	
Tongestein	X	Der Anteil des durchflusswirksamen Porenraums bzw. der effektiven Porosität vom Gesamtporenraum von Tongestein ist abhängig von der Versenkungstiefe und -dauer sowie der Auflast überlagernder Gesteinsschichten (Karrenberg 1981) und kann sich daher sowohl innerhalb eines Standortes als auch zwischen verschiedenen Standorten stark unterscheiden. Sowohl die effektive als auch die absolute Porosität als Indikator für den Verfestigungsgrad sind für Tongestein zu ermitteln.
Steinsalz	X	Im unverritzten Salzkörper ist die effektive Porosität sehr gering (Kuhlmann et al. 2018). Die effektive Porosität ist als transportrelevante Gesteinseigenschaft auch für Steinsalz zu bestimmen.
Kristallingestein	X	Die effektive Porosität kann je nach Art des Kristallingestein und der tektonischen Beanspruchung stark variieren und ist somit als transportrelevante Gesteinseigenschaft auch für Kristallingestein zu ermitteln.

3.5. Verfestigungsgrad (Tongestein)

Herleitung aus: Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“

Definition

Bewertungsgröße für die Diffusionsgeschwindigkeit ist neben dem charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser bei 25 °C, für Tongestein zusätzlich auch der **Verfestigungsgrad**.

Der Verfestigungsgrad bildet zusammen mit der Lagerungsdichte den Konsolidierungsgrad des Gesteins und beeinflusst die geomechanischen Eigenschaften wie Scherfestigkeit und Zugfestigkeit sowie auch die Permeabilität von Tongestein durch Abnahme des Porenvolumens und damit auch der effektiven Porosität mit zunehmender Verfestigung.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein	
Tongestein	X	Der Verfestigungsgrad ist eine für das Wirtsgestein Tongestein relevante Messgröße.
Steinsalz	-	Nicht relevant.
Kristallingestein	-	Nicht relevant.

3.6. Hydraulischer Gradient

Herleitung aus: Anlage 2 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Potenzialbringer bei Tonstein“

Definition

Der **hydraulische Gradient** i ist der Quotient aus dem Druckhöhenunterschied Δh_p (entspricht der Differenz der hydraulischen Druckhöhe) und der Fließlänge l (s. Gl. 3-2). Er wird im Wesentlichen durch meteorologische und hydrogeologische Randbedingungen bestimmt, wie z. B. durch den Grundwasserkreislauf, die Abflussverhältnisse, die Ausdehnung der Neubildungsgebiete etc. Die Wasserbewegung erfolgt entlang dieses Druckgefälles, sofern die Gesteins- bzw. Gebirgsdurchlässigkeit weitestgehend homogen sind.

Die hydraulische Druckhöhe h_p ist abhängig von Dichte des Fluides und berechnet sich wie folgt:

$$h_p = \frac{p}{\rho \cdot g} - z \quad (3-12)$$

mit

p	Druck	[bar]
ρ	Dichte des Fluides	[kg·m ⁻³]
g	Erdbeschleunigung	[m·s ⁻²]
z	geodätische Höhe	[mNN]

Die im Gebirgsbereich vorhandenen Poren- oder Grundwässer - insbesondere im Umfeld von Steinsalzen - können hohe Salzgehalte oder Gehalte anderer Stoffe mit hoher Dichte aufweisen, die eine im Vergleich zum Süßwasser geringere hydraulische Druckhöhe ergeben. Diese muss aus Vergleichbarkeitsgründen entsprechend auf eine äquivalente Süßwasser-Druckhöhe umgerechnet werden. In den nachfolgenden Ausführungen wird als hydraulische Druckhöhe die äquivalente Süßwasser-Druckhöhe bezeichnet.

Wird der ewG von hydraulisch wirksameren Gesteinsschichten, sogenannten „Potenzialbringern“ über- oder unterlagert, kann aufgrund des dadurch entstehenden hydraulischen Gradienten eine Induzierung oder Verstärkung der Grundwasserströmung durch den ewG ermöglicht werden (StandAG 2017, Kommission 2016). Dies führt zu einem erhöhten Beitrag des advektiven im Vergleich zum diffusiven Stofftransport und somit zu einer Erhöhung der Abstandsgeschwindigkeit.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein	
Tongestein	X	Der hydraulische Gradient bedingt durch Potenzialbringer ist für Tongestein aufgrund möglicher Klüfte relevant und zu ermitteln.
Steinsalz	-	Der hydraulische Gradient bedingt durch Potenzialbringer ist für ungestörte Steinsalzformationen nicht relevant.
Kristallingestein	X	Der hydraulische Gradient bedingt durch Potenzialbringer ist für geringdurchlässiges Kristallingestein aufgrund möglicher Klüfte relevant und zu ermitteln.

3.7. Tortuosität

Herleitung aus: Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserdargebot“

Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit“

Definition

Die **Tortuosität** τ gibt an, welchem Widerstand die Wasserbewegung in einem porösen Material aufgrund der Geometrie der Porenräume ausgesetzt ist. Die Bestimmung dieser Größe erfolgt empirisch über den effektiven molekularen Diffusionskoeffizienten D_m^* .

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein	
Tongestein	X	Vgl. Abschnitt 3.3.
Steinsalz	X	Vgl. Abschnitt 3.3.
Kristallingestein	X	Vgl. Abschnitt 3.3.

4. Relevante Messgrößen zur Hydrogeochemie

4.1. Haupt- und Spurenelemente des Fluides

Herleitung aus: Anlage 10 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und festen Mineralphasen des ewG“

Hauptbestandteile des Grundwassers sind die Kationen Natrium, Kalium, Kalzium und Magnesium, die Anionen Chlorid, Sulfat- und Nitratverbindungen sowie Hydrogenkarbonat. Als Neben- und Spurenelemente können alle übrigen Elemente im Grundwasser enthalten sein, insbesondere Eisen-, Mangan- und Ammoniumverbindungen und Anionen wie Phosphat und Fluorid (Jordan & Weder 2001).

Die chemische Beschaffenheit des Grundwassers ist hierbei neben der Beschaffenheit des infiltrierenden Niederschlagswassers und möglichen Mischungen mit Grundwässern anderer Zusammensetzung insbesondere im Wesentlichen abhängig von den Wechselwirkungen mit den durchströmten Gesteinsformationen (Jobmann et al. 2016). Nachfolgend werden daher mögliche, typische Gehalte an Haupt- und Spurenelementen in Grundwässern im Einflussbereich der relevanten Wirtsgesteinsformationen aufgeführt.

Hinsichtlich der Beurteilung des Chemismus und des Gleichgewichtes zwischen dem Grundwasser und dem durchströmten Gestein kann zwischen beweglichem Grundwasser (mobiles Porenwasser) und unbeweglichem Grundwasser (immobiles Porenwasser, auch Formationswasser oder fossiles Grundwasser genannt) unterschieden werden. Bewegliches Grundwasser nimmt aktiv am Wasserkreislauf teil, d. h. der advective Stofftransport überwiegt gegenüber dem diffusiven Transport. Die chemische Beschaffenheit wird somit u. a. von der Beschaffenheit des infiltrierenden Niederschlagswassers, möglichen Mischungen mit Grundwässern anderer Zusammensetzung sowie von den Wechselwirkungen mit den durchströmten Gesteinsformationen beeinflusst. Immobile Porenwässer hingegen bezeichnen Lösungen meist meteorischen Ursprungs, welche während der Gesteinsbildung im Porenraum eingeschlossen wurden und somit über geologische Zeiträume hinweg nicht mehr am Wasserkreislauf teilgenommen haben (Bohn 2013). Sie stehen mit dem umgebenden Gestein somit im Gleichgewicht.

Steinsalz

Der natürliche Wassergehalt von Steinsalz ist abhängig von der Gesteinsbildung und der damit verbundenen Bildung von isolierten Flüssigkeitseinschlüssen. Auflockerungs- oder Kompaktierungsprozesse können Einfluss auf die Mobilisierung und ggf. Freisetzung dieser eingeschlossenen Lösungen haben.

Die in den Porenräumen eingeschlossenen Lösungen unterschiedlichster Volumina des Steinsalzes sind an den Salzen des umgebenden Salinars gesättigt und enthalten hohe Gehalte an festen gelösten Bestandteilen (hoher TDS-Gehalt, *total dissolved solids*). Diese immobilen Porenwässer bewirken somit keine Lösungsprozesse mehr im Gestein. Das dominierende Kation des Steinsalzes ist Natrium, daneben können auch Magnesium oder Kalzium enthalten sein. Das Kalium-Kation liegt immer in geringeren Konzentrationen als die anderen Hauptkationen vor. Das dominierende Anion ist Chlorid, untergeordnet tritt auch Sulfat auf (Bozau & Voss 2016).

Bewegliches Grundwasser aus dem Deck- oder Nebengebirge (d. h. den Gesteinsschichten, die sich seitlich außerhalb der Salzstruktur befinden) hingegen ist überwiegend ungesättigt gegenüber

den Salzen und besitzt daher ein erhebliches Lösungspotenzial bei Kontakt mit dem Steinsalz (Bohn 2013).

Eine mit den Salzmineralen bzw. den Mineralparagenesen in Kontakt kommende Lösung (die z. B. aus dem Deck- oder Nebengebirge in das Salinar eindringt) durchläuft eine charakteristische Entwicklung in Abhängigkeit von der Ausgangszusammensetzung der Lösung und den anstehenden Mineralphasen. Es erfolgt, unter der Voraussetzung einer hinreichenden Verfügbarkeit der entsprechenden Mineralphasen, eine Lösung der Minerale entsprechend ihrer Löslichkeitsprodukte bis zum Erreichen der Sättigung. Es entstehen dabei meist verschiedene Lösungstypen (vgl. Tabelle 4-1), die sich durch einen eigenen Chemismus auszeichnen und sehr unterschiedliches Lösungspotenzial im Salinar besitzen (Bohn 2013). Aufgrund des vergleichsweise schnellen Auflösungsverhaltens von Salzen spielen kinetische Effekte in Salz bei der Lösungszusammensetzung nur eine untergeordnete Rolle.

Grundwasser, welches von Salzwassersystemen beeinflusst wird, weist Dichteänderungen und Viskositätsänderungen auf und damit verbunden auch eine Änderung in den Strömungseigenschaften.

Tabelle 4-1: Beispiele für die Klassifikation von Salzlösungen aus Kali- und Steinsalzbergwerken (verändert nach Bohn (2013)).

Lösungstyp	Salzgehalt [g·l ⁻¹]	Dichte [g·cm ⁻³] (20 °C)
Süßwasser	bis 1	bis 1,001 ± 0,0005
Salzwasser	> 1 - 35	> 1,0005 – 1,03 ± 0,01
Schwach konzentrierte Salzlösung	> 35 – 150	> 1,02 – 1,11 ± 0,01
Konzentrierte Salzlösung	> 150 – 350	> 1,10 – 1,24 ± 0,02
Stark konzentrierte Salzlösung	> 350	> 1,22

Tongestein

Frei bewegliches Grundwasser in verbundenen Poren- oder Klufträumen tritt in kompaktierten, geringdurchlässigen Tongesteinen nicht auf, Ausnahmen bilden Bereiche mit Kluftwegsamkeiten für den advektiven Transport (Hoth et al. 2007). Stattdessen liegt dieses meist in Form von immobilem Porenwasser vor, welches somit eine hohe Kontaktzeit mit dem umgebenden Gestein besitzt. Bedingt durch die kleinen Porenräume und die Struktur der Tonminerale besteht außerdem eine große Kontaktfläche zwischen Porenwasser und Tongestein. Das Porenwasser steht somit im Lösungsgleichgewicht mit dem umgebenden Gestein. Wird dieses bei der Verdichtung des Tongesteins in größeren Tiefen ausgetrieben, kann es, je nach Diagenese des Gesteins, einen hohen Mineralsalzgehalt aufweisen (z. B. bei Tongestein aus der Ablagerung mariner Schlämme) und somit zur Mineralisierung des Grundwassers beitragen.

Grundwasser im Einflussbereich von Tongestein besitzt einen hohen TDS-Gehalt sowie, in Abhängigkeit von den pH- und Redoxbedingungen, hohe Eisen- und Fluoridgehalte.

Kristallingestein

Charakteristisch für Grundwässer im Kristallingestein sind hohe SiO₂-Gehalte, welche in silikatreichen Gesteinen bis zu 55 mg·kg⁻¹ betragen können (Mattheß 1990).

In den überwiegend sauren Magmatiten und in Metamorphiten sind die Gehalte an gelösten Erdalkalien und Alkalien im Grundwasser fast ausschließlich abhängig von der langsam voranschreitenden Silikatverwitterung (Karrenberg 1981). Somit enthält das durchströmende Grundwasser nur geringe Gesamtkonzentration an gelösten Bestandteilen (geringer TDS-Gehalt). In Karrenberg (1981) werden hierzu Gehalte $< 0,3 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ angegeben. Der Karbonatgehalt, sowie Sulfat- und Chlorid-Gehalte sind im Grundwasser meist ebenfalls vernachlässigbar gering. Bei den Verhältnissen Kalzium/Magnesium und Natrium/Kalium überwiegen gelöste Kalzium- und Natrium-Gehalte im Grundwasser.

Im Gegensatz zu den sauren Magmatiten und Metamorphiten herrschen in basischen Magmatiten und Metamorphiten kalzium- und magnesiumhaltige Minerale vor, der TDS-Gehalt ist ebenfalls gering und liegt im Allgemeinen bei $0,4 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ (Karrenberg 1981).

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein
Tongestein	Keine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung, da Fluideigenschaft. Die Messgröße ist für die Erkundung aller Wirtsgesteine relevant.
Steinsalz	
Kristallingestein	

4.2. pH-Wert des Fluides

Herleitung aus: Anlage 10 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und festen Mineralphasen des ewG“

Definition

Als **pH-Wert** wird der negative dekadische Logarithmus der Aktivität von gelösten Wasserstoffionen (H^+) bezeichnet (z. B. Langguth 2004):

$$pH = -\log a_{\text{H}^+} \quad (4-13)$$

Die Aktivität a_i ist die nach außen „wirksame“ Konzentration einer chemischen Verbindung, also ihrer jeweils in der Lösung vorhandenen Teilchen und berechnet sich als Produkt aus der Konzentration c_i des Ions sowie dem Aktivitätskoeffizienten γ_i ($0 < \gamma_i < 1$). Der Aktivitätskoeffizient für eine Ionenart hängt von der Ladung aller vorhandenen Ionen in der Lösung sowie von deren Konzentration ab, somit also von der Ionenstärke (vgl. Abschnitt 4.9).

Je verdünnter die Lösung ist, desto mehr nähern sich die Werte von Konzentration und Aktivität an, da dann die Wechselwirkung und gegenseitige Beeinflussung zwischen den Ionen abnehmen (der Aktivitätskoeffizient geht somit gegen 1). Nur in einer unendlich verdünnten Lösung wären daher Konzentration und Aktivität gleichzusetzen. Die Aktivität ist somit in realen Lösungen stets kleiner als die Konzentration.

Der pH-Wert beschreibt den sauren ($\text{pH} < 7$) oder basischen ($\text{pH} > 7$) Charakter einer wässrigen Lösung. In neutralen Lösungen und bei 25°C ist die Aktivität an $[\text{H}^+]$ - und $[\text{OH}^-]$ -Ionen gleich ($\text{pH} = 7,0$). Insbesondere das Kalk-Kohlensäuregleichgewicht (in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von

Kohlenstoffdioxid und Karbonaten) beeinflusst aufgrund der Pufferwirkung des Lösungsgleichgewichtes von Kalziumkarbonat den pH-Wert hin zu neutralen Werten um pH 7.

Grundwasser aus karbonathaltigen Gesteinen mit guter Pufferwirkung besitzt somit einen geringeren pH-Wert (im neutralen Bereich von pH 6,5 – 7,5) als Grundwasser aus karbonatarmen Gesteinen (z. B. Granite).

Der pH-Wert beeinflusst die Löslichkeit und Wiederausfällung vieler Minerale sowie die Konzentrationen der entsprechenden Ionen im Wasser. In erster Näherung kann der pH-Wert auch für die Beurteilung des Sättigungsgrades des Wassers bezüglich bestimmter Minerale herangezogen werden. Weiterhin beeinflusst der pH-Wert die Sorption durch Änderung von Typ und Verteilung der geladenen Oberflächengruppen sowie der Speziation von Radionukliden in Lösung.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

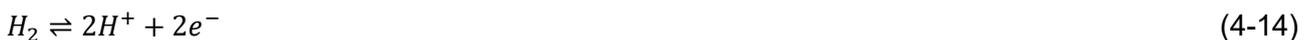
Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein
Tongestein	Keine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung, da Fluideigenschaft. Die Messgröße ist für die Erkundung aller Wirtsgesteine relevant.
Steinsalz	
Kristallingestein	

4.3. E_h -Wert des Fluides

Herleitung aus: Anlage 10 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und festen Mineralphasen des ewG“

Definition

Die Löslichkeit verschiedener Elemente hängt neben dem pH-Wert auch von ihren im jeweiligen Fluid oder Gestein gegebenen Oxidationsstufen ab. Bei Vorliegen elektrochemischer Potentiale laufen Reduktions-Oxidations-Reaktionen ab, bei denen Elektronen übertragen werden. Oxidation wird allgemein als Abgabe von Elektronen und Reduktion als Aufnahme von Elektronen definiert. Als Maß für die relative Aktivität der oxidierten und reduzierten Stoffe in einem System dient das Reduktions-Oxidations-Potenzial (Redoxpotenzial). Diese relative Maßzahl wird auf die folgende Standardreaktion bei 25°C, 1.013 hPa und einer Aktivität von 1 mol·l⁻¹ bezogen, welche dem Potenzial Null gleichgesetzt wird (Scheffer & Schachtschabel 2018, Mattheß 1990):



Redoxpotentiale, welche nach Standardbedingungen gemessen werden, werden mit E^0 (Normalpotentiale) bezeichnet. Alle nicht-standardisiert gemessenen Werte (z. B. in Feldversuchen) werden mit E_h bezeichnet.

Das Redoxpotenzial ist abhängig von der Temperatur sowie der Konzentration der beteiligten Redoxpartner. Die meisten Redoxreaktionen sind außerdem abhängig von der pH-Wert-Änderung, wobei höhere pH-Werte das Redoxpotenzial vieler Redoxpaare senken.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein
Tongestein	Keine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung, da Fluideigenschaft. Die Messgröße ist für die Erkundung aller Wirtsgesteine relevant.
Steinsalz	
Kristallingestein	

4.4. Gehalt Kolloide und Komplexbildner im Fluid

Herleitung aus: Anlage 10 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und festen Mineralphasen des ewG“

Definition

Radionuklide in Lösung können durch Kolloidbildung bzw. Anlagerung an natürlich im Grundwasser vorhandenen Kolloide und Komplexbildner in Lösung gehalten werden. Hinsichtlich der Radionuklidmobilität sind daher die Konzentrationen von Kolloiden (z. B. Huminstoffkolloide) und Komplexbildnern (z. B. Karbonatkomplexe oder anionische Bestandteile) im Grundwasser entscheidend (FZK-INE 2000).

Als **Kolloide** werden Teilchen oder Tröpfchen definiert, die in einem Medium fein verteilt und frei beweglich sind. In natürlichen Grundwassersystemen können sie in anorganischer (Cl^- , OH^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , im Wesentlichen aus dem durchströmten Gestein sowie durch chemische Ausfällung (Sekundärmineralbildung) oder organischer (z. B. als organische Abbauprodukte oder Huminstoffe) Form vorliegen. Als sogenannte „Bio-Kolloide“ werden auch Bakterien und Viren sowie Sporen und Algen bezeichnet.

Die Größe der Teilchen liegt im Mikro- bis Nanometerbereich. Im Verhältnis zu ihrer Größe besitzen Kolloide eine große, meist geladene Oberfläche. Da somit an Kolloiden ausgeprägte Sorbat-Sorbens-Oberflächenreaktionen auftreten können, wirken diese im Grundwasser als Trägermedium für Radionuklide und erhöhen damit deren Migrationsgeschwindigkeit im Grundwasser (Bitea 2005, Kalmykov & Denecke 2011).

Radionuklide können mit einer Vielzahl von Lösungsinhaltsstoffen des Grundwassers stabile **Komplexe** bilden, die schlechtere Sorptionseigenschaften haben als die reinen Ionen der Radionuklide und somit die Migrationsgeschwindigkeit der Radionuklide im Grundwasser erhöhen (FZK-INE 2000). Die Komplexbildung hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie beispielsweise dem geochemischen Milieu des Grundwassers, des durchströmten Gesteins und der Interaktion des Grundwassers mit den Abfällen und kann somit an dieser Stelle nicht allgemein beurteilt werden. Da die Eigenschaften der Abfälle im Rahmen dieses Vorhabens nicht betrachtet werden, wird im Rahmen dieses Vorhabens auf die Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Abfällen nicht weiter eingegangen.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein
Tongestein	Keine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung, da Fluideigenschaft. Die Messgröße ist für die Erkundung aller Wirtsgesteine relevant.
Steinsalz	
Kristallingestein	

4.5. Karbonatgehalt

Herleitung aus: Anlage 10 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und festen Mineralphasen des ewG“

Der **Karbonatgehalt** des Grundwassers wird durch die im Gestein enthaltenen Calcium- und Magnesiumkarbonate (Kalk, Dolomit) bzw. Kalzit- und Magnesitgleichgewichte bei Steinsalz oder CO₂-reiche Gaseinschlüsse im Gestein beeinflusst (FZK-INE 2000). Der Karbonatgehalt hat direkten Einfluss auf den pH-Wert. Die Löslichkeit der meisten Radionuklide nimmt mit steigendem Karbonatgehalt zu.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein
Tongestein	Keine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung, da Fluideigenschaft. Die Messgröße ist für die Erkundung aller Wirtsgesteine relevant.
Steinsalz	
Kristallingestein	

4.6. Isotopenzusammensetzung der tiefen Grundwässer

Herleitung aus: Anlage 10 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und festen Mineralphasen des ewG“

Definition

Radioaktive und stabile Isotope im Grundwasser dienen als Tracer zur Beschreibung der Grundwasserströmungsverhältnisse da sie Aussagen über die Herkunft des Grundwassers, die Fließwege, Verweilzeiten und Fließgeschwindigkeiten liefern können.

In geringdurchlässigen Gesteinen bzw. Gebirgsbereichen, welche aufgrund der sehr hohen Verweilzeiten des Grund-, bzw. Porenwassers z. B. eine Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeit durch geohydraulische Versuche nicht ermöglichen, bietet die Isotopenbestimmung den Vorteil, dass damit ebenfalls Aussagen zu den bereits abgelaufenen und bestehenden Wasserbewegungen getroffen werden können.

Die Auswahl der zu bestimmenden Isotope richtet sich nach der zu erwartenden Verweilzeit des Grundwassers. Häufig verwendete Isotope sind hierbei

- Tritium (Halbwertszeit: 12,43 Jahre) für geringe Verweilzeiten bis ca. 100 Jahre,
- Argon-39 (Halbwertszeit: 269 Jahre) für Verweilzeiten bis zu ca. 1.000 Jahren,

- Kohlenstoff-14 (Halbwertszeit: 5.730 Jahre) für Verweilzeiten bis zu ca. 10.000 Jahren,
- Krypton-81 (Halbwertszeit: 210.000 Jahre) für Verweilzeiten zwischen einigen 10.000 bis 1 Millionen Jahre),
- Helium-Argon-Verhältnis für lange Verweilzeiten im Bereich von Millionen Jahren.

Die kurzlebigen Isotope dienen außerdem als Tracer im Rahmen des Abteufens von Tiefbohrungen, um eine mögliche Kontamination der tieferen Grundwässer durch oberflächennahes Grundwasser oder Spülflüssigkeit zu detektieren.

Anhand der Konzentrationsverteilung der Isotope kann unter Berücksichtigung der Zerfallszeit die Verweilzeit und somit das scheinbare Alter der Grundwasserprobe bestimmt werden. Hierbei muss beachtet werden, dass ohne Kenntnis der Infiltrationszonen und der Fließweglänge keine Fließgeschwindigkeit, sondern immer nur die mittlere Verweilzeit des Grundwassers in einem Gebiet unbekannter Größe an der jeweiligen Entnahmestelle bestimmt werden kann (Nagra 1983).

Um belastbare Aussagen zur Verteilung der Verweilzeiten innerhalb der hydrogeologischen Einheiten erhalten zu können, müssen die Ergebnisse der Konzentrationsverteilungen aus den einzelnen Isotopenbestimmungen mit Kenntnissen zu den Konzentrationen der Isotope in Niederschlag und Atmosphäre, den Transportprozessen (z. B. Berücksichtigung der Sorption der Isotope), dem geochemischen Milieu etc. kombiniert und gemeinsam ausgewertet werden. Dies erfordert somit das Vorliegen von hydrochemischen und hydraulischen Modellen.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein
Tongestein	Keine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung, da Fluideigenschaft. Die Messgröße ist für die Erkundung aller Wirtsgesteine relevant.
Steinsalz	
Kristallingestein	

4.7. Viskosität des Fluides (dynamisch, kinematisch)

Herleitung aus: Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserdargebot“
 Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit“
 Anlage 4 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Änderung der wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale“

Definition

Die **Viskosität** μ , oder auch der Koeffizient der inneren Reibung, ist eine Folge der inneren Reibung zwischen den Molekülen einer strömenden Flüssigkeit (oder eines Gases). Mit steigender Temperatur nimmt die Viskosität von Flüssigkeiten stark ab. Die dynamische Viskosität (Einheit: Pascalsekunde, Pa·s) von Wasser beträgt bei einem Druck von 1.013 hPa und einer Temperatur von 0°C 1,79 mPa·s und fällt bei 20°C auf 1.002 mPa·s ab. Die kinematische Viskosität ist der Quotient aus dynamischer Viskosität und Dichte des Fluides.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein
Tongestein	Keine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung, da Fluideigenschaft. Die Messgröße ist für die Erkundung aller Wirtsgesteine relevant.
Steinsalz	
Kristallingestein	

4.8. Dichte des Fluides

Herleitung aus: Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserdargebot“
 Anlage 1 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit“
 Anlage 4 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Änderung der wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale“

Definition

Die **Dichte** ρ eines Stoffes ist der Quotient aus der Masse m seines Körpers und seinem Volumen V :

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{4-15}$$

Generell ist die Dichte eine für einen Stoff spezifische Größe, die von der Temperatur und vom Druck abhängig ist. Die Dichte von Wasser hängt zusätzlich noch von der chemischen Zusammensetzung, insbesondere dem Salzgehalt des Wassers ab. Zudem weist reines Wasser bei etwa 4°C das kleinste Volumen und gleichzeitig die größte Dichte auf. Sowohl bei Temperaturerhöhung als auch bei Temperaturabsenkung steigt das Volumen und die Dichte verringert sich entsprechend.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein
Tongestein	Keine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung, da Fluideigenschaft. Die Messgröße ist für die Erkundung aller Wirtsgesteine relevant.
Steinsalz	
Kristallingestein	

4.9. Ionenstärke

Herleitung aus: Anlage 9 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“

Anlage 10 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und festen Mineralphasen des ewG“

Definition

Die Ionenstärke ist ein Maß für die Art und die Anzahl der in einer Lösung vorhandenen Ladungsträger (Ionen). Sie beschreibt die Wirkung gelöster Ionen auf die Löslichkeit eines Feststoffes in einem idealen (unendlich) verdünnten Fluid, unter Beachtung von Ladung und Konzentration (Mattheß 1990) und beeinflusst die Speziation und Sorption von gelösten Radionukliden (Cloet et al. 2014). Empirisch ist die Ionenstärke bestimmbar durch die Gesamtheit aller gelösten Ionen im Fluid:

$$I = \frac{1}{2} \sum_i^n c_i \cdot z_i^2 \tag{4-16}$$

mit

<i>I</i>	Ionenstärke	[mol·L ⁻¹]
<i>c_i</i>	Stoffmengenkonzentration (Molarität)	[mol·L ⁻¹]
<i>z_i</i>	Wertigkeit des Ions	[1]

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein	
Tongestein	X	Die Ionenstärke ist für Fluide im Bereich des Wirtsgesteins Tongestein zu ermitteln.
Steinsalz	X	Die Ionenstärke ist für Fluide im Bereich des Wirtsgesteins Steinsalz zu ermitteln. Die Bestimmung der Ionenstärke für stark salzhaltige Grundwässer im Einflussbereich von Steinsalzformationen ist komplex und erfordert daher zusätzliche Annahmen und Berechnungsverfahren (z. B. empirisch ermittelte Zusammenhänge) im Vergleich zu Grundwasser mit geringerem Salzgehalt.
Kristallingestein	X	Die Ionenstärke ist für Fluide im Bereich des Wirtsgesteins Kristallingestein zu ermitteln.

4.10. Elektrische Leitfähigkeit/Salinität

Herleitung aus: Anlage 10 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und festen Mineralphasen des ewG“

Definition

Echte und potenzielle Elektrolyte dissoziieren in wässriger Lösung. Die dabei entstehenden Ionen bewirken die elektrische Leitfähigkeit der Lösung, wobei die Ionen je nach Dissoziationsgrad und Beweglichkeit einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Leitfähigkeit haben. Die **elektrische Leitfähigkeit** setzt sich aus den Leitfähigkeitsbeiträgen der einzelnen Kationen und Anionen zusammen. Damit gibt die elektrische Leitfähigkeit einen groben Hinweis auf die Größe des Gesamtlösungsinhaltes und den Abdampfdruck und ist somit eine einfach zu ermittelnde Kontrollmessgröße. Die elektrische Leitfähigkeit wird vielfach als Log in Bohrungen gemessen, um Zutrittsstellen von Wässern einer anderen Mineralisation zu lokalisieren, und wird hier dann häufig als **Salinität** bezeichnet.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein
Tongestein	Keine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung, da Fluideigenschaft. Die Messgröße ist für die Erkundung aller Wirtsgesteine relevant.
Steinsalz	
Kristallingestein	

4.11. Sorptions- oder Verteilungskoeffizient (K_d -Wert) für Radionuklide

Herleitung aus: Anlage 9 StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft „Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches“

Definition

Unter Sorption versteht man einen Vorgang, bei dem ein flüssiger (oder gasförmiger) Bestandteil, genannt Sorptiv, an eine Flüssig- oder Festphase, genannt Sorbens, angelagert (Adsorption) oder in sie eingelagert (Absorption) wird. Den Verbund aus Sorbens und an- oder eingelagertem Sorptivteilchen bezeichnet man als Sorbat. Desorption bezeichnet den Umkehrvorgang der Sorption, bei dem sich das sorbierte Teilchen wieder von dem Sorbens löst. In Abbildung 4-1 werden diese Begriffe anhand des Beispiels der Sorption von gelösten Radionukliden in flüssiger Phase an einem Gestein veranschaulicht.

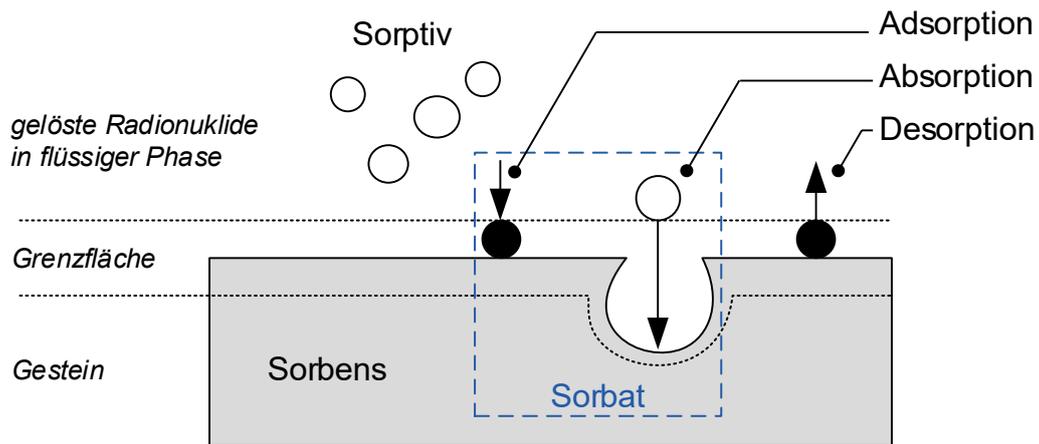


Abbildung 4-1: Schema zu den Grundbegriffen der Sorption (verändert nach Kümmel & Wolch (1990)).

Die Sorption lässt sich quantitativ durch den Sorptionskoeffizienten (K_d -Wert) und die dazugehörigen Sorptionsisotherme sowie Oberflächenkomplexierungsmodelle beschreiben.

Zwischen der Menge an sorbiertem Stoff und der Konzentration des Sorptivs in Lösung besteht ein mathematischer Zusammenhang, der bei konstanter Temperatur mit Hilfe von Sorptionsisothermen dargestellt werden kann (z. B. Dörfler 1994):

- Henry-Isotherme (Sättigung der Oberfläche, Wechselwirkungen von jedem Sorptiv mit Sorbat identisch, vom Grad der Oberflächenbeladung unabhängig, nur für Bereiche niedriger Konzentration geeignet).
- Freundlich-Isotherme (Wechselwirkungen zwischen sorbierten Teilchen werden berücksichtigt, Grad der Oberflächenbeladung beeinflusst Sorption).
- Langmuir-Isotherme (berücksichtigt maximale Anzahl an Sorptionsplätzen, Wechselwirkungen der sorbierten Teilchen untereinander werden vernachlässigt).
- BET-Isotherme (Brunauer, Emmett, Teller) (erlaubt Mehrschichtensorption, bei niedrigen Konzentrationen äquivalent zu Langmuir).

Der **Sorptionskoeffizient** K_d ist eine empirisch ermittelte Verteilungskonstante und beschreibt die bei einer konstanten Temperatur ermittelte Verteilung eines Stoffes zwischen zwei nicht-mischbaren Phasen (fest/flüssig). Im einfachsten Fall wird hierbei eine lineare Verteilung angenommen (Henry-Isotherme):

$$K_d = \frac{C_s}{C_l} \tag{4-17}$$

mit

K_d	Sorptionskoeffizient	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
C_s	sorbierte Konzentration an fester Phase	$[mol \cdot kg^{-1}]$
C_l	gelöste Konzentration in flüssiger Phase	$[mol \cdot m^{-3}]$

Mit dem K_d -Wert kann das Rückhaltevermögen bzw. die Retardation R als Verzögerung der Geschwindigkeit eines Stoffes gegenüber der Abstandsgeschwindigkeit v_a eines Fluids beschrieben werden:

$$R = \frac{v_a}{v_r} \text{ bzw. } R = 1 + \frac{K_d \cdot \rho_d}{n_e} \tag{4-18}$$

mit

R Retardationsfaktor [1]
 v_r Geschwindigkeit des retardierten Stoffes [m·s⁻¹]

Als wirksame Bindungsmechanismen des Sorptivs an das Sorbens werden die Physisorption und Chemisorption unterschieden. Die Physisorption (engl. *outer-sphere complexes*) umfasst das Wirken physikalischer Kräfte im Bereich der Grenzfläche, wie Dipol/Dipol-, Ionen/Ionen-, Ionen/Dipol-, und Dispersionskräfte, sowie Wasserstoffbrückenbindungen. Die Chemisorption (engl. *inner-sphere complexes*) beinhaltet die spezifischen chemischen Verbindungen zwischen Sorptiv und Sorbens.

Bewertungsgröße gemäß StandAG (2017) für die Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG ist der K_d -Wert für langzeitrelevante Radionuklide, der $\geq 0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ sein sollte. Mit der Sorptionsfähigkeit der Gesteine kann das Rückhaltevermögen im ewG bewertet werden. Dieses hängt sehr stark sowohl von der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins als auch von den hydrogeochemischen Bedingungen des Grundwassers ab (s. Abschnitt 4.1). Mineralauflösungs- bzw. Mineralneubildungsreaktionen können Sorptionsprozesse entscheidend beeinflussen. Beispielsweise können Sulfid und zweiwertiges Eisen (Fe(II)) in den Mineralphasen die Radionuklide Uran, Plutonium und Neptunium reduzieren, d. h. die Oxidationsstufe verringern, wodurch die Radionuklide eine geringere Löslichkeit aufweisen und stärker zur Sorption neigen (FZK-INE 2000). Weitere wesentliche hydrogeochemische Einflussgrößen sind der pH-Wert und das Redoxpotenzial sowie die Ionenstärke und die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden im Grundwasser (Kommission 2016). Der gemessene K_d -Wert ist somit eine unspezifische Größe, die nur für die angelegten experimentellen Bedingungen gültig ist. Wird eine der Einflussgrößen verändert, so ändert sich auch der K_d -Wert.

Wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung

Wirtsgestein	Relevanz für jeweiliges Wirtsgestein	
Tongestein	X	Die Retardation in Tongestein lässt sich in Sorptions- und Fällungsprozesse unterteilen. Die Sorptionsprozesse sind im Wesentlichen bestimmt durch Adsorption der Radionuklide an den Tonmineralen, Kationenaustauschprozesse
Steinsalz	-	Retardation findet im reinen Steinsalz nur in einem sehr geringen Umfang statt. Dieser Rückhalteprozess wird relevant, wenn Ton-schichten zwischengelagert sind.
Kristallingestein	X	Gesteinsbildende Minerale, wie z. B. Quarz und Feldspat, welche hohe Anteile z. B. in Granit besitzen, verfügen nur über ein sehr geringes Sorptionsvermögen. Retardation im Kristallingestein findet hauptsächlich in tonhaltigen Kluffüllungen statt.

5. Messmethoden zur Bestimmung transportrelevanter Gesteinseigenschaften

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine Beschreibung der Messmethoden, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und im Rahmen der Erkundungsprogramme zu den hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Fragestellungen im Standortauswahlverfahren zur Bestimmung folgender transportrelevanter Gesteinseigenschaften durchgeführt werden können:

- Abstandsgeschwindigkeit (v_a),
- Gebirgsdurchlässigkeit (K),
- effektiver Diffusionskoeffizient (D_m^*),
- absolute bzw. effektive Porosität des Gesteins (n bzw. n_e),
- Verfestigungsgrad (Tongestein) (U_{Ton}),
- hydraulischer Gradient (i),
- Tortuosität (τ).

Die Messmethoden gliedern sich in geohydraulische und geophysikalische bzw. bohrlochgeophysikalische Methoden im Rahmen von Feldmessungen (Abschnitte 5.1 und 5.2) sowie von Laboruntersuchungen (Abschnitt 5.3). Die Beschreibung der Messmethoden zur Bestimmung transportrelevanter Gesteinseigenschaften enthält im Allgemeinen

- eine allgemeine Kurzbeschreibung der Methode unter Angabe von Messprinzip und technischer Ausführung, der Zielmessgröße und dem Anwendungsgebiet sowie der Auswertemethode,
- eine Kurzdarstellung der Grenzen der Methode im Hinblick auf Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen, horizontale Reichweite im Untersuchungsgebiet, Reproduzierbarkeit bzw. Anforderungen zur Herstellung der Reproduzierbarkeit der Messwerte, Erkennungs- und Nachweisgrenzen, Fehleranfälligkeit sowie ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen auf das Gebirge oder nachfolgende Messungen durch Anwendung der Methode,
- eine Angabe zu Einflussfaktoren auf den zu erwartenden zeitlichen und technischen Aufwand,
- die Auflistung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Messmethode sowie
- eine Bewertung der Messmethode mit Schwerpunkt auf einer Eignung für die übertägige Erkundung im Standortauswahlverfahren und Aufzeigen eines potenziellen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs. Die Bewertung der jeweiligen Messmethode beschreibt auch Möglichkeiten zur Kombination mit anderen Methoden. Hierbei werden nur die weiteren Messmethoden aufgezeigt, die unmittelbar vor, während oder unmittelbar nach der entsprechenden Messmethode eingesetzt werden können. Grundsätzlich können zeitversetzt nahezu alle Messmethoden kombiniert werden (z. B. können nach Abschluss eines Tracerversuches und Rückgang in die natürlichen Druckverhältnisse Packertests durchgeführt werden).

5.1. Geohydraulische Messmethoden

Grundlegende Literatur

Appel, D., Habler, W. (2001): *Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Bericht an den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS).*

Coldewey, W.G., Göbel, P. (2015): *Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hekel, Odenwald (2012): *Bohrlochversuche zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit von Fels*, BAW-Mitteilungen Nr. 95.

Hölting, B., Coldewey, W. G. (2013). *Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*, 8. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg.

Mattheß, G. (Hrsg.) (2000): *Lehrbuch der Hydrogeologie Band 4, Grundwassererschließung – Grundlagen, Brunnenbau, Grundwasserschutz, Wasserrecht*. 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.

Mittels geohydraulischer Messmethoden sowohl im Feld als auch im Labor werden hydrologische und hydrogeologische Messgrößen wie Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit, hydraulischer Gradient sowie indirekt auch die effektive Porosität ermittelt. Die unterschiedlichen Messmethoden lassen sich nach bestimmten Gemeinsamkeiten in Methodengruppen einteilen (z. B. Packertests). In Tabelle 5-1 sind die wichtigsten, für das Vorhaben relevanten, übertägigen Messmethoden zur Bestimmung hydrologischer und hydrogeologischer Messgrößen zusammengefasst, die im Rahmen des übertägigen Erkundungsprogramms zu den hier betreffenden Fragestellungen angewendet werden können.

In der Tabelle 5-1 werden für jede geohydraulische Messmethode die Messgröße genannt, welche die übertägigen Erkundungsprogramme erfassen müssen, der mit der Methode ermittelbare Messwert, die Reichweite bzw. das Einflussvolumen, die bzw. das mit der Methode erfasst werden kann sowie der relevante Messbereich der mit der Methode ermittelbaren Messgröße.

Die horizontale Reichweite geohydraulischer Tests ist prinzipiell umso größer je höher die Gebirgsdurchlässigkeit und je kleiner der Speicherkoeffizient des Gebirgsbereiches ist. Sie nimmt außerdem mit der Versuchsdauer zu und kann zusätzlich durch Skin-Effekte beeinflusst werden. Bei Langzeitversuchen (z. B. Langzeitpumpversuch) übertrifft die Reichweite des Versuches die Skin-Zone um ein Vielfaches, während bei hydraulischen Kurzzeittests (z. B. Packertests) die Gefahr besteht, dass die Reichweite des Tests nicht über die Skin-Zone hinausreicht (Appel & Habler 2001).

Das Einflussvolumen ergibt sich aus der Reichweite und der Mächtigkeit des erfassten Gebirgsbereiches. In den Beschreibungen der Methoden werden jeweils die für die einsetzbaren Messbereiche der Gebirgsdurchlässigkeit und die für die jeweilige Methode geläufige Versuchsdauer relevanten Reichweiten bzw. Einflussvolumina genannt.

Tabelle 5-1: Zusammenstellung geohydraulischer Messmethoden zur übertägigen Erkundung, verändert nach Appel & Habler (2001) und Brassler et al. (2008).

Geohydraulische Messmethoden	Messgröße	Messwert	Reichweite [m]	Messbereich
Druckhöhenmessungen				
Druckhöhenmessung	i	h_p	Einzelpunktmessung	unbegrenzt
Pump- und Injektionsversuche				
Langzeitpumpversuch	k_f, T, S	h_p	10 bis > 300	$k_f: 10^{-2}$ bis 10^{-7}
Kurzzeitpumpversuch	$k_f, T, (S)$	h_p	10 bis > 100	$k_f: 10^{-6}$ bis 10^{-8}
Injektionsversuch	k_f, T, S	h_p	10 bis > 100	$k_f: > 10^{-10}$
Packertests				
Wasserdruck-Test (WD-Test)	k_f, T	h_p	10	$k_f: 10^{-4}$ bis 10^{-8}
Slug- und Bail-Test	$k_f, T, (S)$	h_p	1 bis 10	$k_f: 10^{-2}$ bis 10^{-9}
Drill-Stem-Test (DS-Test)	k_f, T	h_p	1 bis 10	$k_f: 10^{-5}$ bis 10^{-8}
Pulse-Test	$k_f, T, (S)$	h_p	1	$k_f: 10^{-8}$ bis 10^{-14}
Squeeze-Test	$k_f, T, (S)$	p	1	$k_f: 10^{-7}$ bis 10^{-14}
Packer-Flowmeter-Logging	k_f, T	h_p	k.A.	T: $5 \cdot 10^{-3}$ bis 10^{-7}
Druckerholungstest	k_f, T	h_p	k.A.	k.A.
Pumptest mit Packer	$k_f, T, (S)$	h_p	10 bis > 100	$k_f: 10^{-2}$ bis 10^{-7}
Weitere geohydraulische Bohrlochmethoden				
Einschwingverfahren	k_f, T	h_p	1 bis 10	$k_f: 10^{-2}$ bis 10^{-6}
Auffüllversuch	k_f, T, S	h_p, Q	1 bis 10	$k_f: 10^{-5}$ bis 10^{-7}
Fluid-Logging	k_f, T	σ	< 10	$k_f: 5 \cdot 10^{-4}$ bis 10^{-9} T: 10^{-10}
Gezeitenverfahren	$(k_f), (T)$	h_p	(Einflussvolumen > 100.000 m ³)	k.A.
Interferenz-Test	k_f, T, S	h_p	k.A.	k.A.
Luftdruckmessungen	k_f, T	h_p, p_0	k.A.	k.A.
Tracerversuche				
Mehrbohrloch-Tracerversuch	v_a	c_T	bis Einzugsgebiet	k.A.

i: hydraulischer Gradient [-]

h_p : hydraulische Druckhöhe [m]

n_e : effektive Porosität [-]

k_f : hydraul. Durchlässigkeitsbeiwert (Gebirgsdurchlässigkeit) [$m \cdot s^{-1}$]

p_0 : Luftdruck [bar]

p: Druck im Bohrlochabschnitt [bar]

c_T : Konzentration des Tracers [mg/l oder Anzahl]

k.A.: keine Angaben in der Literatur nach W+T

Q: Durchflussrate [$m^3 \cdot s^{-1}$]

T: Transmissivität [$m^2 \cdot s^{-1}$]

v_a : Abstandsgeschwindigkeit [$m \cdot s^{-1}$]

S: Speicherkoeffizient [-]

σ : elektrische Leitfähigkeit [$S \cdot m^{-1}$]

$m(d_i)$: Masse einer Korngröße d_i [g]

Die Mehrzahl der genannten hydrologischen und geohydraulischen Messmethoden wird in Bohrlöchern, meist nach Fertigstellung des Bohrloches oder eines Bohrlochabschnittes durchgeführt. Je nach Test können diese in unverrohrten oder ausgebauten, in offenen oder geschlossenen Bohrlöchern durchgeführt werden. Bei der Errichtung der Messstellen ist darauf zu achten, dass keine Umläufigkeiten und hydraulischen Kurzschlüsse zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken generiert werden. Sofern eine maßgebliche Menge an Grundwasser entnommen wird, ist der jeweilige Test zudem nach § 8 WHG (Wasserhaushaltsgesetz) erlaubnispflichtig. Für Versuche in

großen Teufen muss entsprechendes Equipment bereitgestellt werden, um die Messgeräte in mehreren hundert Metern Teufe handhaben zu können (z. B. mit Hilfe eines Krans).

Die entsprechenden Voraussetzungen für die einzelnen hydrologischen und geohydraulischen Bohrlochversuche sind in Tabelle 5-2 aufgelistet.

Tabelle 5-2: Zusammenstellung der erforderlichen Voraussetzungen für geohydraulische Bohrlochmethoden.

Geohydraulische Bohrlochmethoden	Bohrloch		Wasserrechtl. Erlaubnis erforderlich?	Sättigung der Gesteinsschicht
	Ausbau	Minstdurchmesser [mm]		
Pump- und Injektionsversuche				
Langzeitpumpversuch	A, B*	100	ja	gesättigt
Kurzzeitpumpversuch	A, B	100	ggf. ¹⁾	gesättigt
Injektionstest	A, B	100	ggf. ²⁾	gesättigt, ungesättigt
Packertests				
Wasserdruck-Test (WD-Test)	A, B*	50	nein	gesättigt, ungesättigt
Slug- und Bail-Test	A, B*	50	nein	gesättigt
Drill-Stem-Test (DS-Test)	A, B*	50	nein	gesättigt
Pulse-Test	A, B*	50	nein	gesättigt
Squeeze-Test	A, B*	50	nein	gesättigt
Pumptest mit Packer	A, B*	50	ggf. ¹⁾	gesättigt
Packer-Flowmeter-Logging	A, B*	50	nein	gesättigt
Druckerholungstest	A, B*	50	nein	gesättigt
Weitere hydraulische Bohrlochmethoden				
Einschwingverfahren	A	50	nein	gesättigt
Auffüllversuche	A	50	nein	gesättigt, ungesättigt
Fluid-Logging	A, B	50	nein	gesättigt
Gezeitenverfahren	A, B	50	nein	gesättigt
Luftdruckmessungen	A, B	50	nein	gesättigt
Tracerversuche	A, B	50	ja	gesättigt

A verrohrter, ausgebaute(r) Brunnen oder Pegel.

B unverrohrtes Bohrloch.

B* unverrohrtes Bohrloch im standfesten Gebirge.

1) Die Entnahme („Zutagefördern“) von Grundwasser ist erlaubnisfrei nach § 48 Abs. 1 Nr. 1 WHG (geringe Menge zu vorübergehendem Zweck).

2) Erlaubnisfrei ist das Einleiten von Niederschlagswasser in das Grundwasser

In den nachfolgenden Abschnitten werden die in Tabelle 5-1 genannten hydrologischen und geohydraulischen Methoden einzeln beschrieben und bewertet.

5.1.1. Druckhöhenmessung

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Die Messung der hydraulischen Druckhöhe erfolgt als Abstandsmessung zwischen einer Referenzhöhe und dem Grundwasserstand/-druck in einem Bohrloch und kann mit verschiedenen Messgeräten (u. a. Meterstab, Lichtlot, elektrisches Kabellichtlot, Differenzdruckaufnehmer) durchgeführt werden. Eine umfangreiche Beschreibung der Messmethode und eingesetzten Messgeräte enthält Coldewey und Göbel (2015). Neben Messgeräten mit einmaliger Messwerterfassung kommen Messgeräte mit kontinuierlicher Registrierung (z. B. Datenlogger) zur Anwendung. Die Wahl des Messgerätes hängt u. a. vom Einsatzbereich und vor allem der gewünschten Genauigkeit ab.

Diese Messmethode kommt auch bei den meisten geohydraulischen Versuchen (u. a. Pump- und Injektionsversuche, Packertests) zum Einsatz.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Durch Druckhöhenmessungen wird der Grundwasserstand (in ungespannten hydrogeologischen Schichten) bzw. der Grundwasserdruck (in gespannten hydrogeologischen Schichten) im Untergrund gemessen (vgl. Tabelle 5-1). Durch räumliche Messungen an mehreren Messorten werden damit die Grundwasseroberfläche, der hydraulische Gradient sowie die Grundwasserfließrichtung bestimmt. Zusammen mit hydrogeologischen Messgrößen wie Gebirgsdurchlässigkeit und Transmissivität kann daraus das Grundwasserdargebot ermittelt werden. Druckhöhenmessungen sind bis in große Teufen einsetzbar.

Bei der Messung ist die Dichteabhängigkeit der hydraulischen Druckhöhe zu beachten. Insbesondere im Umfeld von Steinsalz kann eine deutlich höhere Dichte im Poren- oder Grundwasser auftreten und zu einer im Vergleich zum Süßwasser geringeren hydraulischen Druckhöhe führen (vgl. Abschnitt 3.6). Die Messwerte müssen daher entsprechend in eine äquivalente Süßwasser-Druckhöhe umgerechnet werden.

Druckhöhenmessungen können an einem Bohrloch durchgeführt werden, in der Regel werden jedoch Messungen in mehreren Teufen (Multipacker) und Mehrbohrloch-Druckhöhenmessungen (Interferenzmessungen) zur räumlichen Beurteilung von Systemen durchgeführt. Bei Einsatz in mehreren Teufen kommen Grundwasser-Mehrfach-Monitoring-Systeme (z. B. Multi-Packer-Systeme) zum Einsatz, bei dem in mehreren isolierten Intervallen in einer vertikalen Bohrung Druckhöhenmessungen und Probenahmen erfolgen können. Multi-Packer-Systeme sind bereits in sehr kleinen Bohrlochdurchmessern (ab 50 mm) einsetzbar und bis zu einer Teufe bis 1.500 m und mehr verfügbar.

Auswertung

Das Messergebnis wird auf die Referenzhöhe (+/- m NN) als Abstich (m) oder auf eine Bezugsebene als Grundwasserstand bzw. hydraulische Druckhöhe (+/- m NN) bezogen. Die räumliche Auswertung erfolgt kartografisch in Form von Grundwasser- bzw. Druckhöhengleichenplänen und Flurabstandskarten, bei denen die Messwerte in Karten aufgetragen und daraus Linien gleicher hydraulischer Druckhöhen und Linien gleicher Flurabstände durch Interpolation der Messwerte konstruiert werden. Die Auswertung der zeitlichen Messdaten erfolgt durch Ganglinien.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Reaktion des Messgerätes (z. B. elektrische Elektrode des Lichtlots) auf die Druckhöhenänderung. In gering durchlässigen Gebirgsbereichen ist eine längere Zeitdauer bis zum Erreichen eines stabilen Messwertes zu berücksichtigen.

Die Auflösung ist abhängig vom eingesetzten Messgerät und beträgt für Druckaufnehmer bis 0,001 mWS bzw. 0,1 mbar.

Reichweite

Die Messgröße wird jeweils punktuell an einem Einzelpunkt erfasst. Durch eine räumliche Interpolation mehrerer Einzelpunkte ist eine großmaßstäbliche Erfassung möglich.

Reproduzierbarkeit

In großen Teufen ist eine Reproduzierbarkeit gegeben, sonst nur bei identischen Umweltbedingungen (z. B. Niederschlag, Verdunstung, Zuflüsse, Grundwasserzu- oder -abflüssen).

Erkennungs- und Nachweiskgrenzen

Messgeräte zur Druckhöhenmessung sind bis zu einer Teufen von mehr als 1.000 m verfügbar. Die Nachweiskgrenze für die Messung der hydraulischen Druckhöhe beträgt bis 1 mm.

Die Messgenauigkeit ist abhängig vom eingesetzten Messgerät sowie dem Messbereich. Je höher der Messbereich (Teufe der anzutreffenden Druckhöhe), desto geringer ist die absolute Messgenauigkeit (Differenz zwischen Messwert und wahren Wert). Die relative Messgenauigkeit (Differenz bezogen auf den wahren Messwert) liegt bei Druckaufnehmern bei 0,005 bis 0,1 %.

Die Nachweiskgrenzen für die Messgröße „hydraulischer Gradient“ sind abhängig von der Größe des betrachteten Gebirgsbereiches und liegen bei einem Gebirgsbereich von 1 km horizontaler Ausdehnung bei 1 ‰.

Fehleranfälligkeit

Folgende Fehler können auftreten:

- durch ungenaue oder Nichtbeachtung der Kenntnisse zum hydrogeologischen Aufbau (Stockwerke, geologische Schichtung),
- durch ungenaue oder falsche Einmessung der Messstellen (lage- und höhenmäßig),
- bei der räumlichen Interpolation der Messwerte.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Keine.

Aufwand

Der Aufwand für eine Messung umfasst das Messgerät, die Ablesung sowie die Auswertung und ist gering. Der zeitliche und technische Aufwand für die Messungen steigen mit der Messstellenanzahl und der Teufe.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- Preiswerte und einfache Methode,
- hohe Genauigkeit,
- Anwendung in großen Teufen möglich.

Nachteile

- Interpretation durch Interpolation der Messwerte erfordert hydrogeologische Erfahrung.

Bewertung

Fazit

Potenzialmessungen sind eine einfache, preiswerte und unverzichtbare Messmethode, um die Grundwasserverhältnisse (Grundwasserniveau, hydraulischer Gradient, Fließrichtung) in hydrogeologischen Schichten zu erkunden.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Kombiniert mit hydraulischen Versuchen (Packertests, Pumpversuche, Tracerversuche) können so die hydrogeologischen Messgrößen und geohydraulischen Eigenschaften des Untergrundes ermittelt werden.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Nicht erforderlich.

5.1.2. Pump- und Injektionsversuche

Mit Pump- und Injektionsversuchen können folgende Messgrößen des Untergrundes ermittelt werden (Appel & Habler 2001):

- Leitvermögen der Aquifere: Transmissivität, Durchlässigkeitsbeiwert, Permeabilität.
- Speichervermögen des Aquifers: Speicherkoeffizient, spezifischer Speicherkoeffizient, effektive Porosität.
- Kluftaquifer: Kluftweite, Kluftlänge, Speicherverhältnis und Durchlässigkeitsverhältnis bei Zweiporositätsmedien usw.

Daneben können aus Pump- und Injektionsversuchen weitere Untergrundeigenschaften wie Bohrlocheinflüsse und Anisotropien (vertikal, horizontal) sowie Lage und Eigenschaften hydraulisch wirksamer Aquiferränder sowie Brunnenkenndaten (u. a. Skin-Faktor, Brunneneinzugsgebiet, Reichweite, Brunnencharakteristik) erkundet werden.

Man unterscheidet:

- **Langzeitpumpversuche:** Pumpversuch über einen längeren Zeitraum von 100 bis 500 Stunden.
- **Kurzzeitpumpversuche (Pumptests):** Versuche mit kurzer Pumpphase (auch mit Packer) dienen der Ermittlung qualitativer Aussagen.
- **Injektionsversuche/Injektionstests:** analoge Versuche mit Wassereinpresseung statt Wasserentnahme.

Pump- und Injektionsversuche können prinzipiell mit konstanter Fluss- oder Pumprate oder konstanter Druckhöhe durchgeführt werden. Die weitaus umfangreichsten Informationen über den Gebirgsbereich können allerdings aus Tests mit konstanter Pumprate (Aquifertest) gewonnen wer-

den, da es für diese Methode sehr viele verschiedene Auswerteverfahren gibt (Typkurvenverfahren, analytische und numerische Auswerteverfahren, Näherungslösungen).

5.1.2.1. Pumpversuch

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Während eines Pumpversuches wird aus einem Brunnen, einer Grundwassermessstelle oder einem Bohrloch Wasser mit einer konstanten Rate entnommen. Die zeitliche Änderung der Wasserstands- bzw. Wasserdruckhöhe wird gemessen. Die Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen ist in der DIN EN ISO 22282-4 (2012) erläutert. Ein daraus entnommenes Schema zu einem Pumpversuch im gespannten Grundwasserleiter ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

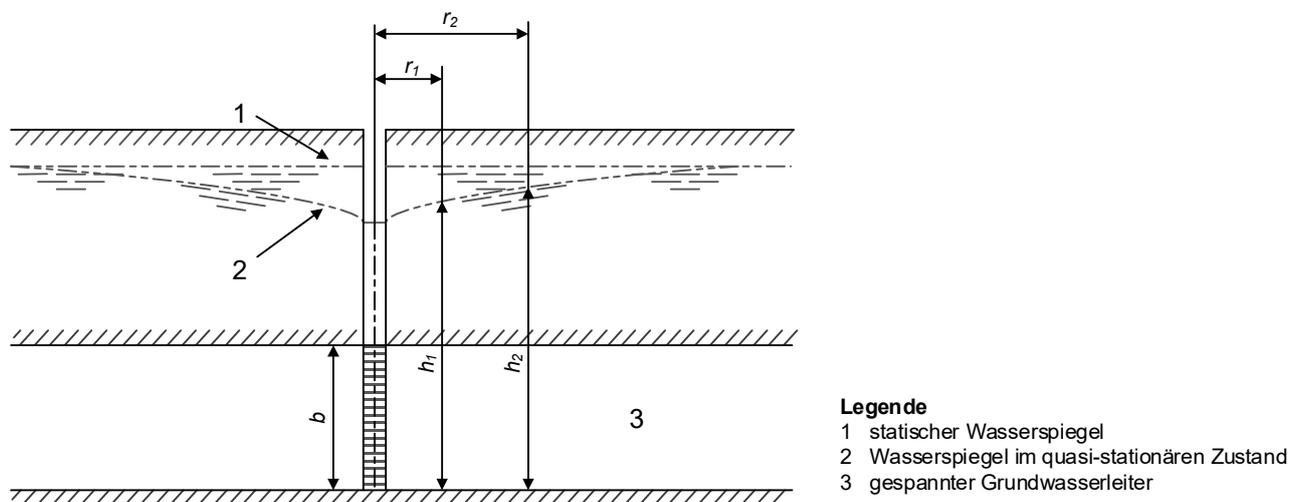


Abbildung 5-1: Schema eines Pumpversuches im gespannten Grundwasserleiter (Quelle: DIN EN ISO 22282-4).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Pumpversuche werden zur Bestimmung von Gebirgsdurchlässigkeiten zwischen 10^{-2} und $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ eingesetzt. Bei sehr hohen Durchlässigkeiten können die erforderlichen Förderleistungen nicht erreicht werden, um eine auswertbare Absenkung zu erreichen: Bei sehr geringen Durchlässigkeiten besteht die Gefahr des Leerpumpens des Bohrloches (Appel & Habler 2001).

Mittels Kurzzeitpumpversuchen können die Gebirgsdurchlässigkeiten im Nahbereich des Bohrloches ermittelt werden. Aus Langzeitpumpversuchen können darüber hinaus weitere Untergrundeigenschaften wie Bohrlocheinflüsse (Skin-Effekt) und Anisotropien (vertikal, horizontal) sowie Lage und Eigenschaften hydraulisch wirksamer Aquiferränder sowie Brunnenkenndaten (Brunneneinzugsgebiet, Reichweite, Kulminationspunkt, Brunnencharakteristik) erkundet werden (Schreiner & Kreysing 1998). Die mit Pumpversuchen erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 gelistet. Pumpversuche sind, sofern die zu untersuchenden Gesteinsschichten grundwasserführend sind, bis in große Teufen einsetzbar.

Auswertung

Die herkömmliche Auswertung der Pump- und Injektionsversuche erfolgt über Typkurvenverfahren. Hierbei werden die gemessenen hydraulischen Druckhöhen in der Absenk- und Wiederanstiegsphase gegen die Zeit im logarithmischen Maßstab aufgetragen und mit Typkurven verglichen

(Abbildung 5-2). Daraus können die oben genannten Aquiferparameter und brunnenspezifischen Kenngrößen ermittelt werden. Die Auswertung erfolgt meist numerisch mit spezieller Software.

Aus dem Kurvenverlauf können zudem Aquifereigenschaften abgelesen werden, wie z. B. eine Zusickerung aus einem überlagerenden Aquifer, die sich in einer zunehmend negativen Steigung der Ausgleichsgerade zeigt.

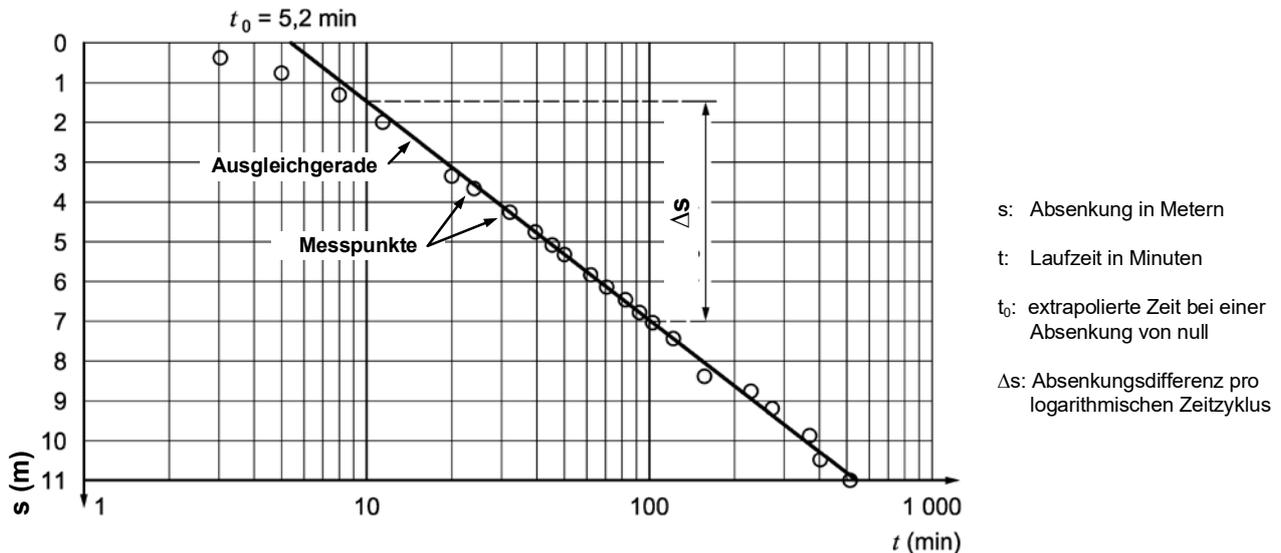


Abbildung 5-2: Grafische Auswertung eines Pumpversuches nach Cooper-Jacob (verändert nach DIN EN ISO 22282-4).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der hydraulischen Druckhöhe infolge einer Grundwasserentnahme aus einem Grundwasserleiter mit einer vorhandenen hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auflösung für die Messung hängt im Wesentlichen vom gewählten Messgerät ab und beträgt bei Druckaufnehmern im Bereich von 1 cm bis 1 mm.

Reichweite

Die horizontale Reichweite liegt bei Kurzzeitpumpversuchen bei 10 bis > 100 m, bei Langzeitpumpversuchen bei 10 bis > 300 m.

Reproduzierbarkeit

Pumpversuche sind bei identischen Umweltbedingungen reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze für die Messung der hydraulischen Druckhöhe beträgt bis hinunter zu 1 mm.

Fehleranfälligkeit

Fehler können sich ergeben aus:

- der Zusammenfassung mehrerer Grundwasserstockwerke,
- nicht geeigneten Auswerteverfahren,
- zu geringer Versuchsdauer,

- Nichtberücksichtigung von Gasen (durch Einschlüsse im Gestein, Ausgasung bedingt ggf. einen Druckabfall).

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Durch einen Langzeitpumpversuch wird das Grundwasser während der Versuchsdauer - und eine Zeitlang auch nach dem Versuch - abgesenkt und die natürlichen Grundwasserbedingungen damit vorübergehend gestört. Nachfolgende Messungen liefern erst nach der Wiedereinstellung der natürlichen Verhältnisse reproduzierbare Ergebnisse. Vor dem Versuch sollten Grundwasserproben für die hydrogeochemische Analyse entnommen werden, um eine nachteilige Beeinflussung des Pumpversuches auf den Chemismus zu vermeiden.

Aufwand

Der Aufwand für Langzeitpumpversuche ist hoch. Der technische und zeitliche Aufwand für einen Pumpversuch ist grundsätzlich abhängig von der Fördermenge, der Versuchsdauer sowie der Gebirgsdurchlässigkeit und der Grundwasserbeschaffenheit. Für Pumpversuche ist i.d.R. eine wasserrechtliche Genehmigung gemäß § 8 WHG erforderlich. Bei geringen Mengen und kurzer Pumpversuchszeit können in Abstimmung mit der zuständigen Behörde diese Versuche ggf. von der Erlaubnispflicht ausgenommen werden. Kontaminiertes Grundwasser muss gereinigt werden.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- bei Langzeitpumpversuchen Erfassung verschiedener Randbedingungen und Untergrundeigenschaften (z. B. Anisotropien, Leakage-Faktoren, Aquiferränder),
- einfache Versuchsdurchführung, große Erfahrung,
- große Reichweite,
- für Langzeitpumpversuche große Genauigkeit im Rahmen des Anwendungsbereiches der Gebirgsdurchlässigkeit zwischen 10^{-2} und $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Nachteile

- Langzeitpumpversuche sowohl in sehr schwach als auch in sehr stark durchlässigen Gebirgsbereichen nicht einsetzbar,
- hoher Aufwand (Kosten und Zeit) bei Langzeitpumpversuchen,
- ggf. wasserrechtliche Genehmigung erforderlich.

Bewertung

Fazit

Ein Langzeitpumpversuch ist eine gängige, einfache und genaue Methode, um hydrogeologische Untergrundkennwerte in stark bis schwach durchlässigen ($k_f = 10^{-2}$ und $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) Gebirgsbereichen großräumig zu ermitteln. Demgegenüber steht der hohe Aufwand. Kurzzeitpumpversuche/Pumptests werden bei geringerem Aufwand zur schnellen Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit in Gebirgsbereichen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-6} und $10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ eingesetzt.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Ein Langzeitpumpversuch kann mit Grundwasserprobennahmen für hydrogeochemische Erkundung kombiniert werden.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Pumpversuche werden seit langem angewandt und zählen zu den Standardmethoden in der Hydrogeologie. Sie sind u. a. fest in der DIN EN ISO 22282-4 (2012) verankert. Daneben existiert umfangreiche Literatur zur Durchführung und Anwendung der Methode. Ein Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung wird im Rahmen dieses Vorhabens nicht erkannt. Ein zusätzlicher Bedarf besteht jedoch in der Verbesserung der Auswerteverfahren.

5.1.2.2. Injektionsversuch

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Ein Injektionstest entspricht einem umgekehrten Pumpversuch, bei dem statt Wasser entnommen, Wasser in das Gebirge eingebracht wird. Injektionstests können mit konstantem Druck oder mit konstanter Fließrate (Aquifertest) durchgeführt werden. Bei dem häufiger verwendeten Verfahren mit konstanter Rate wird Wasser mit konstanter Rate in das Bohrloch (ohne/mit Packer) eingegeben. Der dadurch sich erhöhende Wasserspiegel wird aufgezeichnet.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Ein Injektionsversuch oder Injektions-Test wird zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeiten im Bereich geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit bis $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Appel & Habler 2001) sowohl in gesättigten als auch in ungesättigten Gebirgsbereichen angewendet.

Die mit Injektionsversuchen erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 enthalten. Injektionsversuche sind bis in große Teufen einsetzbar.

Auswertung

Die Auswertung von Injektionstests mit konstanter Rate erfolgt analog zur Pumpversuchsauswertung über Typkurvenverfahren, analytische und numerische Auswerteverfahren oder Näherungslösungen (vgl. Abschnitt 5.1.2.1).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der hydraulischen Druckhöhe infolge einer Infiltration von Wasser in einen Grundwasserleiter mit einer entsprechenden hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auflösung für die Messung des Grundwasserpotenzials beträgt 1 cm bis 1 mm.

Reichweite

Die horizontale Reichweite eines Injektions-Tests liegt bei 10 bis > 100 m (Appel & Habler 2001).

Reproduzierbarkeit

Der Injektionsversuch ist bei identischen Umweltbedingungen eingeschränkt reproduzierbar, da es durch das Einbringen von Wasser zu einer Veränderung des Gebirgsbereiches und damit der hydraulischen Eigenschaften des Gebirgsbereiches kommen kann.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze für die Messung des Grundwasserpotenzials beträgt bis hinunter zu 1 mm.

Fehleranfälligkeit

Fehler können sich ergeben aus:

- ungeeigneten Auswerteverfahren,
- zu geringer Versuchsdauer.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Bei Injektionsversuchen kann es zu einer irreversiblen Veränderung des Gebirgsbereiches durch Aufweiten und Aufreißen von Klüften und damit zu einer Veränderung der hydraulischen Eigenschaften kommen (Appel & Habler 2001).

Analog zu einem Pumpversuch wird bei einem Injektionsversuch das Grundwasser während der Versuchsdauer und eine Zeitlang auch nach dem Versuch aufgehört. Nachfolgende hydraulische Versuche sollten erst nach Wiedereinstellung der natürlichen Verhältnisse durchgeführt werden.

Vor dem Versuch sollten Grundwasserproben für die hydrogeochemische Analyse entnommen werden, um eine nachteilige Beeinflussung durch den Pumpversuch auf den Chemismus zu vermeiden.

Aufwand

Der Aufwand für Injektionsversuche ist abhängig von der Injektionsmenge, der Versuchsdauer sowie der Gebirgsdurchlässigkeit und vergleichsweise hoch. Eine wasserrechtliche Genehmigung ist erforderlich.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- Erfassung vieler Randbedingungen und Untergrundeigenschaften (z. B. Anisotropien, Leakage-Faktoren, Aquiferränder),
- einfache Versuchsdurchführung, große Erfahrung,
- große Reichweite,
- große Genauigkeit.

Nachteile

- hoher Aufwand (Kosten und Zeit),
- es kann zum Aufweiten und Aufreißen von Klüften kommen.

Bewertung

Fazit

Die Einsatzbereiche der Injektionsversuche entsprechen im Wesentlichen denen der Pumpversuche. Anders als letztere können Injektionsversuche aber auch zur Ermittlung hydrogeologischer Messgrößen in der ungesättigten Zone eingesetzt werden, haben jedoch durch die Einpressung von Fremdwasser in den Gebirgsbereich auf diesen größere negative Auswirkungen (z. B. Aufweiten und Aufreißen von Klüften, Lösung von Mineralen, Störung des chemischen Milieus).

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Injektionsversuche mit geringen Injektionsmengen können mit Tracerversuchen kombiniert werden.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Es besteht ein Bedarf an F&E für den Einsatz von Injektionsversuchen in dem für die Endlagerung relevanten Bereich mit Gebirgsdurchlässigkeiten unterhalb von $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Darüber hinaus ist zu untersuchen, inwieweit die Methode nachteilige Einflüsse auf die Gebirgsbereiche besitzt.

5.1.3. Packertests

Packertests sind in dem Regelwerk DIN EN ISO 22282-6 (2012) festgehalten und bezeichnen eine Gruppe geohydraulischer Versuche in einem Bohrloch, bei denen einzelne Bohrlochabschnitte mit Packer hydraulisch abgetrennt sind. Beim Einfachpackertest wird der Test im oberhalb bzw. unterhalb des Packers befindlichen Abschnitt, beim Doppelpackertest abschnittsweise in der Strecke zwischen zwei Packern durchgeführt. Bei Multipackertests können eine Reihe von Bohrlochabschnitten gleichzeitig getestet werden.

Für Packertests wird ein Testventil (sog. Schließventil) benötigt, mit dem der Durchgang zwischen dem Testrohr und der Packerstrecke geöffnet und geschlossen werden kann (Abbildung 5-3). Mit Druckaufnehmern, die über, zwischen und unter den Packern angeordnet sind, werden dabei die Wasserdrücke (p_1 , p_2 und p_3 in Abbildung 5-3) in den verschiedenen Abschnitten gemessen. An einem Bohrloch werden meist mehrere Tests in den nachfolgend beschriebenen, verschiedenen Phasen (Mehrphasen-Packertests) hintereinander durchgeführt (Goldsworthy et al. 2009, Nagra 2001):

- Ruhephase,
- Aktive Testphase (Diagnostischer-, Haupttest- und Optionaler Abschnitt),
- Druckerholungsphase.

Die Nagra hat für die hydrogeologische Erkundung von Endlagerstandorten in der Schweiz Standards zur Durchführung und Auswertung von geohydraulischen Tests entwickelt (Tsang et al. 1988, Ostrowski et al. 1989, Wyss 1989, Ostrowski et al. 1992, Liedke et al. 1994, Adams et al. 1994, Nagra 2001).

Aufgrund einer sehr geringen Reichweite der Packertests sind Aussagen über das Aquifermodell (hydrogeologisches Modell des Untergrundes zur Abbildung der hydraulischen Prozesse), Durchlässigkeitsanisotropien u. ä. nur begrenzt möglich und erfordern spezielle Auswerteverfahren.

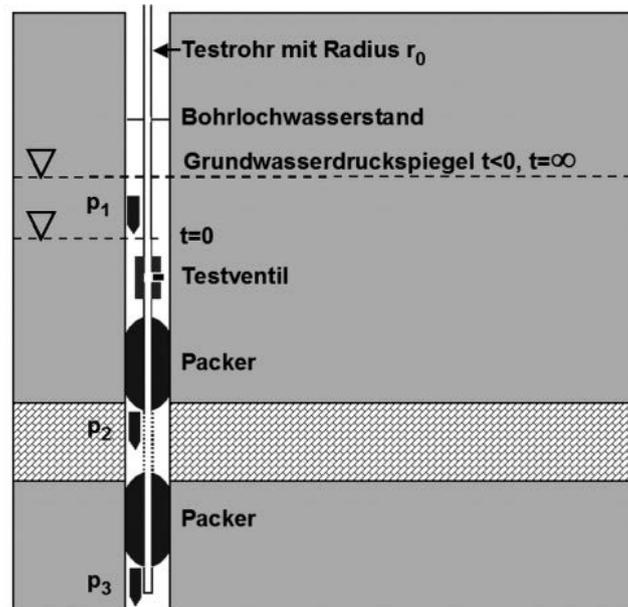


Abbildung 5-3: Bohrloch-Testequipment für Slug-, Drill-Stem und Pulse-Tests am Beispiel einer Doppelpackeranordnung (nach Hekel et al. (2012)).

Vorteile

Bei Tiefenbohrungen werden in der Regel Packertests bevorzugt eingesetzt (Brasser et al. 2008). Dies ist vor allem begründet durch:

- eine hohe Tiefengenauigkeit (± 1 m) in Bezug auf die Untersuchung verschiedener Tiefen- und Zuflussbereiche,
- die Anwendung ist auch in großen Teufen möglich,
- je nach Methode sind auch gering durchlässige Gebirgsbereiche messbar,
- eine hohe Zuverlässigkeit der Messergebnisse, da mehrere Packertests nacheinander durchführbar sind,
- einen hohen Erfahrungsstand,
- durch die geringe Versuchsdauer vergleichsweise kostengünstig.

Nachteil

- geringe horizontale Reichweiten,
- der Speicherkoeffizient kann nur abgeschätzt werden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die für übertägige Erkundungsprogramme maßgeblichen Packertests einzeln beschrieben und bewertet.

5.1.3.1. Wasserdruck-Test (WD-Test)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Im Bohrabschnitt wird Wasser in verschiedenen Druckstufen verpresst. Innerhalb der Druckstufen wird eine konstante verpresste Wassermenge angestrebt. Der Druck wird gegen die Einpressmenge aufgetragen. Diese Druck-Mengen-Diagramme können, mit Grundformen verglichen, Aussagen über das Gebirgsverhalten liefern, z. B. ob eine vollkommen elastische Reaktion erfolgt, oder ob nach dem Druckversuch im Gestein Verformungen zurückbleiben (Kluftaufweitungen). Durch Ver-

wendung eines Doppelpackers und inklusive dessen stufenweises Versetzen innerhalb der Filterstrecke können Durchlässigkeiten in verschiedenen Schichten ermittelt werden (Hölting et al. 2013).

Durchführung und Auswertung des WD-Tests sind im Technischen Regelwerk DIN EN ISO 22282-3 (2012) beschrieben.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Der WD-Test wird zur (Schreiner & Kreysing 1998):

- Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f
- Bestimmung des druckabhängigen Wasseraufnahmevermögens

für Untergrundbereiche mit Gebirgsdurchlässigkeiten im Bereich von $k_f < 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bis $10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ angewendet (Heitfeld 1984).

Die mit WD-Tests erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 enthalten. WD-Tests sind bis in große Teufen einsetzbar.

Auswertung

Die Auswertung erfolgt analytisch aus der Wassermengen-Druck-Kurve, einstufige WD-Tests können anhand von Typkurven- und Geradenverfahren erfolgen (Hölting et al. 2013, Schreiner & Kreysing 1998). Die Auswertung erfolgt i.d.R. mittels spezieller Software.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die messbare Änderung der hydraulischen Druckhöhe infolge der zugegebenen Wassermenge in einem Untergrundbereich mit einer entsprechenden hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auflösung für die Messung der hydraulischen Druckhöhe beträgt 1 cm bis 1 mm.

