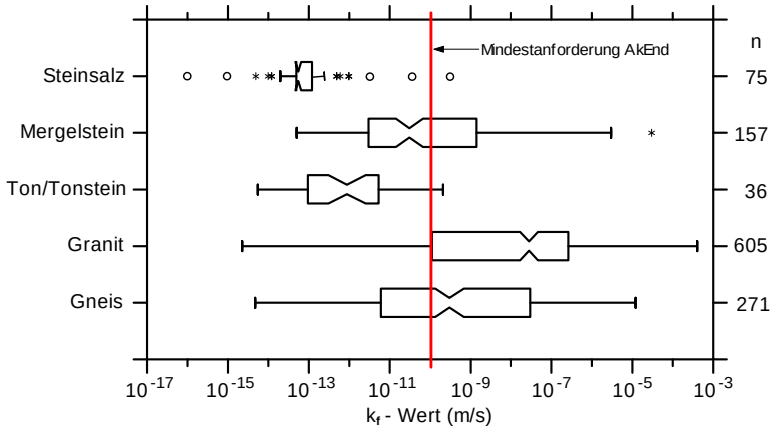
AkEnd Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte

Detlef Appel & Walter Habler

Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung

Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung



und

Datenbank "Gebirgsdurchlässigkeit" (auf CD-ROM)

BfS-Bestellnummern: 8377-9-6 und 8377-9-7

Hannover, 14.12.2002

Dipl.-Geol. Dr. Detlef Appel

PanGeo - Geowissenschaftliches Büro
Ibykusweg 23, 30629 Hannover
Telefon: 0511 - 95 86 710
Telefax: 0511 - 95 86 711
email: appel-pangeo@t-online.de

Dipl.-Geol. Dr. Walter Habler

Dr. W. Habler - Geoservice
Kaiser-Wilhelm-Straße 11, 31061 Alfeld
Telefon: 05181 - 82 92 12
Telefax: 05181 - 82 92 14
e-mail: walter.habler@t-online.de

Detlef Appel & Walter Habler

Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung

Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung

und

Datenbank "Gebirgsdurchlässigkeit" (auf CD)

Inhalt Seite

Zusammenfassung 1

1 Aufgabenstellung und Gliederung des Berichts 8

2 Grundlagen der Grundwasserbewegung und -speicherung 12
2.1 Grundwasserbewegung, Wasserdurchlässigkeit 12
2.2 Durchflusswirksames Hohlraumvolumen, Speichervermögen 16

3 Untersuchungsmethoden und Aussagekraft hydraulischer Daten 19
3.1 Testverfahren 19
3.2 Datenqualität 24
3.3 Räumliche Repräsentanz der hydraulischen Daten 26

4 Faktoren mit Einfluss auf die Ergebnisse hydraulischer Tests 29
4.1 Geowissenschaftliche Faktoren 29
4.2 Verfahrensbezogene Faktoren 35

5 Datenmaterial 37
5.1 Datenherkunft 37
5.2 Testverfahren und Repräsentativität 41
5.3 Zuordnung der hydraulischen Daten zu Gesteinstypen 42

6 Vorgehen bei der Datenauswertung und -bewertung 46
6.1 Statistische Grundlagen
6.1.1 Grundgesamtheit und Stichprobe 46
6.1.2 Statistische Verteilung, statistische Kenngrößen 46
6.1.3 Einschränkungen der Aussagekraft 47
6.2 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 49
6.2.1 Statistische Parameter 50
6.2.2 Auswerteverfahren 51
6.2.3 Tiefenbereiche 52
6.2.4 Bewertungsgrundsätze und -maßstäbe 53

		Seite
6.2.5	Graphische Darstellungsformen von Auswertungsergebnissen	55
6.2.6	Behandlung der Faktoren mit Einfluss auf die Ergebnisse hydraulischer Tests	58
7	Auswertung Gebirgsdurchlässigkeit	60
7.1	Gesteinstypübergreifende Auswertung	60
7.1.1	Häufigkeitsverteilungen und statistische Kennwerte der k_f-Werte	62
7.1.2	Einflussfaktoren	69
7.1.2.1	Einflussfaktor Reichweite	69
7.1.2.2	Einflussfaktor Länge Testintervall	71
7.1.2.3	Einflussfaktor Testtiefe	74
7.1.2.4	Zusammenfassende Beurteilung Einflussfaktoren	78
7.1.3	Unterscheidung der Hauptgesteinstypen anhand der k_f-Werte	81
7.1.3.1	Verfahren zur Unterscheidung der Gesteinstypen	81
7.1.3.2	Ergebnisse der Unterscheidungsverfahren	84
7.1.4	Formale Beurteilung der Hauptgesteinstypen im Hinblick auf die Erfüllung von Anforderungen des AkEnd	96
7.2	Gesteinstypbezogene Auswertung	100
7.2.1	Gneis	100
7.2.2	Granit	114
7.2.3	Tuff/Tuffit	128
7.2.4	Sandstein	134
7.2.5	Ton/Tonstein	139
7.2.6	Mergelstein	152
7.2.7	Sandstein/Tonstein-Wechselfolgen	164
7.2.8	Kalkstein	167
7.2.9	Anhydrit	172
7.2.10	Steinsalz	175
8	Auswertung Spezifischer Speicherkoeffizient	180
9	Kriterienableitung Gebirgsdurchlässigkeit	185
9.1	Rahmenbedingungen und Vorgaben	185

Seite

9.2 Vorgehen 187
9.3 Einflussfaktoren 189
9.4 Kriterium Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs 195
9.5 Hinweise zur Anwendung des Kriteriums 199

10 Zitierte Schriften 201

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1 Merkmale verschiedener Methoden zur Erhebung hydraulischer Informationen 21
Tab. 5-1 Untersuchungsgebiete, Zielsetzung der Untersuchung und untersuchte Hauptgesteinstypen 39
Tab. 5-2 Anzahl und Anteil der zu den Hauptgesteinstypen vorliegenden k_f-Werte sowie Anzahl der zugehörigen Untersuchungsgebiete und erfasste Tiefenbereiche, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche 43
Tab. 5-3 Anzahl und Anteil der zu den Hauptgesteinstypen vorliegenden Werte für den spezifischen Speicherkoeffizienten (S_s) sowie Anzahl der zugehörigen Untersuchungsgebiete und erfasste Tiefenbereiche, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche 44
Tab. 7-1 Statistische Kenndaten der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen für die gesamte Datenbasis sowie für die Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche 61
Tab. 7-2 Kolmogorov-Smirnov-Test: Wahrscheinlichkeiten für die Übereinstimmung der k_f-Wert-Verteilungen der Hauptgesteinstypen mit der vermuteten Normalverteilung 62
Tab. 7-3 Statistische Kennwerte von k_f-Werten in Abhängigkeit vom Skalenbereich des Untersuchungsverfahrens am Beispiel der Untersuchungsgebiete Münchehagen (Ton- bzw. Siltstein) und Grimsel (Granit) 72
Tab. 7-4 Pearson-Korrelationskoeffizienten für k_f-Wert, Transmissivität, Speicherkoeffizienten, spezifischen Speicherkoeffizienten, mittlere Testtiefe und Länge des Testintervalls, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche 75

Seite

Tab. 7-5 t-Test: Paarweise Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Unabhängigkeit der geometrischen Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen (Bonferroni-Anpassung) 85

Tab. 7-6 Varianzanalyse: Paarweise Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Unabhängigkeit der Varianzen der geometrischen Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen (Anpassung nach Scheffé) 86

Tab. 7-7 Diskriminanzanalyse: Zuordnungsmatrix mit der Anzahl derjenigen k_f-Werte eines Hauptgesteinstyps, die auf Grund der Ergebnisse der linearen Diskriminanzanalyse bestimmten Gesteinstypen zugeordnet werden, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m u. G. 87

Tab. 7-8 Mann-Whitney-Wilcoxon-Test: Paarweise Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Unabhängigkeit der geometrischen Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen 88

Tab. 7-9 Kolmogorov-Smirnov-Test: Paarweise berechnete Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Annahme signifikanter Unterschiede zwischen den kumulativen Häufigkeitsverteilungen der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen 89

Tab. 7-10 Ergebnisse verschiedener statistischer Verfahren zur Bestimmung der paarweise Irrtumswahrscheinlichkeit für statistisch signifikante Unterschiede zwischen den k_f-Werten der Hauptgesteinstypen, differenziert nach Datenbasis insgesamt und Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche 95

Tab. 7-11 Gruppierung der Hauptgesteinstypen nach der relativen Gebirgsdurchlässigkeit, differenziert nach Datenbasis insgesamt und Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche 96

Tab. 7-12 Formale Beurteilung der Hauptgesteinstypen anhand der Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit gemäß AKEND (2002a) 98

Tab. 7-13 Formale Beurteilung der Hauptgesteinstypen anhand der für Schiefe und Kurtosis formulierten Positivverhältnisse, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche 99

Tab. 7-14 Gebirgsdurchlässigkeit von Gneis, differenziert nach Tiefenbereichen 104

Tab. 7-15 k_f-Werte für Gneis, differenziert nach Gefügeklassen und Tiefenbereichen 105

Tab. 7-16 k_f-Werte für Gneis in den einzelnen Untersuchungsgebieten 111

Tab. 7-17 k_f-Werte für Granit, differenziert nach Tiefenbereichen 116

Seite

Tab. 7-18 k_f-Werte für Granit, differenziert nach Gefügeklassen und Tiefenbereichen 119
Tab. 7-19 k_f-Werte für Granit im Untersuchungsgebiet Nordschweiz, differenziert nach Gefügeklassen 125
Tab. 7-20 k_f-Werte für Granit in den einzelnen Untersuchungsgebieten 126
Tab. 7-21 k_f-Werte für Tuff/Tuffit in den Untersuchungsgebieten Sellafield (Großbritannien) und Yucca Mountain (USA, Nevada) 129
Tab. 7-22 k_f-Werte für Tuff/Tuffit, differenziert nach Tiefenbereichen 130
Tab. 7-23 k_f-Werte für Tuff/Tuffit aus den Untersuchungsgebieten Sellafield (Großbritannien) und Yucca Mountain (USA) in Abhängigkeit vom Gesteinsgefüge 132
Tab. 7-24 k_f-Werte für Sandstein, differenziert nach Tiefenbereichen 135
Tab. 7-25 k_f-Werte für Ton/Tonstein, differenziert nach Tiefenbereichen 141
Tab. 7-26 k_f-Werte für Ton/Tonstein aus den beiden nach Tiefe und Gebirgsdurchlässigkeit definierten Werte-Clustern 142
Tab. 7-27 k_f-Werte für Ton und Tonstein aus den einzelnen Untersuchungsgebieten 148
Tab. 7-28 k_f-Werte für Ton/Tonstein, differenziert nach dem Grad der Gesteinskonsolidierung (Ton oder Tonstein) 149
Tab. 7-29 k_f-Werte für Mergelstein, differenziert nach Tiefenbereichen 153
Tab. 7-30 Untersuchungsgebiet Konrad: k_f-Werte und felsmechanische Kennwerte für Tonmergelstein des Barrêmium und Mergelstein des Albium 157
Tab. 7-31 Untersuchungsgebiet Wellenberg: Vergleich der k_f-Werte für Mergelstein ohne und mit Einschaltungen von Kalksteinbänken im Testintervall 157
Tab. 7-32 k_f-Werte für Mergelstein ohne und mit Einschaltungen von Kalksteinbänken im Testintervall 159
Tab. 7-33 k_f-Werte für Mergelstein, differenziert nach den Gefügeklassen "gestört" und "keine Angabe" 160
Tab. 7-34 k_f-Werte für Mergelstein in den einzelnen Untersuchungsgebieten 161
Tab. 7-35 k_f-Werte für Wechselfolgengesteine in den Untersuchungsgebieten Burgdorf, Ruhrgebiet und Nordschweiz 165
Tab. 7-36 k_f-Werte für Wechselfolgengesteine in den Untersuchungsgebieten Burgdorf, Ruhrgebiet und Nordschweiz, differenziert nach Tiefenbereichen 165
Tab. 7-37 k_f-Werte für Kalkstein, differenziert nach Untersuchungsgebieten 168
Tab. 7-38 k_f-Werte für Kalkstein, differenziert nach Tiefenbereichen 169

Seite

Tab. 7-39 k_f-Werte für Anhydrit aus den Untersuchungsgebieten Morsleben und WIPP 172
Tab. 7-40 k_f-Werte für Anhydrit, differenziert nach Tiefenbereichen 173
Tab. 7-41 k_f-Werte für Steinsalz in den Untersuchungsgebieten Morsleben und Gorleben (Deutschland) sowie WIPP (USA) 176
Tab. 7-42 k_f-Werte für Steinsalz, Steinsalz mit Anhydritbeimengungen bzw. -einschaltungen und Anhydrit 178
Tab. 8-1 Statistische Kenndaten der Spezifischen Speicherkoeffizienten verschiedener Hauptgesteinstypen, getrennt für die gesamte Datenbasis sowie die Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche 181

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1 Fluid-Logging und Lugeon-Test-Resultate: Vergleich der Transmissivitätswerte (aus AMMANN et al. 1993) 25
Abb. 6-1 Geometrische Mittelwerte der k_f-Werte verschiedener Gesteinstypen in Abhängigkeit von den arithmetischen Mittelwerten 48
Abb. 6-2 Wahrscheinlichkeitsdiagramme und Histogramme zur Veranschaulichung der Häufigkeitsverteilungen von Stichproben mit (annähernder) Normalverteilung bzw. deutlich abweichender Verteilung der Werte 57
Abb. 6-3 Erläuterung der Elemente von Boxplots 58
Abb. 7-1 Wahrscheinlichkeitsdiagramme für verschiedene Stichproben der k_f-Werte von Granit 64
Abb. 7-2 Histogramme der k_f-Werte aller Hauptgesteinstypen (gesamte Datenbasis und Tiefenbereich 300 bis 1.500 m u. G.) 65
Abb. 7-3 Histogramme der k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen (gesamte Datenbasis) 66
Abb. 7-4 Histogramme der k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen (Tiefenbereich 300 bis 1.500 m u. G.) 70
Abb. 7-5 Boxplots zum Vergleich der mit hydraulischen Tests unterschiedlicher Reichweite erhobenen k_f-Werte im Untersuchungsgebiet Münchehagen (Ton-/Siltstein) 72
Abb. 7-6 Boxplots zum Vergleich der mit hydraulischen Tests unterschiedlicher Reichweite erhobenen k_f-Werte im Untersuchungsgebiet Grimsel (Granit) 73
Abb. 7-7 Häufigkeitsverteilung der Längen der Testintervalle 73
Abb. 7-8 k_f-Werte in Abhängigkeit von der Länge des Testintervalls 76

Seite

Abb. 7-9	k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen in Abhängigkeit von der Länge des Testintervalls	77
Abb. 7-10	Histogramm der Häufigkeitsverteilung der mittleren Testtiefen der k_f-Wert-Bestimmungen	78
Abb. 7-11	Abhängigkeit der k_f-Werte von der Testtiefe	79
Abb. 7-12	k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen in Abhängigkeit von der Testtiefe	80
Abb. 7-13	Geometrische Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen und ihre Standardfehler	82
Abb. 7-14	Boxplots zur vergleichenden Darstellung der statistischen Verteilungen der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen (gesamte Datenbasis)	90
Abb. 7-15	Boxplots zur vergleichenden Darstellung der statistischen Verteilungen der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen (Tiefenbereich 300 - 1.500 m u. G.)	91
Abb. 7-16	k_f-Werte für Gneis in Abhängigkeit von der Testtiefe	101
Abb. 7-17	Tiefenverteilung der k_f-Werte für Gneis, differenziert nach Gefügeklassen	102
Abb. 7-18	Tiefenverteilung der k_f-Werte für Gneis bis 2.000 m Tiefe unter Geländeoberfläche	103
Abb. 7-19	Histogramme der k_f-Werte für Gneis für die Gefügeklassen "intakt" und "gestört"	107
Abb. 7-20	Wahrscheinlichkeitsdiagramme für die k_f-Werte der Gefügeklassen von Gneis	108
Abb. 7-21	k_f-Werte der Gefügeklassen von Gneis in Abhängigkeit von der Testtiefe	109
Abb. 7-22	Boxplots der k_f-Werte für Gneis aus den einzelnen Untersuchungsgebieten	112
Abb. 7-23	k_f-Werte für Granit in Abhängigkeit von der Länge des Testintervalls bei den Untersuchungsgebieten Grimsel und Schwarzwald	115
Abb. 7-24	k_f-Werte für Granit in Abhängigkeit von der Testtiefe	116
Abb. 7-25	Abhängigkeit der k_f-Werte für Granit von der Testtiefe in den Untersuchungsgebieten Schwarzwald und Lac du Bonnet	118
Abb. 7-26	Tiefenverteilung der k_f-Werte für Granit	117
Abb. 7-27	Histogramme der k_f-Werte für Granit für die Gefügeklassen "intakt" und "gestört"	120
Abb. 7-28	Wahrscheinlichkeitsdiagramme für die k_f-Werte der Gefügeklassen von Granit	121

Seite

Abb. 7-29	k_f-Werte der Gefügeklassen von Granit in Abhängigkeit von der Testtiefe	122
Abb. 7-30	Boxplots der k_f-Werte für Granit aus den einzelnen Untersuchungsgebieten	127
Abb. 7-31	Wahrscheinlichkeitsdiagramme der k_f-Werte für Tuff/Tuffit aus den Untersuchungsgebieten Sellafield und Yucca Mountain	130
Abb. 7-32	k_f-Werte für Tuff/Tuffit in Abhängigkeit von der Testtiefe bei den Untersuchungsgebieten Sellafield und Yucca Mountain	131
Abb. 7-33	k_f-Werte für Sandstein in Abhängigkeit von der Testtiefe	135
Abb. 7-34	Boxplots der k_f-Werte für Sandstein aus den verschiedenen Tiefenbereichen	136
Abb. 7-35	Boxplots der k_f-Werte für Sandstein aus den einzelnen Untersuchungsgebieten	137
Abb. 7-36	Tiefenverteilung der k_f-Werte für Ton/Tonstein	143
Abb. 7-37	k_f-Werte für Ton/Tonstein in Abhängigkeit von der Tiefe, differenziert nach dem Ausmaß der Konsolidierung (Ton bzw. Tonstein)	144
Abb. 7-38	k_f-Werte für Tonsteinkörper unterschiedlicher stratigraphischer Herkunft in Abhängigkeit von der Tiefe	145
Abb. 7-39	Gegenüberstellung der Histogramme der k_f-Werte für Ton/ Tonstein aus den Untersuchungsgebieten Hoheneggelsen und Münchehagen (Unterkreide)	146
Abb. 7-40	k_f-Werte für Mergelstein in Abhängigkeit von der Testtiefe	153
Abb. 7-41	Tiefenverteilung der k_f-Werte für Mergelstein, differenziert nach dem Auftreten von Kalksteinbänken	156
Abb. 7-42	Histogramme der k_f-Werte für Mergelstein ohne und mit Kalksteinbänken	158
Abb. 7-43	Boxplots der k_f-Werte für Mergelstein, differenziert nach dem Vorhandensein von Kalksteinbänken	159
Abb. 7-44	Tiefenverteilung der k_f-Werte für den Gesteinstyp Wechselfolge in den Untersuchungsgebieten Burgdorf, Nordschweiz und Ruhrgebiet	166
Abb. 7-45	Boxplots der k_f-Werte für Kalkstein aus den einzelnen Untersuchungsgebieten	169
Abb. 7-46	k_f-Werte für Kalkstein in Abhängigkeit von der Tiefe	170
Abb. 7-47	Tiefenverteilung der k_f-Werte für Kalkstein, differenziert nach Untersuchungsgebieten	171
Abb. 7-48	k_f-Werte für Anhydrit in Abhängigkeit von der Tiefe	174
Abb. 7-49	k_f-Werte für Steinsalz in Abhängigkeit von der Tiefe	177

Seite

Abb. 7-50	Boxplot mit den k_f-Werten für weitgehend reines Steinsalz und reinen Anhydrit sowie Steinsalz mit Beimengungen von Anhydrit	178
Abb. 8-1	Boxplots für die Spezifischen Speicherkoeffizienten der Hauptgesteinstypen in der Datenbasis insgesamt sowie aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche	182
Abb. 8-2	Boxplots der Spezifischen Speicherkoeffizienten für Granit, differenziert nach intaktem und gestörtem Gebirge	184
Abb. 9-1	Wahrscheinlichkeitsdiagramme für die Hauptgesteinstypen	194
Abb. 9-2	Wahrscheinlichkeitsdiagramme für die Hauptgesteinstypen	197
Abb. 9-3	Bandbreiten und Medianwerte (mit Grenzen des 95-%-Vertrauensintervalls) der k_f-Werte von Gesteinstypen in der vorgesehenen Endlagertiefe (300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche)	198

Seite

Anhang - Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit

A-1	**Einleitung**	**A-1**
A-2	**Installation und Start des Datenbankprogramms**	**A-3**
A-3	**Aufbau der Datensammlung (Tabellen)**	**A-4**
A-4	**Abfragen**	**A-12**
A-5	**Formulare**	**A-14**
A-6	**Arbeiten mit der Datenbank**	**A-19**
A-6.1	**Formular "Start"**	**A-19**
A-6.2	**In der Datenbank blättern und Berichte abrufen**	**A-20**
A-6.2.1	Formular "Untersuchungsgebiete"	A-20
A-6.2.2	Formular "Versuchsreihen"	A-21
A-6.2.3	Formular "Versuche"	A-22
A-6.2.4	Formulare für die Markierungsversuche Münchehagen und Grimsel	A-22
A-6.2.5	Formular "Quellen"	A-24
A-6.3	**Neue Datensätze eingeben**	**A-25**
A-6.3.1	Formular "Dateneingabe"	A-25
A-6.3.2	Formular "Dateneingabe Untersuchungsgebiete"	A-27
A-6.3.3	Formular "Dateneingabe Versuchsreihen"	A-27
A-6.3.4	Formular "Dateneingabe Quellen"	A-28
A-6.3.5	Formular "Dateneingabe Versuche"	A-30
A-6.4	**Nach Datensätzen suchen und Suchauswahl exportieren**	**A-30**
A-6.4.1	Formular "Datensuche"	A-31
A-6.4.2	Formular "Quellen suchen"	A-33
A-6.5	**Löschen und Bearbeiten von Daten**	**A-33**
A-6.5.1	Formular "Löschen/Bearbeiten"	A-34
A-6.5.2	Formular "Untersuchungsgebiete Löschen/Bearbeiten"	A-35
A-6.5.3	Formular "Versuchsreihen Löschen/Bearbeiten"	A-35
A-6.5.4	Formular "Quellen Löschen/Bearbeiten"	A-35
A-6.5.5	Formular "Versuche Löschen/Bearbeiten"	A-35

Tabellenverzeichnis

Tab. A-1	Generelle Struktur von Access-Tabellen	A-4
Tab. A-2	Access-Tabellen der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit	A-5
Tab. A-3	Inhalt der Tabelle "Untersuchungsgebiete"	A-7
Tab. A-4	Inhalt der Tabelle "Versuchsreihen"	A-7

Seite

Tab. A-5 Inhalt der Tabelle "Versuche" A-8
Tab. A-6 Inhalt der Tabelle "Markierungsversuche Grimsel" A-10
Tab. A-7 Inhalt der Tabelle "Markierungsversuche Münchehagen" A-10
Tab. A-8 Inhalt der Tabelle "Quellen" A-11
Tab. A-9 Inhalt der Tabelle "Versuchsreihen-Quell-ID" A-11
Tab. A-10 Formulare, ihre Aufgaben und Zugriffsrechte auf den Datenbestand A-16
Tab. A-11 Schaltflächen des Formulars "Start" A-19
Tab. A-12 Schaltflächen des Formulars "Versuchsreihen" A-21
Tab. A-13 Schaltflächen des Formulars "Dateneingabe" A-26
Tab. A-14 Eingabefelder des Formulars "Versuchsreihen" A-28

Abbildungsverzeichnis

Abb. A-1 Verknüpfungsschema der Datentabellen A-5
Abb. A-2 Tabellenverknüpfungen über Schlüsselfelder A-6
Abb. A-3 Formularschema A-15
Abb. A-4 Formular "Start" A-19
Abb. A-5 Formular "Untersuchungsgebiete" A-20
Abb. A-6 Formular "Versuchsreihen" 1. Registerkarte A-21
Abb. A-7 Formular "Versuche" 1. Registerkarte A-22
Abb. A-8 Formular "Markierungsversuche Münchehagen" A-23
Abb. A-9 Formular "Markierungsversuche Grimsel" A-24
Abb. A-10 Formular "Quellen" A-24
Abb. A-11 Formular "Dateneingabe" A-26
Abb. A-12 Schema der Dateneingabe A-26
Abb. A-13 Formular "Dateneingabe Untersuchungsgebiete" A-27
Abb. A-14 Formular "Dateneingabe Versuchsreihen" A-29
Abb. A-15 Formular "Dateneingabe Quellen" A-29
Abb. A-16 Formular "Dateneingabe Versuche" A-31
Abb. A-17 Formular "Datensuche" A-32
Abb. A-18 Formular "Quellen suchen" A-33
Abb. A-19 Formular "Löschen/Bearbeiten" A-34
Abb. A-20 Formular "Untersuchungsgebiete Löschen/Bearbeiten" A-36
Abb. A-21 Formular "Versuchsreihen Löschen/Bearbeiten" A-36
Abb. A-22 Formular "Quellen Löschen/Bearbeiten" A-37
Abb. A-23 Formular "Versuche Löschen/Bearbeiten" A-37

Zusammenfassung

Das Projekt "Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung" wurde im Rahmen der Entwicklung eines Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte durch den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) durchgeführt. Ziel war die Prüfung der Voraussetzungen zur Ableitung von Kriterien zur Beurteilung der hydraulischen Parameter Gebirgsdurchlässigkeit (k_f-Wert) und durchflusswirksames Hohlraumvolumen (effektive Porosität) und gegebenenfalls die Entwicklung von Kriterien. In der ersten Projektphase waren die Datenbasis für die Kriterienableitung gelegt worden und die erhobenen Daten auf ihre Eignung für die Ableitung von Kriterien geprüft worden. Danach erwiesen sich die Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit als für die Kriterienentwicklung wahrscheinlich geeignet und ausreichend, während die zum Hohlraumvolumen vorliegenden Daten als qualitativ und quantitativ wahrscheinlich nicht ausreichend eingeschätzt worden waren.

Während der zweiten Projektphase sind die Datenbasis vervollständigt sowie die Datenbewertung und -auswertung fortgesetzt worden. Alle Daten sind in die relationale Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit übernommen worden, die diesem Bericht auf CD beiliegt. Die Datenbank enthält insgesamt 2.885 Werte zur Gebirgsdurchlässigkeit (k_f-Werte) und 451 Werte zum Spezifischen Speicherkoeffizienten. Aufgenommen wurden außerdem die technischen Daten zu Versuchsbedingungen und -durchführung sowie die Quellen.

Die Einschätzung der Eignung der vorliegenden Daten aus Phase 1 für die Kriterienentwicklung hat sich weitgehend bestätigt: Zum durchflusswirksamen Hohlraumvolumen liegen keine Daten aus In-situ-Erhebungen vor. Auf die Entwicklung eines porositätsbezogenen Kriteriums unter Verwendung der ersatzweise erhobenen Daten zu Speicherkoeffizient und Spezifischem Speicherkoeffizient wurde daher verzichtet. Nach übersichtsmäßiger Auswertung sind die zu den verschiedenen Gesteinstypen vorliegenden Daten allerdings plausibel und stehen in Einklang mit den bekannten Informationen.

Die erhobenen k_f-Werte lassen sich insgesamt neun Hauptgesteinstypen zuordnen: Gneis, Granit, Tuff/Tuffit, Sandstein, Ton/Tonstein, Mergelstein, Kalkstein, Anhydrit und Steinsalz. Die zusammenfassenden Bezeichnungen Tuff/Tuffit bzw. Ton/Tonstein werden verwendet, weil den Datenquellen nicht immer eindeutig zu entnehmen ist, um welchen Gesteinstyp genau es sich jeweils handelt.

Der Schwerpunkt der Datenrecherche und -auswertung lag auf denjenigen Gesteinstypen, die derzeit international für die Endlagerung radioaktiver Abfälle verfolgt oder ins Auge gefasst werden. Das sind Gneis, Granit, Tuff/Tuffit, Ton/Tonstein, Mergelstein und Steinsalz. Davon kommt der Gesteinstyp Tuff/Tuffit nach derzeitiger Einschätzung in Deutschland nicht in für die Endlagerung ausreichender Ausdehnung

und Qualität vor. Er wurde - wie Gesteinstypen mit bekanntermaßen in der Regel hoher Gebirgsdurchlässigkeit, wie Sandstein und Kalkstein - in die Auswertung einbezogen, um die Unterschiede zwischen den verschiedenen Gesteinstypen zu akzentuieren. In der Regel wurde bei der Auswertung zwischen der alle k_f-Werte zu den Hauptgesteinstypen umfassenden Datenbasis insgesamt sowie den Daten aus dem Tiefenbereich zwischen 300 und 1.500 m unter Geländeoberfläche unterschieden. In diesem Tiefenbereich wird sich gemäß Festlegung des AkEnd das geplante Endlagerbergwerk aus geomechanischen und thermischen Gründen voraussichtlich befinden. Zur Kriterienentwicklung wurden lediglich die k_f-Werte für Gneis, Granit, Ton/Tonstein, Mergelstein und Steinsalz aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche herangezogen.

Gesteinstypübergreifende Datenauswertung

Bei der gesteinstypübergreifenden Datenauswertung wurde zunächst die grundsätzliche Bedeutung verfahrensbezogener und geowissenschaftlicher Faktoren mit möglichem Einfluss auf die erhobenen k_f-Werte untersucht. Danach ist insbesondere die Messtiefe (mittlere Testtiefe) bedeutsam, während der Einfluss von Test-Reichweite im Gebirge und Länge des Testintervalls von wirksameren Einflussfaktoren überlagert werden.

Zur Unterscheidung der Hauptgesteinstypen anhand der k_f-Wert-Verteilungen wurden verschiedene Verfahren eingesetzt. Damit wurde der Inhomogenität der Datenbasis sowie Unsicherheiten hinsichtlich des Typs der statistischen Verteilung der k_f-Werte Rechnung getragen. Die mit den verschiedenen Verfahren erzielten Ergebnisse sind durchaus ähnlich. Außerdem wurden die geometrischen Mittelwerte und Medianwerte der k_f-Werte insgesamt sowie der Stichproben der einzelnen Hauptgesteinstypen an der Mindestanforderung des AkEnd an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (k_f-Werte $<10^{-10}$ m/s) gemessen. Insgesamt ergibt sich folgendes Bild:

- Bei den Daten der **Datenbasis insgesamt** bilden Sandstein, Ton/Tonstein und Kalkstein eine hinsichtlich der statistischen Verteilung ähnliche Hauptgesteinsgruppe mit relativ hoher Gebirgsdurchlässigkeit. Granit weist eine große Bandbreite der k_f-Werte mit hohem Anteil hoher Werte auf und bildet danach ein eigenes k_f-Wert-Kollektiv. Gneis und Tuff/Tuffit werden auf Grund ausgeprägt zweigipfliger Häufigkeitsverteilung ebenfalls eine Gesteinsgruppe mit teils hoher, teils geringerer Gebirgsdurchlässigkeit. Signifikant niedrigere k_f-Werte als bei allen anderen Hauptgesteinstypen wurden für Steinsalz bestimmt. Mergelstein und Anhydrit bilden statistisch weitgehend eigenständige k_f-Werte-Gruppen mit Gebirgsdurchlässigkeiten zwischen Steinsalz und den zuvor genannten Gesteinstypen.

  Mehr als 70 % der Werte insgesamt erfüllen die Mindestanforderung gemäß AkEnd nicht. Nur bei den Gesteinstypen Mergelstein, Anhydrit und Steinsalz wird sie von mehr als 50 % der jeweiligen k_f-Werte erfüllt.

- Bei den Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche besteht die Gesteinsgruppe mit den höchsten k_f-Werten aus Granit, Sandstein und Kalkstein. Die statistische Eigenständigkeit von Gneis sowie Tuff/Tuffit ist nicht so deutlich wie bei der Datenbasis insgesamt. Auf Grund deutlicher Tiefenabhängigkeit der k_f-Werte bei Ton/Tonstein weist dieser Gesteinstyp gewisse Übereinstimmungen mit Anhydrit auf. Mergelstein und Anhydrit bilden statistisch eigene Datenkollektive.

  Die Mindestanforderung des AkEnd wird bei Ton/Tonstein, Mergelstein, Anhydrit und Steinsalz von mehr als 50 % der k_f-Werte erfüllt.

Gesteinstypbezogene Datenauswertung

Beim Hauptgesteinstyp **Gneis** besteht eine deutliche Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit von der Tiefe der Messung unter Geländeoberfläche. Die k_f-Werte nehmen zur Tiefe ab. Dieser Trend wird jedoch vom Vorhandensein wassergängiger Trennfugen (gestörtes Gefüge) bis in große Tiefe überlagert.

Bei **Granit** ist die Tiefendifferenzierung der k_f-Werte weniger auffällig. Sie wird weitgehend kaschiert durch das verbreitete Auftreten wassergängiger Trennfugen. Es führt bei den weitaus meisten Untersuchungsgebieten und über alle Tiefenbereiche zu auffällig hohen k_f-Werten.

Bei **Tuff/Tuffit** bestehen zwischen den Verteilungen und statistischen Kennwerten der k_f-Werte (nur zwei Untersuchungsgebiete) erhebliche Unterschiede. Sie haben ihre Ursache in sehr unterschiedlichen Entstehungsbedingungen der untersuchten Gesteinskörper. Danach ist die Zusammenfassung unter einheitlicher Gesteinstypbezeichnung fragwürdig. Der weitaus größte Anteil der k_f-Werte aus dem Untersuchungsgebiet Sellafield (81 %) erfüllt die Mindestanforderung des AkEnd. Von den Daten des Gebietes Yucca Mountain trifft das nur für 3 % zu. Andere Einflüsse auf die k_f-Werte werden durch die auffälligen gebietsbezogenen Unterschiede überlagert.

Sandstein ist durch hohe k_f-Werte von im Mittel gut 10^{-07} m/s gekennzeichnet und gehört damit zu den stark durchlässigen Hauptgesteinstypen. Nur wenige k_f-Werte erfüllen die Mindestanforderung gemäß AkEnd. Die Durchlässigkeit wird hauptsächlich durch Trennfugen, insbesondere Klüfte und Störungen, bestimmt. Die Gebirgsdurchlässigkeit nimmt zwar mit der Tiefe deutlich ab, doch werden in allen Tiefenbereichen immer auch relativ hohe k_f-Werte angetroffen.

Der Hauptgesteinstyp **Ton/Tonstein** unterscheidet sich von den anderen Gesteinstypen in einigen Besonderheiten mit erheblichem Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit: Einschaltungen von Gesteinslagen oder -bänken mit petrofaziell von der Normalfazies abweichender Zusammensetzung und - daraus resultierend - anderen hydraulischen Eigenschaften können um Größenordnungen höhere k_f-Werte liefern als die "Normalfazies" (Beispiel karbonatreiche "Blättertonlagen"). Die Gebirgsdurchlässigkeit kann durch regional wirksame geologische Prozesse erhöht werden

(Beispiel schwache Thermometamorphose mit nachfolgender Ausbildung eines ausgeprägten Kluftsystems und besonders wassergängiger Störungszonen). Von besonderer Bedeutung für die Gebirgsdurchlässigkeit ist bei Ton/Tonstein die Testtiefe. Es lassen sich zwei Tiefenbereiche unterscheiden: Bis in Tiefen von knapp 200 m unter Geländeoberfläche werden im Mittel k_f-Werte um 10^{-06} m/s angetroffen (Bandbreite gut 10^{-14} bis etwa 10^{-04} m/s). Darunter wurden bisher ohne Ausnahme sehr niedrige k_f-Werte festgestellt (höchstens 10^{-09} m/s, im Mittel etwa 10^{-12} m/s) festgestellt. Der weitaus größte Teil der k_f-Werte aus diesem Bereich erfüllt die Mindestanforderung des AkEnd.

Die Gebirgsdurchlässigkeit von **Mergelstein** wird generell von der Testtiefe unter Geländeoberfläche bestimmt. Sie nimmt bis auf eine Tiefe von rund 800 m unter Geländeoberfläche deutlich ab. Die k_f- Werte aus dem Tiefenbereich bis 300 m unter Geländeoberfläche liegen im Mittel mit gut 10^{-08} m/s um etwa drei Größenordnungen über denjenigen aus dem Bereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche. Der Anteil der k_f-Werte, die die Mindestanforderung des AkEnd erfüllen, nimmt entsprechend zu. In allen Tiefenabschnitten treten allerdings immer auch hohe k_f-Werte auf. Modifizierend können bei Mergelstein folgende Einflussfaktoren wirksam werden: Die Gesteinszusammensetzung, insbesondere der Karbonatgehalt und die Verteilung des Karbonats im Gestein, ist für die Gebirgsdurchlässigkeit von großer Bedeutung. Erhöhte Kalkgehalte führen zur Entwicklung wassergängiger Trennfugen mit Durchlässigkeitserhöhung in den kalkreicheren Partien, es sei denn das Karbonat ist dispers verteilt. In Gebirgsbereichen mit Kalksteinlagen oder -linsen ist die mittlere Gebirgsdurchlässigkeit mit k_f-Werten um 10^{-09} m/s um ca. zwei Größenordnungen höher als ohne solche Einschaltungen.

Die Gebirgsdurchlässigkeit von **Kalkstein** gehört mit k_f-Werten von etwa 10^{-07} m/s für Medianwert und geometrischen Mittelwert (wie Sandstein) zu den höchsten der betrachten Hauptgesteinstypen. Dies äußert sich auch in besonders geringen Anteilen von k_f-Werten unterhalb der Mindestanforderung des AkEnd. Mit zunehmender Tiefe nimmt zwar der Anteil niedriger k_f-Werte zu, über den gesamten durch Daten belegten Tiefenbereich treten immer aber auch hohe k_f-Werte auf.

Bei **Wechselfolgen** aus feinkörnigen und grobkörnigen Sedimentgesteinen (Tonstein, Mergelstein, Sandstein) wird die Gebirgsdurchlässigkeit offenbar weitgehend durch die gröbere Komponente mit der höheren Wasserdurchlässigkeit bestimmt. Weitere Einflussfaktoren (Testtiefe, Bindemittel) zeichnen sich ab, sind aber auf Basis der vorliegenden Daten nicht zuverlässig beurteilbar.

Für den Hauptgesteinstyp **Anhydrit** liegen k_f-Werte aus nur zwei Unterschungsgebieten und weit überwiegend aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche vor. Rund drei Viertel der Werte erfüllen die Mindestanforderung an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gemäß AkEnd ($<10^{-10}$ m/s). Damit gehört Anhydrit zu den Hauptgesteinstypen mit den im Mittel niedrigsten k_f-Werten (gut 10^{-12}

m/s). Der allerdings auffällig hohe Maximalwert deutet darauf hin, dass bei mechanischer Beanspruchung wassergängige Trennfugen entstehen können.

Die k_f-Werte für **Steinsalz** stammen fast ausschließlich aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche und weit überwiegend aus nur zwei Untersuchungsgebieten. Verglichen mit den anderen Gesteinstypen weist Steinsalz die im Mittel geringste Gebirgsdurchlässigkeit auf: Medianwert und geometrischer Mittelwert der k_f-Werte liegen mit ca. 10^{-14} m/s etwa eine Größenordnung unter denen von Ton/Tonstein und um mehrerer Größenordnungen unter denen anderer Gesteinstypen. Die Bandbreite der Werte ist vergleichsweise gering.

Kriterium Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinskörpern

Die **Entwicklung des Kriteriums** "Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinskörpern" beschränkt sich auf die Gesteinstypen Gneis, Granit, Ton/Tonstein, Mergelstein und Steinsalz. Dabei wurden die vom AkEnd getroffenen Festlegungen für Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zugrundegelegt: Gemäß Mindestanforderung muss der einschlusswirksame Gebirgsbereich eine Gebirgsdurchlässigkeit von weniger als 10^{-10} m/s aufweisen. Nach der für die Abwägung getroffenen Festlegung wird die Gebirgsdurchlässigkeit eines Gesteinstyps bei k_f-Werten $<10^{-12}$ m/s als "günstig" und bei Werten zwischen 10^{-10} und 10^{-12} m/s als "bedingt günstig" angesehen.

Die Ableitung eines Kriteriums ist nur sinnvoll, wenn sich die betrachteten Gesteinstypen in dem zu vergleichenden Merkmal signifikant unterscheiden. Das ist dann der Fall, wenn sich die 95-%-Vertrauensintervalle des Erwartungswertes signifikant nicht überlappen. Erwartungswert ist der Medianwert der für die einzelnen Gesteinstypen maßgebliche Stichproben. Die maßgebliche Stichprobe umfasst jeweils diejenigen k_f-Werte der genannten Gesteinstypen, die aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche, also dem vom AkEnd für die Endlagerung vorgesehenen Tiefenbereich, stammen. Maßgeblich ist die Position der Mitte des Testintervalls. Zusätzlich muss die Oberkante de Intervalls tiefer als 300 m unter Geländeoberfläche liegen, um unerwünschte Einflüsse der Tiefe auf die k_f-Werte zu reduzieren.

Der Vergleich der Wertebandbreiten, der Medianwerte sowie der zugehörigen Vertrauensintervalle hat folgendes Ergebnis:

- Die Medianwerte der betrachteten Gesteinstypen unterscheiden um mehrere Größenordnungen. Ausgenommen sind Ton/Tonstein und Mergelstein, bei denen der Unterschied etwa eine Größenordnung beträgt. Die 95-%-Vertrauensintervalle der Medianwerte überschneiden sich nicht. Die Unterschiede sind signifikant.
- Bei Gneis und insbesondere bei Granit liegen die Medianwerte und die zugehörigen 95-%-Vertrauensintervalle der k_f-Werte oberhalb des vom AkEnd festgelegten

zulässigen Bereichs der k_f-Werte ($<10^{-10}$ m/s). Die Wertebandbreiten sind bei beiden Gesteinstypen sehr groß.

- Die Bandbreiten der k_f-Werte von Ton/Tonstein und Steinsalz sind deutlich schmaler als bei den anderen Gesteinstypen. Medianwert (und geometrischer Mittelwert) der Steinsalz-Daten liegen noch deutlich unter denen von Ton/Tonstein. Die weitaus meisten Messwerte für diese Gesteinstypen erfüllen die Mindestanforderung des AkEnd.
- Bei Mergelstein liegt der Medianwert der kf-Werte noch unterhalb der Mindestanforderung des AKEnd. Die Bandbreite der Werte reicht aber weit in den Bereich höherer Werte hinein. Die verursachenden k_f-Werte stammen überwiegend, aber nicht ausschließlich aus Gesteinskörpern mit Kalksteineinschaltungen oder Bereichen mit relativ hohem Karbonatgehalt. Unter dem Gesichtspunkt Gebirgsdurchlässigkeit ist daher bei Mergelstein mit dem Auftreten ungeeigneter Gesteinsabschnitte zu rechnen.

Die Unterschiede zwischen den Erwartungswerten (Medianwert) der einzelnen Gesteinstypen sind signifikant. Auf Grund dieser Ergebnisse erhält das Kriterium "Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit" folgende **Formulierung**:

- Günstig sind die Voraussetzungen, einen Gesteinskörper mit der geforderten geringen Gebirgsdurchlässigkeit aufzufinden, bei den Gesteinstypen Steinsalz und Ton/Tonstein.
- Bedingt günstig sind die Voraussetzungen, einen Gesteinskörper mit der geforderten geringen Gebirgsdurchlässigkeit aufzufinden, beim Gesteinstyp Mergelstein.
- Weniger günstig sind die Voraussetzungen, einen Gesteinskörper mit der geforderten geringen Gebirgsdurchlässigkeit aufzufinden, bei den Gesteinstypen Granit und Gneis.

Die gemessenen k_f-Werte stehen in Einklang mit Beobachtungen und Erfahrungen zur Barrierewirksamkeit der Gesteine. Bei Ton/Tonstein und Mergelstein bestehen noch gewissen Informations- bzw. Kenntnislücken im Hinblick auf den Einfluss einiger geowissenschaftlicher Faktoren und Prozessen auf die Gebirgsdurchlässigkeit.

Diese Bewertung schließt nicht aus, dass auch bei den hier als bedingt günstig bzw. weniger günstig eingestuften Gesteinstypen Mergelstein (insbesondere mit Kalksteinbänken), Gneis und insbesondere Granit Gesteinskörper existieren und auch aufgefunden werden können, die die geforderte geringe Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist aber erheblich geringer. Bei den günstiger abschneidenden Gesteinstypen ist andererseits zu berücksichtigen, dass gerade bei Gesteinstypen, für die auf Grund der vorliegenden Auswertung oder auf Grund von Erfahrung grundsätzlich mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit gerechnet wird, ein ausschließlich statistischer Ansatz für die Datenauswertung und -bewertung - wie hier verfolgt - nicht ausreicht. Wegen der auch in Zukunft vergleichsweise relativ kleinen

Zahlen von In-situ-Werten gerade bei günstigen Gesteinstypen und der möglichen Bedeutung spezifischer Einflussfaktoren auf die Gebirgsdurchlässigkeit muss die Aussagekraft von Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit auf jeden Fall durch zusätzliche geowissenschaftliche Betrachtungen abgesichert werden.

In jedem Fall müssen die Regeln für den Umgang mit unerwarteten Durchlässigkeitsbefunden vor den Untersuchungen zu dem Bewertungs- und Entscheidungsschritt, für den die Durchlässigkeitsdaten benötigt werden, festgelegt werden.

1 Aufgabenstellung und Gliederung des Berichtes

Der 1999 vom Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) berufene Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) hat ein Verfahren zur Identifizierung von Standorten mit für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle günstiger geologischer Gesamtsituation entwickelt.[1)] Eine herausragende beurteilungsrelevante Eigenschaft einer günstigen geologischen Gesamtsituation ist die Grundwasserbewegung in den Gesteinskörpern der geologischen Barrieren um ein mögliches Endlager; denn Grundwasser ist das wichtigste Transportmedium für Radionuklide aus einem Endlager in die Biosphäre. Ausmaß und Geschwindigkeit der Grundwasserbewegung und damit des advektiven Transports von aus den Abfällen freigesetzten Radionukliden werden maßgeblich durch die miteinander verbundenen Gesteinseigenschaften Gebirgsdurchlässigkeit (Wasserdurchlässigkeit im natürlichen Gesteinsverband, ausgedrückt durch den k_f-Wert bzw. Durchlässigkeitsbeiwert) und durchflusswirksames Hohlraumvolumen (effektive Porosität) beeinflusst.

Eine Kernanforderung an Endlagerstandorte lautet daher (AKEND 2002a): "Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau." Um dies zu gewährleisten sollte der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit bestehen. Als einschlusswirksamer Gebirgsbereich wird derjenige Teil der geologischen Barrieren bezeichnet, der bei normaler Entwicklung des Endlagers den Einschluss der Abfälle für den geforderten Isolationszeitraum von größenordnungsmäßig einer Million Jahre sicherstellen muss.

Auf Grundlage modellhafter Sicherheitsbetrachtungen hat der AkEnd die Mindestanforderung formuliert, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen bestehen muss, denen erfahrungsgemäß eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann. Außerdem hat er ein Abwägungskriterium zur Gebirgsdurchlässigkeit entwickelt. Danach wird der Gesteinstyp des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als "günstig" beurteilt, wenn seine charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit (k_f-Wert) kleiner als 10^{-12} m/s ist, und als "bedingt günstig", wenn die Gebirgsdurchlässigkeit zwischen 10^{-10} und 10^{-12} m/s liegt. Auf die Ableitung eines Kriteriums zur Beurteilung des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens hat der AkEnd verzichtet, weil die zu seiner Anwendung erforderlichen Informationen erst in sehr späten Phasen eines Auswahlverfahrens vorliegen werden.

Wegen ihrer Bedeutung für die Endlagersicherheit müssen Gebirgsdurchlässigkeit und durchflusswirksames Hohlraumvolumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs möglichst frühzeitig bei der Standortauswahl Berücksichtigung finden. Die Gebirgsdurchlässigkeit kann allerdings nur durch aufwendige In-situ-Untersuchungen zuverlässig erhoben werden. Verlässliche Verfahren zur routinemäßigen In-situ-Er-

[1)] Der Abschlussbericht (AKEND 2002b) ist dem Bundesumweltminister am 17.12.2003 übergeben worden.

hebung des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens stehen nicht einmal zur Verfügung. Informationen zu Gebirgsdurchlässigkeit und durchflusswirksamem Hohlraumvolumen sind daher für die Standortauswahl nicht a priori flächendeckend verfügbar und können während eines Auswahlverfahrens auch nicht für alle zu betrachtenden Regionen oder Standorte mit ausreichender Belegdichte erhoben werden.

Erfahrungsgemäß liegen aber Gebirgsdurchlässigkeit und durchflusswirksames Hohlraumvolumen bei bestimmten Gesteinstypen innerhalb gewisser Bandbreiten. Es erscheint daher möglich, den Gesteinstyp als Indikator für eine bestimmte Bandbreite der Gebirgsdurchlässigkeit bzw. des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens von Gesteinskörpern zu verwenden und aus dem Zusammenhang zwischen Gesteinstyp und Gebirgsdurchlässigkeit bzw. Hohlraumvolumen Kriterien zur Beurteilung der potenziellen Grundwasserbewegung in der geologischen Barriere abzuleiten.

Die Kriterienentwicklung setzt allerdings voraus, dass

- Daten in hinreichender Qualität und Quantität vorhanden sind, um die Beziehung zwischen Gesteinstyp und Gebirgsdurchlässigkeit bzw. durchflusswirksamem Hohlraumvolumen zuverlässig quantifizieren zu können,
- sich Gebirgsdurchlässigkeit bzw. durchflusswirksames Hohlraumvolumen verschiedener Gesteinstypen tatsächlich deutlich unterscheiden.

In Phase 1 des Projektes "Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung" (APPEL & HABLER 2001) sind bereits wesentliche Teile der erforderlichen Datenbasis geschaffen worden. Bei der Datenerhebung standen Gesteinstypen im Vordergrund, die heute international für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen in Erwägung gezogen bzw. untersucht werden. Außerdem sind die genannten Voraussetzungen geprüft und die Grundlagen für die Kriterienentwicklung geschaffen worden. Im einzelnen wurden dazu

- die Grundlagen der Grundwasserbewegung dargestellt und die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Gebirgsdurchlässigkeit, durchflusswirksamem Hohlraumvolumen und Strömungsgeschwindigkeit sowie die wesentlichen Bezüge dieser Größen zu anderen Gesteinseigenschaften herausgearbeitet,
- die wichtigsten In-situ-Verfahren zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit und des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens, ihre wissenschaftlich-technischen Grundlagen und Anwendungsgebiete beschrieben,
- die Aussagekraft und die räumliche Repräsentativität der nach verschiedenen Verfahren ermittelten In-situ-Daten sowie der mit ihrer Anwendung verbundene Aufwand und die vorliegenden praktischen Erfahrungen vergleichend beurteilt.

Auf dieser Basis waren die verfügbaren In-situ-Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit bei einigen Einschränkungen als hinsichtlich Aussagekraft und Umfang wahrscheinlich

hinreichend für die Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinstypen erkannt worden. Die Auswertung der Daten hat zudem klare Hinweise geliefert, dass einige der betrachteten Gesteinstypen durch charakteristische Bandbreiten der Gebirgsdurchlässigkeit gekennzeichnet sind.

Die zum durchflusswirksamen Hohlraumvolumen vorliegenden Daten erwiesen sich dagegen als erheblich weniger aussagekräftig. Als Größe zur Beurteilung des Hohlraumvolumens kommt danach allenfalls der im Zuge hydraulischer Tests häufiger ermittelte Spezifische Speicherkoeffizient in Frage.

Mit dem vorliegenden Bericht zu Phase 2 des Projekts wird die Datenbasis vervollständigt. Dazu wurden die erfassten k_f-Werte und Spezifischen Speicherkoeffizienten mit Hilfe des Datenbankprogramms Access der Fa. Microsoft in der **Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit** zusammengestellt. Die Datenbank enthält zusätzlich Informationen über die zugrundeliegenden In-situ-Untersuchungen und zu den erfassten Gesteinskörpern, außerdem die Quellenangaben. Die Datenbank und die zugehörige Benutzeranleitung finden sich auf der beigefügten CD-ROM, die Benutzeranleitung ist außerdem im Anhang dokumentiert.

Da der Bericht einen Gesamteindruck vom Vorgehen vermitteln soll, werden nicht nur die Datenauswertung und ihre Ergebnisse dargestellt, sondern in knapper Form auch die bereits in APPEL & HABLER (2001) behandelten technischen und geowissenschaftlichen Grundlagen der Kriterienableitung. Dazu gehören insbesondere die Kurzdarstellung von Grundlagen der Grundwasserbewegung (Kapitel 2) sowie die Beurteilung wichtiger Verfahren für hydraulische In-situ-Untersuchungen im Hinblick auf die Aussagekraft der mit ihnen erhobenen Daten (Kapitel 3). Eine tabellarische Darstellung wichtiger Merkmale von In-situ-Verfahren findet sich in Tab. 3-1.

Kernstücke des vorliegenden Berichtes sind jedoch die

- Gesteinstypübergreifende Auswertung der Daten zur Erfassung und Darstellung der zwischen den Gesteinstypen bestehenden Unterschiede bei den hydraulischen Parametern Gebirgsdurchlässigkeit (kf-Werte) und durchflusswirksames Hohlraumvolumen (Spezifischer Speicherkoeffizient), soweit die Datenbasis dies erlaubt (Kapitel 7.1 u. 8),
- Charakterisierung und Unterscheidung der betrachteten Gesteinstypen hinsichtlich Gebirgsdurchlässigkeit und durchflusswirksamem Hohlraumvolumen unter Berücksichtigung möglicher technischer und natürlicher Faktoren mit Einfluss auf deren Variationsbreite (Kapitel 4, 7.2 u. 8),
- die Ableitung von Kriterien "Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinskörpern" bzw. "Gesteinstyp als Indikator für das durchflusswirksame Hohlraumvolumen", soweit die Datenbasis und die Auswertungsergebnisse dies erlauben (Kapitel 9).

Die Quellen für die ausgewerteten hydraulischen Daten werden in den nachfolgenden Kapiteln nicht zitiert. Sie sind der Datenbank zu entnehmen. Zitiert werden dagegen solche Schriften, denen für die Interpretation der Auswertungsergebnisse wichtige Informationen entnommen worden sind (Kapitel 10).

2 Grundlagen der Grundwasserbewegung und -speicherung

2.1 Grundwasserbewegung, Wasserdurchlässigkeit

Generell kann bei der Bewegung realer Fluide zwischen laminarem und turbulentem Fließen unterschieden werden. Die Geschwindigkeit laminarer Strömungen ist relativ gering. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten kommt es zum turbulenten Fließen mit Wirbelbildung. Die Grenze zwischen beiden Strömungsarten wird durch die Reynoldszahl (Re) ausgedrückt. Sie ist ein Stabilitätskriterium für laminare Strömungen.

Bei Grundwasser wird die Bewegungsart von Art und Eigenschaften des Grundwasserleiters beeinflusst: In porösen Gesteinen fließt das Grundwasser laminar. Bei den hier betrachteten Gesteinen handelt es sich allerdings weit überwiegend um klüftige Festgesteine. In solchen Gesteinen kann das Grundwasser je nach Öffnungsweite und Gestalt der Klüfte laminar oder turbulent fließen. Da die Eigenschaften der Fließwege des Grundwassers im Gebirge selten gänzlich bekannt sind, ist eine Abschätzung der Anteile beider Strömungsarten an der Grundwasserströmung schwierig. Insgesamt wird aber der Beitrag von turbulenter Strömung zur Strömungsgeschwindigkeit als gering angesehen. Deswegen werden Kluft-Grundwasserleiter vereinfachend meist mit dem Kontinuumsmodell und die Grundwasserbewegung als laminar beschrieben. Dabei wird das klüftige Gestein als ein äquivalentes poröses Medium betrachtet.

Darcy-Gleichung

Wird der Kontinuumsansatz zu Grunde gelegt, kann das Bewegungsverhalten des Grundwassers mit der Darcy-Gleichung beschrieben werden. Sie ist Grundlage für die Ableitung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen:

$$q = \frac{Q}{F} = k_f \frac{\Delta h}{l} = k_f J$$

q Ergiebigkeit pro Flächeneinheit (m/s)
Q durchfließende Wassermenge (m^3/s)
F Durchflussfläche (m^2)
k_f Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
Δh Druckhöhenunterschied (m)
l Fließlänge (m)
J Druckhöhengradient

Die Ergiebigkeit pro Flächeneinheit (q) der Darcy-Gleichung ist auch als Filtergeschwindigkeit v_f interpretierbar: $v_f = k_f * J$ (m/s).

Wird die Darcy-Gleichung verallgemeinert und in eine differentielle Form gebracht, ergibt sich dasselbe Ergebnis wie bei der Herleitung über die partiellen Differential-

gleichungen der allgemeinen Strömungsgleichungen mit verschiedenen Vereinfachungen, wie etwa der Vernachlässigung der Trägheit.

Der Proportionalitätsfaktor k_f (Durchlässigkeitsbeiwert, Durchlässigkeitskoeffizient oder **k_f-Wert**) ist ein für das Vermögen des Gesteins, Grundwasser zu leiten (Wasserdurchlässigkeit oder Durchlässigkeit, hydraulische Leitfähigkeit). Er ist abhängig von den Eigenschaften des Gesteins und des Grundwassers.

In der Praxis wird zwischen der mit Laborversuchen erhobenen Wasserdurchlässigkeit des Gesteins (Gesteinsdurchlässigkeit) und der Durchlässigkeit des Gebirges im natürlichen Gesteinsverband (Gebirgsdurchlässigkeit) unterschieden. In die Gesteinsdurchlässigkeit gehen vor allem die Poren der Gesteinsmatrix ein (Porendurchlässigkeit/Matrixdurchlässigkeit). Die Gebirgsdurchlässigkeit umfasst zusätzlich auch die an Trennfugen, insbesondere Klüfte, gebundene Wasserdurchlässigkeit (Trennfugen- bzw. Kluftdurchlässigkeit). Die k_f-Werte für die Gebirgsdurchlässigkeit eines Gesteinskörpers liegen daher in der Regel um einige Größenordnungen über den Werten für die Gesteinsdurchlässigkeit. Im Zusammenhang mit der Auswahl von Endlagerstandorten ist die Gebirgsdurchlässigkeit die für die Beurteilung der Grundwasserbewegung maßgebliche Eigenschaft der betrachteten Gesteinskörper. Sie kann nur durch In-situ-Messungen bestimmt werden.[1)]

Das Vermögen eines Gesteins, Grundwasser zu leiten, kann auch mit Hilfe der Permeabilität (K) ausgedrückt werden. Die Permeabilität ist ein gesteinsspezifischer, von den Eigenschaften des durchströmenden Fluids aber unabhängiger Parameter. Verschiedentlich wird der Begriff Permeabilität synonym mit den Begriffen Durchlässigkeit, Leitfähigkeit u. ä. verwendet.

Das Darcy-Gesetz unterliegt bestimmten Gültigkeitsbedingungen: Bei hoher Durchlässigkeit gilt der lineare Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit und Druckgefälle nicht mehr streng. Der Übergang in turbulentes Strömen kann die Abweichung von der Linearität noch verstärken. Bei Poren-Grundwasserleitern kann das im Bereich grober Kiese der Fall sein, bei Festgesteinen in Karstgerinnen und Klüften mit großen Öffnungsweiten. Bei sehr kleinen Strömungsquerschnitten bzw. sehr geringer Durchlässigkeit kann die untere Grenze der Gültigkeit des DARCY-Gesetzes unterschritten werden, beispielsweise bei engen Poren toniger Sedimente oder bei sehr geringen Öffnungsweiten der Trennfugen.

Für die Unterscheidung verschiedener Gesteinstypen anhand ihrer Gebirgsdurchlässigkeit und für die Ableitung eines entsprechenden Kriteriums wären diese Einschränkungen dann von Bedeutung, wenn die auf Basis des Darcy-Gesetzes identifizierten Unterschiede bei korrekter Durchlässigkeitsbetrachtung keinen Bestand hät-

[2)] Sofern nicht ausdrücklich anders angegeben, beziehen sich der Begriff k_f-Wert und die entsprechenden Werte im folgenden immer auf die Gebirgsdurchlässigkeit.

ten. Das ist aber schon deswegen nicht der Fall, weil Gesteinstypen mit besonders hoher Durchlässigkeit von vornherein nicht betrachtet werden und Gesteinstypen mit besonders geringer Durchlässigkeit unabhängig von der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes günstiger zu beurteilen sind als solche mit erhöhter Durchlässigkeit. Bei der abschließenden Beurteilung der hydraulischen Verhältnisse möglicher Endlagerstandorte muss allerdings die Frage nach der "tatsächlichen" Durchlässigkeit unter Berücksichtigung des Gültigkeitsbereiches des Darcy-Gesetzes beantwortet werden.

Transmissivität

Die Transmissivität (T) ist das Produkt aus k_f-Wert und Mächtigkeit des Grundwasserkörpers. Sie kennzeichnet die integrale Durchlässigkeit über die Mächtigkeit des durchflossenen Gesteinskörpers. Sie ist die bei In-situ-Versuchen vielfach zuerst bestimmte hydraulische Größe, aus der dann der k_f-Wert berechnet wird.

Abstandsgeschwindigkeit

Aus der Filtergeschwindigkeit kann unter Berücksichtigung der effektiven Porosität (P*, Kapitel 2.2) die Abstandsgeschwindigkeit v_a des Grundwassers berechnet werden:

$$v_a = \frac{k_f \, J}{P^*}$$

k_f Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
J Druckhöhengradient
P* durchflusswirksames Porenvolumen, effektive Porosität (%)

Die Abstandsgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit der Grundwasserteilchen auf ihrem Weg von einem Punkt A nach einem Punkt B. Sie ist die für die Beurteilung der Grundwasserbewegung im Umfeld eines geplanten Endlagers eigentlich gesuchte Gebirgseigenschaft und ergibt sich aus der Entfernung zwischen A und B und der Zeitspanne, in der das Grundwasser diese Strecke durchströmt. Da sich nicht alle Grundwasserteilchen gleich schnell bewegen und nicht alle Teilchen denselben Fließweg haben, handelt es sich bei der rechnerisch ermittelten Abstandsgeschwindigkeit um einen Mittelwert.