Reichweite

Die horizontale Reichweite des WD-Tests ist mit 1 bis 10 m gering (Appel & Habler 2001). Mit geringerer Gebirgsdurchlässigkeit sinkt die Reichweite.

Reproduzierbarkeit

Der WD-Test ist bei identischen Umweltbedingungen eingeschränkt reproduzierbar, da es durch das Einpressen von Wasser zu einer Veränderung des Gebirgsbereiches und damit der hydraulischen Eigenschaften des Gebirgsbereiches kommen kann.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze beträgt bis hinunter zu 1 mm.

Fehleranfälligkeit

Fehler können durch Reibungsverluste in der Testapparatur (Gestänge) oder durch die Wahl eines unpassenden Verfahrens bei der Auswertung entstehen.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Bei einem WD-Test kann es bei hohen Druckstufen insbesondere in unverrohrten Bohrlöchern zu einer irreversiblen Veränderung des Gebirgsbereiches kommen, so dass die hydraulischen Eigenschaften des Gebirgsbereiches verändert und nachfolgende Messungen ungünstig beeinflusst

werden (Appel & Habler 2001, LfU BW 1991). Zudem können durch das Anbringen der Packer offene Bohrlochstrecken irreversibel verändert werden und sind für nachfolgende Messungen nicht mehr geeignet (LfU BW 1991). Dies gilt grundsätzlich für alle Packer-Tests.

Aufwand

Der Aufwand ist vergleichsweise gering und von der Teufe abhängig. An einem Tag sind mehrere Tests an einem Bohrloch möglich.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- Einfache Durchführung und Auswertung
- Auch in der ungesättigten Zone durchführbar, für die Auswertung ist jedoch Sättigung erforderlich, Anhaltspunkte in der ungesättigten Zone können gewonnen und k_f -Werte abgeschätzt werden

Nachteile

- Bei Anwendung hoher Drücke ist ein Aufreißen des Gebirges und Freispülen von Klüften möglich (Nahbereich der Bohrung bis max. Reichweite),
- umfangreiche technische Gerätschaft erforderlich,
- geringe Reichweite,
- wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich,
- eine Grundwasserprobennahme ist aufgrund des Einbringens von Wasser grundsätzlich nur vor der Messung durchführbar.

Bewertung

Fazit

Der WD-Test ist eine schnelle und kostengünstige Messmethode, die zur Ermittlung von Gebirgsdurchlässigkeiten im Bereich 10^{-4} bis $10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ eingesetzt werden kann. Er setzt ein standfestes Gebirge voraus.

Hekel (2012) und DIN EN ISO 22282-3 (2012) empfehlen WD-Tests nur zur Überprüfung der Dichtigkeit des Trennflächengefüges sowie zur Überprüfung von Verpressungen und des Verhaltens des Gebirges gegenüber dem hydraulischem Druck. Demnach sollte die Gebirgsdurchlässigkeit vorzugsweise mit instationären Verfahren ermittelt werden, bei der die Druckhöhenänderung mit der Zeit betrachtet wird, da eine Versuchsdurchführung mit stationären Zuständen mit hohen Unsicherheiten behaftet ist. In der Praxis (z. B. auch im Projekt CHRISTA (Jobmann et al. 2016)) werden WD-Tests jedoch aufgrund der einfachen Durchführung häufig eingesetzt.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Unsicherheiten bei den WD-Test-Ergebnissen können minimiert werden, wenn zusätzliche Informationen über das Gebirge und die Wasserwegsamkeiten vorhanden sind. Wasserwegsame Zonen können z. B. mit dem Flowmeter oder durch Fluid-Logging in der Bohrung lokalisiert werden.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Es besteht ein Bedarf an F&E bei der Beeinflussung der Bohrlochwand durch die Druckerhöhungen sowie im Einsatz der Methode in den gering durchlässigen Gebirgsbereichen unterhalb von

$10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, sofern mit der zu erforschenden Methode eine deutlich geringere Beeinflussung des ewG oder weiterer potenzieller barrierewirksamer Schichten einhergeht.

5.1.3.2. Slug- und Bail-Test

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Der Slug- und Bail-Test besteht, anders als die nachfolgend beschriebenen Drill-Stem- und Puls-Tests, nur aus einer Fließphase, d. h. das Ventil bleibt geöffnet. Beim Slug-Test erfolgt ein schlagartiges Einfüllen einer kleinen Wassermenge oder das Eintauchen eines Verdrängungskörpers in das Testrohr, beim Bail-Test ein schlagartiges Abpumpen einer kleinen Wassermenge oder das Ziehen eines Verdrängungskörpers aus dem Testrohr.

Im Testintervall wird der Druck abrupt verändert und damit das hydraulische Gleichgewicht im Untergrund gestört. Die zeitliche Änderung der Wasserdruckhöhe bis zur Wiederherstellung des Gleichgewichtszustandes wird aufgezeichnet.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Der Slug- und Bail-Test wird zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit und der Transmissivität in Bereichen von 10^{-2} - $10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ empfohlen (Appel & Habler 2001, Schreiner & Kreysing 1998). Ostrowski & Kloska (1989) geben als untere Nachweisgrenze $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ an.

Die mit Slug- und Bail-Tests erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 enthalten. Slug- und Bail-Tests sind bis in große Teufen einsetzbar.

Auswertung

Die herkömmliche Auswertung erfolgt mit Geraden- oder Typkurvenverfahren. Für Geringleiter hat sich das Typkurvenverfahren z. B. nach Cooper et al. (1967) bewährt, das, anders als Geradenverfahren, auch die bei geringen Durchlässigkeiten auftretenden Skin-Effekte berücksichtigt. Hierbei werden die Wasserdruckdaten gegen die Zeit t aufgetragen und mit Typkurven (Abbildung 5-4) verglichen. Die Auswertung erfolgt meist mittels spezieller Software.

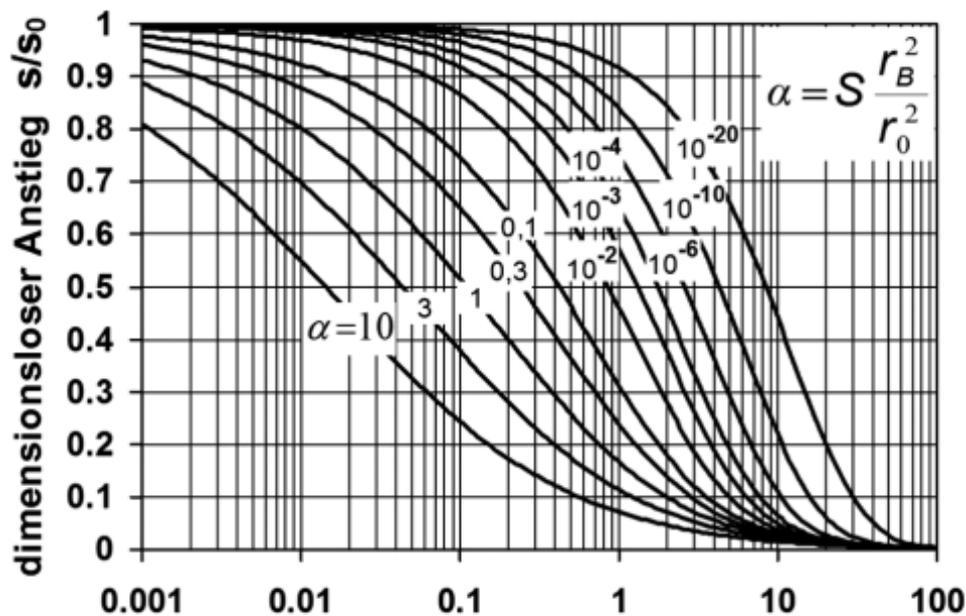


Abbildung 5-4: Typkurven nach Cooper et al. (1967) für Slug-Tests (Hekel 1994).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die messbare Änderung der hydraulischen Druckhöhe infolge einer Druckänderung im Testintervall in einem Untergrundbereich mit einer vorhandenen hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auflösung für die Messung der hydraulischen Druckhöhe beträgt 1 cm bis 1 mm.

Reichweite

Die horizontale Reichweite des Slug- und Bail-Tests ist mit 1 bis 10 m gering (Appel & Habler 2001).

Reproduzierbarkeit

Der Slug- und Bail-Test ist bei identischen Umweltbedingungen eingeschränkt reproduzierbar, da es zu einer Veränderung der hydraulischen Eigenschaften des Gebirgsbereiches kommen kann.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze beträgt bis hinunter zu 1 mm.

Fehleranfälligkeit

Fehler können bei der Auswertung durch die Wahl eines unpassenden Verfahrens entstehen. Während Geradenverfahren nur Näherungslösungen für die Transmissivität geben, beruht das Typkurvenverfahren auf exakt analytischen Lösungen, ist jedoch fehleranfälliger, da die Typkurven von idealtypischen Verhältnissen ausgehen.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Wie bei anderen Packertests kann es durch den Einsatz hoher Druckstufen insbesondere in unverrohrten Bohrlöchern zu einer irreversiblen Veränderung des Gebirgsbereiches, durch das Setzen

der Packer zu irreversiblen Veränderung der Bohrlochstrecken kommen (LfU BW 1991), nachfolgende Messungen können damit ungünstig beeinflusst oder nicht mehr möglich werden. Dies betrifft auch die Grundwasserprobennahme.

Aufwand

Der technische und zeitliche Aufwand ist relativ gering. Die Versuchsdauer ist abhängig von der Gebirgsdurchlässigkeit.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- einfach anzuwenden,
- geringer technischer, personeller, zeitlicher und monetärer Aufwand,
- dem Untergrund muss kein Wasser zugeführt oder entnommen werden (somit auch in kontaminierten Bereichen anwendbar),
- auch in geringen Gebirgsdurchlässigkeiten bis ca. $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ durchführbar.

Nachteile

- Geringe Reichweite.

Bewertung

Fazit

Ein Slug- und Bail-Test ist ein einfacher Versuch, der mit geringem Aufwand zur Ermittlung von Gebirgsdurchlässigkeiten durchgeführt werden kann. Er ist auch in gering durchlässigen Gebirgsbereichen bis $k_f > 10^{-9}$ bis $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ anwendbar, jedoch auf das Nahfeld bis 1 m begrenzt (Appel & Habler 2001).

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Durch eine Kombination mit anderen Packertests (Pulse-, DS-Tests) können bei gleicher Testausrüstung ein breites Durchlässigkeitsspektrum untersucht werden (Schreiner & Kreysing 1998).

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Slug- und Bail-Tests werden zusammen mit anderen Packertests bereits in der Erkundung von Endlagern eingesetzt und es besteht kein Bedarf an grundlegender F&E. Die Beeinflussung der Bohrlochwand durch die Druckerhöhungen sowie der Einsatz der Methode in gering durchlässigen Gebirgsbereichen unterhalb $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sind jedoch weiter zu erforschen, sofern mit der zu erforschenden Methode eine deutlich geringere Beeinflussung des ewG oder weiterer potenzieller barrierewirksamer Schichten einhergeht.

5.1.3.3. Drill-Stem-Test (DS-Test)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Die Methode ähnelt dem Slug-Test, jedoch wird das Testventil nach einer Fließphase wieder geschlossen (Schließphase), so dass das Druckgefälle noch nicht ausgeglichen ist und die Druckerhöhung im Bohrloch gemessen wird. Die zeitliche Änderung des Wasserdruckes wird in der Fließ- und Schließphase aufgenommen. Fließ- und Schließphasen können mehrfach wiederholt werden. Der zeitliche Druckverlauf wird mittels Druckaufnehmer gemessen.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Der Drill-Stem-Test wird zur Bestimmung der Durchlässigkeit in Gebirgsbereichen von $< 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bis $10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ angewendet (Appel & Habler 2001) und ist auch für den Einsatz in geringdurchlässigen Gebirgsbereichen geeignet. Ostrowski & Kloska (1989) geben als untere Nachweisgrenze eine Durchlässigkeit von $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ an.

Die mit DS-Tests erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 enthalten. DS-Tests sind bis in große Teufen einsetzbar.

Auswertung

Für die Auswertung kann aus der Fließphase nach Theis (1935) oder Horner (1951) erfolgen. Daneben stehen Typkurvenverfahren zur Verfügung (Hekel & Odenwald 2012). Eine Übersicht der Auswertemethoden ist in Hekel (1994) und Schreiner & Kreysing (1998) enthalten.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die messbare Änderung der hydraulischen Druckhöhe infolge einer Druckänderung im Testintervall in einem Untergrundbereich mit einer entsprechenden hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auflösung für die Messung der hydraulischen Druckhöhe beträgt 1 cm bis 1 mm.

Reichweite

Die horizontale Reichweite des Drill-Stem-Tests ist mit 1 bis 10 m gering (Appel & Habler 2001).

Reproduzierbarkeit

Der Drill-Stem-Test ist auch bei gestörten Druckverhältnissen reproduzierbar, jedoch nur eingeschränkt, da es zu einer Veränderung der hydraulischen Eigenschaften des Gebirgsbereiches kommen kann.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze beträgt bis hinunter zu 1 mm.

Fehleranfälligkeit

Fehler können bei der Auswertung durch die Wahl eines unpassenden Verfahrens entstehen.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Wie bei anderen Packertests kann es durch den Einsatz hoher Druckstufen insbesondere in unverrohrten Bohrlöchern zu einer irreversiblen Veränderung des Gebirgsbereiches, durch das Setzen der Packer zu irreversiblen Veränderung der Bohrlochstrecken kommen, nachfolgende Messungen können damit ungünstig beeinflusst oder nicht mehr möglich werden.

Aufwand

Der technische und monetäre Aufwand ist gering. Die Versuchsdauer ist mit ca. 1 bis 10 Stunden ebenfalls gering, jedoch im Vergleich zu anderen Packertests zeitaufwendiger. Der Zeitaufwand beim Drill-Stem-Test ist von der Gebirgsdurchlässigkeit und der Standfestigkeit des Gebirges abhängig.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- hohe Tiefengenauigkeit (± 1 m) in Bezug auf die Untersuchung verschiedener Teufen- und Zuflussbereiche,
- Anwendung in großen Teufen möglich,
- gering durchlässige Gebirgsbereiche bis 10^{-10} m·s⁻¹ messbar,
- hohe Genauigkeit, da mehrere Packertests nacheinander durchführbar sind,
- hoher Erfahrungsstand,
- kostengünstig.

Nachteile

- geringe horizontale Reichweiten,
- zeitaufwendiger als andere Packerversuche,
- wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich.

Bewertung

Fazit

Ein Drill-Stem-Test ist für den Einsatz bei Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-5} bis 10^{-10} m·s⁻¹ geeignet. Es ist ein einfacher Versuch mit jedoch aufwändiger Messapparatur, der auch ohne Voraussetzung eines Ruhewasserspiegels beliebig wiederholt werden kann (Schreiner & Kreysing 1998).

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Drill-Stem-Tests eignen sich für den kombinierten Einsatz mit Pumpversuchen im Festgestein und erlauben die vertikale Differenzierung eines k_f -Werte-Profiles.

Durch eine Kombination mit anderen Packertests (Pulse-, Slug- und Bail-Tests) können bei gleicher Testausrüstung breite Durchlässigkeitsbereiche untersucht werden (Schreiner & Kreysing 1998).

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Drill-Stem-Tests werden zusammen mit anderen Packertests bereits in der Erkundung von Endlagern eingesetzt und es besteht somit kein Bedarf an grundlegender F&E. Die Beeinflussung der Bohrlochwand durch die Druckerhöhungen sowie der Einsatz der Methode in gering durchlässigen Gebirgsbereichen unterhalb von 10^{-10} m·s⁻¹ sind jedoch weiter zu erforschen, sofern mit der zu erforschenden Methode eine deutlich geringere Beeinflussung des ewG oder weiterer potenzieller barrierewirksamer Schichten einhergeht.

5.1.3.4. Pulse-Test

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Anders als die zuvor beschriebenen Slug- und Bail- sowie Drill-Stem-Tests besteht der Pulse-Test nur aus einer Schließphase. Im Testintervall wird künstlich ein pulsartiger Über- oder Unterdruck erzeugt, wobei das Testventil unmittelbar nach Einstellung der maximalen Druckänderung wieder geschlossen wird. Dadurch kommt es zu einer Störung des hydraulischen Gleichgewichts im Grundwasserleiter, dessen zeitlicher Ausgleich anschließend registriert wird. Je nach Gebirgsdurchlässigkeit wird eine Rückkehr in den Gleichgewichtszustand schnell oder langsam erfolgen.

Verglichen mit Slug- und Bail-Tests erfolgt der Druckausgleich drei- bis viermal so schnell, allerdings mit erheblich geringerer Eindringtiefe bzw. Reichweite des Tests.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Der Pulse-Test eignet sich zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit in Gebirgsbereichen mit sehr geringer Durchlässigkeit ($k_f < 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bis $10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) und ist somit auch für den Einsatz in geringdurchlässigen Gebirgsbereichen geeignet. Die mit Pulse-Tests erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Pulse-Tests sind bis in große Teufen einsetzbar.

Auswertung

Durchführung und Auswertung des Pulse-Tests sind im Technischen Regelwerk DIN EN ISO 22282-6 (2012) sowie in der Literatur (z. B. Hekel (1994)) ausführlich beschrieben. Hierbei können die Messgrößen wie Durchlässigkeit und Transmissivität u. a. durch das analytische Verfahren nach Cooper (1967), Bredehoeft und Papadopoulos (1980) bestimmt werden. Die Auswertung erfolgt analog dem Slug-Test, wobei bei der Auswertung das Quadrat des Testrohradius, mit dem bei Slug-Tests die Fließrate bestimmt wird, gemäß Bredehoeft & Papadopoulos (1980) beim Pulse-Test durch einen Ausdruck für die Systemkompressibilität des Testequipments zu ersetzen ist (Hekel 1994, Hekel & Odenwald 2012).

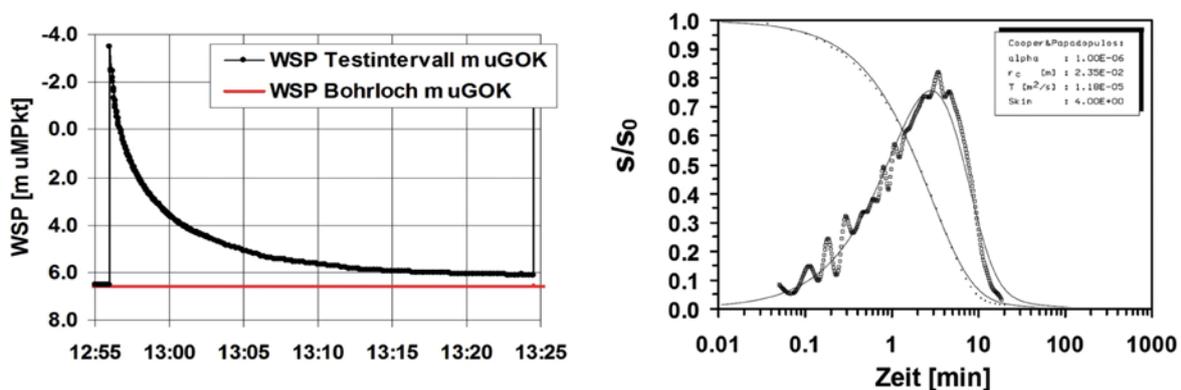


Abbildung 5-5: Messergebnisse (links) und Auswertung eines Pulse-Tests (rechts) (nach Hekel & Odenwald (2012)).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die messbare Änderung der hydraulischen Druckhöhe infolge einer Druckänderung im Testintervall in einem Untergrundbereich mit einer entsprechenden hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auflösung für die Messung der hydraulischen Druckhöhe beträgt 1 cm bis 1 mm.

Reichweite

Die horizontale Reichweite des Pulse-Tests liegt bei 1 m (Appel & Habler 2001, Hekel 1994).

Reproduzierbarkeit

Der Pulse-Test ist bei identischen Umweltbedingungen ggf. nur eingeschränkt reproduzierbar, da es beim Einsatz von hohen Drücken zu einer Veränderung der hydraulischen Eigenschaften des Gebirgsbereiches kommen kann.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze beträgt bis zu hinunter zu 1 mm.

Fehleranfälligkeit

Fehler können entstehen durch

- Gestörte Verhältnisse durch Abteufen der Bohrung,
- Verformung der Testapparatur infolge Druck,
- Fehler bei der Anpassung der Typkurven.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Bei Einsatz großer Druckimpulse besteht insbesondere in unverrohrten Bohrlöchern die Gefahr der Verformung des Gebirgsbereiches, der Aufweitung und dem Aufreißen von Klüften.

Aufwand

Der Aufwand für einen Pulse-Test ist relativ gering, nimmt aber mit steigender Teufe zu. Verglichen mit Slug- und Bail-Tests erfolgt der Druckausgleich drei- bis viermal so schnell, allerdings mit erheblich geringerer Eindringtiefe bzw. Reichweite des Tests.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- hohe Tiefengenauigkeit (± 1 m),
- Anwendung in großen Teufen möglich,
- auch gering durchlässige Gebirgsbereiche messbar, einzige Methode zur Messung von Gebirgsdurchlässigkeiten $< 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- hohe Genauigkeit, da mehrere Tests nacheinander durchführbar sind,
- hoher Erfahrungsstand,
- kostengünstig.

Nachteile

- geringe horizontale Reichweiten,
- Aussagen zur Anisotropie der Gebirgsdurchlässigkeiten u. ä. sind nur begrenzt und nur mit speziellen Auswerteverfahren möglich.

Bewertung

Fazit

Der Pulse-Test ist ein einfacher, schneller und kostengünstiger Versuch, der sich wie kein anderes Verfahren auch zum Einsatz in gering durchlässigen Gebirgsbereichen von 10^{-7} bis $10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ eignet.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Durch eine Kombination mit anderen Packertests (DS-, Slug- und Bail-Tests) lässt sich bei gleicher Testausrüstung das gesamte Durchlässigkeitsspektrum des Gebirgsbereiches erkunden (Schreiner & Kreysing 1998).

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Packertests werden bereits in der Erkundung von Endlagern in gering durchlässigen Gebirgsbereichen bis zu $10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ erfolgreich eingesetzt. Es besteht damit kein Bedarf an grundlegender F&E.

Die Beeinflussung der Bohrlochwand durch die Druckerhöhungen ist jedoch zu untersuchen, sofern mit der zu erforschenden Methode eine deutlich geringere Beeinflussung des ewG oder weiterer potenzieller barrierewirksamer Schichten einhergeht.

5.1.3.5. Squeeze-Test

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Beim Squeeze-Test wird das Wasservolumen im geschlossenen Packer bis zum Erreichen eines gewünschten Druckes zwischen den Packern aufgeblasen. Der zeitliche Druckabfall nach Beenden des Aufblasens wird gemessen und aufgetragen.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Der Squeeze-Test eignet sich zur orientierenden Untersuchung der Gebirgsdurchlässigkeit in Gebirgsbereichen mit sehr geringer Durchlässigkeit. In Brassler et al. (2008) wird eine untere Nachweisgrenze von $k_f < 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ angegeben. Hekel (1994) stellt dar, dass bei Transmissivitäten $< 5\cdot 10^{-8} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ sehr gute und durch andere Messmethoden reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden.

Die mit Squeeze-Tests erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 gelistet. Squeeze-Tests sind bis in große Teufen einsetzbar.

Auswertung

Die Auswertung kann grafisch aus dem Quotient der Steigung m des initialen Druckabfalls und der maximalen Druckdifferenz ($p_{max} - p_0$) erfolgen:

$$K - Index = \frac{m}{(p_{max} - p_0)} \quad (5-19)$$

Aus den ermittelten K-Indizes kann die Gebirgsdurchlässigkeit abgeschätzt werden.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die messbare Änderung des Druckes infolge einer Druckänderung im Testintervall in einem Untergrundbereich mit einer entsprechenden hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auflösung ist abhängig vom eingesetzten Messgerät und beträgt für Druckaufnehmer bis 0,1 mbar.

Reichweite

Die horizontale Reichweite des Squeeze-Tests liegt bei 1 m (Appel & Habler 2001).

Reproduzierbarkeit

Der Squeeze-Test ist bei identischen Umweltbedingungen eingeschränkt reproduzierbar, da es beim Einsatz von hohen Drücken zu einer Veränderung der hydraulischen Eigenschaften des Gebirgsbereiches kommen kann.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze beträgt bei Druckaufnehmern bis hinunter zu 0,1 mbar.

Fehleranfälligkeit

Fehler können durch Interferenzen mehrerer Druckbeaufschlagungen innerhalb einer Testserie entstehen. Hekel (1994) empfiehlt daher, eine Testserie von unten nach oben zu fahren.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Wie bei anderen Packertests kann es durch das Setzen der Packer zu irreversiblen Veränderung der Bohrlochstrecken kommen und nachfolgende Messungen ungünstig beeinflussen. Beim Aufblasen mit großem Druck besteht insbesondere in unverrohrten Bohrlöchern zudem die Gefahr der irreversiblen Verformung des Gebirgsbereiches, der Aufweitung und dem Aufreißen von Klüften.

Aufwand

Technischer Aufwand und Versuchsdauer sind gering. Eine Serie von Squeeze-Tests ist meist innerhalb eines Tages durchführbar (Hekel 1994).

Vor- und Nachteile

Vorteile

- Kurze Versuchsdauer und geringer Aufwand,
- bei sehr geringen Gebirgsdurchlässigkeiten anwendbar,
- kann in gering durchlässigen Gebirgsbereichen ggf. andere Tests ersetzen.

Nachteile

- geringe horizontale Reichweiten,
- nur Abschätzung der Gebirgsdurchlässigkeit möglich.

Bewertung

Fazit

Der Squeeze-Test eignet sich zur schnellen Abschätzung der Durchlässigkeit und ist auch in Gebirgsbereichen mit sehr geringer Durchlässigkeit ($k_f < 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) anwendbar. Squeeze-Tests können in gering durchlässigen Gebirgsbereichen auch quantitativ als Pulse-Test ausgewertet werden und daher andere Tests ersetzen (Hekel 1994).

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Der Squeeze-Test kann - bei gleichem Testequipment - mit allen anderen Packertests kombiniert werden.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Bisher liegen nur wenig Literatur und Erfahrungswerte zum Squeeze-Test vor. Im Rahmen dieses Vorhabens besteht jedoch kein zwingender Bedarf, an Forschung und Entwicklung, da die relevanten Messgrößen auch durch andere Erkundungsmethoden ermittelt werden können. Aufgrund des geringen Versuchsaufwandes und des Einsatzes bei sehr geringen Gebirgsdurchlässigkeiten wäre aber eine zusätzliche Untersuchung hilfreich, inwieweit und bis zu welcher unteren Gebirgsdurchlässigkeit diese Methode einsetzbar ist und ggf. andere aufwändigere Tests ergänzen und ggf. ersetzen kann.

5.1.3.6. Weitere Packertests

5.1.3.6.1. Packer-Flowmeter-Logging

In einer Packerstrecke mit zylindrischem Innenrohr wird ein Propeller-Flowmeter installiert und die Zuflüsse unter stationären Bedingungen in die Packerstrecke gemessen. Die Zuflussraten können dabei tiefengenau ermittelt werden (Appel & Habler 2001).

Das Packer-Flowmeter-Logging ist zur Ermittlung von Gebirgsdurchlässigkeiten in Gebirgsbereichen mit Durchlässigkeiten zwischen $5 \cdot 10^{-3}$ bis $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ anwendbar. Mit Hilfe dieser Messmethode können auch Bereiche detektiert werden, welche z. B. aufgrund von Klüften oder Auflockerungszonen höhere Durchlässigkeiten aufweisen.

Die Auswertung erfolgt numerisch mit spezieller Software (Hufschmied 1983; Thomson 1990; Ammann 1993; Appel & Habler 2001).

5.1.3.6.2. Druckerholungstest

Die hydraulische Druckverteilung in den Gebirgsbereichen wird durch eine geohydraulische Messmethode mit konstanter Druckhöhe oder konstanter Flussrate gestört. Nach Abschluss des Versuches streben die Druckverteilungen wieder nach den natürlichen Druckverhältnissen (Appel & Habler 2001).

Der zeitliche Druckausgleich wird aufgezeichnet und aus der Druckausgleichskurve kann die Gebirgsdurchlässigkeit gemäß dem Verfahren nach Horner (1951) ermittelt werden.

5.1.3.6.3. Pumptest mit Packer

Analog zu einem Pumpversuch wird aus der Packerstrecke eine konstante Wassermenge entnommen bis stationäre Wasserdruckverhältnisse vorliegen. Die Druckabsenkung und der Wiederanstieg nach Beendigung der Entnahme werden im Bohrloch aufgezeichnet.

Die Auswertung erfolgt analog zu den Pumpversuchen über Typkurven.

5.1.4. Weitere geohydraulische Bohrlochmethoden

5.1.4.1. Einschwingverfahren

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Beim Einschwingverfahren nach Krauss (1977) wird der Grundwasserspiegel in einem luftdicht abgeschlossenen Brunnen oder Pegel mittels Druckerhöhung ausgelenkt und kehrt nach Druckentlastung (Öffnen des Brunnenkopfes) wieder zum Ausgangsniveau zurück. Der zeitliche Wiederanstieg des Grundwasserspiegels wird gemessen.

Durchführung und Auswertung der Einschwingversuche sind im Technischen Regelwerk DIN 18130-2 beschrieben.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Das Einschwingverfahren eignet sich zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit in Durchlässigkeitsbereichen von $k_f < 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Schreiner & Kreysing 1998).

Einschwingversuche sind an ausgebauten Bohrlöchern (Brunnen, Messstellen) anwendbar, die Filterstrecke muss hierbei in der gesättigten Zone liegen (vgl. Tabelle 5-2). Grundsätzlich bis in große Teufenbereiche einsetzbar, kann beim Einschwingverfahren der Pressluftverbrauch jedoch in tiefliegenden Grundwasserspiegeln sehr hoch sein, um eine ausreichende Absenkung zu erzielen (Schreiner & Kreysing 1998). Die mit dem Einschwingverfahren erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 enthalten.

Auswertung

Der Wiederanstieg über die Zeit wird aufgetragen und aus der Anstiegskurve ist die Exponentialfunktion E und die Periode der Schwankungen zu entnehmen. Daraus lassen sich Eigenfrequenz und Dämpfungskoeffizient bestimmen (Krauss 1977).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die messbare Änderung der hydraulischen Druckhöhe infolge einer Druckänderung in einem Untergrundbereich mit einer entsprechenden hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auflösung für die Messung der hydraulischen Druckhöhe beträgt 1 cm bis 1 mm.

Reichweite

Die horizontale Reichweite liegt im großmaßstäblichen Bereich bei 1 bis 10 m (Habler & Appel 2001) bis 100 m (Schreiner & Kreysing 1998).

Reproduzierbarkeit

Das Einschwingverfahren ist bei identischen Umweltbedingungen reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze beträgt bis hinunter zu 1 mm.

Fehleranfälligkeit

Fehler können durch Einflüsse des Ringraumes (z. B. Verschmierung der Bohrlochwand im Ton) entstehen, welche die Schwingungen und damit das Versuchsergebnis verändern können. In der Praxis zeigte sich jedoch eine gute Übereinstimmung zu anderen geohydraulischen Verfahren (Müller 1984).

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Da die Druckbeanspruchungen beim Einschwingversuch sehr gering sind, können Beeinflussungen des Gebirgsbereiches und nachfolgender Messungen ausgeschlossen werden.

Jedoch können sich durch diesen Versuch die chemischen Eigenschaften des Grundwassers ändern. Die Grundwasserprobennahme ist daher vor dem Versuch durchzuführen.

Aufwand

Der Aufwand für das Einschwingverfahren ist sehr gering. Die Versuchsdauer beträgt maximal eine Stunde.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- sehr geringer technischer, zeitlicher und monetärer Aufwand,
- durch kurze Versuchszeiten und schnellen Einsatz keine Verfälschungen der Messwerte durch wechselnde hydrologische und anthropogene Einflüsse gegeben (Schreiner & Kreyling 1998),
- keine Entnahme von Wasser, daher keine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich,
- Beeinflussung und Veränderung des Gebirges durch Messmethode äußerst gering,
- nicht auf gesättigte Zone beschränkt.

Nachteile

- geringe Erfahrungswerte,
- bei tiefliegenden Grundwasserspiegeln hoher Pressluftverbrauch.

Bewertung

Fazit

Für das Einschwingverfahren liegt bisher nur in begrenztem Umfang praktische Erfahrung vor und sollte daher nicht als alleinige Messmethode herangezogen werden. Es ist ein einfaches, sehr schnelles und kostengünstiges Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeiten im Bereich von 10^{-3} bis $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, für das keine wasserrechtliche Genehmigung benötigt wird.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Das Einschwingverfahren kann zur Ergänzung anderer geohydraulischer Verfahren herangezogen werden.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Bisher gibt es nur begrenzt praktische Erfahrung mit dem Einschwingverfahren. Im Rahmen dieses Vorhabens besteht jedoch kein zwingender Bedarf an Forschung und Entwicklung, da die relevanten Messgrößen auch durch andere Erkundungsmethoden ermittelt werden können. Aufgrund des sehr geringen technischen, zeitlichen und monetären Aufwandes wäre aber eine zusätzliche Forschung und Entwicklung förderlich, inwieweit und bis zu welcher unteren Gebirgsdurchlässigkeit diese Methode einsetzbar ist und ggf. andere aufwendigere Tests ergänzen oder sogar ersetzen kann.

5.1.4.2. Auffüllversuche

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

In einem Bohrloch wird eine zeitlich konstante Wassermenge eingeleitet. Nach Erreichen eines stationären Wasserspiegels wird der Versuch noch einige Zeit weitergeführt. Auffüllversuche werden nach dem Verfahren von Kollbrunner (1946) oder als Open-End-Tests (Earth Manual 1963) durchgeführt. Der zeitliche Wasserspiegelverlauf und die eingeleitete Wassermenge werden aufgezeichnet. Auffüllversuche erfordern ein vollverrohrtes Bohrloch.

Durchführung und Auswertung der Auffüll- und Absenkversuche sind in den Technischen Regelwerken DIN ISO 22282-2 sowie DIN 18130-2 beschrieben.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Mit dieser Methode können die Gebirgsdurchlässigkeit und der Skin-Faktor des Brunnens in Gebirgsbereichen mit mittleren Durchlässigkeiten ($k_f = 10^{-5}$ bis $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ermittelt werden.

Die mit Auffüllversuchen erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 enthalten. Auffüllversuche sind bis in große Teufen anwendbar.

Auswertung

Die Auswertung erfolgt über einen empirischen Ansatz aus der Wasseraufnahmemenge, der sich gegenüber theoretischen Ansätzen als günstiger erwiesen hat (Schreiner & Kreysing 1998). Dabei wird die pro Zeiteinheit versickerte Wassermenge Q ermittelt und auf eine Teststrecke und einen Vergleichsdruck normiert. Anhand von Q_{WD}/k_f -Wert-Diagrammen können daraus die Gebirgsdurchlässigkeiten abgelesen werden (Schreiner & Kreysing 1998).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die messbare Änderung der hydraulischen Druckhöhe infolge des Einbringens einer Wassermenge in einem Untergrundbereich mit einer vorhandenen hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auflösung für die Messung der hydraulischen Druckhöhe liegt bei 1 cm bis 1 mm.

Reichweite

Die horizontale Reichweite liegt bei 1 bis 10 m (Appel & Habler 2001).

Reproduzierbarkeit

Auffüll- und Absenkversuche sind bei identischen Umweltbedingungen reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze beträgt bis hinunter zu 1 mm.

Fehleranfälligkeit

- Verfälschungen der Messwerte durch Verschmieren/Abdichtung der Bohrlochwand durch feines Material aus dem Gebirgsbereich (bei Tongestein) oder durch den Einsatz von Spülmittelzusätzen,
- die Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes von der Wassersättigung in der ungesättigten Zone wird nicht berücksichtigt.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Durch diesen Versuch können sich die chemischen Eigenschaften des Grundwassers ändern. Die Grundwasserprobennahme ist daher vor dem Versuch durchzuführen.

Aufwand

Der technische Aufwand für den eigentlichen Auffüllversuch ist vergleichsweise gering, für die Vorbereitung des Versuches (u. a. Spülung) ist jedoch ein erhöhter Aufwand erforderlich.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- geringer Aufwand und einfache Versuchsdurchführung,
- aufgrund geringer Druckbeanspruchung i.d.R. kein Aufreißen des Gebirges und Freispülen von Klüften.

Nachteile

- Verschleppung von bindigem Material im Bohrloch,
- vor Versuchsdurchführung eine intensive Spülung des Bohrloches notwendig (Schreiner & Kreysing 1998),
- wasserrechtliche Genehmigung erforderlich.

Bewertung

Fazit

Auffüllversuche sind einfache und kostengünstige Methoden, um die Gebirgsdurchlässigkeit sowohl in gesättigten, als auch in ungesättigten Untergrundverhältnissen zu bestimmen. In der ungesättigten Zone sind die Möglichkeiten zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes jedoch sehr begrenzt (Scheytt & Hengelhaupt 2001) und dienen in erster Linie der Abschätzung des k_f -Wertes.

Auffüllversuche erfordern ein verrohrtes (ausgebautes) Bohrloch, die Filterstrecke muss hierbei im Grundwasser (gesättigte Zone) liegen.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Auffüllversuche mit geringen Wassermengen können mit Tracerversuchen kombiniert werden.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Für die Durchführung der Auffüllversuche liegt das Technische Regelwerk DIN EN ISO 22282-2 (2012) vor. Es besteht ein Bedarf an F&E für den Einsatz der Methode in dem für die Endlagerung relevanten Bereiche mit geringen Gebirgsdurchlässigkeiten unterhalb $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, sofern der Wertebereich der Messgröße nicht durch andere Methoden bestimmt werden kann und mit der zu erforschenden Methode eine geringere Beeinflussung des ewG oder weiterer potenzieller barriere-wirksamer Schichten zu erwarten ist.

5.1.4.3. Fluid-Logging

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Beim Fluid-Logging wird in einem Bohrloch die Bohrlochflüssigkeit gegen ein Fluid mit deutlich niedrigerer oder höherer elektrischer Leitfähigkeit ausgetauscht. Danach wird mit einer konstanten Pumpmenge der Grundwasserspiegel abgesenkt und ein hydraulisches Gefälle zum Bohrloch hin erzeugt. Dadurch wird ein Zufluss zum Bohrloch angeregt. Die zeitliche Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit durch die Zuflüsse wird durch eine Sonde in Abhängigkeit von der Tiefe erfasst. Hierbei werden die einzelnen Zustrombereiche als Peaks im Leitfähigkeitslog erkennbar (Schreiner & Kreysing 1998).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Mit dieser Methode können Klufftransmissivitäten bestimmt und die tiefengenaue Lokalisierung von Zu- und Abflusszonen im Bohrloch ermittelt werden (Schreiner & Kreysing 1998). Das Fluid-

Logging ist nur in der gesättigten Zone anwendbar und wird in Schreiner & Kreysing (1998) für Durchlässigkeiten im Bereich von $5 \cdot 10^{-4}$ bis $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ empfohlen. Tsang & Hufschmied (1988) geben eine untere Nachweisgrenze der Transmissivität von $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ an.

Die mit Fluid-Logging erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Fluid-Logging ist bis in große Teufenbereiche einsetzbar.

Diese Methode wurde von der Nagra in der Schweiz für Standortuntersuchungen entwickelt (Tsang & Hufschmied 1988).

Auswertung

Aus den Leitfähigkeitslogs (Mikrosiemens/cm)/m Teufe) können mit verschiedenen analytischen und numerischen Verfahren die Zuflussraten ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) und Teiltransmissivitäten einzelner Zuflusszonen berechnet werden. Die Gesamttransmissivität kann aus dem Pumpversuch ermittelt werden. Die Messmethode und die entsprechende Auswertung sind ausführlich in Schreiner & Kreysing (1998) beschrieben.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der Leitfähigkeit des Fluids infolge einer Änderung der Zu- und Abflüsse in einem Bohrlochabschnitt.

Die Auflösung für die Messung der Leitfähigkeit beträgt bis $1 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Reichweite

Die horizontale Reichweite liegt mit $< 10 \text{ m}$ im kleinskaligen Bereich.

Reproduzierbarkeit

Fluid-Logging ist bei identischen Umweltbedingungen reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze der Leitfähigkeitslogs beträgt bis $1 \mu\text{S}$, die Genauigkeit liegt bei 1% vom Messbereich.

Fehleranfälligkeit

Fehler können durch mögliches Interferieren der Ergebnisse mit zunehmender Versuchszeit entstehen. Bei hohen Dichteunterschieden zwischen der Austauschflüssigkeit und dem anstehenden Grundwasser besteht zudem die Gefahr, dass sich anfängliche Peaks der Leitfähigkeiten verwischen und die Ergebnisse verfälschen (LfU BW 1991).

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Durch diesen Versuch können sich die chemischen Eigenschaften des Grundwassers ändern. Die Grundwasserprobennahme ist daher vor dem Versuch durchzuführen.

Aufwand

Der technische Aufwand umfasst den Fluidaustausch und Pumpversuch, die Leitfähigkeitssonden und den Aufwand für die Versuchsauswertung. Der zeitliche Aufwand steigt mit der Teufe der Bohrung.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- schnelle Durchführbarkeit und geringer technischer Aufwand,
- Lokalisierung und Quantifizierung der zur Gesamttransmissivität beitragenden Zuflusszonen, z. B. in Klüften oder Störungen,
- Erfassung der Inhomogenitäten.

Nachteile

- große Erfahrung und gute Erkenntnisse der Strömungsverhältnisse im Bohrloch zur Interpretation der Ergebnisse notwendig,
- aufwändige Auswerteverfahren,
- Transmissivitäten von Bereichen mit deutlich geringer Gebirgsdurchlässigkeit und damit deutlich geringeren Zuflüssen können nicht gemessen werden.

Bewertung

Fazit

Fluid-Logging ist eine technisch einfach einzusetzende Messmethode mit breitem Einsatzbereich und in Bohrungen mit oder ohne Packer über relativ große Durchlässigkeitsbereiche hinweg sowohl in gespannten als auch in ungespannten Grundwasserverhältnissen anwendbar. Hiermit können Zufluss- und Abflusszonen lokalisiert und Kluftdurchlässigkeiten bestimmt werden. Dieses Verfahren ist kostengünstiger als Packertests, eignet sich aber nur zur Bestimmung der Transmissivität größerer Zuflussbereiche (Brasser et al. 2008). Nachteilig ist die relativ aufwändige Auswertung der Messdaten.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Durch Koppelung mit einem Pumpversuch können genaue Teufenlage und Transmissivität von Zuflusszonen bestimmt werden (Appel & Habler 2001).

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Zum Fluid-Logging liegt ein vergleichsweise geringer Erfahrungsstand vor und es besteht somit ein Bedarf an Forschung und Entwicklung in der Anwendung, dem Anwendungsbereich und der Auswertung dieser Methode, sofern der Wertebereich der Messgröße nicht durch andere Methoden bestimmt werden kann und mit der zu erforschenden Methode eine geringere Beeinflussung des ewG oder weiterer potenzieller barrierewirksamer Schichten zu erwarten ist.

5.1.4.4. Gezeiten-Verfahren

Bei dieser Methode wird die Eigenschaft der Erde verwendet, sich durch die Anziehungskraft von Mond und Sonne zu verformen. Dadurch kommt es insbesondere in gespannten Grundwasserleitern zu einer Verkleinerung bzw. Vergrößerung des Porenvolumens und damit zu einem Anstieg oder Abfall des Wasserspiegels. Der zeitliche Wasserspiegelverlauf wird aufgezeichnet und ausgewertet, woraus sich die oberflächennahe Gebirgsdurchlässigkeit abschätzen lässt. Die mit dem Gezeiten-Verfahren erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 dargestellt.

5.1.4.5. Interferenz-Test

Ein Interferenz-Test ist die Bezeichnung für Tests, bei denen neben den getesteten Bohrlöchern die Reaktionen an weiteren Beobachtungsmessstellen oder -brunnen berücksichtigt wird (Mehrbohrloch-Versuch). Dieser kann bei vielen hydraulischen Feldmethoden angewandt werden, z. B.

Pulse-Interferenz-Test, WD-Test mit Beobachtungspegeln oder Pumpversuch mit Beobachtungspegeln. Bei Packer-Interferenztests können auch einzelne hydraulische Verbindungen durch Abtrennung bestimmter Bereiche durch Packer im Beobachtungspegel untersucht werden.

Mit Interferenz-Tests können auch der hydraulische Kontakt zwischen den untersuchten Bohrlöchern, die Reichweiten und Form der Druck-Absenktrichter bestimmt werden. Sie sind jedoch aufwendiger als Einbohrlochversuche.

Die einzelnen hydraulischen Methoden, mit welchen Interferenz-Tests durchgeführt werden können, sind in den Abschnitten 5.1.2 bis 5.1.4.3 sowie in Abschnitt 5.1.5 beschrieben.

5.1.4.6. Luftdruckmessungen

Der Grundwasserspiegel wird durch Luftdruckschwankungen beeinflusst. Die Wasserspiegel- und Luftdruckänderungen werden erfasst. Aus dem Verhältnis der Wasserdruck- zur Luftdruckschwankung (barometrischer Koeffizient B_p) kann zudem der spezifische Speicherkoeffizient nach Jacob (1949) ermittelt werden.

Die Methode ist nur in gespannten Grundwasserleitern einsetzbar und kann bei Porengrundwasserleitern im Lockergestein des Deck- und Nebengebirges - separat oder ergänzend zu Pumpversuchen - eingesetzt werden, wenn ein stationärer Zustand erreicht ist (Appel & Habler 2001). Seine Anwendbarkeit im Festgestein ist mit hohen Unsicherheiten behaftet. Die mit Luftdruckmessungen erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 dargestellt.

5.1.5. Tracerversuche

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Tracerversuche können als Einbohrloch- oder Mehrbohrlochversuche ausgeführt werden. Bei einem Mehrbohrlochversuch wird an einer oberstromigen Eingabestelle (z. B. Bohrloch, Grundwassermessstelle, Schwinde) ein Markierungsstoff (Tracer) eingegeben. An Beobachtungsstellen (z. B. Bohrung, Messstelle, Oberflächengewässer) wird die zeitliche Änderung der Konzentration des Tracerstoffes gemessen. Bei Einbohrlochverfahren erfolgt die Eingabe und Messung an einem Bohrloch.

Als Tracer kommen lösliche Stoffe (Salze, Fluoreszenzfarbstoffe, Isotope) und Triftstoffe (z. B. Sporen, schadhlose Bakterien, Pollen, Mikropartikel) sowie sonstige Mittel (Edelgase, diverse organische Verbindungen, Wassertemperatur) zum Einsatz. Eine ausführliche Beschreibung der Tracer-Versuche enthalten u. a. Schreiner & Kreysing (1998), Hölting (2013) und Käss (1992).

Folgende Methoden werden in der Praxis angewandt:

- **Elektrolytische Tracer:** Es wird eine elektrolytischer Tracerlösung (NaCl , MgCl_2) eingegeben und Widerstandsmessungen im Bohrloch durchgeführt.
- **Sporendrift/Mikropartikel:** Lycopodiumsporen (Bärlappsporen) oder Mikropartikel werden eingefärbt und in das Bohrloch gegeben. Die Sporen/Mikropartikel werden mit einem Planktonnetz eingefangen. Die Auswertung erfolgt mikroskopisch durch Auszählen.
- **Aktivierungsanalytisches Tracerverfahren:** Eingabe einer nicht radioaktiven Substanz (Ammonbromid, Lanthan oder Indium) in das Bohrloch. Die entnommenen Proben werden in einem Reaktor aktiviert und so auch geringste Tracer-Konzentrationen analytisch quantifizierbar gemacht.

- **Einbohrlochverdünnungsmethode mit radioaktiven Tracern:** Ein radioaktiver Tracer wird in das Bohrloch eingegeben und die zerfallskorrigierte Konzentrationsabnahme des radioaktiven Tracers im Bohrloch gemessen.
- **Einbohrlochverdünnungsmethode mit Uranin:** Eingabe eines Fluoreszenzfarbstoffes (Uranin) in das Bohrloch.

Für die Durchführung eines Tracerversuches ist eine wasserrechtliche Erlaubnis nach § 8 Abs. 1 Ziff. 1 WHG sowie nach § 8 Abs. 1 Ziff. 3 WHG für das vorübergehende Einbringen von Stoffen in ein Gewässer erforderlich.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Mittels Einbohrloch-Tracerversuchen kann die Filtergeschwindigkeit ermittelt werden. Mit einem Mehrbohrloch-Tracerversuch können darüber hinaus die Verweilzeiten, die Abstandsgeschwindigkeit, die Grundwasserfließrichtung sowie die Dispersion in einem Grundwasserleiter bestimmt werden, sofern frei bewegliches Grundwasser im Gebirgsbereich vorhanden ist. Bei Kenntnis weiterer hydraulischer Messgrößen zur Charakterisierung des Gebirges (hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert, hydraulischen Gradient) kann daraus auch die effektive Porosität ermittelt werden.

Die mit Tracerversuchen erkundbaren Messgrößen sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Tracerversuche sind bis in große Teufen anwendbar.

Auswertung

Der Transport des Tracers wird auf den physikalischen Grundlagen durch Differenzialgleichungen des allgemeinen Massentransports (Baer 1979) beschrieben. Die Auswertung erfolgt analytisch über Konzentrations-/Zeit-Kurven (Durchbruchkurven). Aus der Durchbruchkurve des Tracers können neben den Abstandsgeschwindigkeiten auch die longitudinalen Dispersionskoeffizienten berechnet werden. Hierbei können unterschiedliche Abstandsgeschwindigkeiten ermittelt werden, insbesondere:

- die **maximale Abstandsgeschwindigkeit** etwa beim Ersteinsatz des Tracers,
- die **dominante Abstandsgeschwindigkeit** beim Maximalwert der Tracerkonzentration,
- die **Median-Abstandsgeschwindigkeit** zum Zeitpunkt des Median-Wertes der Tracerkonzentration.

Die „wahre“ Abstandsgeschwindigkeit liegt dabei nach Appel & Habler (2001) und Käss (1992) meist in der zeitlichen Mitte zwischen dominanter und Median-Abstandsgeschwindigkeit.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die messbare Konzentration eines Tracers an der Entnahmestelle infolge der Eingabe eines Tracers an der Eintragsstelle in einem Untergrund mit entsprechenden hydrogeologischen Eigenschaften.

Das Auflösungsvermögen hängt im Wesentlichen vom eingesetzten Tracer ab. Bei Verwendung des Fluoreszenzfarbstoffes Uranin können horizontale Filtergeschwindigkeiten bis hinunter zu $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ gemessen werden.

Reichweite

Mit einem Mehrbohrloch-Tracerversuch kann prinzipiell das gesamte Einzugsgebiet erfasst werden. Bei sehr geringen Abstandsgeschwindigkeiten in Gebirgsbereichen mit geringen Gebirgsdurchlässigkeiten müssen aufgrund der ansonsten langen Versuchszeiten jedoch die Abstände

zwischen Eingabe- und Entnahmepunkt sehr gering sein. Somit ist nur eine geringe Reichweite oder u. U. nur eine punktuelle Erkundung des Gebirgsbereiches möglich. Bei Einbohrloch-Tracerversuchen ist die Reichweite wie bei anderen Einbohrlochversuchen gering.

Reproduzierbarkeit

Tracer-Versuche sind bei identischen Umweltbedingungen und ungestörten Grundwasserverhältnissen zu Beginn des Versuches reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenzen für die eingesetzten Tracer (Appel & Habler 2001, Schreiner & Kreysing 1998, Käss 1992) sind wie folgt:

- Fluoreszenzfarbstoffe: 10^{-8} bis 10^{-9} mg·l⁻¹
- NaCl: 0,1 bis 1 mg·l⁻¹
- Radioaktive Tracer: ca. 10^{-8} bis 10^{-15} mg·l⁻¹
- Sporen: ca. 30 µm
- Mikropartikel: 0,05 bis 90 µm

Mit radioaktiven Tracern sowie mit Uranin-Tracern können noch horizontale Filtergeschwindigkeiten bis zu 10^{-7} m·s⁻¹ ($3,15 \cdot 10^3$ mm·a⁻¹) gemessen werden (Appel & Habler 2001)

Fehleranfälligkeit

Fehler können entstehen durch:

- Verschleppungen des Tracers bei der Probennahme,
- Absinken von dichtem Tracer und damit Schichtungsvorgänge,
- Verzögerungen des Tracers in teilweise ungesättigten Bereichen durch unterschiedliche Grundwasserstände.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Durch die Eingabe des Tracers kann das Grundwasserniveau erhöht und damit die natürlichen Grundwasserverhältnisse ggf. über längere Zeit gestört werden. Weitere geohydraulische Untersuchungsmethoden sollten erst nach Wiedereinstellung der natürlichen Verhältnisse durchgeführt werden.

Die Grundwasserprobennahme ist vor dem Versuch durchzuführen.

Aufwand

Tracer-Versuche werden als aufwändig eingestuft. Der technische Aufwand umfasst die Versuchsvorbereitung, den Ansatz und Eingabe des Tracers, die Entnahme und Analyse der Proben sowie die Versuchsauswertung. Der zeitliche Aufwand kann durch die zahlreichen Analysen sehr hoch sein.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- Erfassung des gesamten Einzugsgebietes,
- direkter Nachweis einer hydraulischen Verbindung.

Nachteile

- lange Versuchszeiten (Wochen bis Monate), hoher Aufwand,

- Erfordernis einer wasserrechtlichen Erlaubnis,
- Störung der natürlichen Grundwasserverhältnisse.

Bewertung

Fazit

Tracer-Versuche liefern Daten zu Abstandsgeschwindigkeiten und Fließwegen, die mit anderen Methoden nicht ermittelt werden können. Allerdings sind diese Versuche aufwändig und erfordern das Vorhandensein von frei beweglichem Grundwasser. Zudem ist die Einsatzfähigkeit durch die unter Umständen sehr langen Versuchszeiten in gering durchlässigen Gebirgsbereichen begrenzt. Die dadurch notwendigen geringen Abstände zwischen den Messstellen lassen nur punktuelle Beurteilungen des Gebirges zu. Somit ist diese Messmethode hauptsächlich auf das Deck- und Nebengebirge anwendbar.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Tracer-Versuche können ergänzend und vergleichend zu den Durchlässigkeitsuntersuchungen eingesetzt werden.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Tracerversuche zählen seit Langem zu den Standardmethoden in der Hydrogeologie, so dass kein Bedarf an grundlegender F&E besteht. Im Rahmen dieses Vorhabens besteht jedoch kein zwingender Bedarf an Forschung und Entwicklung, da die relevante Messgröße „Abstandsgeschwindigkeit“ auch durch andere Erkundungsmethoden ermittelt werden kann.

5.2. Geophysikalische Messmethoden

Grundlegende Literatur

Chandra, P.C. (2015): *Groundwater Geophysics in Hard Rock*. CRC Press.

Fricke, S., Schön, J. (1999): *Praktische Bohrlochgeophysik*. Enke im Georg Thieme Verlag.

Keys, W.S. (1997): *A Practical Guide to Borehole Geophysics in Environmental Investigations*. CRC Press.

Kirsch, R. (Hrsg.) (2009): *Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology*. Springer.

Knödel, K., Lange, G., Voigt, H.J. (Hrsg.) (2007): *Environmental Geology*. Springer.

Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. (Hrsg.) (2005): *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 3: Geophysik*. Springer.

Pellerin, L., Holliger, K., Slater, L., Yaramanci, U. (2009): *Special Issue on Hydrogeophysics – Methods and Processes. Near Surface Geophysics, Vol. 7, No. 5 European Association of Geoscientists & Engineers*.

Rubin, Y., Hubbard, S. S. (Hrsg.) (2005): *Hydrogeophysics*. Springer.

Vereecken, H., Binley, A., Cassiani, G., Revil., A., Titov, K. (Hrsg.) (2004): *Applied Hydrogeophysics*. Springer.

Für die im Projekt „übErStand“ zu betrachtenden übertägigen Erkundungsprogramme für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren können geophysikalische Messmethoden als ein Bestandteil der Erkundungsprogramme insbesondere Informationen zur Porosität, zum Wassergehalt sowie zum Tongehalt und daraus abgeleitet gegebenenfalls zur Permeabilität des Gebirges und Gesteins liefern. Zahlreiche im Standortauswahlverfahren zu ermittelnde Messgrößen, wie Gebirgsdurchlässigkeit, Gesteinsdurchlässigkeit, Abstandsgeschwindigkeit, effektive Porosität oder Transmissivität hängen unmittelbar von der Porosität und Permeabilität des Gebirges und Gesteins ab, so dass geophysikalische Messmethoden ein unverzichtbarer Bestandteil der übertägigen Erkundungsprogramme sind. Keine der geophysikalischen Messmethoden misst allerdings die Porosität oder die Permeabilität oder eine der oben aufgeführten hydrogeologischen Messgrößen direkt. In allen Fällen werden petrophysikalische Messgrößen ermittelt, die Abhängigkeiten von Porosität und Permeabilität aufweisen. Die Tabelle 5-3 zeigt die Gegenüberstellung einzelner geophysikalischer Messmethoden und der wirklichen petrophysikalischen Messgrößen nach Schön (1996). Die angegebenen Zusammenhänge sind vielfach auf bestimmte Wertebereiche für einzelne Messgrößen eingeschränkt oder gelten nur für bestimmte Gesteine. Insofern sind bei der Auswertung der Ergebnisse geophysikalischer Messmethoden empirische Zusammenhänge zu ermitteln oder Gesteinsmodelle zu nutzen bzw. zu erstellen, welche die Abhängigkeiten der ermittelten geophysikalischen Messgrößen zur Porosität und Permeabilität darstellen können (Mavko et al. 2009). Andere Abhängigkeiten der ermittelten petrophysikalischen Messgrößen, wie beispielsweise vom Porenfluid, vom Sättigungsgrad, vom Druck, von der Temperatur oder mögliche anisotrope Eigenschaften des Gesteins sind dabei zu berücksichtigen. Die Ergebnisse können daher eine interpretative/subjektive Komponente des Auswerters enthalten und auch Ergebnisse bezüglich der Porosität und Permeabilität, die mit unterschiedlichen geophysikalischen Messmethoden ermittelt wurden, können sich voneinander unterscheiden. Für alle geophysikalische Messmethoden, die von der Erdoberfläche aus messen, ist

es außerdem essenziell, dass im Untergrund Grenzflächen auftreten an denen sich die untersuchten Messgrößen der Gesteine ändern. Die Darstellung der Messmethoden zur Bestimmung der räumlichen Lage dieser Grenzflächen ist nicht Bestandteil dieses Vorhabens und wird deshalb hier nicht weiter betrachtet.

Einen guten Überblick über den Einsatz von geophysikalischen Messmethoden für hydrologische und hydrogeologische Fragestellungen liefert insbesondere die zu Beginn dieses Kapitels aufgeführte grundlegende Literatur (in alphabetischer Reihenfolge).

Tabelle 5-3: Gegenüberstellung einzelner geophysikalischer Messmethoden und der wirksamen petrophysikalischen Messwerte (nach Schön (1996)).

Geophysikalische Messmethode	Wirksame petrophysikalische Messwerte
Gravimetrie	Dichte
Magnetik	magnetische Suszeptibilität
Geoelektrik	spezifischer elektrischer Widerstand
Elektromagnetik	spezifischer elektrischer Widerstand, dielektrische Leitfähigkeit (Permittivität)
Seismik	Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen Absorptionskoeffizient elastischer Wellen Reflexionskoeffizient
Radiometrie	Aktivität der natürlichen Strahlung
Kernphysik	Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

5.2.1. Oberflächengeophysikalische Messmethoden

Die folgenden Abschnitte 5.2.1.1 bis 5.2.1.4 und die Tabelle 5-4 geben einen Überblick über zahlreiche geophysikalische Messmethoden, die von der Erdoberfläche aus messen (bei den bohrlochseismischen Methoden zum Teil auch im Bohrloch) und im oben beschriebenen Sinne (s. Abschnitt 5.2) zur Lösung hydrologischer und hydrogeologischer Fragestellungen im Standortauswahlverfahren beitragen können. Nicht betrachtet werden Magnetik, Gravimetrie und Georadar. Die Magnetik wird vorwiegend zu geologischen Erkundung eingesetzt, wenn eine signifikante Änderung der magnetische Suszeptibilität zu erwarten ist (z. B. Erzerkundung). Eine Beziehung der magnetischen Suszeptibilität zur Porosität oder zum Wassergehalt ist nicht bekannt. Die Gravimetrie ist, insbesondere in Zusammenhang mit der Reflexionsseismik, zur geologischen Erkundung von Salzstrukturen und kristallinen Gesteinskörpern unverzichtbar. Die Ergebnisse gravimetrischer Messungen hängen zwar direkt von der Dichteverteilung im Untergrund ab, zur Bestimmung von Porositäten wird die Gravimetrie jedoch nicht eingesetzt. Georadar-Messungen, die von der Erdoberfläche ausgeführt werden, weisen, abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des anstehenden Bodens, meist nur sehr geringe Erkundungstiefen von wenigen Metern auf. Zur Beantwortung hydrologischer und hydrogeologischer Fragestellungen zum Deckgebirge oder zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist Georadar daher kaum geeignet. In den oberen Metern des Bodens können Georadar-Messungen allerdings sehr hochauflösende strukturgeologische Abbildungen sowie Informationen zum Wasserstand liefern.

Tabelle 5-4: Übersicht typischer oberflächengeophysikalischer Messmethoden für hydrologische und hydrogeologische Fragestellungen.

Methode	Messprinzip	Messwert → daraus abgeleitete Messgrößen
Geoelektrische Messmethoden		
Gleichstromgeoelektrik	Messung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands.	Spezifischer elektrischer Widerstand → effektive Porosität → Sättigungsgrad
Induzierte Polarisation (IP) / Spektrale Induzierte Polarisation (SIP)	Messung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands in Abhängigkeit von der Frequenz.	Komplexe elektrische Leitfähigkeit → hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert
Elektromagnetische Messmethoden		
Transiente Elektromagnetik (TEM)	Messung des zeitlichen Abklingvorgangs (elektro-)magnetischer Felder, welche künstlich nach Abschalten eines Stromfeldes induziert werden.	Spezifischer elektrischer Widerstand → effektive Porosität → Sättigungsgrad
Magnetotellurik (MT) und Audio-Magnetotellurik (AMT)	Messung des elektromagnetischen Feldes, welches durch natürliche elektromagnetische Quellen induziert wird.	Komplexe elektrische Impedanz → spezifischer elektrischer Widerstand → effektive Porosität → Sättigungsgrad
Controlled Source Audio-Magnetotellurik (CSAMT) und Radiomagnetotellurik (RMT)	Messung des elektromagnetischen Feldes, welches durch künstliche elektromagnetische Quellen induziert wird.	Komplexe elektrische Impedanz → spezifischer elektrischer Widerstand → effektive Porosität → Sättigungsgrad
Oberflächen-Nuklear-Magnetische Resonanz (SNMR)	Messung des zeitlichen Abklingvorgangs magnetischer Felder, welche nach Abschalten eines künstlich angelegten Magnetfelds durch die Präzession ausgelenkter Protonen erzeugt werden.	magnetisches Relaxationsfeld → hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit → absolute und effektive Porosität → Sättigungsgrad

Tabelle 5-4: (Fortsetzung) Übersicht typischer oberflächengeophysikalischer Messmethoden für hydrologische und hydrogeologische Fragestellungen.

Methode	Messprinzip	Messwert → daraus abgeleitete Messgrößen
Seismische Messmethoden		
Reflexionsseismik	Messung der Laufzeit und Amplitude elastischer Wellen, die im Untergrund reflektiert werden.	Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten, akustische oder elastische Impedanz, seismische Attribute → Porosität → Sättigungsgrad → Verfestigungsgrad von Tongestein
Refraktionsseismik (Tomographie)	Messung der Laufzeit und Amplitude elastischer Wellen, die im Untergrund an Schichtgrenzen unter dem kritischen Winkle refraktiert oder durch Geschwindigkeitsgradienten gebeugt werden.	Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten, → Porosität → Sättigungsgrad → Verfestigungsgrad von Tongestein
Bohrlochseismische Messmethoden		
Vertikalseismische Profilierung	Messung der Laufzeit und Amplitude elastischer Wellen (Anregung an der Erdoberfläche, Registrierung im Bohrloch).	Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten, akustische oder elastische Impedanz, seismische Attribute → Porosität → Sättigungsgrad → Verfestigungsgrad von Tongestein
Cross-Hole-Messungen (Tomographie)	Messung der Laufzeit und Amplitude elastischer Wellen (Anregung im Bohrloch, Registrierung im Bohrloch).	Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten, akustische oder elastische Impedanz, → Porosität → Sättigungsgrad → Verfestigungsgrad von Tongestein

5.2.1.1. Geoelektrische Messmethoden

Grundlegende Literatur

- Bhattachary, B.B., Shalivahan, S. (2016): Geoelectrical Methods: Theory and Application. McGraw Hill Education.*
- Kaufmann, A.A., Anderson, B.I (2010): Principles of Electric Methods in Surface and Borehole Geophysics. Methods in Geochemistry and Geophysics, 44. Elsevier.*
- Milsom, J. (2003): Field Geophysics, 3rd Edition. John Wiley & Sons.*
- Sumner, J.S. (1976): Principles of induced polarization for geophysical exploration. Developments in Economic Geology, 5. Elsevier.*

Die geoelektrischen Verfahren lassen sich unterteilen in Methoden, die Gleichstrom bzw. Wechselströme über galvanisch angekoppelte Elektroden in den Untergrund einspeisen, und Methoden, die elektromagnetische Wechselfelder in den Untergrund induzieren.

Mit geoelektrischen Verfahren wird die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit σ [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$] bzw. des (scheinbaren) spezifischen Widerstands R_a [Ωm] (als Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit) im Untergrund bestimmt. Abhängig von der Frequenz der in den Untergrund induzierten Ströme können darüber hinaus das Aufladevermögen bzw. die Frequenzabhängigkeit des spezifischen Widerstands bestimmt werden. Die Ausbreitung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen wird außerdem durch die dielektrischen Eigenschaften (Permittivität) des Untergrunds bestimmt.

Die elektrische Leitfähigkeit σ ist insbesondere von der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins, dem Feinkornanteil, der effektiven Porosität, dem Fluidgehalt, der Salinität des Fluids und der Temperatur abhängig. Sie beruht im Wesentlichen auf drei Mechanismen (Knödel 2005):

a) Elektronische (metallische) Leitfähigkeit:

Die elektrische Leitfähigkeit der gesteinsbildenden Minerale ist mit Werten zwischen 10^{-14} und $10^{-10} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ meist sehr gering, so dass auch trockene Gesteine elektrische Matrixleitfähigkeiten in einer ähnlichen Größenordnung aufweisen. Nur Gesteine, die Erzminerale enthalten, und bei denen der Leitungsprozess durch freie Elektronen gebildet wird, weisen sehr viel höhere Leitfähigkeiten auf.

b) Elektrolytische Leitfähigkeit:

Eine wässrige Lösung in den Poren eines Gesteins führt meist zu einer drastischen Erhöhung der Leitfähigkeit. Der Ladungstransport erfolgt dabei durch die Ionen der im Wasser gelösten Salze. Im Falle eines zusammenhängenden Porennetzwerks reichen schon sehr geringe Wassersättigungen aus, um die Leitfähigkeit eines Gesteins um mehrere Zehnerpotenzen gegenüber der Matrixleitfähigkeit bzw. der Leitfähigkeit im trockenen Zustand zu erhöhen. Da nahe der Erdoberfläche alle Böden zumindest teilgesättigt sind, wird ihre Leitfähigkeit im Wesentlichen von der Leitfähigkeit der Porenfüllung und der Größe des durchflusswirksamen Porenraums bestimmt.

c) Grenzflächenleitfähigkeit:

Wechselwirkungen der Porenflüssigkeit mit der Gesteinsmatrix (Kationenaustausch) führen zur Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht an der Grenzfläche Porenflüssigkeit/Gesteinsmatrix und bedingen den Stromfluss im Bereich der Kornoberflächen. Insbesondere

re die Leitfähigkeit von bindigen Böden (z. B. Tonen) mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit wird durch diese Grenzflächenleitfähigkeit geprägt, die abhängig von der Frequenz der angelegten elektrischen Spannung ist.

Eine direkte Umrechnung der ermittelten elektrischen Leitfähigkeit in Porositäten oder Permeabilitäten ist in den meisten Fällen nicht möglich. Dies erfordert die empirische Ableitung von Korrelationsbeziehungen mit Hilfe von Labormessungen oder direkten Aufschlüssen zur Kalibrierung der Ergebnisse. Es ist dann zu beachten, dass die gewonnenen Korrelationsbeziehungen in der Regel nur für bestimmte Gesteine und räumlich begrenzt gültig sind.

5.2.1.1.1. Gleichstromgeoelektrik

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Über zwei geerdete Elektroden erfolgt die Einspeisung von Gleichstrom oder niederfrequentem Wechselstrom in den Untergrund. Dabei baut sich ein räumliches Potenzialfeld auf, das von den Leitfähigkeitsstrukturen beeinflusst wird. Aus der in den Untergrund eingespeisten elektrischen Stromstärke und der an zwei weiteren Elektroden gemessenen Spannungsdifferenz werden unter Berücksichtigung der Messgeometrie (Konfigurationsfaktor) scheinbare spezifische Widerstände ρ_a bestimmt. Eine Inversionsrechnung führt im Ergebnis dann zur räumlichen Verteilung des spezifischen Widerstands.

Für typische Anwendungen der Gleichstromgeoelektrik (Kartierung, Tiefensondierung, Sondierungskartierung, Widerstandstomographie) werden unterschiedliche Anordnungen der zwei Elektroden, über die der Strom eingespeist wird, und der zwei Elektroden mit denen die Spannungsdifferenz bestimmt wird, eingesetzt (z. B. Elektrodenkonfigurationen nach Wenner, Schlumberger, Dipol-Dipol, Pol-Dipol oder Pol-Pol). Jede dieser Messkonfigurationen besitzt unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich Erkundungstiefe, Auflösungsvermögen, Nutz-/Störsignal-Verhältnis, Einfluss oberflächennaher Inhomogenitäten, Anfälligkeit gegenüber technischen Störungen und der Durchführbarkeit im Gelände.

Multielektrodenanordnungen ermöglichen einen computergesteuerten Messablauf bei denen eine große Anzahl von Elektroden verwendet wird, die sukzessive als Stromeinspeise- oder Spannungsmesselektrodenpaar geschaltet werden. Mehrkanalige Messapparaturen sind darüber hinaus in der Lage an mehreren Spannungsmesselektrodenpaaren gleichzeitig zu messen, was insbesondere die zeitliche Dauer der Messung verkürzt.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Mit der Gleichstromgeoelektrik wird die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit σ [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$] bzw. des spezifischen Widerstands R [Ωm] (als Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit) im Untergrund bestimmt. Abhängig von den mikroskopischen Gesteins- oder der makroskopischen Gebirgseigenschaften kann die elektrische Leitfähigkeit anisotrop sein.

Auswertung

Ein Zusammenhang zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstand und der effektiven Porosität ist mit den sogenannten Archie-Gleichungen gegeben (Archie 1942):

$$\frac{R_s}{R_w} = \frac{\tau}{n_e^m} = F \quad (1. \text{ Archie-Gleichung}) \quad (5-20)$$

$$\frac{R}{R_w} = \frac{\tau}{S_w^{n_{sat}} \cdot n_e^m} \quad (2. \text{ Archie-Gleichung}) \quad (5-21)$$

mit

R_s	spezifischer Widerstand des gesättigten Gesteins	[Ωm]
R	spezifischer Widerstand des Gesteins	[Ωm]
R_w	spezifischer Widerstand des Porenwassers	[Ωm]
n_e	effektive Porosität	[1]
τ	Tortuositätsfaktor	[1]
m	Zementationsexponent	[1]
F	Formationsfaktor	[1]
S_w	Sättigungsgrad	[1]
n_{sat}	Sättigungsexponent	[1]

Mit diesen Gleichungen ließe sich bei wassergesättigtem Gestein die Porosität (1. Archie-Gleichung) bzw. bei bekannter Porosität der Sättigungsgrad bestimmen (2. Archie-Gleichung). Die Gleichungen gelten allerdings nur für poröse, tonfreie Gesteine, wie z. B. Sand- und Kalksteine, und gehen davon aus, dass die Gesteinsleitfähigkeit von der Leitfähigkeit des Porenfluids bestimmt wird. Tortuositätsfaktor und Zementationsexponent sind empirisch zu ermittelnde Größen, die das durch die Archie-Gleichungen beschriebene Modell an experimentell (in Labormessungen) ermittelte Abhängigkeiten des spezifischen elektrischen Widerstands von der Porosität bzw. vom Sättigungsgrad anpassen.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der gemessenen elektrischen Spannung infolge einer Änderung der Leitfähigkeit im Untergrund. Die möglichen Elektrodenanordnungen (z. B. Wenner, Schlumberger, Dipol-Dipol, Pol-Dipol, Pol-Pol) weisen alle unterschiedliche räumlich Sensitivitäten auf (Friedel 2000). Je nach Aufgabenstellung ist eine entsprechende Elektrodenanordnung zu wählen.

Das Auflösungsvermögen hängt im Wesentlichen von der Erkundungstiefe, vom Abstand der Spannungsmesselektroden, der Messkonfiguration und der Widerstandsverteilung im Untergrund ab.

Das beste laterale Auflösungsvermögen bietet meist eine Dipol-Dipol-Anordnung, die vergleichsweise schlechteste laterale Auflösung ergibt sich mit einer Wenner-Anordnung. Das beste vertikale Auflösungsvermögen bieten Schlumberger- oder Wenner-Anordnungen, während Dipol-Dipol- oder Pol-Dipol-Anordnungen bezüglich des vertikalen Auflösungsvermögens etwas schlechter abschneiden.

Abhängig von den auftretenden Widerstandskontrasten liegt das Auflösungsvermögen ungefähr bei einem Verhältnis der Schichtmächtigkeit zur Tiefe von 1:3.

Reichweite

Die Erkundungstiefe der Gleichstromgeoelektrik wird im Wesentlichen vom Abstand der stromeinspeisenden Elektroden, der Stromstärke, der Messkonfiguration und der Widerstandsverteilung im Untergrund bestimmt. Generell nimmt die Erkundungstiefe mit der Vergrößerung des Elektrodenabstands zu.

Bei einem horizontal geschichteten Untergrund bewegen sich typische Erkundungstiefen ungefähr zwischen 0,11 mal dem Abstand der stromeinspeisenden Elektroden bei einer Wenner-Anordnung und 0,25 mal dem Abstand zwischen den beiden entferntesten Elektroden (Stromeinspeise- und Spannungsmesselektrode) bei einer Dipol-Dipol-Anordnung. Hochohmige Gesteine (z. B. kompakte, unverwitterte, nicht geklüftete Festgesteine, wie Sandsteine, Kalksteine, Tonschiefer, Metamorphite, Magmatite, trockenes Steinsalz) können die Reichweite der Messmethode stark begrenzen bzw. verursachen eine Fokussierung der Stromstärke auf niederohmige Bereiche.

Typische und praktikable Erkundungstiefen für Sondierungskartierungen liegen meist deutlich unter 100 m. Für Erkundungstiefen im Bereich von über 300 m sind Hochstromquellen (10 bis 50 Ampere), geeignete Stromeinspeiseelektroden (z. B. Langelektroden mit Erderfeldern, Stahlrohre von Bohrungen), unpolarisierbare Spannungsmesselektroden (z. B. mit Kupfersulfat gefüllte Sonden in porösen Sondenkörpern) erforderlich und Dipol-Dipol- oder Schlumberger-Anordnungen einzusetzen. Dipol-Dipol-Anordnungen bieten theoretisch die größte Erkundungstiefe weisen im Vergleich zu Schlumberger-Anordnungen aber ein deutlich schlechteres Nutz-/Störsignal-Verhältnis auf. Erkundungstiefen von über 1.000 m sind mit Gleichstromgeoelektrik kaum zu erzielen.

Reproduzierbarkeit

Die geoelektrischen Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar.

Die Eingangsempfindlichkeit geoelektrischer Messapparaturen liegt typischerweise im μV -Bereich, der Sendestrom sollte in seiner Stabilität nicht mehr als um 0,3 % abweichen. Der relative Fehler des elektrischen Widerstands liegt unter 1 %.

Erkennungs- und Nachweiskgrenzen

Die geoelektrischen Messungen bestimmen den scheinbaren spezifischen Widerstand R_a des Untergrunds, d. h. die gemessenen Widerstände geben weder den spezifischen Widerstand des Gesteins wider noch befinden sie sich in der korrekten räumlichen Lage (Pseudosektion). Erst eine Inversionsrechnung führt zur räumlichen Verteilung des spezifischen Widerstands. Dabei erfolgt ausgehend von einem Startmodell eine iterative Anpassung der spezifischen Widerstände des Modells bis die numerische Pseudosektion mit der gemessenen Pseudosektion im Rahmen einer plausiblen Fehlergrenze (< 3 %) übereinstimmt. Als Startmodell wird typischerweise der Median der Messwerte des scheinbaren spezifischen Widerstands verwendet. Es kann aber auch ein geologisches Modell mit aus Bohrlochmessungen ermittelten oder aus der Literatur zugeordneten spezifischen Widerständen verwendet werden. Im Inversionsprozess selbst können strukturelle Informationen (z. B. aus Bohrungen bekannte Schichtgrenzen) als Einschränkungen (*Constraints*) oder Randbedingungen einbezogen werden. Der Einfluss des Startmodells auf das Ergebnis des Inversionsprozess ist sehr gering.

Fehleranfälligkeit

Störungen, Fehler oder Verschlechterungen des Nutz-/Störsignal-Verhältnis können sich insbesondere ergeben aus

- elektromagnetischen Einstreuungen bei großen Kabellängen,
- Polarisierungseffekten an den Elektroden,
- starken lateralen Widerstandsänderungen im Bereich der Elektroden,
- unterirdischen Leitungen, Metallzäunen.

Darüber hinaus können die Widerstandsverhältnisse im Bereich der Decksicht (z. B. mächtige trockene Sande, gefrorener Boden, versiegelter Boden) die gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstände beeinflussen. Nicht berücksichtigte Anisotropien der elektrischen Leitfähigkeiten können außerdem zu fehlerhaften Tiefenangaben führen.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Messmethode

Die Gleichstromgeoelektrik ist zerstörungsfrei, hat keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändert das Gestein nicht.

Aufwand

Der zeitliche Aufwand der Gleichstromgeoelektrik ist im Wesentlichen abhängig von der Länge und Anzahl der Messprofile, dem Elektrodenabstand, der Erkundungstiefe, der Messkonfiguration sowie der Topographie und dem Bewuchs des Geländes.

Eine Sondierungskartierung entlang eines 500 m langen Profils mit einer Wenner-Konfiguration, 2 m Elektrodenabständen sowie 15 Tiefenlevel der Pseudosektion (d. h. Elektrodenabständen von 2 m bis 15 x 2 m) dauert bei einfach zugänglichem Gelände und dem Einsatz von bis zu zwei Messtechnikern ungefähr einen Tag.

Vor- und Nachteile

Die Gleichstromgeoelektrik ist zur Charakterisierung des Deck- und Nebengebirges bis in Tiefen von maximal 100 m gut geeignet. Größere Erkundungstiefen erfordern einen erheblich größeren technischen Aufwand und werden überwiegend nur von Forschungseinrichtungen durchgeführt.

Das laterale und vertikale Auflösungsvermögen liegt ungefähr bei einem Drittel der Erkundungstiefe.

Bei Steinsalz und kompaktem Kristallingestein sind aufgrund der hohen spezifischen elektrischen Widerstände nur geringe Erkundungstiefen zu erwarten.

Bewertung

Fazit

Die Gleichstromgeoelektrik ist zur Betrachtung hydrogeologischer Fragestellungen bei der Untersuchung des Deck- und Nebengebirges bis in Tiefen von maximal 100 m gut geeignet. Über Modellannahmen oder (in Labormessungen) empirisch ermittelte Abhängigkeiten lassen sich Porositäten bzw. Sättigungsgrade aus den spezifischen elektrischen Widerständen ableiten. Größere Erkundungstiefen erfordern einen erheblich größeren technischen Aufwand.

Die für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu erwartenden hohen spezifischen Widerstände von kompaktem Kristallingestein und Steinsalz sowie die notwendigen Tiefen von über 300 m schränken die Einsatzmöglichkeiten der Gleichstromgeoelektrik stark ein. Abhängig von den Widerstandsverhältnissen kann in den für die Gleichstromgeoelektrik schon außergewöhnlich großen Erkundungstiefen von über 300 m das Auflösungsvermögen über 100 m liegen.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Kombination mit anderen geophysikalischen Messmethoden kann die Aussagesicherheit erhöhen.

Eine gemeinsame Inversion mit Messdaten aus anderen geophysikalischen Messmethoden kann die Genauigkeit des Ergebnisses insbesondere hinsichtlich der räumlichen Struktur des Untergrundes verbessern.

Die Abhängigkeit des ermittelten spezifischen Widerstands zur Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten, wie beispielsweise vom Porenfluid, vom Sättigungsgrad, vom Druck oder von der Temperatur, für jedes Gestein anhand von Labormessungen unter Ermittlung empirischer Zusammenhänge oder der Nutzung von Gesteinsmodellen im Einzelfall zu bestimmen und damit zu kalibrieren.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Überwiegend finden die gleichstromgeoelektrischen Messungen bei kommerziellen Einsätzen zu hydrogeologischen Fragestellungen auf Profilen statt, so dass eine räumliche Aussage oder die Erfassung von Anisotropien nur durch ein ausreichend dichtes Profilnetz gewährleistet werden kann. Eine flächenhafte Aufstellung von Elektroden, die eine Messung mit azimuthal abhängigen Elektrodenanordnungen und damit auch eine dreidimensionale Inversion hinsichtlich des Tensors der Leitfähigkeit ermöglichen würde, hat sich kommerziell bisher nicht durchgesetzt. Hauptursache dafür ist die große Messdauer aufgrund der geringen Anzahl der Kanäle geoelektrischer Messapparaturen.

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen (Siddiqui & Osman 2012).

5.2.1.1.2. Induzierte Polarisation (IP)/Spektrale Induzierte Polarisation (SIP)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Verschiedene Böden und Gesteine zeigen ein recht unterschiedliches Polarisationsverhalten (Weller 2019). Besonders stark ausgeprägt sind die Polarisierungseffekte bei Erzen oder auch bei metallischen Objekten im Untergrund. Auch wenn ein Grundverständnis für die Polarisation von Gesteinen mit elektronisch leitenden Partikeln vorhanden ist, liefern aktuelle Publikationen allerdings unterschiedliche Hypothesen für eine detaillierte Erklärung der auftretenden Effekte (Revil et al. 2015, Misra et al. 2016, Gurin et al. 2015). Doch auch Gesteine ohne Erzminerale zeigen messbare IP-Effekte, die aber meistens deutlich kleiner sind. Eine Reihe von Modellen sieht die Ursache für die Polarisation in der elektrolytischen Doppelschicht, die sich an der Phasengrenze zwischen den festen Gesteinsbestandteilen (Mineralen) und dem Porenfluid ausbildet. Dabei wird zwischen kornbasierten (Revil & Florsch 2010) und porenraumbasierten (Bücker & Hördt 2013) Modellen unterschieden.

Die Messkonfigurationen der IP bzw. SIP-Messungen unterscheiden sich nicht von denen der Gleichstromgeoelektrik (s. Abschnitt 5.2.1.1.1). So sind z. B. Wenner-, Schlumberger- oder Dipol-Dipol-Anordnungen ebenso gebräuchlich wie auch die Anwendungsmöglichkeiten als Kartierung oder Tiefensondierung. Im Vergleich zur Gleichstromgeoelektrik ist allerdings sowohl der zeitliche

als auch der technische Aufwand für Messungen der spektralen induzierten Polarisation deutlich höher. Die Messungen bei mehreren Frequenzen verlängert die Dauer der Messung, die Verwendung von autonom arbeitenden Mess- und Rechneinheiten (Remote Units) mit getrennt voneinander anschließbaren, galvanisch entkoppelten Elektroden sowie der möglicherweise (in Abhängigkeit der auftretenden Polarisationseffekte) erforderliche Einsatz von unpolarisierbaren Sonden als Elektroden vergrößern den mess- und gerätetechnischen Aufwand (Schleifer 2002).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Die Methode der (spektralen) induzierten Polarisation misst im Bereich von etwa 0,1 Hertz (Hz) bis maximal 1 kHz die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstands von der Frequenz sowie die entstehende Phasenverschiebung zwischen eingespeistem Strom und gemessener Spannung (Ward 1990, Weller & Börner 1996). In Ergänzung der Gleichstromgeoelektrik kann damit die Korrelation der geoelektrischen Messwerte zur Lithologie und zur hydraulischen Leitfähigkeit verbessert werden.

Die spektrale induzierte Polarisation wird überwiegend zur Bestimmung der Gesteinsdurchlässigkeit bzw. des Durchlässigkeitsbeiwertes eingesetzt (Ward 1990, Börner et al. 1996). Aber auch Anwendungen zur Kompaktion bzw. zur daraus resultierenden Porositätsänderung werden beschrieben (Börner et al. 2017). Aus dem Realteil der ermittelten komplexen Leitfähigkeit (Amplitude und Phase) wird im Wesentlichen die sich aus der elektronischen und elektrolytischen Leitfähigkeit zusammengesetzte Volumenleitfähigkeit bestimmt. Der Imaginärteil der komplexen Leitfähigkeit hängt hauptsächlich von der Grenzflächenleitfähigkeit ab. Da die Grenzflächenleitfähigkeit mit der inneren Gesteinsoberfläche korreliert (Börner & Schön 1991), lässt sich daraus auch der Durchlässigkeitsbeiwert ableiten (Pape et al. 1982).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die frequenzabhängige Änderung der Amplitude der gemessenen elektrischen Spannung und der Phasenverschiebung dieser Spannung gegenüber dem eingespeisten Wechselstrom infolge einer Änderung der komplexen Leitfähigkeiten im Untergrund. Die möglichen Elektrodenanordnungen (z. B. Wenner, Schlumberger, Dipol-Dipol, Pol-Dipol, Pol-Pol) weisen räumlich unterschiedliche Sensitivitäten auf. Je nach Aufgabenstellung ist eine entsprechende Elektrodenanordnung zu wählen.

Das Auflösungsvermögen hängt im Wesentlichen von den eingespeisten Frequenzen (SIP), der Erkundungstiefe, vom Abstand der Spannungsmesselektroden, der Messkonfiguration und der Widerstandsverteilung im Untergrund ab.

Reichweite

Die Erkundungstiefe von IP- und SIP-Messungen wird im Wesentlichen von den eingespeisten Frequenzen (SIP), vom Abstand der stromeinspeisenden Elektroden, der Stromstärke, der Messkonfiguration und der Widerstandsverteilung im Untergrund bestimmt. Generell nimmt die Erkundungstiefe mit der Vergrößerung des Elektrodenabstands zu.

Für gering permeable Gesteine sind die messbaren Polarisationseffekte sehr klein und technisch oft nicht genau genug zu erfassen. Im Vergleich zur Gleichstromgeoelektrik ist daher mit deutlich kleineren Tiefenreichweiten im Bereich von wenigen Zehnermetern zu rechnen.

Reproduzierbarkeit

Die IP- und SIP-Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar, insbesondere SIP-Messungen reagieren aber sehr sensibel auf geringe Unterschiede der Ankopplungsbedingungen.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die messbaren Polarisierungseffekte sind insbesondere bei gering permeablen Gesteinen sehr klein, und liegen ggf. unterhalb der durch den Messbereich und internen Noise (Apparatur-Rauschen) bestimmten gerätespezifischen technischen Nachweisgrenze.

Fehleranfälligkeit

Störungen, Fehler oder Verschlechterungen des Nutz-/Störsignal-Verhältnis können sich insbesondere ergeben aus:

- elektromagnetischen Einstreuungen jeder Art,
- Polarisierungseffekten an den Elektroden,
- starken lateralen Widerstandsänderungen im Bereich der Elektroden,
- unterirdischen Leitungen, Metallzäune.

Neben den Polarisierungsprozessen, die im Gestein durch Elektronenleiter (Elektrodenpolarisation) oder durch die unterschiedliche Beweglichkeit von Ionen im Porenraum (Membranpolarisation) hervorgerufen werden, müssen insbesondere bei höheren Frequenzen weitere Effekte berücksichtigt werden (Weller 2019). Dazu gehört die Maxwell-Wagner-Polarisation, die an Grenzflächen zwischen Gesteinsbestandteilen mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften auftritt. Bei höheren Frequenzen entstehen zusätzliche Effekte durch die elektromagnetische Induktion und die dielektrischen Eigenschaften der Gesteinsbestandteile. Neben den Polarisierungseffekten im Gestein treten auch induktive und kapazitive Kopplungseffekte auf, die durch die Messkonfiguration (z. B. Anordnung der Kabel) sowohl bei Labor- als auch bei Feldmessungen verursacht werden können. Eine sachgemäße Interpretation der IP-Messungen setzt voraus, dass die intrinsischen Polarisierungseffekte des Gesteins von den elektromagnetischen Kopplungseffekten getrennt werden.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

IP- und SIP-Messungen sind zerstörungsfrei. Sie haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändert das Gestein nicht.

Aufwand

Der zeitliche Aufwand für SIP-Messungen ist um ein Vielfaches höher als bei der Gleichstromgeoelektrik.

Vor- und Nachteile

SIP-Messungen ermöglichen im oberflächennahen Bereich eine Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit. Sie weisen allerdings eine vergleichsweise geringe Tiefenreichweite und hohe Störanfälligkeit auf. Im Vergleich zur Gleichstromgeoelektrik ist die Dauer der Registrierung deutlich länger.

Bewertung

Fazit

Die Spektrale Induzierte Polarisierung gehört zu den wenigen Oberflächenverfahren, welche theoretisch einen Zugang zur Abschätzung der hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeiten bietet.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Kombination mit anderen geophysikalischen Messmethoden ist notwendig, um mit plausiblen Modellen bei der Inversion die Aussagesicherheit zu erhöhen

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen der Frequenzabhängigkeit des spezifischen Widerstand und der hydraulischen Leitfähigkeit unter Berücksichtigung der Einflüsse von Wassersättigung, der mineralogischen Zusammensetzung, einer chemischen Wechselwirkung in Mehrphasensystemen sowie von Druck und Temperatur sind Gegenstand der aktuellen Forschung (z. B. Börner et al. 2019). Inversionsverfahren sollten auch die Ermittlung anisotroper Eigenschaften beinhalten.

5.2.1.2. Elektromagnetische Messmethoden

Grundlegende Literatur

Berdichevsky, M.N., Dimitriev, V.I. (2008): Models and Methods of Magnetotellurics. Springer-Verlag.

Chave, A.D., Jones, A.G. (2012): The Magnetotelluric Method. Theory and practice. Cambridge University Press.

Legchenko, A. (2013): Magnetic resonance imaging for groundwater. John Wiley & Sons.

Nabighian, M.N. (1991): Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Volume 2, Application, Parts A and B. Investigations in Geophysics No. 3. Society of Exploration Geophysics.

Oristaglio, M.L., Spies, B. R. (1999): Three-Dimensional Electromagnetics. Geophysical Developments No. 7. Society of Exploration Geophysics.

Strack, K.M. (1992): Exploration with Deep Transient Electromagnetics. Methods in Geochemistry and Geophysics, 30. Elsevier.

Zhadanov, M.S. (2010): Geophysical Electromagnetic Theory and Methods. Methods in Geochemistry and Geophysics, 43. Elsevier.

Bei den elektromagnetischen (EM) Messmethoden werden natürliche oder künstlich erzeugte, elektrische oder magnetische Felder als Sender genutzt. Diese frequenzabhängigen Felder rufen Magnetfeldvariationen (Primärfelder) hervor und induzieren elektrische Ströme im Untergrund. Die Stärke dieser induzierten Ströme variiert in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund und es werden durch diese Ströme elektromagnetische Sekundärfelder erzeugt, die an der Erdoberfläche mit Spulen oder Antennen gemessen werden können. Die Auswertung dieser elektromagnetischen Felder liefert die elektrische Leitfähigkeit. Durch Variation der Sender-Empfänger-Eigenschaften (Signalform, Frequenzspektrum, Geometrie) können unterschiedliche Tiefen untersucht werden. Die Messung und Auswertung der elektromagnetischen Felder können im Zeit- oder Frequenzbereich erfolgen, wobei Abklingkurven oder diskrete Frequenzspektren analysiert werden. Neben der elektrischen Leitfähigkeit werden die Messergebnisse auch durch die

magnetische Permeabilität und bei höherfrequenten Signalen auch durch die Permittivität (dielektrische Leitfähigkeit) der Gesteine und Fluide beeinflusst.

Die von elektromagnetischen Verfahren genutzten Frequenzbereiche überstreichen viele Dekaden und sind aufgrund des sogenannten Skineffekts direkt mit den realisierbaren Eindringtiefen (Skin-tiefe) verknüpft. Generell gilt, dass hohe Frequenzen oberflächennahe Bereiche mit hoher Auflösung abbilden können und niedrige Frequenzen große Tiefen mit geringer Auflösung. Für den Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Erkundungstiefen über 300 m kommen daher die Transienten-Elektromagnetik (TEM) und Verfahren der Magnetotellurik (MT, AMT, CSAMT) in Betracht.

5.2.1.2.1. Transiente-Elektromagnetik (TEM)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Bei der Transienten-Elektromagnetik (TEM) wird in der Regel ein vertikaler magnetischer Dipol durch eine große horizontale, stromdurchflossene Spule (Durchmesser bis 100 m und mehr) als Sender erzeugt. Das abrupte Abschalten des konstanten Sendestroms bewirkt im Untergrund Wirbelströme, deren diffusive Ausbreitung durch die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund bestimmt wird. Diese abklingenden Wirbelströme erzeugen ein Magnetfeld, welches in einer Empfangsspule an der Erdoberfläche eine Spannung induziert. Registriert wird der zeitliche Abklingvorgang dieser Spannung im Zeitfenster von wenigen Mikrosekunden bis über 100 ms nach der Stromabschaltung.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Die Abklingkurve der Spannung gibt in ihrem Verlauf die Eigenschaften der vertikalen Verteilung des scheinbaren spezifischen Widerstands im Untergrund wider (Tiefensondierung).

Auswertung

Die quantitative Auswertung der Daten erfolgt mittels räumlicher Tiefenmodelle für den spezifischen Widerstands und Inversionsverfahren, die eine iterative Anpassung von Mess- und Modellwerten durchführen.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der an der Empfangsspule gemessenen Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes im Vergleich zum vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Feld infolge einer Änderung des Widerstands im Untergrund. Die möglichen Spulenanordnungen (Central Loop, Single Loop, Separate Loop, Coincident Loop) weisen unterschiedliche Eigenschaften und Sensitivitäten auf. Je nach Aufgabenstellung ist eine entsprechende Spulenanordnung zu wählen.

Das Auflösungsvermögen hängt im Wesentlichen von der Erkundungstiefe, von der Spulenfläche, der Messkonfiguration und der Widerstandsverteilung im Untergrund ab.

Reichweite

Die Erkundungstiefe der TEM wird im Wesentlichen von der Spulenfläche, der Sendestromstärke, der Messkonfiguration und der Widerstandsverteilung im Untergrund bestimmt. Generell nimmt die Erkundungstiefe mit der Vergrößerung der Spulenfläche und der Sendestromstärke zu.

Hochohmige Gesteine (z. B. kompakte, unverwitterte, nicht geklüftete Festgesteine, wie Sandsteine, Kalksteine, Tonschiefer, Metamorphite, Magmatite, trockenes Steinsalz) als oberste Schicht können die Tiefenreichweite der Messmethode erhöhen.

Zum Nachweis dünner leitfähiger Schichten, z. B. in Form von leitfähigen Störungszonen in schlechtleitender Gesteinsmatrix, ist TEM besonders geeignet.

Erkundungstiefen von über 1.000 m sind mit TEM kaum zu erzielen. Gerätehersteller geben Reichweiten zwischen wenigen Metern und mehreren 100 m an.

Reproduzierbarkeit

Die elektromagnetischen Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweiskgrenzen

Die in der Empfangsspule induzierte Spannung kann bei abnehmender Feldstärke der abklingenden Wirbelströme im Bereich des Rauschens liegen.

Die Transienten-Elektromagnetischen Messungen bestimmen den scheinbaren spezifischen Widerstand des Untergrunds d. h. die gemessenen Widerstände geben weder den spezifischen Widerstand des Gesteins wider noch befinden sie sich in der korrekten räumlichen Lage. Erst eine Inversionsrechnung führt zur Ermittlung des spezifischen Widerstands.

Fehleranfälligkeit

Störungen, Fehler oder Verschlechterungen des Nutz-/Störsignal-Verhältnis können sich insbesondere ergeben aus:

- elektromagnetischen Einstreuungen durch technische Quellen (z. B. Radiosender, Hochspannungsleitungen)
- unterirdischen Leitungen, Metallzäune, etc.

Entscheidend für die Ermittlung der Leitfähigkeitswerte des Untergrundes ist auch, dass die Fläche der Sendespule genau eingemessen wird.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Die TEM ist zerstörungsfrei, hat keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändert das Gestein nicht.

Aufwand

Der zeitliche Aufwand der TEM ist im Wesentlichen abhängig von der Anzahl der Messpunkte und der Erkundungstiefe, welche die Messkonfiguration und insbesondere die Länge der (zumeist quadratischen) Spulen bestimmt. Die Messung erfordert eine genaue Einmessung der Eckpunkte der Spulen sowie metallfreie Oberflächenbedingungen.

Vor- und Nachteile

Vorteile

Die TEM-Verfahren vermeiden durch die zeitliche Trennung von Senden und Empfangen, dass sich dem Sekundärfeld das Primärfeld der Sendespule überlagert und erreichen dadurch eine höhere Messgenauigkeit im Vergleich zu anderen EM-Frequenzverfahren.

- Für geoelektrische Verfahren vergleichsweise hohe vertikale Auflösung,

- Aussagen bis in Tiefen von mehr als 100 m möglich.

Nachteile

Die TEM-Verfahren sind empfindlich gegenüber anthropogenem elektromagnetischem Noise, wie z. B. elektromagnetischen Einstreuungen durch technische Quellen (Radiosender, Hochspannungsleitungen, etc.).

Bewertung

Fazit

Die TEM ist zur Betrachtung hydrogeologischer Fragestellungen bei der Untersuchung des Deck- und Nebengebirges bis in mehrere hundert Meter Tiefe geeignet. Über Modellannahmen oder (in Labormessungen) empirisch ermittelte Abhängigkeiten lassen sich Porositäten bzw. Sättigungsgrade aus den spezifischen elektrischen Widerständen ableiten.

Im Vergleich zu anderen elektrischen Verfahren mit galvanisch angekoppelten Elektroden, wie die Gleichstromgeoelektrik, ist die TEM insbesondere beim Auftreten von hochohmigem Gestein besser für größere Erkundungstiefen geeignet.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Kombination mit anderen geophysikalischen Messmethoden kann die Aussagesicherheit erhöhen.

Eine gemeinsame Inversion mit Messdaten aus anderen geophysikalischen Messmethoden kann die Genauigkeit des Ergebnisses insbesondere hinsichtlich der räumlichen Struktur des Untergrundes verbessern.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen (Strack 2014). Inversionsverfahren sollten auch die Ermittlung anisotroper Eigenschaften beinhalten.

5.2.1.2.2. Magnetotellurik und Audio-Magnetotellurik

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Bei der Magnetotellurik (MT) und Audio-Magnetotellurik (AMT) handelt es sich um passive elektromagnetische Verfahren, welche als anregende Felder ausschließlich natürliche vorhandene elektromagnetische Quellen verwenden. Die klassische Magnetotellurik nutzt als Quelle die Stromsysteme in der Ionosphäre und Magnetosphäre im Periodenbereich von etwa 1 s bis 10^5 s. Die Audio-Magnetotellurik basiert auf Abstrahlungen und Reflektionen von atmosphärischen Gewitterereignissen mit Periodenbereich von etwa 10^{-4} s bis 1 s.

Die natürlichen elektromagnetischen Variationen induzieren im leitfähigen Erdinneren ein erdelektorisches (tellurisches) Feld, das wiederum ein sekundäres Magnetfeld hervorruft. An der Erdoberfläche werden die Variationen der horizontalen Komponenten des magnetischen (B_x , B_y) und elektrischen Feldes (E_x , E_y) gemessen. Als Sensoren für das Magnetfeld dienen dabei Fluxgate-,

Induktionsspulen- oder auch SQUID-Magnetometer („*superconducting quantum interference device*“). Üblicherweise wird auch die magnetische Vertikalkomponente mitregistriert. Zur Messung der erdelektrischen Variationen werden unpolarisierbare Sonden wie z. B. Ag/AgCl-Sonden benutzt.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Aufgrund der niedrigen Frequenzen bei der MT und des großen Frequenzbereiches liefern diese Verfahren besonders tiefreichende Aussagen über die elektrische Leitfähigkeit des Untergrunds bis in mehrere Kilometer. Bei der Nutzung sehr großer Perioden können mit der MT auch Aussagen über die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit bis in den oberen Erdmantel getroffen werden.

Auswertung

Die Auswertung erfolgt durch eine Analyse der Zeitreihen der einzelnen Feldkomponenten. Dabei wird eine komplexe frequenz- oder periodenabhängige Übertragungsfunktion bestimmt (Impedanztensor), aus dem sich u. a. scheinbare spezifische Widerstände und die Phasenverschiebung zwischen elektrischem und magnetischem Feld berechnen lassen, die als Eingangsgrößen für die sich anschließende Inversion verwendet werden.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die zeitliche Änderung der an der Empfangsstation gemessenen Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes infolge einer Änderung des Widerstands im Untergrund.

Das Auflösungsvermögen hängt im Wesentlichen von der Erkundungstiefe, der Frequenzen der genutzten elektromagnetischen Quellen und der Widerstandsverteilung im Untergrund ab. Bei Erkundungstiefen um 1.000 m kann die Auflösung im Hundertmeterbereich liegen.

Reichweite

Mit der MT und AMT können in Abhängigkeit vom nutzbaren Frequenzbereich und der Widerstandsverteilung Erkundungen von 100 m bis zu mehreren Kilometern Tiefe durchgeführt werden.

Reproduzierbarkeit

Die elektromagnetischen Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar. Sich ändernde Umweltbedingungen können sich aber z. B. durch zeitliche Veränderung des Quellenfeldes ergeben, welche aber durch Messungen des Tagessgangs an einer Referenzstation und ihrer Berücksichtigung weitestgehend zu kompensieren ist.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die magnetotellurischen Messungen bestimmen den scheinbaren spezifischen Widerstand des Untergrunds, d. h. die gemessenen Widerstände geben weder den spezifischen Widerstand des Gesteins wider noch befinden sie sich in der korrekten räumlichen Lage. Erst eine Inversionsrechnung führt zur räumlichen Verteilung des spezifischen Widerstands. Durch die Nutzung aller Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes können auch mögliche Anisotropien bestimmt werden.

Fehleranfälligkeit

Störungen, Fehler oder Verschlechterungen des Nutz-/Störsignal-Verhältnis können sich insbesondere ergeben aus:

- elektromagnetischen Einstreuungen durch technische Quellen (Radiosender, Hochspannungsleitungen, etc.),
- unterirdischen Leitungen, Metallzäune,
- topografischen Effekten.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Die MT und AMT sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der zeitliche Aufwand der MT und AMT ist im Wesentlichen abhängig von der Anzahl der Messpunkte und der Erkundungstiefe, welche die Messkonfiguration und die Dauer der Messung bestimmt. Durch den Aufbau der einzelnen Stationen (die elektrischen Sensoren sollten eingegraben werden) und lange Registrierzeiten für große Erkundungstiefen (bei MT bis zu mehreren Stunden) ist er vergleichsweise hoch.

Vor- und Nachteile

Die MT ermöglicht mit niedrigen Frequenzen Aussagen zur Leitfähigkeit bis in große Tiefen (> 1.000 m). Kein anderes elektrisches oder elektromagnetisches Verfahren erreicht größere Erkundungstiefen. Die Auflösung ist dabei aber vergleichsweise gering.

Bewertung

Fazit

Die MT und AMT sind zur Betrachtung hydrogeologischer Fragestellungen in größeren Tiefen bis 1.500 m und mehr geeignet. Über Modellannahmen oder (in Labormessungen) empirisch ermittelte Abhängigkeiten lassen sich Porositäten bzw. Sättigungsgrade aus den spezifischen elektrischen Widerständen ableiten.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Kombination mit anderen geophysikalischen Messmethoden kann die Aussagesicherheit erhöhen.

Eine gemeinsame Inversion mit Messdaten aus anderen geophysikalischen Messmethoden aber insbesondere anderer elektromagnetischer Verfahren kann die Genauigkeit des Ergebnisses insbesondere hinsichtlich der räumlichen Struktur des Untergrundes verbessern.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen. Inversionsverfahren sollten auch die Ermittlung anisotroper Eigenschaften beinhalten.

5.2.1.2.3. Controlled Source Audio-Magnetellurik und Radiomagnetotellurik

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Bei der Controlled Source Audio-Magnetellurik (CSAMT) handelt es sich um elektromagnetische Verfahren, welche eigene Sender im AMT-Bereich (Periodenbereich von 10^{-4} s bis 1 s) verwendet. Die Radiomagnetotellurik (RMT) dagegen nutzt die von Radiosendern abgestrahlten elektromagnetischen Wellen im Periodenbereich von etwa 10^{-4} s bis 10^{-6} s. Aufgrund der kleinen Periodenbereiche ist die RMT nur für geringe Erkundungstiefen im Meter- bis Zehnermeterbereich geeignet, während mit der CSAMT Erkundungstiefen bis über 1.500 m erzielt werden können (Streich 2016).

Da in besiedelten Gebieten viele künstliche Störquellen, z. B. elektrische Bahnen oder das Überlandleitungsnetz, die Qualität der passiven magnetotellurischen Registrierungen beeinflussen, verwendet man dort überwiegend die mit einem eigenen Sender ausgestattete Methode der CSAMT. Dabei wird als elektromagnetische Quelle ein geerdeter horizontaler Dipol von rund 1,5 km Länge realisiert. Das künstliche eingespeiste Signal wird dabei über eine Bandbreite von Frequenzen variiert. Auf der Empfangsseite werden je nach Erkundungstiefe und Geologie in einem Abstand von etwa 5 bis 10 km Entfernung parallel zum Sendedipol mehrere Empfangsstationen mit einem Empfangspunktabstand von 10 m bis 200 m aufgebaut. Jede Empfangsstation besteht dabei aus einem kurzen elektrischen Dipol, der zum Empfang des elektrischen Feldes dient sowie einem Magnetfeldsensor, der die magnetischen Komponenten des elektromagnetischen Feldes registriert.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Aus den Verhältnissen der gemessenen senkrecht zueinander stehenden horizontalen elektrischen und magnetischen Feldkomponenten (z. B. E_x und B_y) kann mit Hilfe der geometrischen Anordnung auf die elektrische Widerstandsverteilung mit der Tiefe zwischen der Sendestation und der Empfangsstation mittels eines Inversionsverfahren geschlossen werden.

Auswertung

Wie bei allen Messungen des elektrischen Widerstands lassen sich über Modellannahmen oder (in Labormessungen) empirisch ermittelte Abhängigkeiten Porositäten bzw. Sättigungsgrade aus den spezifischen elektrischen Widerständen ableiten.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der an der Empfangsstation gemessenen Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes im Vergleich zum vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Feld infolge einer Änderung des Widerstands im Untergrund.

Das laterale Auflösungsvermögen wird im Wesentlichen durch den Stationsabstand der Empfänger festgelegt (typischerweise 10 m bis 200 m). Die vertikale Auflösung wird mit 5 % bis 20 % der Erkundungstiefe angegeben (in z. B. 1.000 m Tiefe liegt die vertikale Auflösung der CSAMT zwischen 50 m und 200 m).

Reichweite

Die Erkundungstiefe der CSAMT wird im Wesentlichen von der Sendefrequenz, der Sendesignalstärke, der Messkonfiguration und der Widerstandsverteilung im Untergrund bestimmt. Generell

nimmt die Erkundungstiefe bei Verwendung niedriger Frequenzen und bei höheren Untergrundwiderständen zu. Mit CSAMT sind Erkundungstiefen bis über 1.500 m realisierbar.

Reproduzierbarkeit

Die elektromagnetischen Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze ist erreicht, wenn das an der Empfangsstation gemessene elektromagnetische Signal im Bereich des Umgebungs- oder Apparatur-Rauschens liegt.

Fehleranfälligkeit

Störungen, Fehler oder Verschlechterungen des Nutz-/Störsignal-Verhältnis können sich insbesondere ergeben aus:

- elektromagnetischen Einstreuungen durch technische Quellen (Radiosender, Hochspannungsleitungen, etc.),
- unterirdische Stromleitungen, Metallzäune, Fahrzeuge, etc.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

CSAMT und RMT sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der zeitliche Aufwand der CSAMT ist im Wesentlichen von der Anzahl der Messpunkte und der Erkundungstiefe abhängig, welche die Messkonfiguration und die Registrierdauer bestimmt. Die Messung erfordert metallfreie Oberflächenbedingungen.

Im Vergleich zu MT sind die Registrierzeiten von CSAMT deutlich kürzer. Der Aufbau eines geerdeten Dipols als Sender kann allerdings mehrere Stunden in Anspruch nehmen.

Vor- und Nachteile

Vorteile

Mit CSAMT sind Aussagen zur Widerstandsverteilung bis in Tiefen von 1.000 m und mehr möglich.

Durch eigene konfigurierbare Sendefrequenzen und Sendeleistungen weist CSAMT ein besseres Signal/Rausch-Verhältnis als andere MT-Methoden mit natürlichen Quellen auf und ist deshalb auch im urbanen Messgebiet erfolgversprechend einsetzbar.

Nachteile

Die CSAMT weist eine vergleichsweise geringe räumliche Auflösung auf.

Bei der CSAMT sind leistungsstarke Hochspannungsquellen erforderlich, die Ausgangsströme bis 20 A bei 1.000 V Spannung erzeugen.

Die RMT ist aufgrund der sehr geringen Erkundungstiefe für Aufgabenstellungen zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht geeignet. Für Erkundungen des Deckgebirges sind andere Messmethoden (z. B. Gleichstromgeoelektrik oder TEM) bei höherer Auflösung meist effizienter einsetzbar.

Bewertung

Fazit

Die CSAMT ist zur Betrachtung hydrogeologischer Fragestellungen bei der Untersuchung des Deck- und Nebengebirges und des einschlusswirksamen Gebirgsbereich bis in Tiefen über 1.500 m gut geeignet, um einen Überblick über etwaige Widerstandsanomalien zu gewinnen, die beispielsweise mit leitfähigen permeablen Klüften in Verbindung stehen könnten.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Kombination mit anderen geophysikalischen Messmethoden kann die Aussagesicherheit erhöhen.

Eine gemeinsame Inversion mit Messdaten aus anderen geophysikalischen Messmethoden aber insbesondere anderer elektromagnetischer Verfahren kann die Genauigkeit des Ergebnisses insbesondere hinsichtlich der räumlichen Struktur des Untergrundes verbessern.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

5.2.1.2.4. Oberflächen-Nuklear-Magnetische Resonanz (SNMR)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Die Oberflächen-Nuklear-Magnetische Resonanz (Surface Nuclear Magnetic Resonance – SNMR) nutzt die magnetischen Eigenschaften des Wassers. Im atomaren Bereich besitzen Wasserstoffkerne als rotierende Teilchen einen Drehimpuls (Kernspin), der mit einem magnetischen Moment verbunden ist. Im Allgemeinen ist dieses magnetische Moment parallel zum lokalen Erdmagnetfeld ausgerichtet. Beim SNMR wird durch das Anlegen eines starken senkrecht dazu stehenden magnetischen Wechselfeldes die Rotationsachse der Wasserstoffprotonen ausgelenkt. Nach dem Abschalten dieses magnetischen Wechselfeldes führen die angeregten Protonen eine Kreisbewegung (Präzession) um die Feldlinien des lokalen Erdmagnetfeldes aus und erzeugen bis zum Erreichen ihrer Ausgangslage dabei ein Relaxationsmagnetfeld mit einer Kreisfrequenz, die proportional zum lokalen Erdmagnetfeld ist (Legchenko & Valla 2002).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Die maximale Amplitude des Relaxationsmagnetfeldes, welches in einer auf der Erdoberfläche ausgelegten Spule gemessen wird, ist direkt proportional zum Wassergehalt. Aus dem zeitlichen Abklingverhalten lassen sich außerdem Informationen über absolute Porositäten, effektive Porositäten und hydraulische Durchlässigkeiten gewinnen. Die SNMR bietet daher folgende Anwendungsmöglichkeiten (Legchenko et al. 2002, Knödel 2005):

- Direktnachweis von Grundwasser,
- Unterscheidung hydrogeologischer Einheiten,
- Bestimmung der Wassergehalte und Porositäten von Porenaquiferen,
- Abschätzung hydraulischer Durchlässigkeiten.

Auswertung

Unter Berücksichtigung des lokalen Magnetfelds, des gesendeten Erregerpulses, der Spulenkonfiguration sowie eines Leitfähigkeitsmodells werden über eine Inversionsrechnung aus der maximalen Amplitude des Relaxationsmagnetfelds sowie dessen zeitlichen Abklingverhalten die hydrogeologischen Messgrößen (z. B. Wassergehalt, hydraulische Durchlässigkeiten) berechnet.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die zeitlich gemessenen Signalamplituden sind maßgeblich von den im Porenraum vorhandenen und kernmagnetisch wirksamen Fluiden (d. h. protonenreiche Fluide wie Wasser) und den Porenraumeigenschaften des Gesteins abhängig.

Das Auflösungsvermögen und die Genauigkeit der SNMR-Messungen sind abhängig von der Stärke der Komponente des anregenden Magnetfelds, welche senkrecht zum Erdmagnetfeld steht, und verringern sich mit der Tiefe.

Reichweite

Die Erkundungstiefe kann generell durch eine Erhöhung des Sendestroms (d. h. der Stärke anregenden Magnetfelds) und/oder der Signaldauer vergrößert werden. Da die Leitfähigkeit des Untergrunds einen starken Einfluss auf die Signalamplitude hat hängt die erzielbare Erkundungstiefe aber auch davon ab. Darüber hinaus wird die erzielbare Erkundungstiefe durch die Spulengeometrie und die Spulenfläche beeinflusst. Im Allgemeinen erhöhen große Spulenflächen die Erkundungstiefe sind aber aufwendiger zu realisieren und störungsanfälliger.

Die maximale Erkundungstiefe liegt abhängig vom Gehalt auslenkbarer Protonen (freies Wasser) und der Leitfähigkeit des Untergrundes bei etwa 150 m.

Reproduzierbarkeit

Die SNMR Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar.

Allerdings ist die Frequenz der Präzessionsbewegung, die sog. Larmorfrequenz, proportional zum lokalen Erdmagnetfeld, was dazu führt, dass die Ergebnisse bei unveränderten Messgrößen und identischen geologischen Verhältnissen (Modellannahmen) ortsabhängig sind und insbesondere bei weltweiten Messaktivitäten zu beachten ist.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Durch die SNMR-Messungen wird im Wesentlichen das in den Porenräumen befindliche freie Wasser nachgewiesen. Das an den Porenoberflächen gebundene Haftwasser besitzt infolge der starken molekularen Bindungskräfte extrem kurze Relaxationszeiten und kann wegen der technisch unvermeidbaren Totzeit zwischen Ende des anregenden Signals und Aufzeichnung des Relaxationsmagnetfelds nicht erfasst werden.

Die Abklingzeiten hängen nicht allein von der Porengeometrie, sondern auch von den magnetischen Eigenschaften der umgebenden Gesteine ab. Gesteine und Sedimente mit erhöhten magnetischen Suszeptibilitäten (Basalte, Diabase, eisenhaltige Sandsteine etc.) können Inhomogenitäten im lokalen Magnetfeld verursachen und die für „normale“ Sedimente verwendeten Beziehungen der Abklingzeit zu den hydraulischen Messgrößen sind nicht mehr gültig.

Fehleranfälligkeit

Die Frequenz des anregenden Signals muss sehr nahe an der dem lokalen Erdmagnetfeld entsprechenden Larmorfrequenz liegen. Ansonsten geraten die ausgelenkten Protonen nicht in Resonanz und die Anregung ist zu schwach.

SNMR ist gegenüber elektromagnetischen Störsignalen extrem anfällig. Stromleitungen oder andere technische Störquellen, aber auch natürliche Vorgänge wie ferne Gewitter, Blitze oder tellurische Kriechströme können Probleme bei den SNMR-Messungen verursachen.

Zur Verbesserung des Signal-/Noise-Verhältnissen können die einzelnen Messvorgänge gestapelt werden.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Die SMNR ist zerstörungsfrei, hat keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändert das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand ist stark abhängig von den lokalen Störbedingungen. In besiedelten Gebieten mit stärkeren elektromagnetischen Einstreuungen können Stapelgrade von über 200 erforderlich werden, so dass mit einem aus 2 - 3 Personen bestehenden Messtrupp nur 1 bis 2 Sondierungen am Tag durchführbar sind. Der zeitliche Aufwand ist damit vergleichsweise hoch.

Vor- und Nachteile

Die SNMR ermöglicht als einziges oberflächengeophysikalisches Verfahren eine direkte Bestimmung des Wassergehaltes und einzelner hydraulischer Messgrößen (z. B. Porosität, hydraulische Durchlässigkeit) des Untergrundes.

Die Erkundungstiefe ist mit bis zu 150 m relativ gering.

Zur Generierung der anregenden Signale werden kurzzeitig Ausgangsströme bis 450 A bei 4.000 V Spannung erzeugt.

Bewertung

Fazit

Die SNMR ist zur Betrachtung hydrogeologischer Fragestellungen bei der Untersuchung des Deck- und Nebengebirges bis in Tiefen von etwa 150 m gut geeignet. Sie ist gegenüber elektromagnetischen Störsignalen allerdings extrem anfällig.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Da für die Auswertung der SNMR-Messungen (Inversion) ein Leitfähigkeitsmodell benötigt wird, sollte mindestens eine gleichstromgeoelektrische Sondierung durchgeführt werden.

Eine deutlich verbesserte Beschreibung der Aquifereigenschaften kann durch eine gemeinsame Inversion (Joint-Inversion) der Daten aus SNMR- und geoelektrischen Verfahren realisiert werden. Die unterschiedlichen physikalischen Prinzipien dieser Verfahren ergänzen und stützen sich vielfach gegenseitig bei der hydrogeologischen und strukturellen Interpretation (Hertrich & Yaramanci 2002).

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Die Bestimmung des Wassergehaltes der ungesättigten Zone und die Abschätzung des Wassergehaltes sowie der hydraulischen Eigenschaften von Karst- und Kluftgrundwasserleitern sind aktuelle Themen der Forschung (Yaramanci & Legchenko 2005).

Eine Verringerung der Zeit zwischen Abschaltung des Erregerpulses und Aufzeichnung der Abklingkurve würde es ermöglichen, den Haftwasseranteil bzw. die hydraulischen Eigenschaften von gering permeablen Medien besser zu bestimmen.

5.2.1.3. Seismische Messmethoden

Grundlage seismischer Messungen ist die gezielte Anregung elastischer Wellen an der Erdoberfläche oder in Bohrungen zur Durchschallung des Untergrundes. Die angeregten seismischen Wellen breiten sich im Untergrund aus und werden an Grenzflächen an denen sich die akustische Impedanz (Produkt aus Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und Dichte) ändert, wie beispielsweise bei einem Wechsel einer Gesteinsart, reflektiert, gebeugt oder gestreut. Die an der Erdoberfläche oder in Bohrungen aufgezeichneten aus dem Untergrund zurückkehrenden seismischen Wellen lassen in erster Linie Rückschlüsse auf den strukturellen geologischen Aufbau zu. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen materialspezifisch ist, kann über eine Bestimmung der seismischen Wellengeschwindigkeiten außerdem auch auf die Materialeigenschaften der geologischen Schichten geschlossen werden.

Eine direkte Umrechnung der ermittelten seismischen Geschwindigkeiten in Porositäten oder Sättigungsgrade ist in den meisten Fällen aber nicht möglich. Dies erfordert Modellannahmen oder die empirische Ableitung von Korrelationsbeziehungen mit Hilfe von Labormessungen oder Bohrlochmessungen zur Kalibrierung der Ergebnisse (Mavko et al. 2009). Es ist dann zu beachten, dass die gewonnenen Korrelationsbeziehungen in der Regel nur für bestimmte Gesteine und räumlich begrenzt gültig sind.

Es existiert eine Vielzahl von theoretischen Modellen und empirischen Beziehungen, welche die Ausbreitung von Kompressions- und Scherwellen in porösen, fluidgefüllten Medien beschreiben. Dabei sind insbesondere die Wechselwirkung des Porenfluids im voll- oder teilgesättigten Porenraum mit der Gesteinsmatrix sowie der viskose Fluss im permeablen Medium zu berücksichtigen.

Die Theorie von Biot (1956, 1962) beschreibt die Frequenzabhängigkeit der seismischen Geschwindigkeiten in einem porösen vollgesättigten Gestein bei Kenntnis der elastischen Eigenschaften des trockenen Gesteins. Die Näherung der Theorie von Biot für niedrige Frequenzen, die eine Erhöhung des Kompressionsmoduls (Versteifungseffekt) und damit eine Erhöhung der Kompressionswellengeschwindigkeit bei vollständiger Sättigung ergibt, wurde bereits von Gassmann (1951) berechnet. Für eine korrekte Beschreibung der Frequenzabhängigkeit der seismischen Geschwindigkeiten bei höheren Frequenzen, wie sie bei Bohrlochmessungen (s. Abschnitt 5.2.2) auftreten, ist es notwendig einen Porendruckgradienten beim Durchlaufen der seismischen Wellen einzuführen (Mavko & Jizba 1991). Der dadurch verursachte „lokale Fluss“ im Porenraum und sein Effekt auf die seismischen Geschwindigkeiten wurde durch Dvorkin et al. (1995) für alle Frequenzen elastischer Wellen beschrieben. Das vereinheitlichte BISQ-Modell (Biot/Squirt) erweitert die Theorie von Biot und das Modell des „lokalen Flusses“ auch auf teilgesättigte Medien (Dvorkin et al. 1994).

Empirische oder semi-empirische Beziehungen sind beispielsweise:

- die von Geertsma (1961) beschriebene Abhängigkeit des Kompressionsmoduls von der Porosität,
- die Zeit-Mittel-Gleichung (Wyllie et al. 1956, 1958, 1963), die im Festgestein die Abhängigkeit der Kompressionswellengeschwindigkeit v_k von der Porosität n und dem Porenfluid beschreibt:

$$\frac{1}{v_k} = \frac{n}{v_{k,p}} + \frac{1-n}{v_{k,m}} \quad (5-22)$$

(mit der Kompressionswellengeschwindigkeit $v_{k,p}$ im Porenfluid und der Kompressionswellengeschwindigkeit $v_{k,m}$ in der Gesteinsmatrix),

- sowie deren Verbesserung durch Raymer et al. (1980) für unterschiedliche Porositätsbereiche,
- die Berücksichtigung von Tongehalten (Han 1986, Tosaya & Nur 1982, Castagna et al. 1985),
- außerdem die Verbindung von Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeiten für wassergesättigte Kalksteine, Dolomite oder Sand- und Tongesteine (z. B. Castagna et al. 1993),
- und die Beziehung von Geschwindigkeiten und Dichten (Gardner et al. 1974).

5.2.1.3.1. Reflexionsseismik

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Bei der Reflexionsseismik werden an der Erdoberfläche mit Vibrationsfahrzeugen oder durch Sprenganregung in flachen Bohrlöchern elastische Wellen erzeugt, welche sich im Untergrund ausbreiten und an Grenzflächen an denen sich die akustische Impedanz ändert reflektiert, gebeugt oder gestreut. Die in Richtung Erdoberfläche zurückkehrenden seismischen Wellen werden an der Erdoberfläche von mehreren Sensoren (z. B. Geophone, Mikroelektromechanische Systeme - MEMS) gleichzeitig empfangen und als Zeitreihen (seismische Datenspur) registriert. Durch die geeignete Anordnung von Anregungs- und Empfangspunkten entlang von Profilen oder in der Fläche werden vertikale Schnitte (2D-Seismik) oder räumliche Abbildungen des Untergrundes (3D-Seismik) erzeugt.

Den Bearbeitungsverfahren zur seismischen Abbildung liegt zugrunde, dass einzelne (benachbarte) Punkte oder Flächenelemente mehrfach mit Reflexionssignalen überdeckt werden. Durch eine Geschwindigkeitsanalyse und kohärente Stapelung der Reflexionshyperbeln (klassische Common-Mid-Point-Stapelung) bzw. durch eine Inversion nach Auftauchwinkel und Krümmungen der Wellenfronten (Common Reflection Surface Stack) wird eine seismische Abbildung in der Zeit erzeugt. Migrationsverfahren nach oder vor der Stapelung (z. B. Fourier-Migration, Finite Differenzen Migration, Kirchhoff Migration, Kirchhoff Pre-Stack Depth Migration, Fresnel Volumen Migration, Reverse Time Migration) als ein Schritt der Datenbearbeitung erzeugen eine lagerichtige Abbildung, die unter Nutzung der Geschwindigkeiten aus der Datenbearbeitung und/oder VSP-Messungen (vertikalseismische Profilierung, s. Abschnitt 5.2.1.4.1) und/oder Akustik-Log-Messungen noch in die Tiefe gewandelt wird.

In der Regel werden Kompressionswellen (P-Wellen) zur Auswertung genutzt, für Spezialanwendungen können aber auch Scherwellen (S-Wellen) verwendet werden, was ggf. eine optimierte Scherwellenanregung und richtungsabhängige Empfänger (3-Komponenten) erfordert.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Hauptaufgabe der Reflexionsseismik ist die strukturelle Abbildung des Untergrunds. Eine Korrelation zur Porosität, Wassersättigung oder dem Verfestigungsgrad von Tongestein kann nur über die für einzelne Schichten ermittelte Wellenausbreitungsgeschwindigkeit oder die akustische bzw. elastische Impedanz hergestellt werden. Zu Ermittlung der akustischen bzw. elastischen Impedanz aus seismischen Daten existieren unterschiedliche Inversionsverfahren:

- Eine *Constrained Sparse-Spike Inversion* liefert die akustische Impedanz für reflexionsseismische Daten in verschiedenen Bandbreiten. Die niedrigen Frequenzen werden durch Akustik-Logs mit einbezogen.
- Die *Elastische Impedanz Inversion* liefert die P-Wellen-Impedanz, die S-Wellen-Impedanz und die Dichte, was insbesondere die Unterscheidung von Einflüssen von Lithologie, Porosität und Fluiden verbessert. Sie beruht im Wesentlichen auf der Analyse der vom Offset abhängigen Amplitude reflektierter Welle (AVO – Amplitude versus Offset) und der mathematischen Beschreibung der winkelabhängigen Reflexionskoeffizienten durch die Zoeppritz-Gleichungen.
- In einer *Geostatistischen (Stochastischen) Inversion* werden die vorhandenen Informationen (u. a. Reflexionsseismik, Bohrlochmessungen) nach der Bayesschen Statistik zusammengeführt und als räumliche Wahrscheinlichkeits-Dichte-Funktionen beschrieben. Durch verschiedene Simulationen (z. B. Markov-Chain-Monte-Carlo-Verfahren) wird iterativ ein geologisches Modell erstellt, das allen Informationen mit größter Wahrscheinlichkeit genügt. Vorteil der Geostatistischen Inversion ist, dass auch lithologische Informationen oder Gesteinseigenschaften, wie Porosität, direkt in die Inversion mit einbezogen werden können.
- Die *Full Waveform Inversion* liefert Modelle der seismischen Geschwindigkeiten oder elastischen Impedanz und der Dämpfung indem es die Differenz zwischen den gemessenen und den modellierten Wellenformen minimiert (Virieux & Operto 2009). Damit ist es theoretisch möglich die gesamten petrophysikalischen Informationen, die sich in der seismischen Spur abbilden, zu extrahieren. Die Full Waveform Inversion ist extrem rechenintensiv, da sie eine (im besten Fall anisotrope, visko-elastische) Vorwärtsmodellierung des seismischen Wellenfeldes benötigt, die abhängig vom Startmodell und der gewählten Methode zur Inversion des Gleichungssystems iterativ mehrfach durchlaufen wird.

Eine generelle Beschreibung der Grundlagen von Inversionsverfahren findet sich beispielsweise in Nolet (1987), Tarantola (2005) und Schuster (2017). Ziel aller Inversionen ist, dass die berechnete akustische oder elastische Impedanz konsistent mit den Messergebnissen der Reflexionsseismik (Stapelung), den Ergebnissen der AVO-Analyse sowie den Geschwindigkeits- und Dichte-Logs sind und ggf. auch andere aus Bohrungen oder Bohrlochmessungen bekannte Gesteinseigenschaften berücksichtigt.

Neben der herkömmlichen strukturgeologischen Interpretation der seismischen Abbildung und den oben beschriebenen Inversionsverfahren lassen sich auch zahlreiche *Seismische Attribute* aus den reflexionsseismischen Daten berechnen. Seismische Attribute werden dazu genutzt die strukturellen, stratigraphischen, lithologischen, hydrogeologischen, petrophysikalischen oder geomechanischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften herauszuarbeiten und darzustellen (Chopra &

Marfurt 2007). Generell lassen sich drei Kategorien von seismischen Attributen unterscheiden: geometrische Attribute, Wellenform-Attribute und spektrale Attribute.

- Ziel der geometrischen Attributanalyse ist die verbesserte Visualisierung der geometrischen Charakteristika der seismischen Abbildung (z. B. Einfallswinkel, Einfallsrichtung und Kontinuität von Reflektoren). Typische seismische Attribute dazu sind: Kohärenz, Neigung, Azimut, Krümmung. Sie ermöglichen es auch sub-seismische Störungen, Kanäle, Deformationen u. ä. hervorzuheben.
- Die in Wellenform-Attributen enthaltenen Informationen der komplexen seismischen Spur stellen hauptsächlich die Verbindung zu den lithologischen, hydrogeologischen, petrophysikalischen oder geomechanischen Eigenschaften her. Typische Attribute sind: momentane Amplitude, durchschnittliche Energie, effektive (RMS)-Amplitude, maximale Magnitude, anelastische Dämpfung, momentane Phase, akustische Impedanz (s. o.).
- Mit spektralen Attributen wird die seismische Abbildung im Zeit-Frequenz-Bereich analysiert. In der spektralen Zerlegung können einzelne struktureologische Muster (z. B. dünne Schichten) oder petrophysikalische Eigenschaften (z. B. Kohlenwasserstoffansammlungen) sichtbar gemacht werden.

Auswertung

In den seismischen Softwarepaketen zur Datenbearbeitung und Interpretation sind oft hunderte von seismischen Attributen enthalten (Pennington 1997, Brown 1999, Schlumberger 2016), die sich leicht voneinander unterscheiden, um bestimmte Eigenschaften der seismischen Abbildung hervorzuheben. Meist wird ein Datensatz mit mehreren seismischen Attributen analysiert und die Ergebnisse hinsichtlich der untersuchten geologischen Eigenschaften (z. B. Fazies) mit Hilfe von Neuronalen Netzwerken klassifiziert (Poupon et al. 1999).

Um die Verbindung der seismischen Attribute zu den lithologischen, hydrogeologischen, petrophysikalischen oder geomechanischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften herzustellen ist es notwendig, sie an Bohrungen, welche die untersuchten Eigenschaften z. B. durch bohrlochgeophysikalischen Verfahren bestimmt haben, zu kalibrieren. Darauf aufbauend sind lineare oder nicht-lineare Beziehungen zwischen den Änderungen der untersuchten Eigenschaften und den Änderungen der seismischen Attribute herzustellen. Zwischen Porosität und seismischer Amplitude lässt sich meist eine hohe Korrelation finden.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der ermittelten seismischen Geschwindigkeiten infolge einer Änderung der Porosität oder Wassersättigung im Untergrund.

Das Auflösungsvermögen hängt von der Wellenlänge und der Bandbreite des seismischen Signals ab. Das vertikale Auflösungsvermögen beträgt etwa ein Viertel der dominanten Wellenlänge. Bei typischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in Festgesteinen von $3.000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bis $6.000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und möglichen Frequenzen zwischen $f = 25 \text{ Hz}$ und 100 Hz liegt die vertikale Auflösung bei 7,5 m bis 60 m.

Reichweite

Die Reichweite in der Reflexionsseismik wird im Wesentlichen von der Anregungsenergie des seismischen Quellsignals, vom Überdeckungsgrad, von der Tiefenlage und den Eigenschaften des Reflektors, den Dämpfungseigenschaften des Untergrundes oberhalb des Reflektors sowie von

den die Messungen begleitenden Störsignalen (Erschütterungen, Lärm, etc.) bestimmt. Im Regelfall können Strukturen bis in einige 1.000 m Tiefe sehr gut abgebildet werden.

Reproduzierbarkeit

Die reflexionsseismischen Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweiskgrenzen

Ob ein Reflektor erkennbar ist hängt im Wesentlichen von der Messanordnung, vom Auflösungsvermögen der Messung und von der Datenbearbeitung ab, was unter Berücksichtigung topografischer und anthropogener Randbedingungen (z. B. Rauschen) entsprechend der Aufgabenstellung zu entwerfen bzw. zu entwickeln ist (Cordsen et al. 2000, Vermeer 2002). Darüber hinaus spielt die Größe des Reflexionskoeffizienten selbst eine Rolle. Außerdem ist zu gewährleisten, dass eine Korrelation der ermittelten Geschwindigkeiten zu Porositäten oder Wassersättigungen hergestellt werden kann.

Fehleranfälligkeit

Aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten der seismischen Geschwindigkeiten (Druck, Anisotropie, Porosität, Porenfüllung, Temperatur, Frequenz) besteht eine Unsicherheit in der Etablierung einer zuverlässigen Korrelation zwischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und Porosität bzw. Wassersättigung sowie eine Fehleranfälligkeit in der Übertragung von Laborergebnissen oder Bohrlochmessungen auf reflexionsseismische Messungen von der Erdoberfläche (Skalierbarkeit, Frequenzeffekte).

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Die reflexionsseismischen Messungen sind in der Regel zerstörungsfrei; lediglich bei der Sprenganregung in flachen Bohrlöchern oder bei der Anregung mit schweren Vibrationsfahrzeugen kann an den Anregungspunkten die oberste Bodenschicht verdichtet werden. Die reflexionsseismischen Messungen haben auf nachfolgende Messungen keine Auswirkungen und verändern das zu erkundende Gestein nicht.

Aufwand

Die Dauer für die Messung ist im Wesentlichen von der Anzahl der Anregungspunkte abhängig. Die Anzahl der pro km bzw. pro km² benötigten Anregungspunkte richtet sich nach dem Erkundungsziel; je flacher dieses gelagert ist, desto geringer sind die Mess- und Anregungspunktabstände.

Lange Vorbereitungszeiten durch notwendige Genehmigungsverfahren, aber auch relativ lange Auf- und Abbauzeiten unter hohem Personaleinsatz (Truppgrößen für 3D-Seismik: 50 bis 100 Personen) erhöhen den Aufwand.

Vor- und Nachteile

Vorteile

Die Reflexionsseismik deckt einen großen Tiefenbereich (wenige Zehnermeter bis mehrere tausend Meter) ab und ermöglicht eine lagegenaue Abbildung auch von komplexen Strukturen mit hoher Auflösung.

Die Porositäten sind über eine zu erstellende Korrelation mit seismischen Geschwindigkeiten bestimmbar.

Nachteile

Es besteht ein hoher technischer und personeller Aufwand.

Bewertung

Fazit

Zur detaillierten Strukturerkundung ist eine 3D-Reflexionsseismik alternativlos, da es im Vergleich zu anderen geophysikalischen Verfahren von der Erdoberfläche die höchstmögliche Auflösung der Strukturen über einen großen Tiefenbereich bietet.

Verschiedene Auswerteverfahren (Inversionen, seismische Attribute) bieten Möglichkeiten zur Korrelation mit in bohrlochgeophysikalischen Messungen ermittelten Messgrößen.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Eine Kombination mit Bohrlochmessungen ist sowohl für die strukturelle und stratigraphische Interpretation als auch die Zuordnung von lithologischen, hydrogeologischen, petrophysikalischen oder geomechanischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften über Inversionsverfahren und seismische Attribute notwendig.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten, der akustischen bzw. elastischen Impedanz sowie verschiedenen seismischen Attributen und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

Der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik geht von einer möglichst glatten, linearen, ungefilterten, azimutal unabhängigen Registrierung des seismischen Spektrums aus. Dazu werden zunehmend Einzelanregungen und Einzelsensoren verwendet. Filtereffekte durch Geophon-Arrays oder Vibratoren-Pattern sind eher unerwünscht (Criss 2019) und bei einem dichten Messraster aufgrund verbesserter Datenbearbeitungsmöglichkeiten zur Noise-Unterdrückung auch nicht mehr notwendig.

Durch die verzerrungsfreie Anregung und Registrierung niedriger Frequenzen (< 8 Hz) kann eine größere nutzbare Bandbreite erzielt werden. Niedrige Frequenzen erhöhen die Erkundungstiefe, die größere Bandbreite verbessert sowohl die Auflösung als auch die Ergebnisse von Inversionsverfahren. MEMS ermöglichen eine lineare Registrierung von Amplitude und Phase über einen großen Frequenzbereich seismischer Wellen (0 bis 1.600 Hz), finden bisher aber nur eine geringe Verbreitung bei seismischen Messungen. Die Anregung niedriger Frequenzen mit Vibratoren befindet sich in einer andauernden Weiterentwicklung (Tellier & Ollivrin 2019).

Die Verwendung von kabellosen Registriereinheiten und der simultane Einsatz mehrerer Einzelvibratoren kann die Durchführung insbesondere von 3D reflexionsseismischen Messungen erheblich beschleunigen, findet in Europa aber erst langsam Einzug.

Die *Full Waveform Inversion* ist auf höhere Frequenzen (größer als ca. 15 Hz) auszudehnen, was insbesondere einen deutlichen Zuwachs an Rechenleistung erfordert (Sedova et al. 2019).

5.2.1.3.2. Refraktionsseismik (Tomographie)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Bei der Refraktionsseismik werden an der Erdoberfläche mit einer seismischen Quelle (Hammer Schlag oder Fallgewicht bei geringen Erkundungstiefen bzw. mit Vibrationsfahrzeugen oder per Sprenganregung in flachen Bohrungen bei großen Erkundungstiefen) erzeugt, welche sich im Untergrund ausbreiten und an Grenzflächen, an welchen sich die akustische Impedanz ändert, reflektiert, gebeugt oder gestreut. Die in Richtung Erdoberfläche zurückkehrenden seismischen Wellen werden an der Erdoberfläche oder in Bohrungen von mehreren Sensoren (z. B. Geophone, MEMS) gleichzeitig empfangen und als Zeitreihen (seismische Datenspur) registriert. Die Refraktionsseismik nutzt die an Schichtgrenzen kritischen refraktierten Wellen. Kritisch refraktierte Wellen entstehen an einer Schichtgrenze nur, wenn die Geschwindigkeit der Hangendschicht kleiner ist als die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Liegendschicht. Dabei breiten sich die kritisch refraktierten Wellen in der Schicht mit der höheren Geschwindigkeit aus und werden daher nach einer gewissen Entfernung vom Anregungspunkt zeitlich als erste Einsätze registriert. Die Refraktionsseismik untersucht diese Ersteinsatzzeiten der an den verschiedenen Sensoren eintreffenden seismischen Wellen (direkte Welle, Refraktionen). Bei der klassischen Refraktionsseismik wird von einem aus wenige Schichten bestehendem Modell ausgegangen. Die Auswertung der Laufzeiten der Ersteinsätze liefert die Mächtigkeit und Geschwindigkeiten der einzelnen Schichten (Gebrande & Miller 1985).

Einen allgemeineren Ansatz verfolgt die tomographische Inversion der refraktionsseismischen Messungen (Lo & Inderwiesen 1994, Lehmann 2007). Hier wird der Untergrund in viele kleinräumige Zellen eingeteilt, wobei jede Zelle als Startmodell eine konstante Geschwindigkeit erhält. Für jede Anregungspunkt-Empfangspunkt-Kombination werden entlang des gebrochenen Strahlwegs die partiellen Laufzeiten durch die einzelnen durchlaufenden Zellen aufaddiert und mit der gemessenen Laufzeit verglichen. Treten Laufzeitdifferenzen auf, werden die Geschwindigkeiten der beteiligten Zellen entsprechend angepasst. Mit den angepassten Geschwindigkeiten werden die Laufzeiten für jeden Wellenstrahl erneut modelliert und mit den gemessenen Werten verglichen und die Abweichungen auf die jeweils durchlaufenden Zellen verteilt usw. Dieser als Laufzeitinversion bezeichnete Vorgang erfolgt iterativ solange, bis eine vorgegebene Anzahl von Iterationen durchlaufen wurde, der Anpassungsfehler sich nicht mehr verbessert oder eine gewünschte Genauigkeit erreicht ist. Die mit der letzten Iteration ermittelten Geschwindigkeiten bilden als Ergebnis der Inversion die Tiefenverteilung der seismischen Geschwindigkeit entlang des Messprofils.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Die P- und S-Wellengeschwindigkeiten sind direkt mit den elastischen Eigenschaften des Gesteins verknüpft, die wiederum von der Porosität und den Fluidgehalten abhängen (s. Abschnitt 5.2.1.3) (Salem 2000). Insbesondere die S-Wellengeschwindigkeiten bieten einen Zugang zur Scherfestigkeit.

Auswertung

In der Regel werden P-Wellen zur Auswertung verwendet. Analog können aber auch S-Wellen ausgewertet werden, welche entsprechende Verteilungen der S-Wellengeschwindigkeiten liefern. Da S-Wellen generell langsamer als P-Wellen laufen, ist deren „Ersteinsatzbestimmung“ aufgrund von Überlagerungen mit P- und anderen Wellen in der Regel schwieriger.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der ermittelten seismischen Geschwindigkeiten infolge einer Änderung der Porosität oder Wassersättigung im Untergrund.

Das Auflösungsvermögen hängt von der Genauigkeit der Ersteinsatzbestimmung (< 1 ms) und dem Fehler bei der Modellanpassung ab. Mit der Refraktionsseismik sind bei der Tiefen- und Geschwindigkeitsbestimmung Genauigkeiten von < 5 % erreichbar.

Reichweite

Die Erkundungstiefe wird maßgeblich von der Gesamtlänge des Profils, der Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund sowie der Stärke der seismischen Quelle bestimmt. Typische Erkundungstiefen beim Einsatz eines beschleunigten Fallgewichts liegen bei maximal 100 m, mit sprengseismischen Anregungen sind abhängig von der Ladungsstärke auch Erkundungstiefen von mehreren hundert Metern erreichbar.

Reproduzierbarkeit

Die refraktionsseismischen Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweiskgrenzen

Die Durchführbarkeit des refraktionsseismischen Verfahrens hängt stark von den Verhältnissen der seismischen Geschwindigkeit der oberhalb und unterhalb des Refraktors liegenden Schichten ab. Ein Refraktor lässt sich nur nachweisen, wenn dessen seismische Geschwindigkeit größer ist als die der darüber liegenden Schicht und die kritisch refraktierte Welle dieser Schichtgrenze als Ersteinsatz erkennbar ist. Besteht ein zu geringer Kontrast zwischen den seismischen Geschwindigkeiten der Schichten, sind refraktionsseismische Messungen für eine Erkundung nicht geeignet.

Die Amplituden der zur Festlegung der Ersteinsatzlaufzeiten benötigten Signale können bei langen Laufwegen und hoher Dämpfung im Verhältnis zum Umgebungsrauschen zu klein sein, so dass kein Laufzeitwert bestimmt werden kann.

Fehleranfälligkeit

Aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten der seismischen Geschwindigkeiten (Druck, Anisotropie, Porosität, Porenfüllung, Temperatur, Frequenz) besteht eine Unsicherheit in der Etablierung einer zuverlässigen Korrelation zwischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und Porosität bzw. Wassersättigung sowie eine Fehleranfälligkeit in der Übertragung von Laborergebnissen oder Bohrlochmessungen auf reflexionsseismische Messungen von der Erdoberfläche (Skalierbarkeit, Frequenzeffekte).

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Die refraktionsseismischen Messungen sind in der Regel zerstörungsfrei; lediglich bei der Sprenganregung in flachen Bohrlöchern oder bei der Anregung mit schweren Fallgewichten kann an den Anregungspunkten die oberste Bodenschicht verdichtet werden. Die reflexionsseismischen Messungen haben auf nachfolgende Messungen keine Auswirkungen und verändern das zu erkundende Gestein nicht.

Aufwand

Die Dauer für die Messung ist im Wesentlichen von der Anzahl der Anregungspunkte und dem Geophonabstand abhängig, wobei eine Mindestprofillänge zur Realisierung der Erkundungstiefe einzuhalten ist.

Vor- und Nachteile

Vorteile

Im Vergleich zur Reflexionsseismik bietet die Auswertung der Refraktionsseismik einen direkten Zugang zu den seismischen Geschwindigkeiten und zu Tiefen.

Porositäten sind über eine zu erstellende Korrelation mit seismischen Geschwindigkeiten bestimmbar (Mavko et al 2009).

Nachteile

Aufgrund von praktischen Erwägungen (notwendige Profillänge, Energie seismischer Quellen) ist die typische Erkundungstiefe meist kleiner als 100 m.

Eine Zunahme der Geschwindigkeit ist eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Refraktionsseismik. Bei Geschwindigkeitsinversionen ist die Refraktionsseismik nicht oder nur eingeschränkt (Tomographie) auswertbar.

Bewertung

Fazit

Im oberflächennahen Bereich bietet die Refraktionsseismik eine gute Möglichkeit zur Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Refraktionsseismik wird oft im Rahmen der Ermittlung von statischen Korrekturen für die Reflexionsseismik angewendet.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

Überwiegend finden die refraktionsseismischen Messungen auf Profilen statt, so dass eine räumliche Aussage oder die Erfassung von Anisotropien nur durch ein ausreichend dichtes Profilnetz gewährleistet werden kann. Eine flächenhafte Registrierung, wie bei der Reflexionsseismik, hat sich bei der Refraktionsseismik für kommerzielle Anwendungen bisher nicht durchgesetzt.

5.2.1.4. Bohrlochseismische Messmethoden

Grundlegende Literatur

Chen, S. T., Zimmerman, L. J., Tugnait, J. K., (1990): *Subsurface imaging using reversed vertical seismic profiling and crosshole tomographic methods. Geophysics 55, 1478–1487.*

Cosma, C., Heikkinen, P., Keskinen, J., and Enescu, N. (2001): *VSP in crystalline rocks—from down-hole velocity profiling to 3-D fracture mapping. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Nummer 38, 843-850.*

Hardage, B.A. (1992): *Crosswell seismology and reverse VSP, Geophysical Press.*

Hardage, B.A. (1985): *Vertical seismic profiling: principles. Geophysical Press.*

Hinds, R.C., Anderson, N.L., Kuzmiski, R.D. (1996): *VSP Interpretive Processing: Theory and Practice. Open File Publications No. 3, SEG Books, Society of Exploration Geophysicists.*

5.2.1.4.1. Vertikalseismische Profilierung (VSP)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Bei der Vertikalseismischen Profilierung VSP (engl. auch *vertical seismic profiling*) werden elastische Wellen von einer (Zero-Offset VSP) oder mehreren Lokationen (Walk-Away VSP, Multi-Offset VSP) an der Erdoberfläche – wie auch bei der Reflexionsseismik – angeregt. Die angeregten seismischen Wellen breiten sich im Untergrund aus und werden an Grenzflächen an denen sich die akustische Impedanz (Produkt aus Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und Dichte) ändert, reflektiert, gebeugt oder gestreut. Im Unterschied zur Reflexionsseismik sind die Sensoren innerhalb eines vertikalen oder geneigten Bohrlochs angeordnet, wo sie die den Untergrund durchlaufenden Wellen als Zeitreihe registrieren.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Hauptaufgabe der VSP ist die strukturelle Abbildung des Untergrunds im näheren Umfeld der Bohrung und die Verbindung zur von der Erdoberfläche gemessenen Reflexionsseismik (Zeit-Tiefenwandlung, Horizontzuordnung). Eine Korrelation zur Porosität, Wassersättigung oder dem Verfestigungsgrad von Tongestein kann nur über die für einzelne Schichten ermittelte Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, die akustische Impedanz oder den winkelabhängigen Reflexionskoeffizienten (Impedanzkontrast) hergestellt werden. Dazu sind die gleichen Verfahren wie bei der Reflexionsseismik verwendbar (s. Abschnitt 5.2.1.3.1).

Auswertung

Analog zur Auswertung der Reflexionsseismik liefert die VSP-Messung nach entsprechender Datenbearbeitung und unter Berücksichtigung der besonderen Messgeometrie ein strukturelles Abbild der Ebene im Untergrund, die zwischen dem Anregungspunkt und dem Bohrlochpfad aufgespannt ist (Corridor-Stack). Durch eine geeignete Anordnung von mehreren Anregungspunkten unter verschiedenen Offsets und Azimuten um das Bohrloch kann auch eine räumliche Abbildung erzielt werden. Im Rahmen der Bearbeitung werden zudem die Ersteinsatzlaufzeiten für jede Datenspur bestimmt, welche projiziert auf die Vertikale eine genaue Laufzeitkurve bzw. eine exakte Geschwindigkeits-Tiefenfunktion liefern, die z. B. zur korrekten Zeit-Tiefenwandlung der Reflexions-

seismik verwendet wird. Darüber hinaus liefert der Vergleich des Corridor-Stacks mit den Stapelergebnissen der Reflexionsseismik wertvolle Hinweise zur Phasenlage bei der Interpretation von Grenzen der Methode.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der ermittelten seismischen Geschwindigkeiten infolge einer Änderung der Porosität oder Wassersättigung im Untergrund.

Das Auflösungsvermögen hängt von der Wellenlänge und der Bandbreite des seismischen Signals ab. Das vertikale Auflösungsvermögen beträgt etwa ein Viertel der dominanten Wellenlänge. Im Vergleich zur von der Erdoberfläche gemessenen Reflexionsseismik kann aufgrund des verkürzten Laufwegs der Welle und aufgrund des besseren Signal-Noise-Verhältnis bei der Registrierung in der Bohrung eine höhere Auflösung erzielt werden.

Reichweite

Die Reichweite in der Bohrlochseismik wird im Wesentlichen von der Anregungsenergie des seismischen Quellsignals, von der Tiefenlage und den Eigenschaften des Reflektors, von den Dämpfungseigenschaften des Untergrundes oberhalb des Reflektors sowie von den die Messungen begleitenden Störsignalen (z. B. Erschütterungen am Bohrplatz) bestimmt. Im Regelfall können Strukturen bis in einige 1.000 m Tiefe abgebildet werden.

Reproduzierbarkeit

Die VSP-Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Ob ein Reflektor erkennbar ist hängt im Wesentlichen von der Messanordnung, vom Auflösungsvermögen der Messung und von der Datenbearbeitung ab, was unter Berücksichtigung topografischer und anthropogener Randbedingungen (z. B. Rauschen) entsprechend der Aufgabenstellung zu entwerfen ist. Darüber hinaus spielt die Größe des Reflexionskoeffizienten selbst eine Rolle. Außerdem zu gewährleisten, dass eine Korrelation der ermittelten Geschwindigkeiten zu Porositäten oder Wassersättigungen hergestellt werden kann.

Fehleranfälligkeit

Aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten der seismischen Geschwindigkeiten (Druck, Anisotropie, Porosität, Porenfüllung, Temperatur, Frequenz) besteht eine Unsicherheit in der Etablierung einer zuverlässigen Korrelation zwischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und Porosität bzw. Wassersättigung sowie eine Fehleranfälligkeit in der Übertragung von Laborergebnissen oder Bohrlochmessungen auf die Ergebnisse der VSP (Skalierbarkeit, Frequenzeffekte).

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Zur Durchführung von VSP-Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig. Abgesehen davon sind VSP-Messungen zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonden, Messung beim Herausziehen) ist im Wesentlichen abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke, der Sondenfahrgeschwindigkeit und der Anzahl der Anregungspunkte.

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Im Vergleich zur Reflexionsseismik

- weist die Registrierung im Bohrloch durch die Geometrie des Laufwegs eine geringere Dämpfung des Anregungssignals sowie ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis und dadurch eine höhere Auflösung auf,
- bietet die Auswertung der VSP einen direkten Zugang zu den seismischen Geschwindigkeiten und zu Tiefen,
- ermöglicht die VSP eine einfachere Unterscheidung von P- und S-Wellenreflexionen, die Identifikation von multiplen Reflexionen sowie anderen Wellenarten,
- bleiben die Aussagen der VSP räumlich auf einen Bereich um das Bohrloch beschränkt.

Bewertung

Fazit

VSP-Messungen sind eine sehr sinnvolle Ergänzung zur Oberflächenreflexionsseismik, insbesondere, wenn das Bohrloch ohnehin für weitere bohrlochgeophysikalische Messungen genutzt wird.

Verschiedene Auswerteverfahren (Inversionen, seismische Attribute) bieten Möglichkeiten zur Korrelation mit in bohrlochgeophysikalischen Messungen ermittelten Messgrößen.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Zeit-Tiefenwandlung sowie die strukturelle Interpretation der Oberflächenreflexionsseismik werden durch VSP deutlich präzisiert.

Die Einbeziehung von petrophysikalischen und litho-stratigraphischen Parametern aus bohrlochgeophysikalischen Messungen ergeben Parameter für die Inversion und für die Korrelation mit seismischen Attributen.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

Die Verwendung von Glasfaserkabeln anstelle von Geophonen (oder Geophonketten) zur Registrierung seismischer Wellen in Bohrlöchern verringert durch die gleichzeitige Registrierung in allen Tiefenleveln den Zeitaufwand der Messung erheblich (Mateeva et al. 2012). Gleichzeitig wird mit Glasfaserkabeln der Messpunktstand verringert, was die Auflösung erhöhen kann. Als technische Herausforderung erweist sich insbesondere bei temporären Messungen die Fixierung des Glasfaserkabels in der Bohrung.

5.2.1.4.2. Cross-Hole-Messungen (Tomographie)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Bei Cross-Hole-Messungen findet eine Durchschallung des Untergrundes zwischen zwei Bohrungen statt. Dabei werden in dem einen Bohrloch seismische Wellen erzeugt, welche sich im Untergrund zwischen den beiden Bohrungen ausbreiten und zeitgleich von mehreren Sensoren im anderen Bohrloch als Zeitreihe registriert werden. Bei der Messung werden durch Variation der Anregungstiefe und Verschiebung der Empfänger in den Bohrlöchern zahlreiche Anregungspunkt- und Empfangspunktkombinationen für das zu übermessende Tiefenintervall realisiert.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Hauptaufgabe der Cross-Hole-Messungen ist die Ermittlung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in der durch die beiden Bohrungen aufgespannten Ebene. Eine Korrelation zur Porosität, Wassersättigung oder dem Verfestigungsgrad von Tongestein kann über die ermittelte Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten oder die akustische Impedanz hergeleitet werden.

Auswertung

Die Auswertung erfolgt analog wie bei der Refraktionstomographie (s. Abschnitt 5.2.1.3.2) durch Inversion der zwischen den Anregungs- und Empfangspunkten gemessenen Laufzeiten der P- und/oder S-Wellen. Als Ergebnis der Inversion erhält man die zweidimensionale Geschwindigkeitsverteilung für das übermessende Tiefenintervall in der Ebene, die durch die beiden Bohrlöcher aufgespannt wird. Durch eine Inversion der Amplituden des Ersteinsatzes kann auch die Dämpfung in der Ebene des gemessenen Tiefenintervalls zwischen den Bohrungen bestimmt werden.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der ermittelten seismischen Geschwindigkeiten infolge einer Änderung der Porosität oder Wassersättigung im Untergrund.

Das Auflösungsvermögen hängt von der Genauigkeit der Ersteinsatzbestimmung ($< 0,5$ ms) und dem Fehler bei der Modellanpassung ab. Mit der Refraktionsseismik sind bei der Tiefen- und Geschwindigkeitsbestimmung Genauigkeiten von < 5 % erreichbar.

Reichweite

Die Reichweite bei Cross-Hole-Messungen hängt in erster Linie von der Anregungsenergie des seismischen Quellsignals und von den Dämpfungseigenschaften des durchschallten Untergrundes ab. Um das Bohrloch durch die Anregung nicht zu beschädigen, sind relativ kleine Energien zu verwenden. Typische Abstände zwischen den Bohrungen für Cross-Hole-Messungen sollten nicht viel größer als die Bohrtiefen sein. Für Messungen im Kristallingestein sind gute Ergebnisse für Bohrlochabstände von 230 m dokumentiert (Wong et al. 1983). Insofern ist die Methode eher für die Erkundung des Deck- und Nebengebirges geeignet.

Reproduzierbarkeit

Die Cross-Hole-Messungen sind bei unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweismgrenzen

Die Erkennungs- und Nachweismgrenze hängt im Wesentlichen von den Geschwindigkeitsverhältnissen und der Anzahl der sich kreuzenden Strahlen zwischen den Bohrungen ab. Einzelobjekte mit einer Größe, die einem Viertel der dominanten Wellenlängen entspricht, sind bei ausreichender Strahlendichte meist gut erkennbar.

Fehleranfälligkeit

Aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten der seismischen Geschwindigkeiten (Druck, Anisotropie, Porosität, Porenfüllung, Temperatur, Frequenz) besteht eine Unsicherheit in der Etablierung einer zuverlässigen Korrelation zwischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und Porosität bzw. Wassersättigung sowie eine Fehleranfälligkeit in der Übertragung von Laborergebnissen oder Bohrlochmessungen auf reflexionsseismische Messungen von der Erdoberfläche (Skalierbarkeit, Frequenzeffekte).

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Zur Durchführung von Cross-Hole-Messungen sind mindestens zwei Bohrungen in den zu erkundenden Bereich notwendig. Abgesehen davon sind Cross-Hole-Messungen zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Versetzen der Anregungspunkte in der Bohrung, Herablassen der Sonden) ist im Wesentlichen abhängig von der Anzahl der Anregungspunkte, der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrsgeschwindigkeit.