Durchlässigkeit und Fließgeschwindigkeit in Klüften

Bei den hier betrachteten Gesteinen handelt es sich weit überwiegend um Festgesteine mit Klüften und anderen Trennfugen unbekannter Öffnungsweite. Daher ist es angebracht, die Grundwasserströmung in solchen Gesteinen auch auf Basis anderer Modellvorstellungen zu beurteilen als nur mit Hilfe des Darcy-Ansatzes für Poren-Grundwasserleiter:

Stark vereinfacht lässt sich eine **einzelne Kluft** als ein durch zwei parallele Flächen begrenzter spaltförmiger Hohlraum definieren. Für die laminare und parallele Strö-

mung in einem idealen dünnen Spalt mit parallelen und unendlich ausgedehnten Kluftwandungen gilt nach LOUIS (1967):

$$v_s = q_s = \frac{g}{12\nu}(2a_i)^2 J_s$$

v_s Fließgeschwindigkeit parallel zum Spalt (m/s)
q_s Ergiebigkeit parallel zum Spalt (m^3/s)
g Erdbeschleunigung (m/s^2)
ν kinematische Zähigkeit (m^2/s)
$2a_i$ Spaltöffnungsweite (m)
J_s Druckhöhengradient parallel zum Spalt

Für den k_f-Wert einer Einzelkluft gilt demnach:

$$k_f = \frac{g}{12\nu}(2a_i)^2$$

g Erdbeschleunigung (m/s^2)
ν kinematische Zähigkeit (m^2/s)
$2a_i$ Spaltöffnungsweite (m)

Für den k_f-Wert einer idealen **Kluftschar** gilt parallel zur Kluftrichtung und bei konstanter kinematischer Zähigkeit:

$$k_f = C\frac{(2a_i)^3}{b_i}$$

C Konstante ($g/12\nu$)
$2a_i$ Spaltöffnungsweite (m)
b_i mittlerer Kluftabstand (m)

Die Öffnungsweite der Klüfte geht danach besonders stark in den k_f-Wert und die damit berechnete Fließgeschwindigkeit ein. Bei Kluft-Grundwasserleitern können daher entlang einzelner diskreter Fließwege deutlich höhere Fließgeschwindigkeiten als in Poren-Grundwasserleitern auftreten. Die diskreten einzelnen Fließwege des Grundwassers im Gebirge können allerdings nur selten und nur in speziellen Forschungsprogrammen gezielt erfasst werden. Beispielsweise konnte im Felslabor Grimsel (Schweiz) in granodioritischem Gestein mit Markierungsversuchen eine Einzelkluft näher untersucht werden. Dabei wurden Fließgeschwindigkeiten von einigen Metern pro Stunde ermittelt (HOEHN et al. 1990).

Bei starker Kluftrauhigkeit kann die Strömung selbst bei geringer Kluftöffnungsweite in den nicht-laminaren Bereich übergehen. Für diese Fälle hat LOUIS (1967) nicht-lineare Beziehungen zwischen Druckgradient und Fließgeschwindigkeit definiert. Kommt es zu flächenhaften Kontakten der Kluftwandungen, treten Windungseffekte auf, die auch im laminaren Bereich zu Abweichungen vom linearen Zusammenhang zwischen Gradient und Fließgeschwindigkeit führen. Beispielsweise haben ABELIN et al. (1985) bei der Untersuchung von zwei Einzelklüften im Granit des Felslabors Stripa (Schweden) eine Kanalisierung der Grundwasserströmung ("channelling") innerhalb des Kluftsystems festgestellt. Durch Kontakte zwischen den Kluftwänden entstehen innerhalb einer Kluft örtlich Zonen mit stagnierendem Wasser ("lakes"), so dass nur etwa 5 - 20 % der Gesamtkluftfläche in den aktiven Grundwasserfluss in der Kluft einbezogen sind. Dies bewirkt eine zusätzliche Diskretisierung der Fließwege in einem Kluft-Grundwasserleiter.

2.2 Durchflusswirksames Hohlraumvolumen, Speichervermögen

Das **durchflusswirksame** oder **effektive Hohlraumvolumen** ist dasjenige Volumen des Gebirges, das für die Grundwasserbewegung zur Verfügung steht. Es ist neben der Gebirgsdurchlässigkeit die zweite für die Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers maßgebliche Gesteinseigenschaft. Sie ist in der Regel deutlich kleiner als das Hohlraumvolumen insgesamt und als das für die Wasserspeicherung verfügbare Volumen des Gesteins: Nicht für die Wasserbewegung stehen isolierte Hohlräume, mit Haftwasser gefüllte Hohlräume bzw. Hohlraumanteile sowie nur an einer Stelle mit dem übrigen Porenraum verbundene Hohlräume zur Verfügung. Letztere sind allerdings für die Speicherung von Grundwasser verfügbar.

Je nach dem, ob das durchflusswirksame Hohlraumvolumen an Poren oder an Klüfte (bzw. allgemein Trennfugen) gebunden ist, wird es als durchflusswirksames (effektives oder nutzbares) Porenvolumen bzw. als durchflusswirksames (effektives oder nutzbares) Kluft(raum)volumen bezeichnet. Meist werden Porenvolumen und Kluftvolumen zusammen als Porenvolumen oder Hohlraumvolumen bezeichnet.

Der Anteil des Porenvolumens am Gesteinsvolumen insgesamt wird als Porosität (n) bezeichnet und in Prozent angegeben, das durchflusswirksame Hohlraumvolumen entsprechend auch als effektive Porosität (P*).

Anders als bei Lockersedimenten setzt sich die Porosität von Festgesteinen aus der an Poren gebundenen Matrixporosität und der Kluftporosität zusammen. Dabei kann der Anteil der Kluftporosität an der effektiven Porosität deutlich höher sein als derjenige der Matrixporosität. Hinsichtlich Art (laminar/turbulent), Geschwindigkeit und Richtung der Grundwasserbewegung können zwischen effektivem Kluftvolumen und effektivem Porenvolumen deutliche Unterschiede bestehen.

Die Bestimmung der Matrixporosität erfolgt im Labor oder wird aus geophysikalischen Bohrlochmessungen abgeleitet. Die Bestimmung der (großräumigen) Kluftporosität ist demgegenüber mit erheblichen methodischen und technischen Problemen bzw. erheblichem Aufwand verbunden. Zu den Ergebnissen der In-situ-Messungen der Gebirgsdurchlässigkeit liegen daher keine äquivalenten Porositätsdaten vor. Ersatzweise wird zur Beschreibung und Bewertung des Hohlraumvolumens das vielfach zusammen mit der Gebirgsdurchlässigkeit bestimmte Speichervermögen heran gezogen.

Speichervermögen

Das Speichervermögen eines Gesteins wird durch den **Spezifischen Speicherkoeffizienten** (Ss) gekennzeichnet. Er gibt die Änderung des im Gestein gespeicherten Wasservolumens je Volumeneinheit des Gesteins (1 m^3) bei Absenkung der Standrohrspiegelhöhe (Grundwasserspiegel) um eine Einheit (1 m) an. Seine genaue Bestimmung setzt Informationen zu Dichte und Kompressibilität des Grundwassers sowie zu effektiver Porosität und Kompressibilität des Gesteins voraus. Die genannten Gesteinsparameter werden üblicherweise durch geophysikalische Bohrlochmessungen gewonnen.

Zwischen Gebirgsdurchlässigkeit und Spezifischem Speicherkoeffizienten besteht eine uneinheitliche Beziehung: Nach den Ergebnissen von Sensitivitätsstudien (BELANGER et al. 1989a u. 1989b) variiert der k_f-Wert im Bereich geringer Durchlässigkeit (k_f-Werte $1 * 10^{-12}$ bis $1 * 10^{-11}$ m/s) um etwa eine Größenordnung, wenn sich der Spezifische Speicherkoeffizient um zwei Größenordnungen ändert. Bei höheren Durchlässigkeiten ist der k_f-Wert dagegen relativ wenig empfindlich gegenüber Variationen von Ss.

Der Speicherkoeffizient (S) ist das Produkt aus dem Spezifischen Speicherkoeffizienten und der Mächtigkeit des Grundwassers. Zu seiner Bestimmung wird also die Mächtigkeit des Grundwasserkörpers benötigt. Bei hydraulischen Versuchen in Bohrlöchern wird meist das Packerintervall für die Mächtigkeit eingesetzt. Allerdings ist die tatsächliche hydraulisch aktive Mächtigkeit des Grundwasserkörpers ohne weitere Untersuchungen in der Regel unbekannt. Durch Skin-Effekte und Brunnenspeicherung kann es bei der Bestimmung des Speicherkoeffizienten zu Messfehlern kommen. Alternativ werden Speicherwerte auch aus den Fluid- und Gesteinseigenschaften abgeleitet (z. B. ADAMS & WYSS 1994).

Beziehung Porosität - Speicherkoeffizient

Die Speicherkoeffizienten für Grundwasserleiter mit gespanntem bzw. ungespanntem Grundwasser unterscheiden sich um Größenordnungen:

Bei **nicht gespannten Grundwasserleitern** ist der Speicherkoeffizient mit der dränbaren Porosität identisch. Diese entspricht der effektiven Porosität plus dem nur zur

Speicherung nutzbaren Hohlraumanteil. Nicht gravitativ entwässerbares Wasser, wie Kapillar- und Haftwasser, ist darin nicht enthalten. Bei feinkörnigen Sedimenten bzw. Sedimentgesteinen (Ton, Schluff bzw. Tonstein, Siltstein u. ä.) ist die dränbare Porosität deutlich kleiner als die Gesamtporosität, während bei grobkörnigen Sedimenten (Sand, Kies) beide etwa gleich groß sind. Da der ausschließlich speicherwirksame Hohlraumanteil selten bestimmt wird bzw. klein gegenüber dem durchflusswirksamen Anteil ist, wird die dränbare Porosität meist mit der effektiven Porosität gleichgesetzt. Die Speicherkoeffizienten freier Grundwasserleiter liegen nach HÖLTING (1989) bei etwa $1 * 10^{-01}$ bis $4 * 10^{-01}$ und damit in der Größenordnung der effektiven Porosität.

In **gespannten Grundwasserleitern** führt die Wasserentnahme zur Dekompression des Wassers und zur Deformation des Korngerüstes. Die Speicherkoeffizienten sind daher deutlich niedriger als bei ungespannten Grundwasserverhältnissen. Typische Werte der Speicherkoeffizienten gespannter Aquifere liegen bei $5 * 10^{-05}$ bis $5 * 10^{-03}$ (HÖLTING 1989).

Die hier ausgewerteten Daten betreffen überwiegend gespannte Grundwasserverhältnisse; allerdings liegen nicht bei allen Versuchen Informationen zur Frage "freies oder gespanntes Grundwasser" vor. Daher ist eine direkte Ableitung der Porosität bzw. der dränbaren Porosität aus dem Speicherkoeffizienten nicht möglich. Dazu wären vielmehr zusätzliche Untersuchungen und Annahmen, insbesondere zur Gesteinskompressibilität, notwendig.

Der Speicherkoeffizient ist zuverlässig nur durch Pumpversuche zu bestimmen. Indirekt kann er annähernd aus Porositätsversuchen im Labor oder durch geophysikalische Bohrlochuntersuchungen ermittelt werden. Mit Auffüllversuchen, Injektionsversuchen, kurzen Pumptests und Slug- und Bail-Tests ist er nur abschätzbar (s. Tab. 3-1). Einige Bohrlochtests, etwa der Pulse-Test, liefern sehr unsichere Speicherkoeffizienten. Oft wird bei der Auswertung von Bohrlochtests ein durch Laboruntersuchungen ermittelter Wert für den Speicherkoeffizienten angenommen und für verschiedene In-situ-Durchlässigkeitsbestimmungen verwendet.

3 Untersuchungsmethoden und Aussagekraft hydraulischer Daten

Die Zuweisung charakteristischer Bandbreiten hydraulischer Parameter zu bestimmten Gesteinstypen setzt Zuverlässigkeit bzw. Reproduzierbarkeit, Vergleichbarkeit und annähernd übereinstimmende räumliche Aussagekraft der einfließenden Daten voraus. Diese Eigenschaften hängen ihrerseits von der zur Erhebung hydraulischer Daten eingesetzten Untersuchungsmethode und den konkreten Versuchsbedingungen, aber auch den hydraulischen Eigenschaften des betrachteten Gesteinstyps bzw. deren ortsspezifischer Ausprägung ab. Nachfolgend werden einige für die Beurteilung dieser Aspekte wichtige verfahrensbezogene Zusammenhänge dargestellt und bewertet. Wichtige Merkmale der Verfahren sind in Tab. 3-1 zusammengestellt.

3.1 Testverfahren

Merkmale

Die in die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit übernommenen und zur Kriterienableitung herangezogenen Daten stammen hauptsächlich aus Bohrungen, und zwar überwiegend aus Tiefbohrungen, nachgeordnet auch aus Untertage-Labors. Der weitaus größte Teil dieser Einzeldaten stammt aus **Packerversuchen**. In dieser Datenlage kommt eine deutliche Bevorzugung von Packerversuchen gegenüber anderen Testverfahren zu Ausdruck, die ihre Ursache vor allem in den folgenden Vorteilen von Packertests hat:

- Es können tiefengenau (±1 m) auch sehr gering durchlässige Gebirgsbereiche getestet werden.
- Ihr Einsatz ist auch in großen Tiefen möglich.
- Sie liefern recht gut abgesicherte Werte, da meist mehrere Packertests nacheinander durchgeführt werden.
- Der Erfahrungsstand ist hoch.
- Packertests sind relativ kostengünstig durchführbar.

Nachteile sind:

- Geringe horizontale Reichweite.
- Der Speicherkoeffizient kann nur abgeschätzt werden.
- Aussagen über Aquifermodell, Durchlässigkeitsanisotropie u. ä. sind nur begrenzt und mit speziellen Auswerteverfahren möglich.

Vor Durchführung der - bei den genannten Kostenvorteilen - doch aufwendigen Packertests werden üblicherweise **Bohrloch-Logging-Verfahren** mit geophysikalischen Bohrlochsonden eingesetzt, wie sie seit langem routinemäßig in der Kohlen-

wasserstoffindustrie Anwendung finden (z. B. Kaliberlog, Density-Log, Gamma-Ray-Log, Microlog). Damit werden tiefenabhängige lithologische Wechsel oder Gefügeunterschiede in der Gesteinsabfolge identifiziert. Mit Flowmeter-Messungen lässt sich die Stärke von Zu- und Abflüssen quantifizieren. Besondere Bedeutung hat in den letzten Jahren das Leitfähigkeits-Fluid-Logging gewonnen (TSANG & HUFSCHMIED 1988). Gekoppelt mit Pumpversuchen können damit genaue Tiefenlage und Transmissivität (bis hinab zu Werten von ca. 10^{-10} m^2/s) von Zuflusszonen im Bohrloch bestimmt werden. Das Verfahren ist kostengünstiger als Packertests. Allerdings werden zwischen den Zuflusszonen liegende Gebirgsbereiche mit geringer Durchlässigkeit nicht erfasst.

Tracerversuche liefern Daten über Abstandsgeschwindigkeiten und Fließwege, die mit anderen Versuchen nicht gewonnen werden können. Mit speziellen Packer-Mehrbohrloch-Tracerversuchen können einzelne Kluftzonen über größere Entfernungen verfolgt werden. Die Bestimmung von Abstandsgeschwindigkeiten mit Tracerversuchen kann dabei zu realistischeren Ergebnissen als mit anderen Untersuchungen führen. Nachteile von Tracerversuchen sind hoher Aufwand (Eingabestelle, Messstellensystem), lange Versuchszeiten (Tage bis Monate) und - damit verbunden - hohe Kosten.

Um großräumige Aussagen über hydraulische Parameter machen zu können, eignen sich bei den Bohrlochversuchen **Langzeitpumpversuche** mit Messung der Grundwasserstände bzw. -drücke oder in Stollen **Ventilationsversuche**. Sie sind ebenfalls zeit- und kostenintensiv.

Erfahrungsstand

Der Erfahrungsstand bei der Anwendung der einzelnen Methoden und der Interpretation ihrer Ergebnisse hängt mit ihrer Anwendungshäufigkeit zusammen. In dieser Hinsicht ergibt sich für die Methoden zur hydraulischen In-situ-Untersuchung von Gesteinen mit relativ geringer Gebirgsdurchlässigkeit derzeit folgende Reihenfolge:

1. Einbohrloch-Packerversuche: WD-, Injektions-, Pump-, Slug-, Bail-, Drill-Stem- und Pulse-Tests, bei geringer Gebirgsdurchlässigkeit vor allem Pulse-Tests;
2. Fluid-Logging: Oft mit Packertests kombiniert zur Lokalisierung von Zu- und Abflusszonen im Bohrloch, auch als Einzelmethode zur Bestimmung der Klufttransmissivität (quantitatives Fluid-Logging);
3. Mehrbohrloch-Versuche: Langzeitpumpversuche mit Piezometermessung, spezielle Packerversuche, als Mehrbohrloch-(Packer-)Versuche ausgeführte Tracerversuche;
4. Ventilationsversuche: In Stollen, Strecken oder Kammern, erfordern lange Versuchszeiten von Wochen bis zu Monaten.

Methode	Versuchsdauer (h)	Reichweite (R) / Einflussvolumen (E)	Messbereiche	Tiefengenauigkeit	Kostenaufwand	Erfahrung	Aussagen, Parameter
Langzeitpumpversuch (Aquifertest)	10 - >100 h **(1)**	R: 10 - >300 **(1)**	k_f: 10^{-02} - 10^{-07} (1)	n. r.	hoch	hoch	Aquifermodell, Aquiferränder, Anisotropie; D, S
Auffüllversuch	h-Bereich	R: 1 - 10	k_f: 10^{-05} - 10^{-07}	n. r.	gering	hoch	D, S
Einschwingversuch (Impedanztest)	h-Bereich	R: 1 - 10	k_f: 10^{-02} - 10^{-06} (3)	n. r.	gering	mittel	D
Gezeitenverfahren		E: >100 000, oft unbekannt		n. r.	gering	gering	D (grobe Mittelwerte)
Abpressversuch (WD-Test)	0,2 - 0,25 h pro Druckstufe (3)	R: 10 (1)	k_f: 10^{-04} - 10^{-08} (3)	±1 m (1)	gering	hoch	D
Injektionstest	10 - >100 h (1)	R: 10 - >100 (1)	k_f: $>10^{-10}$ (4)	±1 m (1)	mittel	hoch	D (S abschätzbar)
Pumptest	10 - >100 h (1)	R: 10 - >100 (1)	k_f: 10^{-06} - 10^{-08}, $>10^{-09}$ (4)	±1 m (1)	mittel	hoch	D (S abschätzbar)
Slug- und Bail-Test	0,1 - 10 h (1)	R: 1 - 10 (1)	k_f: 10^{-02} - 10^{-09} (3), $>10^{-10}$ (4)	±1 m (1)	gering	hoch	D (S unsicher)
Drill-Stem-Test	1 - 10 h (1)	R: 1 - 10 (1)	k_f: 10^{-05} - 10^{-08} (3), $>10^{-10}$ (4)	±1 m (1)	gering	hoch	D
Pulse-Test	0,1 - 10 h (1)	R: 1 (1)	k_f: $<10^{-07}$ (3), 10^{-08} - 10^{-14} (4)	±1 m (1)	gering	hoch	D (für sehr geringe D geeignet, S unsicher)
Squeese-Test	0,1 - 10 h (1)	R: 1 (1)	k_f: $<10^{-07}$ (1)	±1 m (1)	gering	mittel	D (S unsicher)
Packer-Flowmeter-Logging			T: $5 * 10^{-03}$ - $1 * 10^{-07}$ (5)				D, Tiefengenaue Zufluss-/ Abflussmessung
Kaliberlog	h-Bereich			mm-Bereich	gering	hoch	Härteunterschiede, Auflockerungszonen

Tab. 3-1 Merkmale verschiedener Methoden zur Erhebung hydraulischer Informationen (Fortsetzung auf S. 22)

Methode	Versuchsdauer (h)	Reichweite (R) / Einflussvolumen (E)	Messbereiche	Tiefengenauigkeit	Kostenaufwand	Erfahrung	Aussagen, Parameter
Propellerflowmeter	h-Bereich		ab 10 mm/s vertikale Strömungsgeschwindigkeit		gering	hoch	Grundwasserzuflüsse, Tiefenlage und Stärke
Heat-Pulse Flowmeter	h-Bereich		1-100 mm/s vertikale Strömungsgeschwindigkeit			gering	Grundwasserzuflüsse, Tiefenlage und Stärke, auch für geringe Zuflüsse
Temperatur-Log	h-Bereich		ab 0,01 °C Temperaturschwankung		gering	hoch	Grundwasserzuflüsse, Tiefenlage und relative Stärke
Gamma Ray	h-Bereich		bis 0,3 m Schichtauflösung	0,3 m	gering	hoch	Lithologie (Tongehalt)
Density-Sonde	h-Bereich	R: 0,15 - 0,2			mittel	hoch	Lithologie (Dichteunterschiede), Porosität, Trennflächen
Neutron Log	h-Bereich				mittel	hoch	Gesteinsporosität
Laterologsonde	h-Bereich	R: 1 - 2			gering	hoch	Trennflächen, Schichtgrenzen, Lithologie (Ton/ Sand)
Microlog	h-Bereich					hoch	Trennflächen, Feinauflösung von Schichten
Salinometersonde	h-Bereich				gering	hoch	Zufluss-/ Abflusszonen, Tiefenlage
Induction-Log	h-Bereich	R: 1		±0,6 m	mittel	hoch	Lithologie (spez. Gebirgsleitfähigkeit)

Tab. 3-1 Merkmale verschiedener Methoden zur Erhebung hydraulischer Informationen (Fortsetzung von S. 21, Fortsetzung auf S. 23)

Methode	Versuchsdauer (h)	Reichweite (R) / Einflussvolumen (E)	Messbereiche	Tiefengenauigkeit	Kostenaufwand	Erfahrung	Aussagen, Parameter
Fluid-Logging (quantitativ)	0,5 - 100 h (1)	R: 10- >100 (1)	T: 10^{-10} (6)	±1 m (1)	mittel	mittel	Lokalisierung von Zufluss-/ Abflusszonen, D (Kluftdurchlässigkeit)
Elektrolytischer Tracer	Tage - Monate	R: bis Einzugsgebiet		n. r.	hoch	hoch	Abstandsgeschwindigkeit, Fließwege, Anisotropie
Sporendrift, Mikropartikel	Tage - Monate	R: bis Einzugsgebiet		n. r.	hoch	mittel	Abstandsgeschwindigkeit, Fließwege, Anisotropie, Kluftöffnungsweiten
Ventilationsversuch	Wochen - Monate	E: >100 000 (2)	k_f: bis $>10^{-10}$	n. r.	hoch	gering	D (Makropermeabilität)

R - Reichweite (m) E - Einflussvolumen (m^3) k_f - Durchlässigkeitsbeiwert (m/s) T - Transmissivität (m^2/s) D - Durchlässigkeit (k_f, T)
S - Speicherverhalten (Speicherkoeffizient) n. r. - nicht relevant

Angaben aus: (1) HEKEL (1994) (2) LONG et al. (1981) (3) SCHREINER & KREYSING (1997) (4) OSTROWSKI & KLOSKA (1989)
(5) AMMANN et al. (1993) (6) GUYONNET et al. (1993)

Tab. 3-1 Merkmale verschiedener Methoden zur Erhebung hydraulischer Informationen (Fortsetzung von S. 22)

Vor diesen hydraulischen Tests oder in Ergänzung dazu werden bei Tiefbohrungen eine Reihe von geophysikalischen Standardverfahren eingesetzt, um Informationen über mögliche Zuflussbereiche und ihre Tiefenlage zu erhalten (Kaliber-Log, Salinitäts-Log, Temperatur-Log, Gamma-Log, Microlog usw.).

Aufwand

Der Aufwand einzelner Untersuchungsmethoden ist sehr unterschiedlich. Tab. 3-1 enthält dazu einige qualitative Angaben. Insgesamt ist bei Untersuchungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen schon allein auf Grund der Tiefe und der - wegen der geringen Gebirgsdurchlässigkeit der interessierenden Gesteinskörper - längeren Dauer mancher Versuche gegenüber Standarduntersuchungen in anderen Anwendungsbereichen, z. B. bei der Grundwassererschließung, von erhöhtem Kostenaufwand auszugehen. Es ist zudem einleuchtend, dass der Aufwand mit dem Einsatz komplexerer Technik und der Anzahl der erforderlichen Beobachtungspunkte zunimmt.

3.2 Datenqualität

Genauigkeit

Die Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit der in die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit aufgenommenen Ergebnisse hydraulischer Messungen hängt in erster Linie von der Qualität der Datenerhebung ab. Für die Erhebung von k_f-Werten von Gesteinskörpern mit geringer Durchlässigkeit sind genaue Druck- und Mengenmessungen entscheidend. Nach dem heutigen Stand der Technik sind damit verbundene mögliche Fehler der k_f-Werte als gering einzuschätzen. Anhand der ausgewerteten Quellen kann allerdings die durchführungsbezogene Qualität der Datenerhebung nicht beurteilt werden. Auch aus diesem Grund wird die Genauigkeit aller ausgewerteten Daten einheitlich eingeschätzt.

Reproduzierbarkeit von Testergebnissen

Insbesondere bei Gesteinskörpern mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit werden im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen hydraulischer Tests an die Einhaltung bestimmter technischer Versuchsbedingungen hohe Anforderungen gestellt. Probleme ergeben sich insbesondere aus der bei einigen Verfahren erforderlichen langen Versuchsdauer:

Wurde beispielsweise der Aquifer durch einen Test hydraulisch gestört, muss bei den meisten Verfahren vor Beginn des nachfolgenden Tests die Wiedereinstellung des hydraulischen Normalzustands abgewartet werden, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Oft werden die Veränderungen bis zur Wiedereinstellung des Normalzustands registriert und in die Auswertung einbezogen. Bei geringer Gebirgsdurchlässigkeit sind die Versuchsdauern allerdings oft so lang, dass die Wiedereinstellung

des ungestörten Aquiferzustands nicht abgewartet werden kann bzw. nicht abgewartet wird.

Die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit einzelner In-situ-Versuchsergebnisse hängt außerdem maßgeblich davon ab, wie genau der Versuchsort im Gebirge lokalisiert ist. Bei Bohrlochversuchen betrifft dies vor allem die Tiefenlage der Messintervalle. Ihr kommt besondere Bedeutung dann zu, wenn verschiedene Versuche miteinander gekoppelt werden, z. B. zunächst Zuflussbereiche mit Flowmeter-Logs detektiert und anschließend mit Packertests gezielt untersucht werden. Die Tiefengenauigkeit einzelner Methoden ist in Tab. 3-1 angegeben.

Vergleichbarkeit von Daten aus unterschiedlichen Verfahren

Im Idealfall sollten die Ergebnisse der In-situ-Bestimmungen hydraulischer Parameter unabhängig von der eingesetzten Untersuchungsmethode sein. In der Realität trifft das aber nicht immer zu:

AMMANN et al. (1993) haben die Ergebnisse von Fluid-Logging-Verfahren (Packerflowmeter und dynamisches Leitfähigkeitslogging) und WD-Tests (Lugeon-Versuche) in identischen Tiefenbereichen von Bohrungen in der Unteren Süßwassermolasse bei Burgdorf (Schweiz) miteinander verglichen (Abb. 3-1).

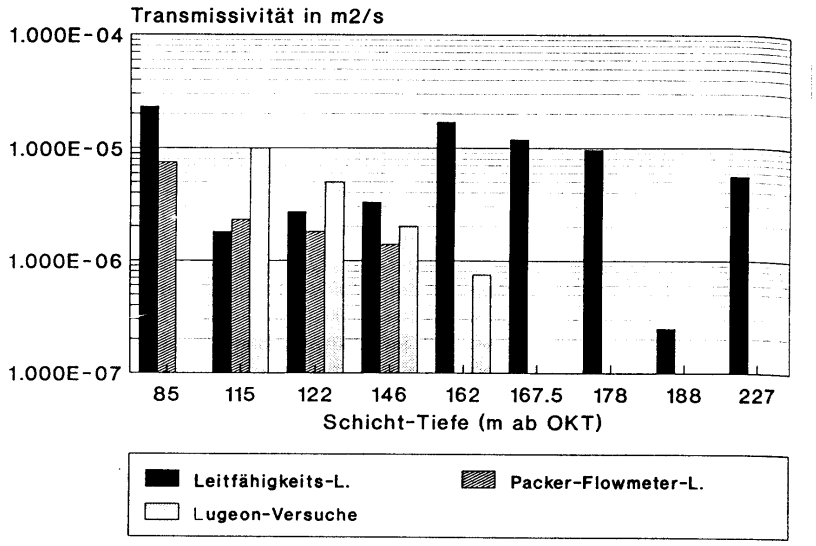


Abb. 3-1 Fluid-Logging und Lugeon-Test-Resultate: Vergleich der Transmissivitätswerte (aus AMMANN et al. 1993)

Die Übereinstimmung der gemessenen Transmissivitäten kann bei den beiden Fluid-Logging-Methoden mit maximalen Unterschieden um den Faktor 3 als sehr gut angesehen werden. Die Abweichungen von den Ergebnissen der WD-Versuche sind dagegen deutlich höher.

Um methodenabhängige kritische Unterschiede in den Messergebnissen auszugleichen, werden bei größeren Untersuchungsvorhaben meist mehrere Verfahren kombiniert sowie die Minimal-, Maximal- und Mittelwerte angegeben. Beispiele für derartige Versuchskombinationen in unterschiedlichen Gesteinstypen finden sich bei DE CANNIÈRE et al. (1994), BARBREAU & BOISSON (1994), HEKEL (1994), ADAMS & WYSS (1994), GUYONNET et al. (1992) sowie LEECH et al. (1984).

Vergleichende Bestimmungen der Gebirgsdurchlässigkeit mit unterschiedlichen Verfahren liegen kaum vor, so dass verfahrensabhängige Unterschiede in den Messwerten bei der Datenauswertung nicht systematisch berücksichtigt werden konnten. Vereinfachend wird jedoch davon ausgegangen, dass sie bei Datenauswertung unter Beachtung der unterschiedlichen Reichweite der hydraulischen Tests implizit miterfasst werden; denn die Zuordnung eines Messergebnisses zu einer bestimmten Versuchsreichweite entspricht letztlich der Zuordnung zu einem bestimmten Verfahren bzw. einer Verfahrensgruppe (Kapitel 3.3).

3.3 Räumliche Repräsentanz der hydraulischen Daten

Einflussvolumen

Die räumliche Repräsentanz von in situ ermittelten hydraulischen Parametern, insbesondere der Gebirgsdurchlässigkeit, ist vom Einflussvolumen abhängig. Darunter wird das durch den hydraulischen Versuch beeinflusste Gebirgsvolumen verstanden. Es ergibt sich aus der Reichweite des Versuchs und der Mächtigkeit des erfassten Gebirgsbereichs, die wiederum von der Art des Tests und den Randbedingungen seiner Durchführung abhängig sind. Außerdem ist das Einflussvolumen von den hydraulischen Eigenschaften des untersuchten Gebirges abhängig. Es ist in der Regel nicht exakt bestimmbar.

Für die Beziehung zwischen Gebirgsdurchlässigkeit und Einflussvolumen gilt generell (z. B. nach NEUMANN 1990), dass In-situ-Untersuchungen im lokalen Maßstab (Reichweite der Untersuchung bis etwa hundert Meter), größere Wertebandbreiten und höhere Maximalwerte liefern als Untersuchungen mit sehr geringer Reichweite bzw. an sehr kleinen Volumina (wenige Kubikmeter) oder im regionalen Maßstab (Reichweite bis zu vielen Kilometern) mit großen bis sehr großen Volumina. Für größere Gebirgskörper ist die Angabe einer all diese Volumenbereiche überdeckenden charakteristischen Bandbreite daher nur dann sinnvoll, wenn die verschiedenen Bereiche repräsentativ erfasst worden sind. Das ist in der Regel nicht der Fall. Daher ist bei Auswertung und Interpretation der Ergebnisse hydraulischer In-situ-Versuche im

Hinblick auf gesteinstypspezifische Charakteristika nach dem Einflussvolumen der Messungen zu differenzieren. Der Einfluss auf das Ergebnis zu klären.

Für Granit bzw. im Hinblick auf die Ausprägung eines wassergängigen Kluftsystems ähnliche Gesteine gehen SCHULZE-MAKUCH & MALIK (2000) allerdings von der Vorstellung aus, dass das Grundwasser bei hydraulischen Tests dem Bohrloch aus dem gesamten Kluftnetz des Gebirgskörpers zufließt. Auch wenn Tests nur Teile des Netzwerkes erfassen, wären danach die gemessenen Transmissivitäten bzw. k_f-Werte mit den Ergebnissen von Tests vergleichbar, die größere Bereiche des Kluftnetzes einbeziehen. Nach den oben erwähnten Betrachtungen NEUMANNs (1990), die durch Durchlässigkeitsdaten für verschiedene Reichweitenbereiche kristalliner Gesteine gestützt werden (CLAUSER 1992), trifft diese Modellvorstellung allerdings wohl nicht für Messungen im regionalen Maßstab zu.

Reichweite

Die laterale Reichweite hydraulischer Tests ist um so größer je höher die Transmissivität (bzw. Durchlässigkeit) und je kleiner der Speicherkoeffizient des Gesteins ist. Sie nimmt außerdem mit der Versuchsdauer zu. Mit kurzen Testzeiträumen (in einem entsprechend eng begrenztem Untersuchungsbereich) werden demnach gegenüber großräumigen Langzeitversuchen mit mehreren Beobachtungsstellen um Größenordnungen kleinere Einflussvolumina erfasst. Bei Gesteinskörpern mit relativ geringer Gebirgsdurchlässigkeit stehen großräumigen Untersuchungen mit langer Dauer in der Praxis der relativ hohe zeitliche und finanzielle Aufwand entgegen. Sie werden daher eher selten durchgeführt. Bei den bevorzugt eingesetzten Verfahren mit geringer Reichweite und geringer Test-Dauer muss die räumliche Zuverlässigkeit der Untersuchungsergebnisse durch erhöhte Anzahl von Belegpunkten und Beurteilung der Gebirgshomogenität erreicht werden (Kapitel 7.2.5).

Bei Pumpversuchen entspricht die Reichweite der Ausdehnung des Absenkungstrichters um den Förderbrunnen. Bei hydraulischen Tests in einzelnen Bohrlöchern ist die Bestimmung der Reichweite nur selten möglich, meist wird sie abgeschätzt. Die typischen Reichweiten verschiedener Testverfahren sind in Tab. 3-1 angegeben. Danach sind einige der verbreitet eingesetzten Packertests durch sehr geringe Reichweiten gekennzeichnet. Bei kurzen Testintervallen (z. B. 2 m) beträgt das Einflussvolumen daher nur wenige Kubikmeter. Die Bedeutung dieser Tests ergibt sich daraus, dass damit bestimmte Gebirgsabschnitte gezielt getestet werden können und ihr Einsatz auch bei sehr geringen Durchlässigkeiten möglich ist.

Die Reichweite wird zusätzlich durch beim Bohren auftretende Effekte beeinflusst: Bohrvorgang und Spülungszirkulation können die Durchlässigkeit um das Bohrloch verändern. Gegenüber der unbeeinflussten Formation kann sie durch in die Bohrlochwand eindringende dichtende Spülung verringert bzw. durch Ausspülen feinkörnigen Materials aus der Bohrlochumgebung erhöht werden (Skin-Effekte). Bei hyd-

raulischen Langzeitversuchen, wie Pumpversuchen, übertrifft die Reichweite des Versuchs die Ausdehnung der Skin-Zone um ein Vielfaches. In diesen Fällen können aus den Anfangsverläufen der Druck/Zeit-Kurven der Skin-Effekt quantitativ abgeschätzt und die tatsächliche Durchlässigkeit des Gebirges bestimmt werden. Bei hydraulischen Packer-Tests mit kurzer Versuchsdauer besteht dagegen die Gefahr, dass die Reichweite des Tests nicht über die Skin-Zone um das Bohrloch hinausreicht und damit eine künstlich veränderte Durchlässigkeit gemessen wird.

Für die Datenauswertung sind die in die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit übernommenen hydraulischen Daten auf Grund der in den Quellen vorhandenen Informationen sowie entsprechend der Art des Versuchs bestimmten Skalenbereichen der Reichweite zugeordnet worden (Kapitel 4.2).

Mächtigkeit des erfassten Gebirgsbereichs

Als Maß für die Mächtigkeit des erfassten Gebirgsbereichs kommen je nach Art des hydraulischen Tests die Grundwassermächtigkeit (z. B. bei vollkommenen Brunnen) oder - unter Vernachlässigung vertikaler Strömungskomponenten - die Länge der Filterstrecke (bei unvollkommenen Brunnen) bzw. des Testintervalls (bei Packertests) in Frage. Weil die weit überwiegende Anzahl der vorliegenden Daten aus Packertests stammt, werden im folgenden sowie in der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit für die Mächtigkeit des bei den Test erfassten Gebirgsbereichs Begriffe wie "Intervall", "Testintervall" o. ä. verwendet.

4 Faktoren mit Einfluss auf die Ergebnisse hydraulischer Tests

4.1 Geowissenschaftliche Faktoren

Petrologische bzw. petrographische Grundlage für die Zuordnung eines Gesteinskörpers zu einem bestimmten Gesteinstyp sind seine charakteristischen Entstehungsbedingungen und die daraus resultierenden charakteristischen Gesteinsmerkmale, insbesondere Mineralbestand und Gefüge. Die Entstehungsbedingungen verschiedener Gesteinskörper und sogar verschiedener Bereiche innerhalb eines Gesteinskörpers eines bestimmten Gesteinstyps sind allerdings nicht völlig identisch. Gesteinskörper sind schon aus diesem Grund in strengem Sinne weder homogen noch isotrop. Einzelne Gesteinskörper und erst recht alle Gesteinskörper eines Gesteinstyps können daher im Hinblick auf eine bestimmte hydraulische Eigenschaft, wie die Gebirgsdurchlässigkeit oder das durchflusswirksame Hohlraumvolumen, grundsätzlich nicht durch nur einen spezifischen Wert umfassend beschrieben werden. Es kann allenfalls eine charakteristische Bandbreite von Messwerten geben. Diese gilt es für die Ableitung von Kriterien zur Unterscheidung der hydraulischen Eigenschaften verschiedener Gesteinstypen zu identifizieren.

Die gesteinstypspezifischen Bandbreiten hydraulischer Parameter können nachträglich durch von der Gesteinsentstehung und damit vom Gesteinstyp unabhängige exogene und endogene Ereignisse und Vorgänge überprägt und möglicherweise kaschiert werden. Auf einzelne Gesteinskörper einwirkende Ereignisse und Vorgänge haben üblicherweise regionale oder lokale Dimension und wirken sich dementsprechend nur bei einem oder einem Teil der Gesteinskörper eines bestimmten Gesteinstyps modifizierend auf die hydraulischen Gesteinseigenschaften aus. Andererseits können aber solche Ereignisse und Vorgänge die hydraulischen Primäreigenschaften eines bestimmten Gesteinstyps in charakteristischer Weise beeinflussen und auf diese Weise wiederum zu einer gesteinstypspezifischen Überprägung dieser Eigenschaften führen. Beispielsweise wirkt sich eine tektonische Beanspruchung bei Tonstein bzw. Granit in unterschiedlicher Weise auf die hydraulischen Eigenschaften aus.

Für die Ableitung charakteristischer Bandbreiten der hydraulischen Parameter von Gesteinstypen ist es demnach unerlässlich, die verschiedenen natürlichen Einflussfaktoren, die die gesteinstypspezifischen Bandbreiten beeinflussen oder solche Bandbreiten vortäuschen können, zu identifizieren und bei der Entwicklung von Kriterien zur Beurteilung der hydraulischen Eigenschaften eines Gesteinskörpers auf Grundlage des Gesteinstyps zu berücksichtigen.

Von den grundsätzlich als mögliche Ursache für Inhomogenität und Ansiotropie der hydraulischen Eigenschaften von Gesteinen in Frage kommenden Faktoren werden einige wichtige nachfolgend beschrieben und bei der Datenauswertung (Kapitel 7 u.

8) gezielt berücksichtigt. Damit soll sicher gestellt werden, dass etwaige Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften der Gesteinstypen tatsächlich typspezifisch und nicht Ausdruck regionaler bzw. lokaler endogener und exogener Einflüsse sind. Zwischen einigen dieser Einflussfaktoren bestehen enge Zusammenhänge. Ihr Zusammenwirken bzw. ihre jeweilige Bedeutung für die hydraulischen Eigenschaften eines Gesteinskörpers kann nur bei detaillierter Einzelfallbetrachtung beurteilt werden. Im Zuge der hier durchgeführten Datenauswertung kann demgegenüber nur die grundsätzliche Bedeutung geklärt werden.

Gesteinszusammensetzung

Die Namengebung für einen bestimmten Gesteinstyp erfolgt innerhalb der großen genetischen Gesteinsgruppen Plutonite, Vulkanite, Sedimentgesteine und Metamorphite im wesentlichen nach dem Mineralbestand sowie der Korngröße der gesteinsbildenden Partikel und ihrer Anordnung. Gesteinskörper eines bestimmten Sediment- bzw. Sedimentgesteinstyps enthalten dabei in der Regel außer den für die Namengebung relevanten Bestandteile gewisse Anteile weiterer Komponenten, die in Abhängig von ihrem Anteil oder der Art ihrer Verteilung Bedeutung für die hydraulischen Eigenschaften eines Gesteinskörpers haben können:

- Ton bzw. Tonstein besteht definitionsgemäß aus Tonmineralpartikeln mit (Äquivalent-)Durchmessern <2 µm. Die gesteinsbildenden Tonminerale bilden eine weit gefächerte Gruppe von Mineralen mit ähnlichen, aber durchaus auch unterschiedlichen Eigenschaften. Die meisten als Ton bzw. Tonstein bezeichneten Gesteinskörper enthalten jedoch neben Tonmineralen Beimengungen anderer Minerale, insbesondere Quarz oder Kalziumkarbonat in verschiedenen Erscheinungsformen, und/oder von Partikeln mit größeren Korndurchmessern. Die Bedeutung dieser Beimengungen für die hydraulischen Eigenschaften von Ton/Tonstein ist im wesentlichen von ihrem Anteil und der Art ihrer Verteilung im Gestein abhängig.
- Bei Mergelstein können unterschiedliche Karbonatgehalte (im Rahmen der für die Bezeichnung Mergelstein maßgeblichen Zusammensetzung) zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften und als Folge davon auch zu Unterschieden in der Gebirgsdurchlässigkeit führen.

Vergesellschaftung des Hauptgesteinstyps mit Gesteinstypen erhöhter Wasserdurchlässigkeit

Alle hier betrachteten Gesteinstypen können entstehungsbedingt mit weiteren Gesteinstypen vergesellschaftet sein, die andere hydraulische Eigenschaften aufweisen oder aufweisen können als der Hauptgesteinstyp, auf den sich eine Untersuchung eigentlich bezieht:

Am Aufbau selbst einheitlich erscheinender großer Vorkommen kristalliner Gesteine sind i. a. verschiedene, durch Übergang miteinander verbunden Gesteinstypen beteiligt. Die meisten Gesteinskörper plutonischer Gesteine (Granit) werden zudem von

jüngeren Ganggesteinen durchschlagen. Diese oder die Kontaktzonen zwischen ihnen und dem umgebenden plutonischen Gestein können andere Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen als die Gesteine selbst.

Alle hier interessierenden Sedimentgesteinstypen können mit charakteristischen anderen Gesteinstypen vergesellschaftet sein oder sogar Wechselfolgen mit ihnen bilden. Von den hier betrachteten Gesteinstypen betrifft das insbesondere Ton/Tonstein, Mergelstein und Steinsalz:

- Ton bzw. Tonstein sind häufig mit Sand bzw. Sandstein, oder chemischen Sedimenten vergesellschaftet. Oft treten Übergänge zu Mergelstein auf.
- Mergelstein kann unterschiedliche Karbonatgehalte und zudem Kalksteineinschaltungen in Gestalt von Lagen oder Linsen aufweisen. Diese können gegenüber Mergelstein auf Grund abweichender mechanischer Eigenschaften durch deutlich höhere Durchlässigkeit gekennzeichnet sein.
- Steinsalz ist insbesondere mit Anhydrit und (Salz-)Ton vergesellschaftet. Diese Gesteinstypen reagieren im Gegensatz zu Steinsalz nicht viskoplastisch auf mechanische Beanspruchung und können daher geklüftet und dauerhaft wasserdurchlässig sein.

Bei Mergelstein und Steinsalz wurde bei der Datenauswertung auf das Vorhandensein möglicher Begleitgesteine geachtet (Kapitel 7.2.6 u. 7.2.10). Außerdem wurden Wechselfolgen zwischen Ton/Tonstein bzw. Mergelstein und Sandstein gesondert ausgewertet (Kapitel. 7.2.7).

Beeinflussung durch Diagenese bzw. schwache Metamorphose

Die Diagenese von Sedimenten bzw. Sedimentgesteinen ist mit Veränderungen ihrer entstehungsbedingten Primäreigenschaften, insbesondere Gefüge und Mineralbestand, verbunden, die sich direkt oder indirekt auf Gebirgsdurchlässigkeit und Porenvolumen auswirken können. Eine wesentliche übergeordnete Ursache für diese Veränderungen ist die zunehmende Versenkung eines Gesteinskörpers durch Überlagerung mit anderen Gesteinsschichten.

Häufige Diagenesephänomen bei Sedimenten bzw. Sedimentgesteinen sind die Kompaktion des Ausgangsmaterials durch Überlagerungsdruck und die Neubildung von Bindemittel durch Zufuhr von Material oder Umwandlung vorhandener Komponenten. Ein allgemein bekanntes Beispiel für diagenetische Veränderungen mit Bedeutung für die hydraulischen Gesteinseigenschaften der hier interessierenden Sedimentgesteinstypen ist auch die Umwandlung quellfähiger Tonminerale in feinkörnigen Sedimenten bzw. Sedimentgesteinen zu Illit. Sie kann mit einer Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit verbunden sein, weil mit der Illit-Bildung ein Verlust an Plastizität und Quellvermögen verbunden ist, so dass unbeständige bzw. hydraulisch unwirksame Trennfugen/Klüfte hydraulisch wirksam werden bzw. entstehende Trenn-

fugen erhalten bleiben können. Andererseits kann es zur Erhöhung der Größe der Tonmineralpartikel mit entsprechender Erhöhung der Matrixporosität kommen.

Bei kristallinen Gesteinen kann es unter dem Einfluss veränderter Druck- und Temperaturbedingungen zur Auflösung, Umbildung bzw. Neubildung von Mineralen kommen. Dadurch kann es zu einer Durchlässigkeitserhöhung aber auch zur Reduzierung des Anteil offener Poren und damit des Speicherkoeffizienten und der Gebirgsdurchlässigkeit kommen.

Ein Sonderfall der Beeinflussung hydraulischer Gesteinseigenschaften durch schwache Metamorphose ist die lokale bis regionale Veränderung von Tongesteinen durch den thermischen Einfluss eines tief liegenden Magmaherdes. Beispiel dafür sind die thermischen Auswirkungen eines tiefliegenden Plutons auf die Ton-/Siltsteinen der Unterkreide im Westteil des Niedersächsischen Beckens (Kapitel 7.2.5).

Gefügestörungen (Klüfte und Störungszonen)

Verschiedene Gesteinstypen neigen bei mechanischer Beanspruchung in unterschiedlichem Ausmaß zur Bildung potenziell wassergängiger Trennfugen, zu denen hier insbesondere Klüfte und Störungszonen gerechnet werden. Das Ausmaß ihrer Entstehung ist außer von den mechanischen Gesteinseigenschaften auch von Art und Intensität der mechanischen Beanspruchung abhängig, die von der Position des jeweiligen Gesteinskörpers im Spannungsfeld der Erdkruste bestimmt werden. Bei manchen kristallinen Gesteinen ist die Entstehung von Trennfugen bereits mit der Gesteinsentstehung selbst verbunden. So kann es bei der Abkühlung von Granit zur Ausbildung eines mehr oder weniger ausgeprägten Trennfugensystems senkrecht zur Abkühlungsfront kommen.

In festen Gesteinen können offene Fugen u. U. über lange Zeiträume erhalten bleiben und so für die Grundwasserbewegung zur Verfügung stehen. Betroffen sind auch Gesteine mit primär geringer Wasserdurchlässigkeit, wie feste Tonsteine oder bestimmte kristalline Gesteine. Bei mehr oder weniger plastischen Gesteinen können Trennfugen im Laufe der Zeit hingegen wieder verschlossen werden (s. dazu z. B. LUX 2002a u. b).

Aus diesen Gründen werden bei der Erhebung von k_f-Werten, und zwar insbesondere im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle, Gesteinsbereiche mit Gefügestörungen in der Regel gesondert untersucht. Das gilt insbesondere für kristalline Gesteine.

Soweit entsprechende Angaben in den ausgewerteten Quellen vorlagen, wurden daher für die Auswertung der k_f-Werte wurden im Hinblick auf das Vorhandensein von Gefügestörungen und resultierender wassergängiger Zonen drei Kategorien gebildet:

- "intakt" - Die getesteten Gebirgsabschnitte werden in den Quellen als frei von Gefügestörungen, wie Klüften oder Störungszonen, beschrieben bzw. geringe Klüftung mit geringer Wasserwegsamkeit auf.
- "gestört" - Das Vorhandensein von Gefügestörungen in den getesteten Gebirgsabschnitten wird ausdrücklich erwähnt. Die derart bezeichneten Bereiche sind durch stärkere Klüftung oder sogar Bruchzonen bzw. Störungszonen gekennzeichnet.
- "keine Angabe" - Es liegen entweder keine Informationen über das Vorhandensein von Gefügestörungen vor oder die vorliegenden Informationen erlauben keine Zuordnung der kf-Werte zu intakten bzw. gestörten Gebirgsabschnitten (z. B. weil "gestörte" und "intakte" Bereiche in einem Messintervall vorkommen).

Systematisch werden Gefügestörungen insbesondere bei der Untersuchung kristalliner Gesteine, und hier insbesondere von Granit und Gneis, erfasst und dokumentiert. Bei beiden Gesteinstypen bestehen zudem zwischen den k_f-Werten für ungestörtes und gestörtes Gebirge deutliche Unterschiede (Kapitel 7.2.1 u. 7.2.2). Bei den anderen Gesteinstypen sind entsprechende Angaben weniger aussagekräftig oder die unterschiedlichen Beanspruchungszustände führen nicht zu deutlichen Unterschieden.

Untersuchungstiefe

Die Untersuchungstiefe erscheint zunächst als ein rein technischer Einflussfaktor, doch die hydraulisch relevanten Eigenschaften des Grundwassers und vor allem der Gesteine ändern sich mit der Tiefe. Die Ergebnisse von In-situ-Untersuchungen der Gebirgsdurchlässigkeit sind daher von der Tiefenlage der Messung abhängig bzw. können es sein. So nimmt die dynamische Viskosität des Grundwassers wegen zunehmender Temperatur mit der Tiefe ab, während die hydraulische Leitfähigkeit praktisch unabhängig von den Gebirgseigenschaften und vom Wasserdruck zunimmt (STOBER 1995): Sie ist bei 60 °C etwa dreimal so groß wie bei oberflächennahen Grundwassertemperaturen. Bei den Gesteinen sind insbesondere folgende Faktoren zu nennen:

- Mit zunehmender Versenkungstiefe werden als Folge des zunehmenden Gebirgsdrucks oberflächennah oder an der Oberfläche entstandene Gesteinskörper, insbesondere Sedimente, unter Verringerung ihres Hohlraumvolumens bzw. Verschließen offener Hohlräume kompaktiert. Damit ist auch eine Veränderung ihrer mechanischen Eigenschaften in Richtung größerer Festigkeit verbunden. Es ist daher zu erwarten, dass es mit zunehmender Tiefe in Abhängigkeit von der Kompressibilität des Gesteins zur Verringerung der Gebirgsdurchlässigkeit und des effektiven Hohlraumvolumens (und damit des Speicherkoeffizienten) kommt. In sehr festen Gesteinen mit geringer Kompressibilität - beispielsweise Granit oder Gneis - ist der Einfluss geringer als bei stärker kompaktierbaren, etwa Tonstein, weil offene Trennfugen eher erhalten bleiben.
- Die Auswirkungen durchlässigkeitserhöhender exogener Einflüsse auf die Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinen, z. B. von Verwitterung oder Abtragung überla-

gernder Gesteine, nehmen mit der Tiefe ab. Umgekehrt kann die Abtragung überlagernder Gesteinsserien zur Auflockerung eines zuvor stärker konsolidierten Gesteinskörpers und damit zur Erhöhung von Gebirgsdurchlässigkeit bzw. Hohlraumvolumen führen. Daraus können auch hydrochemische Veränderungen des Grundwassers resultieren.

- Mit zunehmender Versenkungstiefe kann es als Folge tiefenabhängiger Veränderung des Grundwasserchemismus zu charakteristischen diagenetischen Veränderungen kommen (s. o.). Insbesondere die Neu- oder Umbildung von Zement in Sedimentgesteinen kann zur Verringerung von Porenvolumen und Öffnungsweite der Poren sowie der Gebirgsdurchlässigkeit führen.
- Wenngleich wegen des Dichteunterschieds zwischen Gestein und Wasser der hydrostatische Druck mit der Tiefe weniger stark als der lithostatische Druck ansteigt, kommt es bei tonigen Gesteinen durch zunehmende Kompaktion des Korngefüges ab einer Tiefe von ca. 1 km zu einem deutlichen Anstieg des Porenwasserdrucks. Dies hat nach BJORLYKKE (1999) einerseits die Zunahme der Durchlässigkeitsanisotropie durch Ausrichtung der Tonminerale senkrecht zum größten Stress zur Folge. Andererseits kann der Porenwasserdruck in Tiefen über 2 bis 3 km den Frac-Druck des Gesteins übersteigen, so dass Klüfte bzw. Fugen aufreißen können. Diese Effekte können auch bei späteter Hebung erhalten bleiben - z. B. in Gestalt einer ausgeprägt anisotropen Klüftigkeit.

Auf Grund dieser Zusammenhänge wird bei der Datenauswertung untersucht, ob bei den Daten insgesamt, bei einzelnen Gesteinstypen oder bei einzelnen Untersuchungsgebieten eine Abhängigkeit der hydraulischen Parameter, insbesondere der k_f-Werte, von der Untersuchungstiefe besteht. Zusätzlich werden die Daten nach Tiefenbereichen (<300 m u. G., 300 - 1.500 m u. G., >1.500 m u. G.) getrennt ausgewertet (Kapitel 6.2.3).

Orientierung der Teststrecke in Bezug auf Trennfugensystem

Die Orientierung des Testintervalls in Bezug auf das charakteristische Trennflächen- bzw. Trennfugensystem eines Gesteinskörpers ist vor allem bei Gesteinstypen mit gerichtetem Gefüge, also Sedimenten bzw. Sedimentgesteinen und metamorphen Gesteinen, von Bedeutung; denn bei Gesteinskörpern mit deutlich anisotroper Primärverteilung ihrer hydraulisch wirksamen Eigenschaften, wie Mineralbestand und Korngrößenverteilung, ist auch die Gebirgsdurchlässigkeit entsprechend anisotrop ausgeprägt. Dadurch kann auch die Richtung des Grundwasserflusses durch den Gesteinskörper beeinflusst werden. Auch die Spannungsanisotropie in einem vordergründig nicht anisotrop erscheinenden Gebirgskörper kann eine mehr oder weniger deutliche Durchlässigkeitsanisotropie verursachen. In Gesteinskörpern ohne wirksame sekundäre Gefügeelemente, insbesondere Klüfte, ist die Durchlässigkeit in Richtung paralleler Gefügeelemente üblicherweise deutlich größer als senkrecht dazu. Beispielsweise wurde im Untertage-Labor HADES (Belgien) für den tertiären

Boom-Ton parallel zur Schichtung ein etwa doppelt so hoher Wert wie senkrecht dazu ermittelt (DE CANNIÈRE et al. 1994).

Diese Anisotropieeffekte konnten nicht systematisch berücksichtigt werden, da die ausgewerteten Quellen dazu in der Regel keine oder keine ausreichenden Aussagen enthalten. Die meisten Durchlässigkeitsdaten stammen allerdings aus annähernd vertikalen Tiefbohrungen und dürften daher bei Sedimentgesteinen die Schichtung und bei metamorphen Gesteinen die Foliation mit erfassen; denn selbst in geneigten oder gar gefalteten Gesteinskörpern werden Schichtflächen oder Foliation nur ausnahmsweise nicht durchbohrt. Andererseits werden mit annähernd senkrechten Bohrlöchern weitständige vertikale Trennfugen(systeme) eher unvollständig erfasst.

Untersuchungsgebiet

Die tatsächliche Bedeutung der behandelten gesteinsbezogenen Einflussfaktoren für die hydraulischen Eigenschaften der erfassten Gesteinskörper bzw. die erhobenen hydraulischen Daten ist aus den Daten selbst bzw. den zusätzlichen Informationen in den ausgewerteten Quellen nicht immer eindeutig abzuleiten oder kann nur mit größerem Auswertungsaufwand erfasst werden. Ohnehin können die hydraulischen Eigenschaften von Gesteinskörpern eines bestimmten Gesteinstyps (bzw. die entsprechenden Messergebnisse) durch zusätzliche nicht erhobene oder grundsätzlich unbekannte Faktoren geprägt sein. Als übergreifendes Merkmal für die möglichen Einflüsse solcher Faktoren wird daher das Untersuchungsgebiet als eigener Beurteilungsfaktor in die Auswertung einbezogen.

4.2 Verfahrensbezogene Faktoren

Die Ergebnisse hydraulischer Tests an den Gesteinskörpern eines bestimmten Gesteinstyps sind nicht nur von dessen spezifischen hydraulischen Merkmalen abhängen, sondern auch von der Art des hydraulischen Versuchs und den Randbedingungen seiner Durchführung. Davon hängt das Einflussvolumen eines Tests damit auch die räumliche Repräsentativität seines Ergebnisses ab (Kapitel 3.3). Als für die Ausdehnung des durch den hydraulischen Test beeinflussten Gebirgsbereichs maßgebliche Parameter werden bei der Datenauswertung die Reichweite der Versuche und die Länge des Testintervalls explizit berücksichtigt. Beide Merkmale haben engen Bezug zu den Eigenschaften des untersuchten Gesteinskörpers: Die Reichweite eines Versuchs hängt auch von den hydraulischen Eigenschaften des untersuchten Gesteinskörpers ab und die Länge des Testintervalls entscheidet mit darüber, ob der ermittelte Messwert innerhalb eines Bohrlochs eher punktuelle oder integrale Aussagekraft hat.

Reichweite

Die Reichweite hydraulischer Tests lässt sich aus deren Art näherungsweise ableiten. Umgekehrt können die üblichen Testverfahren bestimmten charakteristischen

Skalenbereichen der Reichweite zugeordnet werden. In der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit und bei der Datenauswertung werden folgende Skalenbereiche und zugehörige Testverfahren unterschieden:

- Kleinskaliger Bereich: Laterale Reichweite bis ca. 10 m (Packerversuche an Kluftzonen und im intakten Gebirgsbereich, einschließlich Bohrloch-Logging),
- Mittelskaliger Bereich: Laterale Reichweite ca. 10 m bis 100 m (Interferenzversuche, wie hydraulische Mehrbohrlochversuche und Tracerversuche),
- Großskaliger Bereich: Laterale Reichweite mehr als 100 m (Langzeitpumpversuche und Ventilationsversuche).

Die Zuordnung der Daten zu einem der drei Skalenbereiche erfolgt außer auf Grund des Testverfahrens auch anhand etwa vorhandener zusätzlicher Angaben in den ausgewerteten Quellen. Bei einigen wenigen Daten konnte nicht zweifelsfrei entschieden werden, ob sie dem kleinskaligen oder dem mittelskaligen Bereich zuzuordnen sind. Da die Hinweise auf die Zugehörigkeit zum mittelskaligen Bereich überwiegen, wurden sie diesem zugeordnet.

Länge des Testintervalls

Die Länge des Testintervalls beeinflusst nicht nur unmittelbar das Einflussvolumen, sondern auch die Anteile von Gesteinsabschnitten mit bestimmten hydraulischen Eigenschaften am Testintervall - z. B. die Anteile ungestörter Gesteinsmatrix mit geringer Wasserdurchlässigkeit und von Kluft- oder Störungszonen. Das Verhältnis beider Anteile wirkt sich ebenfalls auf das Einflussvolumen aus. Außer bei Gesteinskörpern mit regelmäßigem und engständigem Trennfugensystem ist in erster Näherung zu erwarten, dass mit zunehmender Länge des Testintervalls das Verhältnis von Matrixanteil zum Anteil wassergängiger Klüften oder Störungen an der Messstrecke zunimmt und der resultierende intergrale k_f-Wert entsprechend abnimmt. In vergleichbarer Weise kann die Länge des Testintervalls bei Sedimentgesteinen das Verhältnis von Gesteinsabschnitten mit geringer Durchlässigkeit zu gering mächtigen Einschaltungen von Gesteinen mit erhöhter Durchlässigkeit beeinflussen.

In der Praxis hat diese Erkenntnis insbesondere bei Packertests in Bohrlöchern zu unterschiedlichen Messstrategien geführt: Einerseits werden über die gesamte Bohrlochlänge einheitliche kurze Messintervalle verwendet, um die Anteile von Messabschnitten ohne und mit Zonen erhöhter Wasserdurchlässigkeit gesondert zu erfassen. Andererseits werden längere Messintervalle gewählt und ein integraler Durchlässigkeitswert bestimmt. In diesen Fällen werden auffällige Zonen mutmaßlich erhöhter Durchlässigkeit in der Regel zusätzlich gezielt und vertieft untersucht, weil in ihnen die für das Isolationsvermögen eines Gesteinskörpers kritischen Abschnitte gesehen werden.

5 Datenmaterial

5.1 Datenherkunft

Die in der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit enthaltenen Ergebnisse von hydraulischen In-situ-Untersuchungen sind im Zuge einer umfassenden Literaturrecherche zusammengetragen worden. Sie stammen überwiegend aus publizierten Einzelberichten, untergeordnet auch aus unveröffentlichten Gutachten oder ähnlichen Dokumenten. Die Quellen und ihre Art sind in der Datenbank dokumentiert. Einen Überblick über die geographische Herkunft der Daten (alphabetisch geordnet nach Ländern), die Zielsetzung der Datenerhebung sowie die petrographische und - soweit möglich - die grobe stratigraphische Zuordnung der erfassten Daten liefert Tab. 5-1.

Die Daten gelten weit überwiegend für anthropogen unbeeinflusste Gebirgsbereiche. Sie repräsentieren die lediglich durch die Messung selbst beeinflussten, ansonsten aber natürlichen Verhältnisse. Untersuchungsergebnisse aus erkennbar anthropogen beeinflussten Gebirgsbereichen, etwa den Auflockerungszonen um Strecken in Bergwerken oder Untertagelabors, sind dagegen nicht erfasst worden. Bei einigen Messergebnissen aus Bergwerken ist allerdings eine Beeinflussung durch bergbauliche Tätigkeit nicht völlig auszuschließen, auch wenn sie nicht aus einer makroskopisch erkennbaren Auflockerungszone stammen (Kapitel 7.2.10).

Die Datenbank umfasst insgesamt 2.979 Datensätze zur Gebirgsdurchlässigkeit, und zwar 2.885 k_f-Werte und 950 Werte für die Transmissivität. Sofern die ausgewerteten Quellen zwar keine k_f-Werte, aber Informationen zu Transmissivität und Mächtigkeit des getesteten Gesteinskörpers bzw. zur Länge des Testintervalls enthielten, wurden die k_f-Werte aus diesen Informationen errechnet.