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeugen und Personal sind ggf. zwei Lastenkräne bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Im Vergleich zu refraktionsseismischen Messungen bieten Cross-Hole-Messungen eine genauere Möglichkeit zur Bestimmung von Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in der Ebene, die zwischen zwei Bohrungen aufgespannt wird. Die Aussage bleibt damit räumlich allerdings auf den Bereich zwischen diesen beiden Bohrungen beschränkt.

Aufgrund der eingeschränkten Anregungsenergie (damit das Bohrloch bei der Anregung nicht zerstört wird) liegen die Entfernungen zwischen den beiden Bohrungen meist im Zehnermeter-Bereich. Insofern wird die Methode überwiegend für die Erkundung des oberflächennahen Untergrunds eingesetzt.

Porositäten sind über eine zu erstellende Korrelation mit seismischen Geschwindigkeiten bestimmbar.

Bewertung

Fazit

Cross-Hole-Messungen sind eine sinnvolle Ergänzung zur Oberflächenrefraktionsseismik für die präzisere Bestimmung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten.

Verschiedene Auswerteverfahren bieten Möglichkeiten zur Korrelation mit in bohrlochgeophysikalischen Messungen ermittelten Messgrößen.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Die Einbeziehung von petrophysikalischen und litho-stratigrafischen Parametern aus bohrlochgeophysikalischen Messungen ergeben Parameter für die Inversion und für die Korrelation mit seismischen Attributen.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

5.2.2. Bohrlochgeophysikalische Messmethoden

Für die hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Fragestellungen im Standortauswahlverfahren kommen den geophysikalischen Bohrlochmessmethoden als Bestandteil der übertägigen Erkundungsprogramme im Projekt „übErStand“ besondere Bedeutung zu, da sie in situ Informationen zur Porosität, zum Wassergehalt sowie zum Tongehalt und daraus abgeleitet gegebenenfalls zur Permeabilität des Gesteins liefern können. Zahlreiche im Standortauswahlverfahren zu ermittelnde Messgrößen, wie Gebirgsdurchlässigkeit, Gesteinsdurchlässigkeit, Abstandsgeschwindigkeit, effektive Porosität oder Transmissivität hängen unmittelbar von der Porosität und Permeabilität des Gebirges und Gesteins ab, so dass bohrlochgeophysikalische Messmethoden ein unverzichtbarer Bestandteil der übertägigen Erkundungsprogramme sind. Aber auch für die bohrlochgeophysikalischen Messmethoden gilt, dass die Porosität oder die Permeabilität oder andere im Standortauswahlgesetz aufgeführte Messgrößen nicht direkt aus den Messwerten zu bestimmen sind (vgl. Abschnitt 5.2).

Den bohrlochgeophysikalischen Verfahren ist gemeinsam, dass die Registrierung der Messwerte in Abhängigkeit von der Tiefe in einer Bohrung erfolgt. Je nach Erschließungsziel können die Bohrungen keine, eine teilweise oder eine vollständige Verrohrung aufweisen. Darüber hinaus können die Bohrungen trocken oder mit einer Flüssigkeit (z. B. Grundwasser oder Bohrspülung) gefüllt sein. Beides, Verrohrung und Bohrlochfüllung, kann die Anwendbarkeit einzelner bohrlochgeophysikalischer Verfahren einschränken (Tabelle 5-7). Für Versuche in großen Tiefen muss entsprechendes Equipment bereitgestellt werden, um die Messgeräte in mehreren hundert Metern Teufe handhaben zu können (z. B. Kran), da die Messinstrumente in einer Sonde verbaut sind, die über ein Kabel ins Bohrloch gelassen wird. Beim Heraufziehen oder Herablassen der Sonde werden Messwerte über das Kabel zur übertägigen Registrierung geliefert. Die Messergebnisse werden als tiefenabhängige Messkurve (Log) dargestellt.

Die Tabelle 5-6 gibt, basierend auf den unterschiedlichen Messprinzipien in Verfahrensgruppen eingeteilte, eine Übersicht über die bohrlochgeophysikalischen Messmethoden, die zur Beantwortung hydrologischer und hydrogeologischer Fragestellungen beitragen können. Außerdem werden ausgewählte bohrlochgeophysikalische Messmethoden aufgeführt, die notwendige Informationen oder Korrekturwerte für die Messungen zur Hydrologie oder Hydrogeologie liefern. Bohrlochgeophysikalische Verfahren, deren Beitrag zur Beantwortung hydrologischer und hydrogeologischer Fragestellungen nur in einer strukturgeologischen oder lithologischen Gliederung liegt (z. B. Georadar, Gravimetrie), werden im Rahmen dieses Vorhabens nicht aufgeführt.

Die von den bohrlochgeophysikalischen Verfahren ermittelten Messwerte geben nicht allein die temperatur- und druckabhängigen in situ Eigenschaften des durchteuften Gesteins wider, sondern werden auch durch die von der Bohrung künstlich geschaffene Messumgebung beeinflusst.

Bei der Erfassung der Messwerte spielen

- Bohrlochgeometrie (Kaliber, Beschaffenheit der Bohrlochwand, Kavernen, Kaliberausbrüche oder -verengungen etc.),
- eventuell vorhandene Bohrlochausbauten (Verrohrung, Zementation, Hinterfüllung),
- Eigenschaften des Bohrfluids (Dichte, Viskosität, pH-Wert, elektr. Spülungswiderstand, Temperatur),
- Infiltrationsverhältnisse des Bohrfluids ins umgebende Gestein und
- sowie die Position der Sonde im Bohrloch (Tiefe, Neigung, frei hängend, an die Bohrlochwand angepresst)

eine Rolle, die bei der Bestimmung der petrophysikalischen Messgrößen zu berücksichtigen sind. Dementsprechend sind entsprechende Mess- bzw. Korrekturparameter zu bestimmen, die als Standardkorrekturen im Rahmen der Datenaufbereitung anzubringen sind, um bohrlochkorrigierte Messwerte zu erhalten. Zusätzlich sind konstruktionsbedingte, sondenspezifische Tiefenkorrekturen vorzunehmen, um die Messwerte auf eine Referenztiefe zu beziehen.

Die modernen Sonden sind in der Regel so konzipiert, dass sie Messwerte für verschiedene radiale Eindringtiefen liefern, welche die Eigenschaften des Gesteins, des Filterkuchens und der Spülung zu trennen vermögen. Dieses wird bei den aktiven Verfahren durch die Anordnung von zwei oder mehreren Empfängern in unterschiedlichem Abstand (Spacing) zur Quelle realisiert. Kurze Spacings liefern Messwerte, die dem Einfluss des Bohrlochs und des Bohrlochinhaltes stärker unterliegen als lange Spacings, die je nach Reichweite des Verfahrens eher die Eigenschaft des zu untersuchenden Gesteins messen.

Für die Porositätsbestimmung finden verschiedene bohrlochgeophysikalische Verfahren Anwendung, die physikalisch unabhängig voneinander sind. Da die jeweils gemessenen petrophysikalischen Messgrößen auf unterschiedliche Weise von den Charakteristika des Porenraums (z. B. Größe, Form, Verteilung, innere Oberfläche, Füllung, Permeabilität) abhängen, können sich zum einen die mit unterschiedlichen geophysikalischen Messmethoden ermittelten Porositäten voneinander unterscheiden (s. Abbildung 5-6). Zum anderen kann ein Vergleich, der mit unterschiedlichen Verfahren bestimmten Porositäten, aber auch Hinweise zu weitergehenden Informationen über den Porenraum liefern.

Zu beachten ist allerdings, dass die meisten bohrlochgeophysikalischen Verfahren und ihre klassischen Modelle zur Porositätsbestimmung mit dem Ziel entwickelt wurden, möglichst Gesteine mit hohen Porositäten nachzuweisen bzw. zu charakterisieren, die als Speichergesteine für Gas, Öl oder Wasser in Frage kommen. Die Porositätsbestimmung kann bei hohen Porositäten relativ genau durchgeführt werden, da sich die petrophysikalisch wirksamen Größen des Porenraums erheblich von denen der Gesteinsmatrix unterscheiden und damit einen deutlichen Messeffekt liefern. Mit abnehmender Porosität nähern sich die Messwerte an die der Gesteinsmatrix an, so dass die Unterschiede im Bereich der Messgenauigkeit liegen können und die Nachweisgrenze für Porositätsmessungen erreicht werden kann. Tabelle 5-7 gibt den mittleren zufälligen Fehler der Messgrößen verschiedener bohrlochgeophysikalischer Methoden und der daraus abgeleiteten Messgrößen an.

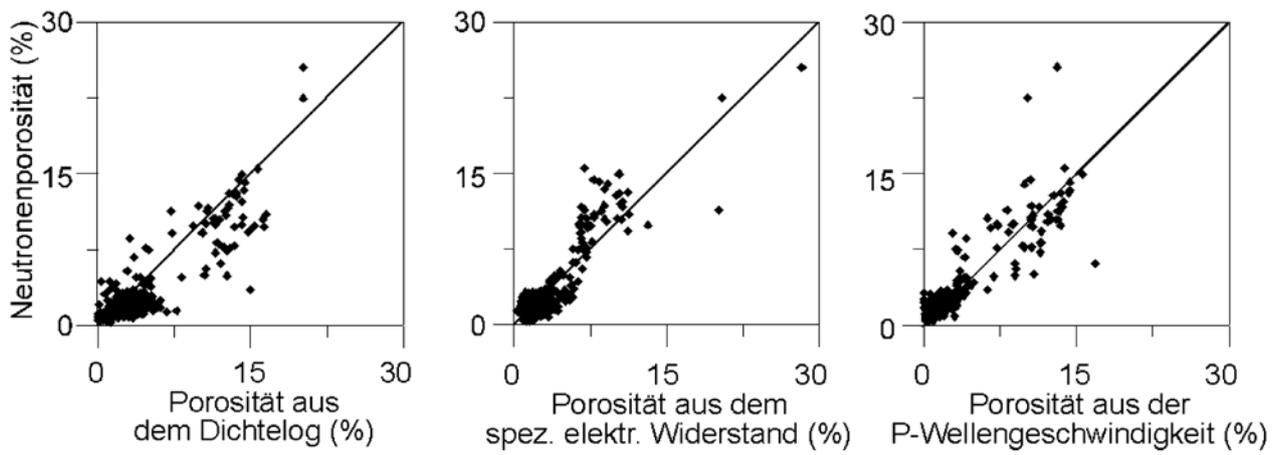


Abbildung 5-6: Vergleich von Porositäten, die in der Bohrung Soutz-sous-Forêts im Granit mit verschiedenen Bohrlochmessmethoden ermittelt wurden (Frese et al. 2000).

Tabelle 5-5: Übersicht typischer geophysikalischer Bohrlochmessmethoden für hydrologische und hydrogeologische Fragestellungen.

Methode	Messprinzip	Log	Abk.	Messwert → daraus abgeleitete Messgrößen
Kernphysikalische Verfahren				
Passive Gamma-Messung	Messung der natürlichen Gamma-Strahlung - Summe - spektral	Gamma Ray Spectral Gamma Ray Log	GR GRS	Zählraten (cps, API-units) → Tongehalt → Gesteinszusammensetzung, Th, U, K-Konzentrationen
Aktive Gamma-Messung	Messung der Gamma-Strahlung mit Hilfe des Compton-Effektes oder Photoeffektes	Gamma-Gamma log Density Log Pe-log	GG	Zählraten (cps, API-units) → Dichte → Porosität
Neutronen Messung	Messung der Neutronen-Strahlung nach Kollision mit einem Atom	Neutron-Neutron Log Pulsed Neutron Log	NN, INN	Zählraten (cps, API-units) → Neutronenporosität
	Messung der Gamma-Strahlung nach einem Neutroneneinfang	Neutron-Gamma-Spektrometrie Neutron-Gamma Log	EBS NG	→ Wassersättigung → Konzentration einzelner Elemente
Kernmagnetische Verfahren				
Nuclear Magnetic Resonance	Messung des zeitlichen Abklingvorgangs der Magnetisierung nach Wechselwirkung mit aufgeprägtem Magnetfeld	NMR	NMR	Relaxationszeiten → Permeabilität, Porosität, → Fluideigenschaften

Tabelle 5-5: (Fortsetzung) Übersicht typischer geophysikalischer Bohrlochmessmethoden für hydrologische und hydrogeologische Fragestellungen.

Methode	Messprinzip	Log	Abk.	Messwert → daraus abgeleitete Messgrößen
Elektrische und Elektromagnetische Verfahren				
Eigenpotenzial	Messung des Eigenpotenzials	Self potenzial log	SP	elektr. Potenzial → Lithologische Gliederung
Widerstand	Messung des elektrischen Gesteinswiderstands	Resistivity measurements	EL, ML	Elektrischer Widerstand → Lithologische Gliederung
		Focused electric log	FEL, DLL, MLL	→ Porosität → Wassersättigung
		Dipmeter		Elektrischer Widerstand → Schichtneigungen
	Übergangswiderstand	Bohrlochwand-Scanner	FMI	Elektrischer Widerstand → Klüfte, Risse
Induktive Messung	Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Suszeptibilität	Induction log	IL	Elektrische Leitfähigkeit → Lithologische Gliederung → Porosität → Wassersättigung
		Susceptibility log	SUSZ	magnetische Suszeptibilität → Lithologische Gliederung
Dielektrische Wellenmessung	Messung der Phasenverschiebung und Dämpfung elektromagnetischer Wellen	Electromagnetic propagation log	EPT	Permittivität, elektrische Leitfähigkeit → Sättigungsverhältnisse, Porosität

Tabelle 5-5: (Fortsetzung) Übersicht typischer geophysikalischer Bohrlochmessmethoden für hydrologische und hydrogeologische Fragestellungen.

Methode	Messprinzip	Log	Abk.	Messwert → daraus abgeleitete Messgrößen
Akustische Verfahren				
Transmission, Refraktion	Messung von Ultraschallwellen, die an der Bohrlochwand geführt werden	Acoustic log	AL	Laufzeit ($\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$) → mechanische Gesteinseigenschaften → Porosität, Klüftigkeit → Fluidnachweis → Permeabilität aus Stoneley-Welle
	Messung der Dämpfung von Ultraschallwellen in zementierten Ringraum	Cement bond log	CBL	Dämpfung ($\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$) → Güte der Zementierung
Reflektion	Messung von Ultraschallwellen, die an der Bohrlochwand oder an der Verrohrung reflektiert werden	Borehole Televiwer	BHTV	Gesamter Wellenzug → Klüfte, Risse
Optische Verfahren				
	Videoaufnahmen der Bohrlochwand	Borehole TV	OPT	→ Klüfte

Tabelle 5-5: (Fortsetzung) Übersicht typischer geophysikalischer Bohrlochmessmethoden für hydrologische und hydrogeologische Fragestellungen.

Methode	Messprinzip	Log	Abk.	Messwert → daraus abgeleitete Messgrößen
Verfahren zur Bestimmung geometrischer Größen des Bohrlochs				
	Messung des Bohrloch-durchmessers und der Abweichung von der Vertikalen	Caliper log Deviation log	CAL DEV	Kaliber Neigung, Azimuth
Verfahren zur Bestimmung von Eigenschaften der Bohrspülung				
	Messung von: – Temperatur – Elektrischer Leitfähigkeit – Hydrogeochemischen Messgrößen	Temperature log Salinity log Drilling fluid log	TEMP SAL MIL	Temperatur elektrische Leitfähigkeit pH-Wert, Sauerstoffkonzentration
	Messung des vertikalen Fluss	Impeller flowmeter	FLOW	Umdrehungen pro Zeiteinheit → Fließgeschwindigkeit
	Messung der Wassertrübung	Photometric turbidity measurement	PMT	→ Grundwasserfließgeschwindigkeit

Tabelle 5-6: Anwendungsmöglichkeiten ausgewählter geophysikalischer Messmethoden in Bezug auf die Verrohrung und Bohrlochfüllung (+: Messung ohne Einschränkungen möglich, *: Messung mit Einschränkungen möglich, -: Messung nicht möglich).

Sonde, Tool (Abkürzung)	Messwert	Mit Flüssigkeit gefüllte Bohrung			Trockene Bohrung
		Verrohrung			ohne Verrohrung
		ohne	Stahl	PVC	
GR	Nat. Gamma-Strahlung	+	+	+	+
GRS	Spektrale natürliche Gamma-Strahlung	+	+	+	+
GG	Dichte	+	*	*	+
NN, INN	Neutronen-Porosität	+	*	*	+
SP	Eigenpotenzial	+	-	-	-
EL, ML	Elektr. Widerstand	+	-	-	-
FEL, DLL, MLL	Elektr. Widerstand (fokussierende Methode)	+	-	-	-
DIP	Streichrichtung, Neigung	+	-	-	-
IL	Elektr. Leitfähigkeit	+	-	+	+
AL	Schallgeschwindigkeit	+	-	-	-
CBL	Schallgeschwindigkeit	-	+	-	-
BHTV	Schallgeschwindigkeit	+	-	-	-
OPT	Bild der Bohrlochwand	*	*	*	+
TEMP	Temperatur der Bohrlochspülung	+	+	+	-
SAL	Elektr. Widerstand der Bohrlochspülung	+	+	+	-
MIL	pH, O ₂ -Konzentration der Bohrlochspülung	+	+	+	-
FLOW	Vertikale Fließrate des Fluids im Bohrloch	+	*	*	-
CAL	Bohrlochdurchmesser	+	-	-	+
DEV	Bohrlochneigung	+	+	+	+
DIP	Streichrichtung, Neigung	+	-	-	-

Tabelle 5-7: Mittlerer zufälliger Fehler ausgewählter bohrlochgeophysikalischer Messwerte und der daraus abgeleiteten Messgrößen (nach Fricke und Schön (1999)).

Messmethode	Messwert	Abgeleitete Messgröße	Mittlerer Fehler
Teufe	Teufe [m]	- Schichtmächtigkeit	+/- 0,1 % (relativ) +/- 0,1 – 0,5 m (je nach Messmethode)
Gamma-Ray	GR [API un.]	- Tongehalt	+/- 5 API-un. +/- 2,5 % (absolut)
Dichtelog	Dichte [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	- Porosität	+/-0,015 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ +/- 1,5 % (absolut)
Neutron-Neutron	Scheinbare Porosität [%]	- Porosität	+/- 1,5 % (absolut) +/- 2 % (absolut)
Widerstandsmessungen	Scheinbarer spezifischer Widerstand [Ωm]	Wahrer spezifischer Widerstand R_t [Ωm] Porosität [%] Wassersättigung [-]	+/- 15 % (relativ) +/- 15 % (relativ) +/- 15 % (relativ)
Spülungswiderstandsmessungen	Elektrische Leitfähigkeit [$\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$]	Spezifischer Widerstand [Ωm] Salinität [$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	+/- 5 % (relativ) +/- 10 % (relativ)
Akustiklog	Differenzlaufzeit [$\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$]	- Porosität [%]	+/- 3 $\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ +/- 2 % (absolut)

5.2.2.1. Kernphysikalische Messmethoden

5.2.2.1.1. Gamma Messmethoden

Kurzbeschreibung der Methode

Messgröße und Anwendungsgebiet

Die Messung erfolgt mit einer Bohrlochmesssonde vorzugsweise in einem offenen Bohrloch mit oder ohne Spülung. Die vom Gestein als natürliche Radioaktivität ausgesandte Gammastrahlung wird in der Sonde von einem Detektor (Szintillationszähler) aufgenommen und in elektrische Impulse gewandelt, die oberhalb einer Diskriminatorschwelle gezählt werden (s. Abbildung 5-7).

Messprinzip und technische Ausführung

Gamma Log (GR): Im einfachen Fall des Gamma Logs werden sämtliche pro Zeiteinheit oberhalb einer Diskriminatorschwelle eintreffenden Impulse registriert und als Messkurve (Einheit in cps (counts per second)) oder in API-Einheiten (American Petroleum Institute) dargestellt. Das Gamma Log wird genutzt

- als Tiefenreferenz (aufgrund des hohen vertikalen Auflösungsvermögens),
- zur lithologischen Gliederung von Sedimenten (Ton-Schluff-Sand),
- zur Bestimmung des Tongehalts.

Spektrales Gamma Log (GRS): Beim spektralen Gamma Log werden die eintreffenden Gammaquanten nach Energiebereichen getrennt gezählt. Der alle Quanten enthaltene Energiebereich wird in viele gleichmäßige Intervalle (z. B. 256 Kanäle) unterteilt. Dargestellt wird für jeden Tiefenpunkt das Energiespektrum (Zählrate in Abhängigkeit vom Energiebereich). Durch Vergleich mit Spektren bekannter radioaktiver Zerfälle ist sowohl eine qualitative als auch quantitative Analyse der Gesteinszusammensetzung möglich. Dies umfasst differenzierte Betrachtungen zur Lithologie bis hin zum Nachweis einzelner Elemente.

Selektives Gamma Log: Beim Selektiven Gamma Log werden Gammaquanten lediglich in wenigen, speziellen Energiebereichen getrennt gezählt. Eine typische Anwendung ist die Einteilung in die drei Energiebereiche, welche markant sind für den Zerfall der im Gesteinsverband enthaltenen Radionuklide der Uran-Zerfallsreihe, der Thorium-Zerfallsreihe und des Kaliumisotops K-40. Mit geeichten Sonden können die Konzentrationen von Uran, Thorium und Kalium bestimmt werden. Aus den Verhältnissen der Radionuklid-Gehalte kann bei Tongesteinen auf die Tonmineralzusammensetzung geschlossen werden.

Auswertung

Für alle Gammaverfahren sind bei der Auswertung die Einflüsse des Kalibers, der Spülung und ggf. der Verrohrung und Zementation zu korrigieren (Absorptionskorrektur). Die Korrekturgrößen sind sondenspezifisch und bedürfen weiterer zusätzlicher Informationen (Spüldichte, Kaliber, Dicke und Dichte eventueller Verrohrungen und hinterfüllter Zementation).

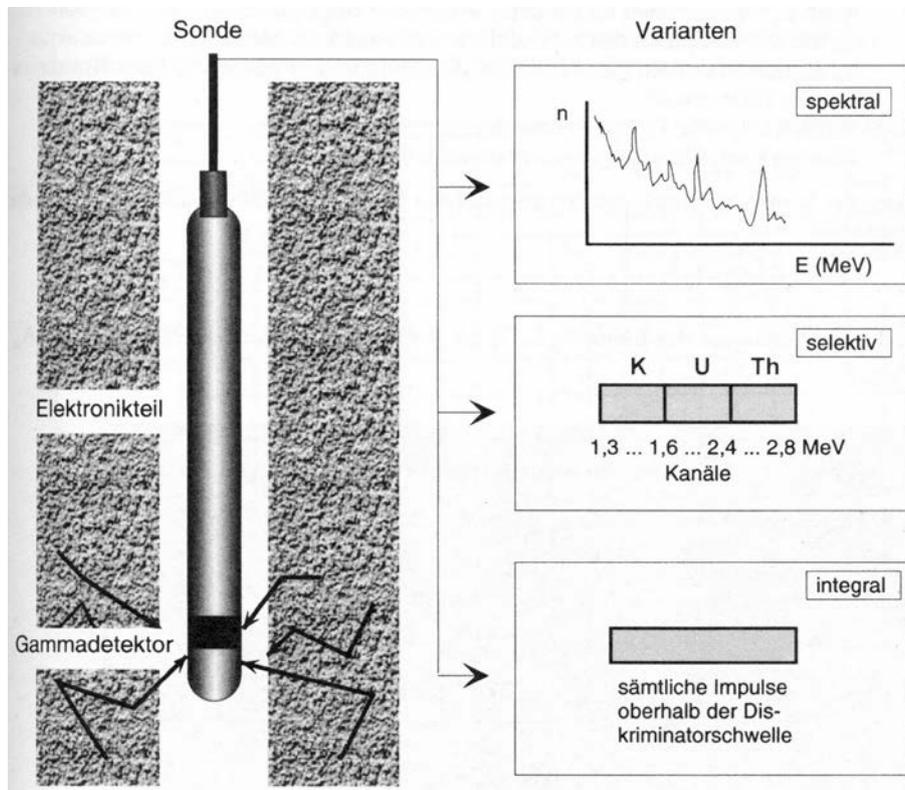


Abbildung 5-7: Gamma-Messungen, links schematische Darstellung des Sondaufbaus; rechts Varianten der Messverfahren (aus Fricke und Schön 1999).

Grenzen der Methode

Sensitivität

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der Anzahl der vom Gestein emittierten Gammaquanten infolge von natürlichen radioaktiven Zerfallsprozessen.

Ortsauflösungsvermögen

Das vertikale Auflösungsvermögen hängt im Wesentlichen von der Sondenfahrgeschwindigkeit und der Log-Abtastrate ab. Es liegt bei Standardmessungen mit Sondenfahrgeschwindigkeiten von 3 bis 5 m·min⁻¹ bei 15 bis 30 cm und lässt sich durch die Stapelung von Mehrfachmessungen und langsamen Sondenfahrgeschwindigkeiten (1 bis 2 m·min⁻¹) auf etwa 10 cm reduzieren (Fricke & Schön 1999).

Reichweite

Die Reichweite hängt vor allem von der Dichte des Gesteins sowie den Absorptionseigenschaften des zwischen Gestein und Detektor befindlichen Materials ab und liegt radial vom Bohrloch ausgehend zwischen einem Dezimeter bis zu etwa einem Meter.

Reproduzierbarkeit

Die Gamma-Logs sind bei unveränderten Messbedingungen im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Erkennungsgrenze sinkt bei zunehmenden Bohrlochdurchmessern, wenn keine Ankopplung zur Bohrlochwand erfolgen kann und bei massiver Abschirmung durch etwaige Verrohrungen insbesondere mit Zementation.

Fehleranfälligkeit

Als absoluter mittlerer Fehler werden für die Gamma Messung +/- 5 API und für die aus dem Gamma Log abgeleiteten Tongehalte +/- 2,5 % abgeschätzt (Fricke & Schön 1999).

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Messmethode

Zur Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig.

Die Gamma Messungen sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der zeitliche Aufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Heraufziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrgeschwindigkeit. Nach Herstellerangaben können moderne Messsysteme je nach Ausführung mit maximalen Sondenfahrgeschwindigkeiten zwischen rund 550 m·h⁻¹ und 1.100 m·h⁻¹ betrieben werden (Schlumberger 2015).

Hinsichtlich des technischen Aufwands ist neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Die Gamma-Verfahren haben eine hohe vertikale Auflösung.

Das Gamma Log ist eine bohrlochgeophysikalische Standardmessung zur Erstellung geologischer Profile und zur lithologischen Ansprache. Das Gamma Log ermöglicht damit auch tiefengenaue Vergleiche mit Logs anderer Messverfahren.

Die Messung kann mit oder ohne Spülung sowohl im offenen als auch im verrohrten Bohrloch erfolgen.

Bewertung

Fazit

Das Gamma Log ist als weit verbreitetes Messverfahren zur Tiefenreferenz, zur Festlegung der Lithologie und zur Bestimmung des Tongehalts, welcher in einigen Modellen zur Porositätsbestimmungen eingeht, unerlässlich.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

In bohrlochgeophysikalischen (Kombinations-)Sonden ist häufig ein Gamma-Messsystem integriert, da das Gamma Log durch sein detailliertes Kurvenbild und die hohe vertikale Auflösung in besonderem Maße geeignet ist, eine genaue Tiefenzuordnung oder -kontrolle der Logs unterschiedlicher Messfahrten vorzunehmen.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Einfluss des Tongehalts auf die Porositätsbestimmung ist insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

5.2.2.1.2. Gamma-Gamma-Dichte Log

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Die Messung erfolgt mit einer Bohrlochmesssonde vorzugsweise in einem offenen Bohrloch mit oder ohne Spülung. Die von einer radioaktiven Quelle ausgesandte Gammastrahlung wird nach Wechselwirkung mit dem Gestein (Compton-Effekt, Photo-Effekt) mit mindestens zwei Gammadektoren gemessen.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Mit dem Gamma-Gamma-Dichte Log wird die Gesteinsdichte (ρ_b in $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) des die Bohrung unmittelbar umgebenden Gesteins bestimmt und für Sedimente kann über die Dichte-Mittelgleichung die absolute Porosität ermittelt werden.

Auswertung

Die registrierten Impulsraten (in cps oder API Einheiten) werden mithilfe sondenspezifischer Kalibrierkurven in „Rohdichten“ umgerechnet (Abbildung 5-8). Typische Gamma-Gamma-Dichte-Sonden registrieren zugleich die Bohrlochgeometrie (Kaliber CAL) und die natürliche Gammastrahlung (GR) mit. Zusammen mit den Differenzen zwischen den „Rohdichten“ des kurzen und langen Spacings lassen sich bei Kenntnis der Dichte des Bohrlochfluids daraus die Einflüsse von Bohrlochgeometrie, Spülung und Filterkuchen korrigieren. Weicht das Verhältnis der Kernladungszahl Z zur Atommasse A der am Gesteinsaufbau beteiligten Elemente wesentlich von 0,5 ab (z. B. bei Haliten, Gips), dann ist zusätzlich eine sog. Z/A -Korrektur anzubringen. Unter Berücksichtigung dieser Korrekturen lässt sich dann aus den „Rohdichten“ die Gesteinsdichte ρ_b berechnen.

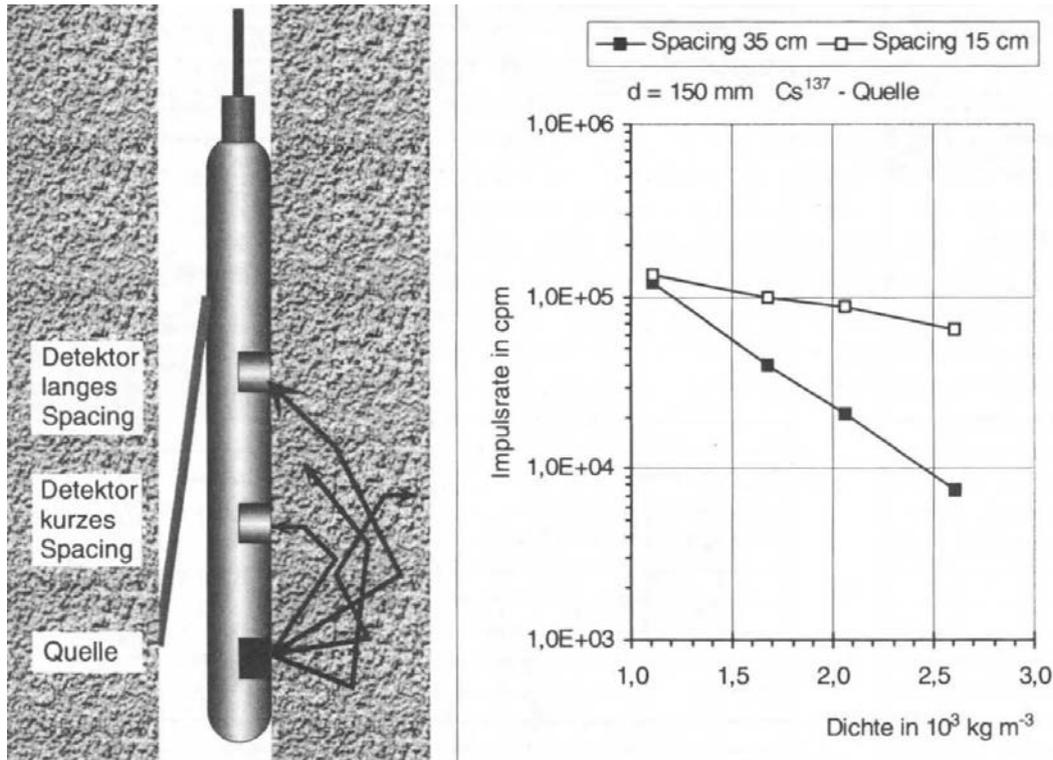


Abbildung 5-8: Gamma-Gamma-Dichte Log, links schematische Darstellung des Sondaufbaus; rechts Kalibrierkurve für zwei Sondenspacings (Fricke und Schön 1999).

Die Gesamtporosität für Sedimente lässt sich aus den gemessenen Gesteinsdichten ρ mit Hilfe der Dichte-Mittelgleichung ableiten, wobei der Tongehalt V_{Sh} aus der Gamma-Messung ermittelt wird:

$$n = \frac{\rho_{ma} - \rho}{\rho_{ma} - \rho_w} \quad \text{für tonfreies Gestein} \quad (5-23)$$

$$n_{korr} = \frac{\rho_{ma} - \rho}{\rho_{ma} - \rho_w} - V_{Sh} \frac{\rho_{ma} - \rho_{cl}}{\rho_{ma} - \rho_w} \quad \text{für toniges Gestein} \quad (5-24)$$

mit

n	Gesamtporosität	[1]
n_{korr}	tonkorrigierte Porosität	[1]
ρ	gemessene Dichte	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{ma}	Dichte der tonfreien Gesteinsmatrix	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_w	Dichte des Schichtwassers	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{cl}	Dichte des Tones	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
V_{Sh}	Tongehalt	[1]

Grenzen der Methode

Sensitivität

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der Anzahl der zurück gestreuten Gammaquanten infolge einer Dichteänderung im Untergrund.

Ortsauflösungsvermögen und Reichweite

Das vertikale Auflösungsvermögen hängt im Wesentlichen vom verwendeten Strahler, der Dichteverteilung, der Messkonfiguration und der Sondenfahrgeschwindigkeit ab und liegt bei 10 bis 60 cm (Fricke & Schön 1999)

Die Reichweite hängt im Wesentlichen vom verwendeten Strahler, der Dichteverteilung und der Messkonfiguration ab und liegt radial vom Bohrloch ausgehend zwischen einem Dezimeter bis zu etwa einem Meter.

Reproduzierbarkeit

Die Gamma-Gamma-Dichte Logs sind bei unveränderten Messbedingungen (z. B. keine Änderung des Bohrlochfluids) im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Erkennungsgrenze sinkt bei zunehmenden Bohrlochdurchmessern, wenn keine Ankopplung zur Bohrlochwand erfolgen kann und bei massiver Abschirmung durch etwaige Verrohrungen insbesondere mit Zementation. Aufgrund der mit einer absoluten Genauigkeit von $\pm 0,015 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ bestimmbaren Dichte liegt die Nachweisgrenze bei den aus Gamma-Gamma-Logs über die Dichten abgeleiteten Porositäten bei 1,5 %. Die tatsächlichen Porositäten im Kristallingestein oder im Steinsalz liegen damit ggf. unterhalb der Nachweisgrenze.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Messmethode

Zur Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig.

Die Gamma-Gamma-Messungen sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Herausziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrgeschwindigkeit. Nach Herstellerangaben können moderne Messsysteme je nach Ausführung mit maximalen Sondenfahrgeschwindigkeiten zwischen rund $550 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ und $1.100 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ betrieben werden, wobei für hohe Auflösungen Fahrgeschwindigkeiten zwischen $275 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ und $550 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ empfohlen werden (Schlumberger 2015).

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Von den klassischen Bohrlochmessmethoden zur Porositätsbestimmung ist die Gamma-Gamma-Dichte Messung zur Bestimmung der Gesteinsdichte am genauesten (mittlerer Fehler: $\pm 1,5 \%$).

Die Messung kann mit oder ohne Spülung sowohl im offenen als auch im verrohrten Bohrloch erfolgen.

Bewertung

Fazit

Der Gamma-Gamma-Dichte Log ist als klassische Bohrlochmessmethode zur Dichte- und Porositätsbestimmung unerlässlich.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Für einen direkten Vergleich von unabhängig bestimmten Porositäten sind im Rahmen einer gemeinsamen Interpretation Neutron-Neutron-Messungen, Akustik-Log-Messungen oder Widerstandsmessungen mit einzubeziehen.

Ferner können punktuell an Kernen unter Laborbedingungen gewonnene Dichten oder Porositäten die Qualität der interpretierten Logergebnisse bestätigen.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen der durch den Gamma-Gamma Log ermittelten Porosität und der Permeabilität ist insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

5.2.2.1.3. Neutronverfahren: Neutron-Neutron Log, Neutron-Gamma Log

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Bei den Neutron-Bohrlochverfahren wird eine Neutronenquelle in die Bohrung eingebracht, die schnelle Neutronen (mit Energien > 100 keV) erzeugt. Diese treffen auf die Atomkerne des porösen, fluidgefüllten Gesteins, wo verschiedene Wechselwirkungen wie Brems- und Einfangreaktionen stattfinden können. Die Wechselwirkungen führen im Ergebnis

- zu einer rückgestreuten Neutronenstrahlung mit verringerter Intensität und Energie, die von Neutronendetektoren (Heliumzählrohre)
 - integral, d. h. in einem Energie- und Zeitfenster registriert werden: Neutron-Neutron-Messung;
 - selektiv, d. h. für bestimmte Energiefenster (z. B. thermische und epithermische Neutronen) registriert werden: Neutron-Neutron selektiv;
- oder zu einer rückgestreuten Gammastrahlung, die mit Gammadetektoren (Szintillationszähler)
 - integral, d. h. in einem Energie- und Zeitfenster gemessen werden: Neutron-Gamma Messung;
 - spektral, d. h. in vielen Energiefenstern gemessen werden: Neutron-Gamma Spektrometrie;
 - im zeitlichen Verlauf (Abklingkurven) registriert werden, wobei kurze, Neutronenpulse als Quelle verwendet werden: Gepulste Neutron-Gamma-Messung (Thermal Decay Time Messung)

Messgröße und Anwendungsgebiet

Mit dem Neutron-Neutron Log wird die Neutronporosität n_{NN} des die Bohrung unmittelbar umgebenden Gesteins bestimmt.

Die Messung kann mit einer Bohrlochmesssonde sowohl in einem offenen als auch verrohrtem Bohrloch mit oder ohne Spülung erfolgen. Die von einer Neutronenquelle ausgesandte Neutronen-

strahlung wird nach Wechselwirkung mit dem Gestein (Brems- und Einfangreaktionen von thermischen und epithermischen Neutronen) mit mindestens zwei Neutronendetektoren (kurzes und langes Spacing) gemessen.

Auswertung

Die registrierten Impulsraten (I_{NN} in cps oder API) werden mithilfe einer sondenspezifischen Kalibrierkurve in die sog. Neutronporositäten n_{NN} umgerechnet, die aufgrund der typischerweise an mit Süßwasser gesättigten Kalksteinen mit bekannten Porositäten durchgeführten Kalibrierung der Sonde auch „Kalksteinporositäten“ genannt werden (Abbildung 5-9).

Für die Kalibrierbeziehung gilt:

$$I_{NN} = -a \cdot \lg n_{NN} + b \quad (5-25)$$

wobei die Faktoren a und b empirisch bei der Kalibrierung ermittelt werden. Für das Kalibriermodell (Kalksteinmatrix/Wasser) gilt dann:

$$n_{NN} = n$$

Durch die Einführung des sog. Wasserstoffindex HI (*hydrogen index*), welcher per Definition für Süßwasser = 1 und für eine Kalksteinmatrix (Calcit) = 0 gesetzt wird, lässt sich unter der Annahme vollständiger Sättigung der Porenfüllung für die Neutronporosität ein Zusammenhang zur Gesamtporosität für beliebige Gesteinsmatrizen und Poreninhalte definieren:

$$n_{NN} = (1 - n_g) \cdot HI_{Matrix} + n \cdot HI_{Poreinhalt} \quad (5-26)$$

mit

$$\begin{array}{lll} HI_{Matrix} & \text{Wasserstoffindex der Gesteinsmatrix} & [1] \\ HI_{Poreinhalt} & \text{Wasserstoffindex des Poreinhalts} & [1] \end{array}$$

Der Wasserstoffindex der Gesteinsmatrix ist eine gesteinscharakterisierende Konstante mit typischen Werten zwischen -0,02 (Quarz) und 0,1 bis 0,4 (Tongesteine), dessen Anwendung auch Lithologiekorrektur genannt wird. Setzt sich die Gesteinsmatrix aus mehreren Komponenten zusammen, dann ergibt sich der Wasserstoffindex der Gesteinsmatrix HI_{Matrix} aus den Wasserstoffindizes H_i und den Volumenanteilen V_i der einzelnen Bestandteile:

$$HI_{Matrix} = \sum_{i=1}^n H_i \cdot V_i \quad (5-27)$$

mit

$$\begin{array}{lll} H_i & \text{Wasserstoffindex} & [1] \\ V_i & \text{Volumenanteile der einzelnen Bestandteile} & [1] \end{array}$$

Analoges gilt für den Wasserstoffindex des Poreinhaltes $HI_{Poreinhalt}$, der sich bei mit Wasser teilgesättigten Gesteinen entsprechend aus Wasser- und Gasanteilen zusammensetzt. Durch den Vergleich mit durch andere Verfahren bestimmten Porositäten kann damit auf Sättigungsverhältnisse geschlossen werden.

Typische Neutron-Messungen registrieren zugleich die Bohrlochgeometrie (Kaliber CAL) und die natürliche Gammastrahlung (GR) mit. Aus den Differenzen zwischen den „Neutronporositäten“ des kurzen und langen Spacings lassen die Einflüsse von Bohrlochgeometrie, Spülung und Filterkuchen korrigieren. Bei der Auswertung der rückgestreuten Gammastrahlung ist die „Hintergrundstrahlung“ der natürlichen Gammastrahlung zu korrigieren (Backgroundkorrektur).

Teilweise wird zudem die rückgestreute Gammastrahlung registriert, die ebenfalls bei den Wechselwirkungsprozessen entstehen kann und analog zum Neutron-Neutron Log kalibriert und dargestellt wird (Neutron-Gamma Log mit Impulsraten I_{NG} und Neutronporosität n_{NN}).

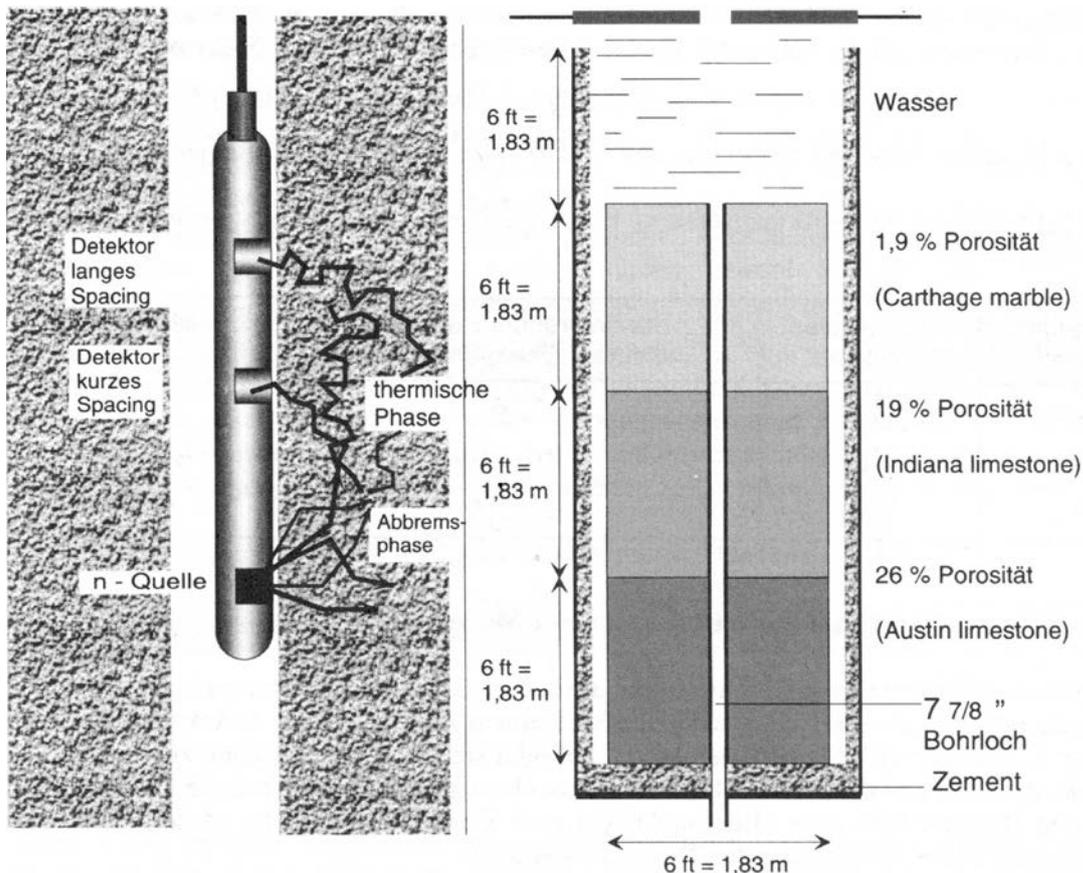


Abbildung 5-9: Neutron-Neutron Log, links schematische Darstellung des Sondaufbaus; rechts Kalibriereinrichtung für Neutronsonden mit tonfreien Kalksteinen bekannter Porositäten (API-Calibration Pit, Houston) aus Fricke & Schön (1999).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der Anzahl der zurück gestreuten Neutronen bzw. Gammaquanten infolge von Brems- und Einfangreaktionen vorwiegend aufgrund des Vorhandenseins von Wasserstoffatomen im Untergrund.

Das vertikale Auflösungsvermögen wird von Serra (1984) mit Werten zwischen 25 und 65 cm angegeben und hängt u. a. von der verwendeten Neutronenquelle, der Porosität, der Messkonfiguration und der Sondenfahrgewindigkeit ab.

Reichweite

Die Reichweite (in der 90 % des Ausgangsmesswerts registriert wird) hängt im Wesentlichen vom verwendeten Strahler, der Porosität bzw. dem Wassergehalt der Formation sowie der Messkonfiguration ab. Sie liegt für Gesteine mit einer Porosität von 30 % bei etwa 16,5 bis 18 cm und erhöht sich für nichtporöse Gesteine auf etwa 60 cm (Lehnert & Rothe, 1962, Rider, 1986)

Reproduzierbarkeit

Die Neutronverfahren sind bei unveränderten Messbedingungen (z. B. keine Änderung des Bohrlochfluids) im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Erkennungsgrenze sinkt bei zunehmenden Bohrlochdurchmessern, wenn keine Ankopplung zur Bohrlochwand erfolgen kann.

Fehleranfälligkeit

Fehleranfälligkeiten bestehen vor allem durch eine unzureichende Kenntnis der Korrekturgrößen (Kaliber- und Spülungskorrekturen, Lithologiekorrektur, Volumenanteile von Einzelkomponenten usw.), insbesondere bei mehrkomponentigen Gesteinsmatrizen (Tongestein und Kristallingestein) und der Sättigungsverhältnisse.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Messmethode

Zur Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig.

Die Neutron-Messungen sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Herausziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrsgeschwindigkeit. Nach Herstellerangaben können moderne Messsysteme je nach Ausführung mit maximalen Sondenfahrsgeschwindigkeiten zwischen rund $550 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ und $1.100 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ betrieben werden, wobei für hohe Auflösungen Fahrsgeschwindigkeiten von $275 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ empfohlen werden (Schlumberger 2015).

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Die gemessenen (scheinbaren) Porositäten lassen sich bei Neutron-Neutron Messungen relativ genau bestimmen (mittlerer Fehler: $\pm 1,5 \%$), für die absolute Porosität wird ein etwas größerer mittlerer Fehler von $\pm 2 \%$ angegeben (Fricke und Schön 1999).

Die Messung kann sowohl im offenen als auch im verrohrten Bohrloch mit oder ohne Spülung erfolgen.

Bewertung

Fazit

Das Neutron-Neutron Log und/oder das Neutron-Gamma Log sind als klassische Bohrlochmessmethoden zur Porositätsbestimmung und im Rahmen der Komplexinterpretation als Verfahren zur Bestimmung der Wassersättigung unerlässlich.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Für einen direkten Vergleich von unabhängig bestimmten Porositäten sind im Rahmen einer Komplexinterpretation Gamma-Gamma-Dichte-Messungen, Akustik-Log-Messungen und Widerstandsmessungen mit einzubeziehen. Zur genaueren Bestimmung der Korrekturgrößen sind ggf. noch weitere Messungen erforderlich, die eine volumenanteilige Zusammensetzung der Gesteinsmatrix liefern wie z. B. Gamma Log/Spektrales Gamma Log.

Ferner sollten punktuell an Kernen unter Laborbedingungen gewonnene Porositäten die Qualität der interpretierten Logergebnisse bestätigen.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen der durch Neutronverfahren ermittelten Porosität und der Permeabilität ist insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

5.2.2.1.4. Kernmagnetische Resonanzmessungen (Nuclear Magnetic Resonance NMR)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Kernmagnetische Resonanzmessungen NMR beruhen auf einer Wechselwirkung der magnetischen Momente der Atomkerne mit einem äußeren Magnetfeld. Beim Anlegen eines äußeren Magnetfelds an ein poröses, fluid gefülltes Gestein erfolgt eine Magnetisierung durch die Ausrichtung der magnetischen Momente der Atome in Feldrichtung. Dabei tragen insbesondere die Wasserstoffkerne (Protonen) im Porenraum des Gesteins zur Magnetisierung bei, da sie ein starkes magnetisches Moment besitzen. Nach dem Abschalten des äußeren Magnetfeldes wird der zeitliche Abklingvorgang (Relaxation) der Magnetisierung in Feldrichtung (transversale Relaxationszeit T_2) gemessen (s. Abbildung 5-10). Während Formationswässer (ohne Gestein) Relaxationszeiten zwischen 3 und 5 Sekunden besitzen, verringern sich die Relaxationszeiten im fluid gefüllten, porösen Gestein auf deutlich kleinere Werte (< 300 ms). Die Relaxationszeit nimmt mit zunehmender innerer Oberfläche des Porenraums ab und kann Werte von kleiner als 1 ms annehmen.

Die Messung erfolgt in einem offenen Bohrloch mit oder ohne Spülung. Bei der technischen Ausführung wird zunächst ein statisches magnetisches Feld B_0 zur Polarisierung der magnetischen Momente verwendet und der Polarisationsverlauf zeitlich registriert (Relaxationszeit T_1). Anschließend werden zusätzliche magnetische Wechselfelder B_1 im Radiofrequenzbereich (einige 100 kHz bis wenige MHz) pulsartig angewandt. Durch eine Serie von Pulsen mit wahlweise unterschiedlichen Frequenzen werden vorzugsweise die Protonen zu einer Serie messbarer abfallender Spin-Echos angeregt (Spin-Echo-Messung, Puls-Echo-NMR-Technik).

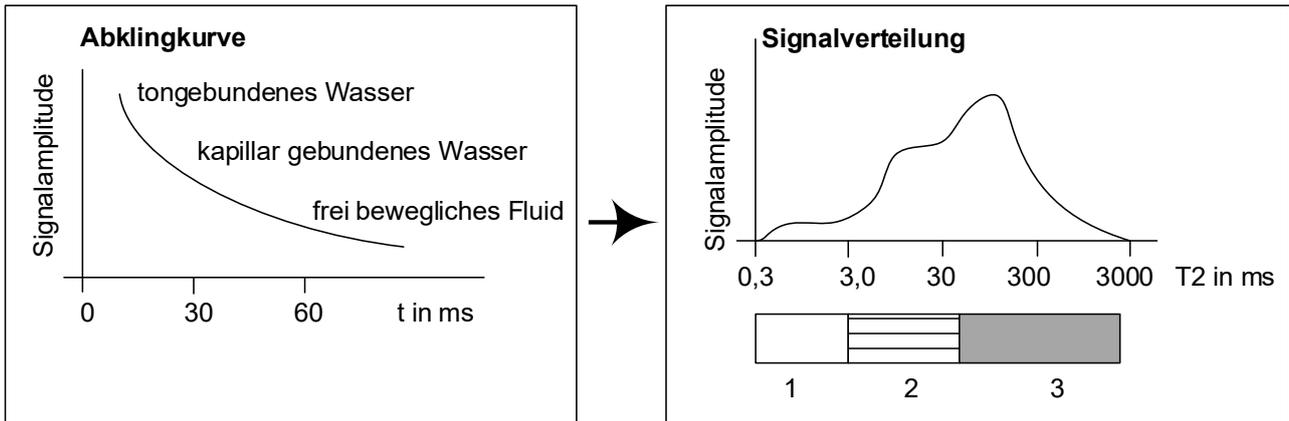


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der NMR-Messungen. Links: Relaxationskurve mit vorrangig wirksamen Wasseranteilen; rechts: Ergebnis der Inversion in Form einer T₂-Verteilung mit Zuordnung zu Wasseranteilen (1 - tongebundenes Wasser, 2 – kapillar gebundenes Wasser, 3 – frei bewegliches Wasser bzw. Fluide) (Fricke und Schön 1999).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Aus dem Signalspektrum der Abklingzeiten (vorzugsweise wird T₂ analysiert) lassen sich verschiedene Kennwerte zur Korngrößenverteilung und zur Art der Bindung des Formationswassers an die Oberfläche des Gesteins gewinnen.

Auswertung

- Porosität:

Durch eine Inversionsrechnung kann die Abklingkurve in eine Verteilung der Relaxationszeit T₂ umgerechnet werden (s. Abbildung 5-10). Mit passender Kalibrierung ergibt die Fläche unterhalb der T₂-Verteilung die Porosität (s. Abbildung 5-11). Bei vollständiger Wassersättigung korreliert diese Verteilung auch mit der Verteilung der Porengrößen (Coates et al. 1999). Dabei sind keine zusätzlichen Annahmen zur Gesteinsmatrix erforderlich.

- Wasseranteil nach Bindung:

Die Bestimmung der Wasseranteile für tongebundenes, kapillar gebundenes und frei bewegliches Wasser (s. Abbildung 5-10).

- Porengröße:

Rückschlüsse auf die Porengröße und ihre Verteilung (je kleiner T₂, desto kleiner die Porengröße).

- Permeabilität:

Die Bestimmung der Permeabilität folgt meist dem „free-fluid-model“ oder dem „mean-T₂ model“ (Coates, Xing & Prammer 1999). Im „free-fluid-model“ lässt sich die Permeabilität aus dem vom mobilen Wasser eingenommenen Volumenanteil im Verhältnis zum immobilen, kapillargebundenen Wasseranteil der Formation sowie aus der Gesamtporosität ableiten:

$$K_{\text{NMR}} = \left(\frac{n}{c}\right)^4 \cdot \left(\frac{BVM}{BVT}\right)^2 \quad (5-28)$$

Mit dem „*mean-T₂ model*“ ergibt sich die Permeabilität aus der Gesamtporosität und dem geometrischen Mittel der T₂-Verteilung (s. Abbildung 5-10, rechts). Wie beim „*free-fluid-model*“ ist auch hier die Konstante C eine von der Formation abhängige Größe, die im Labor durch Kernanalysen präzisiert werden kann.

$$K_{NMR} = C \cdot T_{2,gm}^2 \cdot n^4 \tag{5-29}$$

mit

K_{NMR}	Permeabilität	[m ²]
n	Gesamtporosität	[1]
BVM	Volumenanteil des freien Wassers in der Formation (Bulk Volume Movable)	[1]
BVI	Volumenanteil des gebundenen Wassers in der Formation (Bulk Volume Irreducible)	[1]
$T_{2,gm}$	<i>geometrisches Mittel der T₂-Verteilung</i>	[1]
C	Formationsabhängige Konstante	[1]

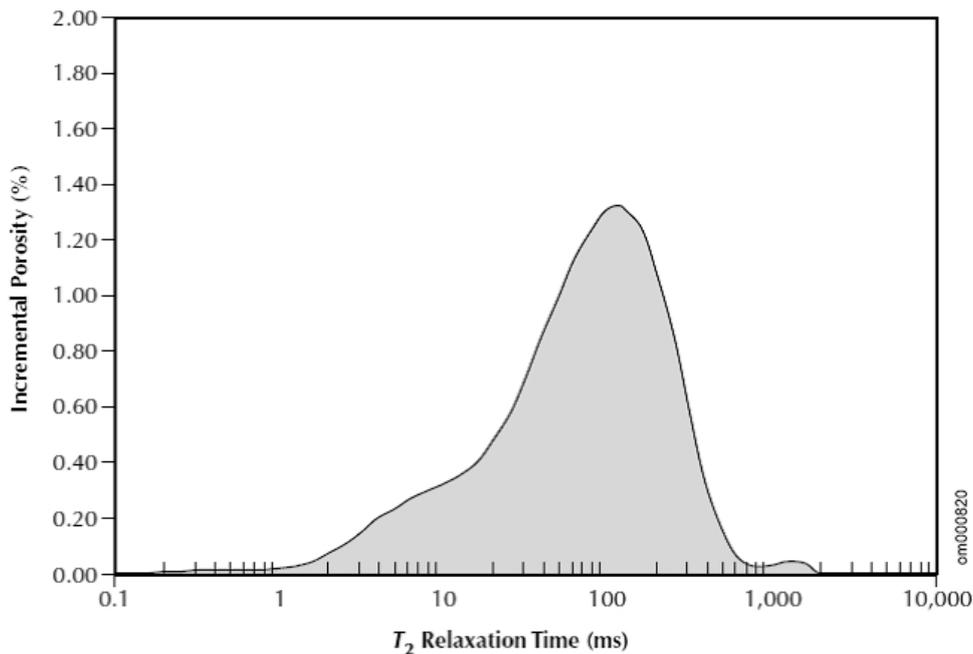


Abbildung 5-11: Zusammenhang zwischen Abklingzeit und Porosität. Die Fläche unterhalb der T₂-Verteilung ist ein Maß für die Porosität (Coates et al. 1999).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die zeitlich gemessenen Signalamplituden sind maßgeblich von den im Porenraum vorhandenen und kernmagnetisch wirksamen Fluiden (i. W. Protonen) und den Porenraumeigenschaften des Gesteins abhängig. Die kernmagnetischen Eigenschaften der Gesteinsmatrix, der Bohrspülung und des Filterkuchens spielen hingegen nur eine untergeordnete Rolle, sofern die unbeeinflusste

Formation innerhalb der vom Frequenzband des Pulses abhängigen Reichweite der Magnetisierung liegt.

Das vertikale Auflösungsvermögen wird bei stationären Messungen von der Länge der in der Sonde zur Messung des Magnetfeldes verwendeten Antenne bestimmt. Für eine typische 24-Inch-Antenne ist dieses ca. 60 cm. Es reduziert sich mit zunehmender Sondenfahrsgeschwindigkeit in Verbindung mit zunehmender Anzahl von Messzyklen (zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses) und der pro Messzyklus notwendigen Polarisations- und Abkling-Messzeiten.

Reichweite

Die Reichweite bzw. der von den Polarisationsvorgängen betroffene Bereich hängt im Wesentlichen von der zur Polarisation verwendeten Magnetfeldstärke B_0 und dem von dem Frequenzband des überlagerten B_1 -Pulses ab, welche quadratisch mit dem Abstand der Entfernung von der Magnetoberfläche (Sonde) abnehmen. Die Reichweite reduziert sich zudem mit zunehmender Temperatur des Magneten. Typische Sonden sind deshalb für bestimmte Bohrlochdurchmesser konzipiert und erkunden dann wenige Zentimeter mächtige Bereiche in einem radialen Abstand bis ca. 50 cm.

Reproduzierbarkeit

Die NMR Abklingkurven sind bei unveränderten Messbedingungen (z. B. keine Änderung des Bohrlochfluids) im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbar. Die Messgenauigkeit lässt sich z. B. durch Wiederholungsmessungen, Verwendung mehrerer Frequenzbereiche, geringere Sondenfahrsgeschwindigkeiten verbessern.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Erkennungsgrenze sinkt bei zunehmenden Bohrlochdurchmessern und abnehmenden Porositäten. Dieses liegt zum einen an der insgesamt geringeren Anzahl polarisierbarer Protonen und zum anderen können sich die Abklingzeiten durch die Porenraumverringern auf Zeiten deutlich unterhalb von 1 ms reduzieren, die messtechnisch meist nicht mehr erfasst werden können. Die tatsächlichen Porositäten im Kristallingestein oder im Steinsalz liegen damit ggf. unterhalb der Nachweisgrenze.

Fehleranfälligkeit

Fehleranfälligkeiten bestehen vor allem in der Festlegung der T2-Relaxationszeit, die den Volumenanteil des gebundenen Wassers im Gestein (BVI) vom Volumenanteil des freien Wassers (BVM) trennt (T2 Cut-Off). Ferro- und paramagnetische Mineralen führen zu einer Verschiebung der T2-Signalverteilung hin zu kleineren Zeiten. Auch Gase können einen Einfluss auf die T2-Signalverteilung haben. Isolierte Poren im Gestein beeinflussen die NMR-Ergebnisse zur Porosität zwar nicht, führen aber zu einer Überschätzung der Permeabilität.

Die Bohrspülung hat insbesondere einen Einfluss auf das Signal-zu-Noise-Verhältnis der Messergebnisse. Bohrspülungen mit geringer elektrischer Leitfähigkeit (z. B. ölbasierte Spülungen) sind gegenüber Spülungen mit hoher elektrischer Leitfähigkeit zu bevorzugen. Die Bohrspülungen sollten metallfrei sein, da dies das magnetische Feld stark verzerren kann.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Messmethode

Zur Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig.

Die NMR-Messungen sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Heraufziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrgeschwindigkeit. Nach Herstellerangaben können moderne NMR-Messsysteme je nach Ausführung und Aufgabenstellung mit maximalen Sondenfahrgeschwindigkeiten von $1.100 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ betrieben werden, wobei für spezielle Fragestellungen mit hohen Auflösungen Fahrgeschwindigkeiten zwischen $76 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ und $122 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ empfohlen werden (Schlumberger 2015).

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Von allen klassischen Bohrlochmessmethoden zur Porositätsbestimmung kommt das NMR-Messverfahren ohne zusätzliche Annahmen zur Porenraumverteilung der Gesteinsmatrix aus, und es kann ohne Modellannahmen auf die effektive Porosität geschlossen werden. Mit entsprechenden empirischen Modellen sind damit auch Permeabilitätsabschätzungen möglich.

Bewertung

Fazit

Die kernmagnetische Resonanzmessung (NMR) ist als einziges Verfahren zur Bestimmung von absoluten und effektiven Porositäten ohne zusätzliche Modellannahmen zur Gesteinsmatrix unerlässlich.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Für einzelne Auswertungen der NMR-Messungen aber auch für die Stärke des auslenkenden Magnetfelds werden Informationen über die elektrische Leitfähigkeit des Gebirges benötigt, so dass immer Widerstandsmessungen (s. Abschnitt 5.2.2.2.2) mit durchgeführt werden sollten.

Für einen direkten Vergleich von unabhängig bestimmten Porositäten sind im Rahmen einer Komplexinterpretation Neutron-Neutron-Messungen, Akustik-Log-Messungen und Widerstandsmessungen mit einzubeziehen.

Ferner können punktuell an Kernen unter Laborbedingungen gewonnene Porositäten die Qualität der interpretierten Logergebnisse bestätigen. Zur genaueren Berechnung von Permeabilitäten ist der Kalibrierungsfaktor C des „*free-fluid-model*“ oder des „*mean- T_2 model*“, aus Laboruntersuchungen zu bestimmen.

Da sich Klüfte, die zur Gesamtpermeabilität beitragen, typischer Weise nicht in den Relaxationszeiten T_1 und T_2 widerspiegeln, kann dieser Anteil der Permeabilität mit NMR nicht erfasst werden. Die NMR Permeabilität beschreibt in dieser Hinsicht nur die Matrixpermeabilität des Gesteins (Thern et al. 2007).

Eine weitere Synergie ergibt sich bei der Kombination von NMR und der Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmter elastischer Wellen (Geerits 1999). Hierbei werden die NMR-Permeabilität und die Stoneley-Wave-Permeabilität kombiniert und zur Identifikation von fluidleitenden Klüften benutzt. Da die NMR-Permeabilität nur die Matrixpermeabilität reflektiert, die Stoneley-Wave-Permeabilität dagegen aber auch empfindlich auf Fluidbewegung in Klüften reagiert, weist eine höhere Stoneley-Permeabilität auf Klüfte hin (Thern et al. 2007).

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Die NMR-Relaxationszeiten hängen im Wesentlichen von der Porosität, der Porengröße, den Eigenschaften des Porenfluids und der Mineralogie ab. Die Bestimmung der Permeabilität beruht meistens auf dem „*free-fluid-model*“ oder dem „*mean-T₂ model*“, die in wassergesättigten klastischen Sedimenten zuverlässige Ergebnisse liefern (Bryant et al. 1993, Chang et al. 1997). Für andere Gesteine sind zur Bestimmung der Permeabilität die Gleichungen zu modifizieren oder neue Zusammenhänge zu entwickeln.

5.2.2.2. Elektrische Messmethoden

Elektrische Bohrlochverfahren zählen zu den geophysikalischen Standardmessungen und werden insbesondere zur Untersuchung poröser klüftiger Gesteine eingesetzt. Der starke Einfluss des Poren- und Kluftwassers auf die elektrische Leitfähigkeit bildet die Grundlage für Anwendungen zur Bestimmung von Porosität und Wassersättigung. Sie werden aber auch zur Festlegung der Lithologie oder zur Charakterisierung bzw. Abgrenzung von Klüften genutzt.

Die elektrischen Verfahren (s. Tabelle 5-5) lassen sich grob einteilen in

- Eigenpotenzialmessung,
- Widerstandsmessung (konventionell und fokussierend),
- Induktive Messung,
- Dielektrische Wellenmessung.

5.2.2.2.1. Eigenpotenzialmessungen (Self Potenzial - SP)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Beim Eigenpotenzial wird an einer Elektrode im Bohrloch die natürliche Potenzialdifferenz in mV gegen eine Referenzelektrode an der Erdoberfläche gemessen und gegenüber der Tiefe dargestellt (Eigenpotenzial- oder SP-Log). Diese passive Methode kommt ohne künstliche Stromquellen aus. Die natürlichen Quellen des Eigenpotenzials können auf verschiedenen Vorgängen beruhen:

- Elektrochemische Komponente (Diffusions- und Membranpotenzial): Transport von Ionen in Folge eines Konzentrationsgefälles;
- Elektrokinetische Komponente (Strömungspotenzial): Strömung von wässrigen Lösungen;
- Reduktions- und Oxidationsvorgänge (Redoxpotenzial): Chemische Reaktionen.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Das SP-Log wird unter anderem genutzt

- zur Unterstützung der lithologischen Gliederung (insb. bei Sand-/Tonfolgen),
- zur Tongehaltsbestimmung (alternativ zur Gamma-Messung, insb. bei radioaktiv wirksamen Bestandteilen wie z. B. Glaukonit),
- zur Korrelation der Bohrlochmessergebnisse aus benachbarten Bohrungen,
- zur Bestimmung des spezifischen Widerstandes des Formationswassers,
- zum Nachweis von Graphit und Pyrit bzw. anderen sulfidischen Mineralisationen z. B. als geringmächtige Zwischenlagen oder in Klüftbereichen und Störungszonen.

Voraussetzung für die Messung ist ein fluidgefülltes, unverrohrtes Bohrloch.

Die Faktoren, welche die Größe des gemessenen Eigenpotenzialwerts beeinflussen, sind

- der Tongehalt sandiger Bereiche,

- der Bohrlochdurchmesser (Kaliber),
- die Schichtmächtigkeit, der Gebirgs- und Spülungswiderstand,
- die Infiltrationstiefe
- sowie eine eventuell vorhandene Gas- oder Ölführung.

Auswertung

Interpretiert wird nicht der absolute Wert des Eigenpotenzials, sondern der Messwertunterschied zwischen zwei angrenzenden Schichten, zwischen denen eines der o. g. Potenziale besteht. Über Korrekturdiagramme können Einflussgrößen wie Bohrlochdurchmesser, Temperatur und Schichtmächtigkeit eliminiert werden.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Änderungen des Eigenpotenzials entstehen zwischen zwei benachbarten Schichten aufgrund von zwischen ihnen vorhandenen elektrochemischen, elektrokinetischen oder Redoxpotenzialen.

Das Ortsauflösungsvermögen ist gering.

Reichweite

Die Reichweite ist gering, da im Wesentlichen der Übergangswiderstand den Eigenpotenzialwert bestimmt.

Reproduzierbarkeit

Eigenpotenzialmessungen sind bei Verwendung von unpolarisierbaren Elektroden und unveränderten Umweltbedingungen im Rahmen ihrer Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Für die Interpretation sind immer Variationen des Eigenpotenzials zur Festlegung von Schichtgrenzen erforderlich.

Fehleranfälligkeit

Probleme treten insbesondere aufgrund von Polarisationspotenzialen im Bereich der Metallelektroden auf, welche nicht reproduzierbar sind, und die Messergebnisse beeinträchtigen.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Die Messung des Eigenpotenzials ist zerstörungsfrei, hat keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändert das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Herausziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrgeschwindigkeit. Nach Herstellerangaben können moderne Messsysteme je nach Ausführung mit maximalen Sondenfahrgeschwindigkeiten von $1.100 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ betrieben werden (Schlumberger 2015). Das SP-Log wird oft als „Nebenprodukt“ gleichzeitig mit anderen elektrischen (Mehrelektroden)-Messungen mit registriert, so dass in diesem Fall kein zusätzlicher Aufwand entsteht.

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Die Eigenpotenzialmessungen werden häufig bei elektrischen Messungen mit registriert und als Interpretationshilfe bei der Festlegung der Lithologie verwendet. Insbesondere dienen sie auch zur Abschätzung des Tongehalts, wenn die Gesteine radioaktive Anteile enthalten, welche die Ergebnisse des Gamma-Logs verfälschen können.

Ein wesentlicher Nachteil der Eigenpotenzialmessungen ist die geringe Auflösung der Methode.

Bewertung

Fazit

Die Messung des Eigenpotenzials ist eine sinnvolle Ergänzung zu anderen elektrischen Messmethoden und des Gamma-Logs.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Zur Verfeinerung der Interpretation kann mit einer zusätzlichen Messung des Redoxpotenzials der Spülung dieser Beitrag zum Eigenpotenzial vom SP-Log abgezogen werden.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Potenzielle Aussagemöglichkeiten des Strömungspotenzials im Hinblick auf hydraulische Eigenschaften und Fließvorgänge sind bisher nicht ausgeschöpft; das Hauptproblem liegt in der Schwierigkeit einer Trennung der einzelnen Komponenten des SP aus dem Gesamtmesswert (Fricke und Schön 1999).

5.2.2.2. (Fokussierende) Widerstandsmessungen

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

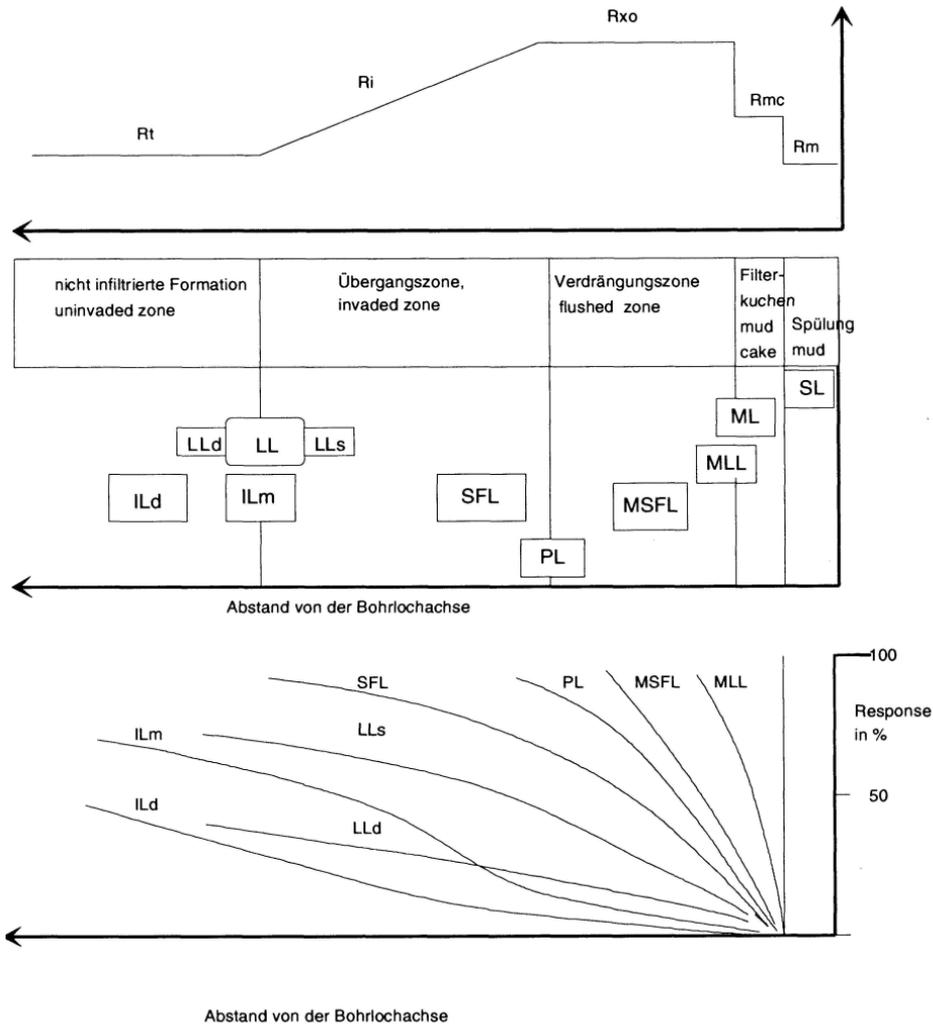
Das Messprinzip beruht auf einer Mehrelektrodenanordnung im Bohrloch, bei der stationäre elektrische Ströme eingespeist werden, welche aufgrund der Leitfähigkeit des Gebirges bzw. seines leitfähigen Poreinhalts Potentialdifferenzen an anderen Elektroden hervorrufen, die gemessen werden und über einen sondenspezifischen Geometriefaktor in scheinbare spezifische Widerstände R_a als Messgrößen umgerechnet werden.

Beispiele für einfache Vier-Elektroden-Konfigurationen sind Potenzialsonden („Kleine Normale“ und „Große Normale“) und Gradientensonden mit unterschiedlichen Eindringtiefen („Kleine Laterale“ und „Große Laterale“).

Bei den **fokussierenden Verfahren** werden im Gegensatz zu einfachen, konventionellen Widerstandsmessungen zusätzliche Steuerströme eingesetzt, die eine Fokussierung der stromdurchflossenen Bereiche und damit präzisere Ortszuordnungen der Messergebnisse ermöglichen (Laterolog - LL).

Die Wirkungstiefen nehmen mit zunehmenden Elektrodenabständen (Spacing) zu, so dass die Messwerte bei kleinen Elektrodenabständen (wenige Zentimeter, Mikrowiderstandsmessungen MicroLog – ML oder Microlaterolog - MLL) eher die Spülungseigenschaften wiedergeben und die Messwerte von Messungen mit großem Spacing (einige Dezimeter) eher die Eigenschaften des nicht infiltrierten Gesteins (s. Abbildung 5-12). Da die Ströme von der inhomogenen Bohrlochumgebung beeinflusst werden (Spülung, Filterkuchen, Verdrängungszone) sind zur Ermittlung der wahren Gebirgs widerstände Korrekturen erforderlich (Bohrlochkorrektur, Spülungskorrektur, Tem-

peratur). Diese müssen ggf. durch weitere Messungen mit speziellen Spacings bzw. Wirkungstiefen ermittelt werden.



- | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| ILd – Inductionlog (deep) | LLs – Laterolog (shallow) | MLL® – Microlaterolog |
| IIm – Inductionlog (medium) | SFL – Spherical Focused Log | ML – Microlog |
| LL – Laterolog | PL® – Proximity Log | SL – Spülungsleitfähigkeitslog |
| LLd – Laterolog (deep) | MSFL® – Micro Spherical Focused Log | |

Abbildung 5-12: Schematische Darstellung der mit elektrischen Bohrlachsmessmethoden erfassten Bereiche (nach Rider 1996).

Bei den **elektrischen Bohrlachswand-Scannerverfahren** (z. B. Formation MicroScanner® Formation MicroImager® (FMI-Log)) werden mehrere Elektroden (Pads) hydraulisch an die Bohrlachswand gepresst, die Übergangswiderstände gemessen und farbcodiert dargestellt. Dabei entsteht ein (elektrisches) Abbild der Bohrlachswand, welches Mikrorisse und Klüfte durch die zumeist erniedrigten Widerstandswerte aufgrund des leitfähigen Poren- und Kluftwassers nachweist.

Da der elektrische Widerstand generell von der Temperatur abhängt, wird bei allen elektrischen Messsystemen die Temperatur mit registriert.

Auswertung

Komplexere Auswertemethoden (Inversionsverfahren) liefern aus den Messwerten verschiedenster Wirkungstiefen eine radiale Verteilung des spezifischen Widerstands. Dabei können auch Widerstands- und Induktionsmessungen (s. Abschnitt 5.2.2.2.3) kombiniert werden.

Die Porosität lässt sich im einfachen Modell aus der Kenntnis des spezifischen Widerstands des Porenwassers und der Gesteinsmatrix unter der Annahme vollständiger Wassersättigung aus der 1. Archie-Gleichung berechnen (s. Abschnitt 5.2.1.1.1).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der gemessenen Potenzialdifferenz (elektrischen Spannung) infolge einer Änderung der Leitfähigkeit im stromdurchflossenen Bereich des Untergrunds.

Das vertikale Auflösungsvermögen wird insbesondere durch das Spacing festgelegt und kann durch die Fokussierung und bei langsamen Sondenfahrgeschwindigkeiten erhöht werden. Das vertikale Auflösungsvermögen liegt für elektrische Messmethoden mit kleinsten Sondenabständen (Formation Microscanner) bei 0,5 cm, beim Laterolog zwischen 20 cm (shallow) und 75 cm (deep) und beim Induction Log (deep) bei ca. 120 cm

Reichweite

Die Reichweite im Sinne einer radialen Wirkungstiefe wird im Wesentlichen vom Abstand der stromeinspeisenden Elektroden, der Stromstärke, der Messkonfiguration und der radialen Widerstandsverteilung um das Bohrloch bestimmt. Generell nimmt die Reichweite mit der Vergrößerung des Elektrodenabstands zu. Typische Sonden sind deshalb für bestimmte Reichweiten konzipiert und erkunden dann Bereiche in einem radialen Abstand von wenigen Zentimetern (z. B. Spülungsleitfähigkeitslog - SL) bis etwa 1 m und mehr (z. B. Laterolog (deep)- LLd oder Inductionlog (deep) - ILd).

Reproduzierbarkeit

Die gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstandswerte sind bei unveränderten Messbedingungen (z. B. keine Änderung des Bohrlochfluids) im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Erkennungsgrenze sinkt bei zunehmenden Bohrlochdurchmessern, abnehmenden Porositäten und Porenwässern geringer Leitfähigkeit. Aus technischen Gründen werden Messsysteme oft auf maximale Widerstandswerte in der Größenordnung von 40 bis 60 k Ω m begrenzt, so dass der wahre Formationswiderstand hochohmiger Gesteine eventuell nicht mehr gemessen werden kann. Damit wären für schlecht leitende Formationen mit geringer Porosität (wie Kristallingestein oder Steinsalz) ggf. auch keine Porositätsbestimmungen durchführbar.

Fehleranfälligkeit

Fehlerquellen bestehen bei den elektrischen Verfahren insbesondere durch

- externe elektrische oder elektromagnetische Störfelder,
- unzureichende Kenntnis von Korrekturgrößen,
- zu hohe Übergangswiderstände.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Zur Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig.

Die elektrischen Bohrlochmessmethoden sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Herausziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrgeschwindigkeit. Nach Herstellerangaben können moderne Messsysteme mit maximalen Sondenfahrgeschwindigkeiten von $1.100 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ betrieben werden, wobei für hohe Auflösungen Fahrgeschwindigkeiten von etwa $550 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ empfohlen werden (Schlumberger 2015).

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Für die Messung ist ein offenes Bohrloch oder eine nichtleitende Verrohrung mit einer leitfähigen Spülung erforderlich.

Die Methode ist eher ungeeignet für Formationen mit sehr hohen Widerständen (z. B. Steinsalz, Kristallingestein). Daher können dort lediglich permeable, infiltrierte Bereiche ausgewiesen werden.

Im Vergleich zu einfachen Widerstandsmessungen bieten die fokussierenden Verfahren ein besseres vertikales Auflösungsvermögen und eine genauere Ermittlung des Gesteinswiderstandes bei hochohmigen Schichten.

Bewertung

Fazit

Widerstandsmessungen mit verschiedenen radialen Eindringtiefen sind als Standardverfahren zur lithologischen Gliederung des Gebirges immer erforderlich. Bei Trockenbohrungen sind induktive Messmethoden (s. Abschnitt 5.2.2.2.3) anzuwenden.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Widerstandsmessungen sind mit Induktionsmessungen kombinierbar und können zur Berechnung einer radialen Widerstands-/Leitfähigkeitsverteilung gemeinsam invertiert werden.

Für einen direkten Vergleich von unabhängig bestimmten Porositäten sind im Rahmen einer Komplexinterpretation Gamma-Gamma-Dichte, Neutron-Neutron-Messungen, Akustik-Log-Messungen und NMR-Messungen mit einzubeziehen.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

Die Messbereiche der handelsüblichen Sonden für elektrische Messungen sind meist nicht auf sehr hochohmige Gesteine, ausgelegt, so dass für den Einsatzbereich im trockenen Steinsalz oder im Kristallingestein technische Weiterentwicklungen notwendig werden können.

5.2.2.2.3. Induktive Messung

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Bei **induktiven Messungen** erfolgen die Stromzuführung und der Spannungsabgriff nicht über galvanisch angekoppelte Elektroden wie bei konventionellen Widerstandsmessungen, sondern induktiv über Sende- und Empfangsspulen, so dass keine leitfähige Spülung zur Messung erforderlich ist und diese auch im trockenen Bohrloch durchgeführt werden kann. Die Sendespule erzeugt ein elektromagnetisches Wechselfeld (Frequenz meist 20 kHz), welches sich in das umgebende Gestein ausbreitet und dort eine Wechselfeldspannung induziert, die in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit des Gesteins σ_t ihrerseits zu einem Ringstrom führt (s. Abbildung 5-13).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Das vom Ringstrom hervorgerufene Feld induziert in der Empfangsspule eine Spannung, die gemessen wird und im einfachen Fall direkt proportional zur elektrischen Leitfähigkeit σ_t ist. Bei den induktiven Messungen werden insbesondere in gut leitenden Formationen die Ringströme von starken magnetischen Wechselfeldern begleitet, die ihrerseits eine phasenverschobene Spannung induzieren, welche das gesuchte Messsignal überlagert und korrigiert werden muss (Skin-Effekt-Korrektur). In der praktischen Ausführung werden zumeist mehrere Sende- und Empfangsspulen verwendet, die unterschiedliche radiale Eindringtiefen bzw. -sensitivitäten durch Veränderung des Spacings verwirklichen (s. Abbildung 5-13).

Auswertung

Die Porositätsberechnungen erfolgen analog zu den konventionellen Widerstandsmessungen über die Archie-Gleichung, wobei $R_t = \frac{1}{\sigma_t}$ ist.

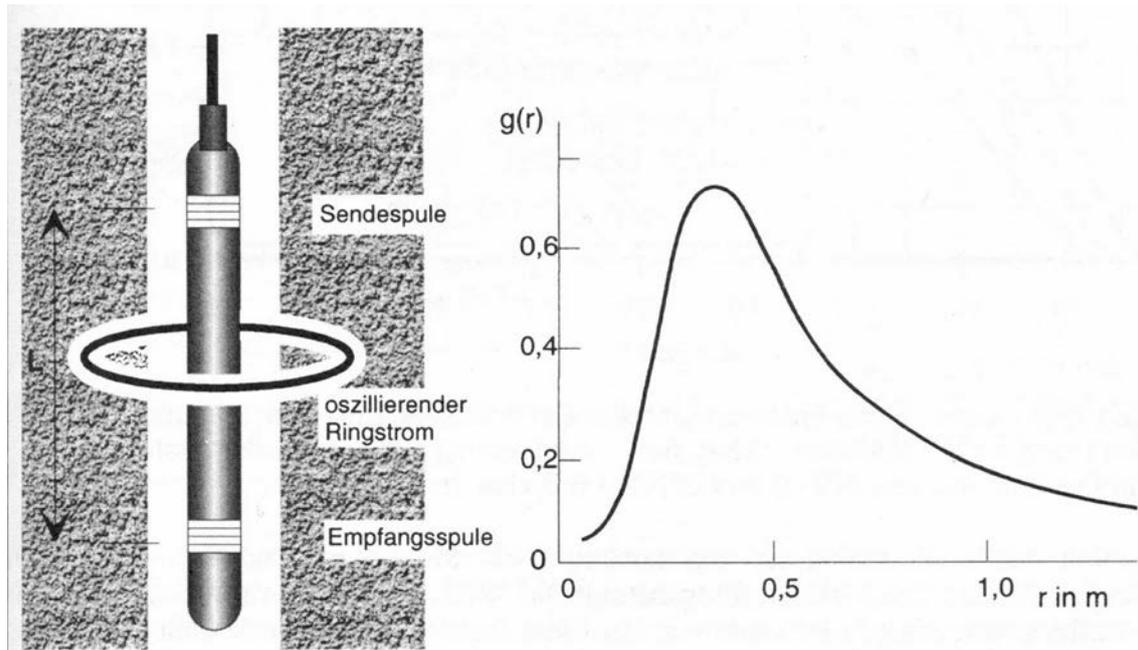


Abbildung 5-13: Zweispulen-Induktionslogsonde, links Aufbau der Sonde, rechts schematischer Verlauf der radialen Sondenempfindlichkeit (Fricke & Schön 1999).

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Sensitivität ist hier ein Maß für die Änderung der gemessenen Potenzialdifferenz (elektrischen Spannung) infolge einer Änderung der Leitfähigkeit im stromdurchflossenen Bereich des Untergrunds.

Das vertikale Auflösungsvermögen hängt insbesondere durch das Spacing festgelegt und hängt zudem von der Gesteinsleitfähigkeit ab. Es liegt für typische induktive Messungen in der Größenordnung zwischen 50 cm bei hohen Gesteinsleitfähigkeiten (z. B. Sande, stark geklüftete, fluidführende Festgesteine) und 120 cm bei geringen Gesteinsleitfähigkeiten (z. B. kompakte, unverwitterte, nicht geklüftete Festgesteine, trockenes Steinsalz).

Reichweite

Die Reichweite im Sinne einer radialen Wirkungstiefe wird im Wesentlichen vom Abstand der Send- und Empfangsspule, der Sendestromstärke und der radialen Leitfähigkeitsverteilung um das Bohrloch bestimmt. Generell nimmt die Reichweite mit der Vergrößerung des Elektrodenabstands und geringeren Leitfähigkeiten zu. Für das Dual-Inductionlog (ILm -IL(medium) und ILd -IL(deep)) wird von Fricke & Schön (1999) eine Wirkungstiefe zwischen 0,5 m und 3 m angegeben.

Reproduzierbarkeit

Die gemessenen Leitfähigkeiten sind bei unveränderten Messbedingungen im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Erkennungsgrenze sinkt bei zunehmenden Bohrlochdurchmessern, abnehmenden Porositäten und zunehmender Leitfähigkeit. In gut leitenden Gesteinen werden die induzierten Ringströme von starken magnetischen Wechselfeldern begleitet, die ihrerseits eine phasenverschobene Spannung induzieren, welche das gesuchte Messsignal überlagern und abmindern (Skinneffekt). Nach Herstel-

lerangaben sind die Arbeitsbereiche moderner Sonden je nach Ausführung und Einsatzbereich auf Widerstandswerte zwischen 0,2 Ωm und 40 $\text{k}\Omega\text{m}$ bis 100 $\text{k}\Omega\text{m}$ begrenzt. Damit können ggf. der wahre Formationswiderstand für schlecht leitende Formationen mit geringer Porosität (wie Kristallingestein oder Steinsalz) nicht mehr gemessen und auch keine Porositätsbestimmungen mehr durchgeführt werden.

Fehleranfälligkeit

Fehlerquellen bestehen bei den elektrischen Verfahren insbesondere durch

- externe elektrische oder elektromagnetische Störfelder,
- unzureichende Kenntnis von Korrekturgrößen,
- Skineffekte.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Zur Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig.

Die induktiven elektrischen Bohrlochmessmethoden sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Herausziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrgeschwindigkeit. Nach Herstellerangaben können moderne Messsysteme mit maximalen Sondenfahrgeschwindigkeiten von etwa $1.100 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ betrieben werden (Schlumberger 2015).

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Induktive Messungen sind im Gegensatz zu konventionellen Widerstandsmessungen auch im trockenen Bohrloch (ohne Spülung) möglich.

Zur Messung muss das Bohrloch offen sein bzw. es darf allenfalls eine nichtleitende Verrohrung aufweisen.

Es können im Vergleich zu konventionellen Widerstandsmessungen höhere radiale Wirkungstiefen realisiert werden.

Die Messbereiche der handelsüblichen Sonden für induktive Messungen sind meist nicht auf sehr hochohmige Gesteine ausgelegt, so dass für den Einsatzbereich im trockenen Steinsalz oder im Kristallingestein technische Weiterentwicklungen notwendig werden können.

Bewertung

Fazit

Induktive Widerstandsmessungen mit verschiedenen radialen Eindringtiefen sind als Standardverfahren zur Charakterisierung der Formationen insbesondere bei Trockenbohrungen erforderlich.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Induktive Widerstandsmessungen sind mit konventionellen Widerstandsmessungen kombinierbar und können zur Berechnung einer radialen Widerstands-/Leitfähigkeitsverteilung gemeinsam inver-

tiert werden. Die Auswahl sollte Abhängigkeit in von der erforderlichen Eindringtiefe sowie von den zu erwartenden Leitfähigkeitsverhältnissen zwischen Gestein und Bohrlochfüllung getroffen werden.

Für einen direkten Vergleich von unabhängig bestimmten Porositäten sind im Rahmen einer Komplexinterpretation Neutron-Neutron-Messungen, Akustik-Log-Messungen und NMR-Messungen mit einzubeziehen.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

5.2.2.2.4. Dielektrische (Wellen-)Messung

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Dielektrische (Wellen-)Messungen zählen zu den Hochfrequenzverfahren mit Frequenzen elektromagnetischer Wellen im MHz- bis GHz-Bereich. Das Messsystem besteht aus Sende- und Empfangsantennen, die auf einem an die Bohrlochwand gedrückten Schuh (Pad) im Abstand weniger Zentimeter montiert sind. Bei der Messung werden an den beiden Empfängerantennen die Phasen- bzw. Laufzeitdifferenzen der elektromagnetischen Welle $\Delta t_{el-magn}$ bezogen auf 1 m sowie die Amplitudenunterschiede bzw. die daraus ermittelte Dämpfung der elektromagnetischen Welle $\alpha_{el-magn}$ gemessen.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Aus diesen beiden Messgrößen lassen sich die Dielektrizitätszahl ε und die Leitfähigkeit σ berechnen (z. B. Ellis 1987), welche als Eingangsgrößen in Modelle zur Berechnung von Porosität und Wassersättigung genutzt werden. Der Zusammenhang zwischen der Porosität n und der Dielektrizitätszahl ist über die sog. CRIM-Formel nach Baker et al. (1985) und Kenyon & Baker (1986) gegeben:

$$\varepsilon_{\text{Formation}} = [(1 - n) \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{Matrix}}} + n \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{Porenfluid}}}]^2 \quad (5-30)$$

mit

ε	Dielektrizitätszahl	[F·m ⁻¹]
n	Gesamtporosität	[1]

Der Zusammenhang zwischen der Porosität und den Laufzeiten wird über die Zeit-Mittelgleichung beschrieben, die in gleicher Weise für die akustischen Verfahren (s. Abschnitt 5.2.2.3.1) gilt:

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Her-aufziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke, der Sondenfahr-geschwindigkeit und beträgt bis zu $1.000 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$.

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Dielektrische Messungen sind im Gegensatz zu konventionellen Widerstandsmessungen auch im trockenen Bohrloch (ohne Spülung) möglich.

Die Ergebnisse dielektrischer Messungen sind weitestgehend unabhängig von der Salinität der Wasser.

Die Messungen sind nur im unverrohrten Bohrloch möglich.

Bewertung

Fazit

Dielektrische Messungen können insbesondere zur Sättigung des Gesteins wertvolle Informationen liefern.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Dielektrische Messungen werden häufig während der laufenden Bohrung gemessen („*measuring while drilling*“).

Für einen direkten Vergleich von unabhängig bestimmten Porositäten sind im Rahmen einer Komplexinterpretation Gamma-Gamma-Dichte, Neutron-Neutron-Messungen, Akustik-Log-Messungen und NMR-Messungen mit einzubeziehen.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen der Permittivität und der Porosität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

5.2.2.3. Akustische Messmethoden

Akustische Bohrlochverfahren zählen zu den Standardbohrlochmessmethoden, bei denen mit elastischen Wellen das Gebirge und der Bohrlochausbau hinsichtlich ihrer elastischen Eigenschaften untersucht werden.

Die akustischen Messmethoden (s. Tabelle 5-5) lassen sich einteilen nach der Art des verwendeten Strahlenweges:

- Refraktierte Wellen: Akustiklog (s. Abschnitt 5.2.2.3.1), Zementlog (Cementbondlog);
- Reflektierte Wellen: Akustischer Bohrlochfernseher (s. Abschnitt 5.2.2.3.2);
- Geführte Wellen an der Grenzfläche Formation/Spülung: Stoneley-Welle, Pseudo-Raleigh-Welle.

5.2.2.3.1. Akustiklog (Sonic Log)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Die Messung erfolgt mit einer Bohrlochmesssonde vorzugsweise im offenen, unverrohrten Bohrloch. In der einfachsten Ausführung besteht die Sonde aus einem Ultraschallsender und zwei Ultraschallempfängern, die in verschiedenen Abständen zur Quelle angebracht sind (s. Abbildung 5-14). Die Ultraschallquelle erzeugt einen akustischen Impuls, der sich als direkte Kompressionswelle (P-Welle) durch die Spülung mit der Geschwindigkeit $v_{p,fl}$ bis zur Bohrlochwand ausbreitet, dann als kritisch refraktierte Welle im Gestein parallel zur Bohrlochwand mit der P-Wellengeschwindigkeit des Gesteins $v_{p,Gestein}$ (falls $v_{p,fl} < v_{p,Gestein}$) weiterläuft und schließlich nacheinander von den Ultraschallempfängern registriert wird. Gemessen wird (normiert auf 1 Meter) die Laufzeitdifferenz DTP in $\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ zwischen den beiden Empfängern. Die Messwerte für verschiedene Teufen werden als **P-Wellen-Akustiklog** dargestellt. Aus dem Kehrwert ergibt sich die P-Wellengeschwindigkeit v_p .

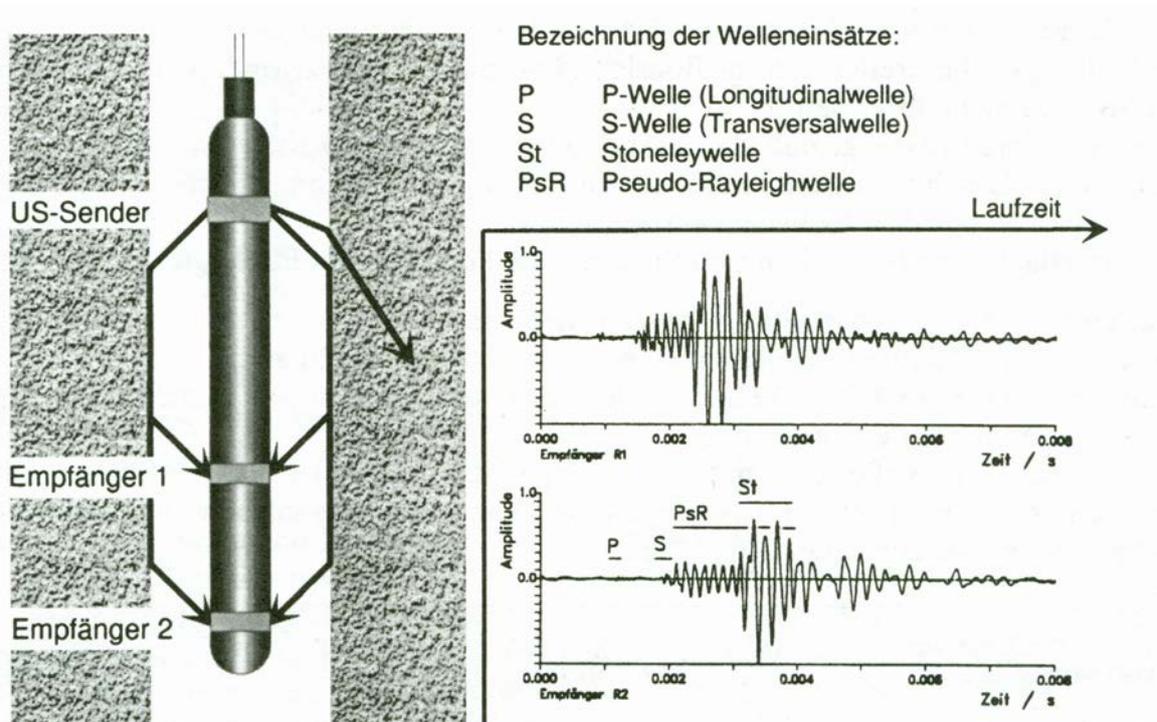


Abbildung 5-14: Akustiklogmessung. Zwei-Empfänger-Sonde mit schematisch dargestellter Ausbreitung der Wellen (links) und Wellenbilder (Tönnies 1991) an zwei Empfängern (rechts) (Fricke und Schön 1999).

Verschiedene Sondenausführungen verfügen über

- eine vollständige Aufzeichnung des Wellenzuges an jedem Empfänger (**Full wave Sonic Log**), die eine nachträgliche Bearbeitung und Spezialanalysen ermöglichen (Ermittlung der Dämpfung, Auswertung von Stoneley- oder Pseudo-Rayleigh-Wellen),
- zusätzliche Ultraschallempfänger (z. B. mit einem Array von 4 Empfängern), die eine Unterscheidung von Eigenschaften eines eventuell vorhandenen Filterkuchens von denjenigen des ungestörten Gesteins ermöglichen,

- über spezielle Scherwellen-Sender (Dipolquelle), die in Verbindung mit einer anderen Ankopplung bevorzugt Scherwellen (S-Wellen) anregen, welche analog wie P-Wellen ausgewertet werden (**S-Wellen Akustiklog**, S-Wellengeschwindigkeit v_s).

Moderne Messsysteme nutzen als Quelle sowohl Monopol- als auch Dipolquellen (zur Anregung von S-Wellen mit unterschiedlicher Polarisation) und arbeiten in mehreren Frequenzbereichen. Die unterschiedlichen Abstrahl- und Aufnahmecharakteristiken, die Abdeckung mehrerer Frequenzbereiche sowie die Arraykonfiguration ermöglichen eine Trennung der verschiedenen Wellentypen bei hoher vertikaler Auflösung (15 cm). Diese Messsysteme erlauben die Analyse der P-Welle, der unterschiedlich polarisierten S-Wellenkomponenten und der Stoneley-Welle und vermögen auch Anisotropien zu bestimmen (Klieber & Brill 2018).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Akustiklogmessungen werden unter anderem genutzt

- zur Unterstützung der lithologischen Gliederung (insb. bei Sand-/Tonfolgen),
- zur **Porositätsbestimmung**,
- zum Gasnachweis aus dem Verhältnis von P- und S-Wellenlaufzeit,
- zur **Kluftcharakterisierung**,
- zur **Permeabilitätsbestimmung** auf der Grundlage einer Analyse der Stoneley-Welle (Halliburton Energy Services, Inc. 2006),
- zur Bestimmung von mechanischen Gesteinseigenschaften (**dynamische Elastizitätsmoduln, Festigkeitsmerkmale**),
- zur Unterstützung reflexionsseismischer Messungen von der Erdoberfläche (synthetische Seismogramme),
- zur technischen Prüfung von Rohrtouren, Hinterfüllungen (Zementation). Ausgewertet werden die Laufzeiten und Amplituden (Dämpfung) der refraktierten Wellen, die Messungen erfolgen mit mehreren Azimuthen. Darstellung als sogenanntes **Cement Bond Log, CBL**. Beispiele: Cement Evaluation Tool CET® (Schlumberger) oder Segmented Bond Tool® (Baker Atlas).

Auswertung

Die Porositätsbestimmung erfolgt für nicht-tonige Gesteine über die Zeit-Mittelgleichung (s. Abschnitt 5.2.2.2.4). Bei der Porositätsbestimmung für tonige Gesteinen ist eine sogenannte Tonkorrektur anzubringen, für den der Tongehalt und die Porosität der Tonmatrix unabhängig bestimmt werden müssen. Bei einem anderen Modell zur Bestimmung der Porosität an Tongesteinen ist ein Kompaktionsfaktor an nicht porösem Tongestein empirisch zu ermitteln.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Differenzlaufzeiten der kritisch refraktierten (P- oder S-)Wellen verlängern sich mit zunehmender Porosität oder Klüftigkeit des Gesteins, da sich die Gesteinsmatrix und das Fluid im Porenraum deutlich in ihren elastischen Eigenschaften unterscheiden.

Das vertikale Auflösungsvermögen wird im Wesentlichen durch Sondenfahr Geschwindigkeit und die konstruktionsbedingten Abstände zwischen Sender und Empfänger bestimmt. Es beträgt im günstigsten Fall ca. 15 cm.

Reichweite

Die Reichweite hängt von der abgestrahlten Energie der Ultraschallquelle ab, von der Sondenkonfiguration und von den Dämpfungseigenschaften des Gesteins sowie der Porenfüllung.

Reproduzierbarkeit

Die Sonic Log Messungen sind bei unveränderten Messbedingungen im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbar. Als Messgenauigkeit wird für die Differenzlaufzeit ein Wert von $\pm 3 \mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ und für abgeleitete Porositäten ein Wert von $\pm 2 \%$ (absolut) angegeben (Fricke & Schön 1999).

Erkennungs- und Nachweiskgrenzen

Die Erkennungsgrenze sinkt mit zunehmenden Bohrlochdurchmessern und abnehmenden Porositäten.

Voraussetzung für die Durchführung des Akustik-Logs ist, dass die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in der Bohrlochspülung kleiner ist als im Gestein, was bei Lockergesteinen oder bei Scherwellen im Festgestein nicht immer gegeben ist.

Fehleranfälligkeit

Fehlerquellen liegen bei den Messungen von Laufzeitdifferenzen in folgenden Fällen vor:

- Einer oder beide Empfänger greifen nicht die Laufzeit der im Gestein kritisch refraktierten Welle ab (Bohrlochdurchmesser zu groß, Überholentfernung der Kopfwellen größer als der Abstand von Quelle zum nächsten Empfänger, Amplitude der refraktierten Welle ist zu klein z. B. in stark absorbierenden Bereichen wie in Gas führende Zonen) und der Ersteinsatzlaufzeit wird in eine andere Signalphase gelegt (Cycle Skip).
- Es bildet sich keine refraktierte Welle im Gestein aus.
- Akustische Störgeräusche während der Messung.
- Bohrlochausbrüche verlängern den Laufweg und verfälschen den Messwert.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Zur Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig.

Die akustischen Bohrlochmessungen sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Herausziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrgeschwindigkeit. Nach Herstellerangaben können moderne Akustik-Loggingsysteme je nach Ausführung mit maximalen Sondenfahrgeschwindigkeiten zwischen etwa $550 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ und $1.100 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ betrieben werden (Schlumberger 2015).

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Das Akustik-Log ist als klassische Bohrlochmessmethode zur Bestimmung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten im Gestein und damit insbesondere zur Ableitung gebirgsmechanischer Eigenschaften unerlässlich.

Aus den ermittelten Geschwindigkeiten lassen sich auch auf den Gesteinsmodellen oder den (semi-)empirischen Beziehungen basierende Korrelationen zur Porosität herstellen.

Bewertung

Fazit

Akustiklogs zählen aufgrund ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten zu den unverzichtbaren Standardverfahren, die über die unabhängige Porositätsbestimmung hinaus Aussagen zu mechanischen Gesteinseigenschaften ermöglichen sowie eine direkte Korrelation von oberflächenseismischen Messergebnissen in der Zeit zu tatsächlichen Tiefen herstellen können.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Für einen direkten Vergleich von unabhängig bestimmten Porositäten sind im Rahmen einer Komplexinterpretation Neutron-Neutron-Messungen, Gamma-Gamma-Log-Messungen und Widerstandsmessungen mit einzubeziehen.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Der Zusammenhang zwischen den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten und der Porosität sowie der Zusammenhang zwischen der Stoneley-Welle und der Permeabilität ist unter Berücksichtigung anderer Abhängigkeiten (z. B. Porenfluid, Sättigungsgrad, Druck, Temperatur, mineralogische Zusammensetzung, chemische Wechselwirkung in Mehrphasensystemen) insbesondere für Gesteine mit geringer Permeabilität und geringer Porosität gesteinspezifisch weiter zu erforschen.

5.2.2.3.2. Akustischer Bohrlochfernseher (ABF)/Borehole Televiewer (BHTV)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Der Akustische Bohrlochfernseher (ABF) arbeitet wie ein Echolot. Er tastet die Bohrlochwand mit einer im Bohrloch zentrierten, rotierenden Ultraschall-Sender-Empfänger-Kombination spiralförmig ab und zeichnet dabei neben der Lage im Bohrloch (Azimuth und Tiefe) die Laufzeit und die Amplitude des reflektierten Signals auf. Typische technische Parameter sind:

- Frequenz der impulsartigen Ultraschallwellenzüge: 800 kHz
- Folgefrequenz (Takt) der Ultraschallimpulse: 600 bis 700 Hz
- Rotationsfrequenz des Messkopfes: 3 bis 6 Hz
- Sondenfahrgewindigkeit: 60 bis 600 m·h⁻¹

Die Messung erfolgt in wasser- oder spülungsgefüllten Bohrlöchern, wobei eine Trübung des Bohrlochfluids zulässig ist.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Die Reflexionsamplituden werden farbcodiert zu einem Abbild des abgerollten Bohrlochwand-Zylinders zusammengesetzt. Glatte und klufffreie Bohrlochwandabschnitte liefern große Amplituden, Kluffbereiche, Trenn- und Schichtfugen und ähnliche Inhomogenitäten hingegen sehr geringe Amplitudenwerte. Die Abbildungen werden für weitergehende Untersuchungen zur **Charakterisierung von Klüften und des Schichtgefüges** verwendet.

Auswertung

Aus den Laufzeiten und den in situ gemessenen Spülggeschwindigkeiten lässt sich ein hochgenaues Kaliberlog berechnen.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Reflexionslaufzeiten sind von der Schallgeschwindigkeit in der Spülung und dem Abstand der zwischen Quelle/Empfänger und Reflexionspunkt abhängig und unterscheiden sich bei idealer zylindrischer Bohrlochgeometrie nicht. Die reflektierten Signalamplituden sind maßgeblich vom Impedanzkontrast (Impedanz = Dichte x Geschwindigkeit) zwischen Spülung und Gestein abhängig. Bei Klüften verringert sich der Impedanzkontrast erheblich.

Das vertikale Auflösungsvermögen wird im Wesentlichen durch Sondenfahrgeschwindigkeit und Rotationsfrequenz des Messkopfes festgelegt und liegt in dem o. g. Beispiel zwischen ca. 3 mm ($60 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ | 6 Hz) und ca. 5,5 cm ($600 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ | 3 Hz). Die horizontale bzw. azimutale Auflösung hängt vom Bohrllochdurchmesser, der Rotationsfrequenz des Messkopfes und der gewählten Folgefrequenz der Ultraschallimpulse ab.

Reichweite

Keine Reichweite ins Gestein. Es wird nur die Bohrlochwand abgetastet.

Reproduzierbarkeit

Die Aufnahmen des BHTV sind bei unveränderten Messbedingungen (z. B. keine Änderung des Bohrlochfluids) im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Klufiterkennung wird erschwert, wenn die Bohrlochform vom idealen Zylinder abweicht (z. B. Kaliberausbrüche). Im Extremfall ist die Abbildung nicht interpretierbar.

Fehleranfälligkeit

Neben den o. g. geometrischen Faktoren, können auch hohe Feststoffanteile der Spülung zu unerwünschten Streu- und Absorptionseffekten führen und die Abbildungsqualität herabsetzen.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Zur Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig.

Die akustischen Bohrlochmessungen sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang (Herablassen der Sonde, Messung beim Heranziehen) ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrgeschwindigkeit. Nach Herstellerangaben können moderne akustische Bohrlochfernseher je nach Ausführung mit maximalen Sondenfahrgeschwindigkeiten zwischen etwa $130 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ und $648 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ betrieben werden (Schlumberger 2015).

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Im Gegensatz zu optischen Verfahren ist dieses Verfahren auch bei nicht-transparentem Bohrlochinhalt, d. h. trüber Spülung einsetzbar.

Das Verfahren ist nur in wasser- oder spülungsgefüllten Bohrlöchern möglich. Bei deformierten und rauen Bohrlochwänden verfälschen Reflexionen von der Seite die Abbildung.

Bewertung

Fazit

Für die zur Kluffanalyse genutzte in situ Abbildung der Bohrlochwand ist für wasser- bzw. spülungsgefüllte Bohrlöcher der Akustische Bohrlochfernseher in gleicher Weise geeignet wie das elektrische Pendant (FMI-Log). In trockenen Bohrlöchern ist ein optisches Abbildungsverfahren erforderlich.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Teilweise werden elektrische und akustische Scannerverfahren gemeinsam eingesetzt, um eine höhere Texturauflösung zu erzielen, offene und gefüllte bzw. verheilte Klüfte zu unterscheiden oder um Kluffmaße (Öffnungsweite etc.) abzuleiten (Beispiel: Messsystem STAR® (Simultaneous Acoustic and Resistivity Imager) von Baker Atlas).

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Verfahren zur Unterscheidung von permeablen und nicht-permeablen Klüften wären zu entwickeln.

5.2.2.4. Optische Messmethoden

5.2.2.4.1. Optisches Bohrlochfernsehen (OPTV)

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Eine Kamera- oder Videobefahrung mit einem optischen Bohrlochfernseher (OPTV) ermöglicht eine visuelle Untersuchung der Bohrlochwand (radiale Sicht) und des Bohrlochs (axiale Sicht). Die Messung kann nur in einem trockenen oder in einem mit optisch transparenter Flüssigkeit gefüllten Bohrloch oder Bohrlochabschnitt erfolgen.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Vorrangig kommt der Bohrlochfernseher bei folgenden hydrologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Aufgabenstellungen zu Einsatz:

- Untersuchung des Ausbaus von Brunnen und Pegeln (z. B. Zustands- und Positionskontrolle der Filterbereiche),
- Detektierung von Kluffbereichen und Zuflüssen im Kristallin,
- Kartierung von Kluffzonen und Gesteinswechsell.

Auswertung

Die Sonde ist mit einer Beleuchtung, einem Spiegel, einer Zoomeinrichtung und mit einem Tiefenmesssystem ausgestattet, welche eine individuelle hochauflösende Inspektion in Echtzeit inklusive Dokumentation mit Hilfe von Einzelaufnahmen mit und ohne Vergrößerungen ermöglicht.

Grenzen der Methode

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen

Die Auflösung hängt von der Auflösung der verwendeten digitalen Kamera und den Sichtbedingungen ab. Aufgrund einer sofortigen optischen Kontrolle können interessierende Bereiche gezielt angefahren werden.

Reichweite

Keine Reichweite ins Gestein.

Reproduzierbarkeit

Die Aufnahmen des Bohrlochfernsehens sind bei unveränderten Messbedingungen im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbar.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Die Erkennungs- und Nachweisgrenzen werden von den Sichtbedingungen im Bohrloch bestimmt.

Fehleranfälligkeit

Schlechte Beleuchtung, zu hohe Sondenfahrgeschwindigkeiten, kondensierendes oder auf die Optik tropfendes Wasser können zu unscharfen, nicht auswertbaren Aufnahmen führen.

Ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode

Zur Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen ist eine Bohrung in den zu erkundenden Bereich notwendig.

Die optischen Bohrlochmessungen sind zerstörungsfrei, haben keine Auswirkungen auf nachfolgende Messungen und verändern das Gestein nicht.

Aufwand

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Messvorgang ist abhängig von der Bohrtiefe, der Messstrecke und der Sondenfahrgeschwindigkeit. Die Sondenfahrgeschwindigkeiten sind so anzupassen, dass verzerrungsfreie Aufnahmen entstehen, was in der Regel online kontrolliert werden kann.

Neben dem eigentlichen Messsystem mit Registriereinheit, Windenfahrzeug und Personal ist ggf. auch ein Lastenkran bereitzustellen.

Vor- und Nachteile

Es ist im Gegensatz zu elektrischen und akustischen Scannerverfahren auch in trockenen Bohrlöchern einsetzbar und die Farbgebung entspricht den tatsächlichen Verhältnissen.

Das Verfahren ist nicht bei trüben Bohrlochfluiden einsetzbar.

Bewertung

Fazit

Für die zur Kluftanalyse genutzte in situ Abbildung der Bohrlochwand ist in trockenen Bohrlöchern nur der optische Bohrlochfernseher geeignet, welcher zudem in optisch transparenten Bohrlochfluiden einsetzbar ist. Bei trüben Bohrspülungen versagen optische Systeme und es sind stattdessen akustische Bohrlochfernseher oder elektrische Scannerverfahren (FMI-Log) einzusetzen.

Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden

Optische Messmethoden sind gerade in Brunnen oder flachen Bohrungen (< 500 m Teufe) oft Teil des Bohrlochmessprogramms, werden aber üblicherweise separat von den anderen Bohrlochmessverfahren durchgeführt.

Potenzieller Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung

Techniken zur Bildbearbeitung und Mustererkennung entwickeln sich stetig weiter, so dass sich die online-Auswertung von Kamerabefahrungen beschleunigt und verbessert.

5.3. Laboruntersuchungen

Neben der direkten Ermittlung der transportrelevanten Gesteinseigenschaften im Feldversuch mittels geohydraulischer und geophysikalischer Messmethoden, können viele Gesteinseigenschaften auch an Materialproben wie z. B. Bohrkernen im Labor ermittelt werden.

Die Laboruntersuchungen werden zwecks Kalibrierung, Verifizierung und/oder Ergänzung der Feldversuche durchgeführt. Im Vergleich zu Feldversuchen sind diese sehr gut reproduzierbar, da die Versuchsbedingungen im Vorfeld definiert werden und meist leicht wiederherstellbar sind. Zudem lassen sich im Labor viele Einflussfaktoren auf die Messgröße gezielter vermeiden oder verändern, sodass auch, je nach Aufgabenstellung, deren Effekte auf die Messgröße untersucht werden können.

Ein wesentlicher Nachteil der Laborversuche ist, dass sich die Gültigkeit der Ergebnisse auf die jeweils entnommene Probe unter den gegebenen Laborbedingungen beschränkt. Eine vollständige Übertragbarkeit der punktuell gewonnen Informationen auf die natürlichen, ungestörten Verhältnisse im Untersuchungsgebiet ist somit nicht gegeben.

Die nachfolgende Darstellung der verschiedenen Messmethoden im Labor fasst die Beschreibung und Grenzen der Methoden im Vergleich zu den geohydraulischen und geophysikalischen Messmethoden im Feld kompakter zusammen. Aussagen z. B. zu Reichweite oder Beeinflussung nachfolgender Messungen entfallen bei den Laboruntersuchungen zur Bestimmung transportrelevanter Gesteinseigenschaften. Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Labor-Methoden sowie deren physikalische und messtechnische Hintergründe wird an auf methodenspezifische Literatur zu Beginn der jeweiligen Abschnitte verwiesen.

5.3.1. Korngrößenanalysen

Grundlegende Literatur

Matthes, K., Nusche, H., Dietrich, P., Vienken, T. (2012): *Auswirkungen von Messunsicherheiten bei der Korngrößenanalyse auf die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes*. *Grundwasser*, Vol. 17(2), pp. 105–111, Elsevier.

Storz, K., Steger, H., Wagner, V., Bayer, P., Blum, P. (2017): *Methodenvergleich zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit*. *Grundwasser*, Vol. 22(2), pp. 103-111, Springer.

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Grundlage dieser Methode ist der empirisch belegte Zusammenhang, dass die Gesteinsdurchlässigkeit eines Lockergesteins von dessen Korngrößenverteilung abhängt. Zur Durchführung der Korngrößenanalysen liegt das Regelwerk DIN 18123 (2011) vor. Bei der Korngrößenanalyse wird die Korngrößenverteilung einer Bodenprobe mit Korngrößen über 0,063 mm durch Trennen der vorhandenen Korngruppen mittels Siebung bestimmt. Bei Böden mit Anteilen von Korngrößen unter 0,063 mm wird die Korngrößenverteilung durch Siebung nach nassem Abtrennen der Feinteile ermittelt.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Diese Methode ist nur für Lockergesteine durchführbar. Mittels Korngrößenanalyse kann im Labor die Gesteinsdurchlässigkeit eines Lockergesteins in einem Durchlässigkeitsbereich zwischen 10^{-3} bis $10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ermittelt werden.

Auswertung

Nach DIN 18123 werden die Massensummen der Rückstände auf den einzelnen Sieben ermittelt und die Siebdurchgänge in einem Diagramm dargestellt.

Die Auswertung der Siebkurven erfolgt über verschiedene analytische Verfahren:

- Nach HAZEN (1892)
- Nach BEYER (1964)
- Nach SEELHEIM (1880)
- Nach KOZENY/KÖHLER (1965)

Eine ausführliche Beschreibung der Auswerteverfahren enthält z. B. Hölting et al. (2013).

Bewertung

Die Korngrößenanalyse ist einfache, schnelle und kostengünstige Methode, um die Gesteinsdurchlässigkeit in Porengrundwasserleitern der Lockergesteine orientierend zu untersuchen.

Die aus der Korngrößenanalyse ermittelten Gesteinsdurchlässigkeiten liefern jedoch nur punktuelle Werte für die jeweilige Probe. Die Dreidimensionalität natürlicher Gesteinsformationen (unterschiedliche Verdichtungsverhältnisse, vertikale Schichtungen) und Inhomogenitäten werden nicht berücksichtigt. Eine Reproduzierbarkeit für andere Proben ist somit nicht gegeben.

Korngrößenanalysen sollten ergänzend und teufenorientiert zu geohydraulischen Feldversuchen oder geophysikalischen Bohrloch-Versuchen eingesetzt werden, um die Ergebnisse der ermittelten k_f -Werte zu verifizieren.

5.3.2. Durchströmungsversuche

Grundlegende Literatur

DIN EN ISO 17892-11 (2019): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit, Beuth Verlag, Berlin.

Storz, K., Steger, H., Wagner, V., Bayer, P., Blum, P. (2017): Methodenvergleich zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit. Grundwasser, Vol. 22(2), pp. 103-111, Springer.

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Für die Durchführung der Durchströmungsversuche und die Probennahmen liegen jeweils Technische Regelwerke vor, z. B. DIN 18130-1 (1998) (ersetzt durch DIN EN ISO 17892-11 (2019)), DIN EN ISO 22475-1 (2007). Die Untersuchung der Durchlässigkeit von Festgesteinen mit geringen Gesteinsdurchlässigkeiten $< 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ erfolgt in einer Triaxialzelle, in der die Gesteinsprobe unter natürlicher Auflast durchströmt wird (s. Abbildung 5-15). Der Versuch kann mit konstanter oder veränderlicher Druckhöhe sowohl an gestörten als auch an ungestörten Proben durchgeführt werden. Die Durchflussmengen und die Wasserstände werden jeweils aufgezeichnet.

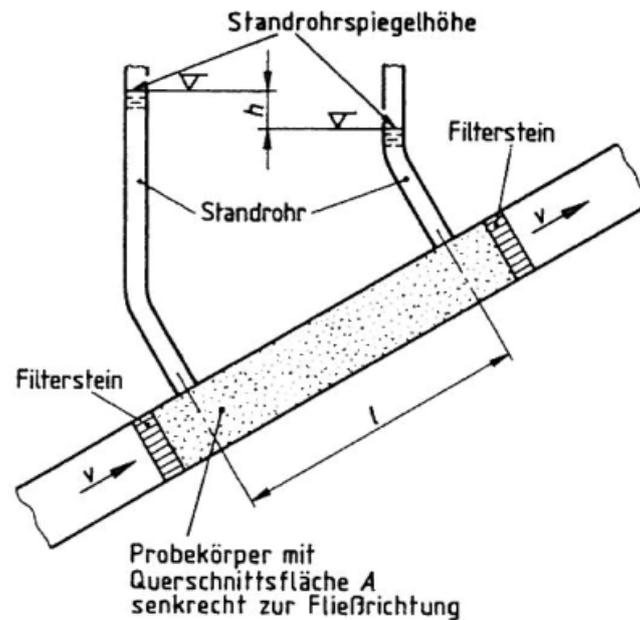


Abbildung 5-15: Schematische Darstellung des Durchströmungsversuches (Quelle: DIN 18120-1).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Mittels Durchströmungsversuche (Permeameterversuche) können im Labor Gesteinsdurchlässigkeiten im Bereich 10^{-2} bis 10^{-11} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ermittelt und die Porosität abgeschätzt werden (LfU BW 1991).

Auswertung

Die Auswertung der Durchströmungsversuche erfolgt analytisch nach dem Gesetz von DARCY (s. Gl. 3-1):

$$k_f = \frac{v_x}{i} = \frac{Q \cdot l}{A \cdot \Delta h_p} = \text{konstant} \quad (5-32)$$

mit

k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
v_x	Filtergeschwindigkeit in x-Richtung	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
i	hydraulischer Gradient	[1]
Q	Wassermenge	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
A	voll durchströmte Querschnittsfläche	$[\text{m}^2]$
Δh_p	Druckhöhenunterschied	[m]
l	Fließlänge	[m]

Bewertung

Ein Durchströmungsversuch ist ein einfacher, schneller und kostengünstiger Versuch, um die vertikale Gesteinsdurchlässigkeit orientierend zu untersuchen. Auch wenn sich gezielt Klüfte erbohren und längere Kernstrecken untersuchen lassen, kann der Durchströmungsversuch die Heterogenität und das Gesamt-Kluftsystem eines natürlichen Gebirgsverbandes nicht erfassen.

Durchströmungsversuche sollten daher nur ergänzend und in Kombination mit geohydraulischen Feldversuchen oder Bohrloch-Versuchen eingesetzt werden.

5.3.3. Diffusionsversuche

Grundlegende Literatur

- Aromaa, H., Voutilainen, M., Ikonen, J., Yli-Kaila, M., Poteri, A., Siitari-Kauppi, M. (2019): *Through diffusion experiments to study the diffusion and sorption of HTO, ^{36}Cl , ^{133}Ba and ^{134}Cs in crystalline rock. Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 222, pp. 101-111, Elsevier.*
- García Gutiérrez, M., Cormenzana, J. L., Missana, T., Mingarro, M., Molinero, J. (2006): *Overview of laboratory methods employed for obtaining diffusion coefficients in FEBEX compacted bentonite. Journal of Iberian Geology, 32(1).*
- Muuri, E., Siitari-Kauppi, M., Matara-aho, M., Ikonen, J., Lindberg, A. Qian, L., Koskinen, L. (2017): *Cesium sorption and diffusion on crystalline rock: Olkiluoto case study. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 311(1), pp. 439–446, Springer.*
- Tachi, Y., Ebina, T., Takeda, C., Saito, T., Takahashi, H., Ohuchi, Y., Martin, A. J. (2015): *Matrix diffusion and sorption of Cs^+ , Na^+ , I^- and HTO in granodiorite: Laboratory-scale results and their extrapolation to the in situ condition. Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 179, pp. 10-24, Elsevier.*
- Van Loon, L. R., Soler, J. M. (2003a): *Diffusion of HTO, ^{36}Cl , ^{125}I and $^{22}\text{Na}^+$ in Opalinus Clay: Effect of confining pressure, sample orientation, sample depth and temperature. Nagra Technical Report 03-07.*
- Van Loon, L. R., Soler, J. M., Jakob, A., Bradbury, M. H. (2003b): *Effect of confining pressure on the diffusion of HTO, Cl^{-36} and I^{-125} in a layered argillaceous rock (Opalinus Clay): Diffusion perpendicular to the fabric. Applied Geochemistry 18, pp. 1653 - 1662.*
- Van Loon, L. R., Soler, J. M., Müller, W., Bradbury, M. H. (2004a): *Anisotropic diffusion in layered argillaceous rocks: A case study with Opalinus Clay. Environmental Science & Technology 38, pp. 5721 - 5728.*
- Van Loon, L. R., Wersin, P., Soler, J. M., Eikenberg, J., Gimmi, T., Hernan, P., Dewonck, S., Savoye, S. (2004b): *In situ diffusion of HTO, $^{22}\text{Na}^+$, Cs^+ and I^- in Opalinus Clay at the Mont Terri underground rock laboratory. Radiochimica Acta 92, pp. 757 - 763.*
- Van Loon, L. R., Müller, W., Iijima, K. (2005a): *Activation energies of the self-diffusion of HTO, $^{22}\text{Na}^+$ and ^{36}Cl in a highly compacted argillaceous rock (Opalinus Clay). Applied Geochemistry 20, pp. 961 - 972.*
- Van Loon, L. R., Baeyens, B., Bradbury, M. H. (2005b): *Diffusion and retention of sodium and strontium in Opalinus clay: Comparison of sorption data from diffusion and batch sorption measurements, and geochemical calculations. Applied Geochemistry 20, pp. 2351 - 2363.*
- Van Loon, L. R., Glaus, M. A., Müller, W. (2007): *Anion exclusion effects in compacted bentonites: Towards a better understanding of anion diffusion. Applied Geochemistry 22, pp. 2536 - 2552.*
- Wigger C, Kennell-Morrison L, Jensen M, Glaus M, Van Loon L. (2018): *A comparative anion diffusion study on different argillaceous, low permeability sedimentary rocks with various pore waters. Applied Geochemistry 92, 157.*

Nachfolgend werden verschiedene laborative Messmethoden zur Bestimmung des effektiven Diffusionskoeffizienten aufgeführt, welche derzeit auch in der internationalen Endlagerforschung (z. B. durch die Nagra in der Schweiz) Anwendung finden.

Kurzbeschreibung der Methoden

Messprinzip und technische Ausführung

Der **Durchdiffusionsversuch** ist eine gängige Messmethode, wodurch mit Hilfe einer Diffusionszelle der Fluss und die Menge eines Stoffes in Lösung, der während eines Zeitintervalls durch eine Gesteinsprobe diffundiert, gemessen werden. Hierfür wird eine Diffusionszelle verwendet, welche aus mindestens zwei Kammern besteht, die durch die Gesteinsprobe getrennt sind. Die Kammern sind mit einer Lösung gefüllt (echtes bzw. meist synthetisches Porenwasser), welche im chemischen Gleichgewicht mit dem Gestein steht. In die Lösung einer Kammer wird dann eine bestimmte Menge an Tracer zugegeben. Durch die Überwachung der Lösung ohne Tracer wird die Diffusion des gelösten Stoffes als Funktion der Zeit gemessen (Van Loon & Soler 2003a).

In einer Variante dieser Messmethode wird nach Zugabe des Tracers die Konzentration nicht konstant gehalten und der Verlauf der Konzentration in beiden Kammern gemessen.

In einer weiteren Versuchsvariante wird die Konzentration in der tracergefüllten Kammer konstant gehalten werden, bis der stationäre Zustand der Diffusion erreicht wird.

Ausdiffusionsversuche sind gängige instationäre Messmethoden und werden mit der gleichen Apparatur wie Durchdiffusionsversuche durchgeführt. Sobald in einem Durchdiffusionsexperiment ein stationärer Zustand erreicht wird, werden die Lösungen in beiden Behältern durch synthetisches Porenwasser ohne Tracer ersetzt. In bestimmten Zeitabständen wird die Konzentration in den Lösungen gemessen und die Lösungen durch neue ersetzt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis die Ionen aus den Proben herausdiffundiert sind (Van Loon & Soler 2003a).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Die Diffusionsversuche eignen sich für die laborative Bestimmung des Flusses der untersuchten Spezies durch die Gesteinsprobe als Funktion der Zeit. Anhand dessen kann der effektive Diffusionskoeffizient bestimmt werden.

Auswertung

Bei der Auswertung des **Durchdiffusionsversuches** werden der Fluss und die diffundierte Gesamtmasse über die Zeit aufgetragen. Sobald der Gleichgewichtszustand des Diffusionsprozesses erreicht ist, kann die diffundierte Gesamtmasse als lineare Funktion der Zeit analytisch bestimmt werden.

Bei der Auswertung des **Ausdiffusionsversuches** wird die Entwicklung des Konzentrationsprofils als Funktion der Zeit aufgetragen und über die diffusiven Flüsse der effektive Diffusionskoeffizient analytisch bestimmt.

Die ausführlichen mathematischen Herleitungen hierzu werden in Van Loon & Soler (2003a) beschrieben.

Bewertung

Methoden zur Messung des Diffusionskoeffizienten (sowohl des effektiven als auch des scheinbaren) können sowohl stationär und instationär durchgeführt werden. Instationäre Verfahren sind

experimentell einfacher durchführbar, während stationäre Verfahren in der Regel eine viel längere Versuchszeit erfordern (García Gutiérrez et al. 2006).

Diffusionsversuche bilden die natürlichen, diffusiven Transportvorgänge gut ab, sofern die Zusammensetzung der Lösung der des Grundwassers entspricht. Zu beachten sind hierbei die langen Versuchszeiten, welche mehrere Monate betragen können.

Diffusionsversuche werden häufig auch zur simultanen Bewertung der Sorption herangezogen. Hierbei besteht generell Bedarf, diese Methoden weiterzuentwickeln, um das Verständnis hinsichtlich der ablaufenden Sorptionsprozesse zu verbessern.

5.3.4. Tomographie

Grundlegende Literatur

Chen, Q., Kinzelbach, W. (2002): *An NMR study of single- and two-phase flow in fault gouge filled fractures. Journal of Hydrology. 25, pp. 236-245.*

Degeldre, C., Pleinert, A., Maguire, P., Lehmann, E., Missimer, J., Hammer, J., Leenders, K., Böck, H., Townsend, D. (1996): *Porosity and pathway determination in crystalline rock by positron emission tomography and neutron radiography. Earth and Planetary Science Letters 140, pp. 213 - 225.*

Goethals, P., Volkaert, A., Jacobs, P., Roels, S., Carmeliet, J. (2009): *Comparison of Positron Emission Tomography and X-Ray radiography for studies of physical processes in sandstone. Engineering Geology 103, pp. 134 - 138.*

Radon, J. (1917): *Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. Mathematisch-Physische Klasse 69, pp. 262 - 277.*

Richter, M., Gründig, M., Seese, A. (2003): *Transport Modelling of Aqueous Solutions in Clay and Clay Rock Using the Data of PET Studies. Jahresbericht. Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung (IIF) Leipzig, pp. 97 - 102.*

Schikora, J., *Simulation of diffusion-adsorption processes in natural geological media by means of COMSOL Multiphysics, in Faculty of mechanical Science and Engineering. 2012, Dresden Technical University, Dresden.*

Wernick, M. N., Aarsvold, J. N. (2004): *Emission Tomography – The Fundamentals of PET and SPECT. Amsterdam: Elsevier Academic Press.*

Wolf, M. H. (2011): *Visualisierung und Quantifizierung der Fluidynamik in Bohrkernen aus dem Salinar und Deckgebirge des Raumes Staßfurt mittels Positronen-Emissions-Tomographie. Dissertation. Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig, Leipzig.*

Kurzbeschreibung der Methoden

Messprinzip und technische Ausführung

Die Tomographie wird in der Geowissenschaft als ein zerstörungsfreies, bildgebendes Verfahren eingesetzt, welches es ermöglicht, innere Strukturen von Gesteinen durch die Aufnahme von vielen Einzelschichten als Schnittbilder (Tomogramme) darzustellen. Die mathematischen Grundlagen der tomographischen Messmethoden gehen ursprünglich auf Radon (1917) zurück. Neben

den großräumigen Feldmethoden, wie z. B. bei Messmethoden der Geoelektrik (s. Abschnitt 5.2.1.1) und Seismik (s. Abschnitt 5.2.1.3), wird die Tomographie auch im kleinräumigen Labormaßstab an Bohrkernen eingesetzt, um transportrelevante Messgrößen zu ermitteln. Im Unterschied zu den klassischen Durchströmungsversuchen (s. Abschnitt 5.3.2), welche keine Rückschlüsse auf die Heterogenität der Gesteinsproben zulassen, lässt sich mittels tomographischer Messmethoden die räumlich differenzierte Verteilung von Messgrößen darstellen. Auch hier kann jedoch durch das geringe Probenvolumen die Heterogenität und das Gesamt-Kluftsystem eines natürlichen Gebirgsverbandes nicht erfasst werden.

Es kommen folgende Methoden zum Einsatz:

- Magnetresonanztomographie (MRT)/Nuklear Magnetische Resonanz (NMR),
- elektrische Widerstandstomographie (ERT),
- Computertomographie (CT),
- Emissionscomputertomographie (ECT)
 - Einzelphotonen-Emissions-Tomographie (SPECT),
 - Positronen Emissionstomographie (PET)

Messgrößen und Anwendungsgebiet

Mit Hilfe der **Nuklear Magnetischen Resonanz (NMR)** werden die inneren Strukturen anhand unterschiedlicher Wassergehalte mit einer Auflösung im Mikrometerbereich abgebildet (s. Abschnitt 5.2.2.1.4). Um die Fluidynamik mittels Tracer sichtbar zu machen, sind hier große Mengen an Tracer notwendig, welche zudem ferromagnetische Eigenschaften aufweisen müssen.

Die **elektrische Widerstandstomographie (ERT)** misst den spezifischen elektrischen Widerstand (bzw. die elektrische Leitfähigkeit als Kehrwert), welcher abhängig ist von den Porenraumeigenschaften (Porosität, elektrischer Widerstand des Porenfluids, Sättigungsgrad, Tongehalt, etc.). Aus diesen gewonnenen Messgrößen wird tomographisch deren räumliche Verteilung rekonstruiert. Bei Messungen an Steinsalz und dessen hochsalinaren Lösungen liefert diese Methode jedoch keine eindeutigen Ergebnisse.

Bei der **Computertomographie (CT)** wird das zu untersuchende Objekt aus vielen Richtungen mittels Röntgenstrahlung durchleuchtet. Die Abbildung von internen Strukturen erfolgt dann anhand unterschiedlicher Dichteverteilungen durch die Messung von Absorptionsprofilen des zu untersuchenden Gesteins mit einer Auflösung im Mikrometerbereich. Mit dieser Methode lassen sich auch Strömungsprozesse darstellen, jedoch benötigt man eine größere Menge eines Tracers, welcher eine signifikant unterschiedliche Dichte zum umgebenden Material aufweisen muss.

Die **Emissionscomputertomographie (ECT)** ist ein funktionelles bildgebendes Verfahren, welches die Verteilung eines injizierten radioaktiven Isotops abbildet. Die Verteilung und zeitliche Entwicklung der Strahlung, die vom Tracer ausgesendet wird, wird räumlich aufgelöst erfasst und ermöglicht so die Darstellung der Strömungsverteilung und die orts aufgelöste Berechnung hydrodynamischer Parameter. Hierbei ist insbesondere die **Positronen Emissionstomographie (PET)** hervorzuheben wobei ein mit einem Positronenstrahler markierter Stoff in die Gesteinsprobe injiziert wird. Damit kann die PET die Strömungsverteilung innerhalb einer Gesteinsprobe sowohl hochauflösend als auch mit nur geringer Beeinflussung des untersuchten Systems abbilden. In Verbindung mit der tomographischen Erfassung der inneren Struktur der Gesteinsprobe, kann die Konzentrationsverteilung auch bei komplizierten, heterogenen Strukturen erfasst und die Fluidynamik dargestellt werden (Wolf 2011). Dieses Verfahren liefert somit gegenüber konventionellen Säulenversuchen detaillierte Informationen zur Geschwindigkeitsverteilung, der effektiven Porosität, präferenzierter Fließpfade und somit auch zur Tortuosität. Die **Einzelphotonen-Emissions-**

Tomographie (SPECT) funktioniert auf ähnliche Weise wie die PET, erreicht aber weder deren räumliche Auflösung noch Sensitivität.

Auswertung

Die eindimensionalen Projektionen werden bei den meisten tomographischen Messmethoden computergestützt mittels inverser Radontransformation (Radon 1917) als zweidimensionale Schnittbilder dargestellt. Das Aneinanderreihen mehrerer benachbarter zweidimensionaler Schnittbilder ergibt ein dreidimensionales Bild.

Bewertung

Der Einsatz der Tomographie im Labormaßstab ist eine zerstörungsfreie Messmethode, um sowohl die innere Struktur eines Bohrkernes als auch die Transportprozesse innerhalb von Bohrkernen sichtbar zu machen. Die Anwendung der Tomographie im Rahmen von großskaligen Feldversuchen besitzt im Wesentlichen einen orientierenden Charakter. Bei der Untersuchung von Bohrkernen können, unter Berücksichtigung der Heterogenität, detaillierte Informationen zu den transportrelevanten Messgrößen wie Gesteinsdurchlässigkeit, effektive Porosität und Tortuosität der jeweiligen Gesteinsprobe sowie zu Diffusionsvorgängen innerhalb der Gesteinsprobe erhalten werden. Diese Messmethode liefert somit auch umfassende Eingangsgrößen zur Berechnung komplexer Fluid- und Stofftransportprozesse.

5.3.5. Methoden zur Bestimmung der Porosität

Grundlegende Literatur

DIN ISO 15901-1 (2019): Bewertung der Porengrößenverteilung und Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption - Teil 1: Quecksilberporosimetrie. Beuth Verlag, Berlin.

de Oliveira, G. L. P., Ceia, M. A. R., Missagia, R. M., Archilha, N. L., Figueiredo, L., Santos, V. H., Neto, I. L. (2016): Pore volume compressibilities of sandstones and carbonates from Helium porosimetry measurements. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 137, pp. 185-201, Elsevier.

Ritter, H. L., Drake, L. C. (1945): Pore-Size Distribution in Porous Materials. Pressure Porosimeter and Determination of Complete Macropore-Size Distributions. Ind. Eng. Chem. Anal. Ed. 1945, Vol. 17(12), pp. 782-786. DOI: <https://doi.org/10.1021/i560148a013>.

Sun, J., Dong, X., Wang, J., Schmitt, D. R., Xu, C., Mohammed, T., Chen, D. (2016): Measurement of total porosity for gas shales by gas injection porosimetry (GIP) method. Fuel, Volume 186, pp. 694-707, ISSN 0016-2361, Elsevier.

Washburn, E. W. (1921): The Dynamics of Capillary Flow. Phys. Rev. Vol. 17(3), 273. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>.

Zhang, K., Pang, Z., Zhao, Z., Shao, X., Zhang, X., Li, W., Wang, K. (2018): Pore structure and fractal analysis of Lower Carboniferous carbonate reservoirs in the Marsel area, Chu-Sarysu basin. Marine and Petroleum Geology, Vol. 93, pp. 451-467, Elsevier.

Zhang, N., He, M., Zhang, B., Qiao, F., Sheng H., Hu, Q. (2016): Pore structure characteristics and permeability of deep sedimentary rocks determined by mercury intrusion porosimetry. Journal of Earth Science, Vol. 27(4), pp. 670-676, Springer.

Kurzbeschreibung der Methoden

Messprinzip und technische Ausführung

Gängige Methoden zur Bestimmung der effektiven Porosität sind die

- Auftriebswägung,
- Pulver- und Gaspyknometrie und die
- Quecksilber-Porosimetrie.

Auch die optische, computergestützte Bestimmung der absoluten Porosität an Dünnschliffen einer Gesteinsprobe findet Anwendung in der gängigen Laborpraxis. Hierbei können zudem mit Hilfe von Kontrastmitteln unterschiedliche Porenstrukturen sowie Mineralanteile sichtbar gemacht werden.

Bei der **Auftriebswägung** wird das Archimedische Prinzip zunutze gemacht, indem die verschiedenen Gewichtszustände der Probe (Trockengewicht (m_d), Nassgewicht (m_w) sowie Auftriebsgewicht (m_a)) bestimmt werden. Zur Sättigung der Gesteinsprobe können verschiedene poren-sättigende Medien zum Einsatz kommen (z. B. demineralisiertes Wasser, Isopropanol).

Mittels **Gaspyknometer** können zerstörungsfrei das Volumen und die Dichte der Gesteinsprobe ermittelt werden, indem bei definiertem Druck und Temperatur das in ein genormtes Gefäß strömende Gasvolumen gemessen wird. Als Verdrängungsmittel werden inerte Gase, wie z. B. Helium oder Stickstoff, verwendet. Anhand des Gas- und Gefäßvolumens werden dann das Reinvolumen (ohne Porenräume) sowie die Reindichte (auch absolute Dichte genannt) berechnet. Zur weiteren Bestimmung der effektiven Porosität wird mittels **Pulverpyknometer** das Rohvolumen (mit Porenräumen) der Probe ermittelt. In einer Nullmessung wird zunächst das Volumen eines flüssigkeits-ähnlichen Pulvers mit enger Korngrößenverteilung bestimmt, indem dieses Pulver in einem Messzylinder mit einer definierten Kraft durch einen Kolben komprimiert wird. Anschließend wird die Probe mit dem Pulver zusammen bei gleicher Kraft komprimiert.

Bei der **Quecksilber-Porosimetrie** wird die Porengrößenverteilung einer Gesteinsprobe ermittelt. Unter Vakuum wird Quecksilber in die Poren der Gesteinsprobe gedrückt, welches im Laufe der Messung mit zunehmendem Druck in immer kleinere Poren eindringt, diese dabei aber nicht benetzt. Das Volumen des eindringenden Quecksilbers wird in Abhängigkeit vom Druck aufgenommen. Erreicht der Druck eine zuvor definiert Maximalgrenze, wird dieser wieder abgesenkt und das Volumen des ausströmenden Quecksilbers gemessen (Ritter & Drake 1945).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Die Porosität der Proben wird anhand der gemessenen Volumina, Dichten und Massen bestimmt. Die Messmethoden basieren somit grundsätzlich auf dem Zusammenhang zwischen dem Porenanteil und dem Volumen V bzw. der Dichte der Gesteinsprobe.

Auswertung

Die Bestimmung der effektiven Porosität anhand der **Auftriebswägung** erfolgt über die verschiedenen Gewichtszustände der Probe:

$$n_e = \frac{m_w - m_d}{m_w - m_a} \quad (5-33)$$

mit

n_e	effektive Porosität	[1]
m_w	Nassgewicht	[kg]

m_d	Trockengewicht	[kg]
m_a	Auftriebsgewicht	[kg]

Bei der Bestimmung mittels **Pulverpyknometer** wird die Differenzstrecke Δx der Komprimierung zwischen Nullmessung und der Messung mit Probe ermittelt und daraus das Rohvolumen der Probe V_{Roh} über das Messzylindervolumen bestimmt. Anhand des Reinvolumens V_{Rein} der Probe aus der Messung mittels **Gaspyknometer** wird die effektive Porosität für das verwendete Gas (Helium oder Stickstoff) wie folgt berechnet (Hornung & Aigner 2004):

$$n_e = \frac{(r^2 \cdot \pi \cdot \Delta x) - V_{Korn}}{(r^2 \cdot \pi \cdot \Delta x)} = \frac{V_{Roh} - V_{Rein}}{V_{Roh}} \quad (5-34)$$

mit

n_e	effektive Porosität (für verwendetes Gas)	[1]
r	Radius des Messzylinders	[m]
Δx	Differenzstrecke der Komprimierung	[m]
V_{Rein}	Reinvolumen	[m ³]
V_{Roh}	Rohvolumen	[m ³]

Für die **Quecksilber-Porosimetrie** gilt unter der vereinfachten Annahme, dass sich ein poröser Körper wie eine Ansammlung von sehr kleinen zylindrischen Kapillaren verhält, in welche das Quecksilbervolumen in der Zeit t eindringt, hier grundlegend die WASHBURN-Gleichung (Washburn 1921):

$$\Delta p = \frac{-2\varphi_{Hg} \cos\theta}{r} \quad (5-35)$$

mit

Δp	Druck	[Pa]
φ_{Hg}	Oberflächenspannung des Quecksilbers	[N·m ⁻¹]
θ	Benetzungswinkel	[°]
r	Porenradius	[µm]

Hieraus können die den jeweiligen Drücken entsprechenden Porenradien berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Kapillarräume in der Probe nicht, wie vereinfachend angenommen, zylindrisch aufgebaut sind, sondern erweiterte und verengte Bereiche aufweisen. Bei der Quecksilber-Porosimetrie kann somit eine große Pore mit vergleichsweise kleinerem Porenhals erst dann befüllt werden, wenn der erforderliche Druck den kleinen Porenhalsdurchmesser überwunden hat. Mit der Quecksilber-Porosimetrie lassen sich somit Porenradienverteilungen, die aufgrund dieser Beschränkung in Richtung der kleinen Durchmesser verschoben sind, messen, bzw. eine Verteilung der durchflussbegrenzenden Porenhalsdurchmesser ableiten (Ritter & Drake 1945). Mit dieser Methode werden alle Poren erfasst, die mindestens in eine Richtung offen sind, also auch sogenannte Sackporen (*Dead-End-Poren*), welche für den Fluidtransport jedoch nicht relevant sind.

Bewertung

Die Auftriebsswägung, Pulver- und Gaspyknometrie und die Quecksilber- porosimetrie stellen Standardmethoden bei der Ermittlung von Porositäten bzw. Porenradienverteilungen an Bohrkernproben dar.

Eine umfassende Charakterisierung des Porenraums wird insbesondere mit der Kombination von quantitativen Messmethoden der Porosimetrie und den tomographischen Analysen, die eine räumlich differenzierte Verteilung der Porenräume ermitteln können, erzielt.

6. Messmethoden zur Hydrogeochemie

Grundlegende Literatur

Camman, K. (Hrsg.) (2001): *Instrumentelle Analytische Chemie. Verfahren, Anwendungen, Qualitätssicherung*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.

Ehlers, E. (2015): *Analytik II - Kurzlehrbuch: Quantitative und Instrumentelle Pharmazeutische Analytik (Wissen und Praxis)*. 12. Auflage, Deutscher Apotheker Verlag.

GDCh (Hrsg.) (2018): *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Physikalische, chemische, biologische und bakteriologische Verfahren*. Wasserchemische Gesellschaft in der GDCh, DIN (Hrsg.), Beuth, WILEY-VCH.

Harrie, D. C. (2014): *Lehrbuch der Quantitativen Analyse*. 8. Auflage, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.

Larue, J., Weyand, T., Mayer, K.-M. (2016): *Untersuchungen zum Transportverhalten von Schadstoffen in Süß- /Salzwassersystemen unter Berücksichtigung von Dichteunterschieden*. GRS - 436. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH.

Mortimer, E. C., Müller, U. (2015): *Chemie: Das Basiswissen der Chemie*. 12. Auflage, Thieme-Verlag.

Die chemische Beschaffenheit des Grundwassers inklusive der Isotopenzusammensetzung ist u. a. abhängig von der Beschaffenheit des infiltrierenden Niederschlagswassers, den Wechselwirkungen mit den durchströmten Gesteinsformationen und möglichen Mischungen mit Grundwässern anderer Zusammensetzung (Jobmann et al. 2016) sowie mikrobieller Aktivität. Anhand der hydrochemischen und isotopengeochemischen Charakterisierung der Grundwässer im Rahmen der übertägigen Erkundung lassen sich Aussagen zur Herkunft (inklusive Ausschluss) der Grundwässer bzw. Quantifizierung von Zuflüssen aus dem Deck- und Nebengebirge, zur Verweilzeit im Untergrund und weiterer geochemischer Besonderheiten treffen. Dies erlaubt wiederum nähere Aussagen über eine mögliche hydraulische Verbindung zwischen unterschiedlichen Grundwasserleitern, die Einteilung in die regionalen Grundwasserströmungsverhältnisse sowie die Bestimmung der zeitlichen und chemischen Randbedingungen für mögliche Stofftransporte innerhalb der Wirt- und Nebengesteine (Jobmann et al. 2016).

Chemische Grundwasseruntersuchungen werden im Rahmen der übertägigen Standorterkundung durchgeführt, um entsprechend der Anforderungen des StandAG (2017) die Beschaffenheit des Grundwassers in seiner räumlichen Verbreitung und seiner zeitabhängigen Veränderung zu ermitteln sowie unterschiedliche Grundwasserleiter abzugrenzen und hydraulische Verbindungen zu identifizieren. Mittels hydrochemischer Messmethoden werden somit z. B. hydrochemische Messgrößen wie elektrische Leitfähigkeit, pH- und Eh-Wert, Salinität, Ionenstärke, Isotopenverhältnisse sowie Dichte und Viskosität des Fluides ermittelt. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungsmethoden, welche aufgrund ihrer prinzipiellen Funktionsweise in Methodengruppen (Spektrometrie, Chromatographie, etc.) eingeteilt werden können. Für geringdurchlässige Gesteinseinheiten, aus welchen im Feld keine ausreichenden Mengen an Wasser gewonnen werden können, müssen andere Methoden zur Extraktion und Analyse der Porenwässer zum Einsatz kommen. Diese Methoden werden gesondert in Abschnitt 6.2.7 beschrieben.

Für die Durchführung der Messmethoden zur Hydrochemie in Feld und Labor nach aktuellem Stand von W+T existieren zahlreiche Normen und Regelwerke, welche gesammelt von der GDCh

(2018) herausgegeben werden. Aufgrund der Vielzahl der geltenden Normen wird im Rahmen dieses Berichtes daher auf dieses Sammelwerk in seiner aktuellen Version verwiesen.

Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Labor-Methoden sowie deren physikalische und messtechnische Hintergründe wird an dieser Stelle auf die allgemeine Standardliteratur wie z. B. Camman (2001), Ehlers (2015) oder Mortimer & Müller (2015) verwiesen. Weitere methodenspezifische Literatur wird, wo erforderlich, zu Beginn der nachfolgenden Abschnitte aufgeführt.

Die nachfolgende Darstellung der verschiedenen Messmethoden im Feld und im Labor fasst die Beschreibung und Grenzen der Methoden im Vergleich zu den geohydraulischen und geophysikalischen Messmethoden kompakter zusammen. Aussagen z. B. zu Reichweite oder Beeinflussung nachfolgender Messungen entfallen bei den Messmethoden zur Hydrogeochemie.

6.1. Messmethoden im Feld

Bei der Feld-Analytik handelt es sich um Methoden, mit denen unter relativ geringem Aufwand und ohne eingerichtetes Labor quantitative oder semiquantitative Aussagen zur Grundwasserbeschaffenheit gewonnen werden können. Da Messmethodik und Technik der Probenahme sowie anschließender Probentransport die Beschaffenheit der Grundwasserprobe beeinflussen können (s. Abschnitt 8.2.3), liefert die Feld-Analytik erste und teilweise unentbehrliche Aussagen zu den relevanten Messgrößen.

Zu den Vor-Ort-Messgrößen, welche im Feld mit genügender Genauigkeit messbar sind, zählen

- der pH-Wert,
- die elektrische Leitfähigkeit,
- das Redoxpotenzial,
- die Wassertemperatur,
- der Sauerstoffgehalt,
- gelöste Gase (z. B. CO₂, H₂S) sowie
- eine organoleptische Prüfung.

Der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und das Redoxpotenzial werden mit Hilfe verschiedener Elektroden gemessen, welche an das Messgerät angeschlossen werden und so nach geeigneter Kalibration ein direktes Ablesen der Messgrößen ermöglichen. Sauerstoffmessungen können z. B. mittels einer elektrometrischen Sauerstoffsonde (DIN EN 5814) oder Sonden mit optischen Sensoren (DIN ISO 17289) durchgeführt werden. Die standardmäßige Bestimmung dieser Messgrößen sowie der Temperatur ist in GDCh (2018) festgelegt. Bei der pH-Wert-Messung von hochsalinaren Lösungen muss berücksichtigt werden, dass die gemessenen pH-Werte aufgrund der hohen Ionenstärke der Lösung und des daraus resultierenden hohen Diffusionspotenzials an der Elektrode nicht dem tatsächlichen pH-Wert entsprechen (Zimmer 2003). Bei der Messung des pH-Wertes in hochsalinaren Lösungen nach der konventionellen Methode befindet man sich somit nicht mehr im definierten Verfahren gemäß DIN 19268 (1985). Die Messfehler bei der pH-Wert-Messung in Lösungen mit hoher Ionenstärke können beispielsweise durch die Wahl geeigneter Elektroden und den Salzen angepassten Pufferlösungen reduziert werden. Zusätzlich muss auch eine Korrektur des gemessenen pH-Werts mit Hilfe der Konzentration der Salze durchgeführt und stattdessen der sogenannte pH_m-Wert angegeben werden (Eichholtz 2005).

Für den Feldeinsatz zur Quantifizierung von Wasserinhaltsstoffen (Anionen, Kationen) sind ionensensitive Sonden nur bedingt geeignet, da ein hoher Aufwand für das Warten und Eichen der Sonden betrieben werden muss und diese meist schlag- und stoßempfindlich sind. Gleichzeitig liegen die zu bestimmenden Inhaltsstoffe im Grundwasser in der Regel in sehr geringen Konzentrationen

vor. Auch der Einfluss von Störionen kann zu erheblichen Messfehlern führen (Gräber 2005). Die Genauigkeit der vor Ort ermittelten Wasserinhaltsstoffe ist somit nur bedingt mit der aus der Labo-
analytik vergleichbar.

6.2. Messmethoden im Labor

6.2.1. Spektroskopie/Spektrometrie

Grundlegende Literatur

- Aosai, D., Saeki, D., Iwatsuki, T., Matsuyama, H. (2015): *Concentration and characterization of organic colloids in deep granitic groundwater using nanofiltration membranes for evaluating radionuclide transport. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 485, pp. 55 - 62, Elsevier.
- Bitea, C. (2005): *Laser-induzierte Breakdown Detektion (LIBD): Quantifizierung der Kolloidbildung vierwertiger Actiniden und Homologen. Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7083, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Karlsruhe.*
- Bundschuh, T., Kim, J.-I. (1999): *Entwicklung und Anwendung der Laser-induzierten Breakdown-Detektion zur Quantifizierung aquatischer Kolloide und Actinidenkolloide. FZKA 6273, FZ Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik, Karlsruhe.*
- Bundschuh T., Wagner T. U., Köster R. (2005a): *Laser-induced Breakdown Detection (LIBD) for the Highly Sensitive Quantification of Aquatic Colloids. Part I: Principle of LIBD and Mathematical Model. Particle & Particle Systems Characterization* 22, pp. 172 - 180.
- Bundschuh T., Wagner T. U., Köster R. (2005b): *Laser-induced Breakdown Detection (LIBD) for the Highly Sensitive Quantification of Aquatic Colloids. Part II: Experimental Setup of LIBD and Applications. Particle & Particle Systems Characterization* 22, pp. 181 - 191.
- Calvin, S. (2013): *XAFS for everyone. 1st Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group.*
- Hein, H., Kunze, W. (2004): *Umweltanalytik mit Spektrometrie und Chromatographie. Von der Labor-gestaltung bis zur Dateninterpretation. 3. Auflage. Wiley-VCH, Weinheim.*
- Hetzer, B. (2009): *Methodische Weiterentwicklung der Laser-induzierten Breakdown-Detektion (LIBD) und ihre Anwendung auf kolloidchemische Fragestellungen. Dissertation, Universität Regens-burg.*
- Manceau, A., Marcus, M. A., Tamura, N. (2002): *Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. In: Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. P. Fenter and N.C. Sturchio, Eds. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America, Washington, DC., Vol. 49, pp. 341 - 428.*
- Mayerhöfer, T. G., Popp, J. (2018): *Beer's Law – Why Absorbance Depends (Almost) Linearly on Con-centration. ChemPhysChem* Vol. 20, pp. 511– 515.
- Schnurr A., Marsac R., Rabung T., Lützenkirchen J., Geckeis H. (2015): *Sorption of Cm(III) and Eu(III) onto clay minerals under saline conditions: Batch adsorption, laser-fluorescence spectroscopy and modeling. Geochim. Cosmochim. Acta* 151, pp. 192 - 202.
- Teo, B. K., Joy D. C. (1981): *EXAFS Spectroscopy - Techniques and Applications. Springer US.*

Kurzbeschreibung der Methoden

Messprinzip und technische Ausführung

Die Spektroskopie und Spektrometrie haben sich in den modernen Laboreinrichtungen zu einer Routinespurenanalytik etabliert. Die Spektroskopie umfasst Methoden, welche die gemessenen Substanzen (Analyten) qualitativ nachweist. Die Spektrometrie erweitert die Spektroskopie durch eine zusätzliche quantitative Auswertung, indem Spektrometer mithilfe von Standards bekannter Konzentrationen auf die jeweiligen Analyten kalibriert werden.

Bis heute wurden sehr viele verschiedene qualitativ-analytische und quantitativ-analytische Methoden entwickelt, mithilfe derer sowohl Element- als auch Molekül- bzw. Ionenanalysen durchgeführt werden können.

Gängige Methoden der Elementanalytik sind:

- Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)
- Atomemissionsspektroskopie (AES)
- Atomfluoreszenzspektroskopie (AFS)
- Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)
- (synchrotron-basierte) Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS)
- Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)
- Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP OES)

Gängige Methoden der Molekülanalytik sind:

- UV/vis-Absorption
- Fluoreszenzspektrometrie
- Kernspinresonanzspektroskopie (NMR)
- Infrarotspektrometrie (IR)
- Massenspektrometrie (MS)
- Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP MS)
- Laser-induzierte Breakdown-Detektion (LIBD)

Messgrößen und Anwendungsgebiet

Hauptsächlich dient die Spektrometrie der laborativen Untersuchung von festen und flüssigen Proben und gibt Informationen über deren strukturellen Aufbau und qualitative Zusammensetzung. Auch quantitative Aussagen über die Zusammensetzung der Proben sind bei entsprechender Kalibration der Spektrometer über die Messung der Intensität der Strahlung bei unterschiedlichen Wellenlängen möglich.

Die Messmethoden sind im Hinblick auf die relevanten hydrochemischen Messgrößen für die Analyse der **Haupt- und Spurenelemente** in Grundwässern verschiedener Herkunft und Zusammensetzung (z. B. auch für Laugen und konzentrierte Salzlösungen) geeignet. Da die Absorption elektromagnetischer Wellen in wässriger Lösung in einem gewissen Konzentrationsbereich gemäß dem Lambert-Beer'schen Gesetz linear proportional zur Konzentration in Lösung ist (Mayerhöfer & Popp 2018), kann mittels spektrometrischer Methoden die **Ionenkonzentration** (Kationen, Anionen) ermittelt werden. Anhand von Gl. 4-16 lässt sich aus der Ionenkonzentration zudem auch die **Ionenstärke** der einzelnen Ionen ermitteln.