In den ausgewerteten Quellen enthaltene Daten zum durchflusswirksamen Hohlraumvolumen bzw. Speichervermögen der Gesteine wurden ebenfalls erfasst. Messtechnisch erhobene Daten zum durchflusswirksamen Hohlraumvolumen liegen nicht vor, aber 319 Werte für den Speicherkoeffizienten bzw. 451 Werte für den Spezifischen Speicherkoeffizienten. Die Auswertung beschränkt sich auf die Daten zum Spezifischen Speicherkoeffizienten. Soweit nur Daten zum Speicherkoeffizienten und zur Länge des Testintervalls vorlagen, sind daraus die Werte für den Spezifischen Speicherkoeffizienten berechnet worden. Diese Datenbasis ist inhomogen und reicht für statistisch zuverlässige Aussagen zu Unterschieden zwischen den Gesteinstypen nicht aus. Auf die detaillierte Auswertung der Parameter wurde daher verzichtet.

Untersuchungsgebiete

Die Daten stammen aus 53 Untersuchungsgebieten weltweit. Als Untersuchungsgebiet wird hier ein Gebiet aufgefasst, das im Zuge eines definierten Programms mit bestimmter Zielsetzung untersucht worden ist und bei dem eine weitere geographische Differenzierung auf Grund der Informationslage nicht möglich bzw. vor dem Hin-

tergrund der Kriterienentwicklung nicht sinnvoll ist. Entsprechendes gilt für Untersuchungsergebnisse, die von den Autoren der ausgewerteten Quellen einem bestimmten Untersuchungsgebiet zugeordnet worden sind. Diese Gebiete können sehr unterschiedliche Größe aufweisen. In einigen Fällen stammen die zugehörigen Daten aus nur einem Bohrloch, in anderen decken sie Gebiete mit regionaler Dimension ab.

Erhebungszusammenhang

Da für die Endlagerung radioaktiver Abfälle vornehmlich Gesteinstypen mit relativ geringer Wasserdurchlässigkeit in Frage kommen, ist auch der weitaus größte Teil der erfassten Daten im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle gewonnen worden. Sie wurden überwiegend zur Charakterisierung potenzieller Endlagerstandorte im Zuge der Standortauswahl gewonnen, seltener im Rahmen der Erkundung mit dem Ziel der Beurteilung eines bereits ausgewählten Standortes.

Weitere umfangreiche Datensätze stammen wegen der ähnlichen Gesteinsanforderungen auch aus dem Bereich der oberflächennahen bzw. untertägigen Entsorgung herkömmlicher Abfälle (z. B. Deutschland: Hoheneggelsen, Münchehagen, Schwäbische Alb).

Andere Anwendungsgebiete, in denen die systematische Erhebung hydraulischer Gesteinsparameter ebenfalls eine wichtige Rolle spielt, haben dagegen meist nur einen geringen Anteil der Daten geliefert. Dazu gehören insbesondere die Wasserwirtschaft und die Kohlenwasserstoff-Exploration und -Gewinnung. Deren Ziel ist überwiegend die Förderung von Flüssigkeiten und Gasen, so dass sie überwiegend auf Gesteinskörper mit höherer Durchlässigkeit ausgerichtet sind. Daten aus diesen und hinsichtlich der Zielsetzung grundsätzlich vergleichbaren Anwendungsbereichen sind daher nicht systematisch erfasst worden, da die gesuchten Informationen zu Gesteinen mit geringer Wasserdurchlässigkeit in dem sehr umfangreichen Datenangebot nur in starker "Verdünnung" enthalten sind. Bei der Kohlenwasserstoff-Exploration und -Gewinnung stehen bei der Erhebung hydraulischer Parameter zudem indirekte Messverfahren, insbesondere mit Bohrloch-Sonden, im Vordergrund.

Messtiefen unter Geländeoberfläche

Die Tiefen der Teststrecken (bezogen auf die Mitte des Testintervalls bzw. bei Horizontalbohrungen in Bergwerken die Tiefe des Ansatzpunktes) decken den Tiefenbereich von 5 m bis gut 9.065 m Tiefe unter Geländeoberfläche ab (Abb. 7-10). Die tiefste Messstrecke befindet sich in der Kontinentalen Tiefbohrung bei Windisch-Eschenbach in der Oberpfalz. Der Messbereich reicht dort dort bis 9.101 m unter Geländeoberfläche hinab.

Untersuchungsgebiet	Zielsetzung bzw. Gegenstand der Untersuchung	Hauptgesteinstyp (Stratigraphie, Formation)
Belgien, Flandern	Forschung	Ton (Eozän)
Belgien, Mol	Endlagerung (Untertagelabor HADES)	Ton (Tertiär, Boom-Formation)
Deutschland, Asse	Endlagerung	Tonstein, Mergelstein, Sandstein (Mesozoikum)
Deutschland, Falkenberger Granitmassiv (Oberpfalz)	Forschung (Geothermie)	Granit (Falkenberg-Granit)
Deutschland, Gorleben	Endlagerung	Steinsalz (Zechstein), Lockersedimente (Quartär)
Deutschland, Hoheneggelsen	Sonderabfall-Deponie	Tonstein (Unterkreide)
Deutschland, Konrad	Endlagerung	Tonstein, Mergelstein (Dogger, Kreide)
Deutschland, Münchehagen	ehemalige Sonderabfall-Deponie	Tonstein/Siltstein (Unterkreide)
Deutschland, Morsleben	Endlagerung	Steinsalz, Anhydrit (Zechstein)
Deutschland, Niedersachsen	Wasserwirtschaft	Kalkstein, Sandstein, Mergelstein, Siltstein (Mesozoikum)
Deutschland, Oberpfalz (Kontinentale Tiefbohrung)	Forschung	Gneis, Amphibolit
Deutschland, Ruhrgebiet	Untertageverbringung von Abfällen	Wechselfolgen aus Sandstein, Siltstein und Kohleflözen (Oberkarbon)
Deutschland, Schwäbische Alb	Sonderabfall-Deponie	Tonstein (Dogger, Opalinuston)
Deutschland, Schwarzwald	Wasserwirtschaft (Mineralwasser, Thermalwasser)	Granit, Gneis
Deutschland, Urach	Forschung (Geothermie)	Gneis
Finnland, Hästholmen (Loviisa)	Endlagerung	Granit
Finnland, Kivetty	Endlagerung	Granit
Finnland, Olkiluoto	Endlagerung	Gneis
Finnland, Romuvaara	Endlagerung	Gneis
Frankreich, Meuse/Haute Marne (Bure)	Endlagerung (Untertagelabor)	Tonstein, Mergelstein (Callovium - Oxfordium)
Frankreich, Soultz (Elsass)	Geothermie	Granit
Frankreich, Tournemire	Endlagerung	Tonstein, Mergelstein (Lias, Dogger)

Tab. 5-1 Untersuchungsgebiete, Zielsetzung der Untersuchung und untersuchte Hauptgesteinstypen

(Fortsetzung auf Seite 40)

Untersuchungsgebiet	Zielsetzung bzw. Gegenstand der Untersuchung	Hauptgesteinstyp (Stratigraphie, Formation)
Großbritannien, Cornwall	Endlagerung	Granit
Großbritannien, Sellafield	Endlagerung	Tuff/Tuffit (Borrowdale Volcanic Group, Ordovizium)
Italien, Orte	Endlagerung	Tonstein (Pliozän)
Italien, Trigno	Endlagerung	Tonstein (Oberkreide - Miozän)
Japan, Kamaishi	Endlagerung	Granit
Japan, Tono	Endlagerung	Granit
Kanada, Lac du Bonnet (Manitoba)	Endlagerung	Granit
Kanada, Saskatchewan/ Ontario	Nicht bekannt	Ton, Geschiebelehm (Pleistozän)
Schweden, Äspö	Endlagerung (Untertagelabor)	Granodiorit, Gneis
Schweden, Gasspeicher	Gasspeicherung	Granit
Schweden, Finnsjö	Endlagerung	Granodiorit, Gneis
Schweden, Stärnö	Endlagerung	Granodiorit, Gneis
Schweden, Stripa	Endlagerung (Untertagelabor)	Granit
Schweiz, Benken	Endlagerung	Tonstein (Unterer Dogger, Opalinuston)
Schweiz, Burgdorf	(Erdsondenfeld)	Sedimentgesteine (Tertiär, Untere Süßwassermolasse)
Schweiz, Grimsel	Endlagerung (Untertagelabor)	Granit, Granodiorit
Schweiz, Mont Terri	Endlagerung (Untertagelabor)	Tonstein (Unterer Dogger, Opalinuston)
Schweiz, Nordschweiz	Endlagerung	Granit, Gneis, Sedimentgesteine
Schweiz, Wellenberg	Endlagerung	Tonmergelstein (Palfris-Formation)
Schweiz, Schweizer Druckstollen (Zentral- und Nordalpen)	Wasserwirtschaft	Kristallin, Sedimentgesteine
Spanien, Duero	Nicht bekannt	Ton/Tonstein (Tertiär, San Pedro Formation)

Tab. 5-1 Untersuchungsgebiete, Zielsetzung der Untersuchung und untersuchte Hauptgesteinstypen

(Fortsetzung von Seite 39, Fortsezung auf Seite 41)

Untersuchungsgebiet	Zielsetzung bzw. Gegenstand der Untersuchung	Hauptgesteinstyp (Stratigraphie, Formation)
USA, Cajon-Pass (Kalifornien)	Forschung	Metamorphite (Gneis)
USA, Colorado	Wasserwirtschaft	Granit, Gneis
USA, Illinois	nicht bekannt (Tiefbohrung)	Granit
USA, Maryland	Druckluftspeicher	Gneis
USA, Savannah River (South Carolina)	nicht bekannt	Gneis, andere Metamorphite
USA, Texas	Forschung	Ton (Quartär)
USA, WIPP (New Mexico)	Endlagerung	Steinsalz, Evaporit-Abfolge (Perm, Salado-Formation)
USA, Yucca Mountain (Nevada)	Endlagerung	Tuff (Tertiär)
USA, Zentral-USA	Nicht bekannt	Tonstein (Kreide, Pierre-Shale)

Tab. 5-1 Untersuchungsgebiete, Zielsetzung der Untersuchung und untersuchte Hauptgesteinstypen

(Fortsetzung von Seite 40)

Nur knapp 10 % aller k_f-Werte stammen allerdings aus Tiefen >1.000 m, nur noch einzelne Messwerte aus Tiefen >2.000 m. Von den 451 Werte des Spezifischen Speicherkoeffizienten betreffen immerhin noch 148 den Tiefenbereich >1.000 m und noch 26 den Tiefenbereich >2.000 m unter Geländeoberfläche.

5.2 Testverfahren und Repräsentativität der Daten

In die Datenbank aufgenommen und bei der Auswertung berücksichtigt wurden nur solche Daten, die gemäß der Beurteilung der Aussagekraft der In-situ-Verfahren in Kapitel 3 die für die Kriterienentwicklung erforderliche Zuverlässigkeit aufweisen. Der weit überwiegende Anteil der Daten wurde mit hydraulischen In-situ-Untersuchungen in Bohrlöchern gewonnen, und zwar vor allem mit Packertests in Bohrungen von der Erdoberfläche aus.

Im Hinblick auf die räumliche Repräsentativität der Daten dominieren zahlenmäßig daher die Ergebnisse von kleinskaligen Versuchen (2.284 Daten) deutlich gegenüber denen von mittelskaligen (400 Daten) und großskaligen Versuchen (52 Daten). Hinsichtlich der Anisotropie der Gebirgsdurchlässigkeit in Gesteinen mit ausgeprägtem Parallelgefüge (Sedimentgesteine, Metamorphite) gilt zudem, dass in der Regel die Durchlässigkeit parallel zu den Gefügeelementen erhoben worden ist. Soweit im Ein-

zelfall nicht besondere tektonische Verhältnisse vorliegen, ist sie zweifellos größer als die vertikale Durchlässigkeit (Kapitel 4.1), doch sind belastbare Aussagen dazu auf Basis des ausgewerteten Datenmaterials nicht möglich.

Reichweite der Versuche

Entsprechend dem mit der Versuchsdurchführung verbundenen technischen, zeitlichen, personellen und finanziellen Aufwand nimmt die zu den verschiedenen Skalenbereichen (Kapitel 4.2) vorliegende Anzahl von Daten in der Reihenfolge kleinskalig - mittelskalig - großskalig deutlich ab. Die weitaus meisten Daten stammen aus Einbohrloch-Packertests. Unter den Daten aus dem kleinskaligen und mittelskaligen Bereich sind stärker durchlässige Gebirgsbereiche gegenüber solchen mit geringerer bzw. "durchschnittlicher" Durchlässigkeit überrepräsentiert: Einerseits werden Kluftzonen, in denen mit erhöhter Durchlässigkeit gerechnet wird, oft bevorzugt untersucht, andererseits können bei manchen Testverfahren Gebirgsbereiche mit sehr geringer Durchlässigkeit wegen Unterschreitens der Messbereiche herausfallen.

Länge der Testintervalle

Die Längen der Testintervalle weisen eine große Variationsbreite auf (0,3 m - 3.500 m). Der Mittelwert liegt bei 44 m. Bei den einzelnen Untersuchungen wurden im Hinblick auf die Intervalllänge unterschiedliche Messstrategien angewendet (Abb. 7-6): Bei einigen Untersuchungskampagnen sind alle Tests mit einheitlicher Testlänge von wenigen Metern durchgeführt worden. Das gilt insbesondere für Erkundungsarbeiten im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Finnland. Bei anderen Untersuchungen wurden die Testlängen entsprechend den jeweiligen Zielsetzungen differenziert.

5.3 Zuordnung der hydraulischen Daten zu Gesteinstypen

Von wenigen Ausnahmen abgesehen sind die in die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit aufgenommenen hydraulischen Daten neun Hauptgesteinstypen aus folgenden genetischen Gesteinsgruppen zuzuordnen (Tab. 5-2 u. 5-3):

- Regionalmetamorphe Gesteine: Gneis,
- Tiefengesteine: Granit,
- vulkanische Gesteine: Tuff/Tuffit,
- klastische Sedimentgesteine: Sandstein, Ton/Tonstein, Mergelstein,
- chemische Sedimentgesteine: Kalkstein, Anhydrit, Steinsalz.

Als Hauptgesteinstyp wird hier derjenige Gesteinstyp bezeichnet, der nach Darstellung in den Datenquellen mit den hydraulischen Tests allein oder hauptsächlich erfasst worden ist. Bei einigen Versuchen waren die Ergebnisse nicht oder nicht ein-

deutig einem bestimmten Gesteinstyp zuordenbar, etwa wenn entsprechende Angaben in den ausgewerteten Quellen fehlen oder wenn die Testintervalle in den Bohrungen mehr als eine Gesteinsvarietät umfassen. Letzteres kann insbesondere für längere Testintervalle zutreffen.

	Gesamte Datenbasis				**Daten aus der wahrscheinlichen Endlagertiefe (300 - 1.500 m u.G.)**			
	Anzahl k_f-Werte	Anteil (%)	Anzahl Untersuchungsgebiete	erfasster Tiefenbereich (m u. G.)	Anzahl k_f-Werte	Anteil (%)	Anzahl Untersuchungsgebiete	erfasster Tiefenbereich (m u. G.)
Gneis	472	17	11	15 - 9.066	271	18	8	301 - 1.499
Granit	890	32	18	11 - 3.485	605	40	11	302 - 1.480
Tuff/Tuffit	260	9	2	363 - 2.245	228	15	2	363 - 1.378
Sandstein	67	2	5	25 - 1.800	31	2	3	341 - 1.488
Ton/Tonstein	676	24	22	5 - 1.474	36	2	8	313 - 1.474
Mergelstein	199	7	8	9 - 1.856	157	10	6	304 - 1.104
Kalkstein	83	3	7	31 - 1.414	37	2	5	316 - 1.414
Anhydrit	70	3	2	200 - 1.000	68	5	2	387 - 1.000
Steinsalz	75	3	3	300 - 841	75	5	3	300 - 841
alle	2.792	99			1.508	99		

Tab. 5-2 Anzahl und Anteil der zu den Hauptgesteinstypen vorliegenden k_f-Werte sowie Anzahl der zugehörigen Untersuchungsgebiete und erfasste Tiefenbereiche, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche

Anteil (%): Anteil an der Summe der Werte (gerundet)
Tiefenangaben bezogen auf Mitte Testintervall (gerundet)

Die Datenerhebung und -auswertung konzentriert sich auf die international für die Endlagerung ins Auge gefassten bzw. in Frage kommenden Gesteinstypen Gneis, Granit, Tuff/Tuffit, Ton/ Tonstein, Mergelstein und Steinsalz. Die zum Hauptgesteinstyp Tuff/Tuffit vorliegenden Daten stammen ausschließlich aus den beiden Untersuchungsgebieten Sellafied (Großbritannien) und Yucca Mountain (Nevada, USA). Die unter dieser Bezeichnung zusammengefassten Gesteinstypen kommen nach heutiger Einschätzung in Deutschland nicht in für die Endlagerung ausreichender Mäch-

tigkeit und Ausbildung vor (APPEL & KREUSCH 2000). Sie wurden der Vollständigkeit halber aufgenommen und ausgewertet.

	Gesamte Datenbasis				**Daten aus der wahrscheinlichen Endlagertiefe (300 - 1.500 m u. G.)**			
	Anzahl S_s-Werte	Anteil (%)	Anzahl Untersuchungsgebiete	erfasster Tiefenbereich (m u. G.)	Anzahl S_s-Werte	Anteil (%)	Anzahl Untersuchungsgebiete	erfasster Tiefenbereich (m u. G.)
Gneis	144	33	3	238 - 3.925	113	33	2	317 - 1.392
Granit	223	51	2	400 - 1.980	184	53	2	400 - 1.480
Tuff/Tuffit *)	5	1	2	483 - 870	3	1	1	483 - 870
Sandstein	20	5	1	113 - 1.711	15	4	1	342 - 1.488
Ton/Tonstein	25	6	5	20 - 1.126	14	4	4	313 - 1.126
Mergelstein	14	3	3	234 - 1.003	13	4	3	325 - 1.003
Kalkstein	9	2	1	183 - 1.338	5	1	1	859 - 1.338
Anhydrit	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-
alle	440	101			347	100		

Tab. 5-3 Anzahl und Anteil der zu den Hauptgesteinstypen vorliegenden Werte für den Spezifischen Speicherkoeffizienten (S_s) sowie Anzahl der zugehörigen Untersuchungsgebiete und erfasste Tiefenbereiche, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche

Anteil (%): Anteil an der Summe der Werte (gerundet)
Tiefenangaben bezogen auf Mitte Testintervall (auf ganze Meter gerundet)
*) Tiefenangaben nur aus einem Untersuchungsgebiet

Sandstein, Kalkstein und Anhydrit werden bei der gesteinstypübergreifenden und bei der gesteinstypbezogenen Auswertung der k_f-Werte (Kapitel 7) mit berücksichtigt, um die Unterschiede zu den bevorzugten Gesteinstypen näherungsweise deutlich zu machen. Die repräsentative Erfassung dieser Gesteinstypen wurde bei der Datenerhebung nicht angestrebt.

Zu den Hauptgesteinstypen liegen insgesamt 2.792 k_f-Werte und 440 Werte für den Spezifischen Speicherkoeffizienten vor. Sie bilden die Datenbasis für die gesteins-

typübergreifenden und gesteinstypbezogene Auswertung in Kapitel 7 und 8. Bei der Auswertung wird zwischen der Datenbasis insgesamt und den Daten aus dem für die Endlagerung vorgesehenen Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche (Kapitel 6.2.3) unterschieden. Bei beiden Datensätzen bestehen zwischen den Hauptgesteinstypen hinsichtlich der Anzahl der vorliegenden k_f-Werte und der Werte für den Spezifischen Speicherkoeffizienten sowie der Anzahl der Untersuchungsgebiete, in denen sie erhoben worden sind, erhebliche Unterschiede (Tab. 5-2 u. 5-3). Hinzu kommen 54 k_f-Werte sowie 11 Werte für den Spezifischen Speicherkoeffizienten für Wechselfolgen aus Tonstein und/oder Mergelstein und Sandstein, auf die - ohne ausführliche Auswertung - in Kapitel 7.2.7 eingegangen wird. In der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit vereinzelt enthaltene Angaben zu weiteren Gesteinstypen (z. B. Dolomitstein) wurden in die Darstellung und Auswertung nicht einbezogen.

6 Vorgehen bei der Datenauswertung und -bewertung

6.1 Statistische Grundlagen

6.1.1 Grundgesamtheit und Stichprobe

Unter Grundgesamtheit bzw. Population wird hier ein Datenkollektiv verstanden, das hinsichtlich der statistischen Eigenschaften der Daten des betrachteten hydraulischen Parameters, z. B. k_f-Wert, alle für dessen unterschiedliche Ausprägung verantwortlichen Ursachen umfasst. In diesem Sinne wird bei der Datenauswertung von der Vorstellung ausgegangen, dass die Gesamtheit aller erfassten Werte eines Parameters bzw. die Gesamtheit der insgesamt für einen bestimmten Gesteinstyp vorliegenden Werte eines Parameters als Grundgesamtheit mit bestimmten statistischen Merkmalen anzusehen ist. Dies ist Voraussetzung für die signifikante Unterscheidung der Daten verschiedener Gesteinstypen anhand ihrer statistischen Kennwerte. In strengem Sinne trifft diese Vorstellung bei vorliegenden Datenmaterial allerdings nicht zu, da mit den in die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit aufgenommenen Daten die verschiedenen Gesteinstypen zweifellos nicht repräsentativ erfasst worden sind.

Als Stichprobe aus dieser Grundgesamtheit wird demgegenüber ein Datenkollektiv aufgefasst, für das auf Grund bestimmter Merkmale des betrachteten Gesteinskörpers, des Untersuchungsortes oder der Erhebungsbedingungen eine der Grundgesamtheit nur teilweise entsprechende Ausprägung der statistisch relevanten Merkmale vermutet wird. In diesem Sinne gelten beispielsweise die k_f-Werte für Granit mit intaktem bzw. gestörtem Gefüge oder die k_f-Werte aus einem bestimmten Untersuchungsgebiet jeweils als eine Stichprobe. Als Merkmale zur Unterscheidung verschiedener Stichproben kommen grundsätzlich die in Kapitel 4 dargestellten, aber auch weitere Einflussfaktoren in Frage. Da a priori nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Messwerte für hydraulische Parameter stärker von diesen Merkmalen als vom Gesteinstyp abhängig sind, wird bei der Auswertung überprüft, ob die statistischen Merkmale der Grundgesamtheiten tatsächlich durch gesteinstypspezifische Eigenschaften und nicht durch Einflussfaktoren bestimmt werden.

6.1.2 Statistische Verteilung, statistische Kenngrößen

Allen statistischen Auswertungen liegt die Hypothese zugrunde, dass die Werte der Grundgesamtheiten und auch einzelner Stichproben der betrachteten hydraulischen Parameter (k_f-Wert, Spezifischer Speicherkoeffizient) der statistischen Normalverteilung folgen, wie dies bei vielen geowissenschaftlichen Parametern der Fall ist. Diese Hypothese trifft für die dekadisch-logarithmierten Werte einzelner Stichproben, z. B. die k_f-Werte eines bestimmten Gesteinstyps aus einem bestimmten Untersuchungsgebiet, weitgehend zu.

Da die Werte in einer Stichproben oft aber in unterschiedlichem und in der Regel unbekanntem Ausmaß durch die in Kapitel 4 genannten Faktoren beeinflusst sind, gilt die Annahme der Normalverteilung nur mit Einschränkungen: Selbst wenn Teilmengen von Stichproben lognormale Verteilung aufweisen, können die Stichproben insgesamt mehr oder weniger von der "normalen" Verteilung abweichen; denn aus der Zusammenfügung von Daten selbst aus nur einem Gesteinskörper eines Untersuchungsgebietes entsteht nicht zwangsläufig ein homogener Satz normalverteilter Daten. Das gilt erst recht für die Grundgesamtheiten der Gesteinstypen und die gesteinstypübergreifende Betrachtung aller Werte eines Parameters (Kapitel 7.1.1).

Um dem Modell der Normalverteilung der logarithmierten Werte Rechnung zu tragen, wurden diejenigen statistischen Kennwerte, zu deren Bestimmung über Interpolation hinausgehende arithmetische Operationen erforderlich sind, mit den dekadischen Logarithmen der Ausgangsdaten berechnet (Tab. 7-1). Die Logarithmen der Kennwerte wurden dann in die entsprechenden Numeri umgewandelt. Mit diesem Vorgehen wurde in den meisten Fällen die beste Anpassung an die Normalverteilung erzielt.

Auch die statistischen Signifikanztests wurden mit den logarithmierten Werten durchgeführt. Statistisches Hauptelement der Normalverteilung ist in diesem Fall das geometrische Mittel. Der geometrische Mittelwert beschreibt Datenkollektive in logarithmischer Normalverteilung erheblich zutreffender als der arithmetische Mittelwert. Beim vorliegenden Datenmaterial ist der geometrische Mittelwert bei fast allen Stichproben um mehrere Größenordnungen kleiner als der arithmetische Mittelwert und liegt dichter am Medianwert als dieser. Die Beziehung zwischen dem arithmetischen und dem geometrischen Mittelwert der verschiedenen Gesteinstypen geht aus Abb. 6-1 hervor, wobei zwischen der Datenbasis insgesamt und den Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe (Kapitel 6.2.3) unterschieden wird. Wären die arithmetischen und geometrischen Mittelwerte identisch, lägen sie auf den eingezeichneten Geraden.

Da bei einigen Datenkollektiven nicht von der Normalverteilung ausgegangen werden kann (Kapitel 6.1.1), werden bei der Beschreibung und Beurteilung von Datensätzen auch Kennwerte der Häufigkeitsverteilung berücksichtigt. Hierzu gehören vor allem der Medianwert, aber auch andere Quantile der Häufigkeitsverteilungen, die z. B. in Boxplots dargestellt sind (Kap. 6.2.5). Sie erlauben die verteilungsunabhängige Beurteilung von Datensätzen. Da sie lediglich auf Interpolation beruhen, bedürfen sie zudem der genannten Umformungen nicht.

6.1.3 Einschränkungen der Aussagekraft

Die zu den einzelnen Gesteinstypen bzw. aus den einzelnen Untersuchungsgebieten vorliegenden Messwerte sind nicht nach statistischen Bedürfnissen, etwa nach dem Zufallsprinzip bzw. nach dem Gesichtspunkt räumlicher Repräsentanz erhoben bzw.

ausgewählt worden. Das gilt sowohl für die Untersuchung bestimmter Gesteinstypen als auch für die Untersuchung einzelner Gesteinskörper eines bestimmten Gesteinstyps:

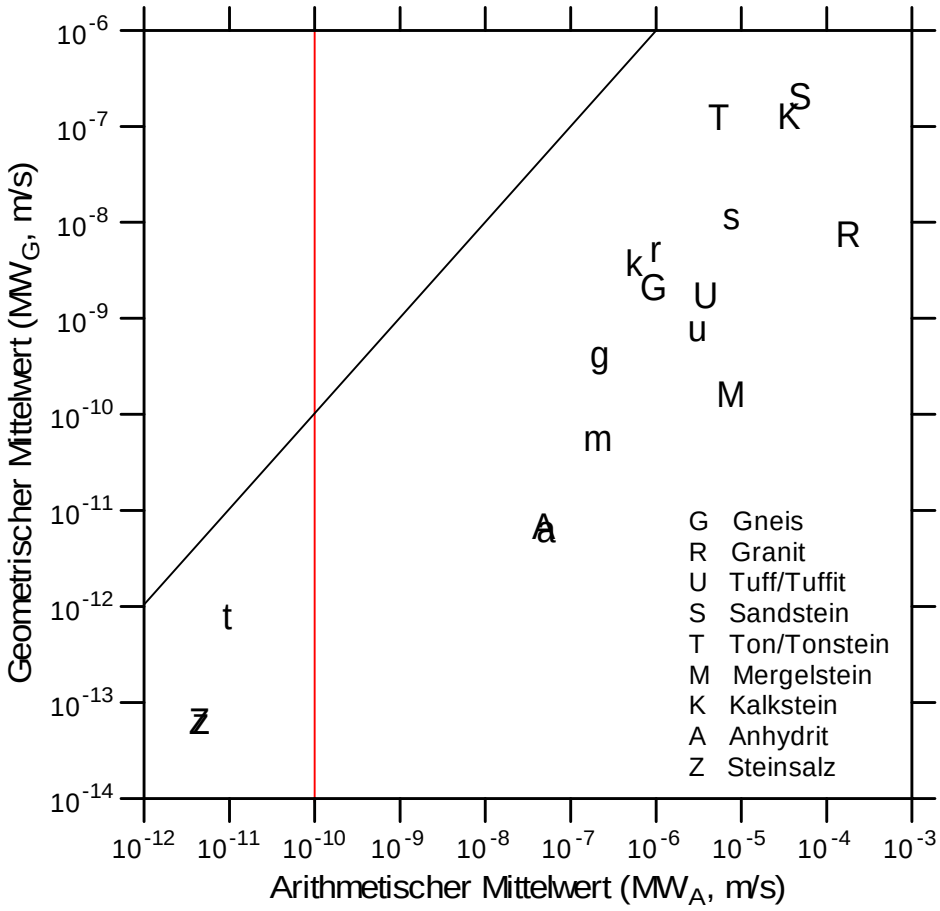


Abb. 6-1 Geometrische Mittelwerte (MW$_G$) der k_f-Werte verschiedener Gesteinstypen in Abhängigkeit von den arithmetischen Mittelwerten (MW$_A$)

Großbuchstaben: Werte für die gesamte Datenbasis
Kleinbuchstaben: Werte für den Tiefenbereich 300 - 1.500 m u. G. (Kapitel 6.2.3)
vertikale Linie bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Zu den Speicherkoeffizienten bzw. Spezifischen Speicherkoeffizienten einzelner Gesteinstypen liegen in der Regel ohnehin nur von zwei oder drei Untersuchungsgebieten überhaupt Daten vor (Tab. 5-3). Lediglich bei Ton/Tonstein stammen die insgesamt 25 Daten aus fünf Gebieten. Eine systematische Ableitung charakteristischer Werte für Gesteinstypen kommt für diese Parameter also schon aus diesem Grund nicht in Frage.

Hinsichtlich der Anzahl der Untersuchungsgebiete ist die Datenlage bei den k_f-Werten für die systematisch erfassten Gesteinstypen deutlich besser (Tab. 5-2). Von den derzeit weltweit für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ins Auge gefassten Gesteinstypen gilt das nicht für Tuff/Tuffit und Steinsalz (zwei bzw. drei Untersuchungsgebiete). Angesichts der umfangreichen empirischen Befunde und zahlreicher Ergebnisse aus Laborversuchen zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften wird die Auswertung bei Steinsalz durch diesen Mangel nicht ernsthaft behindert. Tuff/Tuffit kommt für die Endlagerung in Deutschland nicht in Frage (Kapitel 7.2.3). Die Anzahl der zu den verschiedenen Untersuchungsgebieten eines Gesteinstyps vorliegenden Daten kann sich erheblich unterscheiden. Aus den ausgewerteten Quellen geht nicht immer zuverlässig hervor, wieweit die in die Datenbank übernommenen und ausgewerten Daten in statistischem Sinne unabhängig voneinander sind.

Bei einigen Gesteinstypen, insbesondere Granit und Gneis, sind Gesteinsbereiche bevorzugt untersucht worden, in denen auf Grund von Informationen aus Kernen oder Bohrlochlogs mit erhöhter Gebirgsdurchlässigkeit gerechnet wurde. Werte aus solchen Zonen können daher innerhalb der Stichprobe für ein Untersuchungsgebiet überrepräsentiert sein. Es ist nicht in allen Fällen bekannt, welche Rolle diese oder vergleichbare Gesichtspunkte bei der Datenerhebung gespielt haben. Die statistischen Kenndaten in den Tabellen und Abbildungen geben also die wahren statistischen Verhältnisse nicht immer korrekt wieder. Besonders betroffen sind die kristallinen Gesteine, insbesondere Granit und Gneis, bei denen Kluft- bzw. Störungszonen häufiger angetroffen bzw. erkannt und gezielt untersucht worden sind. Um die Unterschiede zwischen intaktem und gestörtem Gebirge zu erfassen, sind beide Stichprobengruppen getrennt ausgewertet worden (Kapitel 7.2.1 u. 7.2.2). Nicht zu allen Messwerten liegen allerdings Angaben dazu vor, ob sie sich auf Gesteinsbereiche mit intaktem oder gestörtem Gefüge beziehen.

Bei den anderen Gesteinstypen spielt diese Differenzierung keine so große Rolle, da etwaige gestörte Gesteinsabschnitte schwieriger zu erkennen und gezielt zu testen sind. Bei plastischen und quasiplastische Gesteinen muss ohnehin bei gestörtem Gefüge nicht zwangsläufig mit erhöhter Gebirgsdurchlässigkeit gerechnet werden. Eine Sonderrolle nimmt der Gesteinstyp Mergelstein ein. Hier könnnen in Gesteinsbereichen mit erhöhten Kalkgehalt, insbesondere in Kalkbänken, wegen der veränderten gebirgsmechanischen Eigenschaften erhöhte Durchlässigkeiten auftreten (Kpitel 7.2.6).

6.2 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

Für die statistische Auswertung der inDder datenbank Gebirgsdurchlässigkeit enthaltenen hydraulischen Daten und die graphische Darstellung ihrer Ergebnisse wurde das Programmpaket SYSTAT 10 der SPSS Inc., Chicago, IL (USA), eingesetzt. Es erlaubt die routinemäßige Durchführung zahlreicher statistischer Verfahren, insbe-

sondere für die Prüfung bestimmter Hypothesen und Signifikanztests. Die Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit wurden sowohl gesteinstypübergreifend als auch gesteinstypspezifisch (Kapitel 7.1 u. 7.2), die Daten zum durchflusswirksamen Hohlraumvolumen bzw. zum Speichervermögen wegen der schlechteren Datenlage dagegen nur gesteinstypübergreifend (Kapitel 8) ausgewertet. Soweit zutreffend bzw. sinnvoll wurden dabei die in Kapitel 4 dargestellten Einflussfaktoren in die Auswertung einbezogen bzw. bei der Beurteilung der Auswertungsergebnisse berücksichtigt.

6.2.1 Statistische Parameter

Grundkenngrößen zur Charakterisierung und Beurteilung der spezifischen Merkmale von Datenkollektiven der hydraulischen Parameter einzelner Gesteinstypen in Kapitel 7 und 8 sind der geometrische Mittelwert und der Medianwert. Beide Parameter bilden die Grundlage für die Beschreibung und Beurteilung der Verteilungsmerkmale der behandelten Datenkollektive sowie zur Ableitung weiterer Parameter. Insgesamt wurden zur Charakterisierung von Grundgesamtheiten bzw. einzelnen Stichproben bei der statistischen Auswertung der Daten für alle betrachteten Datenkollektive folgende Parameter berechnet:

- Anzahl der Messwerte des Kollektivs (n),
- Minimalwert,
- Maximalwert,
- arithmetischer Mittelwert (MWA),
- Medianwert,
- Geometrischer Mittelwert (MWG),
- Relativer Standardfehler des geometrischen Mittelwerts (SER),
- Unter- und Obergrenze des 95-Prozent-Vertrauensintervalls des Mittelwerts (VI95UN und VI95OB),
- Standardabweichung (SD),
- Schiefe (Sf),
- Kurtosis (K, auch als Exzess bezeichnet).

Minimalwert, Maximalwert, arithmetischer Mittelwert und Medianwert wurden aus den Originaldaten übernommen bzw. errechnet. Die übrigen Größen wurden aus den in 6.1.2 genannten Gründen aus den dekadischen Logarithmen der Daten errechnet. Die genannten Parameter sind für alle ausgewerteten Gesteinstypen in Tab. 7-1 zusammenfassend dargestellt, und zwar getrennt für die gesamte Datenbasis und für die Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche (Kapitel 6.2.3).

Bei der Beschreibung und Interpretation der k_f-Werte nach Gesteinstypen in Kapitel 7.2 werden zur Charakterisierung sowohl der Gesteinstypen insgesamt als auch von

Datenkollektiven, bei denen eine Beeinflussung durch einen der in Kapitel 4 dargestellten Einflussfaktoren erwartet wurde, regelmäßig folgende Parameter in Tabellenform angegeben: Anzahl der Messwerte, Minimalwert, Maximalwert, geometrischer Mittelwert und Medianwert.

Bei der Interpretation einiger der statistischen Kennwerte ist zu beachten, dass manche Datensätze die statistischen Voraussetzungen für deren Berechnung nicht erfüllen. Das gilt insbesondere für Datensätze mit bimodaler oder gar multimodaler Verteilung, bei denen z. B. die Parameter, Medianwert, Schiefe und Kurtosis keine oder allenfalls begrenzte Aussagekraft besitzen. Mit solchen Einschränkungen ist beim vorliegenden Datenmaterial durchaus zu rechnen; denn die Werte der einzelnen nach bestimmten Merkmalen unterschiedenen Stichproben können durch weitere Faktoren beeinflusst sein, woraus sich wiederum komplexe Häufigkeitsverteilungen ergeben können.

6.2.2 Auswerteverfahren

Bei den meisten der zur Datenauswertung eingesetzten statistischen Verfahren wurden die dekadischen Logarithmen der Ausgangsdaten verwendet. Beziehungen der hydraulischen Parameter untereinander und zu einigen der Einflussfaktoren wurden mit **Korrelationsrechnungen** und **Regressionsrechnungen** überprüft. Zur Unterscheidung der Grundgesamtheiten bzw. ihrer weiteren Differenzierung in verschiedene Stichproben nach bestimmten Kriterien wurden **Varianzanalysen** und **Diskriminanzanalysen** durchgeführt. Soweit möglich und sinnvoll wurden bei diesen Verfahren sowie bei den Tests zur Bestimmung der **Irrtumswahrscheinlichkeit** von Prüfhypothesen bzw. zur Überprüfung der **Signifikanz** bestimmter statistischer Kennwerte und der statistischen **Unabhängigkeit** verschiedener Datenkollektive voneinander übliche **verteilungsgebundene** und **verteilungsunabhängige** Verfahren und Tests angewendet. Beispielsweise wurden bei den Korrelationsrechnungen neben den Pearson-Korrelationskoeffizienten zusätzlich die Spearman-Rangkoeffizienten bestimmt. Die Ergebnisse wurden nach Möglichkeit mit verschiedenen Verfahren abgesichert.

Zur genaueren verteilungsunabhängigen Unterscheidung der k_f-Wert-Verteilungen im Zuge der Kriterienableitung in Kapitel 9 wurden zusätzlich zu den in Kapitel 6.2.1 genannten statistischen Parametern Vertrauensintervall bzw. Standardfehler des geometrischen Mittelwerts die 95-Prozent-Vertrauensintervalle der Medianwerte bestimmt. Dazu wurden durch "**bootstrapping**" Vielfachbestimmungen des Medianwertes durchgeführt, wobei in den einzelnen Bestimmungsgängen ein jeweils anderer Wert des Datensatzes unberücksichtigt blieb. Insgesamt ergibt sich so eine der Anzahl der Rechengänge entsprechende Anzahl von Medianwerten. Aus der Liste der nach ihrer Höhe geordneten Medianwerte können die Unter- und die Obergrenze des Vertrauensintervalls als 5. Perzentil und als 95. Perzentil der Rangliste abgele-

sen bzw. abgeleitet werden. Das so bestimmte Vertrauensintervall ist unabhänig von der angenommen statistischen Verteilung der Daten und nicht immer symmetrisch um den Medianwert angeordnet.

6.2.3 Tiefenbereiche

Routinemäßig wird bei einer Vielzahl von Datenkollektiven der wegen des möglichen Einflusses der Messtiefe auf die hydraulischen Parameter, insbesondere die Gebirgsdurchlässigkeit (Kapitel 4.1), die Beziehung zwischen k_f-Werten und der Lage der Teststrecke unter Geländeoberfläche untersucht. Für die differenzierte Auswertung der k_f-Werte und nach einzelnen Gesteinstypen in Kapitel 7.2 wurden die Messwerte zusätzlich drei Tiefenbereichen zugeordnet, die sich an den von AKEND (2002a) festgelegten Grenzen für die mögliche bzw. wahrscheinliche Tiefe eines Endlagers zwischen 300 m und 1.500 m unter Geländeoberfläche orientieren: <300 m, 300 bis 1.500 m und >1.500 m unter Geländeoberfläche. Bei der gesteinstypübergreifenden Auswertung in Kapitel 7.1 wird lediglich zwischen den Ergebnissen für die gesamte Datenbasis und den Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche unterschieden. Bei der Ableitung von Kriterien in Kapitel 9 werden nur die Daten aus der wahrscheinlichen Endlagertiefe berücksichtigt.

Der Tiefenbereich zwischen 300 m und 1.500 m unter Geländeoberfläche entspricht demjenigen Tiefenbereich, innerhalb dessen die Errichtung eines Endlagers im Hinblick auf Langzeitsicherheit und sicheren Betrieb grundsätzlich möglich bzw. sinnvoll erscheint. Die obere Grenze wurde vom AKEND (2002a) als Mindesttiefe festgelegt. Sie bezieht sich auf die Oberkante des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und soll dessen Schutz gegen von der Erdoberfläche ausgehende naturbedingte Einwirkungen sicherstellen. Aber auch die tiefenabhängige Veränderung der Gebirgsdurchlässigkeit bei einigen Gesteinstypen, insbesondere bei Ton bzw. Tonstein, spricht für eine Mindesttiefe in diesem Bereich (Kapitel 7.2.5).

Unterhalb der angegebenen Höchsttiefe ist wegen der hohen Gebirgstemperaturen mit erhöhtem technischen Aufwand zu rechnen. Bei manchen Gesteinstypen, insbesondere Tonstein, kann erhöhter Aufwand aus gebirgsmechanischen Gründen allerdings bereits in deutlich geringerer Tiefe erforderlich sein. Die Verschiebung der Untergrenze um einige hundert Meter aufwärts oder abwärts hat auf das Auswertungsergebnis keinen Einfluss, da aus Tiefen um bzw. >1.500 m nur wenige Daten vorliegen. Sie liefern zudem keinen Hinweis, dass in größerer Tiefe (soweit sie durch Untersuchungen belegt ist) deutlich unterschiedliche Verhältnisse gegenüber dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche anzutreffen sind.

Außer bei der Festlegung für die Kriterienableitung der maßgeblichen Stichprobe (Kapitel 9) werden die k_f-Werte und die Spezifischen Speicherkoeffizenten den Tiefenbereichen nach der Lage der Mitte des Testintervalls ("mittlere Testtiefe") in Meter

unter Geländeoberfläche zugeordnet. Das zugehörige Testintervall kann daher im Einzelfall über die genannten Grenzen der drei Tiefenbereiche hinausreichen. Bei Anwendung anderer Zuordungskriterien, etwa der Lage nur der Oberkante (Top), der Unterkante (Bottom) oder von Ober- **und** Unterkante des Testintervalls innerhalb des jeweiligen Bereichs, verändern sich die Auswertungsergebnisse jedoch nur marginal. Die Datenbasis für den Tiefenabschnitt 300 - 1.500 m unter Geländeoberfläche wird jedoch deutlich reduziert, weil einige Messintervalle oberhalb von 300 m unter Geländeoberfläche beginnen und andere in größerer Tiefe als 1.500 m unter Geländeoberfläche enden.

6.2.4 Bewertungsgrundsätze und -maßstäbe

Mit der Auswertung der vorliegenden Daten in Kapitel 7 und 8 soll einerseits abschließend geklärt werden, ob die Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zu Gebirgsdurchlässigkeit und Hohlraumvolumen qualitativ und quantitativ ausreicht und ob zwischen den Gesteinstypen ausreichend deutliche Unterschiede bestehen; andererseits soll die Auswertung auch Aussagen dazu liefern, welche der Gesteinstypen im Hinblick auf Durchlässigkeit und Hohlraumvolumen für die Endlagerung besser oder schlechter geeignet sind bzw. wieweit sie die AkEnd-Anforderungen (Kapitel 1) erfüllen. Nicht angestrebt werden und auch nicht möglich sind absolute Aussagen zur Eignung der einzelnen Gesteinstypen als einschlusswirksamer Gebirgsbereich.

Unter Berücksichtigung möglicher Einflussfaktoren ist dazu zunächst zu prüfen, ob zwischen den Werten für die hydraulischen Parametern verschiedener Gesteinstypen deutliche Unterschiede bestehen. Grundlage dafür sind die statistischen Verteilungen der k_f-Werte bzw. Spezifischen Speicherkoeffizienten bzw. die zu deren Beschreibung benutzten statistischen Kennwerte (Kapitel 6.2.1). Die Ergebnisse dieser Beurteilung fließen dann in die Ableitung der Kriterien in Kapitel 9 ein.

Bei der Beurteilung der Gebirgsdurchlässigkeit der betrachteten Hauptgesteinstypen deuten die statistischen Verteilungen der k_f-Werte dann auf günstige Voraussetzungen für die Endlagerung hin, wenn sie - generalisierend und vereinfacht ausgedrückt - folgende Merkmale aufweisen:

- Kleiner Maximalwert,
- kleine Medianwerte und geometrische Mittelwerte,
- kleine absolute (eher positive als negative) Werte für die Schiefe,
- positive Werte der Kurtosis.

Eher ungünstige Voraussetzungen würden durch das sinngemäße Gegenteil dieser Merkmale angezeigt (hohe Maximalwerte, Medianwerte und geometrische Mittelwerte, hohe negative Werte der Schiefe, hohe negative Werte der Kurtosis). Die Beurtei-

lung der Gesteinstypen hinsichtlich ihres durchflusswirksamen Hohlraumvolumens erfolgt - ausreichende Datenlagen vorausgesetzt - sinngemäß. Anforderungen des AkEnd liegen hierzu nicht vor.

Die Maximalwerte (zusammen mit den Minimalwerten), Medianwerte und geometrische Mittelwerte bestimmen den Gesamteindruck der Werte-Verteilung einer Stichprobe und erlauben den Vergleich der Stichproben untereinander sowie mit den Vorgaben des AkEnd (s. u.). Beim Vergleich der Medianwerte und geometrischen Mittelwerte verschiedener Gesteinstypen sind die Vertrauensintervalle bzw. Fehler zu beachten.

Schiefe und Kurtosis liefern ergänzende Aussagen zur Symmetrie bzw. zur Wölbung einer Verteilung: Entsprechend der Arbeitshypothese, wonach die Werte der hydraulischen Parameter log-normal verteilt sind, ist die Schiefe bei symmetrischen Verteilungen Null. Ist das Häufigkeitsmaximum einer Verteilung gegenüber dem (geometrischen) Mittelwert zu hohen Werten verschoben, ist die Schiefe negativ, bei Verschiebung zu niedrigen Werten positiv. Eine ausgeprägt negative Schiefe bedeutet demnach, dass in einer Verteilung relativ hohe Werte eine anteilsmäßig besondere Bedeutung haben - ein eher ungünstiger Sachverhalt gegenüber positiver Schiefe als Hinweis auf erhöhte Bedeutung kleiner Werte. Die Kurtosis beschreibt die von der normalen Verteilung (Kurtosis Null) abweichende Zentrierung der Daten um das Maximum einer Häufigkeitsverteilung. Bei positiver Kurtosis sind die Werte eng um das Maximum geschart, die Bandbreite der Werte ist dann relativ schmal und weist kein Ausreißer auf. Bei negativer Kurtosis ist die Zentrierung weniger ausgeprägt, die Werte-Verteilung daher insgesamt eher breit.

Für die Beurteilung anhand von Schiefe und Kurtosis kommen nur signifikante Werte in Frage. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn der Quotient aus Schiefe bzw. Kurtosis und Standardfehler der Schiefe bzw. der Kurtosis größer ist als zwei. Unabhängig davon ist die Aussagekraft der Werte für Schiefe und Kurtosis beim vorliegenden Datenmaterial grundsätzlich eingeschränkt, da sie besonders empfindlich auf die Beeinflussung der statistischen Verteilung durch verschiedene Einflussfaktoren reagieren.

Zur formalen Beurteilung der statistischen Verteilungen auf Grundlage der AkEnd-Anforderungen (Kapitel 7.1.4) werden Maximalwert sowie Medianwert bzw. geometrischer Mittelwert einer k_f-Wert-Stichprobe an den vom AKEND (2002a) formulierten Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gemessen. Entsprechend der Mindestanforderung muss der Maximalwert danach $<10^{-10}$ m/s sein. Die charakteristischen k_f-Werte eines Gesteinstyps (Kapitel 6.1: Medianwert, geometrischer Mittelwert) werden nach ihrem Bezug zu den k_f-Werten 10^{-12} und 10^{-10} m/s beurteilt, die Grundlage für die Zuordnung der k_f-Werte zu den Wertungsgruppen "günstig" ($<10^{-12}$ m/s) bzw. "bedingt günstig" (10^{-12} - 10^{-10} m/s) im Rahmen der Abwägung sind.

Für die vergleichende formale Beurteilung der Gesteinstypen in 7.1.4 werden die oben qualitativ formulierten Anforderungen hinsichtlich der statistischen Kennwerte unter Berücksichtigung der AkEnd-Anforderungen wie folgt quantifiziert:

- Maximalwert: Da der Maximalwert bei keinem Gesteinstyp unterhalb der Mindestanforderung (<10-10 m/s) liegt, wird zur Beurteilung ersatzweise der Anteil der kf-Werte <10-10 m/s an der Gesamtzahl der Werte der Stichprobe herangezogen.
- Medianwert und geometrischer Mittelwert: Beide Kennwerte sind sehr ähnlich. Stellvertretend auch für den geometrischen Mittelwert wird daher geprüft und dargestellt, ob der Medianwert <10-10 m/s oder <10-12 m/s ist (das Ergebnis für den geometrischen Mittelwert ist identisch).
- Schiefe: Als "klein" werden Schiefewerte zwischen -0,5 und 0,5 betrachtet.
- Kurtosis: Positiver Wert (je größer desto günstiger).

6.2.5 Graphische Darstellung von Auswertungsergebnissen

Übliche Darstellungsformen für die Merkmale einzelner Datenkollektive oder von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Parametern sind z. B. **Histogramme** oder **Verteilungsdiagramme**, die in Kapitel 7 und 8 häufiger verwendet werden. In vielen Abbildungen ist der für die Endlagerung in Frage kommende Tiefenbereich von 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche (Kapitel 6.2.3) hervorgehoben. In der Regel ist auch die gemäß Mindestanforderung AKEND (2002a) zu unterschreitende Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-10} m/s gekennzeichnet, in einigen Fällen zusätzlich die bei der abwägenden Beurteilung zu beachtende Grenze zwischen "günstiger" und "bedingt günstiger" Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-12} m/s (Kapitel 6.2.5).

Zusätzlich zu diesen üblichen Darstellungsformen werden zwei Diagrammtypen verwendet, die der näheren Erläuterung bedürfen, da sie weniger gebräuchlich sind:

Zur optischen Einschätzung, ob eine Stichprobe dem angenommenen Verteilungstyp entspricht, ob sie sich aus einem oder mehreren Datenkollektiven zusammensetzt oder welche qualitative Bedeutung Extremwerte haben, eignen sich **Wahrscheinlichkeitsdiagramme** (Abb. 6-2). Gegenüber Histogrammen haben sie u. a. den Vorteil, dass mehrere Stichproben gemeinsam in einer Abbildung dargestellt und optisch miteinander verglichen werden können.

In den Wahrscheinlichkeitsdiagrammen sind sogenannte "Erwartungswerte" oder "erwartete Werte" in Abhängigkeit von den Messwerten der zu untersuchenden Stichprobe aufgetragen. Dazu werden die Messwerte nach der Reihenfolge ihrer Höhe geordnet und für jeden Messwert die Wahrscheinlichkeit des zugehörigen Rangquantils bestimmt, gemäß

$$p = \frac{(i - 0{,}5)}{n}$$

p Rangwahrscheinlichkeit
r Rang
n Größe der Stichprobe

Mit der Funktion für die hier angenommene standardisierte Normalverteilung wird daraus für die dekadischen Logarithmen der Ausgangswerte der zum Messwert gehörende Erwartungswert berechnet. An der Anordnung der Erwartungswerte ist erkennbar, ob die Daten der Normalverteilung entsprechen bzw. ob es sich eher um eine homogene oder um eine komplex zusammengesetzte Stichprobe handelt: Liegen die Erwartungswerte annähernd auf einer das Diagramm diagonal von links unten nach rechts oben querenden Geraden, folgen die Daten dem zugrunde gelegten Verteilungstyp. Im Erwartungswert "0" fallen geometrischer Mittelwert und Medianwert zusammen. Einzelne Ausreißerwerte und Abweichungen von der Normalverteilung sind qualitativ leicht erkennbar.

In Abb. 6.2 sind zwei Wahrscheinlichkeitsdiagramme mit übereinstimmendem Abzissenmaßstab den entsprechenden Histogrammen der Häufigkeitsverteilungen gegenüber gestellt. Das Diagramm links zeigt beispielhaft die Erwartungswerte für eine k_f-Wert-Stichprobe, die - erkennbar an der Anordnung entlang einer Geraden - näherungsweise Normalverteilung aufweist, allerdings mit einigen Unregelmäßigkeiten und Ausreißern. Die Stichprobe im rechten Diagramm weicht dagegen insgesamt deutlich von der linearen Anordnung und damit von der Normalverteilung ab. Einzelne Abschnitte mit linear angeordneten Datenpunkten deuten aber daraufhin, dass sie normalverteilte Anteile enthält.

Ein weiteres wichtiges Instrument zur graphischen Veranschaulichung statistischer Eigenschaften einzelner Stichproben und der Unterschiede zwischen verschiedenen Stichproben sind sogenannte **Boxplots** ("Kastendigramme"). Die Elemente dieser Abbildungen sind in Abb. 6-3 erläutert.

Boxplots erlauben die direkte visuelle Beurteilung, wieweit sich die Kernbereiche der Werte (die mittleren 50 Prozent der Werte einer Verteilung zwischen 1. und 3 Quartil) verschiedener Stichproben, z. B. die k_f-Werte verschiedener Gesteinstypen, überschneiden und insbesondere, ob sich die Medianwerte verschiedener Stichproben signifikant unterscheiden. Das ist dann der Fall, wenn sich die in den Boxplots durch die Kerbe um den Medianwert gekennzeichneten 95-Prozent-Vertrauensintervalle der Medianwerte verschiedener Stichproben nicht überschneiden.

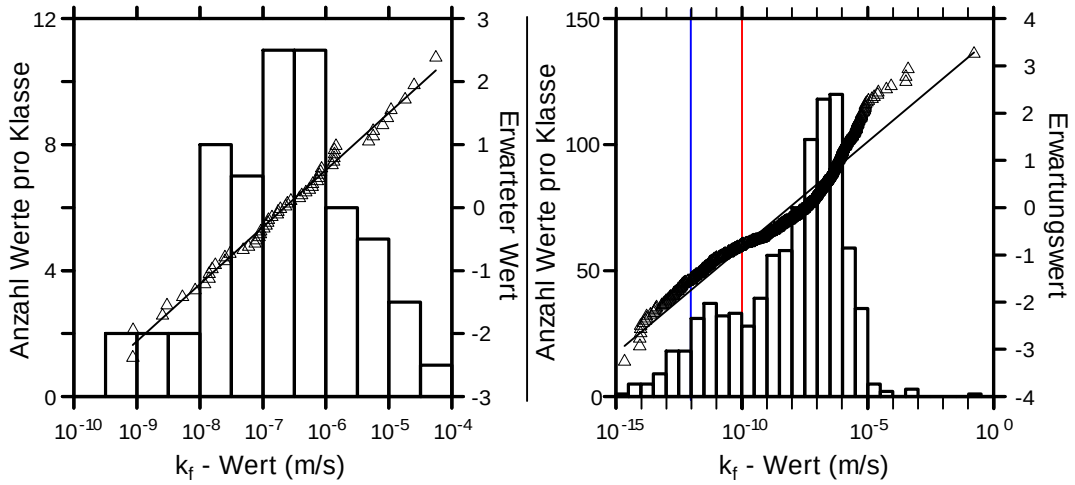
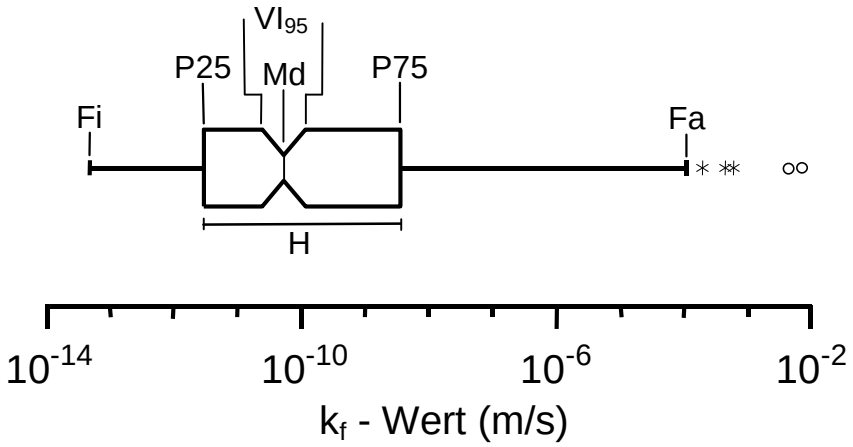


Abb. 6-2 Wahrscheinlichkeitsdiagramme und Histogramme zur Veranschaulichung der Häufigkeitsverteilungen von k_f-Wert-Stichproben mit (annähernder) Normalverteilung (links) bzw. deutlich abweichender Verteilung der Werte

Vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Gebirgsdurchlässigkeit $<10^{-10}$ m/s) bzw. die Grenze zwischen "günstiger" und "bedingt günstiger" Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (10^{-12} m/s) gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
Schräge Geraden: Regressionsgeraden der Erwartungswerte



Md	Medianwert (50. Perzentil bzw. 2. Quartil)
VI_{95}	95-%-Vertrauensintervall des Medianwertes (nicht in allen Boxplots ausgeschieden)
P25	25. Perzentil (1. Quartil)
P75	75. Perzentil (3. Quartil)
H	P75 - P25 (absolut)
Fi	P25 - (1,5 ∗ H) Fa P75 + (1,5 ∗ H)
∗	<Fi, aber >[P25 - (3 ∗ H)] oder >Fa, aber <[P75 + (3 ∗ H)]
○	<[P25 - (3 ∗ H)] oder >[P75 + (3 ∗ H)]

Abb. 6-3 Erläuterung der Elemente von Boxplots

6.2.6 Behandlung der Faktoren mit Einfluss auf die Ergebnisse hydraulischer Tests

Die in Kapitel 4.1 und 4.2 beschriebenen Faktoren mit Einfluss auf die k_f-Werte bzw. Spezifischen Speicherkoeffizienten werden bei der Datenauswertung und der Ergebnisdarstellung in den Kapiteln 7 und 8 wie folgt berücksichtigt, soweit dies auf Grund der Datenlage möglich und für die Interpretation der Ergebnisse sinnvoll ist:

Geowissenschaftliche (gesteinsbezogene) Faktoren:

- Gesteinszusammensetzung: Gesteinstypbezogen,
- Vergesellschaftung eines Hauptgesteinstyps mit anderen Gesteinstypen: Gesteinstypbezogen,
- Diagenese bzw. schwache Metamorphose: Gesteinstypbezogen,
- Gefügestörungen (Klüfte und Störungszonen): Gesteinstypbezogen, insbesondere bei kristallinen Gesteinen Unterscheidung der Kategorien "intakt", "gestört", "keine Angabe" (Kapitel 4.1),

- Testtiefe: Gesteinstypübergreifend und gesteinstypbezogen als Position der Mitte des Testintervalls unter Geländeoberfläche (m u. G.), außerdem Tiefenbereiche <300 m unter Geländeoberfläche, 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche und >1.500 m unter Geländeoberfläche (Kapitel 6.2.3),
- Untersuchungsgebiet als integrales Merkmal für im einzelnen unbekannte Einflussfaktoren: Gesteinstypbezogen.

Verfahrensbezogene Faktoren:

- Reichweite: Gesteinstypübergreifend und gesteinstypbezogen über die Skalenbereiche "kleinskalig" (bis ca. 10 m), "mittelskalig" etwa 10 - 100 m), "großskalig" (>100 m), die bestimmten Testverfahren zugeordnet sind (Kapitel 4.2),
- Länge des Testintervalls als Maß für Mächtigkeit des durch einen Test beeinflussten Gebirgsbereich: Gesteinstypübergreifend.

Mit Ausnahme der Testtiefe sind auswertbare Daten bzw. Informationen zu den geowissenschaftlichen Faktoren nur bei bestimmten Zielsetzungen der Untersuchungen erhoben worden und liegen daher nur zu einzelnen Gesteinstypen bzw. einzelnen Untersuchungsgebieten vor. Die in Kapitel 4.2 diskutierte Orientierung der Teststrecke in Bezug auf gesteinstypspezifische Trennfugensysteme (Schichtung, Foliation) wird mangels Daten nicht systematisch behandelt. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die weit überwiegende Anzahl der vorliegenden k_f-Werte die Durchlässigkeit parallel zu solchen Gefügeelementen betrifft.

7 Auswertung Gebirgsdurchlässigkeit

7.1 Gesteinstypübergreifende Auswertung

Ziele

Mit der gesteinstypübergreifenden Auswertung der vorliegenden k_f-Werte werden drei Ziele verfolgt: Zunächst werden die statistischen Verteilungen der k_f-Werte insgesamt und die Verteilungen der neun unterschiedenen Hauptgesteinstypen unter Berücksichtigung der Kennwerte der Verteilungen beschrieben (Kapitel 7.1.1) und die Bedeutung einiger verfahrensbezogener und geowissenschaftlicher Faktoren mit möglichem Einfluss auf die ermittelten k_f-Werte abgeschätzt (Kapitel 7.1.2). Die Verteilungsmuster und die statistischen Kennwerte der Verteilungen werden anschließend dazu benutzt, um etwaige Unterschiede zwischen den k_f-Wert-Verteilungen der verschiedenen Gesteinstypen zu identifizieren und auf Signifikanz zu prüfen. Dabei werden - anders als bei der Kriterienentwicklung in Kapitel 9 - alle Hauptgesteinstypen berücksichtigt (Kapitel 7.1.3). Abschließend werden die Hauptgesteinstypen anhand der Verteilungen und ihrer Kennwerte an den auf die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gerichteten Anforderungen des AkEnd gemessen und im Hinblick auf die Erfüllung dieser Anforderungen miteinander verglichen (Kapitel 7.1.4).

Parameterauswahl

In den ausgewerteten Quellen wird zur Quantifizierung der Gebirgsdurchlässigkeit entweder die Transmissivität oder der k_f-Wert benutzt. Da in die Transmissivität die Mächtigkeit des Grundwasserleiters bzw. die Länge des Testintervalls eingeht, ist sie für die vergleichende Beurteilung von Gesteinskörpern nur dann geeignet, wenn die Tests mit einheitlicher Intervalllänge durchgeführt werden. Das war beim ausgewerteten Datenmaterial nur bei wenigen Untersuchungskampagnen der Fall (Kapitel 7.1.2.2). Die Beurteilung der Gebirgsdurchlässigkeit stützt sich daher allein auf die k_f-Werte, die allerdings zum Teil aus Transmissivität und Länge des Testintervalls berechnet worden sind. Dieses Vorgehen ist nicht zuletzt auch deswegen gerechtfertigt, weil beide Parameter auf Grund ihrer engen Verknüpfung erwartungsgemäß hoch miteinander korreliert sind, und zwar sowohl bei den Daten der Datenbasis für die Hauptgesteinstypen insgesamt als auch bei den Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche. Zudem ist der k_f-Wert von dem verfahrenstechnischen Einflussfaktor Länge des Testintervalls offenbar weniger abhängig als die Transmissivität (Tab. 7-4).