Die Kernspinresonanzspektroskopie (NMR), Infrarotspektrometrie und insbesondere die Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP MS) werden auch zur Bestimmung der **Isotopenzusammensetzung** des Grundwassers eingesetzt.

Mit Hilfe der laser-induzierten Breakdown-Detektion (LIBD) lassen sich **aquatische Kolloide** im Grundwasser quantitativ und mit Angabe des mittleren Kolloiddurchmessers bestimmen sowie, bei bekannter Dichte der Kolloide, auch die Massenkonzentration (Hetzer 2009).

Die synchrotron-basierte Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS) wird im Rahmen von Versuchen zum **Sorptionsverhalten** eingesetzt, um die Speziation von einzelnen chemischen Elementen zu bestimmen. Dies kann an Gasen, Flüssigkeiten oder Festphasen durchgeführt werden.

Die Röntgenabsorptionsspektroskopie wird in zwei Kategorien unterteilt, welche sich durch die verschiedenen Energiegebiete unterscheiden:

- Die EXAFS-Spektroskopie (*extended X-ray absorption fine structure*) wird in der chemischen Elementanalyse eingesetzt, um Aussagen über die Art des chemischen Elements sowie Informationen über die strukturelle Umgebung des Absorberatoms treffen zu können. In einzelnen Fällen können auch Aussagen darüber getroffen werden, wie geordnet ein System ist.
- Die XANES-Spektroskopie (*X-ray absorption near-edge structure spectroscopy*) liefert Informationen über die Oxidationsstufen, die elektronischen Zustände des untersuchten Atoms. Die Speziation ist durch Vergleiche mit Referenzen zu gewinnen. Der Detaillierungsgrad an Informationen dieser Methode hängt stark von der Energieauflösung der Spektren ab. Durch Kombination dieser Methode mit numerischen Modellierungen kann die Struktur der untersuchten unbekannt Phase bestimmt werden.

Für diese Messmethoden wurden verschiedene technische Verfeinerungen entwickelt:

- Die sogenannten P-EXAFS-Messungen nutzen die große Polarisierung des durch ein Synchrotron erzeugten Röntgenstrahls für Messungen von Proben mit einer Winkelabhängigkeit aus (z. B. Tonminerale).
- Werden Untersuchungen der Probenoberflächen benötigt, kann entweder die sogenannte „*grazing incidence EXAFS*“-Methode zur Anwendung kommen, oder, falls die Proben vakuumtauglich sind, die sog. Auger-Elektronen-Spektroskopie. Die „*grazing incidence EXAFS*“-Methode beprobt einige wenige Mikrometer der Probe, während in der Auger-Elektronen-Spektroskopie nur einige Nanometer der Probe zum Signal beitragen.

Diese beiden Varianten werden vor allem in den Materialwissenschaften eingesetzt. In umweltbasierten Fragestellungen wird der Röntgenstrahl der Röntgenabsorptionsspektroskopie in zwei unterschiedlichen Skalen eingesetzt (Vespa et al. 2006a, Vespa et al. 2007):

- Die Makro-Methode (bulk-XAS) setzt einen Röntgenstrahl im Wellenlängenbereich von mehreren hundert Mikrometer ein und kann auf feste, pulverartige oder flüssige Proben sowie Gase angewendet werden.
- Die Mikro-Methode (Mikro-XAS) verwendet einen Röntgenstrahl im Wellenlängenbereich von wenigen Mikrometern und erfordert polierte Dick- oder Dünnschliffe (> 30 Mikrometer). Die Mikro-XAS wird häufig in Kombination mit Röntgenfluoreszenz (Mikro-XRF) und Röntgendiffraktion (Mikro-XRD) eingesetzt (Vespa et al. 2018, Vespa et al. 2010, Dähn et al. 2014).

Mit Hilfe der Mikro-XRF können chemische Elementverteilungskarten aufgenommen werden, anhand derer charakteristische Regionen für genauere Untersuchungen ausgewählt werden können. Mittels Mikro-XRD können kristalline Phasen bestimmt werden (Dähn et al. 2016).

Die Nachweisgrenze der XAS liegt, in Abhängigkeit von der Probenmatrix, bei einigen wenigen bis einigen 100 ppm des untersuchten Elements.

Auswertung

Die Kalibrierungen und Auswertungen der gemessenen Absorptions- oder Emissionsspektren erfolgen automatisch mit Hilfe von Software.

Bewertung

Viele der hier vorgestellten Messmethoden aus dem Bereich der Spektrometrie haben sich als gängige Routineverfahren in Labors etabliert, deren Durchführung in verschiedenen Normen vorgeschrieben ist (DIN 2018). Die Reproduzierbarkeit der Messmethoden ist im Wesentlichen abhängig von der Probenahme (s. Abschnitt 8.2.3).

Wesentliche Vorteile dieser Messmethoden sind hierbei die große Bandbreite an bestimmaren Elementen sowie die hohe Nachweisempfindlichkeit der Geräte. In Tabelle 6-1 sind die wesentlichen Vor- und Nachteile der gängigsten Messmethoden aus dem Bereich Spektroskopie/Spektrometrie aufgeführt.

Tabelle 6-1: Übersicht der wesentlichen Vor- und Nachteile gängiger Messmethoden der Spektroskopie und Spektrometrie.

Messmethode	Vorteile	Nachteile
Atomabsorptions-spektroskopie (AAS)	große Bandbreite an bestimmaren Elementen	hohe spektrale Interferenzen möglich (Gefahr systematischer Fehler)
Atomemissions-spektrometrie (AES)	große Bandbreite an bestimmaren Elementen	hohe spektrale Interferenzen möglich (Gefahr systematischer Fehler)
Atomfluoreszenz-spektrometrie (AFS)	hohe Empfindlichkeit, hohes Nachweisvermögen, geringe spektrale Interferenzen, geringe Kosten, Einfachheit des Systems	Bandbreite zu ermittelnder Elemente begrenzt im Vergleich zu AAS und AES
Röntgenfluoreszenz-analyse (RFA)	Für alle Elemente (bis auf Helium und Wasserstoff) geeignet, nur geringe Probenmengen erforderlich, verbrauchsfrei	Analyse von Wasserproben aufwändiger im Vergleich zu Feststoffproben
(synchrotron-basierte) Röntgenabsorptions-spektroskopie (XAS)	Messung von Proben in festen, flüssigen oder gasförmigen Zuständen, Messung von kristallinen, amorphen oder semi-amorphen Proben möglich, hohe Nachweisgrenzen, Methode ist energiespezifisch (störende Elemente können ausgeblendet werden), sehr gut kombinierbar mit weiteren Labor-Messmethoden	hoher Zeitaufwand, um Strahlzeit am Synchrotron zu erhalten, Referenzmaterial erforderlich zur Kalibrierung
Laser-induzierte Break-down-Detektion (LIBD)	sehr hohe Nachweisempfindlichkeit im Vergleich zu anderen Methoden auf Basis der Laserlichtstreuung, Probenvorbereitung mit geringem Aufwand	zeitaufwändige Messung (sorgfältige Justierung und wiederholte Kalibrierungen erforderlich)
Neutronenaktivierungs-analyse (NAA)	chemisch ähnliche Elemente gut unterscheidbar durch Auswertung der Kerneigenschaften	an Neutronenquelle gebunden, u. U. lange Bestrahlungsdauern, lange Abklingzeiten limitieren NAA als Routinetechnik

Messmethode	Vorteile	Nachteile
Massenspektrometrie (MS) (mit induktivgekoppeltem Plasma (ICP))	MS in Verbindung mit induktivgekoppeltem Plasma (ICP) derzeit gängigste Methode der Wasseranalytik, geringe spektrale Interferenzen, quantitative Analyse der Analyten möglich (nach Kalibrierung), gleichzeitige Messung mehrerer Analyten, hoher Probendurchsatz, niedrige Nachweisgrenzen (im ppt-Bereich), großer Messbereich, hoch automatisierte Methode, Kopplung mit chromatographischen Methoden möglich	-

Durch die Kopplung mit chromatographischen Messmethoden wie z. B. Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) oder Gaschromatographie (GC) (s. Abschnitt 6.2.2) werden das Massenspektrum, die Differenzierung und die Genauigkeit der Messungen weiter verbessert. Verschiedene Kopplungstechniken unterliegen laufend der Weiterentwicklung und sind Gegenstand der aktuellen Forschung.

6.2.2. Chromatographie

Grundlegende Literatur

- Aosai, D., Saeki, D., Iwatsuki, T., Matsuyama, H. (2015): *Concentration and characterization of organic colloids in deep granitic groundwater using nanofiltration membranes for evaluating radionuclide transport. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 485, pp. 55 - 62, Elsevier.*
- Hein, H., Kunze, W. (2004): *Umweltanalytik mit Spektrometrie und Chromatographie. Von der Laborgestaltung bis zur Dateninterpretation. 3. Auflage. Wiley-VCH, Weinheim.*
- Jensen, D. (2013): *Modernste Trenntechnik - Grundlagen der Ionenchromatographie. Thermo Fisher Scientific.*
- Kozai, N., Ohnuki, T., Iwatsuki, T. (2013): *Characterization of saline groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan by SEC-UV-ICP-MS: Speciation of uranium and iodine. Water Research, Vol. 47(4), pp. 1570 - 1584.*
- Snyder, L. R., Kirkland, J., J., Dolan, J., W. (2009): *Introduction to Modern Liquid Chromatography. 3. Auflage, Wiley-VCH, ISBN 978-0-470-16754-0.*
- Weiß, J. (2001): *Ionenchromatographie. 3. Auflage, Wiley-VCH, ISBN 978-3527287024.*

Kurzbeschreibung der Methoden

Messprinzip und technische Ausführung

Die Chromatographie ist ein physikalisch-chemisches Trennverfahren, bei dem die zu trennenden Substanzen zwischen zwei nicht miteinander mischbaren Phasen verteilt werden: die stationäre Phase liegt fest vor, die mobile Phase bewegt sich entlang der stationären Phase (Camman 2001).

Die Trennung und Identifizierung von Stoffen erfolgt auf der Basis ihres unterschiedlichen Adsorptions-, Löslichkeits- oder Ionenaustauschverhaltens. Die den Gleichgewichtsprozess charakterisierende Konstante wird als Verteilungskoeffizient K_V bezeichnet, welcher definiert ist als das Verhältnis der Konzentration eines Stoffes in der stationären zur mobilen Phase. Stoffe mit einem hohen Verteilungskoeffizienten werden somit stärker zurückgehalten als solche mit einem geringen. Der Verteilungskoeffizient ist proportional zur Ionenladung.

Die Benennung chromatographischer Methoden beruht auf dem überwiegend vorliegenden Trennmechanismus. Gängige Methoden sind die

- Flüssigchromatographie (LC),
 - Ionen(austausch)chromatographie (IC),
 - Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC),
 - überkritische Fluidchromatographie (SFC).
- Gaschromatographie (GC),
- Dünnschichtchromatographie (DC).

Diese analytischen Verfahren werden häufig in Verbindung mit der Spektrometrie eingesetzt, um nach der chromatographischen Auftrennung der Moleküle eine Identifizierung und Quantifizierung dieser durchzuführen.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Im Hinblick auf die relevanten hydrochemischen Messgrößen lässt sich mit Hilfe der Chromatographie durch die laborative Bestimmung der **Ionenkonzentrationen** (Kationen, Anionen) auch die **Ionenstärke** ermitteln (s. Gleichung 4-16).

Auswertung

Die Auswertung erfolgt computergesteuert. Zur Auswertung wird das Detektorsignal gegen die Zeit aufgetragen (Chromatogramm), dadurch können qualitative und quantitative Informationen über die Komponenten der Probe gewonnen werden. Anhand der Peakflächen und auch der Peakhöhen kann das getrennte Gemisch quantifiziert werden, da beide Messwerte proportional zur Konzentration des Analyten sind (Camman 2001).

Bewertung

Die verschiedenen Messmethoden aus dem Bereich der Chromatographie haben sich als gängige Routineverfahren in Labors etabliert, deren Durchführung in verschiedenen Normen vorgeschrieben ist (DIN 2018).

Die Reproduzierbarkeit ist im Wesentlichen abhängig von der Probennahme (vgl. Abschnitt 8.2.3) sowie der Probenaufgabe. Automatisierte Probenaufgabesysteme verbessern die Reproduzierbarkeit der Messungen in der quantitativen Analyse.

Tabelle 6-2: Übersicht der wesentlichen Vor- und Nachteile gängiger Messmethoden der Chromatographie.

Messmethode	Vorteile	Nachteile
Ionen(austausch)-chromatographie (IC)	hohe Empfindlichkeit, hoher Automatisierungsgrad, hoher Durchsatz	Einschränkung: Analyt muss in mobiler Phase ausreichend löslich sein
Dünnschicht-chromatographie (DC)	geringer apparativer Aufwand	Einschränkung: Analyt muss in mobiler Phase ausreichend löslich sein
Hochleistungsflüssigkeits-chromatographie (HPLC)	hohe Trennleistung, quantitative Analyse möglich (erfordert Kalibrierung)	Einschränkung: Analyt muss in mobiler Phase ausreichend löslich sein
überkritische Fluidchromatographie (SFC)	hohes Einsparpotenzial bzgl. Materialverbrauch, weitere Analyseverfahren können einfach nachgeschaltet werden (z. B. UV/vis)	Einschränkung: Analyt muss in mobiler Phase ausreichend löslich sein
Gaschromatographie (GC)	hohe Empfindlichkeit und Trennleistung, kurze Analysendauer, zur Untersuchung komplexer Proben geeignet	Verbindungen müssen unzerstört verdampfbar sein, dadurch kleineres Anwendungsfeld als Methoden der Flüssigchromatographie, hoher apparativer Aufwand durch Gasleitungen

6.2.3. Titration

Kurzbeschreibung der Methode

Messprinzip und technische Ausführung

Die Bestimmung des Karbonatgehaltes der Grundwasserprobe erfolgt durch Zugabe (Titration) einer starken Säure. Bei der Zugabe der Säure wird ein entsprechender Teil der OH⁻-Ionen durch die zugegebenen H⁺-Ionen neutralisiert, es verbleibt eine kleinere Menge OH⁻-Ionen in einem vergrößerten Gesamtvolumen der Lösung, der pH-Wert nimmt ab. Dies erfolgt solange bis der Äquivalenzpunkt erreicht ist. Am Äquivalenzpunkt beträgt der pH-Wert = 7. Bei Zugabe weiterer Säure erhält die Lösung überschüssige H⁺-Ionen, die Lösung wird somit saurer. Zur Bestimmung des Äquivalenzpunktes wird der pH-Wert während der Titration mit einem pH-Meter messen und die Titrationskurve (pH-Wert gegen zugegebenes Volumen der Säure) aufgezeichnet; der Wendepunkt der Kurve entspricht dem Äquivalenzpunkt. Werden der Lösung einige Tropfen Indikator-Lösung zugesetzt, wird das Erreichen des Äquivalenzpunktes durch einen Farbumschlag angezeigt (Mortimer & Müller 2015).

Messgröße und Anwendungsgebiet

Die Titration ist eine bewährte Messmethode, um den Karbonatgehalt der Grundwasserproben zu bestimmen.

Auswertung

Zur Bestimmung des Karbonat-Gehalts einer Lösung wird das Volumen der verbrauchten Menge an Säure bis zum Erreichen des Äquivalenzpunktes gemessen. Über den Verbrauch der Säure

(hier z. B. Salzsäure) kann die Konzentration der Karbonat-Lösung (hier z. B. Natriumkarbonat) wie folgt berechnet werden:

$$c(\text{Na}_2\text{CO}_3) = \frac{n(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{V(\text{Na}_2\text{CO}_3)} = \frac{n(\text{HCl})}{V(\text{Na}_2\text{CO}_3)} = \frac{c(\text{HCl}) \cdot V(\text{HCl})}{V(\text{Na}_2\text{CO}_3)} \quad (6-36)$$

mit

$c(\text{Na}_2\text{CO}_2)$	Konzentration der Natriumkarbonat-Lösung	$[\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}]$
$n(\text{Na}_2\text{CO}_3)$	Stoffmenge der Natriumkarbonat-Lösung (= $n(\text{HCl})$, da Natriumkarbonat und Salzsäure im Stoffmengenverhältnis 1:1 reagieren)	$[\text{mol}]$
$n(\text{HCl})$	Stoffmenge der Salzsäure ($n(\text{HCl}) = c(\text{HCl}) \cdot V(\text{HCl})$)	$[\text{mol}]$
$V(\text{Na}_2\text{CO}_3)$	Volumen der Natriumkarbonat-Lösung	$[\text{l}]$
$c(\text{HCl})$	Konzentration der Salzsäure	$[\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}]$
$V(\text{HCl})$	Volumen der Salzsäure	$[\text{l}]$

Bewertung

Die Bestimmung des Karbonat-Gehalts mittels Titration ist eine relativ schnelle und preiswerte Methode, welche sehr genaue und – bei konstanten Versuchsbedingungen – gut reproduzierbare Ergebnisse liefert.

6.2.4. Sorptionsversuche

Grundlegende Literatur

Bradbury, M. H., Baeyens, B. (2011): *Physico-Chemical Characterisation Data and Sorption Measurements of Cs, Ni, Eu, Th, U, Cl, I and Se on MX-80 Bentonite*. PSI Bericht Nr. 11-05, Paul Scherrer Institut, Villingen, Schweiz.

Elo O., Müller K., Ikeda-Ohno A., Bok F., Scheinost A. C., Hölttä P., Huittinen N. (2017): *Batch sorption and spectroscopic speciation studies of neptunium uptake by montmorillonite and corundum*. *Geochim. Cosmochim. Acta* 198, pp. 168-181.

Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V. (2010): *Radionuclide Source Term for HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Waste)*. Report-Nr. KIT-SR 7624, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Montoya, V., Baeyens, B., Glaus, M.A., Kupcik, T., Marques Fernandes, M., Van Laer, L., Bruggeman, C., Maes, N., Schäfer, T. (2018): *Sorption of Sr, Co and Zn on illite: Batch experiments and modelling including Co in-diffusion measurements on compacted samples*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, pp. 1–20.

Muuri E., Ikonen J., Matara-Aho M., Lindberg A., Holgersson S., Voutilainen M., Siitari-Kauppi M., Martin A. (2016): *Behavior of Cs in Grimsel granodiorite: Sorption on main minerals and crushed rock*. *Radiochim. Acta* 104, pp. 575 - 582.

Muuri, E., Siitari-Kauppi, M., Matara-aho, M., Ikonen, J., Lindberg, A. Qian, L., Koskinen, L. (2017): *Cesium sorption and diffusion on crystalline rock: Olkiluoto case study*. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 311(1), pp. 439–446, Springer.

Noseck, U. (Hrsg.) (2009): *FUNMIG – Fundamental Processes of Radionuclide Migration in Salt Rock Far Field. A Natural Analogue Study*. GRS-255, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.

Petrov, V., Vlasova, I., Rodionova, A., Yapaskurt, V., Korolev, V., Petrov, V., Poluektov, V., Hammer, J., Kalmykov, S. (2019): *Preferential sorption of radionuclides on different mineral phases typical for host rocks at the site of the future Russian high level waste repository*. *Applied Geochemistry* 100, pp. 90–95, Elsevier.

Schnurr A., Marsac R., Rabung T., Lützenkirchen J., Geckeis H. (2015): *Sorption of Cm(III) and Eu(III) onto clay minerals under saline conditions: Batch adsorption, laser-fluorescence spectroscopy and modeling*. *Geochim. Cosmochim. Acta* 151, pp. 192 - 202.

Schoonheydt, R., Johnston, C. T., Bergaya, F. (Hrsg.) (2018): *Developments in Clay Science - Surface and interface Chemistry of Clay Minerals*. Volume 9, Elsevier.

Schröder, T. J., Meeussen, J. C. L. (2017): *Final report on radionuclide sorption in Boom Clay*. OPERA-PU-NRG6123, NRG.

Die Sorption in Ton- und Kristallingestein, wird, bedingt durch Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung, maßgeblich durch den Gehalt an Schichtsilikaten beeinflusst. Sorptionsprozesse im Steinsalz sind hauptsächlich an zwischengelagerte, sedimentäre (tonhaltige) Schichten gebunden. Auch die Porenwasserchemie (insbesondere Ionenstärke, pH- und E_h -Wert, Gehalt an Komplexbildnern wie Karbonaten und Organika) beeinflusst die Sorption von Radionukliden.

Experimentelle Methoden zur Untersuchung des Sorptionsverhaltens von Radionukliden sollten daher unter Laborbedingungen durchgeführt werden, welche unter Berücksichtigung der jeweiligen Gesteinstypen und der assoziierten Porenwässer repräsentativ für die jeweiligen Standortbedingungen sind.

Standardmethoden zur Ermittlung der K_d -Werte stellen hierbei Batchversuche, Säulenversuche und Diffusionsversuche (s. Abschnitt 5.3.3) dar.

Kurzbeschreibung der Methoden

Messprinzip und technische Ausführung

Batchversuche (Schüttelversuche) stellen relativ einfach durchzuführende Messmethoden dar, um die Verteilungskoeffizienten (K_d -Werte) zu bestimmen (s. Gl. 4-17). Die Gesteinsproben werden zunächst hinsichtlich ihrer mineralogischen Zusammensetzung, der spezifischen Gesteinsoberfläche sowie dem Gehalt an organischen Kohlenstoff analysiert, um den Hauptmechanismus der Sorption zu ermitteln.

Eine definierte Masse der gemahlene Gesteinsprobe sowie ein definiertes Volumen an Lösung mit bekannter Ausgangskonzentration der zu untersuchenden Elemente (Radionuklide) werden in Probenflaschen gefüllt und z. B. mittels Schütteltisch geschüttelt. Das maximale Sorptionsvermögen der Gesteinsproben gegenüber dem jeweiligen Radionuklid wird ermittelt, sobald sich ein Gleichgewicht zwischen der Lösungskonzentration und den Gesteinsproben eingestellt hat. Dieses Gleichgewicht wird anhand kinetischer Tests ermittelt und die Proben werden entnommen, sobald der stationäre Zustand erreicht wird (Montoya 2018).

Vor und im Anschluss an den Versuch wird der pH-Wert der Probe bestimmt.

Bei einem **Säulenversuch** wird die Gesteinsprobe weitestgehend ungestört in eine Säule eingebaut und unter Aufbringung eines hydraulischen Gradienten von einer Lösung bekannter Ausgangskonzentration durchflossen. Die aus der Säule austretende Lösung wird abgeführt und der Säule wieder kontinuierlich frische Lösung mit bekannter Ausgangskonzentration zugeführt (kein Kreislaufprinzip). Das Sorptionsgleichgewicht (das Gleichgewicht zwischen Adsorption/Absorption und Desorption) zwischen Gesteinsprobe und Lösung ist beim Säulenversuch dann erreicht, wenn die Konzentration der austretenden Lösung gleich der zugegebenen Lösung ist. Dieses Gleichgewicht wird ebenfalls anhand kinetischer Tests ermittelt und die Proben werden entnommen, sobald der stationäre Zustand erreicht wird. Die Höhe der zugefügten Konzentration bestimmt die Höhe der Beladung der Gesteinsprobe im Sorptionsgleichgewicht und entspricht am Ende des Säulenversuches auch gleichzeitig der Gleichgewichtskonzentration.

Messgröße und Anwendungsgebiet

Sorptionsversuche dienen der Ermittlung von Verteilungskoeffizienten (K_d -Werte) für die Radionuklide. Informationen über die Kinetik zur Bestimmung des stationären Zustands zwischen Lösung und Gesteinsprobe und der Löslichkeit sowie über pH-Effekte und Redox-Reaktionen werden mittels zusätzlicher Versuche gewonnen.

Auswertung

Die flüssige Phase wird von der festen Phase getrennt (z. B. durch Zentrifugation) und die Konzentration der Radionuklide in Lösung bestimmt. Zusätzlich wird die Gesamtkonzentration an Elementen in der Gesteinsprobe bestimmt sowie die Mineralphasenbestimmung der Elemente durchgeführt.

Ziel der Auswertung ist die Ermittlung der jeweiligen Sorptionsisotherme (s. Abschnitt 4.11) und der daraus durchgeführten Ableitung von K_d -Werten.

Bewertung

Die Zusammensetzung des Grundwassers ist eine wichtige Messgröße bei der Ermittlung der Verteilungskoeffizienten von Radionukliden. Eine wesentliche Schwierigkeit besteht darin, bei Laborversuchen die Bedingungen des natürlichen Grundwasser-Gesteinsverbandes möglichst realistisch nachzubilden.

Der Batchversuch bietet zwar die Vorteile eines einfachen Versuchsaufbaus und eines geringen Verbrauches an Probenmaterial, kann aber die natürlich ablaufenden Prozesse aufgrund der gemahlten Probe, welche zudem nicht die variable Gesteinszusammensetzung unter natürlichen Bedingungen repräsentiert, der meist synthetischen Lösungen und langen Kontaktzeiten von Feststoff und Lösung sowie der Unkenntnis der sorptionswirksamen Mineraloberflächen nur unzureichend abbilden. Zudem stellt sich im Gegensatz zu natürlichen Fließbedingungen ein Lösungsgleichgewicht ein, so dass stets die maximale Sorption beschrieben wird.

Säulenversuche bieten die Möglichkeit, die dreidimensionale Struktur eines porösen Grundwasserleiters im Labormaßstab durch ein eindimensionales physikalisches Modell nachzubilden.

Für alle Messmethoden ist daher bei den ermittelten Verteilungskoeffizienten zu beachten, dass diese nur für die jeweiligen Versuchsbedingungen gelten.

Eine weitere Schwierigkeit besteht bislang noch darin, alle während der Messungen ablaufenden Sorptionsprozesse in dem hoch komplexen System vollständig nachvollziehen zu können, insbesondere dann, wenn ein Radionuklid sowohl Adsorptions- als auch Desorptionsprozesse durchführen kann.

Bei den klassischen nasschemischen Versuchen wird die abzentrifugierte Lösung aus den Batchversuchen mittels ICP-OES/MS (s. Abschnitt 6.2.1) analysiert. Wird das Prozessverständnis mittels Modellierung der experimentellen nasschemischen Daten gewonnen, setzt das Sorptionsmodell voraus, dass Einbau- und Ausfällungsprozesse keine Rolle spielen, da diese beiden Prozesse nicht bzw. nur schwer mit den nasschemischen Methoden nachgewiesen werden können. Idealerweise sollte daher die Bestimmung der Festphasen zur Charakterisierung der Oberflächenstrukturen mit spektroskopischen Methoden wie z. B. der Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS) verifiziert werden (s. Abschnitt 6.2.1).

6.2.5. Viskosimetrie

Die Ermittlung der kinematischen und dynamischen Viskosität von Fluiden erfolgt mit Hilfe von Viskosimetern. Die Viskosität kann nicht direkt gemessen werden, sondern muss über die jeweiligen Messgrößen der Methode berechnet werden.

Die gängigsten Viskosimeter-Arten und Messmethoden sind hierbei

- das Kugelfallviskosimeter nach DIN 53015 (2018),
- das Ubbelohde-Viskosimeter nach DIN 51562 Teil 1 bis 4, DIN 53000 (2019, liegt im Entwurf vor),
- das Kapillarviskosimeter nach DIN 53014 Teil 1 und 2 (2019, liegt im Entwurf vor).

Die Viskosimetrie lässt sich auch bei der Charakterisierung von Kolloiden einsetzen, ist jedoch im Vergleich zu den spektrometrischen Methoden (s. Abschnitt 6.2.1) weniger genau.

6.2.6. Methoden zur Bestimmung der Fluiddichte

Die dichteabhängige Strömung eines Fluides, welches als potenzielles Transportmedium für Radionuklide dienen kann, wirkt sich insbesondere dann auf den Transportprozess aus, wenn das Fluid einen hohen oder stark schwankenden Salzgehalt aufweist oder wenn nur geringe hydraulische Gradienten vorliegen.

Die Dichte kann im Labor wie folgt bestimmt werden:

a) Pyknometer

Das Pyknometer wird mit einer Kontrollflüssigkeit mit bekannter Dichte und Masse gefüllt. Anschließend wird das Pyknometer mit dem Fluid unbekannter Dichte befüllt und dessen Masse bestimmt. Die Dichtebestimmung erfolgt rechnerisch über die beiden Massen und die Dichte der Kontrollflüssigkeit.

Diese Art der Dichtebestimmung ist eine gängige Methode, die sehr genaue, reproduzierbare Ergebnisse in weiten Temperatur- und Druckbereichen liefert. Durch die aufwändige Wägearbeit ist der Zeitaufwand allerdings höher als bei den anderen Methoden.

b) Biegeschwinger

Ein Fluid mit unbekannter Dichte wird in ein U-förmiges Röhrchen eingefüllt. Das Rohr ist an den offenen Enden fest eingespannt. Zur Dichtemessung wird das Rohr elektronisch oder magnetisch zu einer ungedämpften Schwingung mit möglichst geringer Amplitude angeregt. Die resultierende Eigenfrequenz des Biegeschwingers hängt von der Masse der eingefüllten Probe ab. Diese Frequenz kann sehr genau gemessen werden und in die Dichte der Probe umgerechnet werden.

Die Dichtebestimmung mit einem Biegeschwinger ist eine gängige Methode, die sehr genaue, reproduzierbare Ergebnisse liefert. Die Fehleranfälligkeit bei dieser Methode ist sehr gering. Fehler können bei schwankenden Raumtemperaturen auftreten, daher werden temperaturbedingte Schwankungen der Dichte durch eine Temperierung des Messgerätes verhindert. Der Zeitaufwand ist gering, die eigentliche Messzeit beträgt unter einer Minute, so dass auch in kurzer Zeit belastbare Ergebnisse reproduziert werden können. Fluidichten können im Bereich zwischen $0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ und $3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ gemessen werden, bei der Messung von viskosen Proben ist allerdings eine Viskositätskorrektur nötig.

c) Aräometer

Das Aräometer arbeitet nach dem Prinzip des Auftriebs in Abhängigkeit von der Masse. Ein gläserner Schwimmkörper sinkt in die Flüssigkeitsprobe ein, bis seine masseabhängige Gewichtskraft und die Auftriebskraft übereinstimmen. Auf der Skala im Schwimmkörper-Stängel wird die der Eintauchtiefe entsprechende Dichte angezeigt. Für verschiedene Dichtebereiche werden unterschiedliche Aräometer eingesetzt.

Die Dichtebestimmung mit einem Aräometer ist eine sehr schnelle Methode. Allerdings ist eine langwierige exakte Temperierung notwendig, um hohe Genauigkeiten zu erzielen. Bei der Dichtebestimmung von dunklen oder hochviskosen Proben ist das Aräometer schlecht ablesbar. Es wird ein Mindestvolumen von 100 ml je Probe benötigt.

6.2.7. Methoden zur Bestimmung der Porenwasserkonzentration

Grundlegende Literatur

- Eichinger, F., Waber, H. N. (2013): *Matrix Porewater in Crystalline Rocks: Extraction and Analysis*. Report No. NWMO TR-2013-23, Nuclear Waste Management Organization, Ontario, Canada.
- Koroleva, M., De Haller, A., Mäder, U.K., Waber, H. N., Mazurek, M. (2008): *Borehole DGR 2: Porewater investigations*. RWI Technical Report TR 08-02. Institute of Geological Sciences, University of Bern, Schweiz.
- Mäder, U.K. (2005): *Porewater chemistry, porosity and hydraulic conductivity of Callovo-Oxfordian claystone at the EST-322 deep drilling site sampled by the method of advective displacement (Laboratoire de Recherche Souterrain de Meuse / Haute-Marne)*. Nagra Arbeitsbericht NAB 05-04. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Mäder, U.K., Waber, H. N., Gautschi, A. (2004): *New method for porewater extraction from claystone and determination of transport properties with results for Opalinus Clay (Switzerland)*. In: Wanty, R.B. & Seal II, R.R. (eds.): *Proc. 11th Internat. Symp. Water-Rock Interaction (WRI-11)*, Saratoga Springs (N.Y.). Balkema, 445-448.
- Mäder, U.K. (2018): *Advective Displacement Method for the Characterisation of Pore Water Chemistry and Transport Properties in Claystone*. *Geofluids* 2018(4), pp. 1-11.
- Waber, H. N. [ed.] (2008): *Borehole Oftringen: Mineralogy, Porosimetry, Geochemistry, Pore Water Chemistry*. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-18. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Waber H. N., Smellie J. A. T. (2008): *Characterisation of pore water in crystalline rocks*. *Applied Geochemistry* 23(7), pp. 1834-1861.
- Waber H. N., Smellie J. A. T. (2009): *Forsmark site investigation. Borehole KFM02B: Characterisation of porewater. Part I: Diffusion experiments and porewater data*. SKB P-09-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Die chemische und isotopechemische Charakterisierung von Porenwasser in der geringdurchlässigen Gesteinsmatrix wie z. B. der Wirtsgesteine Tongestein und Kristallingestein, aber auch der Porenwässer in geringdurchlässigen Gesteinsschichten des Deck- und Nebengebirges, ist ein wichtiger Bestandteil der Standortcharakterisierung und Sicherheitsbewertung der Gesteinsschichten. Da für geringdurchlässige Gesteinseinheiten des Ton- und Kristallingesteins z. B. im Rahmen von Pumpversuchen keine ausreichenden Mengen an Wasser zur Analyse gewonnen werden können, müssen daher andere Methoden zur Extraktion der Porenwässer zum Einsatz kommen.

Methoden, welche z. T. im Rahmen laufender Endlagerprojekte wie z. B. in der Schweiz, angewendet werden, sind die advektive Porenwasser-Verdrängung sowie Ausdiffusionsexperimente.

Bei dem **advektiven Porenwasser-Verdrängungsverfahren** wird künstliches Porenwasser auf einer Seite eines Probenkerns injiziert, um das in situ Porenwasser aus dem anderen Ende der Probe heraus zu verdrängen (Mäder 2005, Mäder 2018). Mit Hilfe dieses Versuches können, neben der Porenwasserzusammensetzung auch diverse physikalische, chemisch-physikalische und transportrelevante Eigenschaften der Probe ermittelt werden, wie z. B. die hydraulische Leitfähigkeit und deren Temperaturabhängigkeit, Änderungen im Porenraum (bei sehr reaktiven Systemen, wie z. B. Salzen) sowie der anfängliche Sättigungszustand der Probe (Mäder 2018).

Ausdiffusionsexperimente werden durchgeführt, um daraus die chemische Porenwasser-Konzentrationen von natürlich gesättigten kristallinen Gesteinen abzuleiten (z. B. Waber et al. 2009). In solchen Experimenten kann das Porenwasser über mehrere Monate ein Gleichgewicht mit einer Testlösung um die Bohrkernprobe herum ausbilden. Bei der Elution der Elemente aus dem Porenwasser werden in regelmäßigen Abständen kleine Volumina des Testwasser-Porenwasser-Gemisches gesammelt, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Für Tracerelemente wie Chlorid und Bromid im Porenwasser können diese Konzentrations-Zeitreihen durch Anwendung mathematischer Transportmodelle in einen Porendiffusionskoeffizienten für diese Elemente umgewandelt werden. Die Konzentration dieser Tracer im in situ Porenwasser wird durch die Umrechnung der Endkonzentration im Testwasser unter Verwendung der ursprünglichen Masse an Porenwasser bzw. der wasserzugänglichen Porosität der der Ausdiffusion unterworfenen Gesteinsprobe erhalten (Waber & Smellie 2008, Waber & Smellie 2009, Eichinger & Waber 2013).

Bei allen Verfahren können nach Extraktion der wässrigen Auszüge aus Bohrkernen beispielsweise durch anschließende ionenchromatographische Analyse die Hauptanionen und -kationen der Porenwässer bestimmt werden.

7. Gegenüberstellung und Vergleich geeigneter Messmethoden

Die nachfolgenden Tabellen stellen die relevanten Messgrößen den Messmethoden gegenüber. Anhand dieser Matrixdarstellung lassen sich somit sowohl zur Bestimmung der Messgröße geeignete („1“) als auch ungeeignete („-“) Messmethoden direkt identifizieren. Messmethoden, welche zur Bestimmung der Messgröße nur über Modellannahmen und/oder empirische Zusammenhänge beitragen können, werden gesondert als solche hervorgehoben („X“). Zudem werden auch Messmethoden ermittelt, welche zur Bestimmung der Messgröße geeignet sind, aber Einschränkungen hinsichtlich der Erkundungstiefe aufweisen oder deren geforderter Messbereich wahrscheinlich nicht ausreichend für die jeweilige Fragestellung ist („!“). Diese Messmethoden lassen sich aber bspw. für die Erkundung des Deck- und Nebengebirges anwenden (§ 24 Abs. 5 StandAG in Verbindung mit Anlage 11).

In Abschnitt 7.1 werden die identifizierten Messmethoden zur Bestimmung transportrelevanter Gesteinseigenschaften hinsichtlich ihrer Eignung für die Erkundung für jede Messgröße zusammengefasst. In Tabelle 7-1 werden die geohydraulischen Messmethoden, welche als Feldversuche in Bohrlöchern durchgeführt werden können, den relevanten Messgrößen zugeordnet. In Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3 werden die (bohrloch-)geophysikalischen Messmethoden den Messgrößen gegenübergestellt. Anschließend werden die gängigen Labormethoden aufgeführt, welche sich zur Bestimmung der transportrelevanten Gesteinseigenschaften (Tabelle 7-4) eignen.

In Abschnitt 7.2 erfolgt die Bewertung zur Eignung für die Erkundung für die hydrogeochemischen Messgrößen. Die Labormethoden werden diesen Messgrößen in Tabelle 7-5 gegenübergestellt.

Für viele Messgrößen können verschiedene Messmethoden zum Einsatz kommen unter Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile, der Eignung für das jeweilige Gestein sowie der erforderlichen Erkundungstiefe und Reichweite. Bei der Auslegung der hydraulischen Versuche bzw. der entsprechenden Versuchsapparate müssen die zu erwartenden Gesteinseigenschaften berücksichtigt werden. Die Gesteine, welche den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) bilden sollen, müssen beispielsweise sehr niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte aufweisen. Auch diese Angaben fließen in den Orientierungsrahmen im Rahmen dieses Vorhabens ein.

Abschnitt 7.3 gibt einen kurzen Überblick über den Einsatz von Messmethoden in der bisherigen Endlagerforschung. Dieser zeigt, dass die hier vorgestellten Messmethoden dem aktuellen Stand von W+T entsprechen, aber auch, dass insbesondere bei der Kombination verschiedener Methoden und der gemeinsamen Auswertung weiterer Entwicklungsbedarf besteht.

7.1. Bewertung von Messmethoden zur Bestimmung transportrelevanter Gesteinseigenschaften

Abstandsgeschwindigkeit

Eine geeignete Messmethode zur Ermittlung der Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers im Rahmen der übertägigen Erkundung ist der Tracerversuch (s. Abschnitt 5.1.5) für Festgesteine mit hydraulisch wirksamen Klüften sowie für Porengrundwasserleiter des Deck- und Nebengebirges. Druckhöhenmessungen (s. Abschnitt 5.1.1) können ebenfalls zur Bestimmung dieser Messgröße beitragen.

Diese beiden Methoden setzen jedoch voraus, dass, neben frei beweglichem Grundwasser, sowohl ein hydraulisches Potenzial als auch hydraulisch wirksame Fließwege zur Verfügung stehen, was auf den ewG nicht zutreffen soll.

Da zudem im StandAG die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers (Anlage 1 zu § 24 Abs. 3 StandAG) im ewG mit einer Bandbreite zwischen $< 0,1$ bis $> 1 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ vorgegeben wird, wäre für die festgelegte kleinste Bandbreite der Abstandsgeschwindigkeit auch bei geringen Abständen zwischen den Messstellen eine Versuchszeit zwischen 1.000 und 10.000 Jahren erforderlich. Anhand dieser beiden Methoden ist eine direkte Feldbestimmung dieser Messgröße in geringdurchlässigen Gebirgsbereichen somit nicht möglich.

Somit sind diese Methoden zur Ermittlung von Abstandsgeschwindigkeiten für die weitere Bewertung des advektiven Radionuklidaustrags aus geringdurchlässigen Gesteinsschichten, wie beispielsweise Ton- und Kristallingestein, nicht geeignet. Hinweise auf advektive Transportkomponenten in diesen Gesteinen liefern Isotopenbestimmungen. Die Analyse der Radioisotope (z. B. mittels Spektrometrie, s. Abschnitt 6.2.1) ermöglicht es, verschiedenen Altersbereiche für das Grundwasser abzuschätzen, insbesondere wenn die Datierungsbereiche der verschiedenen Isotope in Kombination angewandt werden. Alternativen bieten die Bestimmung der effektiven Porosität mittels NMR-Verfahren oder Tomographie, mit Hilfe derer auf (potenzielle) Fließgeschwindigkeiten geschlossen werden kann sowie hydrogeochemische Analysen zur Ermittlung der Gleichgewichte bzw. Lösungs- und Fällungsreaktion mit dem durchströmten Gestein.

Gebirgsdurchlässigkeit

Zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit liegen zahlreiche geohydraulische Messmethoden vor, welche geeignet oder aber mit Einschränkungen in der Erkundungstiefe oder im Messbereich versehen sind. Die Einschränkungen der hier vorgestellten Methoden ergeben sich insbesondere aus der limitierten Anwendungsmöglichkeit in gering durchlässigen Gebirgsbereichen, welche für die Eignung als ewG gefordert sind.

Für gering durchlässige Gebirgsbereiche sind insbesondere folgende geeignete Methoden hervorzuheben:

- Der Pulse-Test als einfacher, schneller und kostengünstiger Versuch, der sich zum Einsatz in Gebirgsbereichen mit Durchlässigkeiten von 10^{-8} bis $10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ eignet (s. Abschnitt 5.1.3.4),
- der Squeeze-Test zur schnellen Abschätzung der Durchlässigkeit auch in Gebirgsbereichen mit sehr geringer Durchlässigkeit ($k_f < 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (s. Abschnitt 5.1.3.5),

Die übrigen hier aufgeführten Methoden eignen sich mit Einschränkungen zur übertägigen Erkundung, insbesondere:

- das Fluid-Logging zur tiefengenauen Lokalisierung von Zu- und Abflusszonen im Bohrloch in der gesättigten Zone, für Durchlässigkeiten im Bereich von $5\cdot 10^{-4}$ bis $10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (s. Abschnitt 5.1.4.3),
- weitere Packertests (Slug- und Bail-Test, Drill-Stem-Test) zur Erkundung von Gebirgsbereichen mit Durchlässigkeiten von $> 10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ im Deck- und Nebengebirge,
- der Pumpversuch zur Erkundung von Gebirgsbereichen mit Durchlässigkeiten $> 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ im Deck- und Nebengebirge,
- der Injektionsversuch, welcher auch zur Erkundung in der ungesättigten Zone für Durchlässigkeiten im Bereich $> 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (s. Abschnitt 5.1.2.2).

Von allen aufgeführten geophysikalischen Verfahren ermöglichen nur die nuklear-magnetischen Resonanzmessungen im Bohrloch (NMR) (s. Abschnitt 5.2.2.1.4) oder von der Oberfläche (SNMR) (s. Abschnitt 5.2.1.2.4) Aussagen zur hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeit. Die Erkundungstiefe der SNMR ist jedoch mit Tiefen bis zu 150 m gering.

Mithilfe geophysikalischer Verfahren lassen sich aber petrophysikalische Messgrößen ermitteln (z. B. absolute Porosität, Tongehalt, Wassergehalt), welche empirische Zusammenhänge zur Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen. Insbesondere bohrlochgeophysikalische Messmethoden können zur Bestimmung dieser Messgröße beitragen. Oberflächengeophysikalische Messmethoden im Feld bieten dagegen eine gute Möglichkeit, Änderungen der Durchlässigkeit in den Gebirgsbereichen tiefenaufgelöst zu lokalisieren und sind daher als begleitende und verifizierende Methoden bei der übertägigen Erkundung anzuwenden.

Gesteinsdurchlässigkeit

Zur direkten Bestimmung der Gesteinsdurchlässigkeit sind geohydraulische Methoden nicht geeignet. Über die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f im Rahmen von Pumpversuchen und der Kenntnis von Dichte und Viskosität des Grundwassers, kann die Gesteinsdurchlässigkeit abgeleitet werden.

Mit Hilfe der (bohrloch-)geophysikalischen Messmethoden kann die Gesteinsdurchlässigkeit ebenfalls nicht direkt bestimmt werden. Stattdessen werden petrophysikalische Messgrößen ermittelt, welche empirische Zusammenhänge zur Gebirgs- und somit indirekt zur Gesteinsdurchlässigkeit aufweisen.

Die direkte Messung Gesteinsdurchlässigkeit kann im Rahmen der übertägigen Erkundung experimentell an repräsentativen Gesteinsproben im Labor erfolgen. Korngrößenanalysen (s. Abschnitt 5.3.1) sind hier als ergänzende Messmethode nur auf Lockergesteine des Deck- und Nebengebirges anwendbar. Durchströmungsversuche (s. Abschnitt 5.3.2) besitzen ebenfalls nur einen kleinkaligen Charakter, da die gewonnenen Messwerte nur auf die jeweilige Gesteinsprobe übertragbar sind und die Heterogenität des Gesteins (Lagerung, Klüfte etc.) somit nicht ausreichend berücksichtigt werden kann. Aufgrund der Beschränkung des Messbereiches (10^{-2} bis 10^{-11} m·s⁻¹) ist diese Methode zudem nicht für jedes Gestein des ewG mit hydraulischer Barrierewirkung geeignet.

Als hochauflösende Messmethode, welche auch die heterogene Verteilung der Gesteinsdurchlässigkeit berücksichtigt, eignet sich die Tomographie zur Untersuchung von Bohrkernabschnitten.

Effektiver Diffusionskoeffizient

Zur Bestimmung des effektiven Diffusionskoeffizienten sind geohydraulische und geophysikalische Messmethoden nicht geeignet. Diese Messgröße wird im Labor, z. B. durch Säulenversuche sowie in Diffusionszellen ermittelt. Mit Hilfe der Tomographie, insbesondere der Emissionstomographie, kann das diffusive Ausbreiten eines Stoffes dargestellt und anhand dessen Simulationsergebnisse zu Diffusionsprozessen angepasst werden. Ist die effektive Porosität bekannt, lässt sich auch daraus der effektive Diffusionskoeffizient empirisch herleiten.

Absolute bzw. effektive Porosität des Gesteins

Die effektive Porosität lässt sich zwar indirekt über Tracerversuche (s. Abschnitt 5.1.5) im Rahmen von geohydraulischen Feldversuchen bestimmen, allerdings nur, sofern eine Grundwasserbewegung stattfindet, wie es bspw. im Deck- oder Nebengebirge der Fall ist. Alle weiteren hier aufgeführten geohydraulischen Messmethoden sind für geringdurchlässige Gesteinsschichten, welche für die Eignung als ewG gefordert sind, nicht geeignet.

Mit Hilfe der (bohrloch-)geophysikalischen Messmethoden kann die Porosität nicht direkt bestimmt werden. Stattdessen werden petrophysikalische Messgrößen ermittelt, welche empirische Zusammenhänge zur Porosität aufweisen. Insbesondere bohrlochgeophysikalische Messmethoden können ohne wesentliche Einschränkungen bzgl. Messbereich oder Erkundungstiefe zur Bestimmung dieser Messgröße beitragen.

Einzig mit der kernmagnetischen Resonanzmessung (NMR) (s. Abschnitt 5.2.2.1.4) können absolute und effektive Porositäten ohne zusätzliche Modellannahmen zur Gesteinsmatrix bestimmt werden.

Mittels Laboruntersuchungen wie der Tomographie an Bohrkernen (s. Abschnitt 5.3.4) können die innere Struktur von Gesteinsproben sowie Fluidbewegungen innerhalb der Gesteinsproben sichtbar gemacht und anhand dessen die absolute und die effektive Porosität bestimmt werden kann.

Mit relativ einfach durchzuführenden Methoden wie der Auftriebswägung, Pulver- und Gaspyknometrie sowie der Porosimetrie können die absolute und die effektive Porosität bestimmt werden (s. Abschnitt 5.3.5). Eine umfassende Charakterisierung des Porenraums wird mit der Kombination dieser quantitativen und den tomographischen Analysen, die eine räumlich differenzierte Verteilung der Porenräume ermitteln können, erzielt.

Laboruntersuchungen an einzelnen Gesteinsproben liefern somit einen Beitrag zu der Ermittlung der absoluten bzw. effektiven Porosität von Gebirgsformationen.

Verfestigungsgrad (Tonstein)

Mit Hilfe bohrlochgeophysikalischer Messmethoden kann der Verfestigungsgrad von Tongestein ohne wesentliche Einschränkungen bzgl. Messbereich oder Erkundungstiefe über empirische Zusammenhänge zur Porosität oder den elastischen Eigenschaften aus den jeweiligen gemessenen petrophysikalischen Messgrößen ermittelt werden. Auch seismische Messungen ermöglichen die Bestimmung geomechanischer Eigenschaften wie Scher- und Zugfestigkeit.

Des Weiteren lässt sich der Verfestigungsgrad aus der absoluten Porosität abschätzen.

Hydraulischer Gradient

Eine geeignete Messmethode für den hydraulischen Gradienten bietet die Druckhöhenmessung (s. Abschnitt 5.1.1) als geohydraulische Messmethode im Bohrloch. Hierbei auch müssen mögliche Dichteunterschiede der Grundwässer in den verschiedenen Teufenbereichen berücksichtigt werden (s. Abschnitt 3.6).

Tortuosität

Die Tortuosität τ wird üblicherweise als Funktion der Porosität beschrieben. Geophysikalische Messmethoden zur Ermittlung der Porosität sind somit auch für die Bestimmung der Tortuosität geeignet.

Mittels Laboruntersuchungen wie der Tomographie an Bohrkernen (s. Abschnitt 5.3.4) können die inneren Strukturen von Gesteinsproben sowie Fluidbewegungen innerhalb der Gesteinsprobe sichtbar gemacht und anhand dessen auch präzisere Aussagen zur Tortuosität getroffen werden.

Tabelle 7-2: Geophysikalische Messmethoden: Zuordnung und Bewertung der Eignung zur Bestimmung relevanter Messgrößen.

- 1: Die Messmethode ist geeignet.
- : Die Messmethode ist nicht geeignet.
- X: Die Messmethode kann zur Bestimmung der Messgröße beitragen.
- (): Es liegen Einschränkungen in der Erkundungstiefe oder im Messbereich vor.

Relevante Messgröße	Anlage des StandAG	Geophysik – Oberflächen-Messmethoden														Bohrloch-seismik		
		Magnetik	Gravimetrie	Geoelektrik			Elektromagnetik					Seismik			VSP	Cross-Hole (Tomographie)		
				Eigenpotenzial	Gleichstrom-geoelektrik	(spektrale) induzierte Polarisation	Elektromagnetik	TEM	Magnetotellurik	CSAMT	Georadar	SNMR	Reflexionsseismik	Refraktionsseismik (Tomographie)			Oberflächen-wellenseismik	
Abstandsgeschwindigkeit	§ 22, § 24 1, 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gebirgsdurchlässigkeit	§ 23, § 24 1, 2, 4, 6, 7, 11	-	-	-	(X)	(X)	-	X	X	X	-	(1)	X	(X)	-	X	(X)	
Gesteinsdurchlässigkeit	§ 24 1, 4, 6, 11	-	-	-	(X)	(X)	-	X	X	X	-	(1)	X	(X)	-	X	(X)	
hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert	§ 24 1, 2	-	-	-	(X)	(X)	-	X	X	X	-	(1)	X	(X)	-	X	(X)	
effektiver Diffusionskoeffizient	§ 24 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
absolute Porosität	§ 24 1	-	-	-	(X)	(X)	-	X	X	X	-	(1)	X	(X)	-	X	(X)	
effektive Porosität	§ 24 1, 11	-	-	-	(X)	(X)	-	X	X	X	-	(1)	X	(X)	-	X	(X)	
Verfestigungsgrad (Tongestein)	§ 24 1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	(X)	-	X	(X)	
hydraulischer Gradient	§ 24 1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tortuosität	§ 24 1	-	-	-	(X)	(X)	-	X	X	X	-	(1)	X	(X)	-	X	(X)	

Tabelle 7-3: Bohrlochgeophysikalische Messmethoden: Zuordnung und Bewertung der Eignung zur Bestimmung relevanter Messgrößen.

1: Die Messmethode ist geeignet.
 -: Die Messmethode ist nicht geeignet.
 X: Die Messmethode kann zur Bestimmung der Messgröße beitragen.
 (): Es liegen Einschränkungen in der Erkundungstiefe oder im Messbereich vor.

Relevante Messgröße	Anlage des StandAG	Geophysik – Bohrlochmessmethoden																					
		Akustische Methoden		Optische Methode	Radiometrische, kernphysikalische Methoden									Elektrische Methoden						Magnetik			
		Sonic Log Akustik Log	Borehole Televiwer		geführte Wellen	Borehole TV Video	Gamma Log	Spectral Gamma Log	Gamma-Gamma Density	Pe-Log	Neutron- Neutron	Neutron-Gamma	Gepulste Neutron- Gamma-Messung	Eigenpotenzial	Widerstand	Fokussierter Widerstand	Dipmeter, Dip Log, DIP	El. Bohrloch- Scanner Formation MicroImager	Induktion	Dielektrische Wellenmessung	Bohrlochradar	magnetische Suszeptibilität	Nuclear Magnetic Resonance NMR
Abstandsgeschwindigkeit	§ 22, § 24 1, 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gebirgsdurchlässigkeit	§ 23, § 24 1, 2, 4, 6, 7, 11	X	X	-	X	-	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	(1)
Gesteinsdurchlässigkeit	§ 24 1, 4, 6, 11	X	X	-	X	-	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	(1)
hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert	§ 24 1, 2	X	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	(1)
effektiver Diffusionskoeffizient	§ 24 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
absolute Porosität	§ 24 1	X	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	(1)
effektive Porosität	§ 24 1, 11	X	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	(1)
Verfestigungsgrad (Tongestein)	§ 24 1, 2	X	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-
hydraulischer Gradient	§ 24 1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tortuosität	§ 24 1	X	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	(1)

Tabelle 7-4: Laboruntersuchungen: Zuordnung und Bewertung der Eignung zur Bestimmung transportrelevanter Messgrößen.

- 1: Die Messmethode ist geeignet.
- : Die Messmethode ist nicht geeignet.
- X: Die Messmethode kann zur Bestimmung der Messgröße beitragen.
- (): Es liegen Einschränkungen in der Erkundungstiefe oder im Messbereich vor.

Relevante Messgröße	Paragraf StandAG	Laboruntersuchungen								
		Korngrößenanalyse	Durchströmungsversuch	Diffusionsversuch	Tomographie					Auftriebswägung, Porosimetrie, Pyknometrie
					Magnetresonanztomographie	elektrische Widerstandstomographie	Computertomographie	Einzelphotonen-Emissions-Tomographie	Positronen Emissions-Tomographie	
Anlage des StandAG										
Abstandsgeschwindigkeit	§ 22, § 24 1, 11	-	-	-	-	-	-	X	X	X
Gebirgsdurchlässigkeit	§ 23, § 24 1, 2, 4, 6, 7, 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gesteinsdurchlässigkeit	§ 24 1, 4, 6, 11	(1)	(1)	-	X	X	1	1	1	-
hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert	§ 24 1, 2	(1)	(1)	-	-	-	-	X	X	-
effektiver Diffusionskoeffizient	§ 24 1	-	-	1	-	-	-	X	X	-
absolute Porosität	§ 24 1	-	X	X	X	X	X	X	X	X
effektive Porosität	§ 24 1, 11	-	X	X	X	X	X	X	X	X
Verfestigungsgrad (Tongestein)	§ 24 1, 2	-	X	X	X	X	X	X	X	X
hydraulischer Gradient	§ 24 1, 2	-	-	-	-	-	-	X	X	-
Tortuosität	§ 24 1	-	-	-	X	X	X	1	1	-

7.2. Bewertung von Messmethoden zur Bestimmung hydrogeochemischer Messgrößen

Die Qualität der Ergebnisse von hydrogeochemischen Messgrößen ist in hohem Maße abhängig von der Messstellenplanung sowie der Protokollierung, Probennahme und -lagerung bis zur Analyse im Labor. Dabei ist hier auf die Wahl der Materialien von Messstelle und Probennahme-Equipment sowie die Lagerdauer zu achten, um den Chemismus der Wasserprobe bis zur Analyse möglichst wenig zu beeinflussen. Die Messung der Vor-Ort-Parameter (s. Abschnitt 6.1)

- pH-Wert,
- elektrische Leitfähigkeit/Salinität,
- Redoxpotenzial,
- Wassertemperatur,
- Sauerstoffgehalt,
- gelöste Gase (z. B. CO₂, H₂S)

sowie eine organoleptische Prüfung sind somit wichtige Bestandteile der Qualitätssicherung und können im Feld mittels elektroanalytischer Methoden (Sonden) mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden.

Die nachfolgenden Messgrößen sind mit genügend hoher Genauigkeit nur im Labor bestimmbar. Das Labor muss eine entsprechende Akkreditierung aufweisen, um eine Qualitätssicherung während der Analysen sowie reproduzierbare Arbeitsabläufe sicherstellen zu können.

Haupt- und Spurenelemente des Fluides

Die Bestimmung der Haupt- und Spurenelemente erfolgt spektrometrisch bzw. in Kombination mit chromatographischen Methoden, was nach chromatographischer Auftrennung der Moleküle eine Identifizierung und Quantifizierung ermöglicht (s. Abschnitt 6.2.1 und 6.2.2).

Hierbei ist insbesondere die Massenspektrometrie mit induktiv-gekoppeltem Plasma (ICP-MS) eine sehr effektive und bewährte Standardmethode, welche einen hohen Probendurchsatz und niedrige Nachweisgrenzen aufweist.

Gehalt Kolloide und Komplexbildner

Mit Hilfe der laser-induzierten Breakdown-Detektion (LIBD) wurde eine hochautomatisierte Methode aus dem Bereich der Spektrometrie etabliert (s. Abschnitt 6.2.1), mit deren Hilfe sich aquatische Kolloide im Grundwasser quantitativ und mit einer hohen Nachweisempfindlichkeit im Vergleich zu anderen spektrometrischen Methoden oder der Viskosimetrie bestimmen lassen. Unter Angabe des mittleren Kolloiddurchmessers und deren Anzahl sowie bei bekannter Dichte der Kolloide kann auch die Massenkonzentration bestimmt werden.

Die Bestimmung der Komplexbildner, wie z. B. der Karbonatkomplexe oder anionischer Bestandteile erfolgt über die Messung des Karbonatgehaltes der Lösung bzw. mittels spektrometrischer Methoden.

Karbonatgehalt

Die Titration ist die bewährteste und einfachste Labor-Messmethode, um den Karbonatgehalt der Grundwasserproben zu bestimmen (s. Abschnitt 6.2.3).

Isotopenzusammensetzung

Bei der Bestimmung der Isotopenzusammensetzung des Grundwassers wird die Massenspektrometrie (Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie) in Verbindung mit der Gaschromatographie eingesetzt.

Auch die RFA, Kernspinresonanzspektroskopie und Infrarotspektrometrie werden hierbei eingesetzt, jedoch hat sich die Massenspektrometrie aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile als bewährte Methode etabliert.

Viskosität Fluid

Die Viskosität des Fluides wird im Labor standard- und routinemäßig mit Hilfe von Viskosimetern ermittelt (s. Abschnitt 6.2.5).

Dichte Fluid

Die Bestimmung der Dichte kann laborativ mittels Pyknometer, Biegeschwinger oder Aräometer erfolgen (s. Abschnitt 6.2.6). Grundwasserproben sollten aus verschiedenen Teufenbereichen entnommen werden, da mit zunehmender Teufe in der Regel auch die Salinität des Grundwassers zunimmt.

Ionenstärke

Die Ionenstärke wird nicht direkt bestimmt, sondern rechnerisch anhand der Gesamtheit aller gelösten Ionen im Fluid (durch vorangegangene Analyse der Haupt- und Spurenelemente der wässrigen Lösung) ermittelt.

K_d -Werte der Radionuklide

Bei der Bestimmung der Verteilungskoeffizienten von Radionukliden ist zu beachten, dass die ermittelten Messwerte nur unter den jeweiligen Laborbedingungen gültig sind. Batchversuche sind relativ einfach durchzuführende Messmethoden, jedoch nur an gestörten (zerkleinerten) Gesteinsproben durchführbar. Gegenwärtig werden daher im Rahmen der Endlagerforschung (z. B. durch die Nagra in der Schweiz) Sorptionswerte auch aus Diffusionsexperimenten an intakten Gesteinsproben abgeleitet und mit Ergebnissen aus Batchversuchen verglichen. Um ein tieferes Prozessverständnis hinsichtlich der Adsorptions-, Absorptions- und Desorptionsprozesse zu erhalten und welches der jeweilige Hauptmechanismus der Sorption ist, sollten Sorptionsversuche mit spektroskopischen Methoden zur Bestimmung der Festphasen wie z. B. der Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS) verifiziert werden.

Tabelle 7-5: Hydrochemische Messmethoden: Zuordnung und Bewertung der Eignung zur Bestimmung relevanter Messgrößen.

- 1: Die Messmethode ist geeignet.
- : Die Messmethode ist nicht geeignet.
- X: Die Messmethode kann zur Bestimmung der Messgröße beitragen.
- (): Es liegen Einschränkungen in der Erkundungstiefe oder im Messbereich vor.

Relevante Messgröße	Anlage des StandAG	Hydrochemische Labormethoden																					
		Spektrometrie/Spektroskopie											Chromatographie					Elektroanalytische Methoden	Titration	Säulenversuch	Batchversuch	Viskosimeter	Pyknometer, Aräometer, Biegeschwinger
		Atomabsorptions-spektroskopie	Atomemissions-spektrometrie	Atomfluoreszenz-spektrometrie	Röntgenfluoreszenz-analyse	Röntgenabsorptions-spektroskopie	UV/vis-Spektrometrie	Fluoreszenz-spektrometrie	Kernspinresonanz-spektroskopie	Infrarotspektrometrie	Massenspektrometrie	Laser-induzierte Break-down-Detektion	Ionenchromatographie	Gaschromatographie	Flüssigchromatographie	Überkritische Fluidchromatographie							
Haupt- und Spurenelemente des Fluides	§ 24 10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	
pH-Wert	§ 24 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	
Eh-Wert	§ 24 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	
Gehalt Kolloide und Komplexbildner	§ 24 10	X	X	X	X	X	1	X	X	X	X	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Karbonatgehalt	§ 24 10	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	
Isotopenzusammensetzung	§ 22, § 24 1	-	-	-	X	-	-	-	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	
Viskosität Fluid	§ 24 1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	
Dichte Fluid	§ 24 1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
Ionenstärke	§ 24 9,10	X	X	X	X	-	-	-	-	-	X	-	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	
Elektrische Leitfähigkeit/Salinität	§ 24 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	X	-	-	-	-	-	
K _d -Werte der Nuklide	§ 24 9	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	

7.3. Erfahrungen aus der bisherigen und aktuellen Endlagerforschung

In einer gemeinsamen Studie des GRS und des Öko-Institutes e.V. „Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland“ (2008) sowie bei Appel & Habler (2001) werden folgende Methoden in der Reihenfolge ihrer relativen Anwendungshäufigkeit bei internationalen Erkundungsprogrammen zu potenziellen Endlagerstandorten aufgeführt:

- **Einbohrloch-Packerversuche** (WD-, Injektions-, Slug- und Bail, Drill-Stem- und Pulse-tests), insbesondere Pulse-Tests bei sehr geringen Gebirgsdurchlässigkeiten $< 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- **Fluid-Logging**: Entweder als Einzelmethode, insbesondere um Klufftransmissivitäten zu ermitteln, oder in Kombination mit Packerversuchen, um tiefengenaue Zu- und Abflusszonen zu bestimmen.
- **Interferenztests** (Mehrbohrloch-Versuche: Langzeitpumpversuche, Mehrbohrloch-Packerversuche, Potenzialmessungen, Tracerversuche): Diese Versuche erfassen einen größeren Gebirgsbereich, sind aber aufwändiger als Einbohrloch-Versuche und werden daher seltener angewandt.

In einer Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle im Kristallingestein (Jobmann et al. 2016) wird überwiegend der Einsatz folgender Messmethoden genannt:

- Bei Gebirgsdurchlässigkeiten bis minimal $10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: Pumpversuche, Wasserdruck-Versuche, Slug-Tests;
- Bei sehr geringen Gebirgsdurchlässigkeiten bis minimal $10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: Injektions- und Pulse-Tests, Entnahmetests mit konstanter Rate (Constant Rate Test);
- Zur Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeit: Tracerversuche.

In den gering durchlässigen kristallinen Wirtsgesteinen kommen dabei überwiegend Packertests zur Anwendung (Jobmann et al. 2016):

- Einfachloch-Packerversuche zur Untersuchung größerer Bohrungsbereiche sowie
- Doppel- und Mehrfachpackersysteme zur Abgrenzung definierter Messbereiche oder zur Abgrenzung von Kluftsystemen.

Zur Charakterisierung von Kluftsystemen werden in Jobmann et al. (2016) die hydrogeologischen Versuche in sogenannten Bohrlochfächern (dem Abteufen mehrerer Bohrungen in verschiedenen Winkeln von einem gemeinsamen Ausgangspunkt aus) aufgeführt, bei welchen die Klüfte durch Packersysteme voneinander getrennt werden und nach Einpressen eines Fluides und Messen der Zuflüsse und Druckhöhen in anderen Bohrungen die Wasserbewegungen im Gebirgsbereich und die räumliche Vernetzung der Klüfte erfasst werden können. Praktische Erfahrungen hierzu gibt es bei folgenden Untersuchungen:

- Bohrlochkranzversuch im Untertage-Testlabor Grimsel (Liedtke et al. 1994),
- TRUE-Experiment (SKB 2008),
- Untertage-Testlabor Grimsel (Nagra 2003).

In einem Synthesebericht der DBE Technology GmbH zur „Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen“ (DBE Technology GmbH 2011) sind die bei der übertägigen Standorterkundung am meisten verwendeten Methoden zur Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und der Deckgebirge Durchströmungs- und Einschwingversuche (Porengrundwasserleiter), Pumpversuche (Poren und Kluftgrundwasserleiter) sowie Tracer- und Injektionstests (vgl. Schreiner & Kreysing 1998, Langguth & Voigt 2004). Ergänzend werden nach DBE Technology GmbH

(2011) Laboruntersuchungen (z. B. Korngrößenanalysen, Diffusionsversuche) zur Bestimmung hydraulischer und hydrogeochemischer Messgrößen durchgeführt, z. B. (Nagra 1999, Nagra 2004). Bohrprogramme mit tiefen Erkundungsbohrungen dienen im Wesentlichen der Analyse des lithologischen und strukturgeologischen Aufbaus des Deckgebirges bzw. des Nebengesteins sowie der Bestimmung der Verbreitung, Eigenschaften und Zusammensetzung des Wirtsgesteins, aber auch zum Nachweis von möglicherweise im Umfeld des geplanten Endlagerstandortes vorkommenden hydraulisch aktiven Störungszonen. In den Bohrungen werden geophysikalische, hydraulische und felsmechanische Messungen zur Gebirgscharakterisierung durchgeführt (Hammer & Sönneke 2009). Die Tiefbohrungen ermöglichen zudem die Kalibrierung seismischer Untersuchungen. Durch die Kombination von Oberflächenseismik und Bohrlochseismik können nach DBE Technology GmbH (2011) die Erkundungsergebnisse verbessert werden.

In DBE Technology GmbH (2011) sind folgende gesteinspezifische hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Untersuchungen aufgeführt:

Steinsalz: eine hydrogeologische Analyse des Deckgebirges, von Scheitelgräben, Verbreitung von Grundwasserleitern und von quartären Rinnen oder Subrosionssenken (hydraulische Gradienten, Hydrochemie der Grundwässer, Verweilzeiten) sowie eine Analyse der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine, z. B. Salzstock Gorleben (Zirngast 1985, Köthe et al. 2007, Klinge et al. 2007, Bornemann et al. 2008).

Tongestein: eine hydrogeologische Analyse des Deckgebirges (z. B. Existenz von quartären Rinnen, Vorkommen von mächtigen Störungszonen, Durchlässigkeiten und hydraulische Potenziale in den Deckgebirgsschichten, Hydrochemie der Grundwässer zur Bestimmung von Alter, Verweilzeit und Fließgeschwindigkeit) sowie eine Analyse der sorptions- und hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine (z. B. Langzeitpacker- oder Tracertests), z. B. Endlagerprojekte in Frankreich und in der Schweiz (Hammer & Sönneke 2009).

Kristallgestein: Bestimmung der Grundwasserbeschaffenheit und Alter der Grundwässer, Vorkommen und hydraulische Eigenschaften von Poren- (im Deck- und Nebengebirge) und Kluftgrundwasserleitern, z. B. Endlagerprojekte Forsmark und Oskarshamn in Schweden (SKB 2005a, SKB 2005b) sowie in Finnland (Posiva 2005).

Im Rahmen der übertägigen Erkundung des Wirtsgesteines „Opalinuston“ wendet die Nagra (Schweiz) insbesondere folgende geohydraulische Messmethoden zur Durchlässigkeitsbestimmung in Abhängigkeit vom Gesteinstyp, der Gebirgsdurchlässigkeit und der Tiefenlage an (Nagra 2019a) an:

- Versickerungs-/Auffüllversuche,
- Pumpversuche,
- hydraulische Packertests (injizierend und/oder entnehmend) sowie
- Laboruntersuchungen an Bohrkernen.

Die Nagra hat hierfür, neben der Anwendung der DIN 18130-1 (1998) (ersetzt durch DIN EN ISO 17892-11 (2019)), aufgrund ihrer bisherigen Erfahrung in der Erkundung für „geologische Tiefenlager“ auch eigene Standards für hydraulische Untersuchungen in tonigen Gesteinseinheiten entwickelt, um zuverlässige, tiefenaufgelöste Messwerte der betreffenden Einheiten zu ermitteln (Ostrowski et al. 1989, Wyss 1989, Ostrowski et al. 1992, Nagra 2001).

Die Anzahl und Lage der hydraulischen Packertests sowie die sich aus dem Abstand der Packer ergebenden Intervalllängen werden entsprechend der (hydro-)geologischen Gesteinseinheiten und der jeweiligen Erkundungsziele festgelegt (Nagra 2019a). In einer ca. 1.000 m tiefen Vertikalbohrung führte die Nagra etwa 20 (mehrphasige) hydraulische Packertests durch (Nagra 2001, Nagra

2019a). Insbesondere wurde hier die Erfahrung gemacht, dass für hochspezialisierte hydraulische Untersuchungen im geringdurchlässigen Gestein wie z. B. den Packertests in Tongesteinen, die Anzahl der Experten weltweit noch begrenzt ist.

Dafür, dass Gebirgsdurchlässigkeit und Gebirgswasserdruck mit zu den relevantesten Messgrößen der hydrogeologischen Erkundung zählen, ist der zur Erhebung nötige Aufwand nach Einschätzung der Nagra (Nagra 2019a) vertretbar, da in den dafür benötigten Bohrungen auch weitere Untersuchungen zu anderen Messgrößen vorgenommen werden können (Ziehen von Bohrkernen, geophysikalische Bohrlochmessungen, Spannungsmessungen, Entnahme von Wasser- und Gasproben sowie hydraulische Langzeitmessungen am Bohrloch). Zusätzlich können der Detaillierungsgrad und somit der Aufwand der geohydraulischen Messmethoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit gesteuert werden:

- Im Zusammenhang mit der Erkundung eines geologischen Tiefenlagers können zahlreiche Untersuchungen zur Gebirgsdurchlässigkeit je nach Anspruch und Aufgabenstellung sowohl rasch und verhältnismäßig kostengünstig als auch detailliert und aufwändig durchgeführt werden. Allerdings werden die Untersuchungen tendenziell anspruchsvoller, umso geringdurchlässiger ein Gestein ist.
- Wenn keine exakten Werte oder die Ermittlung von Fließmodellen angestrebt werden, können selbst in geringdurchlässigen Gebirgsbereichen grobe Richtwerte ermittelt werden (Nagra 2019a).

Abhängig von Gebirgsdurchlässigkeit und Dauer des Messdurchführung besitzen die von der Nagra hauptsächlich eingesetzten geohydraulischen Messmethoden kleine bis mittlere Reichweiten sowie, abhängig von der jeweiligen Untersuchungsmethode, dem Packersystem oder der Intervalllänge, eine mittlere bis hohe örtliche Auflösung. Sofern die Messmethode das Gebirge nicht verändert (z. B. Suffosion bei starken Pumpraten), besitzen die Messergebnisse eine hohe Reproduzierbarkeit und (bei genügend zeitlichem Abstand zwecks Druckerholung) somit auch eine geringe Tendenz zur Beeinflussung nachfolgender Messungen. Die Fehleranfälligkeit wird von der Nagra je nach Messmethode als mittel bis hoch eingeschätzt, da teilweise viel Expertenwissen und Erfahrung nicht nur bei der Durchführung, sondern auch bei der Auswertung der Messungen erforderlich ist (Nagra 2019a).

Die Nagra selbst kann in jedem Standortgebiet bereits mindestens eine Tiefbohrung vorweisen (Nagra 2019a). Entsprechend der (hydro-)geologischen Standortbedingungen bzw. des Erkundungsbedarfs sollen bis zur Standortwahl in jedem Standortgebiet in den nächsten Jahren mindestens etwa zwei Tiefbohrungen hinzukommen mit denen vor allem die tieferen Grundwasservorkommen erkundet werden können (Nagra 2019a).

Um zuverlässige, tiefenaufgelöste Informationen aus den hydrogeochemischen Analysen zu erhalten entnimmt die Nagra Wasserproben vorwiegend im Hangenden und Liegenden des Wirtgesteins Opalinuston bzw. der tonigen Rahmengesteine aus den gut bis gering durchlässigen Gesteinseinheiten wie z. B. Malm- und Muschelkalk (im Malm wurden hydraulische Durchlässigkeiten zwischen $6 \cdot 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ und $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ gemessen, der Muschelkalk weist an den Messpunkten höhere hydraulische Durchlässigkeiten von $1 \cdot 10^{-7}$ - $5 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ auf); teilweise aber auch in den quartären Ablagerungen, der Molasse sowie dem Grundgebirge. Proben werden aber auch aus Quellen gewonnen, um Informationen über oberflächennahe Grundwasservorkommen zu gewinnen (Nagra 2019b).

Bereits vor Ort (z. B. im Rahmen eines Pumpversuches) erfolgt die Messung der wichtigsten Messgrößen (Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotenzial, Sauerstoffgehalt sowie ggf. eine organoleptische Beurteilung). Im Labor werden entsprechend der Untersu-

chungsziele Element- und Isotopengehalte sowie Isotopenverhältnisse, organische Bestandteile, gelöste Gase, etc. bestimmt und dabei auf stark standardisierte Messmethoden entsprechend der Normen zurückgegriffen. Die Bestimmung der wichtigsten hydrochemischen Messgrößen ist daher nach Erfahrung der Nagra mit verhältnismäßig geringem Aufwand bzw. Kosten verbunden. Für anspruchsvolle Analysen (wie z. B. bestimmte Isotopen- bzw. Altersbestimmungen) ist die Anzahl der Experten bzw. geeigneten Labore jedoch weltweit begrenzt. Hierbei greift die Nagra auch auf die Zusammenarbeit mit Hochschulen zurück (Nagra 2019b).

Die Methoden zur Beprobung von Porenwasser aus den geringdurchlässigen Gebirgsbereichen sind einzig bei spezialisierten (Forschungs-)Instituten verfügbar. Grundsätzlich kommen hier bei der Nagra unterschiedlich aufwändige und spezialisierte Beprobungsmethoden im Hinblick auf die Analysen von z. B. Edelgasen, stabilen Isotopen, Anionen oder der Gesamtchemie des Porenwassers (inkl. pH, Alkalinität) zum Einsatz (Nagra 2019b) (s. Abschnitt 6.2).

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Untersuchungsparameter sieht die Nagra ein ständiges Entwicklungspotenzial bei der Labormesstechnik; dies gilt besonders auch für die schnelle und zuverlässige Bestimmung bestimmter Messgrößen im Feld (z. B. mit Hilfe von Schnelltests bzw. Messsonden).

7.4. Eingeschränkte Erfassungsmöglichkeiten bei übertägiger Erkundung

Alle im StandAG (2017) aufgeführten, für die hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Untersuchungen relevanten Messgrößen (s. Kapitel 3 und 4) sind durch verschiedene Messmethoden direkt oder indirekt erfassbar (s. Kapitel 7). Darüber hinaus stehen Messmethoden zur Verfügung, die zur Bestimmung der jeweiligen Messgröße über Modellannahmen und/oder empirische Zusammenhänge beitragen können. In den meisten Fällen eignen sich mehrere Methoden für die Bestimmung einer bestimmten Messgröße (s. Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-5). Gerade der Einsatz einer Kombination verschiedener, physikalisch unabhängiger Methoden kann die mögliche Variationsbreite der Messgrößen eingrenzen und damit die Aussagesicherheit deutlich erhöhen.

Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen, Reichweite, Reproduzierbarkeit, Erkennungs- und Nachweisgrenzen, Fehleranfälligkeit sowie mögliche ungünstige Auswirkungen und Beeinflussungen durch Anwendung der Methode sind für alle Messmethoden zur Bestimmung transportrelevanter Gesteinseigenschaften im Kapitel 5 beschrieben. Die für die Hydrogeochemie zur Verfügung stehenden Messmethoden werden in Kapitel 6 hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten bewertet.

Das nachfolgende Kapitel 8 gibt einen Orientierungsrahmen für die Erkundung von Standortregionen. Dennoch ist für jede übertägige Erkundung einer Standortregion individuell zu prüfen und zu planen, welche Kombination von Messmethoden mit welchen Messwerten und in welchem Umfang zur Bestimmung der jeweiligen Messgröße geeignet ist. Im Folgenden soll in Ergänzung der Kapitel 5 und 6 noch einmal zusammenfassend auf mögliche Einschränkungen bei der übertägigen Erkundung hingewiesen werden, die im Extremfall auch zur Unmöglichkeit der Erfassung der Messgrößen führen können.

Allen Messmethoden immanent ist, dass bei der Ermittlung von Messwerten zufällig verteilte oder systematische Messabweichungen auftreten. Diese sind z. B. durch Wiederholungsmessungen, oder über andere für die Erfassung der jeweiligen Messgröße geeigneten Messmethoden, zu quantifizieren und die Einwirkung auf die relevante Messgröße, die sich meist aus mehreren messbaren Größen bestimmt, mittels Fehlerfortpflanzung zu ermitteln.

7.4.1. Oberflächengeophysikalische Messmethoden

Mit Ausnahme der Oberflächen-Nuklear-Magnetischen Resonanz (SNMR) können oberflächengeophysikalische Messmethoden nur über Modellannahmen und/oder empirische Zusammenhänge zu den relevanten Messgrößen beitragen. Für die Erkundung des ewG mit Erkundungstiefen von über 300 m sind allerdings nur die Reflexionsseismik und verschiedene elektromagnetische Methoden (TEM, MT, CSAMT) – die SNMR fällt nicht darunter – ohne Einschränkung geeignet. Die Auflösung dieser Methoden ist physikalisch begrenzt und liegt, abhängig von der Erkundungstiefe, im Meter- bis Dekameterbereich.

Darüber hinaus beruhen die meisten Verfahren der reflexionsseismischen Abbildung des Untergrundes auf lateral aushaltenden Kontrasten der akustischen Impedanz (durch geologische Schichtgrenzen), die innerhalb von Kristallingestein und Steinsalz aber nicht vorliegen müssen. Seismische Abbildungen von Strukturen innerhalb von Kristallingestein sind Stand der Forschung (z. B. Buske et al. 2015, Hlousek et al. 2015).

Ein großer Vorteil der meisten oberflächengeophysikalischen Messmethoden ist die Möglichkeit des flächendeckenden Einsatzes und damit die räumliche Erfassung des Untergrundes. Die Größe der zu untersuchenden Fläche hängt insbesondere von der Erkundungstiefe und natürlich der Ausdehnung der zu erkundenden Standortregion ab. Es ist hier mit Flächen von mehreren Zehner-Quadratkilometern zu rechnen, so dass in Deutschland oft hunderte von Grundeigentümer und Nutzungsberechtigten betroffen sind. Da nach § 12 Abs. 1 StandAG für die Erkundung von Standortregionen Teile des Bundesberggesetz (BBergG 1980) anzuwenden sind, ist dabei zu beachten, dass für die Nutzung der Untersuchungsfläche zur Durchführung der geophysikalischen Messungen die Zustimmung der betroffenen Grundeigentümer und Nutzungsberechtigten einzuholen ist. Darüber hinaus sind im Rahmen eines Betriebsplanverfahrens weitere Behörden, zu deren Aufgaben die Wahrnehmung öffentlicher Interessen gehört (z. B. Naturschutzbehörden, Wasserbehörden, Gemeinden, etc.), mit einzubeziehen und die Gelegenheit zur Stellungnahme zu geben. Wird die erforderliche Zustimmung versagt, so kann sie zwar durch eine Entscheidung der zuständigen Behörde ersetzt werden, da nach § 12 Abs. 1 StandAG „die übertägige und untertägige Erkundung aus zwingenden Gründen des öffentlichen Interesses erfolgt“, dennoch ist in so einem Fall wahrscheinlich mit einem längeren (ggf. mehrjährigen) Genehmigungsverfahren zu rechnen oder Lücken im flächenhaften Messraster in Kauf zu nehmen. Letzteres kann, abhängig von der Größe der Lücken, zu erheblichen Qualitätseinbußen der Messergebnisse führen.

7.4.2. Geohydraulische und bohrlochgeophysikalische Messmethoden

Zur Durchführung von geohydraulischen und bohrlochgeophysikalischen Messmethoden sowie zur Gewinnung von Fluid-, Gesteins- und Gebirgsproben für Laboruntersuchungen sind Bohrungen in den zu erkundenden Bereichen notwendig.

Großer Vorteil der Messungen in Bohrlöchern ist, dass die temperatur- und druckabhängigen Eigenschaften des durchteuften Gebirges in situ erfasst werden können. Bohrlochgeophysikalische Messmethoden haben dabei eine radiale Reichweite um das Bohrloch im Zentimeter- bis Meterbereich. Geohydraulische Messmethoden erfassen meist größere Gebirgsvolumen und ihre Reichweite liegt bei Packertests zwischen 1 m bis 10 m und bei Pump- und Injektionsversuchen zwischen 10 m bis über 100 m (s. Tabelle 5-1). Die punktuell in Bohrungen erfassten Messgrößen müssen allerdings in den Raum extrapoliert bzw. zwischen Bohrungen interpoliert werden, wobei je nach Heterogenität des Gebirges und Abstand der Bohrungen mit gleichen Messungen erhebliche Unsicherheiten auftreten, die ggf. durch statistische Verfahren bewertbar sind. Oberflächengeophysikalische Methoden ermöglichen es, die punktuell gewonnenen Informationen, belegt durch

(andere) physikalische Messwerte, in den durch geophysikalischen Messmethoden erkundeten Raum zu übertragen und so die Unsicherheiten der Extra- und Interpolation zu reduzieren.

Bohrungen stellen immer eine künstlich geschaffene Messumgebung dar, so dass die Situation zur Messung im Bohrloch und für die Probennahme unter Umständen nicht mehr repräsentativ für das Gebirge ist, denn:

- durch den Bohrvorgang selbst entstehen abhängig vom Spannungsfeld im unmittelbaren Umfeld der Bohrung Mikrorisse. Bei geohydraulischen Methoden, die mit einer Druckerhöhung auf abgegrenzten Strecken im Bohrloch arbeiten, können diese Mikrorisse aufgeweitet werden und es kann zu erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten sowie irreversiblen Veränderungen des Gebirgsbereiches kommen.
- abhängig von der hydraulischen Durchlässigkeit, den Spannungsverhältnissen und den durch die Bohrung erzeugten Mikrorissen infiltrieren Bohrspülungen das bohrlochnahe Gebirge.
- die Eigenschaften der Bohrspülung selbst (Dichte, Viskosität, pH-Wert, elektr. Widerstand, Temperatur) können die chemischen Eigenschaften des bohrlochnahen Gebirges und der gewonnenen Fluidproben verändern.
- einige Messmethoden sind bei eventuell vorhandenen Bohrlochausbauten (Verrohrung, Zementation, Hinterfüllung) nicht mehr einsetzbar (s. Tabelle 5-2, Tabelle 5-3).

Diese Einflüsse der Bohrung und der Bohrspülung auf das bohrlochnahe Gebirge sind z. T. bereits aus Bohrungen zur Grundwassererkundung oder zur Kohlenwasserstoffexploration ausreichend bekannt und können durch sorgfältiges Arbeiten beim Erstellen der Bohrungen und des Messstellenausbaus (s. Abschnitt 8.2) sowie geeignete Messgeometrien und/oder Korrekturen minimiert werden. Die Interaktion von Bohrspülungen mit der Bohrlochwand und den sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die hydraulischen Eigenschaften ist weiter zu untersuchen (Nagra 2019a).

Besonders in Tonsteinen sind hydraulische Messmethoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit abhängig von der Bohrmethode bzw. Bohrspülung, der Bohrlochgeschichte (insbesondere den Druckschwankungen während der Bohr- und Untersuchungsarbeiten), den initialen Bohrlochbedingungen (z. B. Bohrlochausbrüche) sowie der Bohrlochentwicklung während der Untersuchungen (z. B. osmotische Effekte oder Quellphänomene). Generell stehen den möglichst detaillierten hydraulischen Untersuchungen in geringdurchlässigen Gebirgsbereichen die dafür benötigte Zeitdauer hinsichtlich der Bohrlochentwicklung und vor allem auch hinsichtlich der Kosten gegenüber (Nagra 2019a). Die Nagra sieht im Rahmen ihrer praktischen Erfahrung daher weiteres Verbesserungspotenzial durch das Abteufen von Bohrungen, die nur zum Zweck der hydraulischen Untersuchungen abgeteuft werden sowie Untersuchungen in unterirdischen Bauwerken (wie z. B. Felslabors), die geeignetere Randbedingungen für detailliertere und somit langfristige hydraulische Untersuchungen bieten können. Entwicklungsbedarf besteht in der Messtechnik z. B. hinsichtlich Glasfaser-optischer (Druck-)Messungen (Nagra 2019a), um beispielsweise genauere Messwerte im Bohrloch auch bei Temperaturschwankungen zu erzielen.

In § 23 StandAG wird eine Gebirgsdurchlässigkeit des ewG von weniger als $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ gefordert. Dies liegt nach jetzigem Stand von W+T außerhalb des Messbereiches der meisten geohydraulischen Messmethoden – nur Pulsetests weisen einen geeigneten Messbereich für die Erkundung des ewG auf. Wohingegen für das Deck- und Nebengebirge je nach vorliegenden k_f -Werten auch weitere geohydraulische Messmethoden (z. B. Injektionstests) eingesetzt werden können (s. Tabelle 5-1). Somit besteht ein Forschungsbedarf bei der Entwicklung und Weiterentwicklung von Messmethoden und Standards in dem für die Endlagerung relevanten Bereich mit Gebirgsdurchlässigkeiten $< 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. In Kristallingestein und Steinsalz sind auch sehr hohe spezifische elektri-

sche Widerstände im Mega-Ohmmeter-Bereich zu erwarten. Dies liegt deutlich außerhalb des Messbereiches üblicher Bohrlochsonden (Schlumberger 2015), weshalb keine eindeutigen Messwerte erzielt und somit auch keine Aussagen zu den daraus ableitbaren Messgrößen wie z. B. der Porosität getroffen werden können.

Auch Tracerversuche in gering durchlässigen Gebirgsbereichen wie z. B. des Ton- und Kristallingesteins sind nicht sinnvoll durchführbar, da bei festzustellenden k_f -Werten $< 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ selbst bei kleinen Untersuchungsvolumen die Messdauer extrem hoch sein wird.

7.4.3. Laboruntersuchungen

Zur Durchführung von Laboruntersuchungen ist die Entnahme von Fluid-, Gesteins- und Gebirgsproben notwendig, die in Bohrungen gewonnen werden. Aufgrund des durch den Bohrvorgang und die Bohrspülung beeinflussten Gesteins, der typischen Dimensionen von Gesteins- und Gebirgsproben im Zenti- bis Dezimeterbereich sowie aufgrund der untersuchten Skala, die bis in den Mikrometerbereich reichen kann, stellen sich generell die Fragen nach der Repräsentativität der Proben und der Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die reale Situation des ewG oder des Deck- und Nebengebirges.

- Beim Transport der Proben aus dem Bohrloch an die Erdoberfläche ändern sich insbesondere die Spannungs- und Temperaturverhältnisse, wodurch es zu Entfestigungen der Proben und zu Änderungen des Aggregatzustandes von eingeschlossenen Porenwässern kommen kann. Durch entsprechende Wiederbelastungsvorgänge im Labor lassen sich einige dieser Vorgänge umkehren, andere bleiben irreversibel.
- Untersuchungen in unterschiedlichen Skalenbereichen können zu verschiedenen Ergebnissen in Bezug auf die gleiche Messgröße führen. Beispielsweise unterscheiden sich Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in porösen (teil-)gesättigten Gesteinen, je nachdem ob sie mit Wellen im kHz-Bereich (Labormaßstab) oder im Zehner-Hz-Bereich (Feldmaßstab) ermittelt worden sind.
- Maßnahmen der Qualitätssicherung zur Untersuchung der Grundwasserbeschaffenheit sind in Abschnitt 8.2 ausführlich beschrieben.

Die oben aufgezählten, bei einer übertägigen Erkundung möglicherweise auftretenden Einschränkungen bei der Erfassung von relevanten Messgrößen können im Rahmen der untertägigen Erkundungsetappe verringert werden. Dies betrifft insbesondere die Laboruntersuchungen, da die Probennahme untertage ungestörter erfolgen kann und viel weniger z. B. von spülmittelgestützten Bohrlöchern abhängig ist.

8. Orientierungsrahmen für die übertägige Standorterkundung

8.1. Inhalte des Orientierungsrahmens

8.1.1. Ziel des Orientierungsrahmens

Der in diesem Vorhaben dargestellte Orientierungsrahmen kann als Unterstützung bei der Bewertung von Vorschlägen zur übertägigen Erkundung von Standortregionen dienen und berücksichtigt folgende Aspekte:

- Anforderungen an die lückenlose Dokumentation und Qualitätssicherung von Messungen und Probenahmen (s. Abschnitt 8.2),
- Berücksichtigung und Ableitung von Kriterien zur Bewertung der Qualität und Quantität der Messwerte und Messergebnisse aus dem übertägigen Erkundungsprogramm (s. Abschnitt 8.3),
- Einflussfaktoren auf die Kriterien zur Auswahl geeigneter Messmethoden zur Ermittlung der Messgrößen gemäß StandAG (2017) (s. Abschnitt 8.4),
- Einflussfaktoren auf die Kriterien zur Auswahl der geeigneten Messnetzdicke und zeitlichen Messintervalle (s. Abschnitt 8.5).

Für den Orientierungsrahmen wird sich im Rahmen dieses Vorhabens auf die hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen konzentriert, die in den Anforderungen und Kriterien der §§ 22 bis 24 StandAG (2017) festgelegt sind bzw. daraus abgeleitet werden können (s. Kapitel 3 und 4). Zudem werden die Informationen zu den Messmethoden aus den Kapiteln 5 und 6 verwendet, um die Anforderungen bzgl. der Messmethoden sowie der Messnetzichten der Messgrößen und zeitlichen Messintervalle zu treffen.

Neben der Zusammenstellung der relevanten Messgrößen und -methoden, zeigt der Orientierungsrahmen auch die grundlegenden zu berücksichtigenden Aspekte bei der Planung eines übertägigen Erkundungsprogrammes auf, wie z. B. bei der Wahl der Messnetzdicke und Messintervalle. Diese Zusammenstellung kann aufgrund der Standortabhängigkeit des jeweiligen Erkundungsprogrammes keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, jedoch bei der Planung als Orientierungshilfe herangezogen werden.

Darüber hinaus zeigt der Orientierungsrahmen die Vorteile eines umfassenden schrittweisen (iterativen) übertägigen Erkundungsprogrammes auf, welches gewährleisten soll, dass die für die Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien benötigten Informationen ermittelt werden können.

8.1.2. Berücksichtigung der Ergebnisse aus Goldsworthy et al. (2009)

Zusätzlich berücksichtigt der Orientierungsrahmen auch eine bereits durchgeführte Studie von Goldsworthy et al. (2009), welche bzgl. Umfang und Inhalt der technischen Überlegungen zu einem potenziellen Endlagerstandort auf AkEnd (2002) basiert. Ziel der Studie von 2009 war die Bewertung vorhandener nationaler und internationaler Erkundungsprogramme auf Basis des damaligen Stands von Wissenschaft und Technik für (potenzielle) Endlagerstandorte in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein, Kristallingestein sowie in Festgestein unter hinreichend mächtiger Tonabdeckung. Hierbei erfolgte keine Beschränkung auf hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Messmethoden zur übertägigen Erkundung, sondern es wurden alle Aspekte

berücksichtigt, die von den beteiligten Experten als erforderlich für eine Sicherheitsbewertung angesehen wurden. Die in Goldsworthy et al. (2009) beschriebene Anwendung geophysikalischer Messmethoden diene somit schwerpunktmäßig der Erfassung geometrischer Eigenschaften von Gesteinsbereichen mit unterschiedlichen Charakteristika und weniger der Erfassung von für das „übErStand“-Vorhaben relevanten Messgrößen.

In Goldsworthy et al. (2009) wurden u. a. für die damals betrachteten Messmethoden auf Basis der Erfahrungen der im Projekt beteiligten Experten verschiedene Quantitäts- bzw. Qualitätskategorien festgelegt. Die damals entwickelten Qualitätskategorien beziehen sich hierbei auf die zu erwartende Qualität der Erkundungsergebnisse und nicht auf die Messmethode selbst.

Die Quantitätskategorien in Goldsworthy et al. (2009) beziehen sich auf eine niedrige, mittlere oder hohe Messnetzdichte. Für diese Messnetzdichten wurden sowohl numerische als auch nicht-numerische Quantitätskategorien aufgestellt:

- Numerische Quantitätskategorien geben eine bestimmte Anzahl von Messungen pro Raum- oder Flächeneinheit vor.
- Nicht-numerische Quantitätskategorien wurden dann gewählt, wenn es galt, die mögliche Bandbreite der Messnetzdichten zwischen einzelnen Messungen bis zu einer, für das modellhafte Verständnis der Messwertverteilung ausreichenden Messwertdichte abzudecken.

Da sich das grundlegende Verständnis der geowissenschaftlichen Anforderungen an einen Endlagerstandort in Deutschland seit 2002 nicht wesentlich geändert hat (vgl. AkEnd (2002), DBE Technology (2011), Deutscher Bundestag (2017), Stand AG (2017)) können die in Goldsworthy et al. (2009) beschriebenen Messnetzdichten als „Erfahrungswerte“ weiterhin herangezogen werden.

Nähere Ausführungen hierzu sind im Anhang zu diesem Bericht enthalten.

8.2. Anforderungen an die Dokumentation und Qualitätssicherung

Grundlegende Literatur

Arbeitskreis Grundwasserbeobachtung (2018): Merkblatt – Funktionsprüfung an Grundwassermessstellen.

DWA-A 909 (2001): Grundsätze der Grundwasserprobennahme aus Grundwassermessstellen (DWA-Arbeitsblatt), inhaltlich gleich mit DVGW W 112. Beuth Verlag, Berlin.

DVGW W 110 (2005): Geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen - Zusammenstellung von Methoden und Anwendungen. Beuth Verlag, Berlin.

DVGW W 112 (2011): Grundsätze der Grundwasserprobennahme aus Grundwassermessstellen. Beuth Verlag, Berlin.

DVGW W 115 (2008): Bohrungen zur Erkundung, Beobachtung und Gewinnung von Grundwasser. Beuth Verlag, Berlin.

DVGW W 116 (2018): Verwendung von Spülungszusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser (ENTWURF). Beuth Verlag, Berlin.

DVGW W 121 (2003): Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen. Beuth Verlag, Berlin.

DVGW W 129 (A) (2012): Eignungsprüfung von Grundwassermessstellen. Beuth Verlag, Berlin.

DVGW W 135 (2018): Sanierung und Rückbau von Brunnen, Grundwassermessstellen und Bohrungen. 2. Auflage, Beuth Verlag, Berlin.

DVWK (1990): Einflüsse von Meßstellenausbau und Pumpenmaterialien auf die Beschaffenheit einer Wasserprobe. DVWK – Mitteilungen, Heft 20.

Die lückenlose Dokumentation der Messdurchführung und -ergebnisse sowie das Archivieren von Probenmaterial und der Daten aus allen Schritten der Datenerhebung, -verarbeitung, -auswertung und -darstellung dienen der Beweissicherung der im Rahmen der Erkundung ermittelten Standortigenschaften, einer transparenten, nachvollziehbaren Darstellung sowie der Ergebnisdokumentation der Erkundungsprogramme.

Die Qualität der Daten wird durch sehr viele verschiedene Faktoren beeinflusst und beginnt bereits mit der Wahl der Messmethode. In Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-5 werden die Messmethoden den Messgrößen gegenübergestellt und als geeignet bzw. ungeeignet gekennzeichnet. Bei der Angabe geeigneter Methoden erfolgte zudem eine weitere Unterteilung in Methoden, welche zur Bestimmung der Messgröße beitragen können, sowie der Hinweis auf mögliche Einschränkungen in Bezug auf die jeweilige Messgrößenbestimmung gegeben. Diese Einschränkungen können sich auf die Erkundungstiefe (z. B. Teufe > 300 m unter der Geländeoberkante) oder den Messbereich (z. B. Gebirgsdurchlässigkeit < $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) beziehen. Da bei Kristallingestein die in § 23 StandAG angegebene Obergrenze der Gebirgsdurchlässigkeit nicht zur Anwendung kommt, wenn das Endlagersystem im Wesentlichen auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht (s. Abschnitt 8.1), sind hier wiederum einige Einschränkungen bzgl. geeigneter hydraulischer Messmethoden gegebenenfalls hinfällig und somit ein breiteres Spektrum an Messmethoden geeignet.

Im weiteren Verlauf ist auf eine repräsentative Durchführung der Probennahmen und Messungen zu achten, um hinsichtlich der Beurteilung der Datenqualität eine Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Daten zu gewährleisten.

Bei der Prüfung, Auswertung und Interpretation der Daten kann die Wahl der jeweiligen Aufbereitungs- und Auswertemethode sowie der Inter- bzw. Extrapolationsmethode einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse haben. Für jeden Messwert ist eine Unsicherheits- oder Fehleranalyse durchzuführen, auch unter Berücksichtigung der durch die Durchführung der Probennahmen und Messungen bedingten Einflussfaktoren. Auch hier sind die gewählten Methoden zum Umgang mit den Daten lückenlos zu dokumentieren. Insbesondere bei Labormethoden können durch das Einhalten von Standards und den darin enthaltenden Angaben zu Wiederholungsmessungen die Messunsicherheiten gering gehalten werden.

Sowohl bei der Messdurchführung und Probennahme als auch bei der Interpretation der Daten können subjektive Einschätzungen und Erfahrungswerte der Bearbeiter einen großen Einfluss auf die Qualität der Daten und Ergebnisse haben. Daher sind sämtliche Arbeitsschritte, beginnend mit der Wahl der Methode lückenlos zu dokumentieren, um transparente Erkundungsstrategien und Entscheidungsprozesse zu gewährleisten. Zudem sollte die festgelegte Erkundungsstrategie im Rahmen von Zwischenauswertungen der erhobenen Messergebnisse iterativ an das Untersuchungsziel im jeweiligen Untersuchungsgebiet angepasst werden. Dies dient neben einer Optimierung der Datendichte auch dazu, die zuvor festgelegte Erkundungsstrategie objektiver zu gestalten und den Einfluss subjektiver Einschätzungen und Erfahrungswerte auf die Interpretation der Messergebnisse zu minimieren.

Die Dokumentation der Einflussfaktoren auf die Datenqualität sowie die Einhaltung der nachfolgenden Maßnahmen zur Qualitätssicherung sind auch relevant für die nachfolgende Ableitung von Bewertungskategorien und -kriterien im Hinblick auf die zu erwartende Qualität der Erkundungsergebnisse (s. Abschnitt 8.3).

8.2.1. Geohydraulische und geophysikalische Messungen und Auswertungen

Zur Qualitätssicherung der geohydraulischen und geophysikalischen Messungen sind sowohl vor und während der Durchführung der Messungen als auch bei der Auswertung der Messungen verschiedene Maßnahmen, z. T. in Abhängigkeit der Methoden zu ergreifen.

Maßnahmen zur Qualitätssicherung vor Durchführung der Messungen umfassen folgende Aspekte:

- Besichtigung des Messgebietes zur Planung des Messablaufs und der einzusetzenden Messgeräte.
- Es sollten als eine Voraussetzung strukturelle und hydrogeologische Modellvorstellungen vom zu untersuchenden Untergrund existieren, um das Erkundungsprogramm mit geeigneten Messparametern entwerfen zu können und um passende Lokationen für Tests auszuwählen.
- Überprüfung der Messgeräte vor Beginn der Messung und ggf. in bestimmten Zeitintervallen während der Messung auf die Einhaltung der vom Hersteller vorgegebenen technischen Spezifikationen. Die Messgeräte sind regelmäßig zu kalibrieren, ggfs. zu eichen und falls erforderlich neu zu justieren.
- Einzelne (vorgegebene) Messgrößen sind vor Beginn der Messung zu testen und die Messanordnung oder die Messparameter entsprechend der Testergebnisse ggf. zu anpassen.
- Mögliche externe Faktoren und Fremdeinflüsse, welche die Messung beeinflussen oder stören können, sind vorab zu erfassen. Die Messwerte müssen anschließend von diesen

Einflüssen bereinigt werden. Ggf. sind (Sicherheits-)Abstände zu diesen Einflussfaktoren einzuhalten.

Maßnahmen zur Qualitätssicherung während der Messung umfassen folgende Aspekte:

- Die durchgeführten Messungen, die Messwerte, die eingesetzten Messgeräte sowie Randbedingungen, die Einfluss auf die Messung haben können, sind zu dokumentieren. Es ist ein Messprotokoll zu führen.
- Die geografische Lage und Höhe aller Messpunkte ist im Rahmen der notwendigen Genauigkeit zu erfassen. Ggf. sind Referenzpunkte dauerhaft zu markieren.
- Während der Messung sind die Funktionalität der Messgeräte und die Datenqualität kontinuierlich zu überprüfen.
- Zur Erfassung oder Abschätzung von systematischen und zufälligen Messabweichungen sind an ausgewählten Messpunkten Wiederholungsmessungen durchzuführen.
- Alle digitalen Messdaten, inkl. digital geführter Protokolle und Statusinformationen über die Messgeräte, sind (mindestens) einmal täglich zu sichern und auf mindestens zwei unabhängigen, räumlich getrennten Datenträgern abzuspeichern.

Maßnahmen zur Qualitätssicherung im Rahmen der Auswertung umfassen folgende Aspekte:

- Die durch die Planung und Vorbereitung des Erkundungsprogramms erlangten Unterlagen sowie die durch die Messungen selbst erzielten Daten und Informationen sind für die Auswertung auf Vollständigkeit zu prüfen.
- Es müssen in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung, der Messsituation, der zu bestimmenden Messgröße die geeignetsten Auswerteverfahren ausgewählt werden (z. B. für gespannte oder nicht gespannte Grundwasserverhältnisse, für ausgeprägt anisotrope oder eher isotrope Gebirgseigenschaften, für söhlige oder stark geneigte Lagerung, etc.).
- Die Auswertung verschiedener Messmethoden besteht aus einer Abfolge zahlreicher Bearbeitungsschritte, die der jeweiligen Messsituation und Aufgabenstellung anzupassen sind. Darüber hinaus sind bei den einzelnen Bearbeitungsschritten die geeigneten Parameter zu wählen, um zu einem bestmöglichen Ergebnis zu kommen (z. B. Reflexionsseismik, Yilmaz 2001). Zur Optimierung des Ergebnisses sind während der Datenbearbeitung und -auswertung einzelne Bearbeitungsparameter im Rahmen einer sinnvollen Variationsbreite zu testen.
- Alle Schritte der Auswertung mit den jeweils angewendeten Bearbeitungsparametern und der eingesetzten Software sind zu dokumentieren.
- Mehrdeutigkeiten und Unsicherheiten der Ergebnisse sind anzugeben.

Ergänzend sollte zu den geohydraulischen Methoden

- das Testequipment in Abhängigkeit vom hydrogeologischen Strukturmodell an der zu untersuchenden Schicht höhengenaу gesetzt werden (z. B. müssen Packersysteme im Bohrloch derart gesetzt werden, dass unterschiedliche hydraulisch getrennte Schichten untersucht werden können),
- bei Kombination mehrerer Methoden die Reihenfolge der Erkundung sorgfältig eingehalten und dokumentiert werden,
- bei Messungen in gering durchlässigen Gebirgsbereichen eine längere Messzeit bis zum Erreichen eines stabilen Messwertes eingeplant und berücksichtigt werden,
- bei Potenzialmessungen (Druckmessungen) die Rückkehr des Grundwasserspiegels in den natürlichen Ruhezustand abgewartet werden.

8.2.2. Planung und Messstellenerrichtung

Bis auf die oberflächengeophysikalischen Messmethoden, erfordern alle der betrachteten Methoden zur übertägigen hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Erkundung das Vorhandensein von Bohrungen. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass das ausgewählte Bohrverfahren geeignet ist. Ideal sind solche Verfahren, welche

- keine wesentliche Störung des Grundwassers oder des Gebirges verursachen,
- die möglichst ungestörte Beprobung vom Grundwasser bzw. vom Gestein ermöglichen,
- geeignete Bohrloch- und Bohrlochrandbedingungen für in situ-Versuche bzw. für Installationen von Messapparaturen bereitstellen,
- eine sichere Verfüllung und Versiegelung eines nicht mehr benötigten Bohrloches gewährleisten, um jede denkbare Art von zukünftiger Auswirkung auf die Umgebung des Bohrloches auszuschließen. Dabei kommen je nach Erfordernis unterschiedliche Rückbaumaßnahmen zu Anwendung, Leitlinien hierfür sind in DVGW W135 aufgezeigt. Bei einer Verfüllung ist zu beachten, dass hydraulisch wirksame Trennschichten durch geeignete bindige Verfüllmaterialien nachweisbar dauerhaft wiederhergestellt werden.

Für die Planung, die Bohrung und den Ausbau von Messstellen für bohrlochgeophysikalische und geohydraulische Messungen sowie die Grundwasserprobennahme an Grundwasserbeschaffenheitsmessstellen existieren zahlreiche Regelwerke und Merkblätter.

Im Folgenden werden daher nur die wesentlichen Aspekte, welche bei Ausbau, Kontrolle und Dokumentation zu beachten sind aufgeführt. Für detailliertere Beschreibungen der jeweiligen Anforderungen wird auf die grundlegende Literatur zu Beginn von Abschnitt 8.2 verwiesen.

Ausbau von Grundwassermessstellen

Der Ausbau von Aufschlussbohrungen zu Messstellen richtet sich nach dem geplanten Verwendungszweck und den vorherrschenden hydraulischen und geologischen Bedingungen. Vorab sollten daher die lokalen strukturellen, hydraulischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Umfeld erkundet und eine Bewertung des vorhandenen Bestandes an Messstellen in der Umgebung durchgeführt werden. Die Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Messungen und Bohrkernansprachen dient der Abgrenzung von Grundwasserleitern und -geringleitern sowie des Filterbereiches für den weiteren Ausbau zu einer Grundwassermessstelle.

Bezüglich des Baus und Ausbaus von Messstellen ist auf einen wirksamen und aktiven Grundwasserschutz zu achten. Das gilt besonders für eine nachhaltige Abdichtung und Trennung der jeweiligen durchteuften Grundwasserleiter zur Verhinderung von Umläufigkeiten im Ringraum der Messstelle. Bei nicht sachgerechter Ausführung kann es sonst zu einem Druckausgleich vorher getrennter und ggf. unter gespannten Druckverhältnissen stehender Grundwasserleiter führen. Neben der damit verbundenen Störung des natürlichen Untergrundes und seiner Strömungsverhältnisse führt dies auch zu einer Vermischung chemisch verschiedener Grundwässer, was sich auf die Repräsentativität einer tiefenorientierten Grundwasserprobennahme auswirkt.

Folgende Aspekte sind zusätzlich beim Ausbau der Messstellen zu beachten:

- Bei der Wahl der Ausbau- und Pumpenmaterialien ist zu beachten, dass diese die Wasserbeschaffenheit für nachfolgende hydrogeochemische Untersuchungen nicht beeinflussen (DVWK 1990).
- Der Einsatz von Spülmittelzusätzen muss im Einklang mit dem vorsorgenden Gewässerschutz stehen und auf Grundlage der gesetzlichen Regelungen erfolgen.

- Spezielle Spülungsrezepte für wasserlösliche Mineralbestandteile (Steinsalz) bzw. quellfähige Tonminerale müssen auf das zu durchteufende Gebirge abgestimmt werden, Spülungsrezepturen enthält das Regelwerk DVGW W 116 (2018). Die Spülungszusätze sind zudem auch auf die Grundwasseranalysen abzustimmen. In Bohrungen wird die Bohrspülung meist mit Tracern versehen, um den Grad der Verunreinigung des gewonnenen Grundwassers abschätzen zu können.

Insbesondere im Hinblick auf die Grundwasserprobennahme im Rahmen der hydrogeochemischen Erkundung ist darauf zu achten, dass:

- die Entnahme von Grundwasser und die Erfassung der Grundwasserstände in einem hydraulisch und hydrochemisch definierten Grundwasserleiter erfolgt. Daraus ergibt sich u. U. die Notwendigkeit einer geeigneten Absperrung gegen die grundwasserüberdeckenden Schichten sowie gegen andere Grundwasserleiter.
- die Auswahl der Filterlänge und -teufe in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung und nach der Teufenlage und Mächtigkeit des maßgebenden Grundwasserleiters erfolgen sollte. Bei der Wahl der Filteroberkante sind die geologischen Verhältnisse sowie, im oberflächennahen Bereich, die natürlichen Grundwasserstandsschwankungen zu berücksichtigen.
- das ordnungsgemäße Einbringen von Filterkies und -sand sowie des abdichtenden Materials durch regelmäßiges Loten zu kontrollieren ist.

Regelmäßige Kontrolle der Grundwassermessstellen

Insbesondere bei längeren Untersuchungsreihen ist in regelmäßigen Abständen zu prüfen, ob die Mess- bzw. Entnahmestelle noch alle Voraussetzungen für eine repräsentative Probennahme erfüllt und auf Unversehrtheit des Bauwerkes, Fremdwasserzufluss sowie die Funktionstüchtigkeit von Filtern und Dichtungen hin zu untersuchen (DVGW W 112 2011).

Ausgebaute Grundwassermessstellen können mit Hilfe bohrlochgeophysikalischer Verfahren z. B. hinsichtlich ihrer Dichtheit oder der Bildung von Ablagerungen überprüft werden. Die einzelnen Verfahren werden in DVGW W 121 (2003) und DVGW W 110 (2005) aufgeführt.

Dokumentation

Die Mess- bzw. Entnahmestelle muss für Wiederholungsmessungen eindeutig gekennzeichnet werden. Dies erfolgt unter Angabe der Lagekoordinaten (Rechts- und Hochwert) sowie die Höhe über Normal-Null (NN), die zumindest für den definierten Messpunkt (nach DIN 4049 Teil 1) zur Bestimmung des Grundwasserspiegels bekannt sein sollte.

Nach der baulichen Fertigstellung der Messstelle werden die Bohr- und Ausbaudaten in einem Abschlussbericht dokumentiert (Messstellenakte). Dieser muss mindestens folgendes enthalten:

- Lagepläne, Koordinaten, Höhenangaben,
- Schichtenverzeichnis gemäß DIN EN ISO 14688-1 (2018), DIN EN ISO 14688-2 (2018), DIN EN ISO 14689-1 (2018),
- Ausbauzeichnung gemäß DIN 4023 (2006),
- Klarpumpprotokoll,
- ggf. Berichte zu geophysikalischen (Kontroll-)Untersuchungen, Kamerabefahrungen, hydraulischen Versuchen, vorliegenden Grundwasseranalysen etc.,
- Abnahmeprotokoll.

8.2.3. Anforderungen an die Probennahme

Grundwasserproben können aus Quellen oder in Bohrungen bei mittleren bis starken Wasserzutritten und, wenn möglich, während Pumpversuchen bzw. hydraulischen Packertests gewonnen werden. Die Entnahme von qualitativ guten Tiefengrundwasserproben hängt einerseits mit den Gebirgseigenschaften und andererseits mit der zur Verfügung stehenden Zeit für die Förderphase und der verwendeten Bohrtechnik zusammen. Die verwendete Bohrspülung muss dabei unterschiedlichste Funktionen erfüllen können - im Hinblick auf die Wasserprobennahme sind deren Eigenschaften kritisch zu evaluieren, da sie die Proben beeinflussen kann (Nagra 2019b).

Da die Probennahme immer den ersten Schritt der Analyse darstellt, pflanzen sich Fehler bei der Probennahme und -behandlung in der Analytik kontinuierlich fort. Auf folgende Punkte ist im Rahmen einer sorgfältigen Planung und repräsentativen Probennahme grundsätzlich zu achten. Für eine detaillierte Beschreibung der Vorgaben zur Probennahme und -handhabung wird auf die entsprechenden Merkblätter und Regelwerke in der grundlegenden Literatur verwiesen.

Analysenumfang den Fragestellungen anpassen

Die Anzahl und Art der Proben sollten an das Erkundungsziel angepasst und es sollte auf eine ausreichend große, verwertbare Probenzahl sowie ein breit ausgelegtes Analytikprogramm geachtet werden (Nagra 2019b).

Im Rahmen der Grundwasserbeprobung wird zwischen horizontbezogenen Einzelproben zur Ermittlung vertikaler Konzentrationsprofile im Grundwasser sowie tiefenintegrierten Mischproben zur großräumigeren Bewertung der Grundwasserbeschaffenheit unterschieden.

Eindeutige Zuordnung der Probe

Für eine eindeutige Zuordnung der Probe sollten Gebirgsbereiche bzw. Grundwasserleiter mit gleichen Eigenschaften zusammengefasst werden. Im Vorfeld der geohydraulischen und hydrogeochemischen Untersuchungen sollten die Anströmverhältnisse im Umfeld der jeweiligen Grundwassermessstelle z. B. auf Basis einer hydraulischen Modellierung geklärt werden. Dies setzt entweder bereits eine hohe Informationsdichte bzgl. der Standortbedingungen voraus (Beudt 1997) oder macht entsprechende Vorerkundungen erforderlich.

Veränderungen im Chemismus der Wasserprobe gering halten

Die Beprobung sollte vor (z. B. vor Tracertests) bzw. zu Beginn (z. B. bei Pumpversuchen) durchgeführt werden, da Messmethoden im Bohrloch Auswirkungen auf die Grundwasserbeschaffenheit haben können.

Welche Probennahmeausrüstung benötigt wird, richtet sich nach der Art und Beschaffenheit des zu untersuchenden Grundwassers, der Beprobungstiefe sowie nach dem jeweiligen Untersuchungsprogramm (DIN 38402-13 2016). Grundsätzlich müssen Gefäße zur Probennahme- und -aufbewahrung dicht verschließbar und aus einem Material sein, welches die Beschaffenheit der Wasserprobe nicht verändert bzw. insbesondere die zu bestimmenden Messgrößen durch Wechselwirkungen mit dem Material nicht beeinflusst werden (Jordan & Weder 2001). Probennahmegeräte und -behälter sind so zu reinigen, dass nachfolgende Analysen nicht beeinträchtigt werden. Vorgaben zur Probennahme enthält die DIN EN ISO 5667-3 (2018).

Bestimmte Inhaltsstoffe der Grundwasserprobe wie z. B. Ca^{2+} , HCO_3^- und der pH-Wert werden durch Kontakt mit der Atmosphäre und dem damit verbundenen Gasaustausch (O_2 , CO_2) beeinflusst. Die Probennahmen sollten daher in luftdicht verschließbaren Druckbehältern durchgeführt werden, um Änderungen der Redoxbedingungen und Lösung von Gasen weitestgehend zu vermeiden. Nach der Entnahme sollten die Proben dennoch zeitnah analysiert werden, um mögliche

Veränderungen im Chemismus so gering wie möglich zu halten (vgl. Tabelle 8-1). Auf lange Transportwege zu geeigneten Laboratorien ist daher zu verzichten.

Bestimmte Messgrößen erfordern eine Probenvorbehandlung (z. B. Ansäuern), die Proben sind bis zur Analyse im Labor gekühlt aufzubewahren.

Tabelle 8-1: Wasserinhaltsstoffe, welche durch die Probennahme in ihrer Konzentration (nicht) beeinflusst werden.

unveränderliche Wasserinhaltsstoffe	veränderliche Wasserinhaltsstoffe
$\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}$	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Ca}^{2+}$
Cl^-	H^+ (Acidität) und OH^- (Alkalität)
$\text{NO}_3^-, \text{PO}_4^{3-}$	Gase (z. B. $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{S}$) und flüchtige Stoffe
chemisch schwer oxidierbare organische Stoffe	leicht oxidierbare (organische) Stoffe

Bei der Entnahme von Grundwasser aus größeren Teufen ist zudem zu beachten, dass das Grundwasser hohe Temperaturen und Drücke über dem Atmosphärendruck aufweisen kann.

Dokumentation der Probennahme

Die Führung eines Probennahmeprotokolls ist notwendig, um die vorherrschenden Bedingungen am Probennahmeort festzuhalten und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Erfassung von Vor-Ort-Messgrößen

Zu den Vor-Ort-Messgrößen zählen

- der pH-Wert,
- die elektrische Leitfähigkeit,
- das Redoxpotenzial,
- die Wassertemperatur,
- der Sauerstoffgehalt und gelöste Gase (z. B. $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{S}$),
- der Organikgehalt sowie
- eine organoleptische Prüfung.

Messmethodik und Technik der Probennahme sowie anschließender Probentransport können die Beschaffenheitskriterien der Grundwasserprobe beeinflussen. Bestimmte Inhaltsstoffe bzw. Messgrößen, die sich nur schwer oder nicht konservieren lassen (z. B. Temperatur, gelöste Gase, Sauerstoffgehalt), sollten daher direkt nach Entnahme der Wasserprobe bestimmt werden. Gleichmaßen ist eine organoleptische Prüfung (Färbung, Trübung, Geruch) vor Ort durchzuführen, da diese Hinweise zur Repräsentativität der Laboranalysen geben kann.

8.2.4. Anforderungen an Fachfirmen und Laboratorien

Alle wesentlichen Schritte der Ausführung geophysikalischer, geohydraulischer und hydrogeochemischer Untersuchungen (Planung, Messung, Auswertung) müssen durch qualifizierte Fachfirmen bzw. Labors ausgeführt werden, die über eine geeignete technische und personelle Ausstattung verfügen. Die fachliche Qualifikation ist aufgabenbezogen über vergleichbare Referenzprojekte, fachlich ausgebildetes Personal und einem dem Stand der Technik entsprechende technische

Ausstattung (Messgeräte, Software) nachzuweisen. Gegebenenfalls sind die wesentlichen Schritte der Erkundung von verschiedenen, voneinander unabhängigen Firmen durchzuführen (z. B. sollten die Messanordnung und die technischen Spezifikationen einer größeren oberflächengeophysikalischen Messung durch eine qualifizierte Firma geplant und entworfen werden, die unabhängig von der ausführenden Messfirma ist) und es sollten, entsprechend § 12 Abs. 3 StandAG, wo möglich, auch die Ergebnisse relevanter Forschungs- und Entwicklungsprojekte z. B. von Hochschulen mit einbezogen werden.

Im Falle der Untersuchung von Proben müssen mit der Probenübergabe an ein Labor qualitätssichernde Verfahren bzw. Verhaltensweisen existieren, die für reproduzierbare Arbeitsabläufe innerhalb des Analyseprozesses sorgen und damit die nötige Transparenz herstellen. Hierfür ist ein Qualitätsmanagementsystem unerlässlich. Dessen Nachweis kann z. B. erfolgen durch

- eine Zertifizierung gemäß DIN EN ISO 9001,
- eine Akkreditierung gemäß DIN EN ISO 17025 oder
- eine Landesnotifizierung gemäß § 18 BBodSchG-Prüfstellen

in den jeweils aktuellen Fassungen. In Abhängigkeit von den jeweils geltenden gesetzlichen Regelungen kann eine Akkreditierung oder die Landesnotifizierung für das entsprechende Fachgebiet zwingend notwendig sein.

8.3. Ableitung von Kriterien zur Beurteilung der Qualität und Quantität der Messwerte

Der Orientierungsrahmen stellt auf Basis der Beschreibung der Messmethoden in den Kapiteln 5 und 6 dar, worauf bei der Wahl der Messmethoden für das übertägige Erkundungsprogramm geachtet werden muss bzw. auf welcher Basis die Eignung der Messmethoden und zugehöriger Messnetzdichten sowie zeitlicher Messintervalle bewertet werden kann.

Hierfür ist nach Vorlage eines Erkundungsprogramms zunächst die zur Beurteilung der Kriterien und Anforderungen nach §§ 22 - 24 StandAG notwendige zu erwartende Qualität der Erkundungsergebnisse zu bewerten. Die Qualität der Messergebnisse hängt dabei nicht in erster Linie davon ab, ob diese durch eine Messmethode indirekt oder direkt bestimmt werden können, sondern unterliegt mehreren standortspezifischen Einflussfaktoren, die sich auch z. T. erst im Rahmen der Anwendung der Methode bzw. erst mit dem Vorliegen der Messwerte ergeben. Eine Bewertung der vorliegenden und bei weiteren Erkundungskampagnen zu erwartenden Qualität der Messwerte sollte somit zwischen jeder Kampagne durchgeführt werden, um qualitätsmindernde Einflüsse frühzeitig zu erkennen und nach Möglichkeit zu beheben, mindestens aber bei der Auswertung mit berücksichtigen zu können. Die Qualität der Messwerte hat somit einen direkten Einfluss auf die Qualität der daraus abzuleitenden Messergebnisse (s. Definition in Abschnitt 1.3). Die Messergebnisse werden zudem von methodenspezifischen Kriterien, wie der Wahl der Auswertemethode und den damit behafteten Ungewissheiten und möglichen subjektiven Kriterien (z. B. Interpretation der Messwerte), beeinflusst.

Erfolgt zuerst eine Bewertung der Qualität, ergibt sich daraus auch gleichzeitig eine quantitative Beeinflussung der Messwerte, denn anhand der qualitativ hochwertigen Daten kann abgewogen werden, ob z. B. eine Erhöhung der Messnetzdichte einen Informationsgewinn darstellt oder ob Kenntnisstand, Detaillierungsgrad und Aussagesicherheit der jeweiligen Messwerte und der daraus resultierenden hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen zur Beurteilung nach §§ 22 – 24 StandAG ausreichend sind. Hierbei sollten auch Faktoren wie prakti-

sche Einschränkungen in Betracht gezogen werden. Diese sind in den Abschnitten 7.4 und 8.5 dargestellt.

Eine Zusammenstellung der verschiedenen die Qualität und Quantität beeinflussenden Faktoren enthält Tabelle 8-2 unter Angabe von Kategorien, welche bei Vorlage des übertägigen Erkundungsprogrammes zur Beurteilung der Messmethoden und Messwerte herangezogen und ggf. um weitere standortspezifische Aspekte, welche sich während der Anwendung der Messmethode ergeben könnten, ergänzt werden können. Die Qualitäts- und Quantitätskategorien werden hierbei durch messwertspezifische und methodenspezifische Kriterien beeinflusst. Einzelne Kriterien, wie z. B. die Reproduzierbarkeit, können auch mehreren Kategorien zugeordnet werden. Die Beurteilung der Qualität und Quantität der Messwerte liefert die Grundlage für eine Aussage dazu, inwiefern Kenntnisstand, Detaillierungsgrad und Aussagesicherheit der jeweiligen Messwerte und der daraus resultierenden hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen zur Beurteilung nach §§ 22 – 24 StandAG ausreichen oder ob weitere Untersuchungen erforderlich und zielführend sind.

Tabelle 8-2: Kriterien zur Beurteilung der Qualität und Quantität von Messwerten.

	Kategorie	Kriterium		Bandbreite der Bewertung
		Messwertspezifisch	Methodenspezifisch	
Qualität	Vollständigkeit der Messwerte	Verfügbarkeit Zugänglichkeit Nutzbarkeit		vollständig teilweise unvollständig
	Richtigkeit der Messwerte		Fehleranfälligkeit (Messabweichung, Auswertefehler) Reproduzierbarkeit Erkennungs- und Nachweisgrenzen Sensitivität und Ortsauflösungsvermögen	richtig korrigierbar fehlerhaft
		Unsicherheit		
	Unabhängigkeit der Messwerte		Reproduzierbarkeit Objektive Kriterien (allg. (Mess-)Standards, Vorschriften, Richtlinien, etc.)	objektiv tlw. objektiv subjektiv
		subjektive Kriterien a) personenbezogen, z. B. Erfahrungswerte, subjektive Wahrnehmung, b) objektbezogen, z. B. Eigenschaften der jeweiligen Messgeräte, Einsatz von unterschiedlichen Materialien und Hilfsmitteln		
	Eignung der Messwerte (zur weiteren Verwendung/Analyse)	Nutzbarkeit	Detaillierungsgrad	vollständig teilweise ungeeignet
Quantität	Anzahl der Messwerte		Reichweite Messnetzdichte Wiederholungsrate	hoch mittel gering

	Kategorie	Kriterium		Bandbreite der Bewertung
		Messwertspezifisch	Methodenspezifisch	
			Kombination mit anderen Messmethoden	keine

Bei der Bewertung der Qualitäts- und Quantitätskategorien auf Basis der Kriterien in Tabelle 8-2 sollten folgende Annahmen zugrunde gelegt werden:

1. Die Messmethode mit der höheren Qualität liefert einen zuverlässigeren Wert für die entsprechende Messgröße.
2. Wenige Messwerte hoher Qualität sind vielen Messwerten schlechter Qualität zu bevorzugen.

Die Qualität der Messwerte ist somit prinzipiell höher zu gewichten als die Quantität. Auch in Goldsworthy et al. (2009) wurde explizit davon ausgegangen, dass für die Zuverlässigkeit einer auf der Basis der vorliegenden Erkundungsergebnisse getroffenen Entscheidung im Rahmen des Auswahlprozesses die Qualität eines Messwertes wichtiger ist als die zur Verfügung stehende Quantität der Messwerte:

„Sind die Informationen in ausreichender Quantität vorhanden und besitzen sie eine gute Qualität, dann ist davon auszugehen, dass eine auf diesen Informationen basierende Aussage eine hohe Zuverlässigkeit besitzt. Der Zuweisung einer hohen Zuverlässigkeit entspricht eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass sich eine auf der Basis einer solchen Aussage getroffene Entscheidung später als falsch erweist.“ (Goldsworthy et al. 2009)

8.4. Einflussfaktoren auf die Kriterien zur Auswahl geeigneter Messmethoden

Eine wichtige Voraussetzung für die Auswahl der (geo-)hydraulischen, geophysikalischen und hydrochemischen Messmethoden zur Untersuchung der hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Fragestellungen im Rahmen eines übertägigen Erkundungsprogramms ist das Vorhandensein eines strukturellen Untergrundmodells des Untersuchungsgebietes. Dieses Untergrundmodell kann aufgrund der Informationen aus der Ermittlung der Teilgebiete (§ 13 StandAG) sowie der Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung (§ 14 StandAG) bereits vorliegen. Ansonsten sollte eine auf allgemeine und strukturgeologische Fragestellungen ausgerichtete übertägige Erkundung der Erkundung für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen vorgeschaltet werden. Das Messprogramm und die Messparameter der übertägigen geologischen „Vor-“Erkundung, insbesondere der oberflächengeophysikalischen Methoden sowie des bohrlochgeophysikalischen Messprogrammes, wären dann so zu planen, dass die Ergebnisse auch zur Bestimmung der relevanten hydrologischen und hydrogeologischen Messgrößen beitragen können. Die für die geologische Erkundung eingesetzten oberflächengeophysikalischen Methoden ermöglichen eine Übertragung der hydrologischen und hydrogeologischen Messgrößen in den Raum, wenn die relevante Messgröße im Bohrloch bestimmt worden und eine Korrelation zum geophysikalischen Messwert herstellbar ist.

Im Hinblick auf die Qualität der Messwerte können folgende Aspekte zur Priorisierung bei der Wahl geeigneter Messmethoden zur übertägigen Erkundung herangezogen werden:

- Methoden zur direkten Bestimmung einer Messgröße sind solchen Methoden vorzuziehen, welche zur Bestimmung der Messgröße nur über Modellannahmen, empirische Zusammenhänge und/oder Korrelationen beitragen können.
- Bei zu erwartenden Einschränkungen in der Durchführung einer Messmethode zur direkten Bestimmung ist alternativ eine indirekte Messmethode auf Basis der Erfüllung der Qualitätskriterien (s. Tabelle 8-2) anzuwenden.
- Die Methoden, die zur Bestimmung der Messgröße Modellannahmen, empirische Zusammenhänge und/oder Korrelationen benötigen, sollten vorzugsweise in Zusammenhang mit direkten Methoden durchgeführt werden, so dass eine Verifizierung der Modellannahmen oder einer Kalibrierung der empirischen Zusammenhänge und/oder Korrelationen möglich ist.

Es sollten zudem - nach Möglichkeit - auch solche Messmethoden zusätzlich zum Einsatz kommen, welche die Messergebnisse einer anderen Methode unabhängig bestimmen und somit bestätigen können.

Auch aus dem StandAG (2017) selbst ergeben sich bereits Anforderungen an Wahl der geeigneten Messmethoden. Für Kristallingestein entfällt die Mindestanforderung in § 23 Abs. 5(1) StandAG (Gebirgsdurchlässigkeit), wenn kein ewG ausweisbar ist und das Endlagersystem somit im Wesentlichen auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht. Die im StandAG enthaltene Anlage 1 und die Anlagen 3 bis 11 zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises sind, sofern sie sich auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) beziehen, in diesem Fall auf den Einlagerungsbereich anzuwenden. An die Stelle des Abwägungskriteriums nach Anlage 2 des StandAG (2017) tritt die rechnerische Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen. Dies ist bei der Auslegung des Erkundungsprogrammes und der Wahl der Messmethoden zu berücksichtigen. Weiterhin ist gemäß Anlage 2 des StandAG (2017) zudem auch eine Bewertung der "wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches" notwendig. Nach Anlage 11 des StandAG (2017) muss außerdem eine Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge erfolgen. Die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind während des Auswahlverfahrens zu erarbeiten, wofür zunächst Informationen zum Deck- und Nebengebirge vorliegen müssen. Die zukünftige übertägige Erkundung potenzieller Standortregionen beschränkt sich somit nicht nur auf den ewG. Es ist bei den Vorbereitungen der Erkundungsprogramme daher zu beachten, dass geeignete Messmethoden für eine breite Spanne von Gesteinsarten, die nicht nur die potenziellen Wirtsgesteine umfassen, ausgelegt werden müssen. Weiterhin ist es sinnvoll, das Messprogramm und die Messgrößen der geologischen Erkundung, insbesondere der geophysikalischen Methoden, so zu wählen, dass auch die relevanten Messgrößen bestimmt werden können.

In Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-5 wurden die Messmethoden zur Bestimmung der jeweiligen Messgrößen identifiziert und hinsichtlich ihrer Eignung und Einschränkungen kategorisiert. Daraus ergeben sich zusammenfassend folgende Messmethoden, welche als geeignet identifiziert worden sind und keine größeren Einschränkungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit sowohl für das Deck- und Nebengebirge als auch für gering durchlässige Gesteinsformationen in größeren Teufen aufweisen. Diese können somit auch nach aktuellem Stand von W+T und auf Basis praktischer Erfahrung in der Standorterkundung für die übertägige Standorterkundung als erforderlich angesehen werden:

- Mehrphasen-Packertests
- Pump- und Injektionsversuche

- Fluid-Logging
- Druckhöhenmessungen
- Tracer-Versuche
- NMR und Tomographie
- Laborversuche
 - Diffusionsversuche
 - Viskosimeter
 - Pyknometer, Aräometer oder Biegeschwinger
 - Röntgenabsorptionsspektroskopie, Säulenversuch und/oder Batchversuch
 - Elektroanalytische Methoden

Folgende Messmethoden können die Messergebnisse einer anderen Methode unabhängig bestimmen und somit bestätigen:

- Bohrloch NMR
- Bohrlochmessung (zu elektrischer Leitfähigkeit/Salinität)
- Laborversuche
 - Korngrößenverteilung
 - Tomographie im Labor
 - Elektroanalytische Methoden
 - Titration
 - UV/vis-Spektrometrie oder Massenspektrometrie
 - Laser-induzierte Breakdown-Detektion
 - Kernspin-, Infrarot- oder Massenspektrometrie
 - Gaschromatographie
 - Spektrometrie/Spektroskopie
 - Chromatographie

Es ist hierbei jedoch zu beachten, dass durch diese Zusammenstellung geeigneter Messmethoden der Einsatz anderer in Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-5 aufgeführter Messmethoden nicht ausgeschlossen ist. Für jede übertägige Erkundung einer Standortregion ist stets individuell zu prüfen, welche Kombination von Messmethoden mit welchen Messwerten zur Bestimmung der jeweiligen Messgröße geeignet ist.

In Tabelle 8-3 sind die, in Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-5 als geeignet („1“) identifizierten Messmethoden tabellarisch dargestellt unter Angabe von zusätzlichen Hinweisen zu der jeweiligen Art der Bestimmung der Messgröße (**direkte** Ableitung der Messgröße aus Messwerten möglich, vor Ort-/**in situ-Bestimmung** möglich, nur **indirekte** Ableitung der Messgröße aus Messwerten möglich, als **unabhängige Zusatzmethode** für die jeweilige Messgröße geeignet) sowie zu Einschränkungen der Anwendbarkeit in bestimmten Gesteinsformationen.

Tabelle 8-3: Geeignete Messmethoden als Basis für den Orientierungsrahmen.

Relevante Messgröße gemäß StandAG (2017)	Bezug zu StandAG	Als „geeignet“ eingestufte Messmethoden gemäß Tabelle 7-1 - Tabelle 7-5	Direkte Bestimmung	In situ Bestimmung	Indirekte Methode	Unabhängige Zusatzmethode	Hinweis
Abstandsgeschwindigkeit	§ 22, § 24 Anl. 1, 11	Tracer-Versuche	X	X			praktische Einschränkung im ewG, daher ist alternativ die Isotopenzusammensetzung zu bestimmen
Gebirgsdurchlässigkeit	§ 23, § 24 Anl. 1, 2, 4, 6, 7, 11	Pumpversuche (Injektionsversuche)	X	X			nicht im ewG anwendbar
		Mehrphasen-Packertests	X	X			-
		Fluid-Logging	X	X			nicht im ewG anwendbar
		NMR	X	X		X	im ewG nur im Bohrloch durchführbar; erfasst nicht den Einfluss von Klüften
Gesteinsdurchlässigkeit	§ 24 Anl. 1, 4, 6, 11	NMR	X	X		X	im ewG nur im Bohrloch durchführbar; erfasst nicht den Einfluss von Klüften
		Korngrößenverteilung			X	X	nur für Lockergestein anwendbar
		Durchströmungsversuch	X				nicht für Steinsalz geeignet
		Tomographie			X	X	
hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert	§ 24 Anl. 1	Pumpversuche (Injektionsversuch)	X	X			nicht im ewG anwendbar
		Mehrphasen-Packertests	X	X			-
		Fluid-Logging	X	X			nicht im ewG anwendbar
		NMR	X	X		X	im ewG nur im Bohrloch durchführbar; erfasst nicht den Einfluss von Klüften
		Korngrößenverteilung			X	X	nicht im ewG anwendbar
		Durchströmungsversuch	X				nicht für Steinsalz geeignet

Tabelle 8-3: (Fortsetzung) Geeignete Messmethoden als Basis für den Orientierungsrahmen.

Relevante Messgröße gemäß StandAG (2017)	Bezug zu StandAG	Als „geeignet“ eingestufte Messmethoden gemäß Tabelle 7-1 - Tabelle 7-5	Direkte Bestimmung	In situ Bestimmung	Indirekte Methode	Unabhängige Zusatzmethode	Hinweis
effektiver Diffusionskoeffizient	§ 24 Anl. 1	Diffusionsversuch	X				-
absolute Porosität	§ 24 Anl. 1	NMR	X				im ewG nur im Bohrloch durchführbar; erfasst nicht den Einfluss von Klüften
		Tomographie, Porosimetrie	X			X	-
effektive Porosität	§ 24 Anl. 1, 11	NMR	X	X	X	X	im ewG nur im Bohrloch durchführbar; erfasst nicht den Einfluss von Klüften
		Tomographie, Auftriebswägung/Porosimetrie/Pyknometrie			X	X	-
Verfestigungsgrad (Tongestein)	§ 24 Anl. 1, 2	Bohrlochgeophysik		X			erforderlich für Tongestein
hydraulischer Gradient	§ 24 Anl. 1, 2	Potenzialmessungen an GW-Messstellen	X	X			-
Tortuosität	§ 24 Anl. 1	NMR	X	X		X	im ewG nur im Bohrloch durchführbar; erfasst nicht den Einfluss von Klüften
		Tomographie	X				-
Haupt- und Spurenelemente des Fluides	§ 24 Anl. 10	Spektrometrie/Spektroskopie	X				-
		Chromatographie	X			X	-
pH-Wert	§ 24 Anl. 10	Elektroanalytische Methoden	X				-
		Titration	X			X	-

Tabelle 8-3: (Fortsetzung) Geeignete Messmethoden als Basis für den Orientierungsrahmen.

Relevante Messgröße gemäß StandAG (2017)	Bezug zu StandAG	Als „geeignet“ eingestufte Messmethoden gemäß Tabelle 7-1 - Tabelle 7-5	Direkte Bestimmung	In situ Bestimmung	Indirekte Methode	Unabhängige Zusatzmethode	Hinweis
E _h -Wert	§ 24 Anl. 10	Elektroanalytische Methoden	X				-
		Titration	X			X	-
Gehalt Kolloide und Komplexbildner	§ 24 Anl. 10	UV/vis-Spektrometrie	X				-
		Laser-induzierte Breakdown-Detektion	X			X	-
Karbonatgehalt	§ 24 Anl. 10	UV/vis-Spektrometrie	X				-
		Titration	X			X	-
Isotopenzusammensetzung	§ 22, § 24 Anl. 10	Kernspin- oder Infrarot- oder Massenspektrometrie	X				-
		Gaschromatographie	X			X	-
Viskosität Fluid	§ 24 Anl. 1, 4	Viskosimetrie	X				-
Dichte Fluid	§ 24 Anl. 1, 4	Pyknometer, Aräometer oder Biegeschwinger	X				-
Ionenstärke	§ 24 Anl. 1, 9	(Massen-)Spektrometrie			X	X	-
		Titration			X	X	-
Elektrische Leitfähigkeit/Salinität	§ 24 Anl. 10	Elektroanalytische Methoden	X				Bohrlochmessung als unabhängige Methode zusätzlich anwenden
K _d -Werte der Nuklide	§ 24 Anl. 9	Röntgenabsorptionsspektroskopie, Säulenversuch und/oder Batchversuch	X				-

8.5. Einflussfaktoren auf die Kriterien zur Auswahl der Messnetzdichten und zeitlichen Messintervalle

Im Rahmen der übertägigen Erkundung sind ausreichende Messnetzdichten und, falls erforderlich, eine ausreichende Häufigkeit der Messungen bzw. zeitliche Intervalle zwischen der Wiederholung einzelner Messvorgänge zu erzielen. Hierdurch soll erreicht werden, dass die Messergebnisse hinreichende Informationen zur Beurteilung der Messgrößen nach §§ 22 – 24 StandAG liefern und aufgrund ihrer Qualität und Quantität dazu beitragen, die Wahrscheinlichkeit von Fehlentscheidungen bei der Standortauswahl möglichst klein zu halten. Es ist zu erwarten, dass standortbezogene Unterschiede bzgl. der erforderlichen Messnetzdichten bestehen.

8.5.1. Kriterien zur Festlegung der Messnetzdichte

Zur Durchführung aller geohydraulischen Messmethoden und aller geophysikalischen Bohrlochmessungen ist mindestens eine Bohrung in den zu erkundenden Bereichen notwendig. Auch die Laboruntersuchungen von Gebirgs- oder Gesteinsproben setzen Bohrungen zur Gewinnung des Probenmaterials voraus. Nur die oberflächengeophysikalischen Messungen benötigen zu ihrer Durchführung keine Bohrungen in den zu erkundenden Bereichen. Allerdings misst keine der oberflächengeophysikalischen Messmethoden die Porosität oder die Permeabilität oder andere hydrogeologische Messgrößen, wie Gebirgsdurchlässigkeit, Gesteinsdurchlässigkeit, Abstandsgeschwindigkeit, effektive Porosität oder Transmissivität des ewG direkt. In allen Fällen werden petrophysikalische Messgrößen ermittelt, die Abhängigkeiten von Porosität und Permeabilität aufweisen können. Insofern sind bei der Auswertung der Ergebnisse geophysikalischer Messmethoden empirische Zusammenhänge zu ermitteln oder Gesteinsmodelle zu nutzen, welche die Abhängigkeiten der ermittelten geophysikalischen Messgrößen zur Porosität und Permeabilität darstellen können. Die Ermittlung dieser empirischen Zusammenhänge oder die Kalibrierung der Gesteinsmodelle können nur mit Hilfe von Laboruntersuchungen oder Messungen in Bohrlöchern erfolgen. Insofern sind für die Auswertung oberflächengeophysikalischer Messmethoden hinsichtlich hydrologischer und hydrogeologischer Messgrößen auch Bohrungen erforderlich.

Die Wahl der Messnetzdichte wirkt sich dabei prinzipiell auf die Zuverlässigkeit der Erkundungsergebnisse aus. Eine Erhöhung der Messnetzdichte ist jedoch immer gegenüber den standortspezifischen Gegebenheiten sowie möglichen negativen Einflüssen auf einen potenziellen ewG abzuwägen. Zum einen sollte gemäß Abschnitt 8.3 die Qualität gegenüber der Quantität (Messnetzdichte) höher gewichtet werden. Zum anderen ist zu berücksichtigen, dass bei einigen (invasiven, mit Bohrlöchern verbundenen) Messmethoden mit zunehmender Messnetzdichte auch die möglichen negativen Einflüsse auf den potenziellen Endlagerbereich und seine Umgebung ansteigen (s. Abschnitt 7.4). Als Beispiel seien hierbei nicht ausreichend abgedichtete Erkundungsbohrungen oder Grundwassermessstellen genannt, welche Kurzschlüsse zwischen hydrogeologischen Schichten verursachen können und damit die Grundwasserverhältnisse nachhaltig verändern. Dieses Risiko steigt mit der Anzahl der Bohrungen. Darüber hinaus gibt es praktische Obergrenzen zu Messnetzdichten, wie Kosten und Zeit, welche im Rahmen dieses Vorhabens jedoch nicht betrachtet werden.

Großer Vorteil der meisten oberflächengeophysikalischen Messmethoden ist die Möglichkeit des flächendeckenden, zerstörungsfreien (d. h. ohne Erfordernis des Abteufens weiterer Bohrungen) Einsatzes. Die flächendeckenden Messungen ermöglichen es, die in Bohrungen punktuell gewonnenen Informationen, belegt durch physikalische Messwerte, in den durch die oberflächengeophysikalischen Messmethoden zu erkundenden Raum zu übertragen. Bei zuverlässiger Korrelation zwischen den geophysikalischen Messwerten und den hydrogeologischen Parametern können so

(z. B. bezüglich der Porosität) größere „Homogenbereiche“ gegenüber Bereichen mit stärkeren Änderungen abgegrenzt werden. Sowohl die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen als auch die räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften ist somit feststellbar (Anlage 3 zu § 24 Abs. 3 StandAG).

Bei der Wahl der Messnetzdichten müssen auch die unterschiedlichen Gesteinscharakteristika berücksichtigt werden. Bei **Kristallingestein** konzentriert sich die Erkundung im Wesentlichen auf das Auffinden von wenig gestörten, undeformierten Gebirgsbereichen. Bei **Steinsalzformationen** ist der Aufbau der Salzstruktur möglichst am Rand der Salzstruktur zu untersuchen und durch oberflächengeophysikalische Messungen zu hinterlegen, um die geologische Barriere durch Bohrungen nicht zu beeinträchtigen (DBE Technology GmbH 2011). Bei **Tongestein** ist eine vergleichsweise hohe Messnetzdichte erforderlich, um Homogenbereiche mit günstigen Eigenschaften ausweisen zu können. Auch für das **Deck- und Nebengebirge**, welches sich aus vielen verschiedenen Gesteinsformationen zusammensetzen kann, ist sehr wahrscheinlich eine relativ hohe Messnetzdichte erforderlich, so dass der zu erwartenden Heterogenität des Aufbaus Rechnung getragen wird.

Die Ableitung von Messnetzdichten für die übertägige Erkundung von Standortregionen stützt sich im Rahmen dieses Berichtes dabei auch auf die Erkenntnisse und Erfahrungswerte aus den in Goldsworthy et al. (2009) dokumentierten und bewerteten nationalen und internationalen Erkundungsprogrammen. Im Rahmen der Erarbeitung und Aufstellung von Erkundungsprogrammen können diese Werte als Orientierungshilfe herangezogen werden.

In der Studie Goldsworthy et al. (2009) wurde auf der Basis von Informationen zu mehreren Standorten im In- und Ausland der damalige Stand von W+T für die Erkundung von potenziellen Endlagerstandorten erfasst und bewertet. Diese Informationen stellen auch heute noch ein ausreichendes Maß notwendiger Erkundungen dar, da seit 2009 hinsichtlich der bewährten Messmethoden und Messnetzdichten kaum Änderungen stattgefunden haben (vgl. Abschnitt 7.3 und 8.4).

Die Herleitung, Darstellung und Bewertung der Messnetzdichten aus Goldsworthy et al. (2009) ist im Anhang zu diesem Bericht dokumentiert. Dort werden Messnetzdichten (in Goldsworthy et al. (2009) als „Erkundungsintensität“ bezeichnet) bezogen auf Erfahrungswerte an unterschiedlichen Endlagerstandorten in verschiedenen Ländern zusammengefasst. Das Ergebnis dieser Herleitung ist in Tabelle A 2 dargestellt. Die darin aufgeführten Messnetzdichten für jede relevante Messgröße können im Rahmen der übertägigen Standorterkundung als Erfahrungswerte herangezogen werden, **stellen aber keine Vorgaben zu Messnetzdichten** dar. Die Messnetzdichten müssen für das Erkundungsprogramm standortspezifisch festgelegt und mit fortschreitender Erkundung ggf. verdichtet werden.

8.5.2. Kriterien zur Festlegung der zeitlichen Messintervalle

Die Wahl der zeitlichen Messintervalle, d. h. die Dauer einer einzelnen Messperiode sowie die Intervalle der Messwertbestimmung innerhalb eines Messvorganges, hängen stark von der jeweiligen Messmethode sowie vom untersuchten Gestein ab.

Im Erkundungsprogramm sollten zudem auch die zeitlichen Abstände zwischen einzelnen ggf. erforderlichen Wiederholungsmessungen berücksichtigt werden. Wiederholungsmessungen sollten eingeplant werden, da diese die Repräsentativität der Messwerte erhöhen und die Messergebnisse im Sinne der Qualitätssicherung (s. Abschnitt 8.2) verifizieren können. Die Festlegung der zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Wiederholungsmessungen ist von verschiedenen Faktoren abhängig.

- Je größer die zeitliche Variabilität der zu bestimmenden Messgröße ist, desto häufiger sollten Wiederholungsmessungen durchgeführt werden, um diese Variabilität erfassen zu können.
- Zwischen Messmethoden, welche einen Einfluss auf die natürlichen Zustände des Untersuchungsgebietes haben (z. B. auf die hydraulische Druckhöhe durch Pump- oder Injektionsversuche), sollte zwischen den Wiederholungsmessungen ausreichend Zeit eingeplant werden, bis die natürlichen Zustände wiederhergestellt sind.

Für die Mehrzahl der im überStand-Vorhaben zu betrachtenden Messgrößen ist aus Sicht der Autoren in dem Zeitraum der übertägigen Erkundung eines potenziellen Standortes von nur einigen Monaten oder wenigen Jahren keine Änderung zu erwarten. Für diese Messgrößen wäre daher innerhalb der Erkundungsprogramme die Wiederholung einer Messung nach einem bestimmten zeitlichen Intervall, außer zur Verifizierung der vorhergehenden Ergebnisse, nicht erforderlich. Ausnahmen bilden insbesondere Messwerte, die u. a. von wasserhaushaltlichen Änderungen in der Umgebung des Erkundungsstandortes beeinflusst werden können. Um beispielsweise die ausreichende Stabilität der Grundwasserverhältnisse und der Messgröße „hydraulischer Gradient“ nachweisen zu können, sollten Langzeitmessungen der hydraulischen Druckhöhe durchgeführt werden. Aufgrund der typischen Schwankungen der meteorologischen Verhältnisse ist eine Messreihe z. B. über ein hydrologisches Jahr nicht immer ausreichend, um langfristig stabile Verhältnisse bzw. Änderungen nachweisen zu können. Es empfiehlt sich daher, die dafür notwendigen Bohrungen bzw. Messstellen über die gesamte Dauer der Standorterkundung (mindestens bis zum Ausschluss der jeweiligen potenziellen Standortregion) offenzuhalten, so dass beispielsweise die Messungen der hydraulischen Druckhöhe über einen langen Zeitraum wiederholt durchgeführt werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Entscheidungen für den Fortgang der Standorterkundung ggf. ohne den Abschluss mehrjähriger Messkampagnen getroffen bzw. die daraus resultierenden Unsicherheiten durch Modellierungen oder andere Charakterisierungen abgeschätzt und im weiteren Verfahren mitgeführt werden müssen.

8.6. Notwendigkeit einer schrittweisen übertägigen Erkundung

Eine schrittweise Erkundung mit einer engen Verzahnung von aufeinanderfolgenden und aufeinander aufbauenden Erkundungsschritten sowie einer dazwischengeschalteten Bewertung ist eine übliche Vorgehensweise in der geowissenschaftlichen Erkundung und spiegelt sich auch im StandardAG wider (z. B. Ermittlung von Teilgebieten → übertägige Erkundung → untertägige Erkundung → Standortvergleich). Ziel der schrittweisen Erkundung ist es, den Kenntnisstand, den Detaillierungsgrad und die Aussagesicherheit mit jedem der Schritte, die ggf. iterativ durchlaufen werden, zu erhöhen, um zu einer Entscheidung für den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu kommen.

Die hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Untersuchungen der übertägigen Erkundung zu den für sie relevanten Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien setzen voraus, dass bereits ein möglicher einschlusswirksamer Gebirgsbereich in Teufe, Ausdehnung und Mächtigkeit als Erkundungsziel identifiziert worden ist. Dies kann bereits durch die vorliegenden geowissenschaftlichen Ergebnisse zur Entscheidung der zu erkundenden Standortregion erfolgt sein oder auf Grundlage eines iterativen Vorgehens im Rahmen des übertägigen Erkundungsprogramms erfolgen (s. Abbildung 8-1). Diese geologischen Erkundungsprogramme werden in den Standortregionen in der Regel mit orientierenden Untersuchungen zur Erfassung von Teufe, Ausdehnung, Mächtigkeit der Gesteinsabfolgen und großräumigen Störungszonen des beginnen (z. B. mit 2D-Reflexionsseismik). Nachfolgende geologische Erkundungsschritte werden das Messraster verdichten (z. B. mit 3D-Reflexionsseismik) und die

Ergebnisse so präzisieren, dass sichere Informationen zur Beurteilung der Erfüllung oder Nichterfüllung der Mindestanforderungen hinsichtlich Teufe, Ausdehnung, Mächtigkeit eines möglichen ewG vorliegen. Das Messprogramm und die Messparameter der geologischen Erkundung, insbesondere der geophysikalischen Methoden, sollten bereits von Anfang an so ausgelegt werden, dass auch die Messgrößen der hydrologischen und hydrogeologischen Untersuchungen bestimmt werden können. Für die hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Untersuchungen gemäß StandAG ergibt sich aus Sicht der Autoren somit folgende Reihenfolge einer schrittweisen Erkundung im Zusammenspiel mit flächendeckenden und punktuellen Methoden (s. Abbildung 8-1).

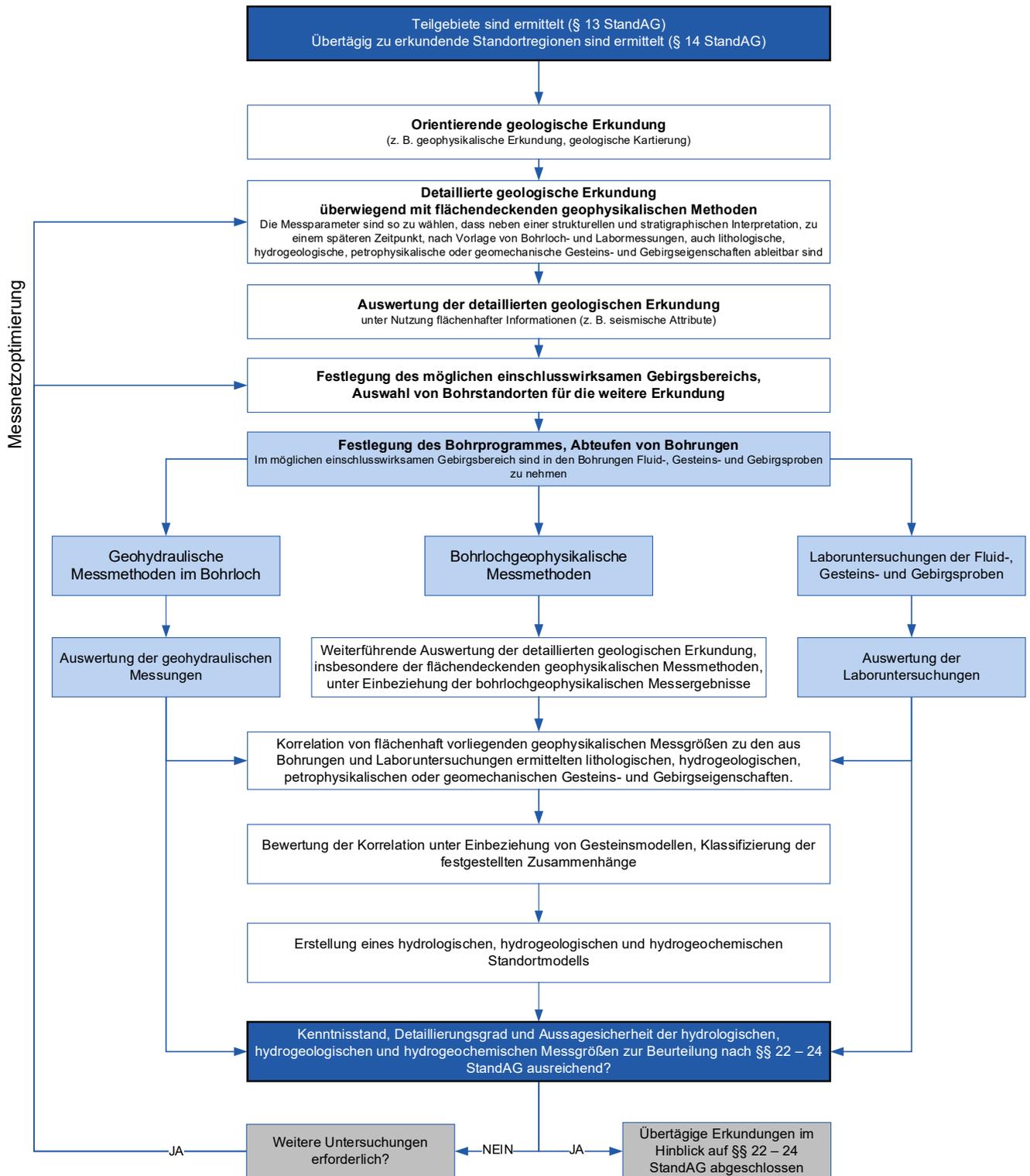


Abbildung 8-1: Vorschlag zum schematischen Ablauf der übertägigen Erkundung von hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen zur Beurteilung nach §§ 22 – 24 StandAG.

9. Zusammenfassung

In Deutschland sollen alle Arten im Inland verursachter radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Für die Auswahl eines Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle trat unter Berücksichtigung der Empfehlungen der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (Endlagerkommission) zu den Regeln und Vorschriften für ein Standortauswahlverfahren am 5. Mai 2017 das novellierte „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ (Standortauswahlgesetz – StandAG) in Kraft. Das StandAG regelt die einzelnen Verfahrensschritte, die bis zur Standortentscheidung durchgeführt werden müssen und legt Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, geowissenschaftliche Abwägungskriterien, planungswissenschaftliche Abwägungskriterien sowie weitere Entscheidungsgrundlagen für das Standortauswahlverfahren fest. Als mögliche Wirtsgesteine kommen dabei Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht.

Vor dem Hintergrund der Prüfung und Festlegung der von der BGE vorgeschlagenen standortbezogenen Erkundungsprogramme zur übertägigen Erkundung durch das BfE soll das vorliegende Vorhaben zur „Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren („übErStand“)“ die einsetzbaren Messmethoden für übertägige Erkundungen zusammenstellen, und die relevanten Messmethoden zur Erkundung dieser Messgrößen vergleichend zusammenfassen. Darauf aufbauend soll ein Orientierungsrahmen erarbeitet werden, welcher die Bewertung konkreter Erkundungsprogramme unterstützen kann. Das „übErStand“-Projekt beschränkt sich hierbei auf diejenigen Messgrößen, welche sich aus den Anforderungen und Kriterien aus dem StandAG für die übertägige Erkundung hydrologischer, hydrogeologischer und hydrogeochemischer Eigenschaften von Standortregionen ergeben. Dies umfasst insbesondere die Beschreibung der transportrelevanten Eigenschaften der Gesteine bzw. des Gebirges (z. B. die Durchlässigkeit) sowie der Grundwasserbewegungen und chemischen Beschaffenheit der Grundwässer.