Auf die Beziehungen zwischen k_f-Werten und den Faktoren Testtiefe und Länge des Testintervalls wird im Detail in Kapitel 7.1.2 eingegangen.

		n	Min	Max	Md	MW_A	MW_G	VI_{95UN}	VI_{95OB}	SD	Sf	K
gesamte Datenbasis	*Gneis*	472	$4{,}70 * 10^{-15}$	$8{,}68 * 10^{-05}$	$3{,}99 * 10^{-09}$	$9{,}68 * 10^{-07}$	$2{,}11 * 10^{-09}$	$1{,}34 * 10^{-09}$	$3{,}30 * 10^{-09}$	$1{,}45 * 10^{02}$	-0,27	-0,84
	Granit	890	$2{,}23 * 10^{-15}$	$1{,}64 * 10^{-01}$	$3{,}15 * 10^{-08}$	$1{,}86 * 10^{-04}$	$7{,}71 * 10^{-09}$	$5{,}56 * 10^{-09}$	$1{,}07 * 10^{-08}$	$1{,}45 * 10^{02}$	-0,74	-0,07
	Tuff/Tuffit	260	$5{,}00 * 10^{-16}$	$2{,}08 * 10^{-04}$	$1{,}16 * 10^{-08}$	$3{,}88 * 10^{-06}$	$1{,}78 * 10^{-09}$	$7{,}88 * 10^{-10}$	$4{,}00 * 10^{-09}$	$1{,}44 * 10^{02}$	-0,23	-1,38
	Sandstein	67	$5{,}00 * 10^{-13}$	$1{,}30 * 10^{-03}$	$2{,}75 * 10^{-07}$	$5{,}01 * 10^{-05}$	$2{,}11 * 10^{-07}$	$5{,}56 * 10^{-08}$	$8{,}04 * 10^{-07}$	$7{,}75 * 10^{02}$	-0,53	-0,60
	Ton/Tonstein	676	$5{,}50 * 10^{-15}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$1{,}20 * 10^{-06}$	$5{,}58 * 10^{-06}$	$1{,}26 * 10^{-07}$	$8{,}38 * 10^{-08}$	$1{,}90 * 10^{-07}$	$2{,}39 * 10^{02}$	-1,24	0,46
	Mergelstein	199	$5{,}00 * 10^{-14}$	$5{,}94 * 10^{-04}$	$6{,}67 * 10^{-11}$	$7{,}62 * 10^{-06}$	$1{,}63 * 10^{-10}$	$8{,}14 * 10^{-11}$	$3{,}27 * 10^{-10}$	$2{,}30 * 10^{02}$	0,77	0,39
	Kalkstein	83	$3{,}89 * 10^{-13}$	$8{,}28 * 10^{-04}$	$2{,}20 * 10^{-07}$	$3{,}74 * 10^{-05}$	$1{,}28 * 10^{-07}$	$4{,}37 * 10^{-08}$	$3{,}75 * 10^{-07}$	$1{,}45 * 10^{02}$	-0,60	0,12
	Anhydrit	70	$1{,}96 * 10^{-14}$	$1{,}96 * 10^{-06}$	$1{,}96 * 10^{-12}$	$5{,}02 * 10^{-08}$	$6{,}92 * 10^{-12}$	$2{,}19 * 10^{-12}$	$2{,}14 * 10^{-11}$	$1{,}20 * 10^{02}$	0,83	-0,17
	Steinsalz	75	$9{,}81 * 10^{-17}$	$2{,}94 * 10^{-10}$	$5{,}50 * 10^{-14}$	$4{,}61 * 10^{-12}$	$6{,}41 * 10^{-14}$	$3{,}88 * 10^{-14}$	$1{,}06 * 10^{-13}$	$0{,}89 * 10^{01}$	0,37	3,88
	alle	2.792	$9{,}81 * 10^{-17}$	$1{,}64 * 10^{-01}$	$2{,}50 * 10^{-08}$	$6{,}41 * 10^{-05}$	$5{,}82 * 10^{-09}$	$4{,}66 * 10^{-09}$	$7{,}82 * 10^{-09}$	$4{,}02 * 10^{02}$	-0,47	-0,82
300 - 1.500 m u. G.	Gneis	271	$4{,}70 * 10^{-15}$	$1{,}20 * 10^{-05}$	$3{,}00 * 10^{-10}$	$2{,}28 * 10^{-07}$	$4{,}27 * 10^{-10}$	$2{,}35 * 10^{-10}$	$7{,}75 * 10^{-10}$	$1{,}47 * 10^{02}$	0,04	-1,05
	Granit	605	$2{,}23 * 10^{-15}$	$4{,}00 * 10^{-04}$	$2{,}80 * 10^{-08}$	$1{,}07 * 10^{-06}$	$5{,}34 * 10^{-09}$	$3{,}60 * 10^{-09}$	$7{,}93 * 10^{-09}$	$1{,}42 * 10^{02}$	-0,73	-0,41
	Tuff/Tuffit	228	$5{,}00 * 10^{-16}$	$2{,}08 * 10^{-04}$	$4{,}63 * 10^{-09}$	$3{,}10 * 10^{-06}$	$7{,}99 * 10^{-10}$	$3{,}40 * 10^{-10}$	$1{,}88 * 10^{-09}$	$6{,}95 * 10^{02}$	-0,11	-1,44
	Sandstein	31	$5{,}00 * 10^{-13}$	$1{,}65 * 10^{-04}$	$1{,}60 * 10^{-08}$	$7{,}85 * 10^{-06}$	$1{,}16 * 10^{-08}$	$2{,}08 * 10^{-09}$	$6{,}47 * 10^{-08}$	$1{,}09 * 10^{02}$	-0,08	0,18
	Ton/Tonstein	36	$5{,}50 * 10^{-15}$	$2{,}05 * 10^{-10}$	$9{,}50 * 10^{-13}$	$1{,}04 * 10^{-11}$	$8{,}05 * 10^{-13}$	$3{,}28 * 10^{-13}$	$1{,}98 * 10^{-12}$	$1{,}42 * 10^{01}$	-0,06	-0,91
	Mergelstein	157	$5{,}00 * 10^{-14}$	$3{,}00 * 10^{-05}$	$3{,}07 * 10^{-11}$	$2{,}15 * 10^{-07}$	$5{,}68 * 10^{-11}$	$3{,}05 * 10^{-11}$	$1{,}06 * 10^{-10}$	$5{,}20 * 10^{01}$	0,43	-0,20
	Kalkstein	37	$3{,}89 * 10^{-13}$	$1{,}00 * 10^{-05}$	$5{,}77 * 10^{-09}$	$5{,}57 * 10^{-07}$	$3{,}78 * 10^{-09}$	$8{,}51 * 10^{-10}$	$1{,}68 * 10^{-08}$	$8{,}76 * 10^{01}$	-0,40	-0,51
	Anhydrit	68	$1{,}96 * 10^{-14}$	$1{,}96 * 10^{-06}$	$1{,}96 * 10^{-12}$	$5{,}17 * 10^{-08}$	$6{,}46 * 10^{-12}$	$2{,}00 * 10^{-12}$	$2{,}04 * 10^{-11}$	$1{,}22 * 10^{02}$	0,83	-0,12
	Steinsalz	75	$9{,}81 * 10^{-17}$	$2{,}94 * 10^{-10}$	$5{,}50 * 10^{-14}$	$4{,}61 * 10^{-12}$	$6{,}41 * 10^{-14}$	$3{,}88 * 10^{-14}$	$1{,}06 * 10^{-13}$	$0{,}89 * 10^{01}$	0,37	3,88
	alle	1.508	$9{,}81 * 10^{-17}$	$4{,}00 * 10^{-04}$	$1{,}00 * 10^{-09}$	$1{,}14 * 10^{-06}$	$5{,}45 * 10^{-10}$	$4{,}06 * 10^{-10}$	$7{,}29 * 10^{-10}$	$3{,}81 * 10^{02}$	-0,16	-1,13

n - Anzahl Messwerte, **Min** - Minimalwert (m/s), **Max** - Maximalwert (m/s), **Md** - Medianwert (m/s), MW_A - Arithmetischer Mittelwert (m/s), MW_G - Geometrischer Mittelwert (m/s), VI_{95UN} / VI_{95OB} - Untergrenze / Obergrenze des 95-%-Vertrauensintervalls von MW_G *(m/s)*, **SD** - Standardabweichung, **Sf** - Schiefe, **K** - Kurtosis, farblich hinterlegt: signifikante Sf- bzw. K-Werte ([Sf bzw. K] / [Standardfehler Sf bzw. K] >2)

Tab. 7-1 Statistische Kenndaten der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen für die gesamte Datenbasis sowie für die Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche
Parameter: Kennwerte aus den dekadischen Logarithmen der Ausgangsdaten berechnet
Gesteinstyp: berechnete Kennwerte mangels Normalverteilung mit beschränkter Aussagekraft (s. Text)

7.1.1 Häufigkeitsverteilungen und statistische Kennwerte der k_f-Werte

Typ der Häufigkeitsverteilungen

Tab. 7-1 enthält die statistischen Kennwerte der k_f-Wert-Verteilungen der einzelnen Hauptgesteinstypen, unterschieden nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus der wahrscheinlichen Endlagertiefe zwischen 300 und 1.500 m unter Geländeoberfläche. Angegeben sind auch die gesteinsübergreifend für die Daten aller Hauptgesteinstypen bestimmten Kennwerte.

Auf Grund der geographisch heterogenen Herkunft und der unterschiedlichen möglichen Beeinflussung der Messwerte durch natürliche und verfahrensbezogene Einflussfaktoren, darf nicht a priori von der in Kapitel 6.1.2 vermuteten Normalverteilung der k_f-Werte der einzelnen Gesteinstypen ausgegangen werden. Bei der Identifizierung von Unterschieden zwischen den Stichproben mit Verfahren, die auf der Annahme Normalverteilung beruhen, ist außerdem ein Einfluss des sehr unterschiedlichen Stichprobenumfangs auf das Ergebnis zu befürchten. Daher wurde zunächst mit dem verteilungsfreien Test nach Kolmogorov-Smirnov überprüft, wieweit bei den k_f-Werten der Hauptgesteinstypen Normalverteilung vorliegt. Der Test liefert Wahrscheinlichkeiten dafür, dass die Häufigkeitsverteilungen der k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen sowie der Hauptgesteinstypen insgesamt ihrer Form nach der Normalverteilung entsprechen.

	Gesamte Datenbasis		**300 - 1.500 m u. G.**	
	Anzahl Werte	Wahrscheinlichkeit	Anzahl Werte	Wahrscheinlichkeit
Gneis	472	0,008	271	0,044
Granit	890	$1{,}19 * 10^{-07}$	605	$1{,}19 * 10^{-07}$
Tuff/Tuffit	260	$2{,}44 * 10^{-06}$	228	$7{,}75 * 10^{-07}$
Sandstein	67	**0,107**	31	**0,764**
Ton/Tonstein	676	$1{,}19 * 10^{-07}$	36	**0,418**
Mergelstein	199	0,063	157	**0,313**
Kalkstein	83	**0,172**	37	**0,458**
Anhydrit	70	0,040	68	0,032
Steinsalz	75	0,001	75	0,001
alle	2.792	$1{,}19 * 10^{-07}$	1.508	$1{,}19 * 10^{-07}$

Tab. 7-2 Kolmogorov-Smirnov-Test: Wahrscheinlichkeiten für die Übereinstimmung der k_f-Wert-Verteilungen der Hauptgesteinstypen mit der vermuteten Normalverteilung

farblich hervorgehoben: Wahrscheinlichkeit >1 %, zusätzlich Fettdruck: Wahrscheinlichkeit ≥10 %

Der Kolmogorov-Smirnov-Test hat folgende Ergebnisse (Tab. 7-2):

- Die Gesamtheit der k_f-Werte aller Hauptgesteinstypen entspricht bei beiden Datensätzen (Datenbasis insgesamt und Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche) nicht der Normalverteilung.
- Von den Stichproben für einzelne Hauptgesteinstypen fehlt bei Granit und Tuff/ Tuffit in beiden Datensätzen jegliche Wahrscheinlichkeit für Übereinstimmung mit der Normalverteilung. Deutlich unter 1 % liegt sie bei Steinsalz, Gneis und Anhydrit unter 5 %.
- Nur bei zwei Gesteinstypen der Datenbasis insgesamt, Sandstein und Kalkstein, übersteigt die Wahrscheinlichkeit für Normalverteilung 10 %.
- Bei den Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche ist die Übereinstimmung der Werteverteilungen der einzelner Hauptgesteinstypen mit der Normalverteilung deutlich besser als bei denen aus der Datenbasis insgesamt. Ausgenommen sind die Gesteinstypen, bei denen beide Datensätze identisch sind oder weitgehend übereinstimmen (Steinsalz, Anhydrit, Tuff/Tuffit). Bei Sandstein, Ton/Tonstein, Mergelstein und Kalkstein ist die Wahrscheinlichkeit für Normalverteilung hoch.
- Die größten Unterschiede zwischen den gesteinstypbezogenen Stichproben aus der Datenbasis insgesamt bzw. den Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche treten bei Ton/Tonstein auf. Dies ist erster Ausdruck der deutlichen Tiefenabhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit dieses Gesteinstyps (Kapitel 7.2.5).

Die heterogenen Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests spiegeln sich auch in den graphischen Darstellungen der Häufigkeitsverteilungen wider: Die Histogramme und Wahrscheinlichkeitsdiagramme der k_f-Werte aller Hauptgesteinstypen (Abb. 7-2) weisen ausgeprägte Zweigipfligkeit der Verteilungen auf. Entsprechendes gilt für die k_f-Werte einiger Gesteinstypen (Abb. 7-3 u. 7-4). Andererseits ist insbesondere bei den Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche bei einigen Gesteinstypen ein eher regelmäßiger Histogrammaufbau erkennbar.

Die deutlich höhere Übereinstimmungswahrscheinlichkeit bei den Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche gegenüber der Datenbasis insgesamt bei Sandstein, Tonstein, Mergelstein und Kalkstein geht mit einer deutlichen Abnahme des Stichprobenumfangs einher. Dies ist jedoch offenbar nicht der Hauptgrund für die Wahrscheinlichkeitsänderung; denn bei anderen Gesteinstypen mit deutlicher Abnahme des Stichprobenumfangs ist eine vergleichbare Änderung der Wahrscheinlichkeit nicht zu beobachten (Gneis, Granit).

Insgesamt bestehen zwischen den einzelnen Hauptgesteinstypen im Hinblick auf die Bestätigung der Hypothese Normalverteilung also deutliche Unterschiede. Die in Kapitel 6.1.1 definierten Grundgesamtheiten, also alle k_f-Werte eines Gesteinstyps,

weisen danach offenkundig keine Normalverteilung auf. Bei Auflösung der Grundgesamtheiten in kleinere Datensätze werden die Ursachen deutlich:

In Abb. 7-1 sind die unter Annahme von Normalverteilung errechneten Erwartungswerte für die k_f-Werte aus drei von 18 Granit-Untersuchungsgebieten (Lac du Bonnet, Schwarzwald und Tono) den Granit-Werten insgesamt gegenübergestellt. Nach dem Lagebezug der Datenpunkte dieser Stichproben zur jeweiligen Regressionsgeraden zu urteilen kommen die Werte aus den drei Untersuchungsgebieten der Normalverteilung in unterschiedlichem Ausmaß nahe (Kapitel 6.2.5). Insbesondere für die Schwarzwald-Werte darf danach Normalverteilung angenommen werden. Die Werte für Granit insgesamt sind dagegen nicht auf einer Geraden angeordnet, wie das bei Normalverteilung näherungsweise der Fall wäre.

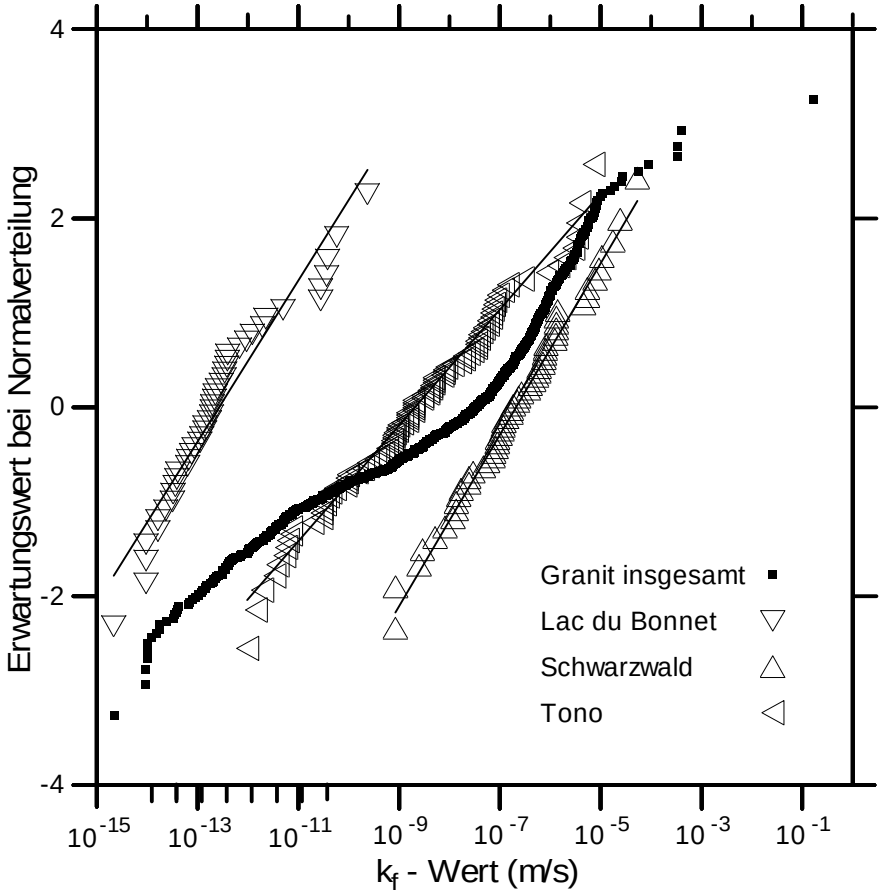


Abb. 7-1 Wahrscheinlichkeitsdiagramme für verschiedene Stichproben der k_f-Werte von Granit (Granit insgesamt sowie gesondert die Daten aus den Untersuchungsgebieten Lac du Bonnet, Kanada, Schwarzwald, Deutschland, und Tono, Japan)

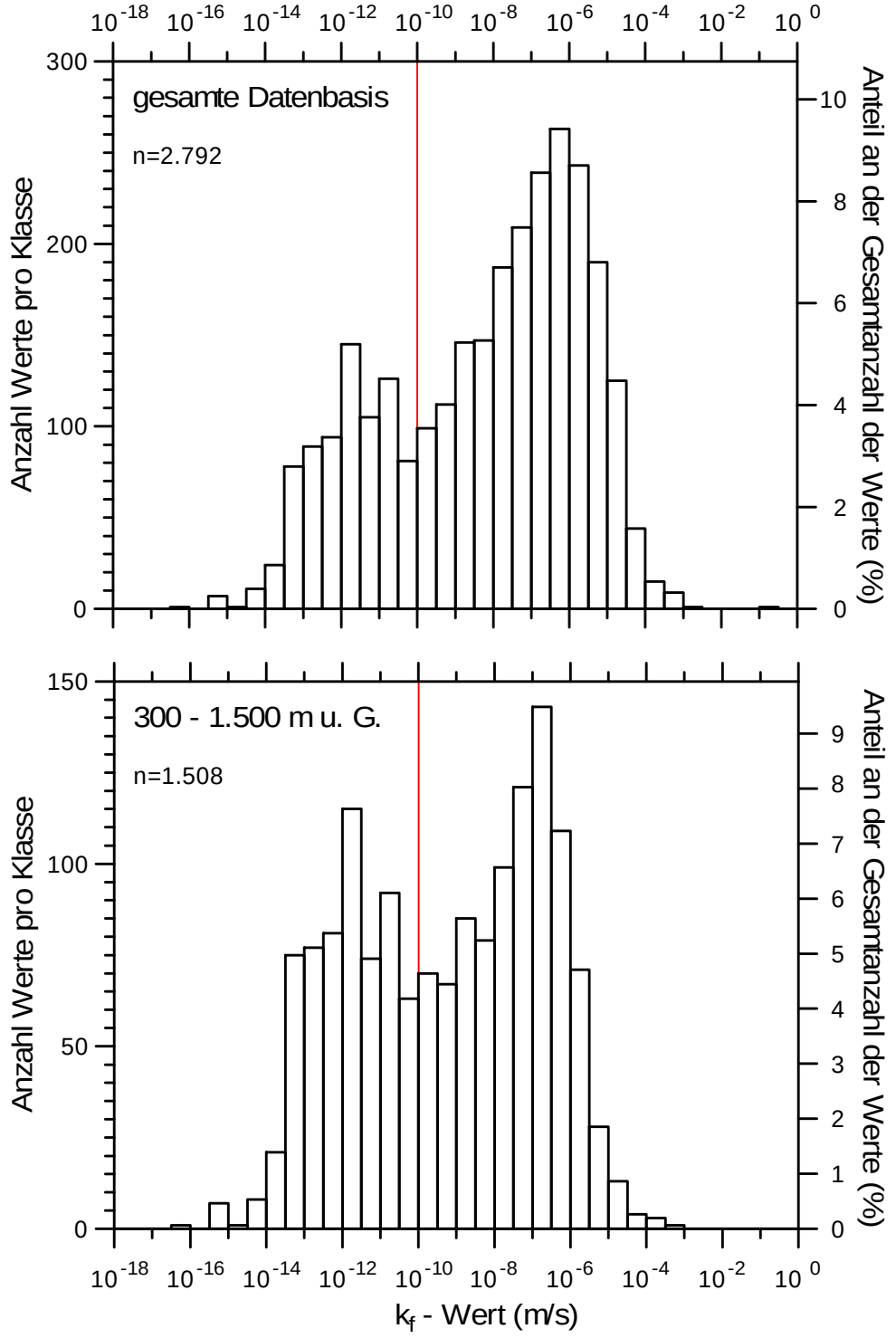


Abb. 7-2 Histogramme der k_f-Werte aller Hauptgesteinstypen (gesamte Datenbasis und Tiefenbereich 300 bis 1.500 m u. G.)

oben: Gesamte Datenbasis
unten: Tiefenbereich 300 - 1.500 m u. G.
vertikale Linien bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

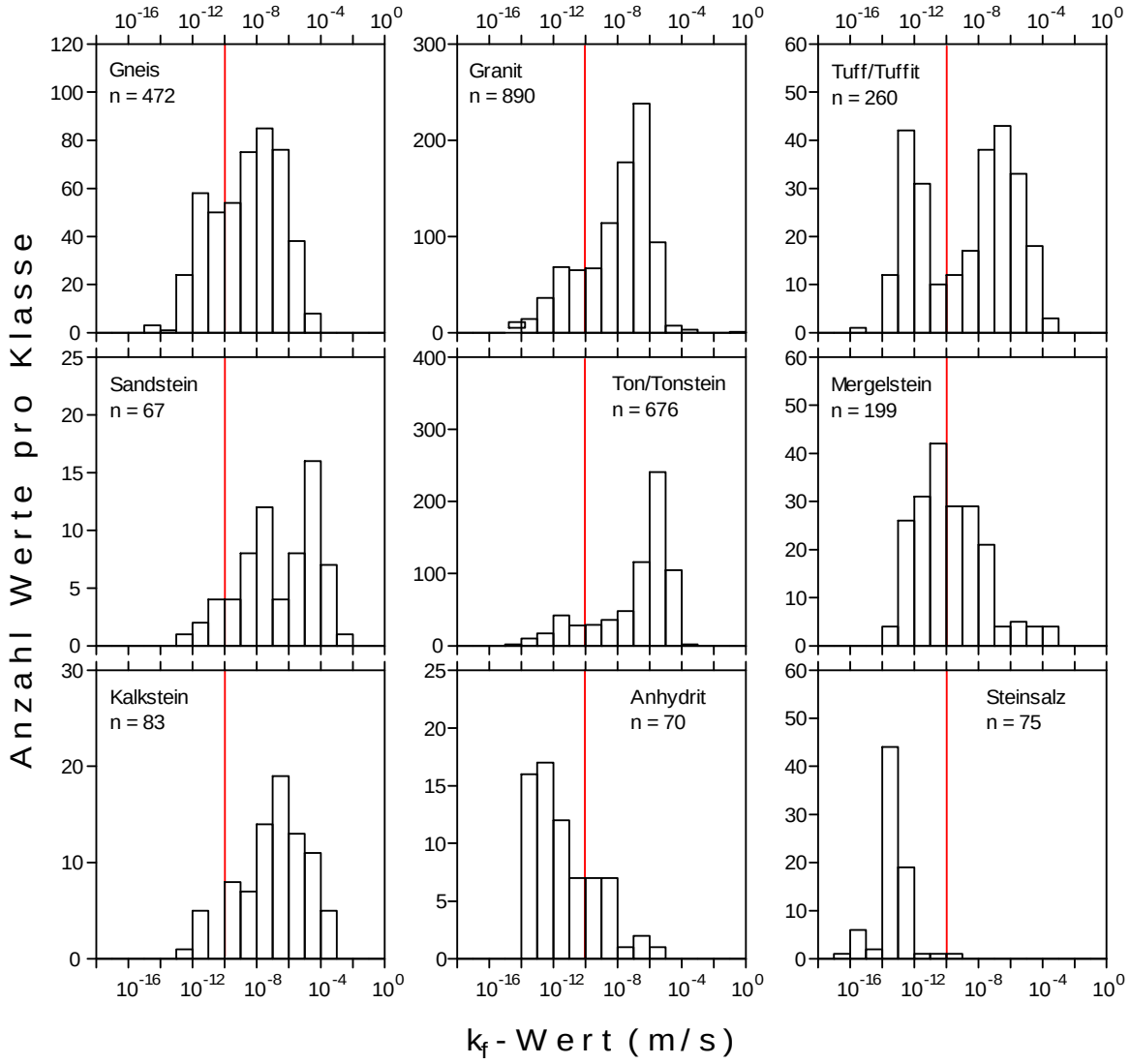


Abb. 7-3 Histogramme der k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen (gesamte Datenbasis)

vertikalen Linien bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Diese optische Einschätzung wird durch die Prüfung der jeweiligen Datensätze auf Normalverteilung nach Kolmogorov-Smirnov bestätigt. Danach beträgt nämlich die Wahrscheinlichkeit für Normalverteilung bei den Schwarzwalddaten 93 %, bei den Daten aus dem Untersuchungsgebiet Lac du Bonnet 22 %, bei den Tono-Daten 2 % und bei den Granitdaten insgesamt 10^{-07}. Auch ohne auf mögliche Ursachen im Detail einzugehen wird angesichts der Unterschiede zwischen den Verteilungen der Stichproben aus den drei Untersuchungsgebieten deutlich, dass die Zusammenfas-

sung aller 18 untersuchungsgebietsbezogenen Granit-Datensätze nur zufällig zu Normalverteilung der Granitwerte insgesamt führen kann. Damit wäre wohl erst nach Erfassung einer noch größeren Anzahl von Granit-Gesteinskörpern zu rechnen.

Vergleichbare Ergebnisse ergeben sich auch für die anderen Gesteinstypen. Besonders auffällig ist in dieser Hinsicht Tuff/ Tuffit (Abb. 7-3 u. 7-4): Die ausgeprägte Zweigipfligkeit der k_f-Wert-Verteilung dieses Gesteinstyps entspricht der Herkunft der Daten aus nur zwei Untersuchungsgebieten (Kapitel 7.2.3).

Beschreibung der Datenbasis insgesamt

Die Anzahl der für die einzelnen Gesteinstypen vorliegenden k_f-Werte ist sehr unterschiedlich: Mit Abstand die meisten Daten wurden zu Granit aufgenommen, gefolgt von Ton/Tonstein und Gneis. Alle anderen Gesteinstypen sind mit weniger als 10 % am Datensatz beteiligt (Tab. 5-2).

Die gesteinstypübergreifende Bandbreite der k_f-Werte liegt bei rund 15 Größenordnungen. Die Verteilung ist ausgeprägt zweigipflig (Abb. 7-2). Das erste Maximum liegt bei etwa 10^{-12} m/s, das zweite bei etwa 10^{-07} bis 10^{-06} m/s. Das Häufigkeitsminimum zwischen den beiden Maxima befindet sich mit etwa 10^{-10} m/s im Bereich des vom AKEND (2002a) in der Mindestanforderung zur Gebirgsdurchlässigkeit festgelegten k_f-Wertes (Kapitel 6.2.4).

Außer bei Anhydrit und Steinsalz decken die Werte in der Datenbasis insgesamt bei den verschiedenen Gesteinstypen Bandbreiten von rund zehn Größenordnungen und mehr ab (Tab. 7-1). Wiederum abgesehen von Anhydrit und Steinsalz sowie dem auffällig hohen Maximalwert für Granit sind die Minimal- und Maximalwerte mit etwa $5 * 10^{-16}$ bis $5 * 10^{-14}$ bzw. $9 * 10^{-05}$ bis $6 * 10^{-04}$ m/s überraschend ähnlich. Die Minimalwerte liegen möglicherweise bereits im Bereich der Werte für die Gesteinsdurchlässigkeit. Bei Anhydrit beträgt die Spannweite der Werte dagegen nur ca. acht Größenordnungen, bei Steinsalz sogar nur gut sechs Größenordnungen. Die Maximalwerte sind bei diesen Gesteinstypen deutlich niedriger als bei den anderen Gesteinstypen, bei Steinsalz sogar um ca. vier Größenordnungen. Für Steinsalz wurde zudem der niedrigste k_f-Wert überhaupt ermittelt. Überraschenderweise weist der Gesteinstyp Ton/Tonstein den höchsten Medianwert unter den dargestellten Gesteinstypen auf. Deutlich niedriger als bei den anderen Gesteinstypen sind die Medianwerte bei Mergelstein und Anhydrit sowie insbesondere Steinsalz.

Die Histogramme einiger Hauptgesteinstypen zeigen (Abb. 7-3), dass deren k_f-Werte - wie die Daten der Hauptgesteinstypen insgesamt - eine mehr oder weniger ausgeprägte bimodale Verteilung oder andere Abweichungen von der Normalverteilung aufweisen. Das gilt insbesondere für Tuff/Tuffit, bei dem auch die Lage der Häufigkeitsmaxima und des Häufigkeitsminimums mit der Verteilung der Werte aller Ge-

steinstypen nahezu übereinstimmt. Auch bei den anderen Hauptgesteinstypen zeichnen sich zumindest Abweichungen von der "normalen" Verteilung ab.

Die Schiefe der Häufigkeitsverteilungen ist bei sechs der neun Gesteinstypen negativ. Ihr Häufigkeitsmaximum also gegenüber der (symmetrischen) "normalen" Verteilung mehr oder weniger deutlich in Richtung hoher Werte verschoben, bei den drei Gesteinstypen mit positiver Schiefe dagegen in Richtung auf niedrige Werte. Bei sechs Gesteinstypen sind die Schiefewerte signifikant (Kapitel 6.2.4). Besonders auffällig (und signifikant) ist die negative Schiefe bei Granit, Tonstein und Kalkstein, die positive Schiefe bei Mergelstein und Anhydrit.

Die errechneten Kurtosiswerte sind nur bei vier Gesteinstypen signifikant: Auffällig hoch (positiv) ist der Wert für Steinsalz, auffällig negativ dagegen die Werte für Gneis und Tuff/Tuffit.

Der Abgleich der Schiefe- und Kurtosiswerte mit den Ergebnissen des Kolmogorov-Smirnov-Tests (Tab. 7-2) und den Histogrammen in Abb. 7-3 macht allerdings deutlich, dass signifikante Schiefewerte auch auf weitergehende Abweichungen von der Normalverteilung (Bimodalität) und nicht nur ausgeprägte Schiefe bzw. Kurtosis einer ansonsten normalverteilen Stichprobe zurückgehen können. Unabhängig von der statistischen Interpretation sind solche Abweichungen Hinweis darauf, dass die jeweilige Stichprobe Daten umfasst, die in unterschiedlichem Ausmaß durch die in Kapitel 4 genannten (oder andere) Faktoren beeinflusst sein können.

Beschreibung der Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche

Die zu den Hauptgesteinstypen aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche vorliegenden Daten (Tab. 7-1) machen insgesamt gut die Hälfte der insgesamt vorliegenden k_f-Werte aus. Die gesteinstypbezogene Zusammensetzung dieser Daten ähnelt mit der Ausnahme von Ton/Tonstein derjenigen der Datenbasis insgesamt (Tab. 5-2). Ton/Tonstein ist dagegen nur mit einem Anteil von gut zwei Prozent vertreten (Datenbasis insgesamt: 24 %).

Die Häufigkeitsverteilung dieses Datensatzes (Abb. 7-1) ähnelt mit ausgeprägter Zweigipfligkeit stark derjenigen für die Datenbasis insgesamt. Die Positionen der Maxima und des Minimums stimmen damit nahezu überein. Das erste Maximum ist im Verhältnis zum zweiten deutlicher ausgeprägt als bei den Daten aus der gesamten Datenbasis. Dazu trägt vor allem Tuff/Tuffit bei, weil die k_f-Werte dieses im Gegensatz zu den meisten anderen Gesteinstypen überwiegend aus diesem Tiefenbereich stammen.

Die statistischen Kennwerte für Steinsalz, Anhydrit und Tuff/Tuffit sind mit denen der gesamten Datenbasis identisch bzw. nahezu identisch, weil alle k_f-Werte (Steinsalz)

bzw. ein großer Teil davon (Anhydrit, Tuff/Tuffit) aus diesem Tiefenbereich stammen. Bei den anderen Gesteinstypen treten mehr oder weniger ausgeprägte Unterschiede auf:

Bei Gneis, Granit, Sandstein, Mergelstein und Kalkstein sind die Maximalwerte und damit auch die Spannweiten der k_f-Werte sowie die Medianwerte und die arithmetischen und geometrischen Mittelwerte kleiner als bei der Datenbasis insgesamt. Bei Ton/Tonstein ist der Maximalwert sogar um rund sechs Größenordnungen niedriger. Dies schlägt sich auch in einem sehr kleinen arithmetischen und geometrischen Mittelwert und in sehr kleinen Medianwert nieder. Diese Werte sind nun die kleinsten nach Steinsalz.

Die Häufigkeitsverteilung der k_f-Werte ist bei den meisten Gesteinstypen ähnlich derjenigen für die Datenbasis insgesamt (Abb. 7-3 u. 7-4). Das gilt insbesondere für Granit und Mergelstein. Die Zweigipfligkeit der Verteilungen der Sandstein- und Gneis-Werte ist nun weniger deutlich ausgeprägt. Sehr auffällig ist dagegen der Unterschied zwischen den beiden Datensätzen bei Ton/Tonstein (Kapitel 7.2.5).

7.1.2 Einflussfaktoren

Bei den das Einflussvolumen bestimmenden Größen hydraulischer In-situ-Untersuchungen Versuchsreichweite und Länge des Testintervalls handelt es sich um verfahrensbezogene Faktoren, deren Bedeutung für die Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit (bzw. Transmissivität) daher gesteinstypübergreifend beurteilt wird. Das gilt auch für den Einflussfaktor Testtiefe (Kapitel 7.1.2.3), der aber wegen seiner geowissenschaftlichen Aspekte zusätzlich zusammen mit den übrigen geowissenschaftlichen Einflussfaktoren, im Rahmen der gesteinstypbezogenen Datenauswertung in Kapitel 7.2 behandelt wird.

7.1.2.1 Einflussfaktor Reichweite

Aus gezielten Untersuchungen ist der Einfluss der Art hydraulischer Tests auf das Ergebnis durchaus bekannt (Kapitel 3.2). Dafür können sowohl rein verfahrenstechnische Gründe verantwortlich sein als auch die unterschiedliche Reichweite verschiedener Versuche. Die ausgewerteten hydraulischen Daten stammen überwiegend aus Packerversuchen, und zwar vor allem Einbohrloch-Packerversuchen. Der größte Teil der Daten ist daher im Sinne der Unterscheidung in Kapitel 4.2 als kleinskalig anzusehen. Sie sind unter dem Gesichtspunkt räumlicher Repräsentativität gut miteinander vergleichbar. Wegen der geringen Ausdehnung des Einflussvolumens ist die räumliche Aussagekraft der Einzelwerte jedoch beschränkt.

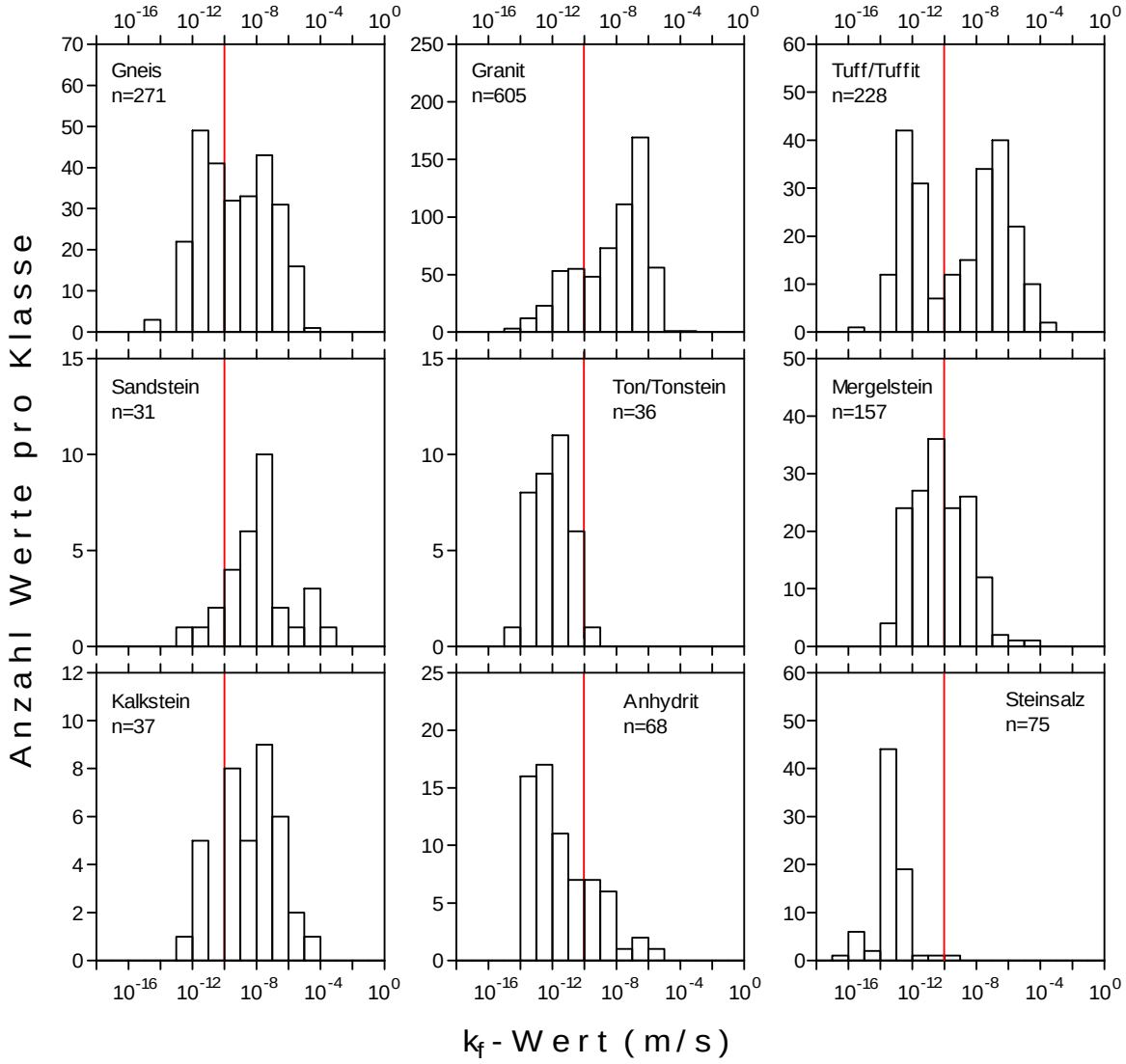


Abb. 7-4 Histogramme der k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen (Tiefenbereich 300 bis 1.500 m u. G.)

vertikale Linien bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Die Reichweite hydraulischer Tests ist außer vom Testverfahren auch von den hydraulischen Eigenschaften des getesteten Gesteinskörpers abhängig (Kapitel 4.2). Daher setzt die Beurteilung ihres Einflusses auf die Testergebnisse voraus, dass für Gesteinskörper mit weitgehend einheitlichen hydraulischen Eigenschaften Ergebnisse von In-situ-Untersuchungen mit unterschiedlichen Skalenbereichen der Reichweite vorliegen. Das ist nur bei zwei Untersuchungsgebieten mit unterschiedlichen Gesteinstypen der Fall (Tab. 7-3, Abb. 7-5 u. 7-6):

- Im Untersuchungsgebiet **Münchehagen** sind an unterkretazischen Ton- bzw. Siltsteinen sowohl Packertests mit geringer Reichweite als auch Pumpversuche mit

mittlerer bzw. großer Reichweite durchgeführt worden. Die Pumpversuche haben dabei im Mittel eine etwas höhere Durchlässigkeit (etwa 10-05 m/s) als die Packertests (etwa 10-06 m/s) ergeben. Die groß- und mittelskaligen Versuche haben im Gegensatz zu den kleinskaligen Packertests keine niedrigen kf-Werte (unter 10-07 m/s) geliefert. Die Bandbreite der Werte ist daher deutlich geringer als bei den Werten aus kleinskaligen Versuchen. Die Unterschiede werden damit erklärt, dass mit den klein- und mittelskaligen Tests im wesentlichen das Kluftsystem, mit den großskaligen Tests zusätzlich hydraulische wirksame Störungszonen erfasst worden sind (GRONEMEIER 1990).

- Beim Untersuchungsgebiet Grimsel sind die kleinskaligen Durchlässigkeitswerte ebenfalls mit Packerversuchen ermittelt worden. Die mittelskaligen Werte stammen aus Mehrbohrloch-Interferenzversuchen und die großskaligen aus Ventilationsversuchen. Die mittelskaligen Versuche sind gezielt in einem stark geklüfteten Bereich des Zentralen Aaregranits durchgeführt worden. Sie haben die höchsten Durchlässigkeitswerte geliefert (im Mittel ca. 10^{-07} m/s). Die Spannweite der Werte ist deutlich geringer als bei den Ergebnissen der andersskaligen Versuche. Insbesondere die Ergebnisse der kleinskaligen Packertests haben eine sehr große Bandbreite der Durchlässigkeitswerte geliefert. Sie ist auf engräumige Wechsel von unterschiedlich stark geklüftetem Gestein zurückzuführen. Die k_f-Werte aus großskaligen Tests liegen mit etwa 10^{-10} m/s innerhalb der Bandbreite der Werte aus den kleinskaligen Versuchen.

Diese Ergebnisse machen zwar den Zusammenhang zwischen der Reichweite hydraulischer Versuche und den Versuchsergebnissen deutlich, doch lässt sich daraus keine eindeutige oder gar allgemeingültige Ursache/Wirkung-Beziehung zwischen Reichweite und Gebirgsdurchlässigkeit ableiten; denn letztlich sind die Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Skalenbereiche weniger von diesen selbst als vielmehr von der unterschiedlichen hydraulischen Wirksamkeit der jeweils bevorzugt erfassten Gefügeelemente abhängig. Eine übergreifende Beziehung zwischen Reichweite und Durchlässigkeit ergibt sich daraus nicht.

7.1.2.2 Einflussfaktor Länge Testintervall

Die in der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit erfassten hydraulischen Tests sind mit sehr unterschiedlich langen Testintervallen durchgeführt worden (Kapitel 5.1). Zum weitaus größten Teil waren die Testintervalle allerdings zwischen 1 m und 100 m lang. Bei einigen Untersuchungskampagnen sind die Tests mit einheitlicher Intervalllänge durchgeführt worden. Sie sind für die großen Fallzahlen bei einigen Intervallängen verantwortlich (Abb. 7-7).

Untersuchungsgebiet (Gesteinstyp)	Skalenbereich	n	k_f-Werte (m/s)			
			Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Münchehagen (Ton-/Siltstein)	groß	18	$2{,}48 * 10^{-06}$	$8{,}45 * 10^{-05}$	$1{,}37 * 10^{-05}$	$1{,}83 * 10^{-05}$
	mittel	3	$2{,}80 * 10^{-06}$	$1{,}10 * 10^{-05}$	$4{,}47 * 10^{-06}$	$2{,}90 * 10^{-06}$
	klein	365	$7{,}00 * 10^{-11}$	$6{,}92 * 10^{-05}$	$2{,}19 * 10^{-06}$	$2{,}61 * 10^{-06}$
Grimsel (Granit)	groß	4	$5{,}00 * 10^{-12}$	$2{,}35 * 10^{-09}$	$1{,}59 * 10^{-10}$	$3{,}18 * 10^{-10}$
	mittel	153	$1{,}81 * 10^{-08}$	$6{,}71 * 10^{-06}$	$2{,}61 * 10^{-07}$	$2{,}71 * 10^{-07}$
	klein	43	$1{,}50 * 10^{-13}$	$4{,}38 * 10^{-07}$	$1{,}12 * 10^{-11}$	$5{,}50 * 10^{-12}$

Tab. 7-3 Statistische Kennwerte von k_f-Werten in Abhängigkeit vom Skalenbereich des Untersuchungsverfahrens am Beispiel der Untersuchungsgebiete Münchehagen (Ton- bzw. Siltstein) und Grimsel (Granit)

n: Anzahl der k_f-Werte
Skalenbereich: Definition Kapitel 4.2

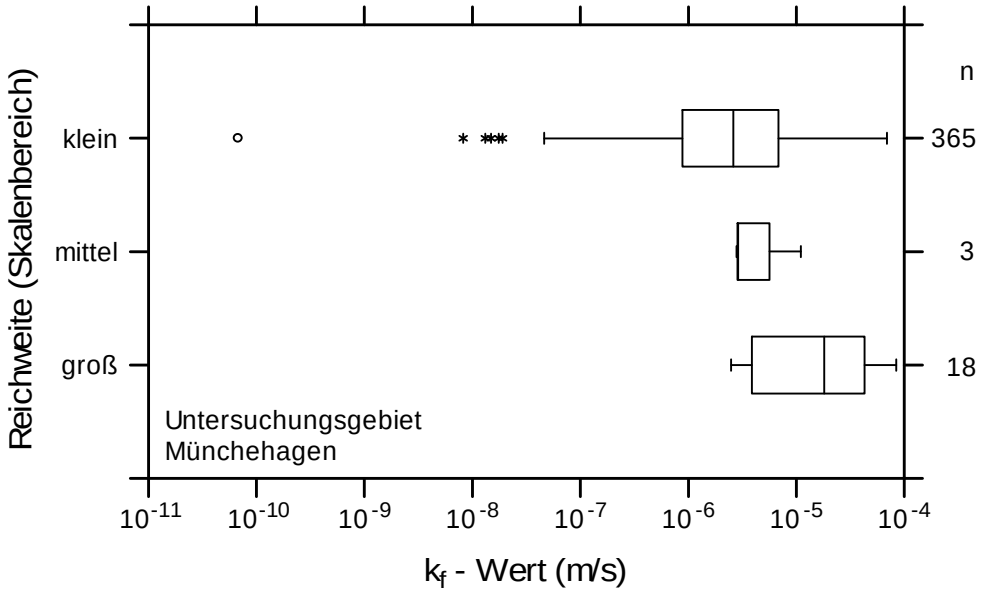


Abb. 7-5 Boxplots zum Vergleich der mit hydraulischen Tests unterschiedlicher Reichweite erhobenen k_f-Werte im Untersuchungsgebiet Münchehagen (Ton-/Siltstein)

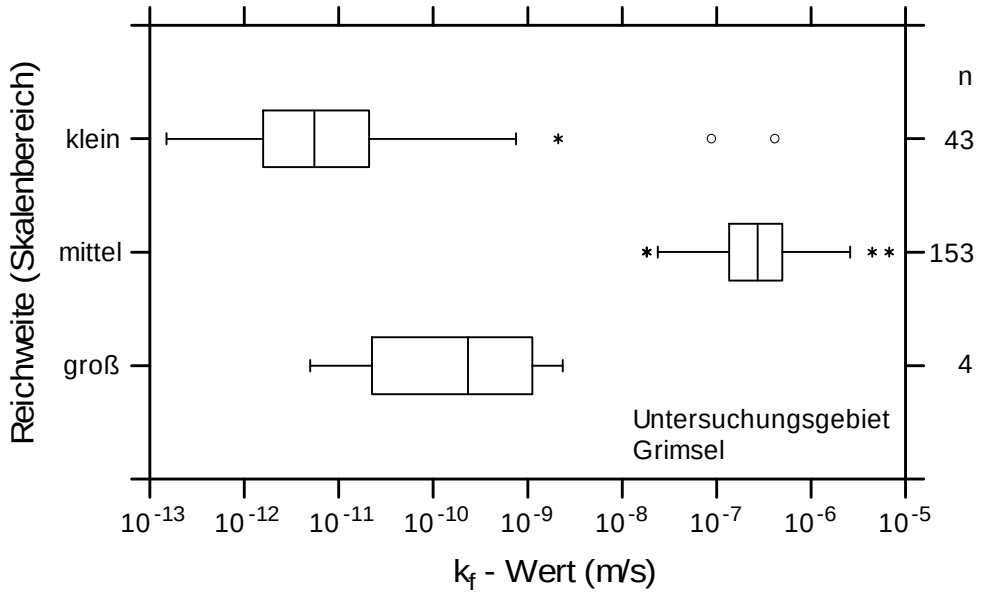


Abb. 7-6 Boxplots zum Vergleich der mit hydraulischen Tests unterschiedlicher Reichweite erhobenen k_f-Werte im Untersuchungsgebiet Grimsel (Granit)

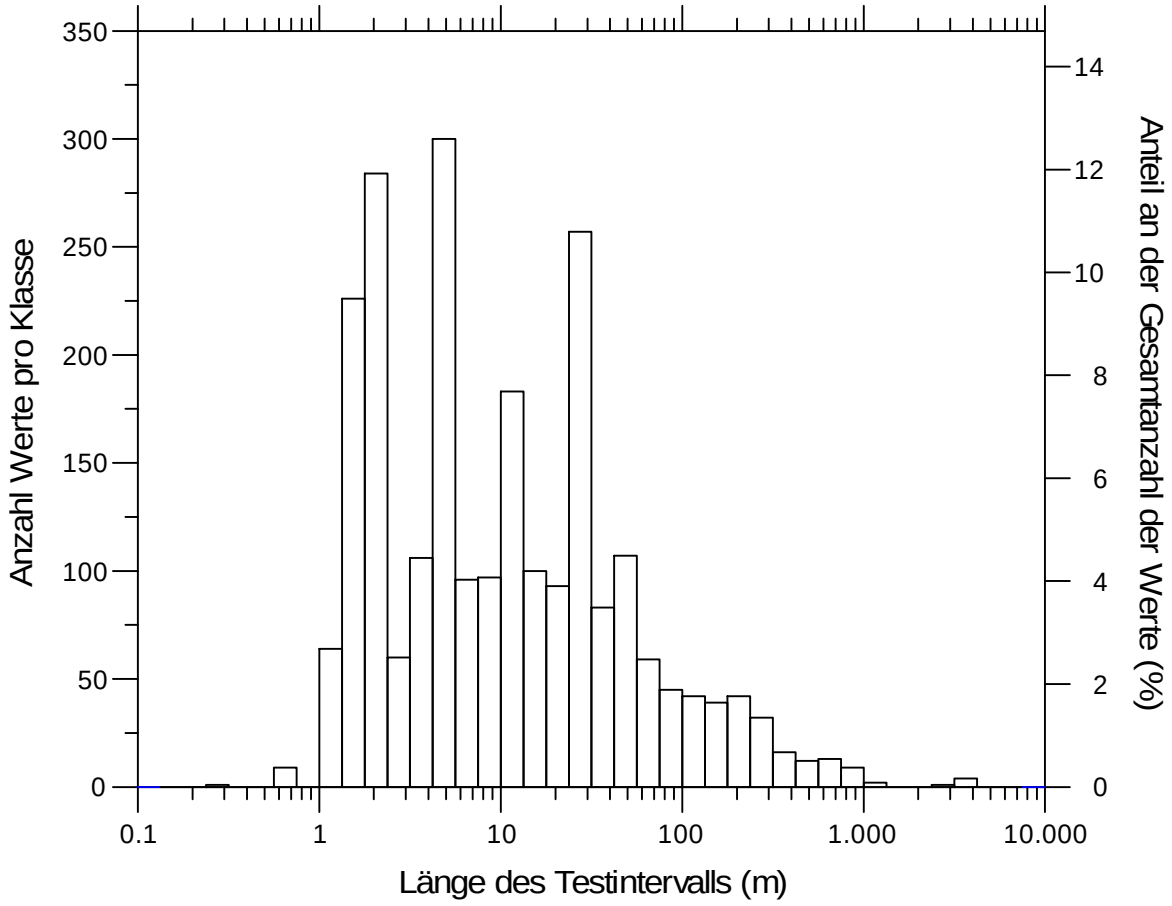


Abb. 7-7 Häufigkeitsverteilung der Längen der Testintervalle

dekadisch-logarithmischer Maßstab!

Aus den Korrelationskoeffizienten für k_f-Wert und Intervalllänge (Tab. 7-4) kann weder bei der Datenbasis insgesamt noch bei den Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche auf eine deutliche Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit von der Länge des Testintervalls geschlossen werden. Das bestätigt auch Abb. 7-8, in der sich die in den Häufigkeitsverteilungen der k_f-Werte erkennbare Zweigipfligkeit (Abb. 7-2) widerspiegelt. Insbesondere in der Gruppe mit den höheren Werten ist eine gewisse Abhängigkeit der k_f-Werte von der Intervalllänge zu erkennen, wobei einer Längenzunahme um etwa eine Größenordnung eine Durchlässigkeitsabnahme von etwa ein bis zwei Größenordnungen entspricht.

Betrachtet man die Beziehung zwischen Intervalllänge und Gebirgsdurchlässigkeit getrennt für die Hauptgesteinstypen (Abb. 7-9), so wird deutlich, dass bei einigen Gesteinstypen durchaus eine gewisse Abhängigkeit der k_f-Werte von der Länge des Testintervalls besteht. Dabei nimmt die Gebirgsdurchlässigkeit mit zunehmender Intervalllänge erwartungsgemäß (Kapitel 4.2) ab. Das gilt insbesondere für Granit, aber auch für Tuff/Tuffit, Sandstein, Ton/Tonstein und Kalkstein. Dieser Zusammenhang gilt vor allem für Daten, die in einer bestimmten Tiefe, aber mit unterschiedlichen Intervalllängen erhoben worden sind, wie dies z. B. bei einigen Testreihen an Granit im Felslabor Grimsel der Fall war. Hinzu kommen Ergebnisse von Versuchen, bei denen die Länge des Testintervalls annähernd so groß wie die mittlere Testtiefe war oder sogar größer. In solchen Fällen reicht der erfasste Testabschnitt weit über die mittlere Testtiefe hinaus. Eine Abhängigkeit der k_f-Werte von der Länge des Testintervalls wird dann möglicherweise lediglich vorgetäuscht.

Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass die Länge des Testintervalls die ermittelten k_f-Werte zwar beeinflusst, jedoch nicht Hauptursache ihrer gesteinstypbezogenen Differenzierung ist.

7.1.2.3 Einflussfaktor Testtiefe

Die vorliegenden k_f-Werte (bzw. Transmissivitäten) sind in sehr unterschiedlichen Testtiefen, ausgedrückt als Lage der Mitte des Testintervalls unter Geländeoberfläche (Mittlere Testtiefe), ermittelt worden. Allerdings zeichnen sich zwei ausgeprägte Häufigkeitsmaxima ab, und zwar bei etwa 30 m und etwa 500 m Tiefe unter Geländeoberfläche (Abb. 7-10). Das zugehörige Minimum liegt um hundert Meter unter Geländeoberfläche.

Diese Häufigkeitsverteilung und die Datenherkunft sind bei der Interpretation des Diagramms in Abb. 7-11 zu berücksichtigen, das deutlich den Zusammenhang zwischen Testtiefe und Gebirgsdurchlässigkeit zeigt (zu beachten ist dabei der dekadisch-logarithmische Maßstab der Testtiefe). Er äußert sich auch in dem relativ deutlichen Korrelationskoeffizienten zwischen k_f-Wert und mittlerer Testtiefe für die ge-

samte Datenbasis (Tab. 7-4). Bei den Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche ist die Korrelation nur undeutlich.

Offenbar hängen die k_f-Werte in komplexer Weise von der Testtiefe ab. Ein einfacher linearer Zusammenhang ist jedenfalls nicht erkennbar, vielmehr bilden die Datenpunkte in Abb. 7-11 drei auffällige Cluster, die offenbar durch übergeordnete Einflussfaktoren (Gesteinstyp, Untersuchungsgebiet) mit verursacht werden:

		k_f-Wert	Transmissivität	Speicherkoeffizient	Spezifischer Speicherkoeffizient	Mittlere Testtiefe
gesamte Datenbasis	Transmissivität	0,960	(1,000)			
	Speicherkoeffizient	0,396	0,363	(1,000)		
	Spezifischer Speicherkoeffizient	0,307	0,372	0,876	(1,000)	
	Mittlere Testtiefe	-0,506	-0,293	-0,349	-0,378	(1,000)
	Länge Testintervall	-0,007	0,334	0,098	-0,235	0,187
	Transmissivität	*832*				
	Speicherkoeffizient	*265*	*278*			
	Spezifischer Speicherkoeffizient	*437*	*296*	*264*		
	Mittlere Testtiefe	*2.735*	*900*	*318*	*438*	
	Länge Testintervall	*2.369*	*789*	*265*	*436*	*2.375*
300 - 1.500 m u. G.	Transmissivität	0,958	(1,000)			
	Speicherkoeffizient	0,294	0,315	(1,000)		
	Spezifischer Speicherkoeffizient	0,324	0,359	0,857	(1,000)	
	Mittlere Testtiefe	-0,105	-0,357	-0,166	-0,378	(1,000)
	Länge Testintervall	0,088	0,406	0,106	-0,304	0,269
	Transmissivität	*644*				
	Speicherkoeffizient	*212*	*254*			
	Spezifischer Speicherkoeffizient	*346*	*266*	*211*		
	Mittlere Testtiefe	*1.508*	*723*	*263*	*347*	
	Länge Testintervall	*1.340*	*623*	*212*	*345*	*1.343*

Tab. 7-4 Pearson-Korrelationskoeffizienten für k_f-Wert, Transmissivität, Speicherkoeffizienten, Spezifischen Speicherkoeffizienten, mittlere Testtiefe und Länge des Testintervalls, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche

kursiv: Anzahl der jeweils in die Berechnung eingehenden Wertepaare

In dem Cluster mit Daten aus geringer Tiefe und mit relativ hohen k_f-Werten stammt der größte Teil der Daten aus den beiden Tonstein-Untersuchungsgebieten Münchehagen und Hoheneggelsen (Kapitel 7.2.5). Die beiden Cluster mit Werten aus größerer Tiefe wurden weitgehend im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle ermittelt. Zahlenmäßig überwiegen daher die Datenpunkte für Gneis, Granit, Tuff/Tuffit und Mergelstein. Die beiden durch den k_f-Wert-Bereich um 10^{-10} bis 10^{-09} m/s getrennten Cluster gehen auf das Zusammenfallen von Daten aus verschiedenen Untersuchungsgebieten mit diesen Gesteinstypen zurück. Auffällig ist zudem, dass auf den für die Endlagerung vorgesehenen Tiefenbereich zwischen 300 und 1.500 m unter Geländeoberfläche praktisch die gesamte Bandbreite der k_f-Werte verteilt ist. Die Zone mit den deutlichsten tiefenabhängigen Veränderungen wird also nicht erfasst. Entsprechend ist die Korrelation zwischen Testtiefe und k_f-Wert für die Daten aus diesem Bereich undeutlich.

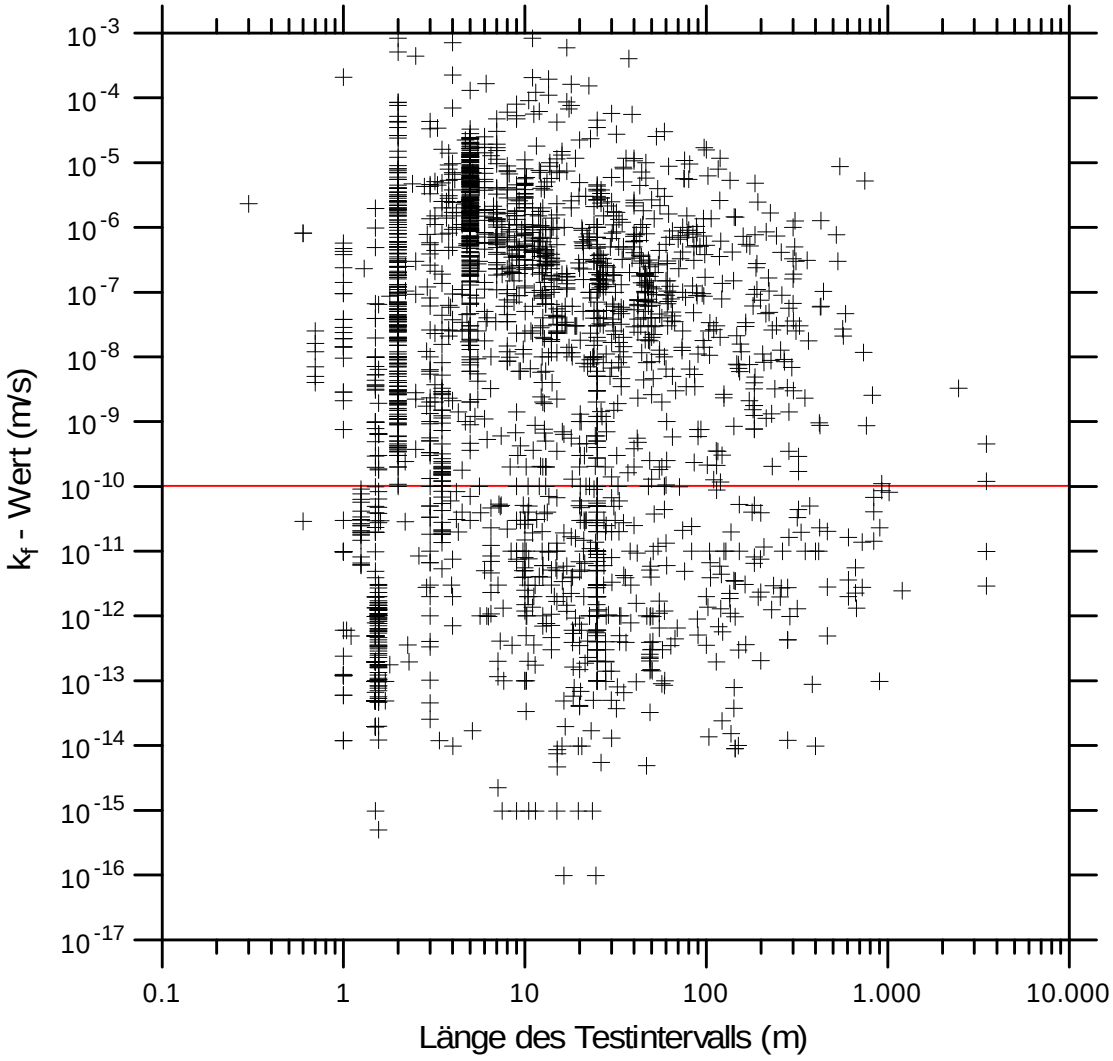


Abb. 7-8 k_f-Werte in Abhängigkeit von der Länge des Testintervalls

horizontale Linie bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd

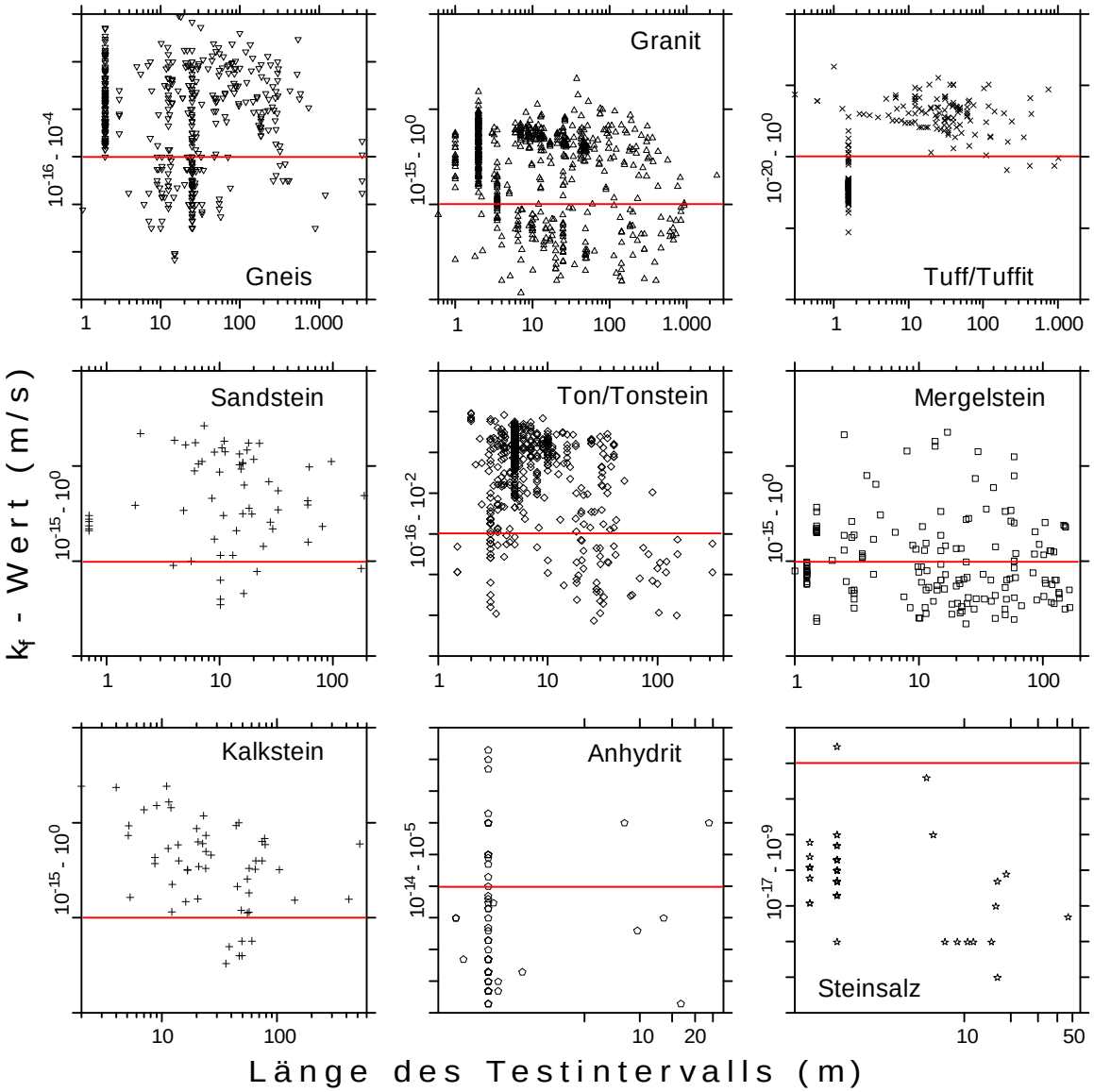


Abb. 7-9 k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen in Abhängigkeit von der Länge des Testintervalls

vertikale Linien bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Übersichtsmäßig werden Zusammenhänge zwischen der Tiefenabhängigkeit der k_f-Werte und Gesteinstyp in Abb. 7-12 deutlich. Danach ist die Beziehung zwischen beiden Parametern bei den einzelnen Gesteinstypen unterschiedlich deutlich ausgeprägt und muss jedenfalls bei der gesteinstypbezogenen Datenauswertung betrachtet werden (Kapitel 7.2). Bei Tuff/Tuffit, Anhydrit und Steinsalz kommt diese Abhängigkeit nicht zum Tragen, weil die Daten aus einem nur engen Tiefenbereich stammen. Bei den Gesteinstypen mit mehr oder weniger deutlicher Abhängigkeit der Ge-

birgsdurchlässigkeit von der Tiefe nehmen die k_f-Werte um gut eine bis zwei Größenordnungen mit Zunahme der Tiefe um eine Größenordnung ab. Am undeutlichsten ist die Beziehung bei Granit: Vor allem bei diesem Gesteinstyp treten bis in große Tiefen auch hohe k_f-Werte auf.

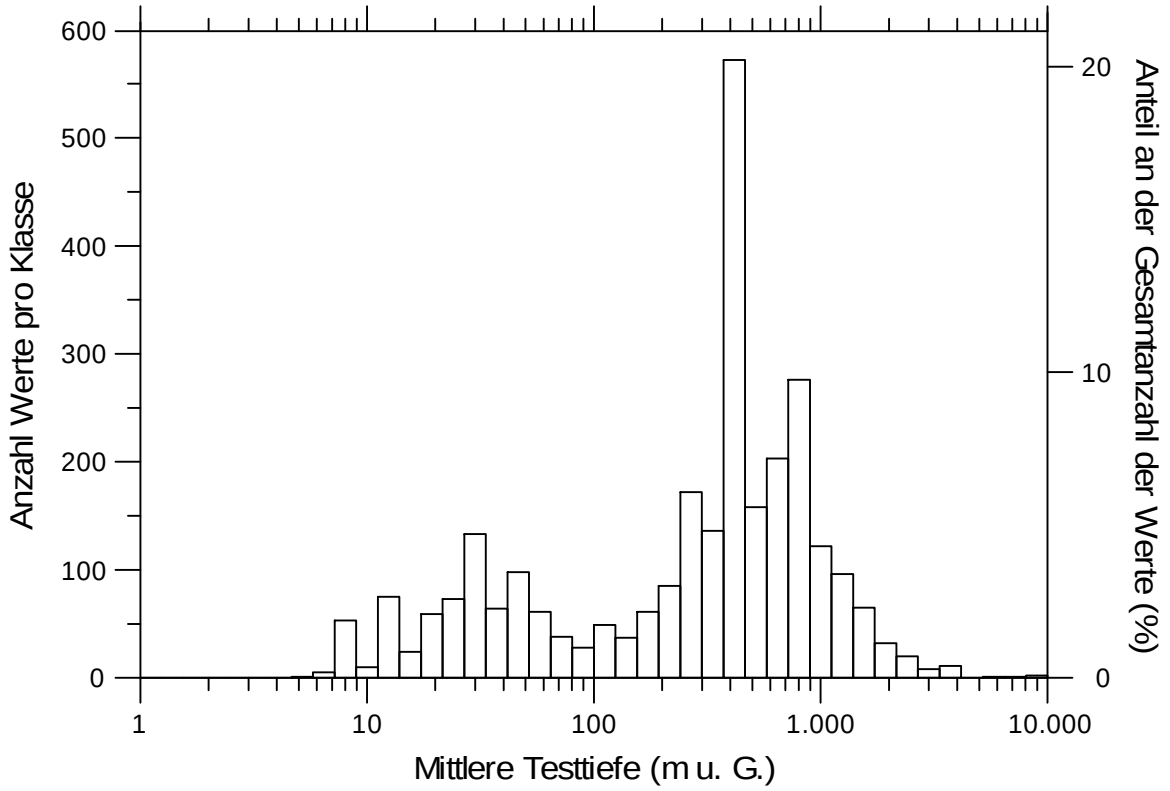


Abb. 7-10 Histogramm der Häufigkeitsverteilung der mittleren Testtiefen der k_f-Wert-Bestimmungen

dekadisch-logarithmischer Maßstab!

7.1.2.4 Zusammenfassende Beurteilung Einflussfaktoren

Die statistischen Kennwerte (Tab. 7-3) und die Häufigkeitsverteilungen der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen (Abb. 7-2 u. 7-3) machen deutlich, dass zwischen den Gesteinstypen im Hinblick auf die charakteristischen Merkmale der k_f-Wert-Verteilungen teilweise deutliche Unterschiede bestehen. Die Werte werden außer durch den Gesteinstyp selbst allerdings in unterschiedlichem Maße auch durch die Reichweite des Tests, die Länge des Testintervalls, die Testtiefe und möglicherweise weitere Faktoren beeinflusst. Dazu ist festzustellen:

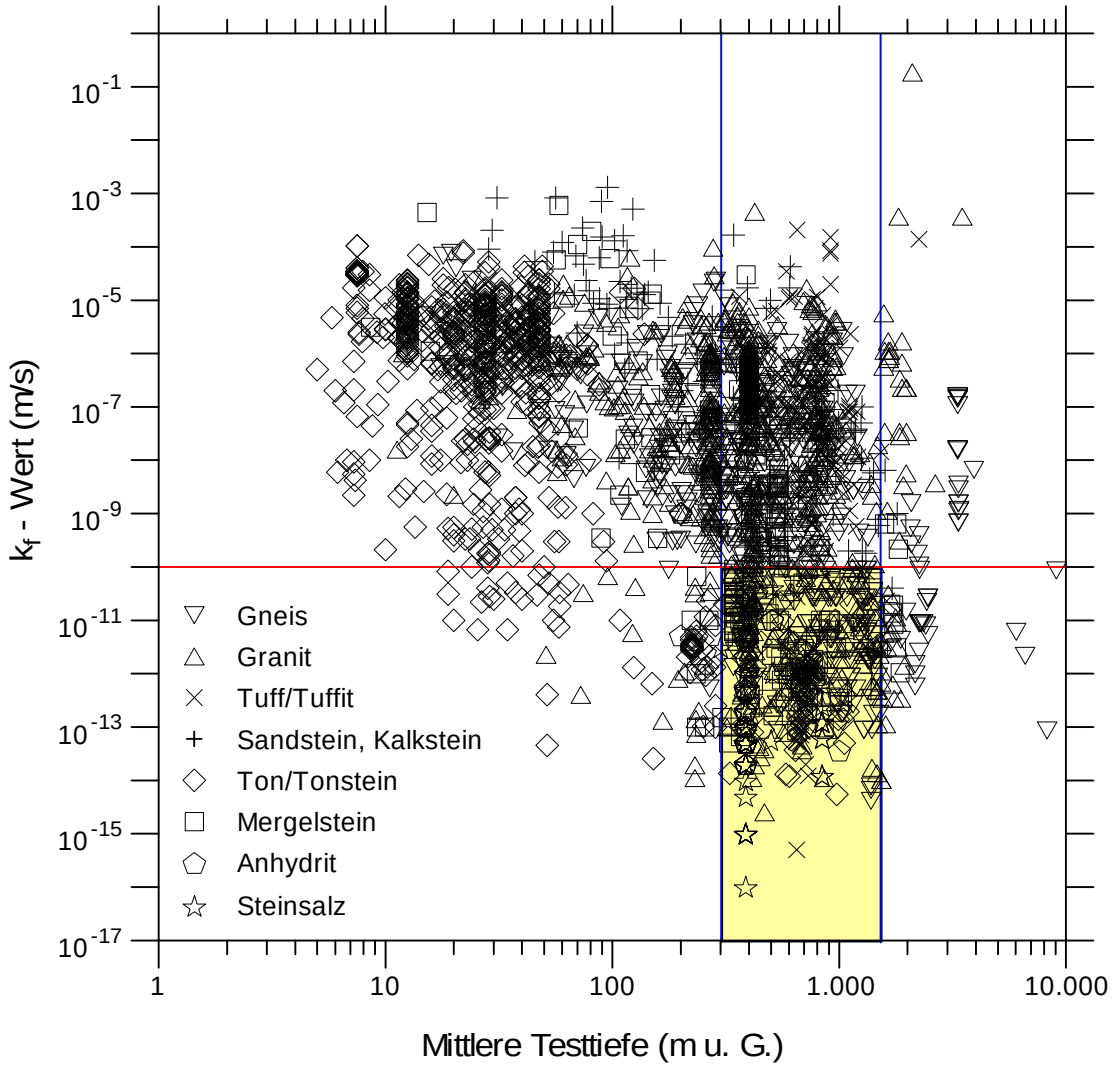


Abb. 7-11 Abhängigkeit der k_f-Werte von der Testtiefe

horizontale Linie bei 10^{-10} m/s: k_f-Wert gemäß Mindestanforderung AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

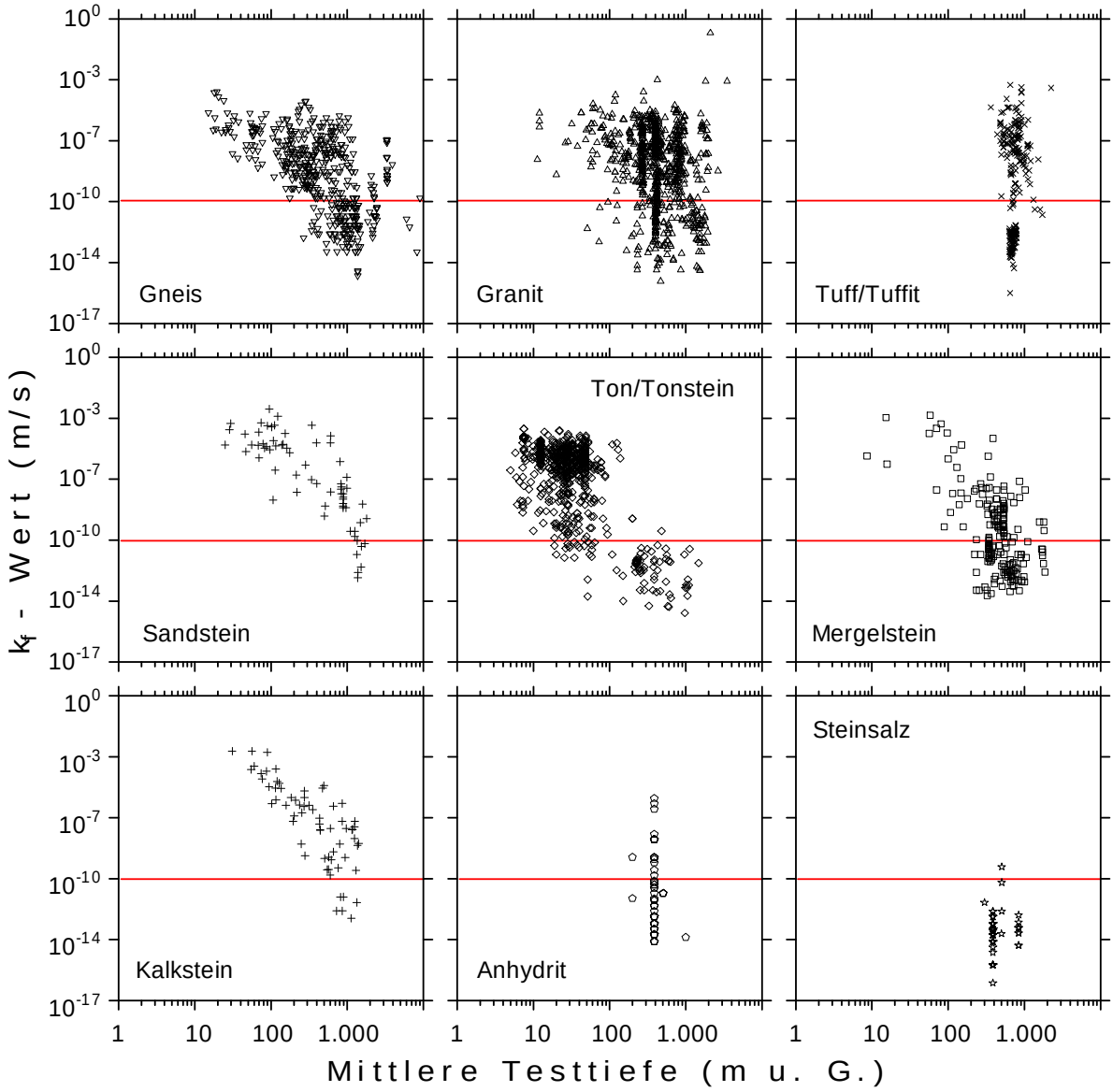


Abb. 7-12 k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen in Abhängigkeit von der Testtiefe

horizontale Linien bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

- Die unterschiedlichen Reichweiten der verschiedenen Testverfahren wirken sich zwar auf die Versuchsergebnisse aus, sind jedoch für die Datenauswertung von untergeordneter Bedeutung, da die weitaus meisten Daten mit nur wenigen Testverfahren mit weitgehend übereinstimmender Reichweite erhoben worden sind.
- Die Länge des Testintervalls wirkt sich im Detail auf das Ergebnis von In-situ- Bestimmungen der kf-Werte aus, macht jedoch die gesteinstypbezogenen Unterschiede nicht zunichte. Der Einfluss wird außerdem durch den der Testtiefe überlagert.
- Die Testtiefe hat deutlichen Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit. Das gilt sowohl für die k_f-Werte insgesamt als auch für einzelne Gesteinstypen. Der Einfluss ist bei den einzelnen Gesteinstypen allerdings unterschiedlich ausgeprägt. Besonders wichtig ist er beim Gesteinstyp Ton/Tonstein, für den in größerer Tiefe erheblich niedrigere k_f-Werte gemessen werden als oberflächennah.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird dem Einfluss von Länge des Testintervalls als dem einzigen fassbaren Faktor des Einflussvolumens hydraulischer Tests und vor allem der Testtiefe auf die k_f-Werte bei der gesteinstypbezogenen Datenauswertung in Kapitel 7.2 im Detail nachgegangen, um zu klären, ob sie bei der Entwicklung des Kriteriums zur Gebirgsdurchlässigkeit gesteinstypspezifische Merkmale vortäuschen können.

7.1.3 Unterscheidung der Hauptgesteinstypen anhand der k_f-Werte

7.1.3.1 Verfahren zur Unterscheidung der Gesteinstypen

Nach den Ausführungen in Kapitel 7.1.1 (Tab. 7-1) überschneiden sich die k_f-Wert-Bandbreiten einiger Hauptgesteinstypen erheblich. Andererseits überwiegen jedoch bei einigen Typen eher niedrige k_f-Werte, bei anderen dagegen eher höhere. Diese Unterschiede bzw. Ähnlichkeiten können nach Kapitel 7.1.2 wahrscheinlich nicht allein mit dem Einfluss modifizierender Faktoren erklärt werden, sondern sind zumindest auch durch Unterschiede bzw. Ähnlichkeiten zwischen den hydraulischen Eigenschaften der Hauptgesteinstypen verursacht.

Zur Charakterisierung der zwischen den k_f-Wert-Verteilungen der Hauptgesteinstypen bestehenden Unterschiede bzw. Übereinstimmungen stehen verschiedene Untersuchungs- und Prüfverfahren zur Verfügung. Wichtige dieser Verfahren beruhen allerdings auf der Annahme eines bestimmten Verteilungstyps (verteilungsgebundene Verfahren). Sie beziehen sich üblicherweise auf die Mittelwerte (hier: geometrische Mittelwerte) oder daraus abgeleitete Parameter. Für die hier betrachteten k_f-Wert-Stichproben gilt die Annahme der Normalverteilung für die dekadischen Logarithmen der Ausgangswerte (Kapitel 6.1.1).

Nach den Ausführungen in Kapitel 7.1.2 darf Normalverteilung der k_f-Werte allerdings keineswegs bei allen Datensätzen vorausgesetzt werden, vielmehr zeigt das Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Tests zur Prüfung der Normalverteilung ein heterogenes Ergebnis (Tab. 7-2). Die Charakterisierung und Unterscheidung der Gesteinstypen anhand von auf der Annahme Normalverteilung beruhenden statistischen Kennwerten ist daher bei einigen Gesteinstypen fragwürdig, weil die entsprechenden Werte (Tab. 7-1) für die Beschreibung und Unterscheidung der Gesteinstypen nur beschränkte Aussagekraft haben.

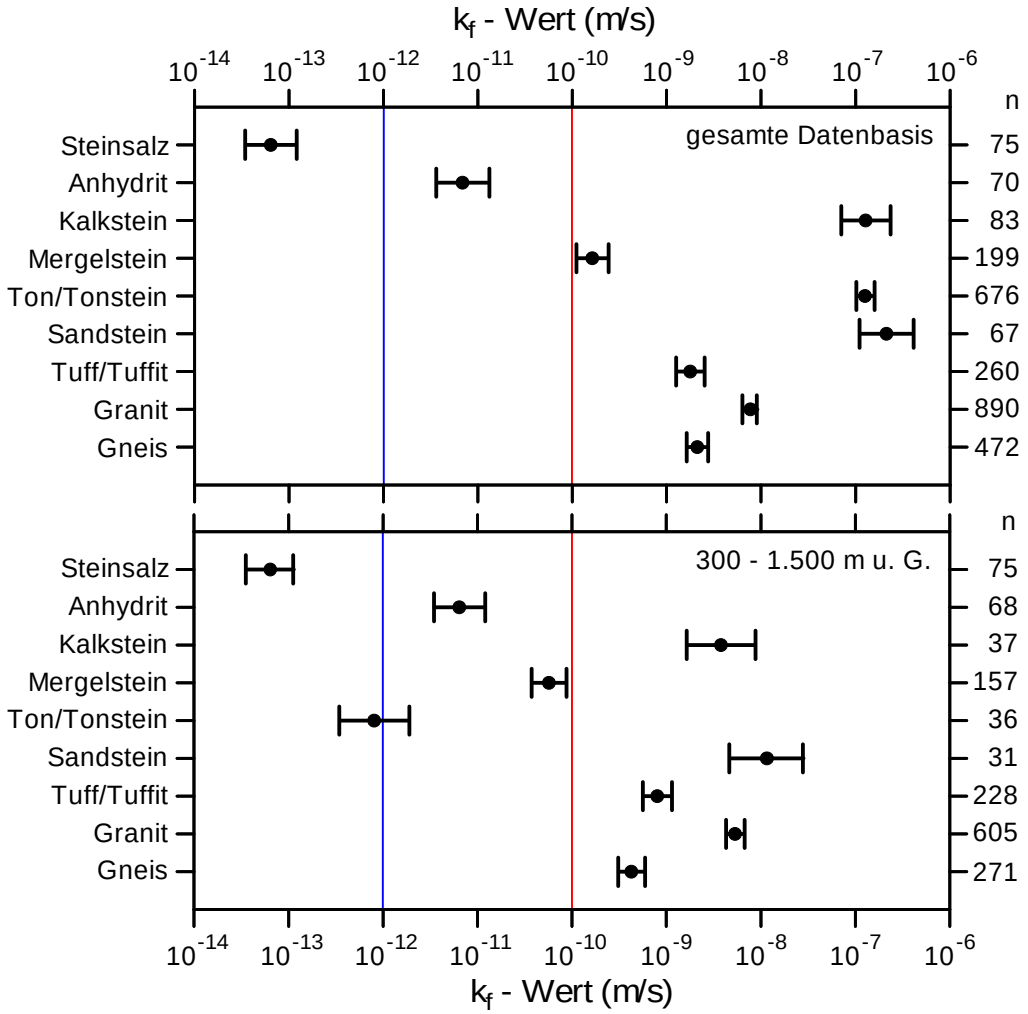


Abb. 7-13 Geometrische Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen und ihre Standardfehler

oben: gesamte Datenbasis
unten: Daten aus 300 - 1.500 m u. G.
vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Der Anwendung verteilungsbezogener Testverfahren unter Berücksichtigung von Mittelwert oder daraus abgeleiteten weiteren Parametern steht zusätzlich die sehr unterschiedliche Größe der Datensätze der einzelnen Hauptgesteinstypen (Tab. 7-1) entgegen; denn sie beeinflusst aus dem Mittelwert abgeleitete bzw. auf ihn bezogene Kenndaten, wie dessen Standardfehler und vergleichbare Kennwerte (Abb. 7-13): Die Größe des Standardfehlers der geometrischen Mittelwerts nimmt deutlich mit zunehmendem Stichprobenumfang ab.

Um den genannten Problemen zu begegnen wurden bei der Überprüfung der statistischen Unterschiede bzw. Ähnlichkeiten zwischen den Verteilungen verschiedener Hauptgesteinstypen neben verteilungsgebundenen Testverfahren auch verteilungsfreie Verfahren eingesetzt. Die Identifizierung bzw. Beurteilung der Unterschiede bzw. Übereinstimmungen zwischen den verschiedenen Hauptgesteinstypen stützt sich damit insgesamt auf folgende Verfahren:
Visuelle Vergleiche
Hierzu gehören der visuelle Vergleich der geometrischen Mittelwerte und der zugehörigen Standardfehler der Hauptgesteinstypen (Abb. 7-13) sowie - verteilungsunabhängig - der Vergleich wichtiger Quantile der Häufigkeitsverteilungen der Hauptgesteinstypen, insbesondere der Medianwerte sowie der 3. und 4. Quartile, anhand der Boxplots in Abb. 7-14 u. 7-15.

Verteilungsgebundene statistische Verfahren

- t-Tests zur Prüfung der Signifikanz der Unterschiede zwischen den geometrischen Mittelwerten der kf-Werte der Hauptgesteinstypen,
- Varianzanalyse zur paarweisen Bestimmung der Beziehungen zwischen den Varianzen der kf-Werte der Hauptgesteinstypen,
- lineare Diskriminanzanalyse zur Unterscheidung der kf-Werte der Hauptgesteinstypen mit Hilfe einer linearen Diskriminanzfunktion.

Verteilungsunabhängige statistische Verfahren

- Kolmogorov-Smirnov-Test zur Prüfung der Signifikanz der Unterschiede zwischen den kumulativen Häufigkeitsverteilungen der kf-Werte der Hauptgesteinstypen,
- Mann-Whitney-Wilcoxon-Test zur Prüfung der Unabhängigkeit der geometrischen Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen voneinander.

t-Test, Varianzanalyse, Kolmogorov-Smirnov-Test und Mann-Whitney-Wilcoxon-Test liefern als Ergebnis Matrizes mit den Wahrscheinlichkeiten zur Annahme oder Zurückweisung der jeweiligen Prüfhypothese. Beim t-Test bezieht sich diese Wahrscheinlichkeit auf das Signifikanzniveau 95 %. In den Ergebnistabellen für die einzelnen Verfahren (Tab. 7-5, 7-6, 7-8 u. 7-9) sind die Wahrscheinlichkeiten für alle Kom-

binationen der neun Hauptgesteinstypen als paarweise Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Hypothese der signifikanten Unterscheidung der jeweiligen Gesteinstypen dargestellt. Hohe Werte bezeichnen daher hohe Wahrscheinlichkeit für die Übereinstimmung des jeweiligen Merkmals zwischen beiden Gesteinstypen. Wahrscheinlichkeitswerte >1 % sind zur besseren Orientierung farblich hervorgehoben, Wahrscheinlichkeitswerte >10 % zusätzlich fett gedruckt. Diese Differenzierung ist willkürlich.

Als Ergebnis der Diskriminanzanalyse werden alle k_f-Werte der einzelnen Hauptgesteinstypen, unterschieden nach Datenbasis insgesamt und den Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche, anhand der Diskriminanzfunktion einem der Hauptgesteinstypen zugeordnet. Tab. 7-7 gibt in Matrixform wieder, wieviele k_f-Werte eines bestimmten Gesteinstyps diesem selbst und wieviele welchen anderen Gesteinstypen zugeordnet worden sind. Die Häufigkeit der Zuordnung erlaubt gewisse Aussagen zu Ähnlichkeit oder Unähnlichkeit zwischen den Werteverteilungen der verschiedenen Gesteinstypen.

Wegen der geschilderten Unsicherheiten hinsichtlich der Datenverteilung dürfen die Wahrscheinlichkeitsangaben in den Tabellen nicht im Sinne realer quantitativer Beziehungen zwischen den Gesteinstypen missverstanden werden. Das gilt insbesondere für die Ergebnisse der verteilungsgebundenen Verfahren. Dennoch liefern die Ergebnisse zusätzlich zu den Datenverteilungen selbst Hinweise für die Interpretation der vorliegenden Daten.

7.1.3.2 Ergebnisse der Unterscheidungsverfahren

Vergleich der geometrischen Mittelwerte

Normalverteilung unterstellt erlauben die geometrischen Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen und ihre Standardfehler folgende Differenzierung (Abb. 7-13):

Bei den Daten der **Datenbasis insgesamt** unterscheiden sich Steinsalz, Anhydrit und Mergelstein signifikant voneinander und von den übrigen Hauptgesteinstypen. Gneis, Granit und Tuff/Tuffit sowie Sandstein, Ton/Tonstein und Kalkstein bilden jeweils eine Gruppe mit ähnlichen Mittelwerten, deren Standardfehler sich teilweise überschneiden; die geometrischen Mittelwerte der betroffenen Gesteinstypen unterscheiden sich danach nicht signifikant.

Bei den **Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe** fällt Ton/Tonstein mit dem nach Steinsalz niedrigsten Mittelwert auf. Die Relationen zwischen Steinsalz, Anhydrit und Mergelstein untereinander und zu den übrigen Hauptgesteinstypen, Gneis, Granit, Tuff/Tuffit, Sandstein und Kalkstein, sind weitgehend unverändert. Deren Mittelwerte liegen allerdings dichter zusammen als bei den Daten der gesamten Datenbasis.

	Anhydrit	Gneis	Granit	Kalkstein	Mergelstein	Sandstein	Steinsalz	Ton/Ton-stein
gesamte Datenbasis								
Gneis	$6{,}22 * 10^{-15}$	-						
Granit	$9{,}99 * 10^{-16}$	$5{,}10 * 10^{-06}$	-					
Kalkstein	$9{,}99 * 10^{-16}$	$1{,}92 * 10^{-10}$	$2{,}86 * 10^{-06}$	-				
Mergelstein	$6{,}24 * 10^{-06}$	$2{,}91 * 10^{-09}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	-			
Sandstein	$9{,}99 * 10^{-16}$	$5{,}38 * 10^{-09}$	$7{,}94 * 10^{-06}$	**0,560**	$9{,}99 * 10^{-16}$	-		
Steinsalz	$3{,}50 * 10^{-11}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	-	
Ton/Tonstein	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	**0,983**	$9{,}99 * 10^{-16}$	**0,465**	$9{,}99 * 10^{-16}$	-
Tuff/Tuffit	$6{,}22 * 10^{-13}$	**0,718**	0,001	$2{,}19 * 10^{-09}$	$1{,}36 * 10^{-05}$	$1{,}43 * 10^{-08}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$
300 - 1.500 m unter Geländeoberfläche								
Gneis	$4{,}09 * 10^{-09}$	-						
Granit	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	-					
Kalkstein	$1{,}85 * 10^{-09}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	**0,653**	-				
Mergelstein	0,001	0,039	$9{,}99 * 10^{-16}$	$3{,}14 * 10^{-06}$	-			
Sandstein	$7{,}34 * 10^{-10}$	$3{,}41 * 10^{-13}$	**0,377**	**0,320**	$6{,}85 * 10^{-07}$	-		
Steinsalz	$1{,}30 * 10^{-10}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	-	
Ton/Tonstein	0,006	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$4{,}63 * 10^{-14}$	$2{,}47 * 10^{-11}$	$3{,}40 * 10^{-13}$	$6{,}27 * 10^{-06}$	-
Tuff/Tuffit	$5{,}59 * 10^{-10}$	0,006	$8{,}66 * 10^{-05}$	0,073	$1{,}21 * 10^{-06}$	0,007	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$

Tab. 7-5 t-Test: Paarweise Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Unabhängigkeit der geometrischen Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen (Bonferroni-Anpassung)

farblich hervorgehoben: Irrtumswahrscheinlichkeit ≥1 %, zusätzlich Fettdruck: Irrtumswahrscheinlichkeit ≥10 %

	Anhydrit	Gneis	Granit	Kalkstein	Mergelstein	Sandstein	Steinsalz	Ton/Ton-stein
gesamte Datenbasis								
Gneis	$1{,}61 * 10^{-12}$	-						
Granit	$9{,}99 * 10^{-16}$	0,015	-					
Kalkstein	$9{,}99 * 10^{-16}$	$7{,}39 * 10^{-07}$	0,005	-				
Mergelstein	0,015	$5{,}13 * 10^{-05}$	$1{,}6 * 10^{-15}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	-			
Sandstein	$9{,}99 * 10^{-16}$	$3{,}07 * 10^{-07}$	0,002	**1,000**	$9{,}99 * 10^{-16}$	-		
Steinsalz	$3{,}27 * 10^{-04}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	-	
Ton/Tonstein	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	**1,000**	$9{,}99 * 10^{-16}$	**1,000**	$9{,}99 * 10^{-16}$	-
Tuff/Tuffit	$2{,}07 * 10^{-10}$	**1,000**	0,044	$1{,}36 * 10^{-06}$	0,003	$4{,}88 * 10^{-07}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$
300 - 1.500 m unter Geländeoberfläche								
Gneis	$7{,}14 * 10^{-06}$	-						
Granit	$9{,}99 * 10^{-16}$	$1{,}26 * 10^{-07}$	-					
Kalkstein	$5{,}34 * 10^{-06}$	**0,621**	**1,000**	-				
Mergelstein	**0,337**	0,039	$9{,}99 * 10^{-16}$	0,007	-			
Sandstein	$1{,}21 * 10^{-07}$	**0,143**	**0,999**	**0,999**	$2{,}85 * 10^{-04}$	-		
Steinsalz	$1{,}93 * 10^{-04}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	-	
Ton/Tonstein	**0,849**	$4{,}86 * 10^{-08}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$1{,}92 * 10^{-08}$	0,007	$3{,}94 * 10^{-10}$	**0,617**	-
Tuff/Tuffit	$8{,}37 * 10^{-08}$	**0,982**	0,002	**0,928**	0,001	**0,448**	$9{,}99 * 10^{-16}$	$8{,}95 * 10^{-10}$

Tab. 7-6 Varianzanalyse: Paarweise Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Unabhängigkeit der Varianzen der geometrischen Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen (Anpassung nach Scheffé)

farblich hervorgehoben: Irrtumswahrscheinlichkeit ≥1 %, zusätzlich Fettdruck: Irrtumswahrscheinlichkeit ≥10 %

Gesteinstyp, dessen k_f-Werte zugeordnet werden	n	Anzahl der k_f-Werte des Gesteinstyps, dessen k_f-Werte zugeordnet werden, die jeweils den nachfolgenden Gesteinstypen zugeordnet worden sind									richtig zugeordnet (%)
		Anhydrit	Gneis	Granit	Kalkstein	Mergelstein	Sandstein	Steinsalz	Ton/Tonstein	Tuff/Tuffit	
gesamte Datenbasis											
Anhydrit	70	17	0	7	0	5	3	32	0	6	24
Gneis	472	95	30	74	6	57	105	27	48	30	6
Granit	890	105	44	118	24	71	294	51	127	56	13
Kalkstein	83	5	1	6	1	5	44	1	15	5	1
Mergelstein	199	67	15	19	0	34	16	25	12	11	17
Sandstein	67	4	2	11	1	5	35	1	5	3	52
Steinsalz	75	4	0	0	0	2	0	69	0	0	92
Ton/Tonstein	676	63	9	42	3	34	455	28	27	15	4
Tuff/Tuffit	260	45	7	24	3	12	85	45	30	9	3
alle	2.792	405	108	301	38	225	1.037	279	264	135	12
300 - 1.500 m unter Geländeoberfläche											
Anhydrit	68	8	2	0	0	7	10	24	12	5	12
Gneis	271	34	17	5	23	43	91	14	36	8	6
Granit	605	50	21	14	32	51	347	23	31	36	2
Kalkstein	37	3	4	2	2	1	18	0	3	4	5
Mergelstein	157	29	16	6	16	29	16	9	29	7	18
Sandstein	31	1	2	3	2	2	17	0	2	2	55
Steinsalz	75	1	1	0	0	1	0	64	8	0	85
Ton/Tonstein	36	11	1	0	0	4	0	14	6	0	17
Tuff/Tuffit	228	4	6	5	7	8	110	25	57	6	3
alle	1.508	141	70	35	82	146	609	173	184	68	11

Tab. 7-7 Diskriminanzanalyse: Zuordnungsmatrix mit der Anzahl derjenigen k_f-Werte eines Hauptgesteinstyps, die auf Grund der Ergebnisse der linearen Diskriminanzanalyse bestimmten Gesteinstypen zugeordnet werden, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m u. G.

farblich hervorgehoben: häufigste Zuordnung

	Anhydrit	Gneis	Granit	Kalkstein	Mergel-stein	Sandstein	Steinsalz	Ton/ Ton-stein
gesamte Datenbasis								
Gneis	$9{,}99 * 10^{-16}$	-						
Granit	$9{,}99 * 10^{-16}$	$4{,}74 * 10^{-07}$	-					
Kalkstein	$9{,}99 * 10^{-16}$	$6{,}20 * 10^{-11}$	$1{,}70 * 10^{-06}$	-				
Mergelstein	$1{,}41 * 10^{-06}$	$1{,}77 * 10^{-10}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	-			
Sandstein	$9{,}99 * 10^{-16}$	$7{,}96 * 10^{-10}$	$2{,}36 * 10^{-06}$	**0,478**	$9{,}99 * 10^{-16}$	-		
Steinsalz	$6{,}45 * 10^{-11}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	-	
Ton/Tonstein	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	**0,238**	$9{,}99 * 10^{-16}$	**0,300**	$9{,}99 * 10^{-16}$	-
Tuff/Tuffit	$3{,}52 * 10^{-10}$	**0,777**	0,017	$1{,}15 * 10^{-06}$	$6{,}20 * 10^{-05}$	$3{,}40 * 10^{-07}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$
300 - 1.500 m unter Geländeoberfläche								
Gneis	$3{,}27 * 10^{-10}$	-						
Granit	$9{,}99 * 10^{-16}$	$2{,}48 * 10^{-12}$	-					
Kalkstein	$2{,}16 * 10^{-08}$	0,013	**0,352**	-				
Mergelstein	$7{,}85 * 10^{-05}$	$4{,}30 * 10^{-05}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}65 * 10^{-07}$	-			
Sandstein	$4{,}21 * 10^{-09}$	0,001	**0,978**	**0,487**	$3{,}04 * 10^{-08}$	-		
Steinsalz	$1{,}78 * 10^{-10}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$1{,}33 * 10^{-15}$	-	
Ton/Tonstein	0,096	$6{,}47 * 10^{-12}$	$9{,}99 * 10^{-16}$	$2{,}48 * 10^{-10}$	$1{,}09 * 10^{-08}$	$1{,}36 * 10^{-10}$	$4{,}12 * 10^{-06}$	-
Tuff/Tuffit	$4{,}08 * 10^{-08}$	**0,328**	$3{,}27 * 10^{-04}$	**0,314**	$1{,}24 * 10^{-04}$	**0,116**	$9{,}99 * 10^{-16}$	$8{,}43 * 10^{-08}$

Tab. 7-8 Mann-Whitney-Wilcoxon-Test: Paarweise Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Unabhängigkeit der geometrischen Mittelwerte der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen

farblich hervorgehoben: Irrtumswahrscheinlichkeit ≥1 %, zusätzlich Fettdruck: Irrtumswahrscheinlichkeit ≥10 %

	Anhydrit	Gneis	Granit	Kalkstein	Mergel-stein	Sandstein	Steinsalz	Ton/ Ton-stein
gesamte Datenbasis								
Gneis	$1{,}19 * 10^{-07}$	-						
Granit	$1{,}19 * 10^{-07}$	$5{,}96 * 10^{-08}$	-					
Kalkstein	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$2{,}53 * 10^{-05}$	-				
Mergelstein	$6{,}68 * 10^{-06}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	-			
Sandstein	$1{,}19 * 10^{-07}$	$< 1 * 10^{-09}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	**0,119**	$1{,}19 * 10^{-07}$	-		
Steinsalz	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	-	
Ton/Tonstein	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	0,011	$1{,}19 * 10^{-07}$	0,007	$1{,}19 * 10^{-07}$	-
Tuff/Tuffit	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$3{,}57 * 10^{-05}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$4{,}73 * 10^{-05}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$
300 - 1.500 m unter Geländeoberfläche								
Gneis	$5{,}96 * 10^{-08}$	-						
Granit	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	-					
Kalkstein	$5{,}96 * 10^{-08}$	0,012	**0,233**	-				
Mergelstein	$2{,}05 * 10^{-05}$	$1{,}74 * 10^{-05}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$4{,}71 * 10^{-05}$	-			
Sandstein	$< 1 * 10^{-09}$	0,004	**0,480**	**0,830**	$5{,}96 * 10^{-08}$	-		
Steinsalz	$< 1 * 10^{-09}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$< 1 * 10^{-09}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$< 1 * 10^{-09}$	-	
Ton/Tonstein	0,060	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	$< 1 * 10^{-09}$	$1{,}55 * 10^{-06}$	$< 1 * 10^{-09}$	$6{,}85 * 10^{-06}$	-
Tuff/Tuffit	$5{,}96 * 10^{-08}$	$2{,}13 * 10^{-05}$	$1{,}19 * 10^{-07}$	0,010	$1{,}19 * 10^{-07}$	0,010	$1{,}19 * 10^{-07}$	$1{,}19 * 10^{-07}$

Tab. 7-9 Kolmogorov-Smirnov-Test: Paarweise berechnete Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Annahme signifikanter Unterschiede zwischen den kumulativen Häufigkeitsverteilungen der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen

farblich hinterlegt: Irtumswahrscheinlichkeit ≥1 %, zusätzlich Fettdruck: Irrtumswahrscheinlichkeit ≥10 %

Medianwerte und Quantile

Bei den **Daten der Datenbasis insgesamt** wird bereits an der Lage des Medianwertes zur Mindestanforderung des AkEnd deutlich (Abb. 7-14), dass nur bei drei Gesteinstypen mehr als 50 % der k_f-Werte die Mindestanforderung des AkEnd erfüllt ist, nämlich bei Steinsalz, Anhydrit und - nur knapp - Mergelstein. Anhydrit und insbesondere Mergelstein sind gegenüber Steinsalz durch größere Spannweite der Werte insgesamt und der mittleren 50 % der Werte (1. bis 3. Quartil) gekennzeichnet. Die höchsten Werte liegen jeweils um gut vier bzw. ca. sieben Größenordnungen über dem Wert der Mindestanforderung. Bei Steinsalz wird die Mindestanforderung nur durch einen Wert, und zwar um weniger als eine Größenordnung, überschritten.

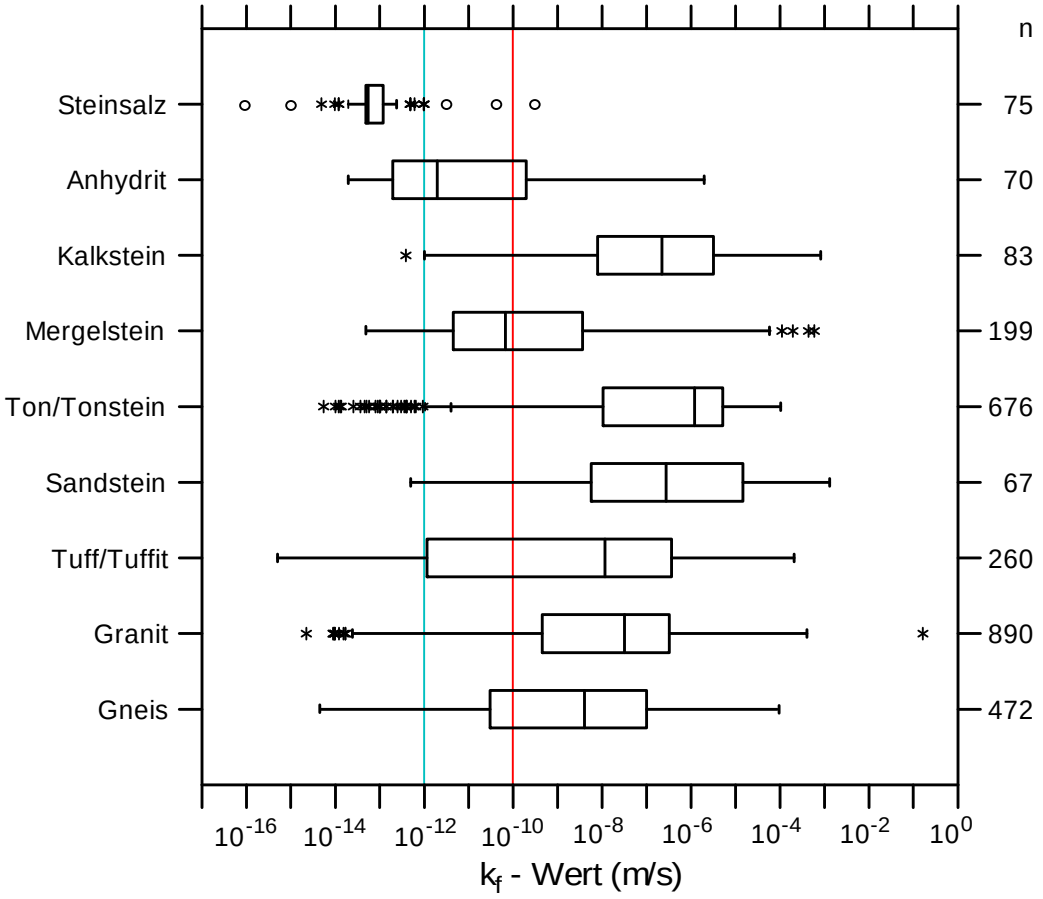


Abb. 7-14 Boxplots zur vergleichenden Darstellung der statistischen Verteilungen der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen (gesamte Datenbasis)

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

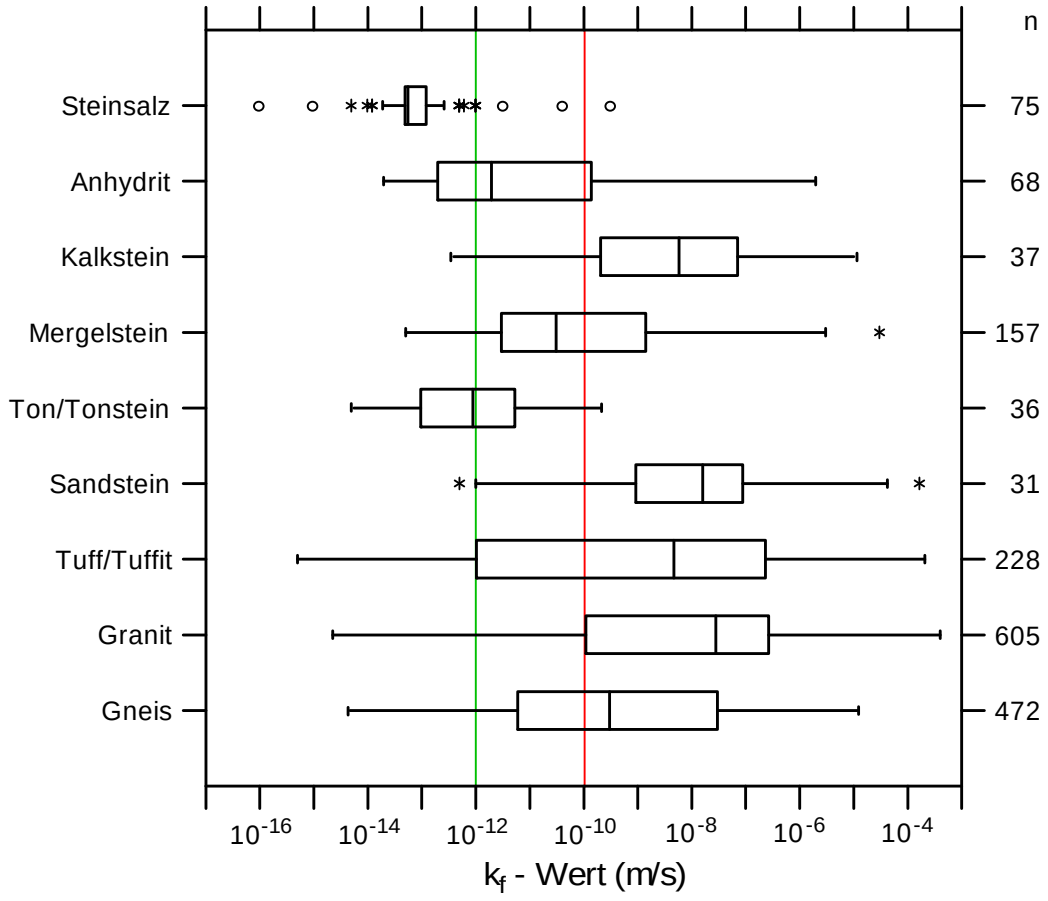


Abb. 7-15 Boxplots zur vergleichenden Darstellung der statistischen Verteilungen der k_f-Werte der Hauptgesteinstypen (Tiefenbereich 300 - 1.500 m u. G.)

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Er wurde im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben bestimmt, einem Bergwerk mit hohem Durchbauungsgrad (Kapitel 7.2.10). Bei Tuff/Tuffit und bei Gneis sind deutlich mehr als 50 % (aber weniger als 75 %) der Daten größer als der Wert der Mindestanforderung, bei Kalkstein, Ton/Tonstein, Sandstein und Granit sogar mehr als 75 %.

Zieht man zur Unterscheidung der Hauptgesteinstypen das Ausmaß der Überschneidung der mittleren 50 % der k_f-Werte eines jeden Gesteinstyps heran, so erweisen sich jeweils Steinsalz, Anhydrit und Mergelstein sowie die übrigen Gesteinstypen als eigene Gesteinsgruppen.

Soweit die Daten für einzelne Gesteinstypen nicht ohnehin ausschließlich oder überwiegend aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche stammen (Anhydrit, Steinsalz, Tuff/Tuffit), sind die Medianwerte sowie die Werte des 1. und 3.

Quartils der einzelnen Gesteinstypen bei den **Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe** gegenüber den Daten der Datenbasis insgesamt mehr oder weniger deutlich zu niedrigeren Werten verschoben. Teilweise ist auch die Bandbreite der Werte kleiner. Davon abgesehen bieten die Boxplots mit Ausnahme von Ton/Tonstein ein insgesamt ähnliches Bild wie bei der Gesamtdatenbasis. Beim Gesteinstyp Ton/Tonstein sind Maximalwert und Medianwert um ca. sechs Größenordnungen niedriger als bei der Datenbasis insgesamt. Mit einer Ausnahme erfüllen alle aus diesem Tiefenbereich vorliegenden k_f-Werte die Mindestanforderung des AkEnd.

Vergleicht man auch bei diesem Datensatz die Wertebandbreiten zwischen dem 1. und 3. Quartil, so bilden wiederum die k_f-Werte für Steinsalz eine eigenständige Gruppe. Ton/Tonstein unterscheidet sich von Mergelstein und Anhydrit durch die deutlich geringere Bandbreite der Werte, doch treten zugleich deutliche Überschneidungen auf. Unabhängig von Differenzierungen im Detail lassen sich die übrigen Gesteinsytpen zu einer weiteren Gruppe zusammenfassen.

Ergebnisse der statistischen Prüfverfahren

Die verteilungsgebundenen Auswertungs- bzw. Prüfverfahren beziehen sich im einzelnen auf unterschiedliche statistische Größen, beruhen aber im Prinzip auf denselben Grundlagen. Sie liefern daher zumindest näherungsweise ähnliche Ergebnisse. Wegen der erwähnten Unsicherheiten hinsichtlich des Verteilungsmodells wird auf eine Bewertung von Einzelwerten und genauen Vergleich der Ergebnisse verschiedener Prüfverfahren verzichtet. Bei gemeinsamer Darstellung der Ergebnisse der verteilungsgebundenen und der verteilungsfreien Verfahren zur Prüfung der Unabhängigkeit der k_f-Werte verschiedener Hauptgesteinstypen ergibt sich allerdings ein recht deutliches Muster:

In Tab. 7-10 sind die Einzelergebnisse für **t-Test, Varianzanalyse, Mann-Whitney-Wilcoxon-Test und Kolmogorov-Smirnov-Test** vergleichend zusammengefasst. Dargestellt sind jeweils diejenigen Kombinationen von Gesteinstypen, deren paarweise Irrtumswahrscheinlichkeit für die Hypothese signifikanter Übereinstimmung der jeweils betrachteten statistischen Merkmale der Hauptgesteinsdatensätze in einen der folgenden Bereiche fällt:

- hohe Irrtumswahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeitswerte >10 %,
- mäßige Irrtumswahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeitswerte 1 - 10 %,
- kein Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit $\geq$1 %.

Hohe Werte der Irrtumswahrscheinlichkeit bedeuten ein hohes Maß an Übereinstimmung hinsichtlich der geprüften Merkmale. Die Bereichsgrenzen und ihre Bezeichnungen wurden willkürlich gewählt. Die Zuordnungen sind daher lediglich als relative Angaben zu verstehen. Da beim Kolmogorov-Smirnov-Test die Formen der Werte-

verteilungen der jeweiligen Datensätze miteinander verglichen werden, liefert er insgesamt die geringsten Übereinstimmungen zwischen den Hauptgesteinstypen.

Wichtige Ergebnisse sind (Tab. 7-10):

- Datenbasis insgesamt:
  - Bei allen Tests fällt das deutliche Maß an Übereinstimmung zwischen Sandstein, Ton/Tonstein und Kalkstein auf. Sie bilden eine Gesteinsgruppe mit sehr ähnlichen statistischen Merkmalen.
  - Außer beim Kolmogorov-Smirnov-Test bilden Gneis und Tuff/Tuffit bei allen Tests ein Gesteinspaar mit weitgehender Übereinstimmung. Hintergrund dafür und für das abweichende Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Tests ist die ausgeprägt zweigipflige Häufigkeitsverteilung der kf-Werte dieser Gesteinstypen.
  - Für Steinsalz wurde mit keinem der Testverfahren eine Übereinstimmung mit anderen Gesteinstypen festgestellt. Mit Ausnahme der Varianzanalyse gilt dies auch für Mergelstein und Anhydrit. Diese Gesteinstypen bilden daher jeweils eine eigenständige Gruppe.
- Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche:
  - Granit, Sandstein und Kalkstein bilden bei allen Tests eine Gruppe mit hohem Maß an Übereinstimmung.
  - Ein gewisses Maß an Übereinstimmung besteht zwischen Gneis, Tuff/Tuffit, Sandstein und Kalkstein.
  - Für Steinsalz wurde wiederum keine Ähnlichkeit mit einem der anderen Gesteinstypen festgestellt.

Mit Hilfe der bei der **Diskriminanzanalyse** ermittelten Trennfunktion wurden alle k_f-Werte einem der neun Hauptgesteinstypen zugeordnet (Kapitel 7.1.3.1). Die für die einzelnen Gesteinstypen resultierende Verteilung (Tab. 7-7) zeigt, dass nur wenige Gesteinstypen die meisten k_f-Werte eines anderen Gesteinstyps oder ihrer selbst auf sich vereinigen. Nachfolgend ist angegeben, welchem Gesteinstyp jeweils die meisten k_f-Werte der einzelnen Gesteinstypen zugeordnet worden sind:

- Datenbasis insgesamt
  - Sandstein am häufigsten zugeordnet wurden kf-Werte von Ton/Tonstein, Kalkstein, Sandstein, Granit, Tuff/ Tuffit und Gneis (Reihenfolge entspricht den zugewiesenen kf-Wert-Anteilen),
  - Anhydrit am häufigsten zugeordnet wurden kf-Werte von Mergelstein,
  - Steinsalz am häufigsten zugeordnet wurden kf-Werte von Steinsalz und Anhydrit (Reihenfolge entspricht den zugewiesenen k_f-Wert-Anteilen).
- Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche

- Sandstein am häufigsten zugeordnet wurden k_f-Werte von Granit, Sandstein, Kalkstein, Tuff/Tuffit und Gneis (Reihenfolge entspricht den zugewiesenen kf-Wert-Anteilen),
- Ton/Tonstein am häufigsten zugeordnet wurden kf-Werte von Mergelstein,
- Mergelstein am häufigsten zugeordnet wurden kf-Werte von Mergelstein,
- Anhydrit am häufigsten zugeordnet wurden kf-Werte von Mergelstein,
- Steinsalz am häufigsten zugeordnet wurden k_f-Werte von Steinsalz, Ton/Tonstein und Anhydrit (Reihenfolge entspricht den zugewiesenen k_f-Wert-Anteilen).

Eine hoher Anteil zugeordeneter Werte bedeutet relativ hohe Übereinstimmung zwischen dem Gesteinstyp, dessen k_f-Werte zugeordnet worden sind, und dem Gesteinstyp, dem sie zugeordnet worden sind. Die k_f-Werte werden bevorzugt den Gesteinstypen zugeordnet, die im Hinblick auf die Gebirgsdurchlässigkeit als die extremen Vertreter der neun Hauptgesteinstypen angesehen werden können (s. u.). Insgesamt ergibt sich auf diese Weise ein ähnliches Bild für die Zusammenhänge zwischen den Hauptgesteinstypen wie bei den anderen Vergleichsverfahren:

In der Datenbasis insgesamt bildet offenbar Sandstein den "Bezugsgesteinstyp" für Gesteine mit erhöhter Gebirgsdurchlässigkeit, insbesondere für Sandstein selbst sowie Ton/Tonstein und Kalkstein. Demgegenüber stellt Steinsalz den "Bezugsgesteinstyp" für Gesteine mit eher geringer Gebirgsdurchlässigkeit dar (vor allem Steinsalz und Anhydrit). Bei den Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche ist in der auf Sandstein bezogenen Gesteinsgruppe Ton/Tonstein durch Granit ersetzt. Steinsalz bildet den "Bezugsgesteinstyp" nicht mehr nur für Anhydrit, sondern auch für Ton/Tonstein. In beiden Datensätzen fällt auf, dass ein deutlicher Anteil der k_f-Werte auch von Gneis, Granit und Mergelstein Steinsalz zugeordnet worden ist. Anders als bei Sandstein und Kalkstein treten bei diesen Gesteinstypen also auch zahlreiche niedrige k_f-Werte auf.

Die Ergebnisse des visuellen Vergleichs der Medianwerte und der 1. und 3. Quartile sind in Tab. 7-11 mit denen der statistischen Unterscheidungsverfahren zusammengeführt. Resultate sind die Gruppierung der Hauptgesteinstypen nach der Gebirgsdurchlässigkeit und die Quantifizierung der gruppenbezogenen Gebirgsdurchlässigkeit durch Zuweisung bestimmter k_f-Wert-Bereiche. Zur Abgrenzung der Gruppen werden die mit den AkEnd-Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirsgbereich verbundenen k_f-Werte (Kapitel 6.2.4) herangezogen.

paarweise Irrtumswahr-scheinlichkeit	t-Test	Varianzanalyse	Mann-Whitney-Wilcoxon-Test	Kolmogorov-Smirnov-Test
gesamte Datenbasis				
hoch (>10 %)	Sandstein - Ton/Tonstein - Kalkstein; Gneis - Tuff/ Tuffit	Sandstein - Ton/Tonstein - Kalkstein; Gneis - Tuff/ Tuffit	Gneis - Tuff/Tuffit; Sandstein - Ton/Tonstein - Kalkstein	Sandstein - Kalkstein
mäßig (1 - 10 %)	-	Granit - Tuff/Tuffit; Gneis - Granit; Mergelstein - Anhydrit	Granit - Tuff/Tuffit	Sandstein - Ton/Tonstein
kein Wert >1 %	Granit, Mergelstein, Anhydrit, Steinsalz	Steinsalz	Steinsalz, Anhydrit, Mergelstein	Steinsalz, Gneis, Anhydrit, Granit, Mergelstein, Tuff/Tuffit
300 - 1.500 m unter Geländeoberfläche				
hoch (>10 %)	Granit - Sandstein - Kalkstein	Granit - Sandstein - Kalkstein; Gneis - Tuff/Tuffit - Sandstein - Kalkstein; Ton/Tonstein - Anhydrit; Ton/Tonstein - Steinsalz; Mergelstein - Anhydrit	Granit - Sandstein - Kalkstein; Gneis - Tuff/Tuffit; Tuffit - Sandstein - Kalkstein	Granit - Sandstein - Kalkstein
mäßig (1 - 10 %)	Tuff/Tuffit - Kalkstein; Gneis - Mergelstein	Gneis - Mergelstein	Ton/Tonstein - Anhydrit; Gneis - Kalkstein	Gneis - Kalkstein; Ton/ Tonstein - Anhydrit; Tuff/ Tuffit - Sandstein; Tuff/ Tuffit - Kalkstein
kein Wert >1 %	Steinsalz, Anhydrit, Ton/ Tonstein	-	Steinsalz, Mergelstein	Steinsalz, Mergelstein

Tab. 7-10 Ergebnisse verschiedener statistischer Verfahren zur Bestimmung der paarweisen Irrtumswahrscheinlichkeiten für statistisch signifikante Unterschiede zwischen den k_f-Werten der Hauptgesteinstypen, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche

	Gruppen von Hauptgesteinstypen	Anteil bestimmter k_f-Wert-Bereiche an den Daten der Hauptgesteinstypen	
gesamte Datenbasis	Granit; Sandstein, Tonstein, Kalkstein	$>10^{-10}$ m/s: mehr als 75 %	relative Gebirgsdurchlässigkeit: niedriger ←→ höher
	Gneis, Tuff/Tuffit	$>10^{-10}$ m/s: mehr als 50 % $<10^{-10}$ m/s: weniger als 25 %	
	Mergelstein	$>10^{-10}$ m/s: mehr als 25 % $<10^{-10}$ m/s: mehr als 50 % $<10^{-12}$ m/s: weniger als 25 %	
	Anhydrit	$>10^{-10}$ m/s: mehr als 25 % $<10^{-10}$ m/s: mehr als 50 % $<10^{-12}$ m/s: mehr als 25 %	
	Steinsalz	$<10^{-12}$ m/s: nahezu ausschließlich	
300 - 1.500 m u. G.	Granit, Sandstein, Kalkstein	$>10^{-10}$ m/s: mehr als 75 %	relative Gebirgsdurchlässigkeit: niedriger ←→ höher
	Gneis, Tuff/Tuffit	$>10^{-10}$ m/s: mehr als 50 % $<10^{-10}$ m/s: weniger als 25 %	
	Mergelstein	$>10^{-10}$ m/s: mehr als 25 % $<10^{-10}$ m/s: mehr als 50 % $<10^{-12}$ m/s: weniger als 25 %	
	Anhydrit	$>10^{-10}$ m/s: mehr als 25 % $<10^{-10}$ m/s: mehr als 50 % $<10^{-12}$ m/s: mehr als 25 %	
	Ton/Tonstein	$<10^{-10}$ m/s: nahezu ausschließlich $<10^{-12}$ m/s: mehr als 25 %	
	Steinsalz	nahezu ausschließlich $<10^{-12}$ m/s	

Tab. 7-11 Gruppierung der Hauptgesteinstypen nach der relativen Gebirgsdurchlässigkeit, differenziert nach Datenbasis insgesamt und Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche

7.1.4 Formale Beurteilung der Hauptgesteinstypen im Hinblick auf die Anforderungen des AkEnd

Gesteinstypübergreifende Beurteilung

Betrachtet man die k_f-Werte gesteinstypübergreifend so fällt bei den zweigipfligen Häufigkeitsverteilungen für die Datenbasis insgesamt und für die Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche auf (Abb. 7-2): Das Minimum zwischen den beiden Maxima liegt bei beiden Datensätzen etwa bei 10^{-10} m/s, also im Bereich des vom AKEND (2002a) in der Mindestanforderung zur Gebirgsdurchlässigkeit festgelegten k_f-Wertes (Kapitel 6.2.4). Ein Großteil der vorhandenen k_f-

Werte entspricht daher nicht der Mindestanforderung. Nach Tab. 7-12 handelt es sich dabei um 73 bzw. 59 % der Werte.