Zunächst werden im Rahmen des vorliegenden Berichts die für dieses Vorhaben relevanten Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§§ 22 - 24 StandAG in Verbindung mit den Anlagen 1 bis 11) auf ungenaue bzw. unvollständige Begriffsdefinitionen im StandAG hin überprüft. Hierfür werden Hinweise zu einem möglichen Umgang mit diesen Definitionen sowie in einigen Fällen auch begründete Vorschläge zur Auslegung gegeben. Im Anschluss daran werden die relevanten hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Messgrößen dargestellt, die direkt aus dem StandAG ableitbar sind. Darüber hinaus wurden auch Messgrößen aus dem StandAG abgeleitet, die dort nicht explizit genannt sind, aber für eine vollständige Charakterisierung und Bewertung der Gesteinsformationen der jeweiligen Standortregion notwendig sind. Diese Charakterisierung basiert auf dem im StandAG festgelegten Schutzziel, welches einen sicheren Einschluss der hochradioaktiven Abfälle über einen Zeitraum von 1 Million Jahre fordert. Wesentliche Messgrößen des „übErStand“-Vorhabens, welche zum Nachweis der Erfüllung dieses Schutzziels herangezogen werden sollten, sind z. B. die (charakteristische) Gebirgsdurchlässigkeit und die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Die hydrogeochemischen Messgrößen können insbesondere die Transportgeschwindigkeit der gelösten Stoffe beeinflussen. Im Ergebnis des ersten Arbeitsschrittes steht die Zusammenfassung aller relevanten Messgrößen aus dem StandAG, die zur Beantwortung der hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Fragestellungen im Standortauswahlverfahren erfasst werden müssen.

Im nächsten Schritt werden diejenigen Messmethoden herausgearbeitet, die zur übertägigen Erkundung im Zusammenhang mit hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen

Fragestellungen angewendet werden können und dem aktuellen Stand von W+T entsprechen. Betrachtet werden hierbei insbesondere geohydraulische und geophysikalische bzw. bohrlochgeophysikalische Methoden im Rahmen von Feldmessungen und Laboruntersuchungen sowie Feld- und Laborversuche zur Bestimmung hydrogeochemischer Messgrößen. Diese Messmethoden werden hinsichtlich ihres Messprinzips, den jeweiligen Grenzen (bedingt z. B. durch eine limitierte Reichweite, begrenzte Reproduzierbarkeit der Messwerte oder physikalisch/technische Erkennungs- und Nachweisgrenzen), dem technischen Aufwand sowie den Vor- und Nachteilen des Einsatzes beschrieben. Auch Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Messmethoden sowie der potenzielle Bedarf an zusätzlicher Forschung und Entwicklung für den Einsatz in der übertägigen Standorterkundung wurden dargestellt. Hierbei fließen auch aktuelle Anwendungen sowie Erfahrungen aus der übertägigen Erkundung von Endlagerstandorten ein.

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Abhängigkeiten hinsichtlich der zur erkundenden Gesteinstypen und notwendigen Erkundungstiefen werden die Messmethoden in einer vergleichenden Übersicht hinsichtlich ihrer Eignung den zuvor zusammengestellten Messgrößen zugeordnet. Messmethoden, welche zur Bestimmung einer Messgröße nur über Modellannahmen und/oder empirische Zusammenhänge beitragen können, werden gesondert als solche hervorgehoben. Zudem werden auch Messmethoden herausgearbeitet, welche zur Bestimmung der Messgröße geeignet sind, aber Einschränkungen hinsichtlich der für den ewG erforderlichen Erkundungstiefe aufweisen oder deren Messbereich wahrscheinlich nicht ausreichend für die jeweilige Fragestellung der Standorterkundung ist. Diese Messmethoden lassen sich dann aber auf das Deck- und Nebengebirge anwenden.

Aus der Gegenüberstellung der Messgrößen und Messmethoden ergibt sich, dass nicht alle im StandAG aufgeführten, für die hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Untersuchungen relevanten Messgrößen durch die verschiedenen Messmethoden direkt erfassbar sind. Dies betrifft die Messgrößen Verfestigungsgrad und Ionenstärke. Diese können nur indirekt, d. h. über Messwerte, die physikalische Abhängigkeiten zu der relevanten Messgröße aufweisen, bestimmt werden. Darüber hinaus stehen Messmethoden zur Verfügung, die zur Bestimmung der jeweiligen Messgröße über Modellannahmen oder auch empirische Zusammenhänge beitragen können. In den meisten Fällen eignen sich mehrere Methoden für die Bestimmung einer bestimmten Messgröße. Gerade der Einsatz einer Kombination verschiedener, physikalisch unabhängiger Methoden kann die mögliche Variationsbreite der Messgrößen eingrenzen und damit die Aussage-sicherheit deutlich erhöhen.

Die Ergebnisse der Zusammenstellung und Dokumentation von Messgrößen und Messmethoden werden im letzten Arbeitsschritt für die Erstellung eines Orientierungsrahmens verwendet.

Der Orientierungsrahmen enthält die wesentlichen Anforderungen an eine lückenlose Dokumentation und Qualitätssicherung der Messungen und Probennahmen und leitet grundlegende Einflussfaktoren auf die zu erwartende Qualität und Quantität der Messwerte ab. Der Orientierungsrahmen nimmt zudem Bezug auf die verschiedenen Faktoren, welche die Auswahl geeigneter Messmethoden zur übertägigen Ermittlung der Messgrößen sowie die Festlegung der geeigneten Messnetz-dichte und zeitlichen Messintervalle beeinflussen können:

- Die Zuverlässigkeit der Erkundungsergebnisse hängt von der Messnetz-dichte ab. Höhere Messnetz-dichten mit geeigneten Erkundungsmethoden führen in der Regel zu zuverlässigeren Erkundungsergebnissen. Eine Erhöhung der Messnetz-dichte von Erkundungsboh-rungen ist jedoch immer gegenüber den standortspezifischen Gegebenheiten sowie möglichen negativen Einflüssen auf die Barrierewirkung des ewG abzuwägen.

- Die Festlegung der zeitlichen Intervalle zwischen den einzelnen Messungen ist z. B. abhängig von der zeitlichen Variabilität der zu bestimmenden Messgröße) sowie der potenziellen Beeinflussung der natürlichen Zustände des Untersuchungsgebietes durch Anwendung der Messmethode. Wiederholungsmessungen dienen weiterhin dazu, die Repräsentativität der Messwerte zu erhöhen, um die Messergebnisse im Sinne der Qualitätssicherung verifizieren können.

Die Messnetzdichten und zeitlichen Messintervalle hängen sowohl stark von der standortspezifischen Geologie der jeweiligen Standortregion als auch von der oder den jeweiligen anzuwendenden Messmethode/n ab. Aus diesem Grund können zu diesem Zeitpunkt noch keine quantifizierbaren Angaben für Messnetzdichten und Messintervalle getroffen werden. Die in diesem Bericht dargestellten Messnetzdichten basieren daher auf einer früheren Auswertung nationaler und internationaler Erkundungsprogramme zur Untersuchung von Endlagerstandorten von Goldsworthy et al. (2009). In diesem Zusammenhang kann diese Studie somit für Erfahrungswerte herangezogen werden, stellt aber keine verbindliche Vorgabe zur Umsetzung dar. Die zu Beginn der Erkundungen gewählten Messnetzdichten sollten stattdessen auf Basis der steigenden Kenntnis über die standortspezifischen geologischen Verhältnisse im Rahmen eines laufenden übertägigen Erkundungsprogrammes schrittweise an die Datenlage und die jeweiligen Standortbedingungen angepasst werden.

Die Notwendigkeit der schrittweisen übertägigen Erkundung wird auch im Orientierungsrahmen hervorgehoben. Durch diese übliche und bewährte Vorgehensweise einer geowissenschaftlichen Erkundung können der Kenntnisstand, der Detaillierungsgrad und damit die Aussagesicherheit der Messergebnisse sukzessive verbessert werden.

Der dargestellte Orientierungsrahmen enthält in Verbindung mit der Beschreibung der relevanten Messgrößen und der zugehörigen Messmethoden eine umfassende Zusammenstellung zu den hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Aspekten der Standorterkundung und kann als Unterstützung bei der Bewertung von Vorschlägen zur übertägigen Erkundung von Standortregionen dienen.

10. Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung, AD-HOC-Arbeitsgruppe Hydrogeologie, Geologisches Jahrbuch, G2, 157 S., Hannover.
- Adams, J., Wyss, E. (1994): Hydraulic Packer Testing in the Wellenberg Boreholes SB1 and SB2, Methods and Field Results, Nagra Technical Report 93-38, Solexperts AG, Schwerzenberg.
- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.
- Amro, M., Häfner, F., Freese, C. (2012): Moderne In-situ- und Labormessung von Permeabilität und Porosität zum Dichtheitsnachweis von Speichern für Wasserstoff, Erdgas und CO₂, Erdöl Erdgas Kohle.
- Aosai, D., Saeki, D., Iwatsuki, T., Matsuyama, H. (2015): Concentration and characterization of organic colloids in deep granitic groundwater using nanofiltration membranes for evaluating radionuclide transport. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 485, pp. 55 - 62, Elsevier.
- Appel, D., Habler, W. (2001): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Bericht an den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS).
- Arbeitskreis Grundwasserbeobachtung (2018): Merkblatt – Funktionsprüfung an Grundwassermessstellen.
- Archie, G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min., Met. & Petr. Eng.*, 146, pp. 54 - 62.
- Aromaa, H., Voutilainen, M., Ikonen, J., Yli-Kaila, M., Poteri, A., Siitari-Kauppi, M. (2019): Through diffusion experiments to study the diffusion and sorption of HTO, ³⁶Cl, ¹³³Ba and ¹³⁴Cs in crystalline rock. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 222, pp. 101 - 111, Elsevier.
- Atkins, P. W. (2001): *Kurzlehrbuch Physikalische Chemie*. 3. Auflage, WILEY-VCH.
- Bahadir, M., Parlar, H., Spittler, M. [Hrsg.] (2000): *Springer Umweltlexikon*. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Baker, P. L., Kenyon, W. L., Kestner, J. M. (1985): EPT Interpretation using a Textural Model. *SPWLA 27th Ann. Logging Symp. Paper DD*.
- BBergG (1980): Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- Bear, J. (1972): *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, New York.
- Bear, J. (1979): *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. McGraw-Hill, New York.
- Beauheim, R. L., Roberts, R. M. (2002): Hydrology and hydraulic properties of a bedded evaporite formation. *Journal of Hydrology*, Vol. 259(1), pp. 66 - 88.
- Berdichevsky, M. N., Dimitriev, V. I. (2008): *Models and Methods of Magnetotellurics*. Springer-Verlag.

- Beudt, J. [Hrsg.] (1997): Grundwasser-Management: Schutz - Reinigung - Sanierung. Springer Verlag Berlin-Heidelberg.
- Bhattachary, B. B., Shalivahan, S. (2016): Geoelectrical Methods: Theory and Application. McGraw Hill Education.
- Biot, M. A. (1956): Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low frequency range and II. Higher frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, pp. 168 - 191.
- Biot, M. A. (1962): Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *J. Appl. Phys.*, 33, pp. 1482 - 1498.
- Bitea, C. (2005): Laser-induzierte Breakdown Detektion (LIBD): Quantifizierung der Kolloidbildung vierwertiger Actiniden und Homologen. Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7083, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Karlsruhe.
- BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Endfassung des Bundesumweltministeriums vom 30.09.2010.
- BMUB (2017): Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [Hrsg.], Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungs-konferenz im Mai 2018.
- Bohn, A. (2013): Hydrogeochemische Analyse und Modellierung von Lösungs- und Reaktionsprozessen im Salinar- und Deckgebirge am Staßfurter Sattel. Dissertation, Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus – Senftenberg.
- Börner, F., Müller-Huber, E., Branka, D., Rücker, C. (2017): The effect of compaction on complex resistivity of shaly sands. *Near Surface Geophysics*, 15, pp. 633 - 643.
- Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil III. Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, *Geol. Jb.*, C 73, Schweizerbart, Stuttgart.
- Börner, F. D., Schön, J. H. (1991): A relation between the quadrature component of electrical conductivity and the specific surface area of sedimentary rocks. *The Log Analyst*, 32, pp. 612 - 613.
- Börner, F. D., Schopper, J. R., Weller, A. (1996): Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. *Geophysical Prospecting*, 44, pp. 583 - 602.
- Börner, J. H., Herdegen, V., Kummerow, J., Raab, S., Spangenberg, E. (2019): Spektrale Induzierte Polarisation reaktiver Systeme unter Reservoirbedingungen. Sonderband I/2019 der DGG-Mitteilungen zum Kolloquium: Induzierte Polarisation.
- Bozau, E., Voss, I. (2016): Variationsbreite der chemischen Zusammensetzung von Grundwässern im Kontakt zu Salzformationen. In: Grundwasser, Mensch, Ökosysteme, 25. Tagung der FH-DGGV, Karlsruhe.

- Bradbury, M. H., Baeyens, B. (2011): Physico-Chemical Characterisation Data and Sorption Measurements of Cs, Ni, Eu, Th, U, Cl, I and Se on MX-80 Bentonite. PSI Bericht Nr. 11-05, Paul Scherrer Institut, Villingen, Schweiz.
- Brasser, T., Herbert, H. J., Miehe, R. (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, Anhang Standorterkundung – Das geologische Endlagersystem: Gebirgsverhalten und Messmethoden. – Braunschweig/ Darmstadt (Öko-Institut e.V., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH).
- Bredehoeft, J. D., Papadopoulos, I. S. (1980): A method for determining the hydraulic properties in tight formations. – *Water Resources Research*, 16(1), pp. 223 - 238.
- Brown, A. R. (1999): Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data. Investigations in Geophysics. Soc. of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- Bryant, S. L., Cade, C. A., Melor, D. W. (1993): Permeability prediction from geological models. *AAPG Bulletin* 77(8), pp. 1338 - 1350.
- Bücker, M., Hördt, A. (2013): Analytical modelling of membrane polarization with explicit parametrization of pore radii and the electrical double layer. *Geophysical Journal International* 194, pp. 804 - 813.
- Bundschuh, T., Kim, J.-I. (1999): Entwicklung und Anwendung der Laser-induzierten Breakdown-Detektion zur Quantifizierung aquatischer Kolloide und Actinidenkolloide. FZKA 6273, FZ Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik, Karlsruhe.
- Bundschuh T., Wagner T. U., Köster R. (2005a): Laser-induced Breakdown Detection (LIBD) for the Highly Sensitive Quantification of Aquatic Colloids. Part I: Principle of LIBD and Mathematical Model. *Particle & Particle Systems Characterization* 22, pp. 172 - 180.
- Bundschuh T., Wagner T. U., Köster R. (2005b): Laser-induced Breakdown Detection (LIBD) for the Highly Sensitive Quantification of Aquatic Colloids. Part II: Experimental Setup of LIBD and Applications. *Particle & Particle Systems Characterization* 22, pp. 181 - 191.
- Buske, S., Bellefleur, G. and Malehmir, A. (2015): Introduction to special issue on “hard rock seismic imaging”, *Geophysical Prospecting* 63 (4).
- Calvin, S. (2013): XAFS for everyone. 1st Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Camman, K. [Hrsg.] (2001): Instrumentelle Analytische Chemie. Verfahren, Anwendungen, Qualitätssicherung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., Eastwood R. L. (1985): Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophys.*, 50, pp. 571 - 581.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., Kan, T. K. (1993): Rock physics – The link between rock properties and AVO response. In: *Offset-Dependent Reflectivity – Theory and Practise of AVO Analysis*, J. P. Castagna und Backus [Hrsg.]. Investigations in Geophysics, No 8, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, pp. 135 - 171.
- Chandra, P. C. (2015): *Groundwater Geophysics in Hard Rock*. CRC Press.
- Chang, D., Vinegar, H., Morris, C. (1997): Effective Porosity, Producing Fluid and Permeability in Carbonates from NMR Logging. *The Log Analyst*, 38, 2, pp. 60 - 72.
- Chave, A. D., Jones, A. G. (2012): *The Magnetotelluric Method. Theory and practice*. Cambridge University Press.

- Chen, Q., Kinzelbach, W. (2002): An NMR study of single- and two-phase flow in fault gouge filled fractures. *Journal of Hydrology*, Vol. 25, pp. 236-245.
- Chen, S. T., Zimmerman, L. J., Tugnait, J. K., (1990): Subsurface imaging using reversed vertical seismic profiling and crosshole tomographic methods. *Geophysics* 55, 1478–1487.
- Chopra, S., Marfurt, K. J. (2007): *Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization*. Society of Exploration Geophysicists.
- Cloet, V., Schwyn, B., Baeyens, B., Curti, E., Diomidis, N., Johnson, L. H., Leupin, O. X., Mibus, J., van Loon, L. R., Wieland, E. (2014): Einfluss der Salinität des Porenwassers der Wirtgesteine auf die Langzeitsicherheit der Tiefenlager. *Arbeitsbericht NAB 14-09*. Nagra, Schweiz.
- Coates, G. R., Xiao, L., Prammer, M. G. (1999): *NMR Logging Principles and Applications*. Halliburton Energy Services Publication H02308, Halliburton Energy Services, Houston.
- Coldewey, W. G., Göbel, P. (2015): *Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Cooper, H. H., Bredehoeft, J. D., Papadopoulos, I. S. (1967): Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water. *Water Resources Research*, 3(1), pp. 263 - 269.
- Cordsen, A., Galbrith, M. and Peirce, J. (2000): *Planning land 3-D seismic surveys*. Geophysical Developments Series No. 9. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Cosma, C., Heikkinen, P., Keskinen, J., and Enescu, N. (2001): VSP in crystalline rocks - from downhole velocity profiling to 3-D fracture mapping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* No. 38, pp. 843 - 850.
- Criss, J. (2019): The enigma of arrays. *First break*, 38, 1, pp. 45 - 47.
- Dähn, R., Arakcheeva, A., Schaub, Ph., Pattison, P., Chapuis, G., Grolimund, D., Wieland, E., Leemann, A. (2016): Application of micro X-ray diffraction to investigate the reaction products formed by the alkali–silica reaction in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 79, pp. 49 - 56.
- Dähn, R., Popov, D., Schaub, Ph., Pattison, P., Grolimund, D., Mäder, U., Jenni, A., Wieland, E. (2014): X-ray micro-diffraction studies of heterogeneous interfaces between cementitious materials and geological formations. *Physics and Chemistry of the Earth* 70–71, pp. 96 - 103.
- DBE Technology GmbH (2011): *Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA)*. Synthesebericht, FKZ 02 E 10346, Peine.
- Degueldre, C., Pleinert, A., Maguire, P., Lehmann, E., Missimer, J., Hammer, J., Leenders, K., Böck, H., Townsend, D. (1996): Porosity and pathway determination in crystalline rock by positron emission tomography and neutron radiography. *Earth and Planetary Science Letters* 140, pp. 213 - 225.
- de Oliveira, G. L. P., Ceia, M. A. R., Missagia, R. M., Archilha, N. L., Figueiredo, L., Santos, V. H., Neto, I. L. (2016): Pore volume compressibilities of sandstones and carbonates from Helium porosity measurements. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 137, pp. 185-201, Elsevier.

- Deutscher Bundestag (2017): Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, BT-Drs 18/11398 (Gesetzentwurf) 07.03.2017.
- DIN 18123 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18130-1 (1998): Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes – Teil 1: Laborversuche. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18130-2 (2015): Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes – Teil 2: Feldversuche. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 38402-13 (2016): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Allgemeine Angaben (Gruppe A) - Teil 13: Probenahme aus Grundwasserleitern (A 13), Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4046 (1983): Wasserversorgung – Begriffe. Technische Regel des DVGW. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4049-1 (1992): Hydrologie - Grundbegriffe. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4049-2 (1990): Hydrologie - Begriffe der Gewässerbeschaffenheit. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 17294-2 (2017): Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 19268 (2007): pH-Messung von wässrigen Lösungen mit pH-Messketten mit pH-Glaselektroden und Abschätzung der Messunsicherheit. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 17892-11 (2019): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22282-1 (2012): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 1: Allgemeine Regeln. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22282-2 (2012): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 2: Wasserdurchlässigkeitsversuche in einem Bohrloch unter Anwendung offener Systeme. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22282-3 (2012): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 3: Wasserdruckversuch im Fels. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22282-4 (2012): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 4: Pumpversuche. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22282-6 (2012): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 6: Wasserdurchlässigkeitsversuche im Bohrloch unter Anwendung geschlossener Systeme. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22475-1 (2007): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen - Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung. Beuth Verlag, Berlin.

- DIN ISO 15901-1 (2019): Bewertung der Porengrößenverteilung und Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption - Teil 1: Quecksilberporosimetrie. Beuth Verlag, Berlin.
- Dörfler, H.-D. (1994): Grenzflächen- und Kolloidchemie. VCH, Weinheim.
- DVGW W 110 (2005): Geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen - Zusammenstellung von Methoden und Anwendungen.
- DVGW W 111 (2015): Pumpversuch bei der Wassererschließung. Technische Regel, Beuth Verlag, Berlin.
- DVGW W 112 (2011): Grundsätze der Grundwasserprobennahme aus Grundwassermessstellen. Technische Regel, Beuth Verlag, Berlin.
- DVGW W 115 (2008): Bohrungen zur Erkundung, Beobachtung und Gewinnung von Grundwasser. Technische Regel, Beuth Verlag, Berlin.
- DVGW W 116 (2018): Verwendung von Spülmittelzusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser (ENTWURF). Technische Regel, Beuth Verlag, Berlin.
- DVGW W 121 (2003): Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen. Technische Regel, Beuth Verlag, Berlin.
- DVGW W 129 (A) (2012): Eignungsprüfung von Grundwassermessstellen. Technische Regel, Beuth Verlag, Berlin.
- DVGW W 135 (2018): Sanierung und Rückbau von Brunnen, Grundwassermessstellen und Bohrungen. 2. Auflage, Beuth Verlag, Berlin.
- Dvorkin, J., Mavko, G., Nur, A. (1995): Squeezeflow in fully saturated rocks. *Geophys.*, 60, pp. 97 - 107.
- Dvorkin, J., Nolen-Hoeksema, R., Nur, A. (1994): The squeeze-flow mechanism: macroscopic description. *Geophys.*, 59, pp. 428 - 438.
- DVWK (1990): Einflüsse von Meßstellenausbau und Pumpenmaterialien auf die Beschaffenheit einer Wasserprobe. DVWK – Mitteilungen, Heft 20.
- DWA-A 909 (2001): Grundsätze der Grundwasserprobennahme aus Grundwassermessstellen (DWA-Arbeitsblatt), inhaltlich gleich mit DVGW W 112.
- Earth Manual (1963): A guide to the use of soils as construction materials for hydraulic structures. (U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation), Denver/Colorado.
- Ehlers, E. (2015): Analytik II - Kurzlehrbuch: Quantitative und Instrumentelle Pharmazeutische Analytik (Wissen und Praxis). 12. Auflage, Deutscher Apotheker Verlag.
- Eichholtz, M. (2005): pH-Wertmessung in konzentrierten Salzlösungen. In Kali und Steinsalz, Heft 3/2005, Kaliverein e.V.
- Ellis, D.W. (1987): Well Logging for Earth Scientists. – Elsevier Amsterdam Oxford New York Tokyo.
- Entsorgungskommission (2015): Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung, Stellungnahme vom 12.05.2016.
- Frese, D., Baretzko, A., Wohlenberg, J. (2000): Porositätsbestimmung aus Bohrlochmessungen – Beispiele für die Anwendung von Standardverfahren in ozeanischer und kontinentaler Kruste.

te. Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Sonderband III/2000, Sitzung der FKPE-Arbeitsgruppe Bohrlochgeophysik und Gesteinsphysik in Hannover, 7.-8.10.1999.

- Fricke, S., Schön, J. (1999): Praktische Bohrlochgeophysik. Enke im Georg Thieme Verlag.
- Friedel, S. (2000): Über die Abbildungseigenschaften der geoelektrischen Impedanztomographie unter Berücksichtigung von endlicher Anzahl und endlicher Genauigkeit der Meßdaten. Dissertation Universität Leipzig, Shaker, Aachen.
- FZK-INE (2000): Günstige hydrochemische Verhältnisse. Anlage 2 des Abschlussberichtes „Ermittlung von Eignungskriterien von geologischen Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels geochemischer Analysen“ im Auftrag des BfS. FZK-INE 03/01, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe.
- García Gutiérrez, M., Cormenzana, J. L., Missana, T., Mingarro, M., Molinero, J. (2006): Overview of laboratory methods employed for obtaining diffusion coefficients in FEBEX compacted bentonite. *Journal of Iberian Geology*, 32(1).
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W. und Gregory, A. R. (1974): Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophys.*, 39, pp. 770 - 780.
- Gassmann, F. (1951): Über die Elastizität poröser Medien. *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 96, pp. 1 - 23.
- GDCh [Hrsg.] (2018): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Physikalische, chemische, biologische und bakteriologische Verfahren. Wasserchemische Gesellschaft in der GDCh, DIN [Hrsg.], Beuth, WILEY-VCH.
- Geerits, T. W., Altunbay, M., Tang, X. M., Lehne, K. A., Kelder, O. (1999): Comparison between Stoneley, NMR and Core-Derived Permeabilities, presented at the SPWLA 40th Annual Logging Symposium, Oslo, Norway.
- Geertsma, J. (1961): Velocity-log interpretation: The effect of rock bulk compressibility. *Soc Pet. Eng. J.*, 1, 235 - 248.
- Gelhar, L. W., C. Welty und K. R. Rehfeldt (1992): "A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers". *Water Resources Research*, 28(7), pp. 1955-1974.
- Goethals, P., Volkaert, A., Jacobs, P., Roels, S., Carmeliet, J. (2009): Comparison of Positron Emission Tomography and X-Ray radiography for studies of physical processes in sandstone. *Engineering Geology* 103, pp. 134 - 138.
- Goldsworthy, M., Seidel, K., Popp, T. (2009): Anforderungen an Methoden und Umfang der über- und untertägigen Erkundung eines Standortes für ein Endlager unter Einbeziehung eines internationalen Vergleichs. Golder Associates GmbH in Kooperation mit GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH und IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, BMUB-Vorhaben 3605R02555.
- Gräber, P.-W. (2005): Grundwassermesstechnik, Band 2. Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften.
- Gurin, G., Titov, K., Ilyin, Yu., Tarasov, A. (2015): Induced polarization of disseminated electronically conductive minerals: a semi-empirical model, *Geophysical Journal International* 200, pp. 1555 - 1565.

- Halliburton Energy Services, Inc. (2006): Evaluating Stoneley waves and formation parameters, Date of publication and mention of the grant of the patent: 03.05.2006 Bulletin 2006/18, Europäisches Patent EP 0 936 477 B1.
- Hammer, J. (2003): Quartärsedimente als geologische Barrieren. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 9, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hammer, J., Sönke, J. (2009): Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. Eugenia Abschlussbericht – Teil 2. unveröff. Bericht, BGR, Hannover.
- Han, D.-H. (1986): Effects of Porosity and Clay Content on Acoustic Properties of Sandstones and Unconsolidated Sediments. Ph.D. Dissertation, Stanford University.
- Hardage, B. A. (1985): Vertical seismic profiling: principles. Geophysical Press.
- Hardage, B. A. (1992): Crosswell seismology and reverse VSP, Geophysical Press.
- Harrie, D. C. (2014): Lehrbuch der Quantitativen Analyse. 8. Auflage, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- Hein, H., Kunze, W. (2004): Umweltanalytik mit Spektrometrie und Chromatographie. Von der Laborgestaltung bis zur Dateninterpretation. 3. Auflage. Wiley-VCH, Weinheim.
- Hekel, Odenwald (2012): Bohrlochversuche zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit von Fels, BAW-Mitteilungen Nr. 95.
- Hertrich, M., Yaramanci, U. (2002): Joint inversion of Surface Nuclear Magnetic Resonance and Vertical Electrical Sounding. Journal of Applied Geophysics, 50 (Special issue), pp. 179 - 191.
- Hetzer, B. (2009): Methodische Weiterentwicklung der Laser-induzierten Breakdown-Detektion (LIBD) und ihre Anwendung auf kolloidchemische Fragestellungen. Dissertation, Universität Regensburg.
- Hiltmann, W., Stribny, B. (1998): Tonmineralogie und Bodenphysik. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 5. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Hinds, R. C., Anderson, N. L., Kuzmiski, R. D. (1996): VSP Interpretive Processing: Theory and Practice. Open File Publications No. 3, SEG Books, Society of Exploration Geophysicists.
- Hlousek, F., Hellwig, O. and Buske, S. (2015): Three-dimensional focused seismic imaging for geothermal exploration in crystalline rock near Schneeberg, Germany. Geophysical Prospecting 63 (4).
- Hölting, B., Coldewey, W. (2012): Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 8.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hornung, J., Aigner, T. (2004): Sedimentäre Architektur und Poroperm-Analyse fluviatiler Sandsteine: Fallbeispiel Coburger Sandstein, Franken. Hallesches Jahrb. Geowiss., Reihe B, Beiheft 18, pp. 121 - 138.
- Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P., Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin, Hannover.

- Hvorslev, M. J. (1951): Time lag and soil permeability in ground-water observation. Bulletin No. 36, U.S.Army, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg Mississippi.
- IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, Specific Safety Guide; ISBN: 978-92-0-128310-8); 120 pp.
- Jacob, C. E. (1940): On the Flow of Water in an Elastic Artesian Aquifer. Transactions Amer. Geophys. Union, pp. 574 - 586.
- Jensen, D. (2013): Modernste Trenntechnik - Grundlagen der Ionenchromatographie. Thermo Fisher Scientific.
- Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A., Wolf, J. (2016): Projekt CHRISTA - Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Abschlussbericht TEC-20-2016-AB, Peine.
- Jordan, H., Weder, H.-J. [Hrsg.] (2001): Hydrogeologie: Grundlagen und Methoden - Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen. 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag.
- Kalmykov, S. N., Denecke, M. A. [Hrsg.] (2011): Actinide Nanoparticle Research. Springer Heidelberg-Dordrecht-London-New York.
- Karrenberg, H. (1981): Hydrogeologie der nichtverkarstungsfähigen Festgesteine. Springer-Verlag Wien-New York.
- Käss, W. (1992): Geohydraulische Markierungstechnik.- Lehrbuch der Hydrogeologie, Mattheß G. [Hrsg.], Band 9, 519 S.; Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- Kaufmann, A. A., Anderson, B. I. (2010): Principles of Electric Methods in Surface and Borehole Geophysics. Methods in Geochemistry and Geophysics, 44. Elsevier.
- Kenyon, W. E., Baker, P. L. (1986): EPT Interpretation in Carbonates Drilled With Salt Muds. SPE Formation Evaluation, October 1986; SPE 13 192, paper presented at the 1984 SPE Ann. Techn. Conf. Houston.
- Keys, W. S. (1997): A Practical Guide to Borehole Geophysics in Environmental Investigations. CRC Press.
- Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V. (2010): Radionuclide Source Term for HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Waste). Report-Nr. KIT-SR 7624, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kirsch, R. [Hrsg.] (2009): Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology. Springer.
- Klieber, C., Brill, T.M. (2018): Schallbasierte Messungen bei Tiefbohrungen. Bestimmung elastischer und struktureller Materialeigenschaften von Gesteinen. Akustik Journal 03/18 (Oktober 2018), S. 15-27. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin.
- Klinge, H., Böhme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R. R., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben Teil I. Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und dem Landesamt für Bergbau, E. u. G.--, Geol. Jb., C 71, Schweizerbart, Stuttgart.

- Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. [Hrsg.] (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 3: Geophysik. Springer.
- Knödel, K., Lange, G., Voigt, H. J. [Hrsg.] (2007): Environmental Geology. Springer.
- Kollbrunner, C. F. (1946): Fundation und Konsolidation. Band I, Schweizer Druck und-Verlagshaus, Zürich.
- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2015): Abriss der Standortauswahl und Darstellung der angewandten geowissenschaftlichen Kriterien bei den Endlagerprojekten in den Ländern Schweiz, Frankreich, Schweden, Belgien und USA, Kurzstudie der BGR, Hannover.
- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016): Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht, K-Drs. 268.
- Köthe, A., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben Teil II. Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Dem Landesamt für Bergbau, E. U. G., Geol. Jb., C 72, Schweizerbart, Stuttgart.
- Kozai, N., Ohnuki, T., Iwatsuki, T. (2013): Characterization of saline groundwater at Horonobe, Hokkai-do, Japan by SEC-UV-ICP-MS: Speciation of uranium and iodine. Water Research, Vol. 47(4), pp. 1570 - 1584.
- Krauss, I. (1977): Das Einschwingverfahren. Wasserwirtschaft 77 (6), pp. 338 - 341.
- Kuhlman, K. L., Edward N. Matteo, E. N. (2018): Porosity and Permeability: Literature Review and Summary. Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Hannover.
- Kukla, P., Pechinig, R., Urai, J. (2011): Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben - Bericht zum Arbeitspaket 2 - Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben, GRS – 276, ISBN 978-3-939355-52-6.
- Kümmel, R., Worch, E. (1990): Adsorption aus wäßrigen Lösungen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1991): Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit, Materialien zur Altlastenbearbeitung 8, Karlsruhe.
- Langguth, H.-R., Voigt, R. (2004): Hydrogeologische Methoden – 2., überarb. u. erw. Aufl., Springer, Berlin.
- Larue, J., Kock, I., Seher, H. (2010): Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes. Teil 1: Randbedingungen und Anforderungen an einen Tonsteinstandort. Projekt VerSi - Endlagerung im Tonstein, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02538 „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“, GRS-A-3535, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.
- Larue, J., Weyand, T., Mayer, K.-M. (2016): Untersuchungen zum Transportverhalten von Schadstoffen in Süß- /Salzwassersystemen unter Berücksichtigung von Dichteunterschieden. GRS - 436. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH.

- Legchenko, A. V., Valla, P. (2002): A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 50, pp. 3 - 19.
- Legchenko, A. V., Baltassat, J. M., Beauce, A., Bernard, J. (2002): Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *Journal of Applied Geophysics*, 50, pp. 21 - 46.
- Legchenko, A. V. (2013): *Magnetic resonance imaging for groundwater*. John Wiley & Sons.
- Lehmann, B. (2007): *Seismic Traveltime Tomography for Engineering and Exploration Applications*. EAGE Publications.
- Lehnert, K., Rothe, K. (1962): *Geophysikalische Bohrlochmessungen*. Akademie-Verlag, Berlin.
- Liedke, L., Götschenberg, A., Jobmann, M., Siemering, W. (1994): Felslabor Grimsel, Bohrloch-kranzversuch, Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Stofftransport in ge-klüftetem Fels. Nagra Technischer Bericht 94-02, Wettingen.
- LfU Bayern (2002): Merkblatt Nr. 3.1/2: Hinweise für die Durchführung und die Begutachtung von Markierungsversuchen in Gewässern.
- Lo, T., Inderwiesen, P. L. (1994): *Fundamentals of Seismic Tomography*. Geophysical Monograph Series No. 6. Society of Exploration Geophysicists.
- Lux, K.-H., Düsterloh, U., Wolters, R., Zhao, J., Rutenberg, M., Feierabend, J., Pan, T. (2018): Multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tongesteingebirge ohne bzw. mit Möglichkeit eines direkten Monitorings. Ein Beitrag zur Verbesserung des geomechanischen und fluiddynamischen Systemverständnisses bei TH2M-gekoppelten Prozessen. Lehrstuhlbericht für die ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod. Schriftenreihe Lehrstuhl Deponietechnik und Geomechanik TU Clausthal, Heft Nr. 23, Clausthal.
- Manceau, A., Marcus, M. A., Tamura, N. (2002): Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. In: *Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science*. P. Fenter and N. C. Sturchio, Eds. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America, Washington, DC., Vol. 49, pp. 341 - 428.
- Mateeva, A., Mestayer, J., Cox, B., Kiyashchenko D., Wills, P., Lopez, J., Grandi, S., Hornman, K., Lumens, P., Franzen A., Hill, D., Roy J. (2012): Advances in Distributed Acoustic Sensing (DAS) for VSP. *SEG Expanded Abstracts Vol. 30*, pp. 4253 - 4257, SEG Annual Meeting.
- Matthes, K., Nusche, H., Dietrich, P., Vienken, T. (2012): Auswirkungen von Messunsicherheiten bei der Korngrößenanalyse auf die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes. *Grundwasser*, Vol. 17(2), pp. 105–111, Elsevier.
- Mattheß, G. [Hrsg.] (1990): *Lehrbuch der Hydrogeologie Band 2 - Die Beschaffenheit des Grundwassers*. 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- Mattheß, G. [Hrsg.] (2000): *Lehrbuch der Hydrogeologie Band 4, Grundwassererschließung – Grundlagen, Brunnenbau, Grundwasserschutz, Wasserrecht*. 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- Mavko, G., Jizba, D. (1991): Estimating grain-scale fluid effects on velocity dispersion in rocks. *Geophys.*, 56, 1940 - 1949.
- Mayerhöfer, T. G., Popp, J. (2018): Beer's Law – Why Absorbance Depends (Almost) Linearly on Concentration. *ChemPhysChem Vol. 20*, pp. 511 - 515.

- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J. (2009): *The Rock Physics Handbook*, 2nd Edition. Cambridge University Press.
- Milsom, J. (2003): *Field Geophysics*, 3rd Edition. John Wiley & Sons.
- Misra, S., Torres-Verdín, C., Revil, A., Rasmus, J., Homan, D. (2016): Interfacial polarization of disseminated conductive minerals in absence of redox-active species — Part 1: Mechanistic model and validation, *Geophysics* 81, 139 - 157.
- Montoya, V., Baeyens, B., Glaus, M. A., Kupcik, T., Marques Fernandes, M., Van Laer, L., Bruggeman, C., Maes, N., Schäfer, T. (2018): Sorption of Sr, Co and Zn on illite: Batch experiments and modelling including Co in-diffusion measurements on compacted samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, pp. 1–20.
- Mortimer, E. C., Müller, U. (2015): *Chemie: Das Basiswissen der Chemie*. 12. Auflage, Thieme-Verlag.
- Müller, C. (1984): *Transmissivitätsmessungen mit dem Einschwingverfahren – Vergleichende Untersuchungen im vollkommenen Brunnen*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Muuri E., Ikonen J., Matara-Aho M., Lindberg A., Holgersson S., Voutilainen M., Siitari-Kauppi M., Martin A. (2016): Behavior of Cs in Grimsel granodiorite: Sorption on main minerals and crushed rock. *Radiochim. Acta* 104, pp. 575 - 582.
- Muuri, E., Siitari-Kauppi, M., Matara-aho, M., Ikonen, J., Lindberg, A. Qian, L., Koskinen, L. (2017): Cesium sorption and diffusion on crystalline rock: Olkiluoto case study. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 311(1), pp. 439 - 446, Springer.
- Nabighian, M. N. (1991): *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Volume 2, Application, Parts A and B. *Investigations in Geophysics No. 3*. Society of Exploration Geophysics.
- Nagra (1988): A borehole fluid conductivity logging method for the determination of fracture inflow parameters, *Technischer Bericht NTB 88-13 der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra)*, Baden.
- Nagra (2001): *Sondierungsbohrung Benken – Untersuchungsbericht*. *Technischer Bericht NTB 00-01 der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra)*, Wetztingen, Schweiz.
- Nagra (2019a): *Erkundungsziel Gebirgsdurchlässigkeit. Umfrage der Auftragnehmer im Rahmen des vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) initiierten Forschungsvorhabens üErStand (FKZ: 4717F01201)*.
- Nagra (2019b): *Erkundungsziel Hydrogeochemische Charakterisierung. Umfrage der Auftragnehmer im Rahmen des vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) initiierten Forschungsvorhabens üErStand (FKZ: 4717F01201)*.
- Nolet, G. [Hrsg.] (1987): *Seismic Tomography with Applications in Global Seismology and Exploration Geophysics*. D. Reidel (Kluwer).
- Noseck, U. [Hrsg.] (2009): *FUNMIG – Fundamental Processes of Radionuclide Migration in Salt Rock Far Field. A Natural Analogue Study*. GRS-255, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.
- Olshausen, H.-G., VDI-Gesellschaft Bautechnik [Hrsg.] (1997): *VDI-Lexikon Bauingenieurwesen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Oristaglio, M. L., Spies, B. R. (1999): Three-Dimensional Electromagnetics. Geophysical Developments No. 7. Society of Exploration Geophysics.
- Ostrowski, L. P., Kloska, M. B. (1989): Final interpretation of hydraulic testing at the siblingen borehole, Nagra Technical Report 89-10, Baden.
- Ostrowski, L. P., Enachescu, C., Harborth, B., Kloska, M. B. (1992): Hydrogeological Investigations at Wellenberg: Hydraulic Packer Testing in Boreholes SB3, SB4 und SB6, Methods and Field Results. Nagra Technical Report 92-05, Golder Associates GmbH, Celle.
- Pape, H., Riepe, H. M. und Schopper, J. R. (1982): A pigeon-hole model for relating permeability to specific surface. *The Log Analyst*, 23, 5 - 13
- Pellerin, L., Holliger, K., Slater, L., Yaramanci, U. (2009): Special Issue on Hydrogeophysics – Methods and Processes. *Near Surface Geophysics*, Vol. 7, No. 5 European Association of Geoscientists & Engineers.
- Pennington, W. D. (1997): *Seismic Petrophysics - An Applied Science for Reservoir Geophysics*. *The Leading Edge* 16, 3, 241.
- Petrov, V., Vlasova, I., Rodionova, A., Yapaskurt, V., Korolev, V., Petrov, V., Poluektov, V., Hammer, J., Kalmykov, S. (2019): Preferential sorption of radionuclides on different mineral phases typical for host rocks at the site of the future Russian high level waste repository. *Applied Geochemistry* 100, pp. 90 - 95, Elsevier.
- Pinneker, E. V. [Hrsg.] (1992): *Das Wasser in der Litho- und Asthenosphäre. Wechselwirkung und Geschichte*. *Lehrbuch der Hydrogeologie Band 6*, Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart.
- Posiva (2005): *Olkiluoto Site Description 2004 – Volume 1*. Report Posiva Oy, Olkiluoto.
- Poupon, M., Azbel, K., Ingram, J. E. (1999): Integrating Seismic Facies and Petro-Acoustic Modeling. *World Oil*, 75.
- Radon, J. (1917): Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. *Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. Mathematisch-Physische Klasse* 69, pp. 262 - 277.
- Raymer, L. L., Hunt, E. R. and Gardner, J. S. (1980): An improved sonic transit time-to-porosity transform, *Trans. Soc. Prof. Well Log Analysts*, 21st Annual Logging Symposium, Paper P.
- Revil, A., Florsch, N. (2010): Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International* 181, 1480 - 1498.
- Revil, A., Florsch, N., Mao, D. (2015): Induced polarization response of porous media with metallic particles — Part 1: A theory for disseminated semiconductors, *Geophysics* 80, 525 - 538.
- Richter, M., Gründig, M., Seese, A. (2003): *Transport Modelling of Aqueous Solutions in Clay and Clay Rock Using the Data of PET Studies*. Jahresbericht. Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung (IIF) Leipzig, pp. 97 - 102.
- Rider, M. H. (1986): *The Geological Interpretation of Well Logs*; Blackie, Glasgow/London. John Wiley Sons, New York.
- Rider, M. H. (1996): *The Geological Interpretation of Well Logs (second edition)*. Whittles Publishing.

- Ritter, H. L., Drake, L. C. (1945): Pore-Size Distribution in Porous Materials. Pressure Porosimeter and Determination of Complete Macropore-Size Distributions. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 1945, Vol. 17(12), pp. 782-786. DOI: <https://doi.org/10.1021/i560148a013>.
- Rubin, Y., Hubbard, S. S. [Hrsg.] (2005): *Hydrogeophysics*. Springer.
- Salem, H. S. (2000): Poisson's ratio and the porosity of surface soils and shallow sediments determined from seismic compressional and shear wave velocities. *Geotechnique* 4, pp. 461 - 463.
- Scheffer, Schachtschabel (2018): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 17. Aufl., Springer Verlag GmbH Deutschland.
- Scheytt, T., Hengelhaupt, F. (2001): Auffüllversuche in der wassergesättigten und ungesättigten Zone – ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren. *Grundwasser*, 6 (2), pp. 71 – 80, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Schikora, J. (2012): Simulation of diffusion-adsorption processes in natural geological media by means of COMSOL Multiphysics, in Faculty of mechanical Science and Engineering. Dresden Technical University, Dresden.
- Schleifer, N., 2002: Anwendung der spektralen Induzierten Polarisation in der archäologischen Prospektion. Dissertation, Johann Wolfgang-Goethe Universität Frankfurt am Main.
- Schlumberger (2013): Dielectric scanner. Multifrequency dielectric dispersion service. Firmenbroschüre.
- Schlumberger (2015): *Wireline Services Catalog*. Schlumberger, 3750 Briarpark Drive, Houston, Texas 77042.
- Schlumberger (2016): Recommended Seismic Volume Attributes. Petrel 2015. URL: www.software.slb.com/products/petrel/petrel-geophysics/multitrace-attribute?tab=Library. Datum des letzten Aufrufes: 18.06.2019.
- Schnurr A., Marsac R., Rabung T., Lützenkirchen J., Geckeis H. (2015): Sorption of Cm(III) and Eu(III) onto clay minerals under saline conditions: Batch adsorption, laser-fluorescence spectroscopy and modeling. *Geochim. Cosmochim. Acta* 151, pp. 192 - 202.
- Schön, J. H. (1996): *Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics*, Oxford, Pergamon.
- Schoonheydt, R., Johnston, C. T., Bergaya, F. [Hrsg.] (2018): *Developments in Clay Science - Surface and interface Chemistry of Clay Minerals*. Volume 9, Elsevier.
- Schreiner, M., Kreysing, K. (1998): *Geotechnik Hydrogeologie.- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, Band 4, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Schröder, T. J., Meeussen, J. C. L. (2017): Final report on radionuclide sorption in Boom Clay. OPERA-PU-NRG6123, NRG.
- Schuster, G. T. (2017): *Seismic Inversion*. Society of Exploration Geophysicists. Tulsa.
- Sedova, A., Royle, G., Allemand, T., Lambaré, G., Hermant, O. (2019): High-frequency acoustic land full-waveform inversion: a case study from the Sultanate of Oman. *First break*, 38, 1, pp. 75 - 81. EAGE.

- Serra, O. (1984): Fundamentals of Well-log interpretation. Elsevier Amsterdam Oxford New York Tokyo.
- Siddiqui, I. F., Osman, S. B. (2012): Simple and multiple regression models for relationship between electrical resistivity and various properties for soil characterization. Environmental Earth Sciences, 70, pp. 259 - 267.
- Snyder, L. R., Kirkland, J., J., Dolan, J., W. (2009): Introduction to Modern Liquid Chromatography. 3. Auflage, Wiley-VCH, ISBN 978-0-470-16754-0.
- StandAG (2017): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017 Nr.26 S. 1074).
- Storz, K., Steger, H., Wagner, V. Bayer, P., Blum, P. (2017): Methodenvergleich zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit. Grundwasser, Vol. 22(2), pp. 103 - 111, Springer.
- Strack, K. M. (1992): Exploration with Deep Transient Electromagnetics. Methods in Geochemistry and Geophysics, 30. Elsevier.
- Strack, K. M. (2014): Future Directions of Electromagnetic Methods for Hydrocarbon Exploration. Surveys in Geophysics, 35, pp. 157 - 177.
- Streich, R. (2016): Controlled-Source Electromagnetic Approaches for Hydrocarbon Exploration and Monitoring on Land. Surveys in Geophysics, 37, pp- 47 - 80.
- Sumner, J. S. (1976): Principles of induced polarization for geophysical exploration. Developments in Economic Geology, 5. Elsevier.
- Sun, J., Dong, X., Wang, J., Schmitt, D. R., Xu, C., Mohammed, T., Chen, D. (2016): Measurement of total porosity for gas shales by gas injection porosimetry (GIP) method. Fuel, Vol. 186, pp. 694-707, Elsevier.
- Svensk Kärnbränslehantering AB (2005a) SKB: Site investigation Oskarshamn – Annual Report 2005.
- Svensk Kärnbränslehantering AB (2005b): Site investigation Forsmark – Annual Report 2005.
- Tachi, Y., Ebina, T., Takeda, C., Saito, T., Takahashi, H., Ohuchi, Y., Martin, A. J. (2015): Matrix diffusion and sorption of Cs⁺, Na⁺, I⁻ and HTO in granodiorite: Laboratory-scale results and their extrapolation to the in situ condition. Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 179, pp. 10 - 24, Elsevier.
- Tarantola, A. (2005): Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia.
- Tellier, N., Ollivrin, G. (2019): Low-frequency Vibroseis: current achievements and the road ahead. First break, 38, 1, pp. 49 - 54. EAGE.
- Teo, B. K., Joy D. C. (1981): EXAFS Spectroscopy - Techniques and Applications. Springer US.
- Theis, C. V. (1935): The Relation between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well using Groundwater Storage, Transactions Amer. Geophys. Union, pp. 519 - 524.
- Thern, H. F., Kruspe, T., Rottengatter, P. (2007): Entwicklung und Anwendung von Bohrloch NMR. Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Sonderband I/2007, DGG-Kolloquium NMR in Aachen am 28.03.2007.

- Tönnies, V. (1991): Analyse dispersiver Bohrlochwellen, Dissertation TU Braunschweig 1991.
- Tosaya, C., Nur, A. (1982): Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks. *Geoph. Res. Lett.*, 9, 5-8.
- Tsang, C.-F., Hufschmied, P. (1988): A borehole fluid conductivity logging method for the determination of fracture inflow parameters, Nagra Technical Report 88-13, Baden.
- Umweltbundesamt (Österreich) (2016): Quickscan Erkundungs- und Monitoringtechnologien. Quickscan über erfolgversprechende Verfahren zur Erkundung von kontaminierten Standorten. Report REP-0570, Wien.
- Van Loon, L. R., Soler, J. M. (2003a): Diffusion of HTO, $^{36}\text{Cl}^-$, $^{125}\text{I}^-$ and $^{22}\text{Na}^+$ in Opalinus Clay: Effect of confining pressure, sample orientation, sample depth and temperature. Nagra Technical Report 03-07.
- Van Loon, L. R., Soler, J. M., Jakob, A., Bradbury, M. H. (2003b): Effect of confining pressure on the diffusion of HTO, Cl^- -36- and I^- -125- in a layered argillaceous rock (Opalinus Clay): Diffusion perpendicular to the fabric. *Applied Geochemistry* 18, pp. 1653 - 1662.
- Van Loon, L. R., Soler, J. M., Müller, W., Bradbury, M. H. (2004a): Anisotropic diffusion in layered argillaceous rocks: A case study with Opalinus Clay. *Environmental Science & Technology* 38, pp. 5721 - 5728.
- Van Loon, L. R., Wersin, P., Soler, J. M., Eikenberg, J., Gimmi, T., Hernan, P., Dewonck, S., Savoye, S. (2004b): In situ diffusion of HTO, $^{22}\text{Na}^+$, Cs^+ and I^- in Opalinus Clay at the Mont Terri underground rock laboratory. *Radiochimica Acta* 92, pp. 757 - 763.
- Van Loon, L. R., Müller, W., Iijima, K. (2005a): Activation energies of the self-diffusion of HTO, $^{22}\text{Na}^+$ and $^{36}\text{Cl}^-$ in a highly compacted argillaceous rock (Opalinus Clay). *Applied Geochemistry* 20, pp. 961 - 972.
- Van Loon, L. R., Baeyens, B., Bradbury, M. H. (2005b): Diffusion and retention of sodium and strontium in Opalinus clay: Comparison of sorption data from diffusion and batch sorption measurements, and geochemical calculations. *Applied Geochemistry* 20, pp. 2351 - 2363.
- Van Loon, L. R., Glaus, M. A., Müller, W. (2007): Anion exclusion effects in compacted bentonites: Towards a better understanding of anion diffusion. *Applied Geochemistry* 22, pp. 2536 - 2552.
- Vereecken, H., Binley, A., Cassiani, G., Revil, A., Titov, K. [Hrsg.] (2004): *Applied Hydrogeophysics*. Springer.
- Vermeer, G. J. O. (2002): 3-D Seismic Survey Design. Geophysical References Series No. 12. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Vespa, M., Dähn, R., Grolimund, D., Wieland, E., Scheidegger, A. M. (2006a): Spectroscopic Investigation of Ni Speciation in Hardened Cement Paste. *Environ. Sci. Technol.*, 40, pp. 2275 - 2282.
- Vespa, M., Dähn, R., Gallucci, E., Grolimund, D., Wieland, E., Scheidegger, A. M. (2006b): Microscale Investigations of Ni Uptake by Cement Using a Combination of Scanning Electron Microscopy and Synchrotron-Based Techniques. *Environ. Sci. Technol.*, 40, pp. 7702 - 7709.
- Vespa, M., Wieland, E., Dähn, R., Grolimund, D., Scheidegger, A. M. (2007): Determination of the elemental distribution and chemical speciation in highly heterogeneous cementitious mate-

- rials using synchrotron-based micro-spectroscopic techniques. *Cement and Concrete Research*, 37, pp. 1473 - 1482.
- Vespa, M., Lanson, M., Manceau, A. (2010): Natural Attenuation of Zinc Pollution in Smelter-Affected Soil. *Environ. Sci. Technol.* 44, pp. 7814 - 7820.
- Vespa, M., Lothenbach, B., Dähn, R., Huthwelker, T., Wieland, E. (2018): Characterisation of magnesium silicate hydrate phases (M-S-H): A combined approach using synchrotron-based absorption-spectroscopy and ab initio calculations. *Cement and Concrete Research*, 109, pp. 175 - 183.
- Vierieux, J., Operto, S (2009): An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. *Geophysics*, Vol. 74, No. 6, pp. 127 - 152.
- Waber, H. N. [ed.] (2008): Borehole Oftringen: Mineralogy, Porosimetry, Geochemistry, Pore Water Chemistry. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-18. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Waber H. N., Smellie J. A. T. (2008): Characterisation of pore water in crystalline rocks. *Applied Geo-chemistry* 23(7), pp. 1834-1861.
- Waber H. N., Smellie J. A. T. (2009): Forsmark site investigation. Borehole KFM02B: Characterisation of porewater. Part I: Diffusion experiments and porewater data. SKB P-09-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ward, S. H. (1990): Resistivity and induced polarization methods. In: Ward, S. H. [Hrsg.]: *Geotechnical and environmental geophysics I: Review and Tutorial*. Society of Exploration Geophysicists, 147 - 189.
- Washburn, E. W. (1921): The Dynamics of Capillary Flow. *Phys. Rev.* Vol. 17(3), 273. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>.
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 4. Dezember 2018 (BGBl. I S. 2254) geändert worden ist.
- Weiß, J. (2001): Ionenchromatographie. 3. Auflage, Wiley-VCH, ISBN 978-3527287024.
- Weller, A. (2019): Induzierte Polarisierung – eine Einführung. Sonderband I/2019 der DGG-Mitteilungen zum Kolloquium: Induzierte Polarisierung.
- Weller, A., Börner, F. D. (1996): Measurements of spectral induced polarization for environmental purposes. *Environmental Geology*, 27, pp. 329 - 334.
- Wernick, M. N., Aarsvold, J. N. (2004): *Emission Tomography – The Fundamentals of PET and SPECT*. Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- Wolf, M. H. (2011): Visualisierung und Quantifizierung der Fluidynamik in Bohrkernen aus dem Salinar und Deckgebirge des Raumes Staßfurt mittels Positronen-Emissions-Tomographie. Dissertation. Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig, Leipzig.
- Wong, J., Hurley, P., West, G. F. (1983): Crosshole seismology and seismic imaging in crystalline rocks. *Geophysical Research Letters*, August 1983.
- Wyllie, M. R. J., Gardner, G. H. F. und Gregory, A. R. (1963): Studies of elastic wave attenuation in porous media. *Geophys.*, 27, pp. 569 - 589.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, G. H. F. (1958): An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. *Geophys.*, 23, pp. 459 - 493.

- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W. (1956): Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophys.*, 21, pp. 41 - 70.
- Wyss, E. (1989): Felslabor Grimsel, Hydrogeologische Untersuchungen zur Bestimmung hydraulischer Potentiale. Nagra Technischer Bericht 89-01, SOLEXPERS AG, Zürich.
- Yaramci, U., Legchenko, A. V. (2005): Special Issue Magnetic Resonance Sounding - aquifer detection and characterization. *Near Surface Geophysics*, 3, pp. 119 - 222
- Yilmaz, Oz (2001): *Seismic Data Analysis (2 Volumes)*. Investigations in Geophysics No. 10, Society of Exploration Geophysicists.
- Zaretzki, H., Shao, H., Hesser, J. (2013): Hydraulische Charakterisierung von dichtem Salzgestein, 19. Tagung für Ingenieurgeologie, München.
- Zhadanov, M. S. (2010): *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*. Methods in Geochemistry and Geophysics, 43. Elsevier.
- Zhang, K., Pang, Z., Zhao, Z., Shao, X., Zhang, X., Li, W., Wang, K. (2018): Pore structure and fractal analysis of Lower Carboniferous carbonate reservoirs in the Marsel area, Chu-Sarysu basin. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 93, pp. 451-467, Elsevier.
- Zhang, N., He, M., Zhang, B., Qiao, F., Sheng H., Hu, Q. (2016): Pore structure characteristics and permeability of deep sedimentary rocks determined by mercury intrusion porosimetry. *Journal of Earth Science*, Vol. 27(4), pp. 670–676, Springer.
- Zimmer, P. (2003): Bildung von Sekundärphasen bei der Korrosion von verglasten Nuklear-Abfällen. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6910, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Karlsruhe.

Anhang

Darstellung und Bewertung der Messnetzdichten aus Goldsworthy et al. (2009)

In der Studie Goldsworthy et al. (2009) wurde eine Tabelle zu den Kategorien der Messnetzdichten (Quantitätskategorien) auf Basis der Erfahrung der beteiligten Experten erstellt und zur Bewertung der dokumentierten, angewendeten Messmethoden verschiedener endlagerbezogener Erkundungsprogramme herangezogen. Die hierbei von den Autoren der Studie Goldsworthy et al. (2009) auf der Basis der erstellten Quantitätskategorien vorgeschlagenen Quantitätsindexwerte (1 entspricht einer niedrigen und 3 einer hohen Messnetzdichte) stellen standortbezogene Informationen zu tatsächlich verwendeten Messnetzdichten für verschiedenen Messmethoden dar.

Einschränkungen bei der Übertragung auf das Vorhaben “übErStand”

Bei der Übertragung der in der Studie Goldsworthy et al. (2009) gesammelten Erfahrungen zu den Messnetzdichten auf die Erfordernisse bzw. Rahmenbedingungen des aktuellen Vorhabens müssen folgende Faktoren berücksichtigt werden:

- a) Die in Goldsworthy et al. (2009) enthaltenen Auswertungen der Unterlagen und Informationen stellen aus den folgenden Gründen eher eine Unterschätzung der tatsächlich durchgeführten Erkundungsaktivitäten dar:
 - die Datengrundlage zur Sichtung durch die Bearbeiter war ggf. unvollständig und somit standen nicht alle relevanten Daten zur Verfügung,
 - in einigen der gesichteten Unterlagen wurde auf die Anwendung von Messmethoden hingewiesen, jedoch konnten diesen aufgrund des damaligen Informationsstandes keine Quantitätskategorien durch die Autoren des Berichtes Goldsworthy et al. (2009) zugeordnet werden,
 - die Erkundungen waren zum Zeitpunkt der Studie an einigen der betrachteten Standorte noch nicht abgeschlossen, bzw. befanden sich in unterschiedlichen Erkundungs- bzw. Entwicklungsetappen.
- b) Im Rahmen dieses Vorhabens (übErStand) ist nur die Phase der übertägigen Standorterkundung zu betrachten. In einigen Fällen befanden sich die in Goldsworthy et al. (2009) betrachteten Standorte jedoch schon in der untertägigen Erkundungsphase oder es handelte sich um bereits im Betrieb befindliche Endlager. Die Fragestellung des übErStand-Vorhabens ist somit nicht identisch mit der von Goldsworthy et al (2009).
- c) Die Aufteilung der standortbezogenen Information zur Erkundungsaktivitäten erfolgte in Goldsworthy et al. (2009) auf der Basis von festgelegten Themenkomplexen. Die zum aktuellen Vorhaben relevanten Themenkomplexe sind in Tabelle A 1 zusammengefasst und werden den im StandAG (2017) enthaltenen bzw. daraus abgeleiteten Messgrößen gegenübergestellt. Der Verfestigungsgrad von Tongestein wurde damals nicht in Zusammenhang mit hydrologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Fragestellungen gebracht.

Messnetzdichte

Im Bericht Goldsworthy et al. (2009) wurden Erkundungsprogramme für die auch im aktuellen Vorhaben betrachteten Wirtsgesteine, Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein, hinsichtlich der damals eingesetzten Messungen und der zugehörigen Messnetzdichte an verschiedenen nationalen und internationalen Standorten untersucht.

- **Steinsalz:** im Jahr 2009 befanden sich drei der vier berücksichtigten Standorte (WIPP, Morsleben, Gorleben) mindestens in der Phase der untertägigen Erkundung, Morsleben und WIPP wurden schon als Endlager betrieben. Die bei Scanzano Jonico in Italien erkundeten Themenkomplexe beinhalten keine für das aktuelle Vorhaben relevanten Messgrößen. Daher werden für Steinsalz nur die in Goldsworthy et al. (2009) ausgewerteten Quantitätskategorien für Gorleben im Rahmen der weiteren Bearbeitung berücksichtigt.
- **Tongestein:** im Jahr 2009 waren zwei (Benken, Wellenberg) von den insgesamt vier betrachteten Standorten nur übertägig erkundet worden. Die anderen beiden Standorte (Mol, Bure) befanden sich schon in der Phase der untertägigen Erkundung. Daher werden nur die Informationen zu den Standorten Benken und Wellenberg berücksichtigt.
- **Kristallingestein:** im Jahr 2009 befanden sich vier (Oskarshamn, Forsmark, Bataapati, Sellafield) von insgesamt sechs Standorten noch in der Phase der übertägigen Erkundung, die übrigen zwei Standorte (Onkalo, Whiteshell) wurden bereits untertägig erkundet. Daher werden nur die Informationen zu den Standorten Oskarshamn, Forsmark, Bataapati und Sellafield berücksichtigt.

Die Tabelle A 1 zeigt für die ausgewählten Standorte die in den entsprechenden standortbezogenen Anhängen zum Bericht Goldsworthy et al. (2009) enthaltenen Indexwerte der Quantitätskategorien für verschiedene Messmethoden, wobei der Qualitätsindexwert 3 der höchsten Messnetzdichte entspricht. Da die Ergebnisse aus Goldsworthy et al. (2009) auf den heutigen Stand weitestgehend übertragbar sind und somit als Erfahrungswerte für die übertägige Standorterkundung herangezogen werden können, wurde folgende Vorgehensweise zur Festlegung der zusammenfassenden Indexwerte gewählt:

Sind alle erfassten Quantitätsindexwerte aus Goldsworthy et al. (2009) für eine Messmethode in einem Wirtsgesteinstyp gleich, wird der entsprechende Wert als typischer Wert für den Quantitätsindex für das üErStand-Vorhaben übernommen.

Die Zusammenfassung verschiedener Quantitätsindexwerte für eine Messmethode in einem Wirtsgesteinstyp erfolgt mit Hilfe einer einfachen statistischen Methode, welche die teilweise breite Variation der bewerteten Messnetzdichten sowohl für einen Standort als auch zwischen verschiedenen Standorten berücksichtigt. Da aufgrund der möglichen Unterschätzung der Messnetzdichten in Goldsworthy et al. (2009) eine einfache Mittelwertbildung von den Autoren als nicht ausreichend für das üErStand-Vorhaben erachtet wird, wird hier als sicherster (konservativer) Indexwert der kleinste Wert gewählt, der innerhalb der oberen 30-Perzentil des entsprechenden Wertesatzes liegt.

Ist eine direkte Ableitung von Informationen aus Goldsworthy et al. (2009) zu einer Messmethode mit Bezug zu einer relevanten Messgröße nicht möglich, werden entsprechend zusammenfassende Quantitätsindizes auf Basis der übrigen Indexwerte verwendet. So werden z. B. für „D3 Transporteigenschaften“ (entspricht „Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ im StandAG (2017)) Werte von 2 für Tongestein und Kristallingestein auf Basis des Mittelwertes aller typischen bzw. sicheren Quantitätsindizes gewählt. Die gleiche Annahme wird für den Verfestigungsgrad von Tongestein getroffen. Bei „D4 Kolloide“ (entspricht „Gehalt an Kolloiden und Komplexbildner im Tiefenwasser“ im StandAG (2017)) wurde auf Basis des Wertes 1 für Tongestein der gleiche Wert für Kristallingestein gewählt.

Tabelle A 1 stellt im Ergebnis die wirtsgesteinsbezogenen Quantitätsindexwerte für einzelne Messmethoden zusammen mit dem Bezug zu den Messgrößen des aktuellen Vorhabens dar.

In Tabelle A 2 sind die abgeleiteten wirtsgesteinsbezogenen Messnetzdichten für die im aktuellen Vorhaben relevanten Messgrößen auf Basis der in Tabelle A 1 dargestellten typischen bzw. siche-

ren Werte der Quantitätsindex und der in Goldsworthy et al. (2009) dargestellten messmethodenbezogenen Quantitätskategorien zusammengefasst. Für Messmethoden, welche noch nicht dem Stand von W+T in 2009 darstellten, wurden die in Tabelle A 2 gezeigten Messnetzdichten von vergleichbaren Methoden von Goldsworthy et al. (2009) bzw. von assoziierten Messgrößen im aktuellen Vorhaben übernommen.

Tabelle A 1: Übertragung der gesteinsbezogenen Quantitätsindexwerte aus Goldsworthy et al. (2009) (3 = höchste Messnetzdicke).

Themenkomplexe und zugehörige Erkundungsmethoden aus Goldsworthy et al. (2009)	Quantitätsindexwerte aus Goldsworthy et al. (2009)							abgeleiteter Quantitätsindexwert für überStand			Bezug zu relevanten Messgrößen (Ausnahme: „Verfestigungsgrad für Tongestein“)
	Steinsalz	Tongestein		Kristallingestein				Steinsalz	Tongestein	Kristallgestein	
	Gorleben	Benken	Wellenberg	Sellafield	Oskarshamn	Forsmark	Bataapati				
B7b Hydraulisch (z. B. Permeabilität, Porosität, Sättigung)											
B7b.3 Geophysik (Bohrlochmessungen)	-	1 - 2	2	-	-	-	-	-	2	-	absolute Porosität; Gesteinsdurchlässigkeit; Tortuosität
B7b.9 Labor	1 - 2	2; 1	2	2	3	2	-	2	2	3	
B7c Diffusion											
B7c.3 Geophysik (Bohrlochmessungen)	-	-	-	-	1	1	-	-	-	1	effektiver Diffusionskoeffizient; Viskosität Fluid; Dichte Fluid
B7c.9 Labor	-	2	1	-	3	1	-	-	2	3	
C Hydrogeologie (im Feldmaßstab)											
C1 Hydraulisch wirksame Einheiten											
C1.2 Geophysik (übertägig)	2	-	-	3	-	2	-	2	-	3	Gebirgsdurchlässigkeit; Transmissivität; hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert
C1.3 Geophysik (Bohrlochmessungen)	1	2	2	2	-	-	2	1	2	2	
C1.4 Geol. Kartierung	-	-	-	2; 3	3	-	-	-	-	3	
C1.6 Feldmessungen - Geohydraulik	1; 1	-	2	-	3	3	3; 2; 2	1	2	3	
C2 Porenwasserdrücke											
C2.6 Feldmessungen - Geohydraulik	1	1; 1	1; 1; 2	1; 1	2; 2; 2	3; 3; 3; 3; 1	3; 2; 2	1	1	3	hydraulischer Gradient
C3 Fließ- und Speicherparameter											
C3.3 Geophysik (Bohrlochmessungen)	-	1,5	2	-	3	-	-	-	2	3	Abstandsgeschwindigkeit; effektive Porosität

Tabelle A 1: (Fortsetzung) Übertragung der gesteinsbezogenen Quantitätsindexwerte aus Goldsworthy et al. (2009) (3 = höchste Messnetzdicke).

Messgrößen und zugehörige Erkundungsmethoden aus Goldsworthy et al. (2009)	Quantitätsindexwerte aus Goldsworthy et al. (2009)							abgeleiteter Quantitätsindexwert für überStand			Bezug zu relevanten Messgrößen (Ausnahme: „Verfestigungsgrad für Tongestein“)
	Steinsalz	Tongestein		Kristallingestein				Steinsalz	Tongestein	Kristallgestein	
	Gorleben	Benken	Wellenberg	Sellafield	Oskarshamn	Forsmark	Bataapati				
C3.6 Feldmessungen - Geohydraulik	1; 1	1; 1	2	1; 1; 1; 1; 1	1; 2; 2	3; 3; 3; 3; 3; 2; 3; 1; 2	3; 2	1	2	3	
D Hydrochemie											
D1 Wasseralter (isotopengeochemische Charakterisierung)											
D1.9 Labor	1; 1; 1; 1; 1	1; 1; 1	3; 2; 2	2; 1; 1; 3	1; 1; 2	1; 1; 2	1; 3; 3; 3	1	2	2	Isotopenzusammensetzung
D2 Porenwasserchemismus											
D2.2 Geophysik (übertägig)	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	pH-Wert; Eh-Wert; elektrische Leitfähigkeit; Ionenstärke; Karbonatgehalt; Salinität; Haupt- und Spurenelemente des Fluides
D2.3 Geophysik (Bohrlochmessungen)	1	-	-	2	2	-	-	1	-	2	
D2.7 Feldmessungen - Geochemie	-	1	2	1	1	3; 1	3; 3; 3	-	2	3	
D2.9 Labor	1	1; 1; 1; 1	1; 2; 2; 2; 2	1; 1; 1	1; 1; 1; 1	1; 1; 1; 1	3; 3; 3; 3; 3; 3; 3; 3; 3	1	2	3	
D3 Transporteigenschaften											
	-	-	-	-	-	-	-	-	(2)	(2)	K _d -Werte
D4 Kolloide											
D4.9 Labor	-	-	1	-	-	-	-	-	1	(1)	Gehalt Kolloide und Komplexbildner

Tabelle A 2: Erfahrungswerte zu Messnetzdichten auf Basis der in Goldsworthy et al. (2009) betrachteten Endlagerstandorte für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein.

Relevante Messgröße	Bezug zu StandAG	Messmethoden	Wirtsgestein			Anmerkung
			Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein	
Abstandsgeschwindigkeit	§ 22, § 24 Anl. 1, 11	Feld: Tracer-Versuche (Randbedingungen bekannt, großer Maßstab)	Nicht erforderlich	2 bis 20 Tests/Standort	> 20 Tests/Standort	Alternativ Isotopenzusammensetzung bestimmen (s. unten)
Gebirgsdurchlässigkeit	§ 23, § 24 Anl. 1, 2, 4, 6, 7, 11	Feld: Mehrphasen-Packertests (mit Untertage-Schließventil)	< 10 Messungen/km ³	10 bis 100 Messungen/km ³	> 100 Messungen/km ³	
		Bohrloch NMR	< 1 Bohrung/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	NMR in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)
Gesteinsdurchlässigkeit	§ 24 Anl. 1, 4, 6, 11	Feld: Bohrloch NMR	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	NMR in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)
		Labor: Tomographie ggfs. Durchströmungsversuch von Proben wiederbelastet zum Gebirgszustand	repräsentative Verteilung über Teufenprofil	repräsentative Verteilung über Teufenprofil	2D- oder 3D-Modell	Tomographie in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)

Tabelle A 2: (Fortsetzung) Erfahrungswerte zu Messnetzichten auf Basis der in Goldsworthy et al. (2009) betrachteten Endlagerstandorte für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein.

Relevante Messgröße	Bezug zu StandAG	Messmethoden	Wirtsgestein			Anmerkung
			Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein	
absolute Porosität	§ 24 Anl. 1	Feld: Bohrloch NMR	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrung/km ²	NMR in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)
		Labor: Porosimetrie, Tomographie von Proben wiederbelastet zum Gebirgszustand	repräsentative Verteilung über Teufenprofil	1 bis 10 Bohrungen/km ²	2D- oder 3D-Modell	Tomographie in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)
effektive Porosität	§ 24 Anl. 1, 11	Feld: Bohrloch NMR	Nicht erforderlich	1 bis 10 Bohrungen/km ²	>10 Bohrungen/km ²	NMR in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)
		Labor: Tomographie von Proben wiederbelastet zum Gebirgszustand	mehrere Einzelmessungen	1 bis 10 Bohrungen/km ²	2D- oder 3D-Modell	Tomographie in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)
hydraulischer Gradient	§ 24 Anl. 1, 2	Feld: Potenzialmessungen in Multi-Packer-Installationen	Nicht erforderlich	< 10 Messungen/km ³	> 100 Messungen/km ³	
hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert	§ 24 Anl. 1	Feld: Mehrphasen-Packertests (mit Untertage-Schließventil)	< 10 Messungen/km ³	10 bis 100 Messungen/km ³	> 100 Messungen/km ³	
		Bohrloch NMR	< 1 Bohrung/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	NMR in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)

Tabelle A 2: (Fortsetzung) Erfahrungswerte zu Messnetzichten auf Basis der in Goldsworthy et al. (2009) betrachteten Endlagerstandorte für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein.

Relevante Messgröße	Bezug zu StandAG	Messmethoden	Wirtsgestein			Anmerkung
			Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein	
Transmissivität	§ 24 Anl. 1, 2	Feld: Mehrphasen-Packertests (mit Untertage-Schließventil)	< 10 Messungen/km ³	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	
		Bohrloch NMR	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	> 10 Bohrungen/km ²	NMR in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)
effektiver Diffusionskoeffizient	§ 24 Anl. 1	Labor: Diffusionsversuch	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	Erfassung aller relevanten Lithologien	
Verfestigungsgrad (Tongestein)	§ 24 Anl. 1, 2	Bohrloch: Geophysik	Nicht erforderlich	1 bis 10 Bohrungen/km ²	Nicht erforderlich	angenommener Wert des Quantitätsindex ist 2
Tortuosität	§ 24 Anl. 1	Feld: Bohrloch NMR	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	1 bis 10 Bohrungen/km ²	NMR in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)
		Labor: Tomographie	2	2	3	Tomographie in der Standorterkundung nicht dokumentiert eingesetzt (Goldsworthy et al. 2009)

Tabelle A 2: (Fortsetzung) Erfahrungswerte zu Messnetzichten auf Basis der in Goldsworthy et al. (2009) betrachteten Endlagerstandorte für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein.

Relevante Messgröße	Bezug zu StandAG	Messmethoden	Wirtsgestein			Anmerkung
			Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein	
Viskosität Fluid	§ 24 Anl. 1, 4	Labor: Viskosimeter	komplexes Untersuchungsprogramm zu Porenwässern	komplexes Untersuchungsprogramm zu Porenwässern	Erfassung aller relevanten Grund- und Porenwässer	
Dichte Fluid	§ 24 Anl. 1, 4	Labor: Pynknometer, Aräometer oder Biegeschwinger	komplexes Untersuchungsprogramm zu Porenwässern	komplexes Untersuchungsprogramm zu Porenwässern	Erfassung aller relevanten Grund- und Porenwässer	
K_d -Werte der Nuklide	§ 24 Anl. 9	Labor: Röntgenabsorptionsspektroskopie, Säulenversuch/ Batchversuch an versch. Gesteinseinheiten unter Anwendung entspr. Wasserzusammensetzung	Nicht erforderlich	3 bis 5 K_d -Bestimmungen/km ³ pro Radionuklid	3 bis 5 K_d -Bestimmungen/km ³ pro Radionuklid	
Ionenstärke	§ 24 Anl. 9, 1	Labor: Spektrometrie, Titration an Proben mit < 5 % des Spülungstracers	< 5 Proben/km ³	5 bis 25 Proben/km ³	> 25 Proben/km ³	wie Haupt- und Spurenelemente des Fluides

Tabelle A 2: (Fortsetzung) Erfahrungswerte zu Messnetzichten auf Basis der in Goldsworthy et al. (2009) betrachteten Endlagerstandorte für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein.

Relevante Messgröße	Bezug zu StandAG	Messmethoden	Wirtsgestein			Anmerkung
			Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein	
pH-Wert	§ 24 Anl. 10	Feld: Beprobung im getrennten Intervall, Messung im Intervall oder in Durchflusszelle an der Geländeoberfläche	Nicht erforderlich	3 bis 10 Bestimmungen/km ³	> 10 Bestimmungen/km ³	
		Labor: Elektroanalytische Methoden; Proben mit keiner oder niedriger Spülungskontamination	< 5 Proben/km ³	5 bis 25 Proben/km ³	> 25 Proben/km ³	wie Haupt- und Spurenelemente des Fluides
E _n -Wert	§ 24 Anl. 10	Feld: Feststellung der Elektrodenstabilisation; keine oder niedrige Spülungskontamination	Nicht erforderlich	3 bis 10 Bestimmungen/km ³	> 10 Bestimmungen/km ³	
		Labor: Elektroanalytische Methoden	< 5 Proben/km ³	5 bis 25 Proben/km ³	> 25 Proben/km ³	wie Haupt- und Spurenelemente des Fluides
Gehalt Kolloide und Komplexbildner	§ 24 Anl. 10	Labor: UV/vis-Spektrometrie, Laser-induzierte Break-down-Detektion	< 3 Proben/km ³	< 3 Proben/km ³	< 3 Proben/km ³	
Karbonatgehalt	§ 24 Anl. 10	Labor: UV/vis-Spektrometrie, Titration an Proben mit < 5 % des Spülungstracers	< 5 Proben/km ³	5 bis 25 Proben/km ³	> 25 Proben/km ³	

Tabelle A 2: (Fortsetzung) Erfahrungswerte zu Messnetzichten auf Basis der in Goldsworthy et al. (2009) betrachteten Endlagerstandorte für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein.

Relevante Messgröße	Bezug zu StandAG	Messmethoden	Wirtsgestein			Anmerkung
			Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein	
Elektrische Leitfähigkeit/Salinität	§ 24 Anl. 10	Feld: Beprobung im getrennten Intervall, Messung im Intervall oder in Durchflusszelle an der Geländeoberfläche, Bohrloch-Logging	< 10 Bestimmungen/km ³	10 bis 50 Bestimmungen/km ³	> 50 Bestimmungen/km ³	
		Labor: Elektroanalytische Methoden an Proben mit keiner oder sehr niedrige Spülungskontamination	< 5 Proben/km ³	5 bis 25 Proben/km ³	> 25 Proben/km ³	analog zu Haupt- und Spurenelemente des Fluides
Isotopenzusammensetzung	§ 22, § 24 Anl. 10	Labor: Kernspin- oder Infrarot- oder Massenspektrometrie, Gaschromatographie an Proben mit < 5 % bzw. < 1 % für Tritium bzw. Kohlenstoff des Spülungstracers	< 3 Proben/km ³	3 bis 10 Proben/km ³	3 bis 10 Proben/km ³	typische Werte angenommen von verschiedenen Werten gemäß Goldsworthy et al. (2009), je nach analysiertem Stoff
Haupt- und Spurenelemente des Fluides	§ 24 Anl. 10	Labor: Spektrometrie/Spektroskopie, Chromatographie an Proben mit < 5 % des Spülungstracers	< 5 Proben/km ³	5 bis 25 Proben/km ³	> 25 Proben/km ³	