Gesteinstypbezogene Beurteilung

Bei den einzelnen Hauptgesteinstypen zeigt sich für die **Datenbasis insgesamt** (Abb. 7-3), dass die Häufigkeitsmaxima bei allen Gesteinstypen außer bei Anhydrit und Steinsalz über dem Wert der Mindestanforderung liegen. Bei Gneis und insbesondere Tuff/Tuffit trifft das allerdings jeweils nur für das höhere der beiden Maxima zu. Die Werte für Mergelstein scharen sich um den kritischen Wert, der Medianwert liegt allerdings knapp unter 10^{-10} m/s (Tab. 7-1).

Beim Datensatz für den **Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche** unterscheiden sich die Verhältnisse bei Anhydrit, Steinsalz und Tuff/Tuffit wegen (weitgehender) Datenübereinstimmung nicht (maßgeblich) von denen der gesamten Datenbasis. Insbesondere bei Granit, Tuff/Tuffit, Sandstein und Kalkstein treten erhebliche Anteile von Werten größer als 10^{-10} m/s auf. Bei Gneis hat der Anteil kleinerer Werte gegenüber der gesamten Datenbasis dagegen zugenommen. Die Werte für Mergelstein sind wiederum eng um den Wert der Mindestanforderung angeordnet, Medianwert (und geometrischer Mittelwert) liegen nun aber unter 10^{-10} m/s. Die auffälligste Veränderung gegenüber der Gesamtdatenbasis ist bei Ton/Tonstein zu verzeichnen: Mit einer Ausnahme erfüllen nun alle Werte dieses Gesteinstyps die Mindestanforderung.

Auf die Anwendung der in 6.2.4 genannten formalen Bewertungsregeln wirken sich diese Verhältnisse wie folgt aus (Tab. 7-12):

In der **Datenbasis insgesamt** wird die Mindestanforderung des AKEND (2002a) nur bei drei Gesteinstypen von mehr als 50 % der Werte erfüllt, nämlich Mergelstein, Anhydrit und Steinsalz. Nur bei diesen Gesteinstypen ist der Medianwert also kleiner als 10^{-10} m/s, nur bei Anhydrit und Steinsalz zugleich auch der geometrische Mittelwert.

Bei den Daten aus **300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche** wird die Mindestanforderung des AkEnd von insgesamt 41 % der k_f-Werte aller Hauptgesteinstypen erfüllt. Bei Mergelstein, Anhydrit und Steinsalz sowie Ton/Tonstein sind mehr als 50 % der k_f-Werte kleiner als 10^{-10} m/s. Bei diesen Gesteinstypen liegt auch der geometrische Mittelwert unter dieser Marke. Bei Steinsalz und Ton/Tonstein sind Medianwert und geometrischer Mittelwert sogar kleiner als 10^{-12} m/s.

Bei allen anderen Gesteinstypen liegen die Medianwerte deutlich über der Mindestanforderung. Außerdem sind die Bandbreiten der k_f-Werte sehr groß. Hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit bieten sie daher für die Endlagerung radioaktiver Abfälle vergleichsweise ungünstige Voraussetzungen. Diese Bewertung schließt allerdings nicht aus, dass an einzelnen Untersuchungsgebieten vorwiegend oder sogar ausschließ-

lich ungewöhnlich niedrige k_f-Werte angetroffen werden können. Daher ist in Kapitel 7.2 zu prüfen, wieweit die aus der gesteinstypübergreifenden Datenauswertung abgeleiteten Aussagen einer Detailbetrachtung standhalten.

	gesamte Datenbasis				300 - 1.500 m u. G.			
	n	Anteil k_f-Werte $<10^{-10}$ m/s (%)	Medianwert $<10^{-10}$ m/s	Medianwert $<10^{-12}$ m/s	n	Anteil k_f-Werte $<10^{-10}$ m/s (%)	Medianwert $<10^{-10}$ m/s	Medianwert $<10^{-12}$ m/s
Gneis	472	29	nein	nein	271	42	nein	nein
Granit	890	21	nein	nein	605	24	nein	nein
Tuff/Tuffit	260	37	nein	nein	228	41	nein	nein
Sandstein	67	10	nein	nein	31	13	nein	nein
Ton/Tonstein	676	15	nein	nein	36	97	ja	ja
Mergelstein	199	52	ja	nein	157	58	ja	nein
Kalkstein	83	7	nein	nein	37	16	nein	nein
Anhydrit	70	74	ja	nein	68	75	ja	nein
Steinsalz	75	99	ja	ja	75	99	ja	ja
alle	2.792	27	nein	nein	1.508	41	nein	nein

Tab. 7-12 Formale Beurteilung der Hauptgesteinstypen anhand der Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit gemäß AKEND (2002a)

ja: Bedingung erfüllt
nein: Bedingungen nicht erfüllt
farblich hinterlegt: Anteil der k_f-Werte $<10^{-10}$ m/s ist >50 % bzw. Bedingung erfüllt

Tab. 7-13 enthält die formale Bewertung der Hauptgesteinstypen auf Grundlage der in Kapitel 6.2.4 für Schiefe und Kurtosis der Häufigkeitsverteilungen abgeleiteten Bewertungsgrundsätze. Sie werden auf die in Tab. 7-1 zusammengestellten Schiefe- und Kurtosiswerte angewendet. Die Tabelle zeigt, dass eine differenzierte Bewertung auf dieser Basis nicht möglich ist; denn die Werte sind entweder nicht signifikant oder weichen von den in Kapitel 6.2.4 als relativ günstig bezeichneten Verhältnissen mehr oder weniger deutlich ab. Die einzigen aussagekräftigen Werte betreffen die Kurtosis der k_f-Werte für Ton/Tonstein in der Datenbasis insgesamt, die Schiefe der k_f-Werte für Mergelstein aus dem Tiefenbereich zwischen 300 und 1.500 m unter Geländeoberfläche und die Kurtosis der Steinsalzwerte. Berücksichtigt man die zweifelhafte Aussagekraft von statistischen Kennwerten, die fälschlich unter Annahme der Nor-

malverteilung abgeleitet worden sind (Kapitel 7.1.3.1), bleiben davon der Schiefewert für die Mergelstein-Werte aus 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche und allenfalls der Kurtosis-Wert für Steinsalz als aussagekräftig übrig.

Die Beurteilung auf Grund der Kurtosis bei Ton/Tonstein für die gesamte Datenbasis erscheint angesichts der sonst ungünstigen Eigenschaften der k_f-Werte dieses Gesteinstyps fragwürdig.

	gesamte Datenbasis			**300 - 1.500 m u. G.**		
	n	kleine (eher positive) Schiefe	positive Kurtosis	n	kleine (eher positive) Schiefe	positive Kurtosis
Gneis	472	(-0,27)	nein	271	-	nein
Granit	890	nein	-	605	nein	nein
Tuff/Tuffit	260	-	nein	228	-	nein
Sandstein	67	-	-	31	-	-
Ton/Tonstein	676	nein	0,46	36	-	-
Mergelstein	199	(0,77)	-	157	0,43	-
Kalkstein	83	nein	-	37	-	-
Anhydrit	70	(0,83)	-	68	(0,87)	-
Steinsalz	75	-	3,88	75	-	3,88
alle	2.792	(-0,47)	nein	1.508	(-0,16)	nein

Tab. 7-13 Formale Beurteilung der Hauptgesteinstypen anhand der für Schiefe und Kurtosis formulierten Positivverhältnisse, differenziert nach der Datenbasis insgesamt und den Daten aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche

kleine Schiefe: -0,5 bis 0,5
nein: Bedingung nicht erfüllt
(Schiefewert) in Klammern: Bedingung nur teilweise erfüllt (klein, aber nicht positiv oder positiv, aber nicht klein)
- Schiefe bzw. Kurtosis nicht signifikant
farblich hinterlegte Werte: Schiefe- bzw. Kurtosisbedingung gemäß Kapitel 6.2.4 erfüllt, Schiefe bzw. Kurtosis signifikant

7.2 Gesteinstypbezogene Auswertung

7.2.1 Gneis

Dem Hauptgesteinstyp Gneis wurden auch einige k_f-Werte anderer Gesteinstypen zugeordnet, die bei den hydraulischen Untersuchungen zusammen mit dem Hauptgesteinstyp erfasst worden sind. Dazu gehören die Metamorphite Amphibolit und Metagabbro (Untersuchungsgebiet Oberpfalz: KTB-Vorbohrung), Diatexit (Untersuchungsgebiet Urach) sowie Migmatit (Untersuchungsgebiet Olkiluoto) und die Ganggesteine Aplit, Lamprophyr und Pegmatit (Untersuchungsgebiet Nordschweiz bzw. Untersuchungsgebiet Oberpfalz: KTB-Vorbohrung). Durchlässigkeitsunterschiede zwischen den genannten Gesteinstypen konnten nicht ermittelt werden. Besonders auffällige k_f-Werte haben sie nicht geliefert; ausgenommen ist der Metagabbro in der KTB-Vorbohrung, für den mit 10^{-15} m/s ein relativ geringer k_f-Wert ermittelt worden ist.

Die k_f-Werte für Gneis decken insgesamt eine Bandbreite von etwa zehn Größenordnungen ab (Tab. 7-1 u. 7-14). Medianwert und geometrisches Mittel liegen bei gut 10^{-09} m/s. Die Häufigkeitsverteilung (Abb. 7-3 u. 7-4) ist allerdings ausgeprägt zweigipflig, so dass diese Kennwerte nur begrenzte Aussagekraft haben. Der weitaus größte Teil der k_f-Werte (ca. 70 %) liegt über dem Wert der Mindestanforderung des AkEnd (Tab. 7-12).

Einflussfaktor Länge Testintervall

Die Länge des Testintervalls hat beim Gesteinstyp Gneis insgesamt keinen ausgeprägten Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit (s. 7.1.2.2). Dasselbe gilt weitgehend auch für die aus den einzelnen Untersuchungsgebieten vorliegenden k_f-Werte. Eine Ausnahmen bilden die Messwerte aus dem Untersuchungsgebiet Schwarzwald, bei denen - ähnlich wie bei Granit (Abb. 7-23) - eine gewisse umgekehrt proportionale Beziehung zwischen den logarithmierten Werten der Länge des Testintervalls und der k_f-Werte besteht. Allerdings ist hier zu beachten, dass die Intervalllängen zugleich mit der mittleren Tiefe des Testabschnitts zunehmen. Der Einfluss der Tiefe auf die k_f-Werte ist allgemein erheblich stärker als derjenige der Länge des Testintervalls.

Einflussfaktor Testtiefe

Die Gebirgsdurchlässigkeit von Gneis ist deutlich tiefenabhängig (Abb. 7-16 - 7-18, 7-20). Besonders gut erkennbar ist dies in der doppelt-logarithmischen Darstellung in Abb. 7-16. Danach ist mit einer Tiefenzunahme um zwei Größenordnungen (10 auf 1.000 m u. G.) eine Abnahme der jeweils niedrigsten k_f-Werte um rund zehn Größenordnungen verbunden. Oberhalb des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs treten fast ausschließlich k_f-Werte größer als 10^{-10} m/s (Mindestanforderung des AkEnd) auf. Mit der Tiefe nimmt der Anteil kleinerer Werte deutlich zu. So

beträgt der Anteil der k_f-Werte $<10^{-10}$ m/s an der Gesamtanzahl der Werte aus den drei unterschiedenen Tiefenbereichen beim Tiefenbereich <300 m unter Geländeoberfläche weniger als 1 %, beim Tiefenbereich 300 bis 1.500 m 42 % und beim Tiefenbereich >1.500 m immerhin 45 %. Auch danach ist im gesamten für die Errichtung eines Endlagers in Frage kommenden Tiefenbereich zwischen 300 und 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche, aber auch darunter noch, mit hohen Werten zu rechnen. Mit zunehmender Tiefe wird lediglich die Bandbreite der k_f-Werte um niedrige Werte erweitert.

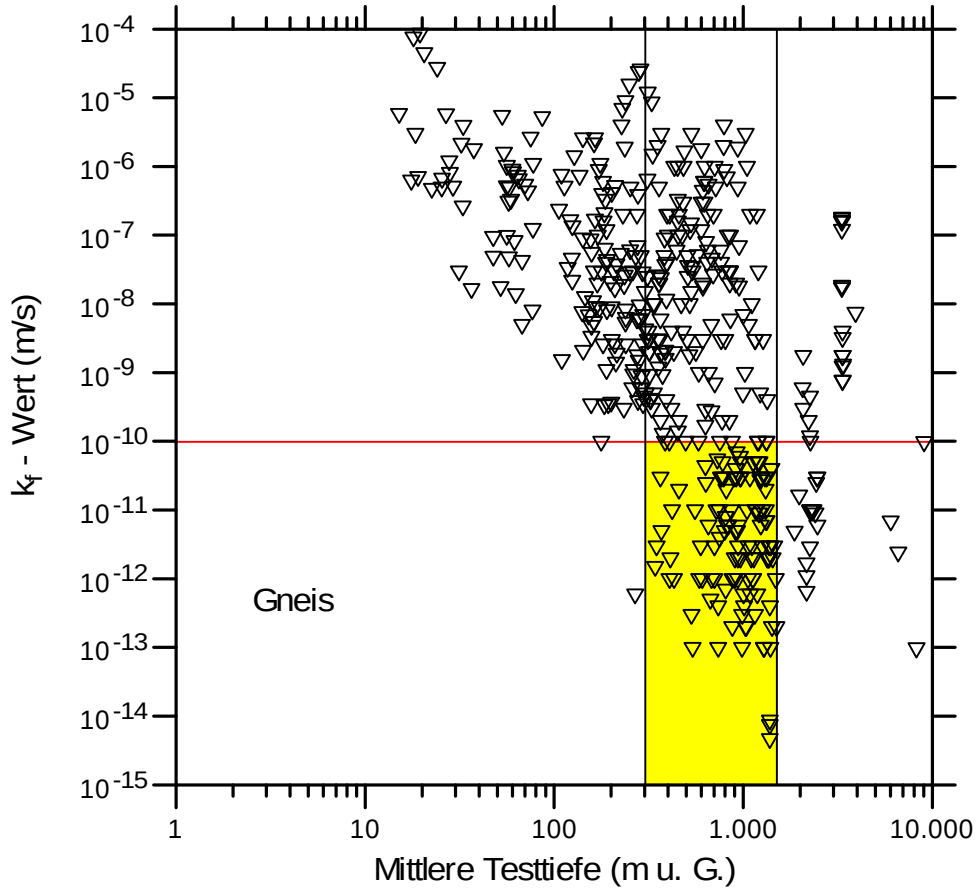


Abb. 7-16 k_f-Werte für Gneis in Abhängigkeit von der Testtiefe

horizontale Linie bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linie bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Die deutliche tiefenabhängige Veränderung der k_f-Werte in Abb. 7-16 vollzieht sich nicht kontinuierlich. Vielmehr setzen sich die Daten bei näherer Betrachtung aus sich teilweise überlagernden Clustern von k_f-Werten aus verschiedenen Untersuchungsgebieten zusammen, die sich hinsichtlich des bevorzugt untersuchten Tiefenbereichs

und der dabei erhobenen charakteristischen Durchlässigkeitswerte (geometrischer Mittelwert, Medianwert) unterscheiden.

In den einzelnen Untersuchungsgebieten ist der Zusammenhang zwischen Tiefe und Gebirgsdurchlässigkeit nicht immer deutlich zu erkennen, weil er von anderen Einflussfaktoren überlagert wird (s. u.) oder weil der jeweils untersuchte Tiefenbereich dafür zu klein ist.

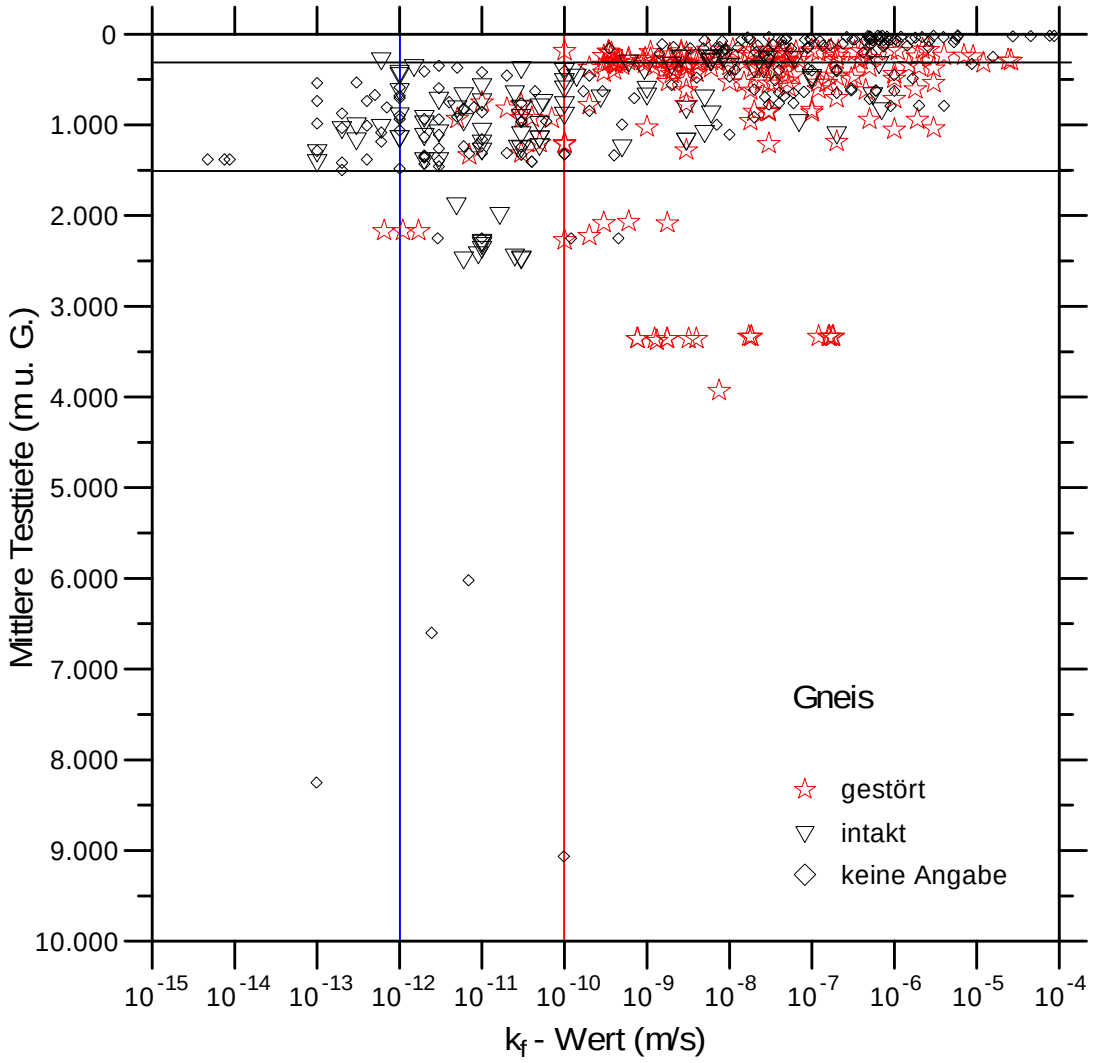


Abb. 7-17 Tiefenverteilung der k_f-Werte für Gneis, differenziert nach Gefügeklassen

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
horizontale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Die Zusammenhänge zwischen Untersuchungstiefe und Durchlässigkeit spiegeln sich auch in den Abb. 7-17 und 7-18 mit der Tiefenverteilung für den gesamten durch k_f-Werte abdeckten Tiefenbereich bzw. dem Tiefenausschnitt bis 2.000 m unter Geländeoberfläche wider, außerdem in den deutlichen Unterschieden zwischen den statistischen Kennwerten für die Tiefenbereiche <300 m und 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche (Tab. 7-14). Sie machen außer beim Maximalwert etwa zwei Größenordnungen aus. Bei den (zahlenmäßig spärlichen) Daten aus Tiefen >1.500 m unter Geländeoberfläche ist keine weitere Abnahme der Gebirgsdurchlässigkeit erkennbar.

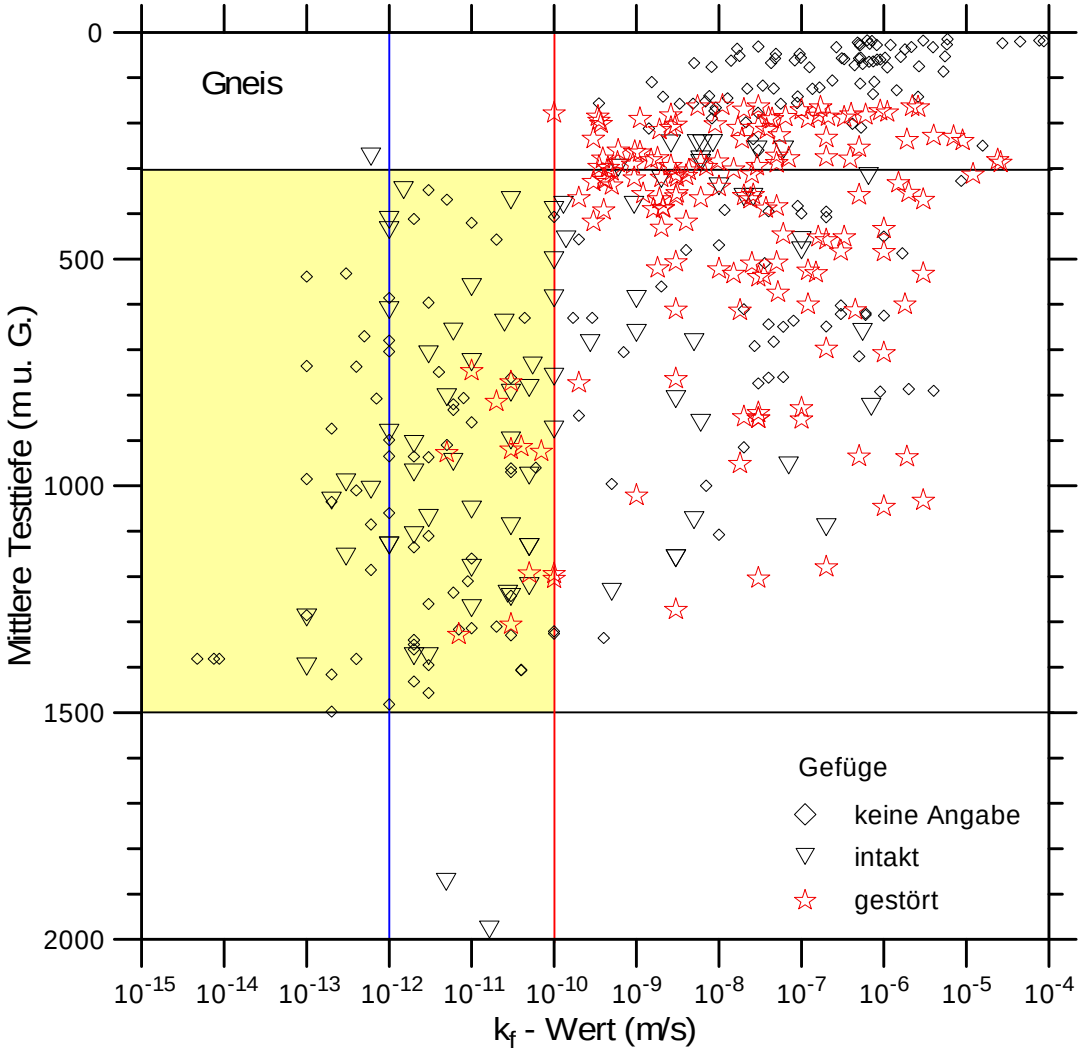


Abb. 7-18 Tiefenverteilung der k_f-Werte für Gneis bis 2.000 m Tiefe unter Geländeoberfläche, differenziert nach Gefügeklassen

horizontale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Tiefenbereich (m u. G.)	**Anzahl Mess-werte**	**k_f-Werte (m/s)**			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
<300	154	$6{,}00 * 10^{-13}$	$8{,}68 * 10^{-05}$	$6{,}65 * 10^{-08}$	$5{,}85 * 10^{-08}$
300 - 1.500	271	$4{,}70 * 10^{-15}$	$1{,}20 * 10^{-05}$	$4{,}27 * 10^{-10}$	$3{,}00 * 10^{-10}$
>1.500	44	$9{,}81 * 10^{-14}$	$1{,}82 * 10^{-07}$	$3{,}62 * 10^{-10}$	$1{,}60 * 10^{-10}$
alle *)	472	$4{,}70 * 10^{-15}$	$8{,}68 * 10^{-05}$	$2{,}11 * 10^{-09}$	$3{,}99 * 10^{-09}$

Tab. 7-14 k_f-Werte für Gneis, differenziert nach Tiefenbereichen

*) einschließlich Werten ohne Tiefenangabe

Einflussfaktor Gefüge

Das Gesteinsgefüge (in dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Sinne) übt bei kristallinen Gesteinen erfahrungsgemäß großen Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit aus. Deshalb liegen zu den k_f-Werten für Gneis verbreitet Informationen über das Vorhandensein von Klüften und Störungen vor. Oft sind gerade Gebirgsbereiche mit solchen Gefügestörungen gezielt untersucht worden. Die k_f-Werte aus in diesem Sinne gestörten Gebirgsbereichen liegen deutlich über denen aus intaktem Gebirge (Tab. 7-15): Im Mittel (geometrischer Mittelwert, Medianwert) unterscheiden sich die k_f-Werte aus Gebirge mit intaktem bzw. gestörtem Gefüge um ca. drei Größenordnungen (Abb. 7-19 u. 7-20). Der Unterschied ist signifikant.

Die Wahrscheinlichkeitsdiagramme für intaktes und gestörtes Gebirge in Abb. 7-20 machen die Durchlässigkeitsunterschiede anschaulich. Auffällig ist das Diagramm für Werte ohne Gefügeangabe: Im Bereich der niedrigen Werte fallen die Datenpunkte nahezu mit denen für ungestörtes Gebirge zusammen. Mit zunehmender Durchlässigkeit nähern sich die Datenpunkte dann immer stärker denen für gestörtes Gebirge an. Dies deutet daraufhin, dass die Daten ohne Angabe zum Gefüge sowohl intakte als auch gestörte Gebirgsbereiche charakterisieren und daher eine zweigipflige Verteilung aufweisen. In abgeschwächter Form gilt das auch für die Werte aus intakten Gebirgsbereichen. Ein nicht unerheblicher Anteil der Werte aus intaktem Gebirge entspricht daher k_f-Werten für gestörtes Gebirge. Möglicherweise sind also bei den hydraulischen Untersuchungen nicht alle durchlässigkeitserhöhenden Gefügestörungen erkannt worden. Das Gefüge ist danach jedenfalls die Hauptursache für die bereits in 7.1.1 diskutierte Zweigipfligkeit der k_f-Werte für Gneis.

Der Einfluss des Gefüges wird von den Auswirkungen der Tiefe überlagert und umgekehrt: Während sich die k_f-Werte für gestörtes und intaktes Gebirge aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche, aus dem die meisten Daten vorliegen, im Mittel ebenfalls um rund drei Größenordnungen unterscheiden, sind bei den Werten aus dem Tiefenbereich kleiner als 300 m unter Geländeoberfläche die Werte für gestörte Gesteinsbereiche nur um eine Größenordnung höher, bei Werten aus Tiefen größer als 1.500 m unter Geländeoberfläche um rund zwei Größenordnungen. Die Unterschiede zwischen den Gefügeklassen sind für alle Tiefenbereiche statistisch signifikant, wobei die "Schärfe" der Unterscheidung in der Reihenfolge 300 - 1.500, >1.500 und <300 m unter Geländeoberfläche deutlich abnimmt.

Gesteins-gefüge	Tiefen-bereich (m u. G.)	n	k_f-Werte (m/s)			
			Minimal-wert	Maximal-wert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
intakt	<300	10	$6{,}00 * 10^{-13}$	$6{,}10 * 10^{-08}$	$2{,}65 * 10^{-09}$	$6{,}00 * 10^{-09}$
	300 - 1.500	70	$1{,}00 * 10^{-13}$	$7{,}00 * 10^{-07}$	$7{,}22 * 10^{-11}$	$3{,}87 * 10^{-11}$
	>1.500	11	$4{,}90 * 10^{-12}$	$3{,}00 * 10^{-11}$	$1{,}23 * 10^{-11}$	$1{,}00 * 10^{-11}$
	alle	91	$1{,}00 * 10^{-13}$	$7{,}00 * 10^{-07}$	$8{,}67 * 10^{-11}$	$3{,}00 * 10^{-11}$
gestört	<300	63	$1{,}00 * 10^{-10}$	$2{,}60 * 10^{-05}$	$2{,}68 * 10^{-08}$	$3{,}00 * 10^{-08}$
	300 - 1.500	92	$5{,}00 * 10^{-12}$	$1{,}20 * 10^{-05}$	$9{,}55 * 10^{-09}$	$1{,}50 * 10^{-08}$
	>1.500	25	$6{,}50 * 10^{-13}$	$1{,}82 * 10^{-07}$	$1{,}76 * 10^{-09}$	$1{,}76 * 10^{-09}$
	alle	180	$6{,}50 * 10^{-13}$	$2{,}60 * 10^{-05}$	$1{,}08 * 10^{-08}$	$1{,}50 * 10^{-08}$
keine Angabe	<300	81	$3{,}50 * 10^{-10}$	$8{,}68 * 10^{-05}$	$2{,}01 * 10^{-07}$	$3{,}30 * 10^{-07}$
	300 - 1.500	109	$4{,}70 * 10^{-15}$	$8{,}67 * 10^{-06}$	$9{,}69 * 10^{-11}$	$2{,}00 * 10^{-11}$
	>1.500	8	$9{,}81 * 10^{-14}$	$4{,}50 * 10^{-10}$	$1{,}12 * 10^{-11}$	$8{,}39 * 10^{-12}$
	alle *)	201	$4{,}70 * 10^{-15}$	$8{,}63 * 10^{-05}$	$2{,}06 * 10^{-09}$	$1{,}00 * 10^{-08}$

Tab. 7-15 k_f-Werte für Gneis nach Gefügeklassen und Tiefenbereichen

n: Anzahl der Werte
*) einschließlich Werten ohne Tiefenangabe

In Abb. 7-21 ist die Abhängigkeit der k_f-Werte von der Testtiefe getrennt für die drei Gefügeklassen "intakt", "gestört" und "keine Angabe" dargestellt. Bei allen drei Klassen ist eine mehr oder weniger ausgeprägte Tendenz zur Abnahme der k_f-Werte mit der Tiefe erkennbar, am auffälligsten bei den Werten aus intaktem Gebirge bzw. denen ohne Gefügeangabe. Sieht man von extrem niedrigen und extrem hohen Werten ab, werden allerdings für vergleichbare Tiefenintervalle, durchaus auch ähnliche Werte gemessen.

Die sich in den drei Diagrammen der Abb. 7-21 (und bereits Abb. 7-16) abzeichnenden Werte-Cluster repräsentieren jeweils Daten aus unterschiedlichen Untersuchungsgebieten. Da nur aus wenigen Untersuchungsgebieten getrennt erhobene Werte aus intakten und gestörten Gebirgsbereichen vorliegen, sind exakte Vergleiche zwischen den Gebieten genauso wenig möglich wie die zuverlässige Ableitung einer gebietsübergreifenden gefügeabhängigen Durchlässigkeit/Tiefe-Funktion

Die Tiefenabhängigkeit der k_f-Werte äußert sich deutlich auch in den Relationen zwischen den geometrischen Mittelwerten und Medianwerten der k_f-Werte aus verschiedenen Tiefenbereichen für intaktes Gebirge bzw. die Stichprobe ohne Gefügeangaben (Tab. 7-15). Sie liegen nämlich beim Tiefenbereich <300 m unter Geländeoberfläche um etwa zwei Größenordnungen über den entsprechenden Werten für die anderen Tiefenbereiche. Offensichtlich sind in geringen Tiefen nicht alle diskreten durchflusswirksamen Gebirgsbereiche erkennbar, so dass auch Gebirgsbereiche mit erhöhter Durchlässigkeit als intakt charakterisiert werden können. Mögliche Ursachen für diese Unterschiede sind die generelle entlastungsbedingte Gebirgsauflockerung in Oberflächennähe oder aber Verschluss bzw. Verengung entstehender durchflusswirksamer Zonen in größerer Tiefe.

Die Abnahme der k_f-Werte mit der Tiefe bei intaktem Gebirge und bei den Werten ohne Gefügeangabe (Abb. 7-21) deutet darauf hin, dass sich mit zunehmender Tiefe die Anzahl wassergängiger Trennfugen und/oder die Öffnungsweite diskreter Trennfugen verringern. SCHÄDEL & STOBER (1987) gehen für die Gneise im Schwarzwald davon aus, dass die Grundwasserbewegung - anders als bei Granit (Kapitel 7.2.2) - bevorzugt auf diskreten Klüften erfolgt. Dafür ist die besondere Zusammensetzung und Textur von Gneis verantwortlich: Einerseits führt danach die Glimmerfoliation des Gneises zu duktilem Verhalten gegenüber Stress, während andererseits Chloritbildung aus Glimmer die Grundwasserbewegung auf Klüften hemmen kann.

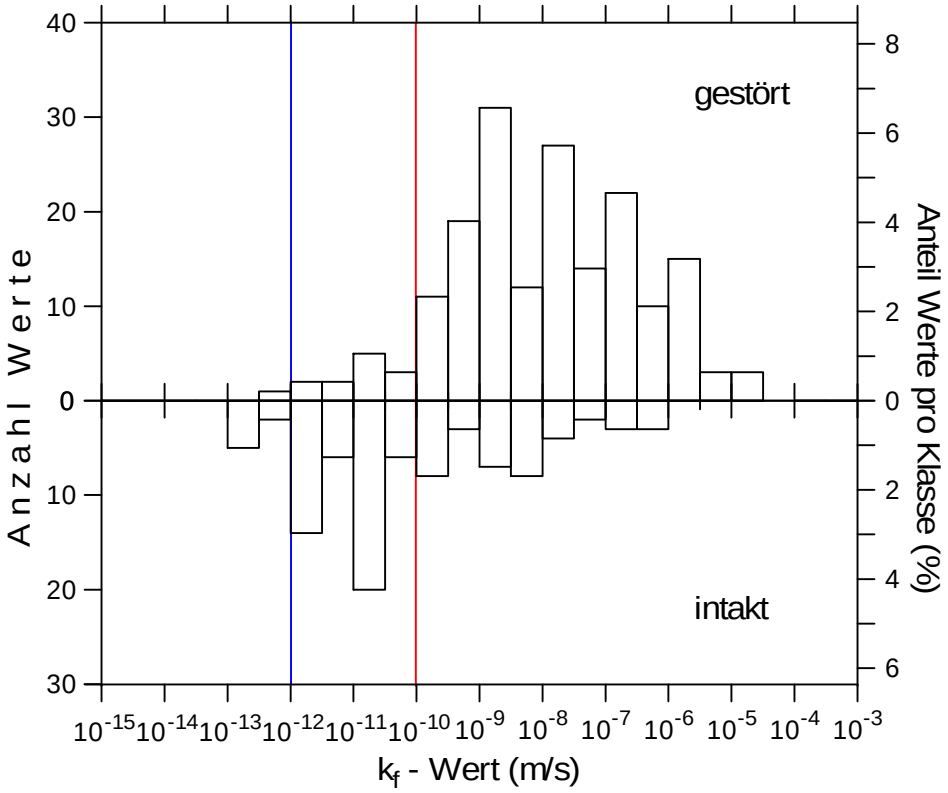


Abb. 7-19 Histogramme der k_f-Werte für Gneis für die Gefügeklassen "intakt" und "gestört"

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

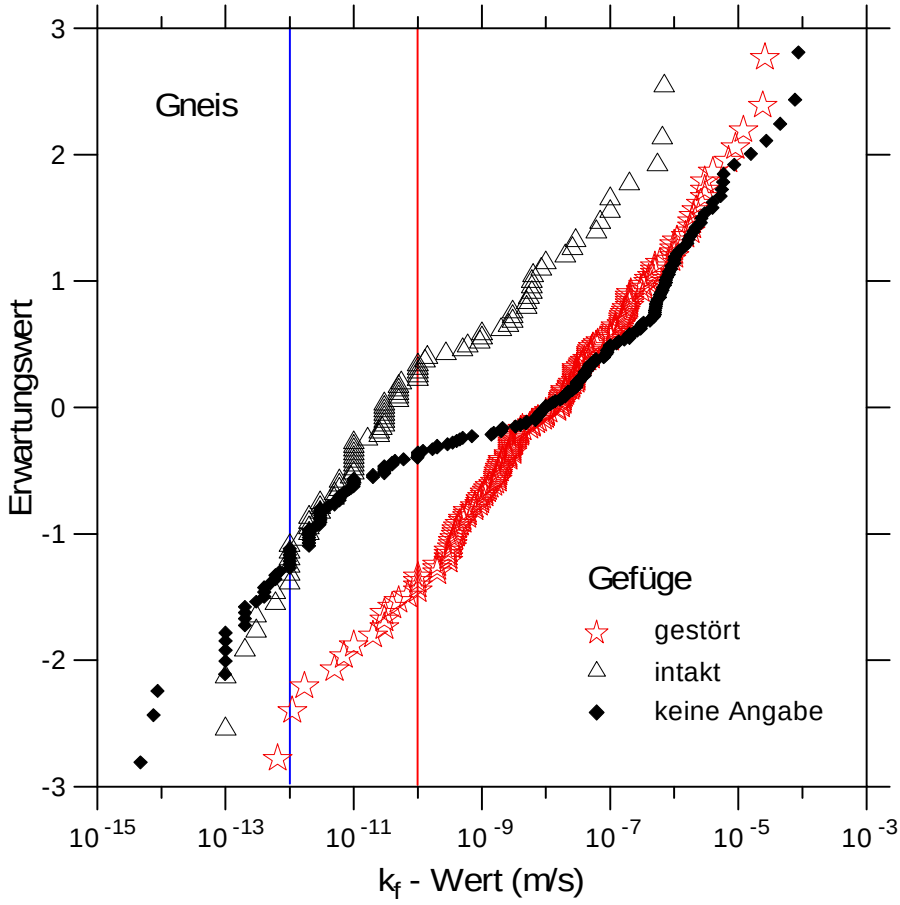


Abb. 7-20 Wahrscheinlichkeitsdiagramme für die k_f-Werte der Gefügeklassen von Gneis

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

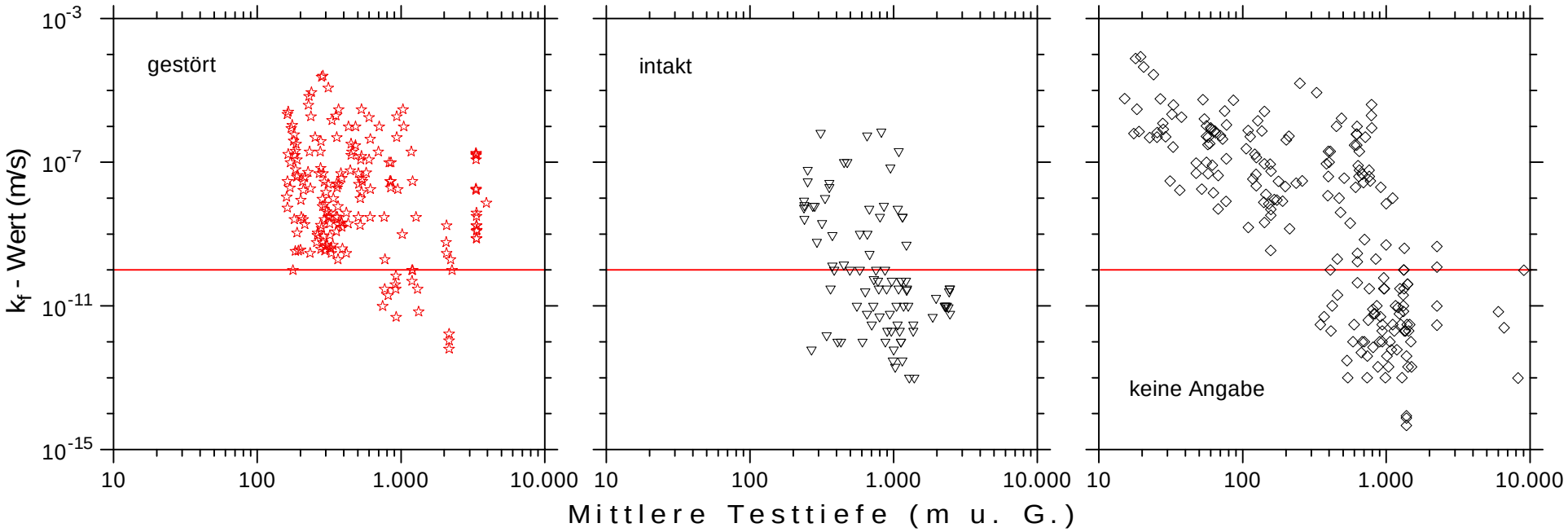


Abb. 7-21 k_f-Werte der Gefügeklassen von Gneis in Abhängigkeit von der Testtiefe

vertikale Linien bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Einflussfaktor Untersuchungsgebiet

Sieht man von Beurteilungsunsicherheiten auf Grund unterschiedlicher Anzahl der Messwerte ab, können die Untersuchungsgebiete für Gneis hinsichtlich der k_f-Wert-Verteilungen in zwei Gruppen untergliedert werden (Tab. 7-16 u. Abb. 7-21):

Die Untersuchungsgebiete Cajon-Pass, Nordschweiz und Oberpfalz fallen mit relativ geringen Durchlässigkeitswerten auf (geometrische Mittelwerte bzw. Medianwerte gut 10^{-12} bis gut 10^{-10} m/s). Die Medianwerte liegen überwiegend unter der Mindestanforderung des AkEnd. Demgegenüber sind alle anderen Untersuchungsgebiete durch hohe k_f-Werte gekennzeichnet. Die geometrischen Mittelwerte Medianwerte liegen überwiegend oberhalb 10^{-09} m/s, teilweise sogar über 10^{-07} m/s.

Darüber hinaus erlauben die Ergebnisse aus einzelnen Untersuchungsgebieten folgende zur Charakterisierung der Gebirgsdurchlässigkeit des Hauptgesteinstyps Gneis wichtige Aussagen:

Die Biotit-, Biotit-Cordierit-Gneise des Kristallins im **Untersuchungsgebiet Nordschweiz** wurden mit den Tiefbohrungen Böttstein, Waiach, Kaisten und Leuggern erkundet. Die Ergebnisse der hydraulischen Packertests in Tiefen über 2.000 m unter Geländeoberfläche (Bohrung Waiach) deuten darauf hin, dass auch in größeren Tiefen Gesteinsbereiche mit gestörtem bzw. weitgehend intaktem Gefüge räumlich eng beieinander liegen.

Am Standort des Kontinentalen Tiefbohrprogramms bei Windischeschenbach (**Untersuchungsgebiet Oberpfalz**) mit vorwiegend Gneis und Amphibolit sind die Fluidzuflüsse und damit Zonen erhöhter Gebirgsdurchlässigkeit stark auf bestimmte Zonen konzentriert. Bei der Vorbohrung wurden die stärksten Zuflüsse ins Bohrloch im Bereich der Endtiefe bei 4.000 m unter Geländeoberfläche verzeichnet. Der k_f-Wert für diese Zone beträgt $7{,}5 * 10^{-09}$ m/s. Die Versuche über fast die gesamte Bohrlochstrecke (500 m - 4.000 m) haben k_f-Werte von 10^{-12} bis 10^{-10} m/s ergeben. Dies kann als integraler Wertebereich über "intakte" und "gestörte" Gebirgsabschnitte aufgefasst werden. Packermessungen in Metagabbro mit kleinen Testintervallen (15 m) im Tiefenbereich um 1.370 m unter Geländeoberfläche ergaben dagegen sehr niedrige Durchlässigkeiten um 10^{-15} m/s. In der Kontinentalen Tiefbohrung selbst sind noch in einer Tiefe über 9.000 m unter Geländeoberfläche ungefähr 10^{-10} m/s als k_f-Wert festgestellt worden.

Sehr tiefe (>3.000 m u. G.) hydraulische Versuche wurden auch in der Forschungsbohrung Urach 3 (**Untersuchungsgebiet Urach**) an Gneisen und Diatexiten durchgeführt. Besonders stark gestörte Bereiche mit sich kreuzenden Kluftflächen sind im Tiefenbereich um 3.300 m angetroffen worden. Entsprechend weist dieser Bereich hohe k_f-Werte zwischen 10^{-08} und 10^{-07} m/s auf.

Untersu-chungs-gebiet	**n**	**mittlere Testtiefe (m u. G.)**	**k_f-Werte (m/s)** Minimal-wert	Maximal-wert	Geometr. Mittelwert	Median-wert
Oberpfalz	18	238 - 9.066	$4{,}70 * 10^{-15}$	$7{,}50 * 10^{-09}$	$4{,}75 * 10^{-12}$	$4{,}89 * 10^{-12}$
Schwarzwald	86	15 - 509	$3{,}50 * 10^{-10}$	$8{,}68 * 10^{-05}$	$2{,}08 * 10^{-07}$	$3{,}74 * 10^{-07}$
Urach	16	3.327 - 3.374	$7{,}61 * 10^{-10}$	$1{,}82 * 10^{-07}$	$1{,}05 * 10^{-08}$	$1{,}06 * 10^{-08}$
Olkiluoto	34	227 - 935	$4{,}00 * 10^{-10}$	$2{,}60 * 10^{-05}$	$8{,}96 * 10^{-08}$	$3{,}60 * 10^{-08}$
Romuvaara	80	160 - 950	$1{,}00 * 10^{-10}$	$2{,}60 * 10^{-06}$	$7{,}85 * 10^{-09}$	$4{,}90 * 10^{-09}$
Stärnö	10	238 - 374	$1{,}30 * 10^{-10}$	$6{,}10 * 10^{-08}$	$6{,}19 * 10^{-09}$	$7{,}35 * 10^{-09}$
Nordschweiz	212	253 - 2.464	$1{,}00 * 10^{-13}$	$4{,}00 * 10^{-06}$	$1{,}42 * 10^{-10}$	$3{,}00 * 10^{-11}$
Schweizer Dr.	3	-	$2{,}00 * 10^{-09}$	$3{,}50 * 10^{-08}$	$7{,}88 * 10^{-09}$	$7{,}00 * 10^{-09}$
Cajon-Pass	3	1.867 - 2.076	$4{,}90 * 10^{-12}$	$1{,}77 * 10^{-09}$	$5{,}22 * 10^{-11}$	$1{,}64 * 10^{-11}$
Maryland	7	530 - 915	$7{,}00 * 10^{-10}$	$1{,}50 * 10^{-07}$	$2{,}60 * 10^{-08}$	$4{,}60 * 10^{-08}$
Savannah-R.	3	450 - 450	$1{,}40 * 10^{-10}$	$3{,}30 * 10^{-07}$	$1{,}95 * 10^{-08}$	$1{,}60 * 10^{-07}$

Tab. 7-16 k_f-Werte für Gneis in den einzelnen Untersuchungsgebieten

n: Anzahl der Werte
Angaben zu den Gebieten s. Tab. 5-1; Savannah-R.: Savannah River, Schweizer Dr.: Schweizer Druckstollen

Die übrigen k_f-Werte für Schwarzwald-Gneise (**Untersuchungsgebiet Schwarzwald**, ohne Forschungsbohrung Urach 3) stammen überwiegend aus relativ geringer Testtiefe (um 50 m u. G.) und sind im Vergleich zu anderen Untersuchungsgebieten in Gneis auffällig hoch (Tab. 7-16 u. Abb. 7-21). Mit zunehmender Tiefe ist insgesamt eine leichte Abnahme der Durchlässigkeitswerte feststellbar.

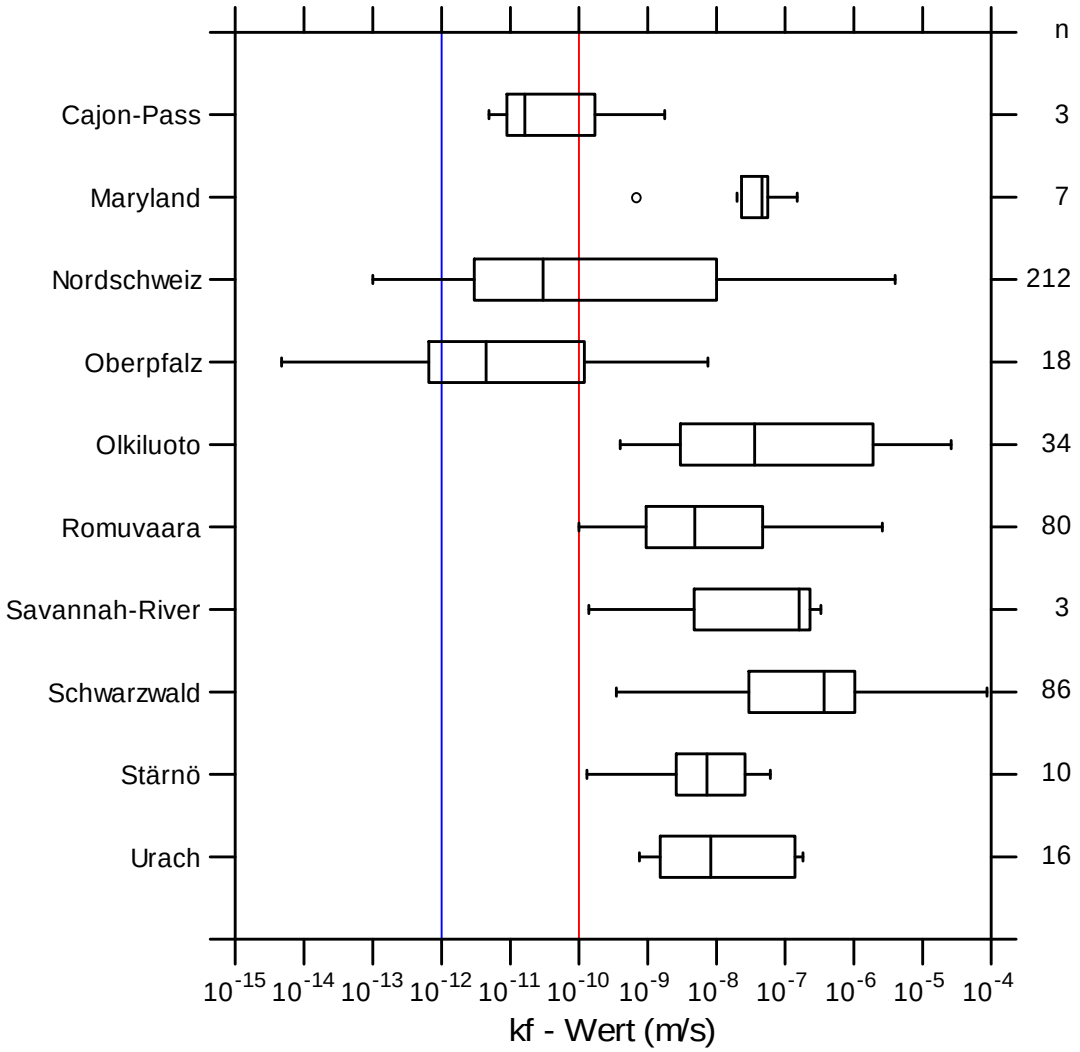


Abb. 7-22 Boxplots der k_f-Werte für Gneis aus den einzelnen Untersuchungsgebieten

n: Anzahl der Werte
vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Die k_f-Werte der **Untersuchungsgebiete Olkiluoto und Romuvaara** repräsentieren ausschließlich Gebirgsbereiche mit gestörtem Gefüge. Da die untere Messgrenze der eingesetzten Instrumente bei 10^{-10} m/s lag, sind genaue Angaben zu den k_f-Werte, für gering durchlässige Gesteinsbereiche mit intaktem Gefüge nicht möglich. Nach POTERI & LAITINEN (1999) sind allerings immerhin 73 % der Messwerte aus dem Tiefenbereich >200 m unter Geländeoberfläche $\leq 10^{-10}$ m/s.

Die Gneise im **Untersuchungsgebiet Stärnö** (5 Bohrungen bis in 805 m Tiefe u. G.) sind in Oberflächennähe nur gering geklüftet (ca. 0,5 Klüfte pro m). Die für diese Bereiche bestimmten k_f-Werte liegen dennoch in derselben Größenordnung wie die aus

den Bereichen mit gestörtem Gefüge bei den Untersuchungsgebieten Olkiluoto und Romuvaara.

Zusammenfassung Gneis

Der weitaus größte Teil der für den Hauptgesteinstyp Gneis erhobenen k_f-Werte ist größer als der vom AkEnd als Mindestanforderung festgelegte Wert von 10^{-10} m/s. Untersuchungsgebietsübergreifend sind das Gesteinsgefüge und die Tiefe die Faktoren mit dem größten Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit von Gneis.

Die Gebirgsdurchlässigkeit nimmt mit zunehmender Tiefe deutlich ab: Oberflächennah (Tiefenbereich <300 m u. G.) wurden praktisch ausschließlich k_f-Werte größer als 10^{-10} m/s festgestellt. Mit zunehmender Tiefe erweitert sich die Bandbreite der ermittelten k_f-Werte durch die Zunahme kleinerer Werte, doch treten über alle Tiefenbereiche immer auch relativ hohe Werte auf.

Die k_f-Werte aus Gebirgsbereichen mit "intaktem" bzw. "gestörtem" Gefüge unterscheiden sich deutlich. Dies äußert sich insbesondere in den höheren geometrischen Mittelwerten und Medianwerten der k_f-Werte für gestörte Gebirgsbereiche. Dieser Einfluss des Gefüges auf die Gebirgsdurchlässigkeit besteht über alle Tiefenbereiche, allerdings sind die Unterschiede zwischen intaktem und gestörtem Gebirge für verschieden Tiefenbereiche nicht identisch: Wegen auffällig hoher Werte für als "intakt" bezeichnete Testabschnitte sind sie im Tiefenbereich <300 m unter Geländeoberfläche am geringsten.

Gebirgsbereiche mit intaktem und gestörtem Gefüge können sich - insbesondere nach den Untersuchungsergebnissen aus dem Untersuchungsgebiet Nordschweiz - engräumig abwechseln.

7.2.2 Granit

Unter der Bezeichnung Granit werden außer den Daten für Granit selbst auch einige Daten zu Granodiorit, Syenit, Monzonit und Diorit erfasst. Die Daten zu Syenit, Monzonit und Diorit stammen aus Tiefbohrungen im Untersuchungsgebiet Nordschweiz, die zu Granodiorit aus den Untersuchungsgebieten Grimsel, Finnsjö und Kivetty. Gesteinstypbezogene Unterschiede in der Durchlässigkeit konnten darum - wie bei Gneis (Kapitel 7.2.1) - nicht ermittelt werden. Auf lokale Besonderheiten wird im Abschnitt "Untersuchungsgebiete" eingegangen.

Die k_f-Werte für Granit weisen mit rund 15 Größenordnungen insgesamt die größte Bandbreite aller untersuchten Hauptgesteinstypen auf; denn Granit hat mit $1{,}64 * 10^{-01}$ m/s auch den mit Abstand höchsten erfassten k_f-Wert überhaupt geliefert (Tab. 7-1 u. 7-17). Lässt man diesen Einzelwert und einige andere Ausreißer außer acht, so beträgt die Spannweite noch gut zehn Größenordnungen (Abb. 7-24: etwa 10^{-04} bis 10^{-14} m/s). Der geometrische Mittelwert und der Medianwert liegen bei 10^{-08}. Knapp 80 % der k_f-Werte übertreffen der Wert der Mindestanforderun gemäß AkEnd (Tab. 7-12).

Einflussfaktor Länge Testintervall

Bei den Granit-Daten insgesamt hat die Länge des Testintervalls keinen Einfluss auf den k_f-Wert. Bei einigen wenigen Untersuchungsgebieten zeichnet sich jedoch ein solcher Einfluss ab, und zwar bei denjenigen, bei denen die Änderungen der Intervalllänge im Vergleich zu denen der Testtiefe groß sind. Das gilt beispielsweise für Datensätze aus dem Felslabor Grimsel, die in annähernd übereinstimmender Tiefe erhoben worden sind. Erwartungsgemäß nimmt in diesem Fall die ermittelte Durchlässigkeit mit zunehmender Intervalllänge zu (Abb. 7-23). Die k_f-Werte werden danach (auch) von der Länge des Testintervalls gesteuert. Weniger deutlich ist diese Abhängigkeit bei den Daten aus dem Untersuchungsgebiet Schwarzwald (Abb. 7-23). Zwar ist dort ebenfalls eine Verringerung der Durchlässigkeit mit zunehmer Intervalllänge erkennbar, doch ist diese an die Testtiefe gekoppelt. Von diesem Faktor geht der größere Einfluss auf die k_f-Werte aus.

Einflussfaktor Testtiefe

Anders als beim Gesteinstyp Gneis ist bei den k_f-Werten für Granit die Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit von der mittleren Testtiefe nur undeutlich (Abb. 7-24). Insbesondere ist mit der Tiefe keine so ausgeprägte Zunahme des Anteils niedriger Werte zu erkennen wie etwa bei Gneis. Die Daten einiger Untersuchungsgebiete stellen Ausnahmen von dieser Regel dar: Bei den Gebieten Schwarzwald und Lac du Bonnet nimmt die Gebirgsdurchlässigkeit mit zunehmender Tiefe ab (Abb. 7-25). Beim Untersuchungsgebiet Schwarzwald ist aber wahrscheinlich die Testtiefe der eigentlich steuernde Faktor; denn große Intervalllängen sind hier von der Testtiefe abhängig.

Am Gesamtbild der Tiefenverteilung der k_f-Werte für Granit ändert dies jedoch nichts: Innerhalb des durch Daten belegten Tiefenbereichs bis ca. 3.500 m unter Geländeoberfläche werden nicht nur vereinzelt hohe k_f-Werte angetroffen, vielmehr kommt bis in diese Tiefe die gesamte Bandbreite der k_f-Werte vor. In einzelnen Tiefenabschnitten können höhere gegenüber niedrigeren Werten dominieren (Abb. 7-24 u. 7-26). Dies äußert sich auch in der tiefenabhängigen Veränderung der Anteile von k_f-Werten $<10^{-10}$ m/s an der Gesamtanzahl der Werte aus den einzelnen Tiefenbereichen. Sie steigt von 9 % in Tiefen <300 m unter Geländeoberfläche auf 24 % bzw. 45 % in den Tiefenbereichen 300 bis 1.500 m bzw. >1.500 m unter Geländeoberfläche an.

Entsprechend sind auch die Unterschiede zwischen den statistischen Kenndaten der k_f-Werte aus den drei getrennt ausgewerteten Tiefenbereichen <300 m, 300 - 1.500 m und >1.500 m unter Geländeoberfläche auffällig gering (Tab. 7-17). Immerhin nehmen geometrischer Mittelwert und Medianwert mit zunehmender Tiefe leicht ab, während andererseits der höchste Wert im Bereich >1.500 m unter Geländeoberfäche ermittelt worden ist.

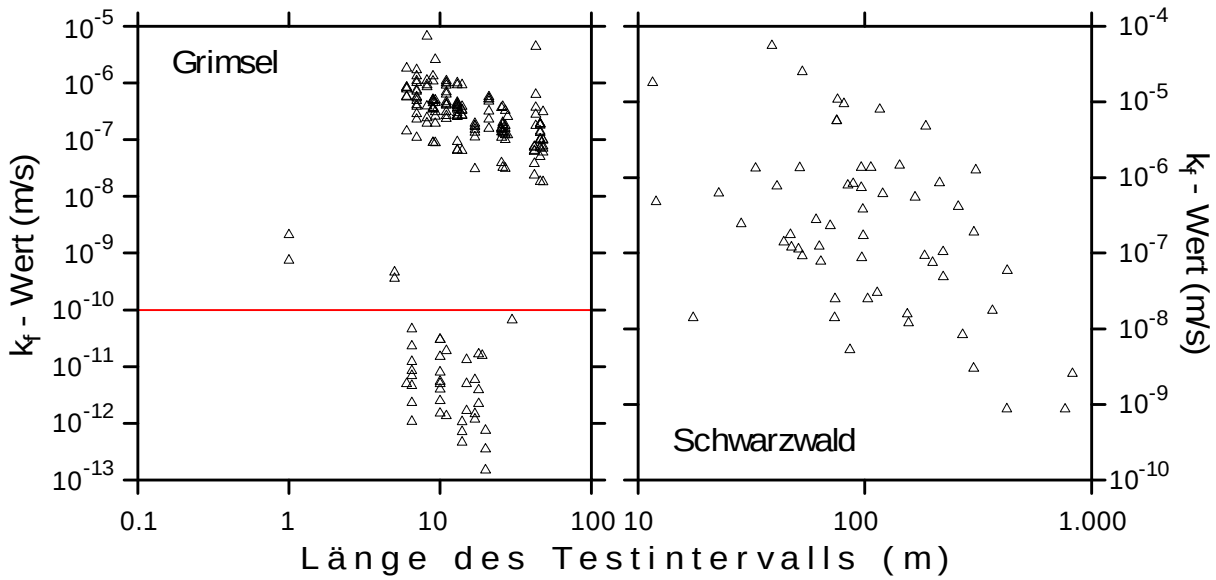


Abb. 7-23 k_f-Werte für Granit in Abhängigkeit von der Länge des Testintervalls bei den Untersuchungsgebieten Grimsel und Schwarzwald

horizontale Linie bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

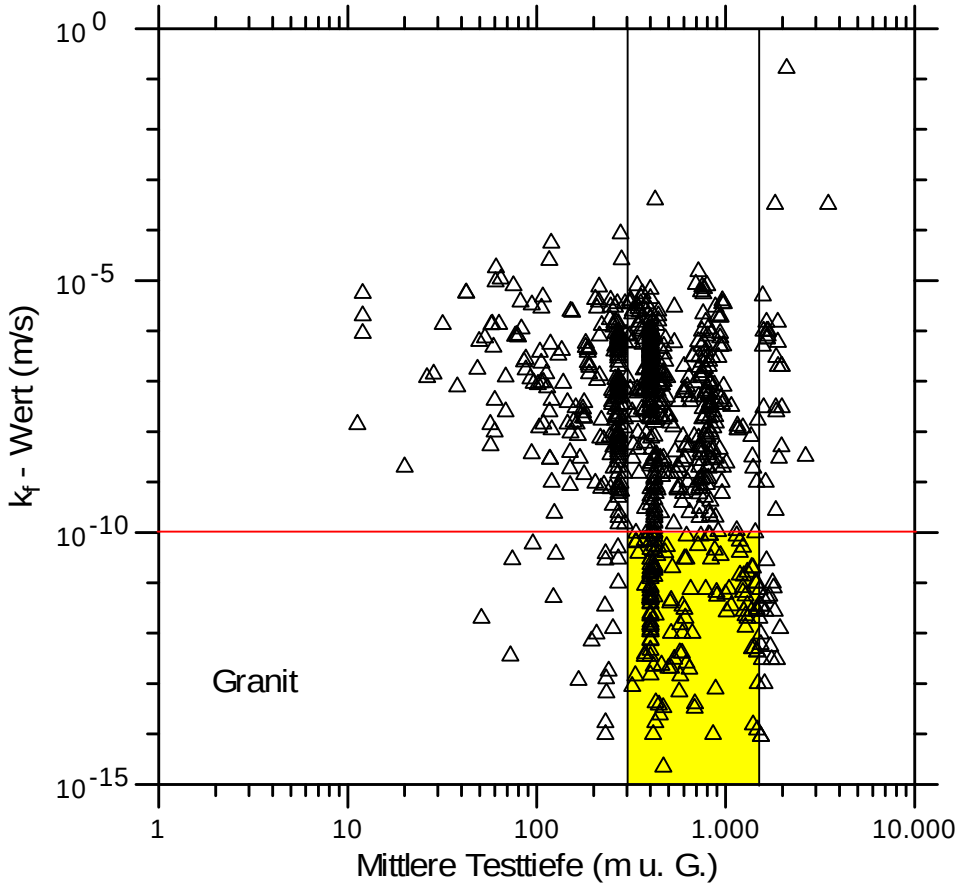


Abb. 7-24 k_f-Werte für Granit in Abhängigkeit von der Testtiefe

horizontale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Tiefenbereich (m u. G.)	**Anzahl Mess-werte**	**k_f-Werte (m/s)**			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
<300	235	$9{,}81 * 10^{-15}$	$8{,}50 * 10^{-05}$	$2{,}88 * 10^{-08}$	$5{,}60 * 10^{-08}$
300 - 1.500	605	$2{,}23 * 10^{-15}$	$4{,}00 * 10^{-04}$	$5{,}35 * 10^{-09}$	$2{,}80 * 10^{-08}$
>1.500	49	$9{,}03 * 10^{-15}$	$1{,}64 * 10^{-01}$	$1{,}22 * 10^{-09}$	$3{,}00 * 10^{-09}$
alle *)	890	$2{,}23 * 10^{-15}$	$1{,}64 * 10^{-01}$	$7{,}71 * 10^{-09}$	$3{,}16 * 10^{-08}$

Tab. 7-17 k_f-Werte für Granit, differenziert nach Tiefenbereichen

*) einschließlich Wert ohne Tiefenangabe

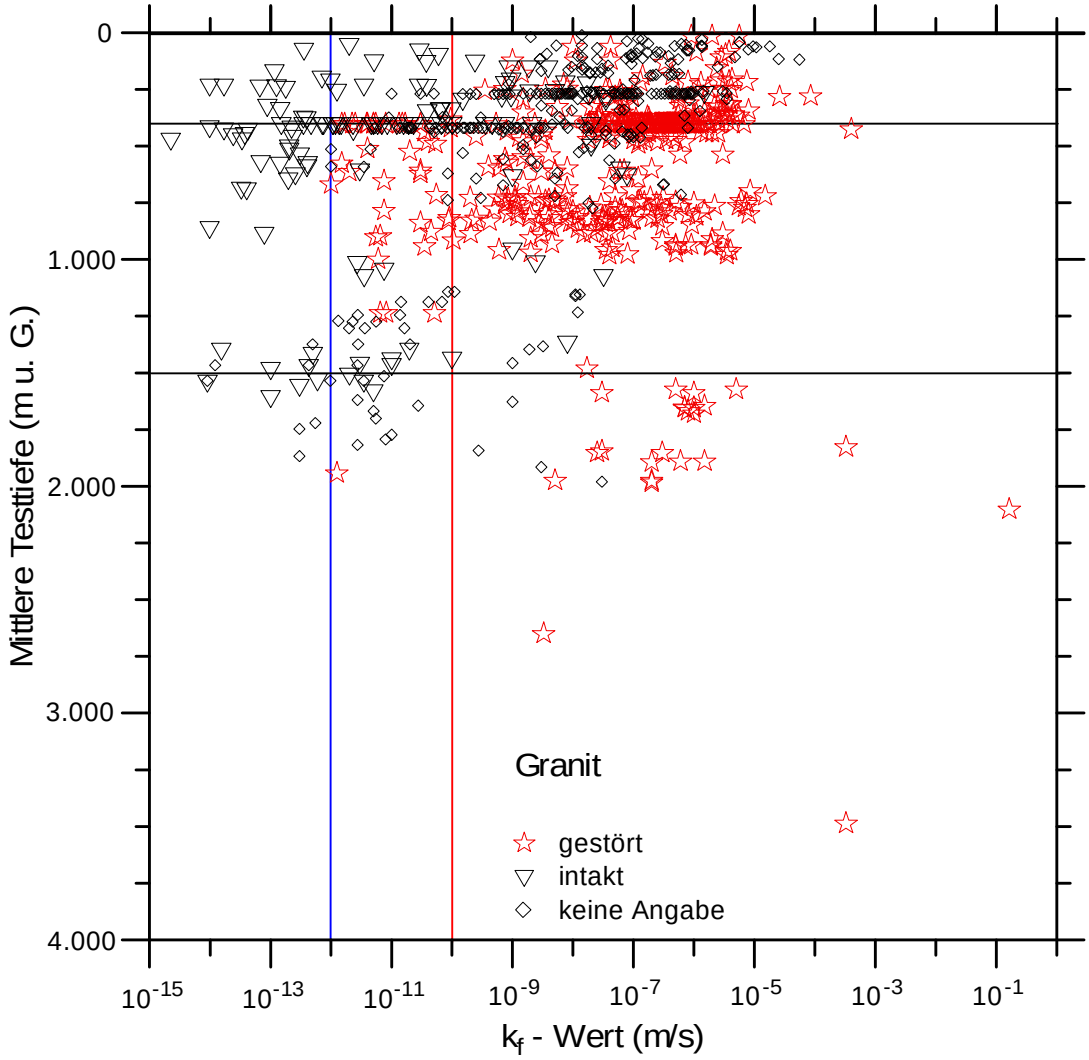


Abb. 7-26 Tiefenverteilung der k_f-Werte für Granit

horizontale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Einflussfaktor Gefüge

Wie bei Gneis (Kapitel 7.2.1) liegen auch zu einem Großteil der k_f-Werte für Granit zusätzliche Informationen über das Gesteinsgefüge vor. Die Unterschiede zwischen den k_f-Werten aus Gebirgsbereichen mit gestörtem bzw. intaktem Gefüge sind allerdings bei Granit erheblich größer (Tab. 7-18):

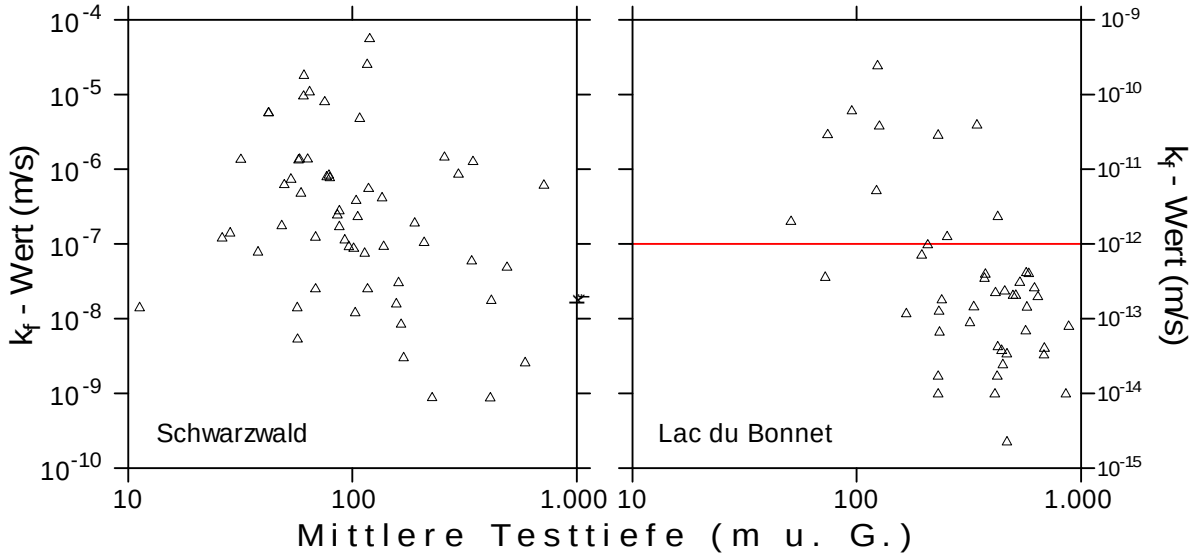


Abb. 7-25 Abhängigkeit der k_f-Werte für Granit von der Testtiefe in den Untersuchungsgebieten Schwarzwald und Lac du Bonnet

horizontale Linie bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Alle statistischen Kennwerte für gestörte Gebirgsbereiche liegen um mehrere Größenordnungen über denen für intaktes Gebirge. Die geometrischen Mittelwerte und die Medianwerte unterscheiden sich jeweils um vier bzw. fünf Größenordnungen. Die entsprechenden Kennwerte für Untersuchungen ohne Angaben zum Gefüge liegen dazwischen. Dies deutet darauf hin, dass unter der Gefügebezeichnung "keine Angabe" sowohl intakte als auch gestörte Gebirgsbereiche getestet worden sind. In den Wahrscheinlichkeitsdiagrammen (Abb. 7-28) ist allerdings am geringen Abstand der Datenpunkte für die die Stichprobe "keine Angabe" zu den Datenpunkten für gestörtes Gefüge zu erkennen, dass Werte aus Bereichen mit Durchlässigkeitseigenschaften, die eher gestörtem Gefüge entsprechen, dominieren.

Diese großen Durchlässigkeitsunterschiede betreffen nicht nur das Datenmaterial insgesamt, sondern treten auch lokal in enger räumlicher Nachbarschaft auf. Beispielsweise sind im Untersuchungsgebiet Grimsel für benachbarte stark bzw. schwach geklüftete Bereiche im selben Tiefenbereich ähnlich große Durchlässigkeitsunterschiede von mehreren Größenordnungen bestimmt worden.

Die Testintervalle in den Bohrungen des Untersuchungsgebietes Tono sind sogar vier Gefügeklassen zugeordnet worden: Intakt, Bruchzone, Zone mit Einzelklüften und als zusätzliches tektonisches Element mit regionaler Bedeutung die Tsukiyoshi-Störung. Sie hat im Tiefenbereich um 900 m unter Geländeoberfläche besonders hohe Durchlässigkeitswerte geliefert (10^{-06} m/s).

Die Unterschiede zwischen k_f-Werten aus gestörtem bzw. intaktem Gebirge werden auch von der Tiefe beeinflusst (Tab. 7-18). So unterscheiden sich die geometrischen Mittelwerte und Medianwerte für intaktes und gestörtes Gebirge bei den Daten aus dem Tiefenbereich <300 m unter Geländeoberfläche um ca. vier Größenordnungen, bei den Daten aus dem Bereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche um rund vier bzw. fünf Größenordnungen und bei den Daten aus Tiefen >1.500 m unter Geländeoberfläche um etwa sechs Größenordnungen. Die Unterschiede sind statistisch signifikant. Bei den Daten für den Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche, die den Hauptanteil der Daten insgesamt liefern, liegen die geometrischen Mittelwerte und Medianwerte in vergleichbarer Größenordnung wie bei der Gesamtverteilung.

Gesteins-gefüge	**Tiefen-bereich (m u. G.)**	**n**	**k_f-Werte (m/s)**			
			Minimal-wert	Maximal-wert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
intakt	<300	35	$9{,}81 * 10^{-15}$	$1{,}50 * 10^{-06}$	$5{,}90 * 10^{-11}$	$5{,}98 * 10^{-11}$
	300 - 1.500	82	$2{,}23 * 10^{-15}$	$7{,}80 * 10^{-08}$	$3{,}75 * 10^{-12}$	$2{,}32 * 10^{-12}$
	>1.500	7	$9{,}03 * 10^{-15}$	$5{,}00 * 10^{-12}$	$4{,}78 * 10^{-13}$	$6{,}00 * 10^{-13}$
	alle	124	$2{,}23 * 10^{-15}$	$1{,}50 * 10^{-06}$	$7{,}26 * 10^{-12}$	$3{,}49 * 10^{-12}$
gestört	<300	45	$3{,}50 * 10^{-10}$	$8{,}50 * 10^{-05}$	$2{,}13 * 10^{-07}$	$4{,}40 * 10^{-07}$
	300 - 1.500	404	$1{,}00 * 10^{-12}$	$4{,}00 * 10^{-04}$	$4{,}29 * 10^{-08}$	$1{,}22 * 10^{-07}$
	>1.500	24	$1{,}25 * 10^{-12}$	$1{,}64 * 10^{-01}$	$4{,}83 * 10^{-07}$	$6{,}50 * 10^{-07}$
	alle	473	$1{,}00 * 10^{-12}$	$1{,}64 * 10^{-01}$	$5{,}64 * 10^{-08}$	$1{,}38 * 10^{-07}$
keine Angabe	<300	155	$1{,}00 * 10^{-11}$	$5{,}54 * 10^{-05}$	$8{,}22 * 10^{-08}$	$8{,}40 * 10^{-08}$
	300 - 1.500	119	$1{,}21 * 10^{-14}$	$1{,}26 * 10^{-06}$	$6{,}78 * 10^{-10}$	$8{,}65 * 10^{-10}$
	>1.500	18	$9{,}03 * 10^{-15}$	$3{,}00 * 10^{-08}$	$8{,}93 * 10^{-12}$	$5{,}28 * 10^{-12}$
	alle *)	293	$9{,}03 * 10^{-15}$	$5{,}54 * 10^{-05}$	$5{,}28 * 10^{-09}$	$1{,}20 * 10^{-08}$

Tab. 7-18 k_f-Werte für Granit, differenziert nach Gefügeklassen und Tiefenbereichen

*) einschließlich Wert ohne Tiefenangabe

Betrachtetet man für die einzelnen Gefügeklassen jeweils die Relationen der k_f-Werte aus den drei Tiefenbereichen so ergibt sich folgendes, von den Verhältnissen bei Gneis (Kapitel 7.2.1) deutlich unterschiedenes Bild: Bei den Daten aus intakten Gebirgsbereichen nimmt die mittlere Gebirgsdurchlässigkeit (geometrische Mittelwerte und Medianwerte der k_f.Werte) von Tiefenbereich zu Tiefenbereich um rund eine Größenordnung ab. Bei den Daten aus gestörten Gebirgsbereichen liegen die Unterschieden zwischen den Tiefenbereichen überhaupt nur bei rund einer Größenordnung, wobei jeweils im Bereich 300 bis 1.500 die im Mittel niedrigsten Werte auftreten. Besonders groß sind demgegenüber die Unterschiede bei den Daten für die Gefügeklasse "keine Angabe". Die geometrischen Mittelwerte bzw. Medianwert der k_f-Werte nehmen von Tiefenbereich zu Tiefenbereich und rund zwei Größenordnungen ab.

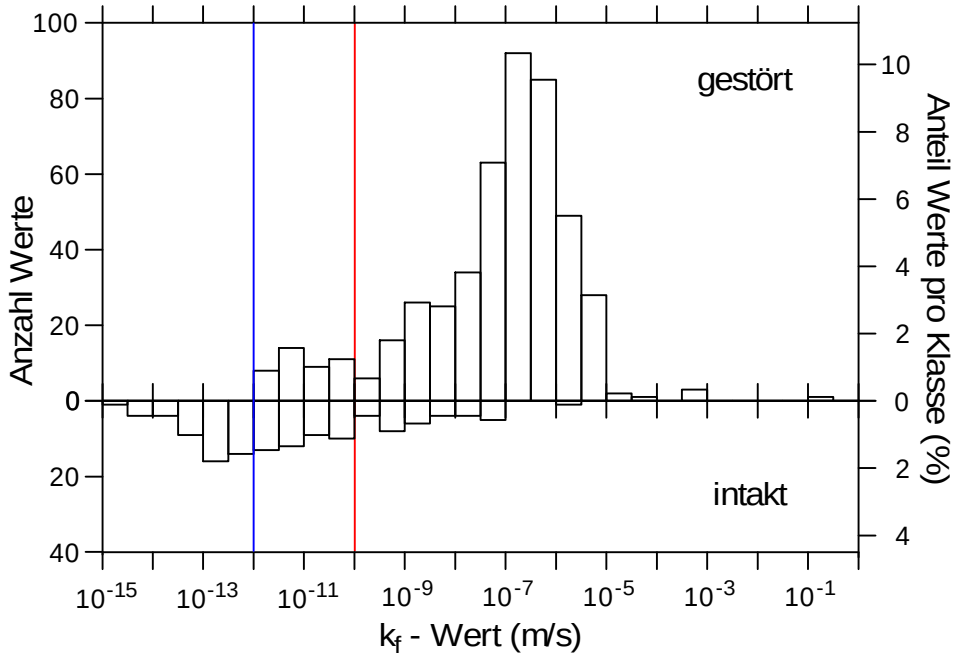


Abb. 7-27 Histogramme der k_f-Werte für Granit für die Gefügeklassen intakt und gestört

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Die geringen Unterschiede zwischen den k_f-Werten aus unterschiedlichen Tiefenbereiche bei gestörtem Gebirgsverband deuten darauf hin, dass die Trennfugen, Klüfte und Störungen, ein für die Grundwasserbewegung zugängliches Netz bilden, wie dies SCHÄDEL & SCHOBER (1987) für Schwarzwald-Granite festgestellt haben. In Gneis bewegt sich das Wasser dagegen eher auf diskreten Einzelklüften (Kapitel 7.2.2).

Diese Unterschiede in der tiefenabhängigen Veränderung der k_f-Werte der drei Gefügeklassen spiegeln sich auch in Abb. 7-29 wider, in der die Abhängigkeit der k_f-Werte von der Testtiefe getrennt für die drei Klassen dargestellt ist. Während die Daten für die Gefügeklassen "gestört" und "intakt" Werte-Cluster ohne bevorzugte Erstreckung und Ausrichtung bilden, ergeben die Daten für die Klasse "keine Angabe" eine gestreckte Wolke innerhalb derer die k_f-Werte mit der Tiefe deutlich abnehmen. Wie die unregelmäßige Anordnung der Datenpunkte für diese Klasse und ihre Lage zu den Datenpunkten der anderen Klassen im Wahrscheinlichkeitsdiagramm zeigen (Abb. 7-28), handelt es sich dabei nicht um ein homogenes Datenkollektiv. Eine einfache und eindeutige lineare Beziehung zwischen Testtiefe und k_f-Wert kann daher aus dem Bild in Abb. 7-29 nicht abgeleitet werden.

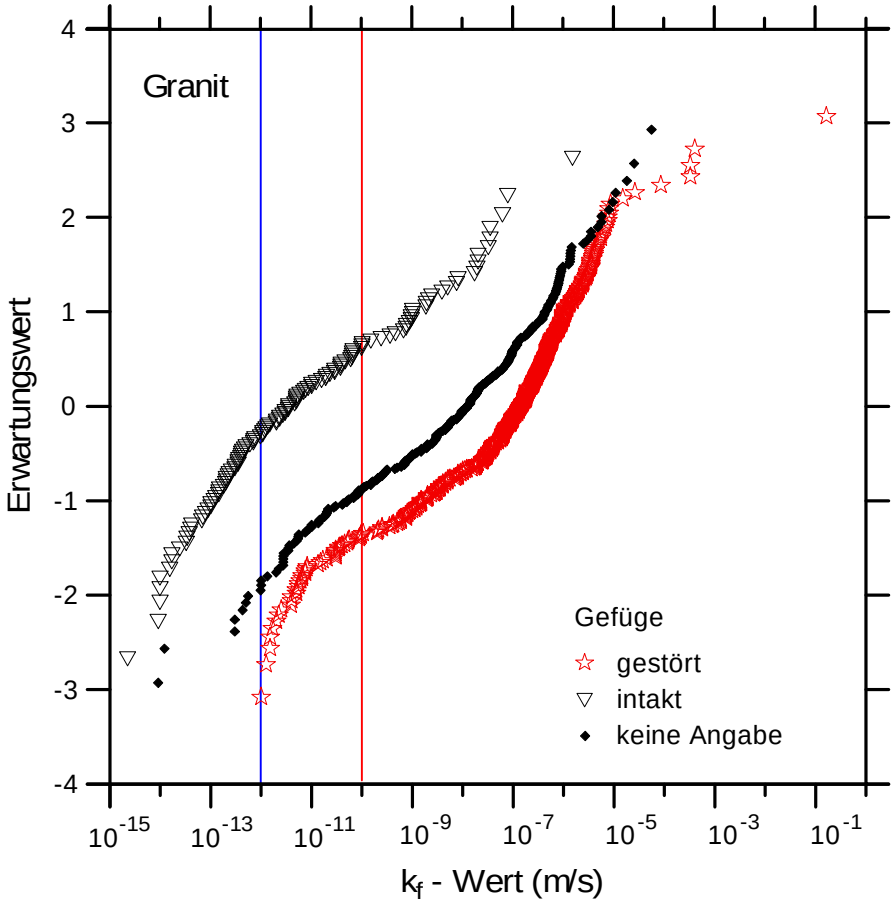


Abb. 7-28 Wahrscheinlichkeitsdiagramme für die k_f-Werte der Gefügeklassen von Granit

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

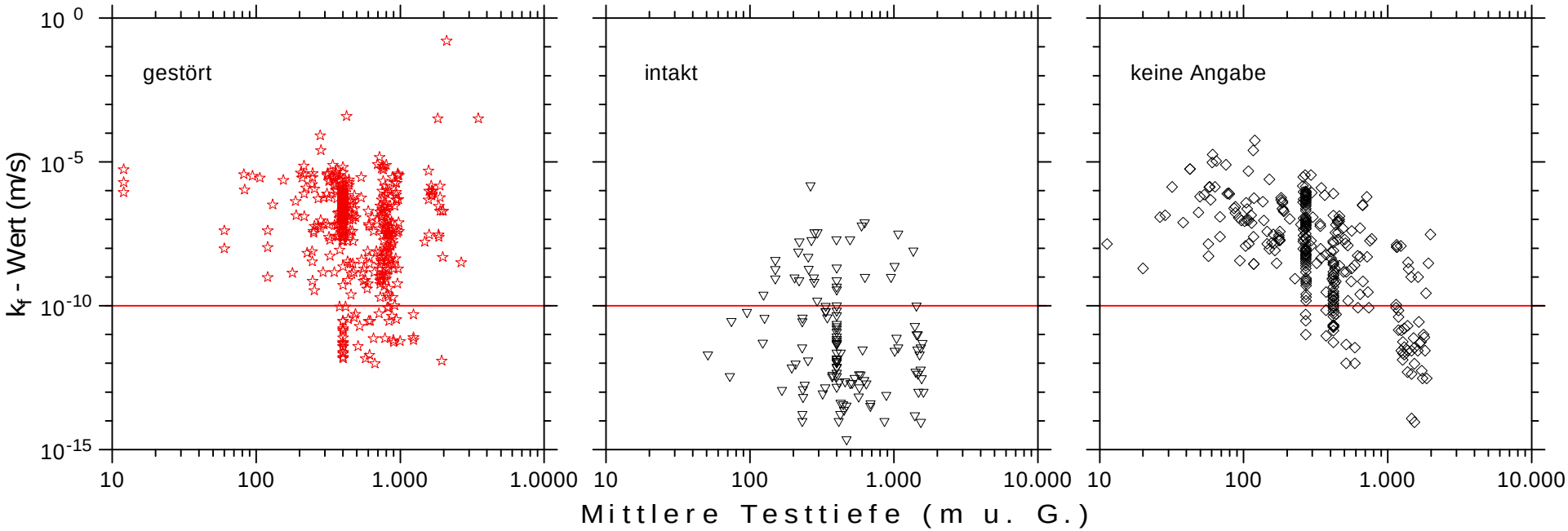


Abb. 7-29 k_f-Werte der Gefügeklassen von Granit in Abhängigkeit von der Testtiefe

vertikale Linien bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Ordnet man die für die einzelnen Untersuchungsgebiete ermittelten Medianwerte und geometrischen Mittelwerte den drei Gefügeklassen zu, so ergibt sich folgends Bild: Die Medianwerte der einzelnen Untersuchungsgebiete für "intaktes" Gefüge variieren zwischen gut 10^{-13} und knapp 10^{-08} m/s, für "gestörtes" Gefüge zwischen gut 10^{-04} und 10^{-10} m/s. Ähnlich sind die Verhältnisse bei den geometrischen Mittelwerten. Trotz der Überschneidungen der Bandbreiten gebietsbezogener Medianwerte und geometrischen Mittelwerte für die beiden Gefügeklassen erweisen sich damit die Gefügemerkmale intakt bzw. gestört bei Granit als wichtiges Differenzierungsmerkmal zwischen Untersuchungesgebieten.

Einflussfaktor Untersuchungsgebiet

Zwischen den 18 Granit-Untersuchungsgebieten bestehen teilweise erhebliche Unterschiede hinsichtlich der im Mittel (geometrischer Mittelwert, Medianwert) festgestellten Gebirgsdurchlässigkeiten (Tab. 7-20 u. Abb. 7-30). Relativ niedrige k_f-Werte mit Medianwerten bzw. geometrischen Mittelwerten unter, allenfalls knapp über 10^{-10} m/s treten in vier Untersuchungsgebieten auf:

- **Lac du Bonnet** mit gut 10^{-13} m/s: Die k_f-Werte für den Granit von Lac du Bonnet stammen ausschließlich aus Gebirgsbereichen mit intaktem Gefüge. Sie nehmen zur Tiefe hin leicht ab (Abb. 7-25). Auch die obersten 150 m, deren stärkere Klüftigkeit nicht immer wahrgenommen wird, hat keine kf-Werte größer als 2,5 * 10-10 m/s geliefert. Insgesamt sind die im Untersuchungsgebiet Lac du Bonnet ermittelten kf-Werte die im Mittel niedrigsten aller Untersuchungsgebiete geliefert.
- **Illinois Tiefbohrung** mit gut 10-12 m/s: Es wurden Gebirgsbereiche mit intakten und gestörtem Gefüge in Tiefen zwischen rund 1.000 und 1.500 m unter Geländeoberfläche untersucht. Auch in gestörten Bereichen wurden lediglich kf-Werte um 10-10 m/s bestimmt. Geometrischer Mittelwert und Medianwert sind daher im Vergleich zu den meisten anderen Untersuchungsgebieten niedrig.
- **Stripa** mit etwa 10-10 m/s: Drei relativ niedrige Messwerte aus Ventilationsversuchen bziwhwn sich auf grossräumiges Gesteinsvolumina (50.000 bis 140.000 m3).
- **Grimsel** (Ort von Ventilationsversuchen und Bohrung 80.003) mit etwa 10-10 m/s: Am Ort des Ventilationsversuchs im Felslabor Grimsel steht gering geklüfteter Granodiorit an, der von einer Scherzone durchzogen ist. Die Scherzone verursacht insgesamt eine nur leichte Erhöhung der Durchlässigkeit. Deutlichere Durchlässigkeitsunterschiede ergeben die Ergebnisse der Ventilationsversuche mit einem kf-Wert von ca. 10-09 m/s für die Scherzone und kf-Werten zwischen etwa 10-10 und 10-12 m/s für die Gesteinsmatrix bzw. nicht auffällig gestörte Bereiche. Für relativ ungestörten biotitreichen Zentralen Aaregranit haben Packertests in der Bohrung 80.003 k_f-Werte zwischen 10^{-09} und 10^{-11} m/s geliefert.

Die genannten Untersuchungsgebiete sind die einzigen, bei denen ein größerer Anteil der ermittelten k_f-Werte die Mindestanforderung des AkEnd (Kapitel 6.2.4) erfüllt. Beim Untersuchungsgebiet Grimsel gilt das allerdings nur für den Ort der Ventilati-

onsversuche. An anderen Untersuchungsorten innerhalb des Untersuchungsgebietes wurden auch deutliche höhere k_f-Werte bestimmt (s. u.). Bei den drei übrigen Gebieten sind Aussagen über die räumliche Repräsentativität der k_f-Werte nicht möglich.

Relativ hohe mittlere Gebirgsdurchlässigkeiten treten in folgenden Untersuchungsgebieten auf:

- **Soultz** mit ca. 10^{-04} m/s: Die selbst für Granit auffällig hohen k_f-Werte stammen aus gestörten Gebirgsbereichen in Tiefen zwischen 1.825 und 3.485 m unter Geländeoberfläche. Sie sind Beleg für die mögliche Existenz wassergängiger Trennfugen in Granit bis in Tiefen weit unterhalb des wahrscheinlichen Endlagerniveaus (Kapitel 6.2.3)
- **Kivetty** mit knapp 10-07 m/s: Die kf-Werte im Granit und Granodiorit des Untersuchungsgebietes Kivetty stammen alle aus Bereichen mit Kluftzonen. Die mittlere Durchlässigkeit für "intaktes" Gestein wird auf 10-11 m/s geschätzt (ANTTILA et al. 1999).
- **Hästholmen** mit etwa 10-07 m/s: Die aufgenommenen kf-Werte gelten für Störungszonen im Rapakivi-Granit. Die kf-Werte für intakte Gesteinsbereiche variieren sehr stark und können auch im Größenbereich der Durchlässigkeit von Kluftzonen liegen. Etwa 60% der in situ gemessenen Werte für intakte Gesteinsbereich liegen unterhalb der Messgrenze von 10-10 m/s (LÖFMAN 1999). Für den Tiefenbereich bis ca. 240 m hat ANTTILA (1986) festgestellt, dass Kluftzonen mit höherer Kluftdichte (4 bis 14 Klüfte pro m) höhere Durchlässigkeit (kf-Werte 10-07 bis 10-06 m/s), aufweisen als Zonen mit geringer Kluftdichte (1 bis 2 Klüfte pro m); für diese wurden Werte um 10-09 m/s ermittelt.
- **Finnsjö** mit gut 10-07 m/s: Insgesamt stark geklüfteter Granodiorit.
- **Schwarzwald** mit gut 10-07 m/s: Über die Gefügeausbildung der getesteten Schwarzwald-Granite liegen keine Informationen vor. Beim überwiegenden Teil der Daten liegen die Messintervalle im Tiefenbereich bis 200 m unter Geländeoberfläche und damit im Bereich möglicher Entlastungsklüfte.
- **Nordschweiz** mit 10^{-08} m/s: Die Messwerte der getesteten Granite stammen aus den Tiefbohrungen Kaisten, Leuggern, Schafisheim und Siblingen. Wie bei den k_f-Werten aus dem Untersuchungsgebiet Grimsel zeigen sich deutliche Durchlässigkeitsunterschiede zwischen den Gefügeklassen "intakt" und "gestört" (s. Tab. 7-19). Besonders deutlich sind die Unterschiede in Tiefen über 1.000 m unter Geländeoberfläche wo besonders Syenite, Monzonite und Diorite getestet wurden.
- **Kamaishi** mit 10^{-08} m/s: Anders als beim Untersuchungsgebiet Tono (s. u.) konnten beim Toki-Granit im Gebiet Kamaishi keine Gefügeklassen unterschieden werden.
- **Tono** mit gut 10-09 m/s (s. auch Kamaishi): Im Gebiet Tono wurde das Gefüge des Toki-Granits in vier Klassen eingeteilt. Besonders hohe Durchlässigkeiten zei-

gen dabei Bruchzonen in Tiefen von 800 - 1.000 m unter Geländeoberfläche, die der Tsukiyoshi-Verwerfung zugeordnet werden.

- **Grimsel** (Ort Bohrlochkranzversuch) mit gut 10^{-08} m/s: Vom Ort der Ventilationsversuche (s. o.) ist der Bohrlochkranzbereich ca. 500 m entfernt. Die Tiefenlage stimmt überein. Der untersuchte Bereich im Zentralen Aaregranit ist intensiv geklüftet. Die gemessenen k_f-Werte stammen überwiegend aus Mehrbohrlochpackerversuchen (Interferenztests) mit horizontalen Distanzen zwischen den Bohrungen von 7 bis 46 m.

Gefüge	n	Mittlere Testtiefe (m u. G.)	k_f-Werte (m/s)			
			Minimal-wert	Maximal-wert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
intakt	18	596 -1.603	$1{,}00 * 10^{-13}$	$7{,}80 * 10^{-08}$	$3{,}32 * 10^{-11}$	$7{,}50 * 10^{-12}$
gestört	30	424 - 1.980	$1{,}25 * 10^{-12}$	$4{,}00 * 10^{-04}$	$2{,}00 * 10^{-07}$	$5{,}05 * 10^{-07}$
keine Angabe	27	439 - 1.980	$3{,}00 * 10^{-13}$	$3{,}20 * 10^{-07}$	$2{,}74 * 10^{-10}$	$1{,}00 * 10^{-09}$
alle	75	424 -1.980	$1{,}00 * 10^{-13}$	$4{,}00 * 10^{-04}$	$2{,}31 * 10^{-09}$	$1{,}10 * 10^{-08}$

Tab. 7-19 k_f-Werte für Granit im Untersuchungsgebiet Nordschweiz, differenziert nach Gefügeklassen

Zusammenfassung Granit

Knapp 80 % der k_f-Werte für den Hauptgesteinstyp Granit erfüllen die Mindestanforderung gemäß AkEnd nicht. Der mit Abstand wichtigste Faktor mit Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit ist das Gefüge: Geklüftete und vernetzte Gesteinsbereiche liefern im Mittel um rund vier Größenordnungen höhere k_f-Werte als Bereiche mit intaktem Gefüge. Gebirgsbereiche mit gestörtem und intaktem Gefüge können in unmittelbarer Nähe zueinander vorkommen.

Wassergängige vernetzte Klüfte werden bis in große Tiefe beobachtet. Daher ist der Einfluss der Tiefe auf die k_f-Werte generell undeutlich. Lokal ist allerdings eine Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit von der Testtiefe zu beobachten.

Untersu-chungs-gebiet	**n**	**mittlere Testtiefe (m u. G.)**	**k_f-Werte (m/s)** Minimal-wert	Maximal-wert	Geometr. Mittelwert	Median-wert
Äspö	34	420	$5{,}34 * 10^{-12}$	$7{,}91 * 10^{-07}$	$3{,}21 * 10^{-10}$	$2{,}00 * 10^{-10}$
Colorado	3	12	$9{,}00 * 10^{-07}$	$5{,}60 * 10^{-06}$	$2{,}16 * 10^{-06}$	$2{,}00 * 10^{-06}$
Cornwall	3	150	$8{,}68 * 10^{-10}$	$3{,}88 * 10^{-09}$	$1{,}84 * 10^{-09}$	$1{,}85 * 10^{-09}$
Falkenberg	38	82 - 279	$3{,}80 * 10^{-11}$	$4{,}27 * 10^{-06}$	$6{,}46 * 10^{-08}$	$5{,}23 * 10^{-08}$
Finnsjön	4	269 - 295	$6{,}20 * 10^{-08}$	$5{,}80 * 10^{-07}$	$1{,}91 * 10^{-07}$	$3{,}04 * 10^{-07}$
Gasspeicher	5	60 -120	$1{,}00 * 10^{-09}$	$4{,}20 * 10^{-08}$	$1{,}14 * 10^{-08}$	$1{,}10 * 10^{-08}$
Grimsel	200	400	$1{,}50 * 10^{-13}$	$6{,}71 * 10^{-06}$	$2{,}94 * 10^{-08}$	$1{,}83 * 10^{-07}$
Hästholmen	83	20 - 955	$1{,}30 * 10^{-09}$	$8{,}50 * 10^{-05}$	$2{,}02 * 10^{-07}$	$2{,}10 * 10^{-07}$
Illinois Tiefb.	39	724 - 1.535	$9{,}03 * 10^{-15}$	$7{,}56 * 10^{-10}$	$5{,}43 * 10^{-12}$	$5{,}57 * 10^{-12}$
Kamaishi	125	258 - 752	$1{,}00 * 10^{-12}$	$3{,}50 * 10^{-06}$	$1{,}14 * 10^{-08}$	$1{,}50 * 10^{-08}$
Kivetty	73	226 - 934	$4{,}20 * 10^{-10}$	$1{,}50 * 10^{-05}$	$7{,}66 * 10^{-08}$	$7{,}00 * 10^{-08}$
Lac d. Bonnet	45	51 - 883	$2{,}23 * 10^{-15}$	$2{,}41 * 10^{-10}$	$2{,}81 * 10^{-13}$	$2{,}03 * 10^{-13}$
Nordschweiz	75	424 - 1.980	$1{,}00 * 10^{-13}$	$4{,}00 * 10^{-04}$	$2{,}31 * 10^{-09}$	$1{,}10 * 10^{-08}$
Schwarzwald	58	11 - 715	$8{,}65 * 10^{-10}$	$5{,}54 * 10^{-05}$	$2{,}20 * 10^{-07}$	$2{,}11 * 10^{-07}$
Schweizer Dr.	1		$2{,}00 * 10^{-07}$			
Soultz	4	1.825 - 3.485	$3{,}27 * 10^{-09}$	$1{,}64 * 10^{-01}$	$8{,}71 * 10^{-05}$	$3{,}27 * 10^{-04}$
Stripa	5	335 - 600	$6{,}30 * 10^{-11}$	$2{,}00 * 10^{-07}$	$3{,}49 * 10^{-10}$	$6{,}50 * 10^{-11}$
Tono	95	204 - 997	$1{,}00 * 10^{-12}$	$7{,}50 * 10^{-06}$	$2{,}28 * 10^{-09}$	$2{,}00 * 10^{-09}$
alle	890	11 - 3.485	$2{,}23 * 10^{-15}$	$1{,}64 * 10^{-01}$	$7{,}71 * 10^{-09}$	$3{,}16 * 10^{-08}$

Tab. 7-20 k_f-Werte für Granit in den einzelnen Untersuchungsgebieten

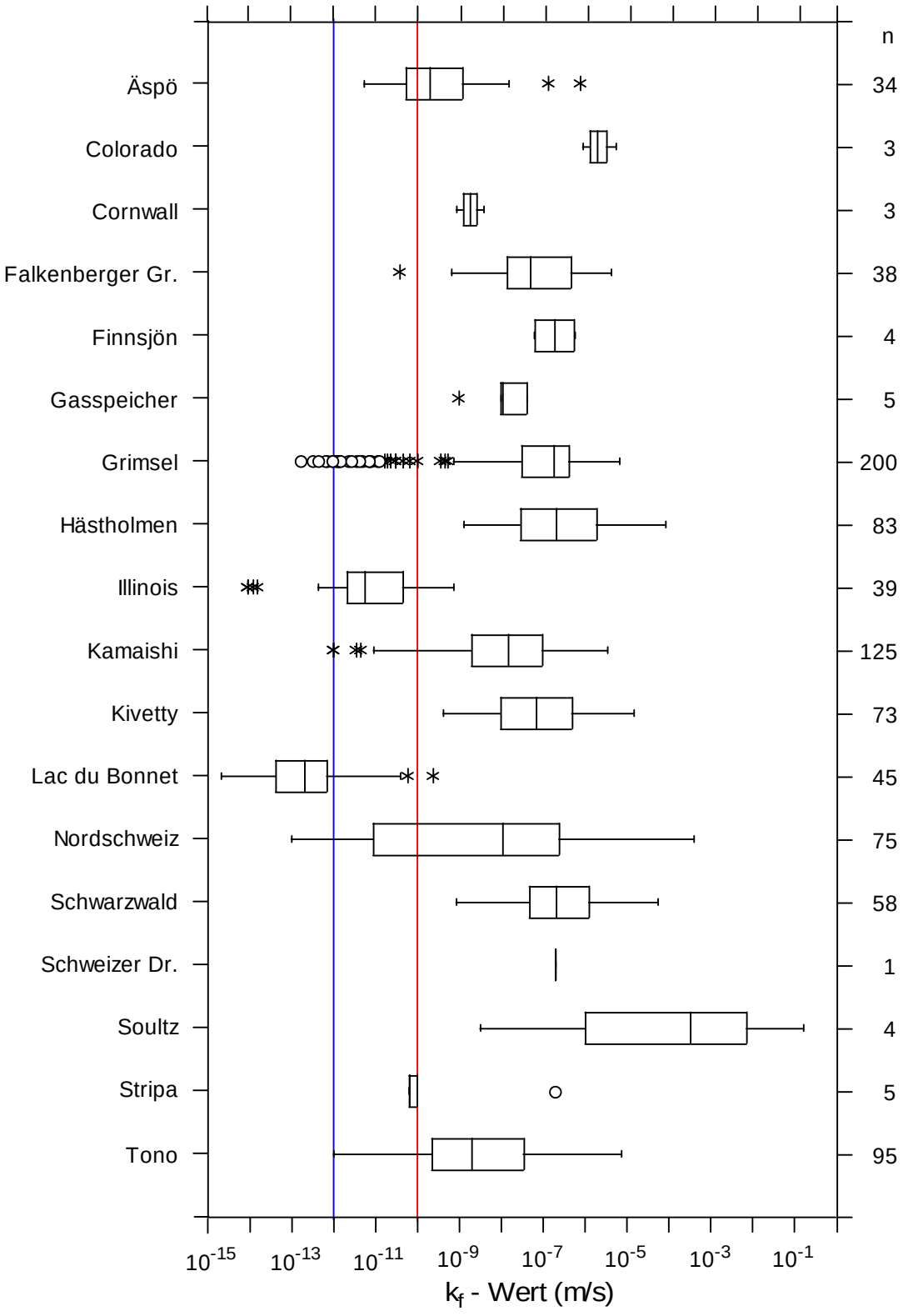


Abb. 7-30 Boxplots der k_f-Werte für Granit aus den einzelnen Untersuchungsgebieten

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

7.2.3 Tuff/Tuffit

Unter der Bezeichnung Tuff/Tuffit werden Vulkanite sowie im Zusammenhang mit vulkanischen Prozessen entstandene Sedimentgesteine, also Gesteinstypen mit im einzelnen sehr unterschiedlicher Genese und Zusammensetzung, zusammengefasst. Gesteinskörper dieses Hauptgesteinstyps kommen in Deutschland nicht in einer für die Endlagerung ausreichenden räumlichen Ausdehnung und Ausbildung vor. Sie werden hier der Vollständigkeit halber und zum Vergleich mitbehandelt.

Einflussfaktor Untersuchungsgebiet

Die k_f-Werte zur Gesteinsgruppe Tuff/Tuffit stammen aus nur zwei Untersuchungsgebieten (Sellafield, Yucca Mountain), zwischen denen gravierde petrographische Unterschiede bestehen. Sie sind für die ebenso deutlichen Unterschiede in den statistischen Kenndaten für die k_f-Werte beider Gebiete und die ausgeprägte Zweigipfligkeit der Häufigkeitsverteilung der k_f-Werte verantwortlich (Tab. 7-21, Abb. 7-3 u. 7-31):

Die Tuffe und Tuffite der paläozoischen Borrowdale Volcanic Group im Untersuchungsgebiet Sellafield (Großbritannien) unterlagen seit ihrer Entstehung im Ordovizium verschiedenen Typen und Graden der Metamorphose. Bei einer Bandbreite von rund sechs Größenordnungen weisen die Gesteine Im Mittel (geometrischer Mittelwert bzw. Medianwert) eine Durchlässigkeit von ca. 10^{-12} m/s auf. Der Anteil der k_f-Werte $<10^{-10}$ m/s ist mit 81 % deutlich höher als bei den aus dem Gebiet Yucca Mountain bzw. bei den anderen kristallinen Hauptgesteinstypen (Gneis und Granit). Die Wahrscheinlichkeitsdiagramme in Abb. 7-31 zeigt dabei, dass sich die Sellafied-Daten aus zwei Stichproben zusammensetzen. Dabei handelt es sich jeweils um die auffällig unterschiedlichen k_f-Werte aus gestörtem bzw. intaktem Gebirge (s. u.).

Die quartären und tertiären Tuffe im Untersuchungsgebiet Yucca Mountain (USA) haben demgegenüber - von einigen Extremwerten abgesehen - ein statistisch weitgehend einheitliches Bild der k_f-Werte (näherungsweise Normalverteilung) geliefert (Abb. 7-31 u. Tab. 7-21). Ihre Durchlässigkeit ist allgemein wesentlich höher beim Untersuchungsgebiet Sellafield: Alle k_f-Werte liegen über 10^{-11} m/s (Anteil der Werte $<10^{-10}$ m/s: 3 %), der geometrische Mittelwert und der Medianwert bei gut 10^{-07} m/s. Der Maximalwert ist sogar größer als 10^{-04} m/s.

Alle k_f-Werte sind größer als die aus intaktem Gebirge aus dem Untersuchungsgebiet Sellafield (Abb. 7-31). Dieser Unterschied spricht gegen die Zusammenfassung der k_f-Werte aus den beiden Untersuchungsgebieten zu einem Hauptgesteinstyp Tuff/Tuffit.

Untersuchungsgebiet	Tiefenbereich (m u. G.)	k_f-Werte (m/s)			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Sellafield	483 - 1.528	$5{,}00 * 10^{-16}$	$2{,}35 * 10^{-07}$	$2{,}63 * 10^{-12}$	$1{,}03 * 10^{-12}$
Yucca Mountain	363 - 2.245	$1{,}11 * 10^{-11}$	$2{,}08 * 10^{-04}$	$2{,}45 * 10^{-07}$	$2{,}86 * 10^{-07}$
alle	363 - 2.245	$5{,}00 * 10^{-16}$	$2{,}08 * 10^{-04}$	$1{,}77 * 10^{-09}$	$1{,}16 * 10^{-08}$

Tab. 7-21 k_f-Werte für Tuff/Tuffit in den Untersuchungsgebieten Sellafield (Großbritannien) und Yucca Mountain (USA, Nevada)

Anzahl der Messwerte: Sellfield 112, Yucca Mountain 148

Einflussfaktor Länge Testintervall

Die k_f-Wert-Bestimmungen sind im Untersuchunsgegbeiet Sellafield von zehn Ausnahmen abgesehen mit demselben, sehr kurzen Testintervall von ca. 1,5 m Länge durchgeführt worden. Ein Einfluss der Intervalllänge auf die ermittelten Durchlässigkeitswerte ist demnach nicht erkennbar. Demgegenüber wurden die k_f-Werte im Untersuchungsgebiet Yucca Mountain mit sehr unterschiedlichen Intervalllängen zwischen 0,3 m und 1.018 m durchgeführt. Eine Abhängigkeit der k_f-Werte von der Länge des Testintervalls ist aber auch hier nicht zu erkennen.

Einflussfaktor Testtiefe

Fast alle k_f-Werte für Tuff/Tuffit, zu denen Tiefenangaben vorliegen, stammen aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche. Nur drei Werte aus dem Untersuchungsgebiet Yucca Mountain und ein Wert aus dem Gebiet Sellafiel wurden in größerer Tiefe gewonnen. Tab. 7-22 und Abb. 7-32 zeigen dementsprechend, dass bei den ausgewerteten Daten keine generelle und auffällige Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit von der Testtiefe besteht. Ein etwaiger Einfluss dieses Faktors wird überlagert von den Unterschieden in der gebietsspezifischen Gesteinsausbildung.

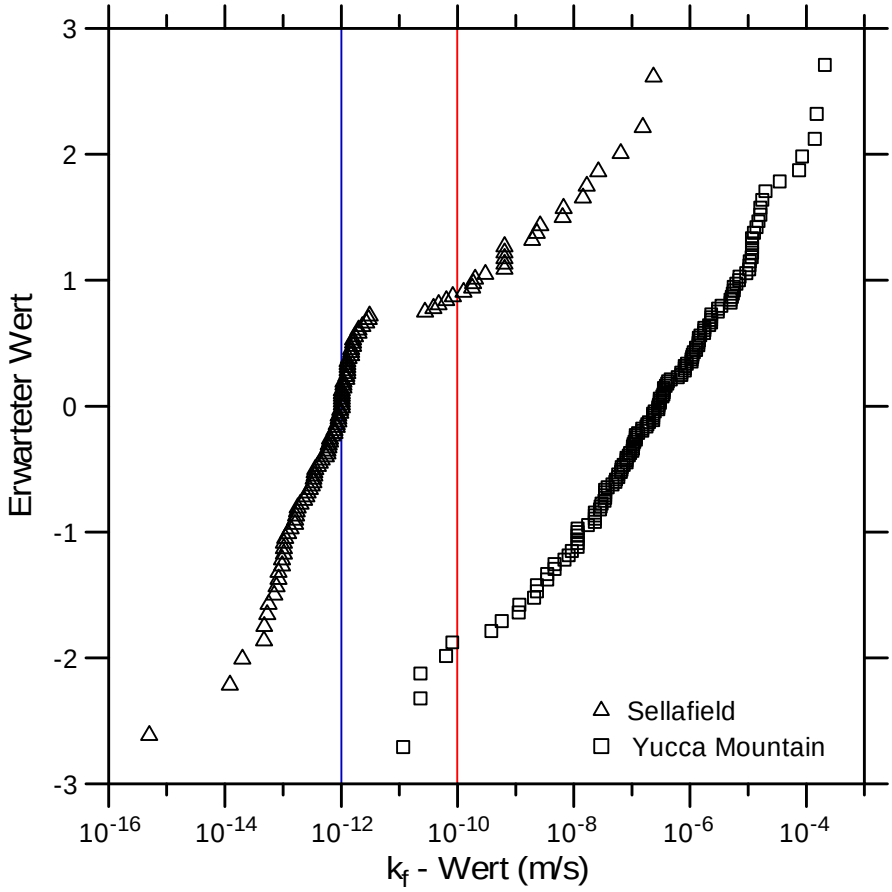


Abb. 7-31 Wahrscheinlichkeitsdiagramme der k_f-Werte für Tuff/Tuffit aus den Untersuchungsgebieten Sellafield und Yucca Mountain

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Tiefenbereich (m u. G.)	**Anzahl Messwerte**	**k_f-Werte (m/s)**			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
300 - 1.500	228	$5{,}00 * 10^{-16}$	$2{,}08 * 10^{-04}$	$8{,}00 * 10^{-10}$	$4{,}63 * 10^{-09}$
>1.500	4	$1{,}16 * 10^{-11}$	$1{,}39 * 10^{-04}$	$4{,}81 * 10^{-09}$	$7{,}16 * 10^{-09}$
keine Angabe	28	$6{,}37 * 10^{-11}$	$1{,}74 * 10^{-05}$	$1{,}03 * 10^{-06}$	$3{,}99 * 10^{-06}$

Tab. 7-22 k_f-Werte für Tuff/Tuffit, differenziert nach Tiefenbereichen

Diese Aussage wird durch die separate Betrachtung der Daten aus den beiden Untersuchunsggebieten weitgehend bestätigt: Die k_f-Werte aus dem Untersuchungsgebiet Sellafield stammen überwiegend aus Tiefen um 700 m unter Geländeoberfläche

und decken - von wenigen Ausnahmen abgesehen - nur einen relativ schmalen Tiefenbereich ab. Die Tiefenabgängigkeit der Werte ist entsprechend gering (Abb. 7-32). Beim Untersuchungsgebiet Yucca Mountain sind die Daten gleichmäßiger über den erfassten Tiefenbereich verteilt. Hier nimmt die Durchlässigkeit mit zunehmender Tiefe nicht sehr ausgeprägt, aber doch erkennbar ab (s. Abb. 7-32). Eine verallgemeinerbare Tendenz für den Hauptgesteinstyp Tuff/Tuffit lässt sich aus diesen Befunden nicht ableiten.

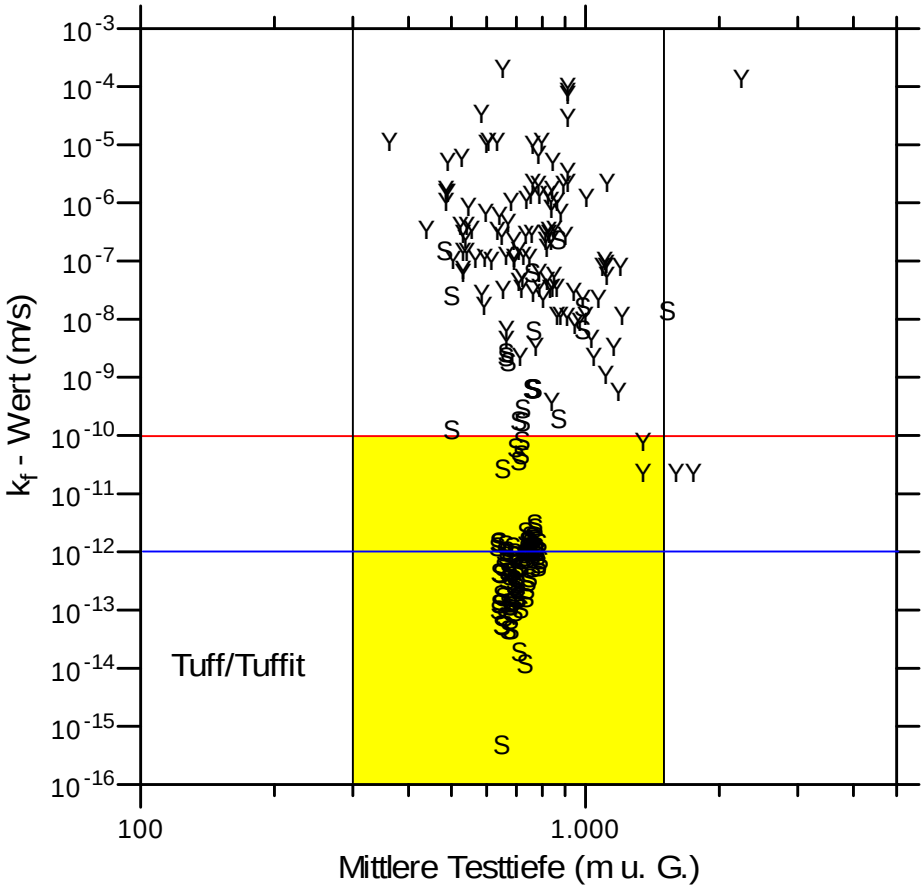


Abb. 7-32 k_f-Werte für Tuff/Tuffit in Abhängigkeit von der Testtiefe bei den Untersuchungsgebieten Sellafield (S) und Yucca Mountain (Y)

horizontale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Einflussfaktor Gefüge

Bei den Untersuchungen an Tuff/Tuffit wird lediglich zwischen den Gefügeklassen "keine Angabe" und "gestört" unterschieden. Es wird vorausgesetzt, dass fehlende

Gefügeangaben auf intaktes Gebirge hinweisen. Unter dieser Voraussetzung wirken sich Gefügestörungen in beiden Untersuchungsgebieten offenbar unterschiedlich auf die Durchlässigkeit aus (Tab. 7-23):

Im Untersuchungsgebiet Sellafield haben geklüftete Zonen mit Bohrlochzuflüssen im Mittel (geometrischer Mittelwert, Medianwert) um mehrere Größenordnungen höhere Durchlässigkeitswerte als die übrigen Testintervalle ergeben (Tab. 7-23). Für das Untersuchungsgebiet Yucca Mountain ist die Datenbasis sehr uneinheitlich. Nur fünf k_f-Werte (von 147) stammen aus gestörtem Gebirge. Die geometrischen Mittelwerte und Medianwerte für gestörtes bzw. intaktes Gebirge unterscheiden sich um etwa eine Größenordnung. Sollte dies der Realität entsprechen, könnte der geringe Unterschied durch die generell ohnehin hohe Durchlässigkeit der Gesteine im Gebiet Yucca Mountain verursacht sein.

Untersuchungs-gebiet	**Gefüge**	**n**	**k_f-Werte (m/s)**			
			Minimalwert	Maximal-wert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Sellafield	k. A.	90	$5{,}00 * 10^{-16}$	$3{,}01 * 10^{-10}$	$5{,}57 * 10^{-13}$	$6{,}73 * 10^{-13}$
	gestört	22	$8{,}97 * 10^{-13}$	$2{,}35 * 10^{-07}$	$1{,}61 * 10^{-09}$	$1{,}28 * 10^{-09}$
Yucca Mountain	k. A. *)	142	$1{,}16 * 10^{-11}$	$2{,}08 * 10^{-04}$	$2{,}32 * 10^{-07}$	$2{,}39 * 10^{-07}$
	gestört	5	$3{,}53 * 10^{-07}$	$2{,}12 * 10^{-06}$	$1{,}10 * 10^{-06}$	$1{,}76 * 10^{-06}$

Tab. 7-23 k_f-Werte für Tuff/Tuffit aus den Untersuchungsgebieten Sellafield (Großbritannien) und Yucca Mountain (USA) in Abhängigkeit vom Gesteinsgefüge

k. A.: keine Angaben zu Gefügestörungen, Gefüge wahrscheinlich intakt
*) : einschließlich eines Werte mit Angabe "intakt"

Zusammenfassung Tuff/Tuffit

Die deutlichen Unterschiede zwischen den Häufigkeitsverteilungen der k_f-Werte aus den Untersuchungsgebieten Sellafield und Yucca Mountain und den zugehörigen statistischen Kenndaten der k_f-Werte stehen in Einklang mit den Angaben zu den sehr unterschiedlichen Entstehungsbedingungen und der unterschiedlichen Ausbildung der Gesteine beider Gebiete. Danach ist die Zusammenfassung unter einheitlicher Gesteinstypbezeichnung fragwürdig.

Auf Grund der genannten Unterschiede sind die k_f-Werte aus dem Untersuchungsgebiet Sellafield im Mittel um rund sechs Größenordnungen niedriger als die aus dem Gebiet Yucca Mountain. Der weitaus größte Anteil der Werte aus dem Untersu-

chungsgebiet Sellafield (81 %) erfüllt daher die Mindestanforderung des AkEnd. Von den Daten des Gebietes Yucca Mountain trifft das nur für 3 % zu.

Andere als petrographisch-genetische Einflüsse auf die k_f-Werte, wie die Länge des Testintervall, die Testtiefe und das Auftreten von Gefügestörungen, werden durch die auffälligen gebietsbezogenen Unterschiede überlagert.

7.2.4 Sandstein

Durchlässigkeitsdaten für Sandstein sind nicht mit dem Ziel der systematischen Beschreibung dieses Gesteinstyps zusammengetragen worden, sondern um sie denen der anderen Gesteinstypen gegenüberzustellen (Kapitel 5.1). Die Datenbasis ist daher mit 67 k_f-Werten aus fünf Untersuchungsgebieten nur klein. Die erfassten Daten beziehen sich überwiegend auf Sandsteine der Trias, des Perm und des Karbon. Daneben liegen einige k_f-Werte zu Grauwacken und zu Flyschsandsteinen vor.

Die k_f-Werte überdecken insgesamt eine Bandbreite von gut 10 Größenordnungen (gut 10^{-12} - 10^{-03} m/s). Geometrischer Mittelwert und Medianwert liegen bei 10^{-07} m/s (Tab. 7-1 u. 7-24). Nur rund 10 % aller Werte sind kleiner als 10^{-10} m/s und erfüllen somit die Mindestanforderung des AkEnd.

Einflussfaktur Länge Testintervall

Die Testintervalle hatten weit überwiegend Längen bis zu 20 m. Bei dieser geringen Bandbreite ist ein systematischer Einfluss der Länge des Testintervalls auf die ermittelten k_f-Werte kaum zu erwarten. Tatsächlich ist ein solcher Einfluss weder bei den Sandstein-Daten insgesamt noch bei den Daten aus einzelnen Untersuchungsgebieten oder bestimmter stratigraphischer Herkunft zu erkennen.

Einflussfaktor Testtiefe

Insgesamt nehmen die k_f-Werte mit zunehmender Tiefe deutlich ab (s. Abb. 7-33). Oberhalb etwa 1.000 m Tiefe unter Geländeoberfläche wird der k_f-Wert gemäß Mindestanforderung AkEnd (10^{-10} m/s) nicht unterschritten. Selbst in den tiefsten erfassten Bereichen, unterhalb 1.500 m unter Geländeoberfläche, sind jedoch noch Werte von nahezu 10^{-08} m/s ermittelt worden.

Die Tiefenabhängigkeit schlägt sich auch in den statistischen Kennwerten (Tab. 7-24) und den Boxplots (Abb. 7-34) für die drei unterschiedenen Tiefenbereiche nieder, wobei allerdings die geringe Anzahl von Werten aus Tiefen >1.500 m zu beachten ist. Im Tiefenbereich <300 m unter Geländeoberfläche unterschreitet kein k_f-Wert die Mindestanforung 10^{-10} m/s gemäß AkEnd. In der vorgesehenen Endlagertiefe (300 - 1.500 m u. G.) wird in allen Untersuchungsgebieten, aus denen für diesen Tiefenbereich Daten vorliegen, der k_f-Wert gemäß Mindestanforderung AkEnd deutlich überschritten. Nur 13 % aller Werte aus diesem Bereich sind kleiner als 10^{-10} m/s, im Tiefenbereich >1.500 m unter Geländeoberfläche sind es dagegen drei von fünf Werten.

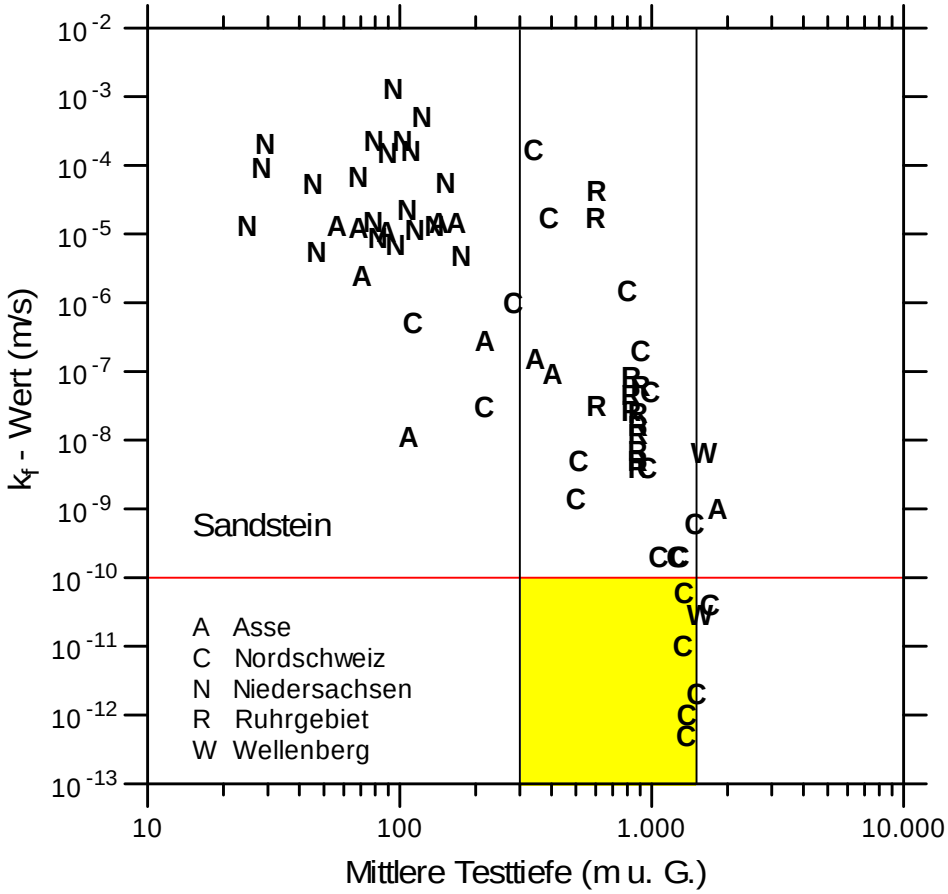


Abb. 7-33 k_f-Werte für Sandstein in Abhängigkeit von der Testtiefe

horizontale Linie bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Tiefenbereich (Mittl. Testtiefe in m u. G.)	**n**	**k_f-Werte (m/s)**			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
<300	31	$1{,}10 * 10^{-08}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$1{,}31 * 10^{-05}$	$1{,}30 * 10^{-05}$
300 - 1.500	31	$5{,}00 * 10^{-13}$	$1{,}65 * 10^{-04}$	$1{,}16 * 10^{-08}$	$1{,}60 * 10^{-08}$
>1.500	6	$2{,}00 * 10^{-12}$	$6{,}48 * 10^{-09}$	$1{,}08 * 10^{-10}$	$4{,}00 * 10^{-11}$
alle	67	$5{,}00 * 10^{-13}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$2{,}11 * 10^{-07}$	$2{,}75 * 10^{-07}$

Tab. 7-24 k_f-Werte für Sandstein, differenziert nach Tiefenbereichen

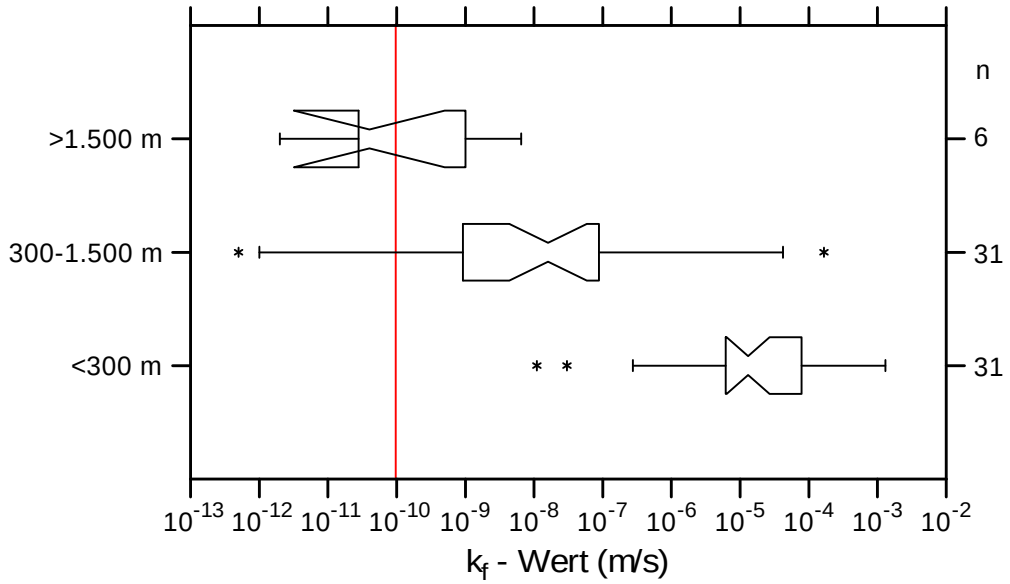


Abb. 7-34 Boxplots der k_f-Werte für Sandstein aus den verschiedenen Tiefenbereichen

n: Anzahl Messwerte
vertikale Linie bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Einflussfaktor Gefüge

Informationen zu den für die Grundwasserbewegung wichtigen Gefügemerkmalen liegen für den Hauptgesteinstyp Sandstein nicht vor. Anders als bei anderen Gesteinstypen können bei Sandstein neben Trennfugen auch Poren in größerem Ausmaß zur effektiven Porosität beitragen. Hohe k_f-Werte - entsprechend der Gefügeklasse "gestört" - dürften aber auch bei diesem Gesteinstyp im wesentlichen durch Klüfte und Störungen hervorgerufen werden.

Einflussfaktor Untersuchungsgebiet

Die für den Hauptgesteinstyp Sandstein ausgewerteten k_f-Werte stammen aus fünf Untersuchungsgebieten (Abb. 7-35). Die überwiegende Zahl der Daten aus den einzelnen Gebiete ist jeweils einer bestimmten stratigraphischen Einheit zuzuordnen, nämlich (in Klammern die Einheiten, zu denen nur Einzelwerte vorliegen):

- Niedersachsen (20 Werte): Buntsandstein (Keuper, Malm, Unterkreide),
- Asse (11 Werte): Buntsandstein (Keuper),
- Nordschweiz (21 Werte): Rotliegendes und Buntsandstein (Keuper),
- Ruhrgebiet (13 Werte): flözführendes Oberkarbon,
- Wellenberg (2 Werte): Tertiär.

Unter der Bezeichnung Niedersachsen wird eine Reihe von k_f-Werten aus Niedersachsen mit im einzelnen sehr unterschiedlicher geographischer (und stratigraphischer) Herkunft, im wesentlichen im Bereich des Niedersächsischen Berglands, zusammengefasst. In strengem Sinne ist auch das Untersuchungsgebiet Asse Teil dieses Gebietes. Die getrennte Behandlung hat ihre Ursache in den unterschiedlichen Erhebungszusammenhängen: Die Untersuchungen im Gebiet Niedersachsen waren auf die Grundwassergewinnung und damit durchlässige Gesteine gerichtet, während die Untersuchungen in der Asse im Zusammenhang mit dem Endlager für radioaktive Abfälle im ehemaligen Salzbergwerk Asse II stehen.

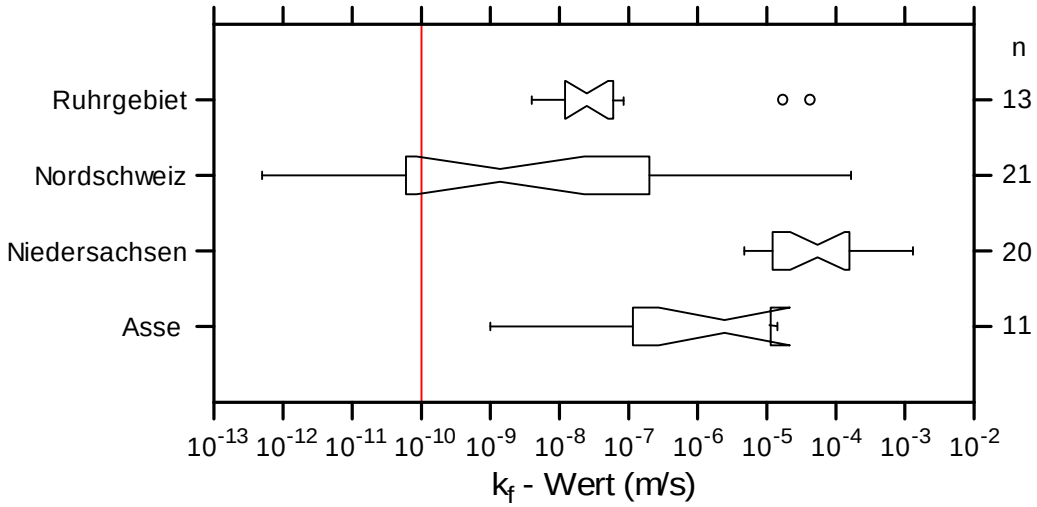


Abb. 7-35 Boxplots der k_f-Werte für Sandstein aus den einzelnen Untersuchungsgebieten

vertikale Linie bei 10^{-10} m/s: Mindestanforderung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Bei den ausgewerteten Sandsteindaten ist die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Formation bzw. zu einem bestimmten Faziesraum zweifellos ein wichtigeres Differenzierungkriterium als die geographische Herkunft. Alle triassischen Sandsteine (Buntsandstein, Keuper) stammen aus dem germanischen Faziesraum. Bei den getesteten Rotliegend-Sandsteinen im Untersuchungsgebiet Nordschweiz handelt es sich in Wirklichkeit um silthaltige Grauwacken. Die beiden Wellenberg-Werte gelten für Flysch-Sandsteine.

Niedrige k_f-Werte (<10^{-10} m/s) stammen mit Ausnahme eines Wertes aus dem Gebiet Wellenberg ausschließlich aus den Rotliegend-Grauwacken des Untersuchungsgebietes Nordschweiz (Abb. 7-35). Das für diesen Gesteinstyp charakteristische breite Korngrößenspektrum ist für die niedrigen k_f-Werte möglicherweise ebenso entscheidend wie die große Tiefe, in der diese Gesteine untersucht worden sind. Die eher ho-

hen Werte aus dem Gebiet Nordschweiz gelten hier für Sandsteine der Trias. Sie liegen im Bereich der Werte für Niedersachsen und die Asse.

Sieht man von zwei Ausreißerwerten ab, ist die Bandbreite der k_f-Werte aus dem Oberkarbon des Ruhrgebiets im Vergleich zu den anderen Gebieten auffällig eng (Abb. 7-33). Bei den beiden Ausnahmen handelt es sich um Werte aus Gesteinsabschnitten, die in den ausgewerteten Quellen ausdrücklich als geklüftet bezeichnet werden.

Zusammenfassung Sandstein

Sandstein ist durch im Mittel (Medianwert, geometrischer Mittelwert) hohe k_f-Werte von gut 10^{-07} m/s gekennzeichnet. Sandstein gehört damit zu den stark durchlässigen Hauptgesteinstypen. Nur wenige k_f-Werte (10 %) erfüllen die Mindestanforderung gemäß AkEnd. Informationen über die Durchlässigkeit erhöhende Gefügestörungen liegen zwar nicht vor, doch wird sie zweifellos stark durch Trennfugen, insbesondere Klüfte und Störungen, bestimmt. Nur wenige Werte erfüllen die Mindestanforderung den AkEnd (10^{-10} m/s). Allein unter dem Gesichtspunkt Gebirgsdurchlässigkeit ist daher verständlich, dass Sandstein nirgendwo als einschlusswirksamer Gebirgsbereich für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ins Auge gefasst wird.

Die Gebirgsdurchlässigkeit nimmt mit der Tiefe deutlich ab, doch werden in allen Tiefenbereichen immer auch relativ hohe k_f-Werte, meist deutlich über der Mindestanforderung angetroffen. Im für die Endlagerung vorgesehenen Tiefenbereich zwischen 300 und 1.500 m unter Geländeoberfläche beträgt die Wertebandbreite mehr als acht Größenordnungen, wobei Median- bzw. geometrischer Mittelwert deutlich über der Mindestanforderung liegen.

7.2.5 Ton/Tonstein

Unter der Bezeichnung Ton/Tonstein werden Sedimentgesteine mit der für Tonstein charakteristischen feinkörnigen Zusammensetzung, aber unterschiedlichem Konsolidierungsgrad und entsprechend unterschiedlichen mechanischen und hydraulischen Eigenschaften zusammengefasst. Dies ist erforderlich, weil zuverlässige Aussagen zum Grad der Konsolidierung der betrachteten Gesteinskörper auf Grund der Quellenlage nicht immer möglich sind. Auf einige der erkannten bzw. bekannten Unterschiede wird nachfolgend eingegangen.

Bei einigen der in den Quellen als Ton bzw. Tonstein bezeichneten Gesteinskörper ist zudem die Zusammensetzung nicht genau bekannt. Die jeweiligen Gesteine können daher Beimengungen von Partikeln mit größerem Korndurchmesser, insbesondere Silt oder Sand, und aus mineralogisch anderem Material, insbesondere Quarz oder Kalzit, enthalten, ohne dass sich dies in der Bezeichnung (z. B. mergeliger Tonstein) niederschlägt. Soweit solche Besonderheiten für die Beurteilung des Hauptgesteinstyps Ton/Tonstein bedeutsam erscheinen, werden sie im Abschnitt "Einflussfaktor Gesteinszusammensetzung" behandelt. Kritisch ist insbesondere die Abgrenzung zu Mergelstein. Nicht zu allen k_f-Werten liegen exakte Gesteinsbeschreibungen vor. Es ist daher nicht auszuschließen, dass einige k_f-Werte für Mergelstein dem Hauptgesteinstyp Ton/Tonstein zugeordnet worden sind und umgekehrt.

Im Hinblick auf die geographische Herkunft der k_f-Werte ist die Zusammensetzung des Datenkollektivs sehr ungleichgewichtig. Von den insgesamt 676 k_f-Werten aus 22 Untersuchungegebieten stammen 504 bzw. rund 75 % aus nur zwei Untersuchungsgebieten (Münchehagen und Hoheneggelsen). Ein weiteres Gebiete hat rund 6 % der Werte geliefert. Die übrigen steuern weniger als fünf Prozent, teilweise auch nur Einzelwerte bei (Tab. 7-25). Aus anderen Untersuchungsgebieten, z. B. Orte, liegt nur ein Mittelwert vor (die Einzelwerte sind nicht publiziert).

Angesichts der Tatsache, dass Tone und Tonsteine als Gesteinstypen mit "bekanntermaßen" geringer Wasserdurchlässigkeit gelten, sind die Bandbreite der erhobenen k_f-Werte (etwa 11 Größenordnungen), vor allem aber die statistischen Kennwerte der k_f-Wert-Verteilung bemerkenswert groß (Tab. 7-1 u. Tab. 7-25): Der Medianwert ist mit gut 10^{-06} m/s der höchste aller Hauptgesteinstypen und der geometrische Mittelwert gehört mit etwa 10^{-07} m/s zu den höchsten Werten. Nur 15 % aller k_f-Werte erfüllen die Mindestanforderung gemäß AkEnd von 10^{-10} m/s. In dieser Hinsicht liegt Ton/Tonstein zwischen Granit und Sandstein (Tab. 7-12).

Hintergrund für die unerwartet hohen k_f-Werte des Hauptgesteinstyps Ton/Tonstein sind die Ergebnisse aus dem Untersuchungsgebiet Münchehagen. Sie sind gegenüber allen anderen durch Daten belegten Gesteinskörpern dieses Gesteinstyps durch eine die Durchlässigkeit generell stark erhöhende petrographische Besonderheit gekennzeichnet (s. Einflussfaktor Diagenese, schwache Metamorphose). Daher

wurden die statistischen Kennwerte für Ton/Tonstein auch ohne die Daten aus dem Gebiet Münchehagen berechnet. Geometrischer Mittelwert und Medianwert liegen dann mit gut 10^{-09} m/s um zwei bis drei Größenordnungen über den unter Einschluss von Münchehagen berechneten Werten (Tab. 7-25). Der Anteil der Werte $<10^{-10}$ m/s liegt nun bei 34 %.

Einflussfaktor Länge Testintervall

Eine signifikante Abhängigkeit der k_f-Werte von der Länge des Testintervalls besteht nicht.

Einflussfaktor Untersuchungsgebiet

Zwischen den k_f-Werten einiger Untersuchungsgebiete des Hauptgesteinstyps Ton/ Tonstein zeichnen sich erhebliche Unterschiede ab. Sie betreffen auch Daten aus ein und derselben stratigraphisch-faziellen Einheit. Diese Unterschiede werden im vorliegenden Fall allerdings nicht durch die unterschiedliche geographische Herkunft der Daten als Ausdruck nicht bekannter geowissenschaftlicher oder anderer natürlicher Ursachen hervorgerufen. Vielmehr können sie bestimmten anderen Ursachen zugeordnet werden:

Als Beispiele für die Auswirkungen der unterschiedlichen Tiefe auf die k_f-Werte werden die zum Opalinuston des Dogger aus den Untersuchungsgebieten Benken, Mont Terri, Nordschweiz und Schwäbische Alb vorliegenden Daten behandelt (s. "Einflussfaktor Testtiefe"). Die Einflüsse der Gesteinszusammensetzung und von schwacher Metamorphose auf die Gebirgsdurchlässigkeit werden anhand der Daten für Tonsteine der Unterkreide aus den Untersuchungsgebieten Hoheneggelsen und Münchehagen diskutiert (s. "Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen").

Einflussfaktor Testtiefe

Im Hinblick auf die Zuordnung der k_f-Werte zu einem der drei Tiefenbereiche <300, 300 bis 1.500 m und >1.500 m unter Geländeoberfläche ist der Datensatz für Ton/Tonstein sehr heterogen: Nahezu 95 % aller Werte stammen aus Tiefen kleiner 300 m. Aus Tiefen größer als 1.500 m unter Geländeoberfläche liegt überhaupt kein Wert vor (Tab. 7-25). Durch dieses Ungleichgewicht wird die statistische Aussagekraft der Auswertungsergebnisse im Hinblick auf den Einfluss der Tiefe auf die Gebirgsdurchlässigkeit eingeschränkt. Das betrifft nicht die Aussagekraft der Werte selbst.

In der Tiefenverteilung der k_f-Werte äußert sich die genannte heterogene Zusammensetzung zum einen in der Massierung von Datenpunkten in geringer Tiefe unter Geländeoberfläche (Abb. 7-36). Die zugehörigen k_f-Werte liegen zwischen etwa 10^{-11} und etwa 10^{-04} m/s. Diese Daten stammen weit überwiegend aus den Untersuchungegebieten Hoheneggelsen und Münchehagen (s. Einflussfaktoren "Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen" u. "Diagenese, schwache Metamorphose"). Zum

anderen treten in Tiefen ab knapp 200 m unter Geländeoberfläche nur noch relativ niedrige k_f-Werte auf, davon nur zwei Werte größer als 10^{-10} m/s. Die Gebirgsurchlässigkeit von Ton/Tonstein ist demnach deutlich tiefenabhängig.

Tiefenbereich (Mittl. Testtiefe in m u. G.)	**n**	**k_f-Werte** (m/s)			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
alle Untersuchungsgebiete					
<300	633	$2{,}55 * 10^{-14}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$2{,}79 * 10^{-07}$	$1{,}53 * 10^{-06}$
300 - 1.500	36	$5{,}50 * 10^{-15}$	$2{,}05 * 10^{-10}$	$8{,}05 * 10^{-13}$	$9{,}50 * 10^{-13}$
>1.500	-	-	-	-	-
alle *)	676	$5{,}50 * 10^{-15}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$1{,}26 * 10^{-07}$	$1{,}20 * 10^{-06}$
ohne Untersuchungsgebiet Münchehagen					
<300	247	$2{,}55 * 10^{-14}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$9{,}86 * 10^{-09}$	$1{,}00 * 10^{-08}$
300 - 1.500	36	$5{,}50 * 10^{-15}$	$2{,}05 * 10^{-10}$	$8{,}05 * 10^{-13}$	$9{,}50 * 10^{-13}$
>1.500	-	-	-	-	-
alle *)	290	$5.50 * 10^{-15}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$2{,}55 * 10^{-09}$	$2{,}45 * 10^{-09}$

Tab. 7-25 k_f-Werte für Ton/Tonstein, differenziert nach Tiefenbereichen, mit und ohne Berücksichtigung der Daten aus dem Untersuchungsgebiet Münchehagen

*) einschließlich Werten ohne Tiefenangabe

Die k_f-Werte aus den Tiefenbereichen <300 und 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche unterscheiden sich im Mittel um rund fünf (geometrischer Mittelwert) bzw. fast sechs Größenordnungen (Medianwert). Die Kennwerte für die Daten insgesamt sind wegen der Dominanz der Werte aus den Gebieten Hoheneggelsen und Münchehagen in beiden Datensätzen mit den aus dem Bereich <300 m unter Geländeoberfläche nahezu identisch. Ohne Berücksichtiung der Münchehagendaten verringert sich der Unterschied zwischen den geometrischem Mittelwerten und den Medianwerten für die Tiefenbereiche <300 und 300 bis 1.500 m Tiefe unter Geländeoberfläche auf rund vier Größenordnungen.

Noch deutlicher wird der Einfluss der Testtiefe auf die Gebirgsdurchlässigkeit in der doppelt logarithmischen Darstellung des Verteilungsdiagramms in Abb. 7-37: Die Abnahme der Gebirgsdurchlässigkeit mit zunehmender Tiefe folgt danach keiner linearen Funktion. Vielmehr lassen sich die Daten (mindestens) zwei Werte-Clustern mit folgenden Merkmalen zuordnen (Tab. 7-26):

- kf-Werte zwischen etwa 10^{-04} m/s und gut 10^{-11} m/s (sowie einige kleinere Werte) in Tiefen kleiner als 170 m unter Geländeoberfläche; ,
- kf-Werte zwischen 10^{-09} (weit überwiegend aber kleiner als 10^{-10} m/s) und knapp 10^{-14} m/s in Tiefen größer als 170 m unter Geländeoberfläche.

Die Tiefengrenze zwischen den beiden Clustern ist mangels Daten aus diesem Tiefenbereich nicht genau belegt. Sie kann um einige Zehnermeter davon abweichen. Möglicherweise handelt es sich auch um einen schmalen Übergansbereich mit allmählich abnehmenden k_f-Werten. Jedenfalls liegt die Grenze nicht tiefer als 200 m unter Geländeoberfläche.

Cluster (Mittl. Testtiefe in m u. G.)	**n**	**k_f-Werte** (m/s)			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
<170 (alle U)	599	$2{,}55 * 10^{-14}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$5{,}31 * 10^{-07}$	$1{,}75 * 10^{-06}$
<170 (ohne M)	213	$2{,}55 * 10^{-14}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$3{,}52 * 10^{-08}$	$3{,}00 * 10^{-08}$
>170	70	$5{,}50 * 10^{-15}$	$1{,}00 * 10^{-09}$	$1{,}61 * 10^{-12}$	$3{,}04 * 10^{-12}$

Tab. 7-26 k_f-Werte für Ton/Tonstein aus den beiden nach Tiefe und Gebirgsdurchlässigkeit definierten Werte-Clustern

alle U: Daten aller Untersuchungsgebiete,
ohne M: Daten ohne Untersuchungsgebiet Münchehagen (s. Text)
n: Anzahl Messwerte

In dem Cluster mit k_f-Werten aus geringer Tiefe kommen durchaus auch niedrige Werte vor. Sie stammen vor allem aus dem Untersuchungsgebiet Zentral-USA (Pierre-Shale), in dem sogar k_f-Werte kleiner als 10^{-13} m/s ermittelt worden sind. Mehrere Werte kleiner als 10^{-10} m/s haben außerdem die Untersuchungsgebiete Schwäbische Alb (Opalinuston) und Hoheneggelsen (Unterkreide) geliefert. Die Mittelwerte der beiden Cluster unterscheiden sich signifikant, und zwar unabhängig davon ob die Werte aus dem Untersuchungsgebiet Münchehagen berücksichtigt werden oder nicht.

Die Zugehörigkeit der k_f-Werte zu einem dieser beiden Cluster ist weder vom Grad der Konsolidierung des jeweiligen Gesteins (Ton oder Tonstein) noch der geographischen oder stratigraphischen Datenherkunft abhängig; denn in beiden Clustern finden sich sowohl Daten für Ton als auch für Tonstein, Daten aus derselben Formation aber unterschiedlichen Untersuchungsgebieten sowie Daten aus einem Untersuchungsgebiet, aber unterschiedlichen Formationen. Ein Beispiel für den Einfluss der Tiefe auf die Durchlässigkeit von Tonstein bestimmter stratigraphischer Herkunft ist

das Untersuchungsgebiet **Asse**, wo die k_f-Werte aus größerer Tiefe formationsunabhängig und formationsbezogen (Oberer Buntsandstein) deutlich kleiner sind als aus geringer Tiefe (Abb. 7-38).

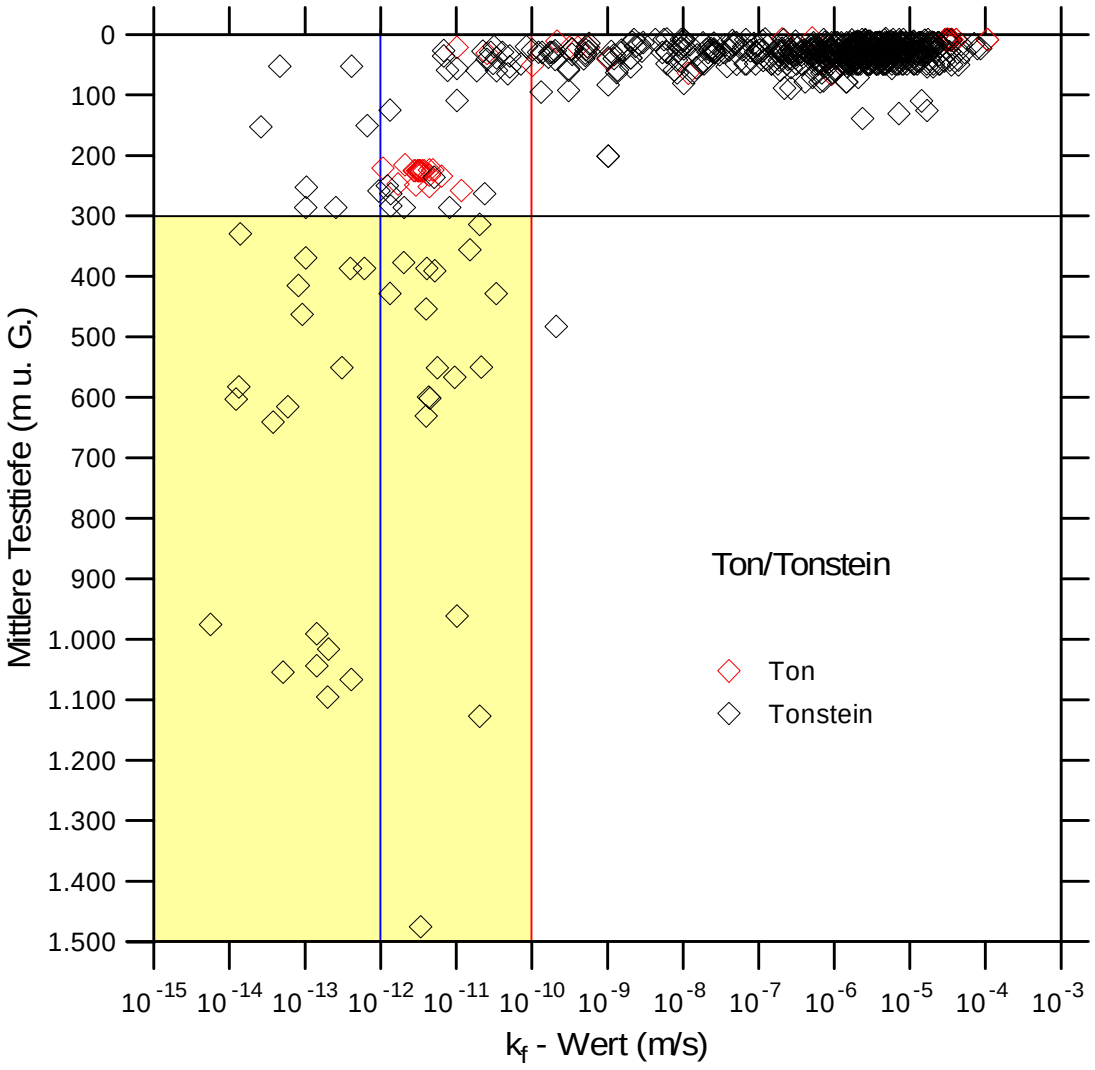


Abb. 7-36 Tiefenverteilung der k_f-Werte für Ton/Tonstein

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
horizontale Linie bei 300 m u. G.: Obergrenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

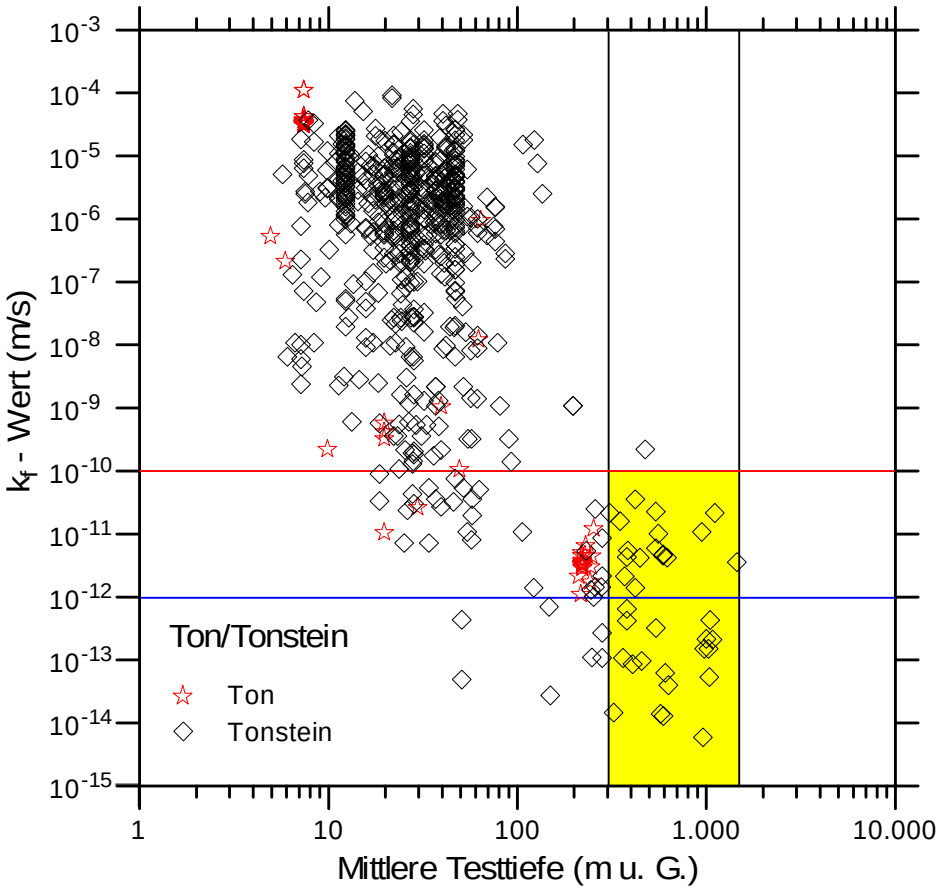


Abb. 7-37 k_f-Werte für Ton/Tonstein in Abhängigkeit von der Tiefe, differenziert nach dem Ausmaß der Konsolidierung (Ton bzw. Tonstein)

horizontaleLinien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

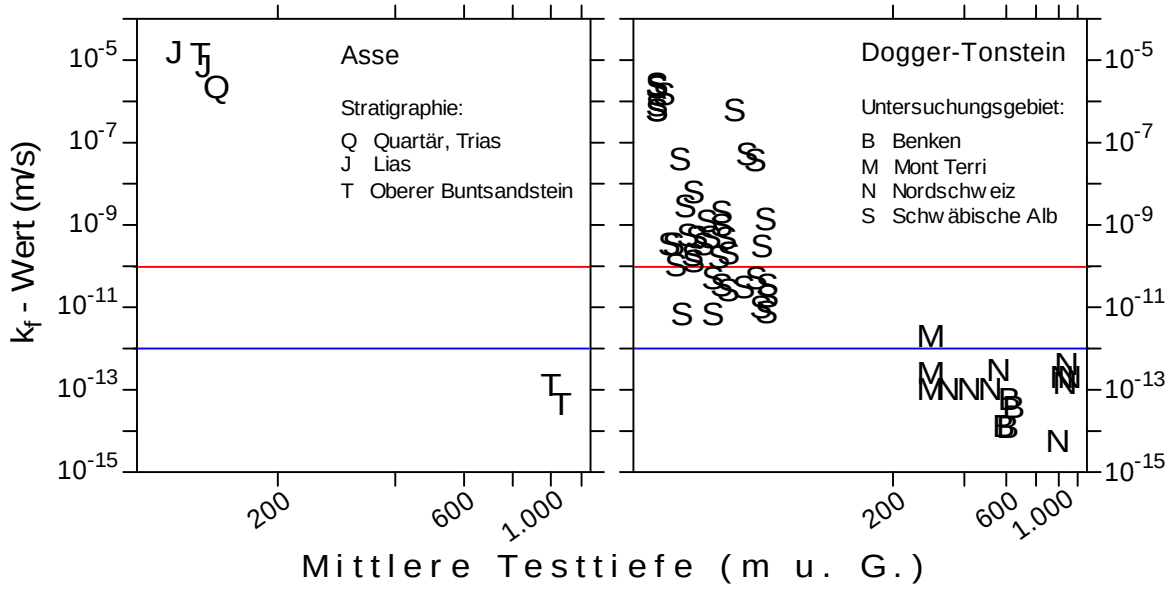


Abb. 7-38 k_f-Werte für Tonsteinkörper unterschiedlicher stratigraphischer Herkunft in Abhängigkeit von der Tiefe

links: unterschiedliche Gesteinskörper im Untersuchunsgebiet Asse,
rechts: Dogger-Tonstein (im Wesentlichen Opalinuston) in unterschiedlichen Untersuchungsgebieten
horizontaleLinien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Die gebietsübergreifende Tiefenabhängigkeit der k_f-Werte einer bestimmten Tonsteinformation veranschaulicht das Beispiel Dogger-Tonstein (Abb. 7-38). In den Untersuchungsgebieten **Benken, Mont Terri, Nordschweiz** und **Schwäbische Alb** wurden k_f-Werte für Opalinuston (und benachbarte Gesteine der Dogger-Schichtfolge mit ähnlichen Eigenschaften) untersucht. Die höchsten k_f-Werte wurden im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb gemessen. Der Opalinuston ist dort oberflächennah verbreitet, so dass die Messtiefen nur zwischen 20 und 60 m unter Geländeoberfläche liegen. Die resultierenden hohen k_f-Werte können außer durch ausgeprägte Klüftung auch durch Verwitterungseinflüsse verursacht sein.

Als Ursache für die Differenzierung der k_f-Werte nach der Tiefe ist bei den Tonsteinen am ehesten sekundäre Trennfugenbildung durch entlastungs- und verwitterungsbedingte oberflächennahe Auflockerung des Gesteins anzunehmen. Daneben können örtlich weitere, im einzelnen nicht bekannte Einflüsse wirksam sein, wie etwa die unterschiedliche tektonische Beanspruchung der Gesteinskörper mit unterschiedlich intensiver Klüftung. Bei den Werten für Ton können die Unterschiede zusätzlich oder allein mit noch unzulänglicher Konsolidierung des Gesteins zusammenhängen.

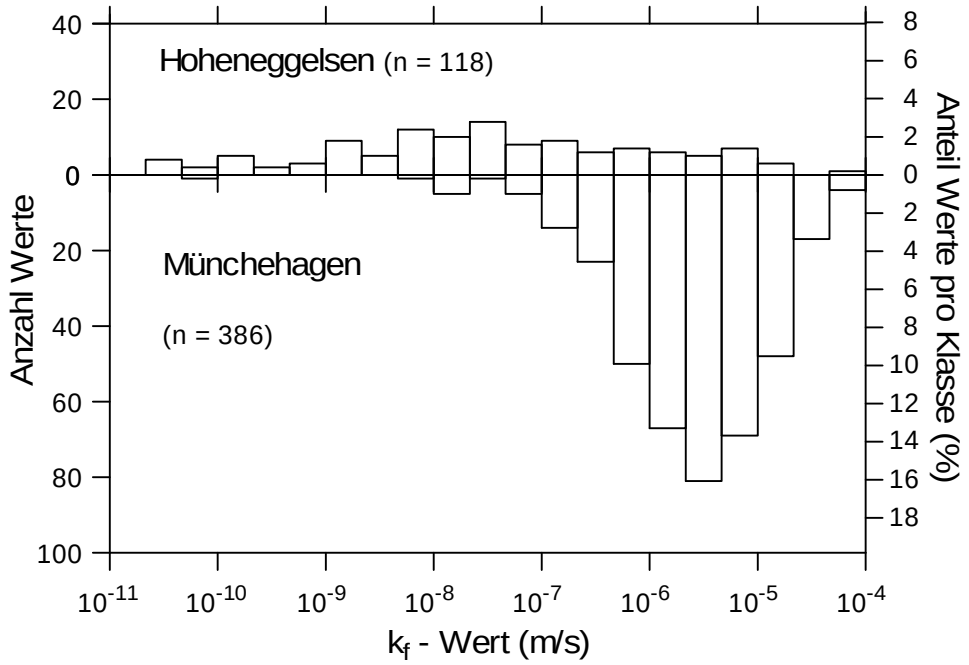


Abb. 7-39 Gegenüberstellung der Histogramme der k_f-Werte für Ton/Tonstein aus den Untersuchungsgebieten Hoheneggelsen und Münchehagen (Unterkreide)

Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen

Die in den Untersuchungsgebieten Münchehagen und Hoheneggelsen untersuchten feinkörnigen Tonsteinserien sind unter stratigraphisch-faziell ähnlichen Bedingungen gebildet worden. Sie sind Teil der mehrere hundert Meter mächtigen Füllung des unterkretazischen Niedersächsischen Beckens und kommen im Raum westlich bis südöstlich von Hannover weitflächig an der Oberfläche bzw. in deren Nähe vor. Diese Schichtfolge besteht überwiegend aus Tonstein bis Siltstein und Mergelstein mit erfahrungsgemäß geringer Gebirgsdurchlässigkeit (NLFB 1986).

Bei den im Gebiet **Hoheneggelsen** und seiner Umgebung (östlicher Teil des Niedersächsischen Beckens) verbreiteten Gesteinen treten in dieser Folge als fazielle Besonderheiten Gesteine mit abweichender Tonmineralzusammensetzung sowie Lagen von Toneisenstein-Konkretionen und fein geschichtete Lagen und Bänke von sogenanntem Blätterton auf. Beim Blätterton handelt es sich um feingeschichteten Tonmergelstein mit lagenweiser Anreicherung von Coccolithen in den helleren Lagen. Insbesondere von Blättertonlagen (bzw. vergleichbaren Gesteinen mit anderer Bezeichnung) ist bekannt, dass sie gegenüber den Gesteinen in Normalfazies erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen können, wenn sie eine gewisse Mächtigkeit aufweisen (GEOUM 1999). Diese Unterschiede spiegeln sich auch im Histogramm der k_f-Werte aus dem Untersuchungsgebiet Hoheneggelsen wider (Abb. 7-39):

Für die Gebirgsdurchlässigkeit der unterkretazischen Gesteine in Normalfazies können im Gebiet Hoheneggelsen die das Häufigkeitsmaximum bildenden k_f-Werte um 10^{-08} m/s und kleiner angesetzt werden. In Blättertonlagen und -bänken ist die Gebirgsdurchlässigkeit in Abhängigkeit von deren Mächtigkeit deutlich höher als bei Gesteinen in Normalfazies. Die mächtigsten dieser Blättertonfolgen haben die im Histogramm erkennbaren hohen k_f-Werte von bis zu gut 10^{-05} m/s geliefert. Die größere hydraulische Wirksamkeit dieser Zonen äußert sich auch darin, dass das Grundwasser in ihnen in den meteorischen Wasserkreislauf einbezogen sein kann und dann - anders als Gesteine in Normalfazies - ausgesüßt ist (APPEL & KRABBE 1996).

Einflussfaktor Diagenese, schwache Metamorphose

Die im Untersuchungsgebiet **Münchehagen** untersuchten unterkretazischen Tonsteine und Siltsteine waren ursprünglich denen der Normalfazies im Untersuchungsgebiet Hoheneggelsen ähnlich. Anders als diese unterlagen sie allerdings einer schwachen thermischen Metamorphose durch den Pluton von Vlotho/Uchte (DEUTLOFF et al. 1980, RHODE 1985). Dadurch wurden der Inkohlungsgrad der organischen Substanz und die Illit-Kristallinität des Gesteins erhöht, die Plastizität und das Sorptionsvermögen aber verringert. Auf Grund der erhöhten Festigkeit der Gesteine ist in den von der Aufheizung betroffenen Unterkreide-Serien im Westteil des Niedersächsichen Beckens eine erheblich intensivere Klüftung entwickelt als bei den entsprechenden Serien weiter im Osten. Sie ist für die generell hohe Durchlässigkeit der Münchehagen-Gesteine mit k_f-Werte um 10^{-06} bis 10^{-05} m/s verantwortlich (Abb. 7-39). Besonders hohe k_f-Werte sind in Münchehagen an Störungen gebunden, deren hydraulische Bedeutung wegen der anderen mechanischen Eigenschaften der Gesteine erheblich größer ist als als bei Störungen in den nicht überprägten und daher weniger festen Tonsteinen im Bereich Hoheneggelsen.

Auf Grund dieser Besonderheiten wurden im Untersuchungsgebiet Münchehagen die im (geometrischen) Mittel höchsten k_f-Werte aller Tonsteinkörper bestimmt. Sie spiegeln sich auch in den sehr unterschiedlichen Häufigkeitsverteilungen der k_f-Werte aus den Untersuchungsgebieten Münchehagen und Hoheneggelsen wider (Abb. 7-39).

Einflussfaktor Gefüge

Die Angaben zu Gefügestörungen im Sinne von Kapitel 4.1 sind beim Hauptgesteinstyp Ton/Tonstein auf Grund der besonderen mechanischen Eigenschaften nur bedingt mit denen bei festeren Gesteinen, etwa den kristallinen Gesteinen, vergleichbar. Angaben zu gestörtem Gefüge in Gestalt hydraulisch wirksamer Klüfte liegen zu Ton/Tonstein nur aus Tiefen bis gut 280 m unter Geländeoberfläche und aus wenigen Untersuchungsgebieten vor. Der Hauptanteil der betroffenen k_f-Werte stammt aus den Untersuchungsgebieten Münchehagen und Hoheneggelsen.

Untersuchungsgebiet	n	Mittlere Testtiefe (m u.G.)	k_f-Werte (m/s) Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Ton						
Texas	32	8	$2{,}90 * 10^{-05}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$3{,}44 * 10^{-05}$	$3{,}10 * 10^{-05}$
Trigno	1	20	$1{,}00 * 10^{-11}$			
Saskatchewan	7	5 - 30	$2{,}50 * 10^{-11}$	$5{,}00 * 10^{-07}$	$1{,}67 * 10^{-09}$	$4{,}00 * 10^{-10}$
Flandern	1	40	$1{,}00 * 10^{-09}$			
Tono	1	50	$1{,}00 * 10^{-10}$			
Orte *)	1	63	$1{,}15 * 10^{-08}$			
Gorleben	1	65	$9{,}00 * 10^{-07}$			
Mol	21	215 - 257	$1{,}05 * 10^{-12}$	$1{,}15 * 10^{-11}$	$3{,}32 * 10^{-12}$	$3{,}24 * 10^{-12}$
Tonstein						
Schwäbische A.	41	20 - 59	$6{,}67 * 10^{-12}$	$2{,}63 * 10^{-06}$	$1{,}32 * 10^{-09}$	$4{,}67 * 10^{-10}$
Münchehagen	386	6 - 88	$7{,}00 * 10^{-11}$	$8{,}45 * 10^{-05}$	$2{,}37 * 10^{-06}$	$2{,}73 * 10^{-06}$
Hoheneggelsen	118	6 - 94	$2{,}20 * 10^{-11}$	$4{,}70 * 10^{-05}$	$3{,}46 * 10^{-08}$	$2{,}55 * 10^{-08}$
WIPP	2	200	$1{,}00 * 10^{-09}$		$1{,}00 * 10^{-09}$	$1{,}00 * 10^{-09}$
Zentral-USA	14	52 - 252	$1{,}00 * 10^{-14}$	$1{,}10 * 10^{-08}$	$1{,}31 * 10^{-12}$	$5{,}78 * 10^{-13}$
Mont Terri	3	285	$1{,}00 * 10^{-13}$	$2{,}00 * 10^{-12}$	$3{,}68 * 10^{-13}$	$2{,}50 * 10^{-13}$
Tournemire	12	235 - 386	$1{,}36 * 10^{-14}$	$2{,}33 * 10^{-11}$	$1{,}67 * 10^{-12}$	$1{,}33 * 10^{-12}$
Duero	3	427 - 549	$1{,}30 * 10^{-12}$	$3{,}30 * 10^{-11}$	$9.66 * 10^{-12}$	$2{,}10 * 10^{-11}$
Meuse/Haute-M.	10	355 - 630	$1{,}98 * 10^{-12}$	$2{,}05 * 10^{-10}$	$7{,}33 * 10^{-12}$	$4{,}75 * 10^{-12}$
Benken	4	581 - 640	$1{,}20 * 10^{-14}$	$5{,}80 * 10^{-14}$	$7{,}33 * 10^{-12}$	$2{,}50 * 10^{-14}$
Konrad	1	961	$1{,}00 * 10^{-11}$			
Asse	6	109 - 1.054	$5{,}00 * 10^{-14}$	$1{,}65 * 10^{-05}$	$1{,}72 * 10^{-08}$	$4{,}65 * 10^{-06}$
Nordschweiz	10	368 - 1.126	$5{,}50 * 10^{-15}$	$2{,}00 * 10^{-11}$	$1{,}87 * 10^{-13}$	$1{,}68 * 10^{-13}$
Wellenberg	1	1.474	$3{,}30 * 10^{-12}$			

Tab. 7-27 k_f-Werte für Ton und Tonstein aus den einzelnen Untersuchungsgebieten (Anordnung nach der höchsten mittleren Testtiefe)

*) Mittelwert aus nicht publizierten Einzelwerten
Unterscheidung zwischen Ton und Tonstein: Ton bei stratigraphischer Herkunft Tertiär und Quartär; Tonstein, wenn älter als Tertiär;
Informationen zu den Untersuchungsgebieten s. Tab. 5-1

Hier gelten die k_f-Werte ausschließlich für gestörte Gebirgsbereiche. Bei den Werten aus anderen Untersuchungsgebieten konnten mangels Information keine eindeutigen Gefügezuordnungen vorgenommen werden.

Der unterschiedliche Konsolidierungsgrad von Ton und Tonstein ist ein weiteres Gefügemerkmal, das sich auf die Gebirgsdurchlässigkeit auswirken kann. Beim vorliegenden Datenmaterial ergeben die entsprechenden Durchlässigkeitsunterschiede kein klares Bild (Tab. 7-28): Je nach dem ob die Daten aus dem Untersuchungsgebiet Münchehagen in die Betrachtung einbezogen werden (s. Einflussfaktor Diagenese, schwache Metamorphose), sind die k_f-Werte für Ton im Mittel um etwa eine Größenordnung niedriger als die für Tonstein (mit Münchehagen) oder um etwa eine Größenordnung höher als die für Tonstein (ohne Münchehagen).

Diese Unterschiede sind geringer als die zwischen den k_f-Werten für verschiedene Tonformationen bzw. aus verschiedenen Untersuchungsgebieten (Tab. 7-27). So zeigen die quartärzeitlichen Tone aus den Untersuchungsgebieten Gorleben, Sakatchewan und Texas höhere Durchlässigkeiten (>10^{-07} m/s) als die tertiärzeitlichen Tone aus den Gebieten Flandern, Mol, Orte, Tono und Trigno (<10^{-08} m/s).

Gesteinstyp/ Konsolidierung	**n**	**Mittlere Testtiefe (m u.G.)**	**k_f-Werte (m/s)**			
			Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Ton	65	5 - 257	$1{,}05 * 10^{-12}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$2{,}97 * 10^{-08}$	$9{,}00 * 10^{-07}$
Tonstein	611	6 - 1.474	$5{,}50 * 10^{-15}$	$8{,}45 * 10^{-05}$	$1{,}47 * 10^{-07}$	$1{,}22 * 10^{-06}$
alle	676	5 - 1.474	$5{,}50 * 10^{-15}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$1{,}26 * 10^{-07}$	$1{,}20 * 10^{-06}$
Tonstein o. M.	225	6 - 1.474	$5{,}50 * 10^{-15}$	$4{,}70 * 10^{-05}$	$1{,}26 * 10^{-09}$	$2{,}00 * 10^{-09}$
Ton ohne Mol	44	5 - 65	$1{,}00* 10^{-11}$	$1{,}04 * 10^{-04}$	$2{,}28 * 10^{-06}$	$3{,}10 * 10^{-05}$

Tab. 7-28 k_f-Werte für Ton/Tonstein, differenziert nach dem Grad der Gesteinskonsolidierung (Ton oder Tonstein)

o. M.: Daten ohne Untersuchungsgebiet Münchehagen
ohne Mol: Daten ohne Untersuchungsgebiet Mol

Besonders geringe Durchlässigkeit mit im Mittel etwa 10^{-12} m/s weisen die Tone im Untersuchungsgebiet Mol auf. Sie liegen damit im Durchlässigkeitsbereich der Tonsteine, befinden sich andererseits aber auch in einer Tiefen zwischen 215 und 247 m unter Geländeoberfläche. In diesem Bereich werden nur noch niedrige k_f-Werte angetroffen. Klammert man bei den Tonsteinen die Werte für das Gebiet Münchehagen und bei den Tonen die Werte für Mol aus, so ergeben sich die in Tab. 7-28 ebenfalls

dargestellten Mittelwerte bzw. Medianwerte. Danach ist die Durchlsässigkeit bei Ton um rund drei (geometrischer Mittelwert) bzw. vier Größenordnungen (Medianwert) höher als bei Tonstein.

Zusammenfassung

Beim Hauptgesteinstyp Ton/Tonstein treten einige Besonderheiten mit erheblichem Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit zu Tage:

- Einschaltungen von Gesteinslagen oder -bänken mit petrofaziell von der Normalfazies abweichender Zusammensetzung und - daraus resultierend - anderen hydraulischen Eigenschaften können k_f-Werte liefern, die mehrere Größenordnungen über denen der Tonsteine in Normalfazies liegen. Beim Untersuchungsgebiet Hoheneggelsen trifft dies für die sogenannten Blättertonlagen (bzw. vergleichbare Gesteinstypen mit anderer Bezeichnung) zu.
- Im Untersuchungsgebiet Münchehagen ist die Gebirgsdurchlässigkeit im Vergleich mit anderen Gebieten generell deutlich erhöht. Die an sich gering durchlässigen Gesteine unterlagen einer schwachen Thermometamorphose und haben dadurch an Festigkeit gewonnen. Als Folge davon hat die tektonische Beanspruchung des Gesteins zur Ausbildung eines ausgeprägten Kluftsystems und besonders wassergängiger Störungszonen geführt.

Zwar stammen die k_f-Werte aus beiden Untersuchungsgebieten aus geringerer Tiefe als für die Endlagerung ins Auge gefasst wird, doch ist der hydraulischen Bedeutung von Gesteinen in anderer Ausbildung als der Normalfazies bei der Beurteilung der Gebirgsdurchlässigkeit von Tonsteinvorkommen besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Denn Tonstein ist verbereitet mit anderen Gesteinstypen vergesellschaftet ist, insbesondere Sandstein und Mergelstein bzw. Kalkstein, deren hohe Durchlässigkeit bekannt ist (Kapitel 7.2.5 u. 7.2.7). Die metamorphe Überprägung der Tonsteine im Untersuchungsgebiet Münchehagen ist ein Beispiel für möglicherweise petrographisch unauffällige Auswirkungen regionaler Phänomene auf die Durchlässigkeit.

Abgesehen von diesen Besonderheiten hat die Testtiefe von allen betrachteten Faktoren den deutlichsten Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit des Hauptgesteinstyps Ton/Tonstein. Es sind zwei k_f-Werte-Cluster zu unterscheiden, die sich folgenden Tiefenbereichen zuordnen lassen:

- In Tiefen von weniger als etwa 170 m unter Geländeoberfläche liegen die k_f-Werte - je nach dem, ob die ungewöhnlich hohen Werte aus dem Untersuchungsgebiet Münchehagen berücksichtigt werden oder nicht - im Mittel bei etwa 10-06 m/s oder 10-08 m/s. Die Bandbreite der kf-Werte reicht von gut 10-14 bis etwa 10-04 m/s.
- In Tiefen von mehr als 170 m unter Geländeoberfläche wurden ausschließlich kf-Werte von höchstens 10^{-09} m/s festgestellt. Der weitaus größte Teil der k_f-Werte aus diesem Bereich liegt unter 10^{-10} m/s.

Diese tiefenabhängigen Durchlässigkeitsunterschiede gelten beim vorliegenden Datenmaterial unabhängig von der Konsistenz bzw. vom Gefüge eines Gesteinskörpers (Ton oder Tonstein), von der geographischen Lage (Untersuchungsgebiet) und der Formationszugehörigkeit eines Gesteinskörpers. Gewisse Unsicherheit besteht auf Grund der ungünstigen Datenlagen im kritischen Tiefenbereich im Hinblick auf den Übergang zwischen den beiden Clustern.

Sieht man von der Tiefenabhängigkeit ab, erweisen sich die untersuchten Tone (aus Tiefen <170 m u. G.) als durchwegs höher durchlässig als die Tonsteine. Eine Ausnahme bildet der Boom-Ton im Untersuchungsgebiet Mol, dessen k_f-Werte mit etwa 10^{-12} m/s denen für Tonstein entsprechen. Allerdings liegt dieses Vorkommen in einer Tiefe, aus der nur niedrige k_f-Werte vorliegen.

7.2.6 Mergelstein

Mergel bzw. Mergelstein wird durch das Mischungsverhältnis von Ton und Kalk definiert und weiter differenziert. Je nach Kalkgehalt werden unterschiedliche Bezeichnungen verwendet (z. B. Kalkmergel oder Tonmergel). Nicht zu allen Gesteinskörpern, die dem Hauptgesteinstyp Mergelstein zugeordnet wurden, liegen Kalkgehaltsangaben vor. Da die Bezeichnunen "Mergel" und "Mergelstein" auch ohne entsprechende Untersuchungen, z. B. auf Grund erfahrungsbasierter Einschätzung oder regional üblicher Zuordnung bestimmter Gesteinseinheiten, verwendet wird, ist die Abgrenzung zu den Hauptgesteinstypen Ton/Tonstein und Kalkstein möglicherweise nicht in allen Fällen zutreffend. Das gilt insbesondere für Gesteinsvarietäten mit geringem Kalkgehalt, die ähnliche mechanische Eigenschaften aufweisen wie Ton bzw. Tonstein. Je nach den genauen Bildungsbedingungen können in Mergelsteinabfolgen Kalksteinlagen oder -bänke eingeschaltet sein (Beispiel: Untersuchungsgebiet Wellenberg). Da Kalkstein auf tektonische Beanspruchung spröde reagiert, können daraus abweichende hydraulische Eigenschaften resultieren. Im Abschnitt "Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen" wird darauf näher eingegangen.

Die ausgewerten Mergelsteindaten stammen aus acht Untersuchungsgebieten. Die Spannweite der k_f-Werte umfasst gut 10 Größenordnungen (Tab. 7-1 u. 7-29). Mit mittleren Werten (geometrischer Mittelwert und Medianwert) um 10^{-10} m/s gehört Mergelstein zu den Hauptgesteinstypen mit relativ geringer Gebirgsdurchlässigkeit. Immerhin 52 % aller k_f-Werte sind kleiner als 10^{-10} m/s, dem Wert der AkEnd-Mindestanforderung an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Kapitel 6.2.4). Diese Zahlen gelten einschließlich der Mergelsteinbereiche mit Kalksteinbänken.

Einflussfaktor Länge Testintervall

Hinweise auf einen Einfluss der Länge des Testintervalls auf die erhobenen k_f-Werte gibt es weder bei den Daten insgesamt noch bei den Daten aus den einzelnen Untersuchungegebieten (s. aber Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen gesteinstypen).

Einflussfaktor Testtiefe

Nach der doppelt logarithmischen Darstellung in Abb. 7-40 ist die Gebirgsdurchlässigkeit von Mergelstein deutlich von der Testiefe abhängig. Die k_f-Werte bilden eine zwar gestreckte, aber breite Datenwolke, so dass jedem Tiefenabschnitt eine große Bandbreite von k_f-Werten zuzuordnen ist. Im Tiefenabschnitt bis etwa 1.000 m unter Geländeoberfläche nehmen die k_f-Werte von maximal knapp 10^{-03} m/s auf etwa minmal 10^{-13} m/s ab. Ab einer Tiefe von etwa 1.000 m unter Geländeoberfläche ändert sich die Durchlässigkeitbandbreite kaum noch.

Tiefenbereich (m u. G.)	Anzahl Mess-werte	k_f-Werte (m/s)			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
<300	33	$1{,}00 * 10^{-13}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$3{,}98 * 10^{-08}$	$4{,}00 * 10^{-08}$
300 - 1.500	157	$5{,}00 * 10^{-14}$	$3{,}00 * 10^{-05}$	$5{,}69 * 10^{-11}$	$3{,}07 * 10^{-11}$
>1.500	9	$1{,}04 * 10^{-12}$	$6{,}40 * 10^{-10}$	$2{,}85 * 10^{-11}$	$1{,}93 * 10^{-11}$
alle	199	$5{,}00 * 10^{-14}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$1{,}63 * 10^{-10}$	$6{,}67 * 10^{-11}$

Tab. 7-29 k_f-Werte für Mergelstein, differenziert nach Tiefenbereichen

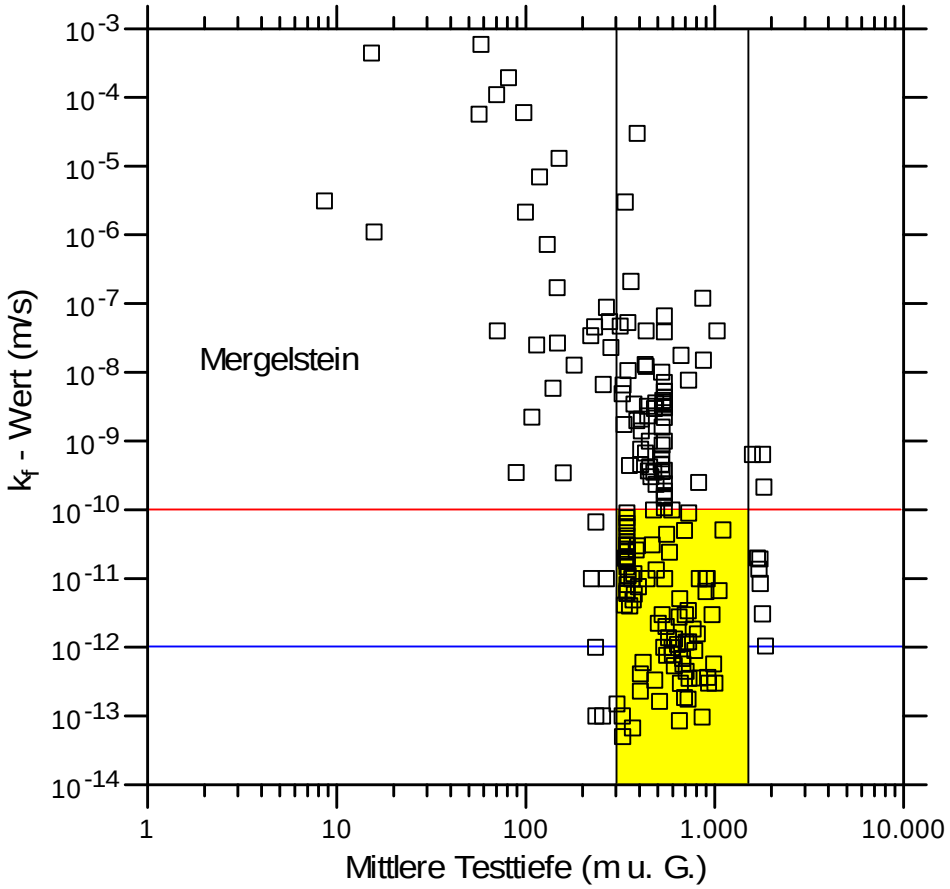


Abb. 7-40 k_f-Werte für Mergelstein in Abhängigkeit von der Testtiefe

horizontale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

In der Tiefenverteilung der k_f-Werte (Abb. 7-41) äußert sich dieser Zusammenhang in der deutlichen Abnahme der k_f-Werte bis in etwa 800 m Tiefe unter Geländeoberfäche: Mit der Tiefe verschiebt sich die gesamte Wertebandbreite in Richtung auf niedrige k_f-Werte. In allen Tiefenbereichen treten immer aber auch relativ hohe k_f-Werte (deutlich $>10^{-10}$ m/s) auf. Diese sind zum Teil, aber durchaus nicht nur an Gesteinsabschnitte mit Kalksteinbänken gebunden, die auffällig hohe k_f-Werte liefern können (s. Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen). Aus Tiefen ab etwa 800 m liegen zwar nur noch relativ wenige Daten vor, doch treten auch hier durchaus k_f-Wert weit oberhalb 10^{-10} m/s auf.

Diese Zusammenhänge schlagen sich in den statistischen Kennwerten für die Daten aus den drei Tiefenbereichen wie folgt nieder (Tab. 7-29): Die Bandbreiten der k_f-Werte für die Tiefenbereiche weniger als 300 m und 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche sind ähnlich, doch sind die Extremwerte für den tieferen Bereich um ein bzw. zwei Größenordnungen niedriger. Der geometrische Mittelwert und der Medianwert nehmen um rund drei Größenordnungen ab. Die entsprechenden Werte für den Tiefenbereich mehr als 1.500 m unter Geländeoberfläche liegen zwischen denen der oberen Tiefenbereiche, doch ist ihre Aussagekraft wegen der geringen Anzahl an Werten beschränkt.

Einflussfaktor Gesteinszusammensetzung

Da in Mergelstein eingebettete Kalksteinbänke zu einer Durchlässigkeitserhöhung führen (s. Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen), liegt es nahe zu prüfen, ob sich nicht bereits geringere Kalkgehaltsunterschiede auf die k_f-Werte auswirken. Im Untersuchungsgebiet Wellenberg war ein Zusammenhang zwischen Kalkgehalt und k_f-Wert für ein Testintervall nicht zu ermitteln. Dort treten schon innerhalb kleiner Testintervalle (<5 m) erhebliche Schwankungen des Kalkgehalts auf, so dass die Zuordnung eines k_f-Wertes zu einem bestimmten Kalkgehalt nicht möglich ist.

Aus dem Untersuchungsgebiet **Konrad** liegen Ergebnisse von Durchlässigkeits- und Kalkgehaltsbestimmungen an Gesteinen der marinen Unterkreide des Niedersächsischen Beckens vor, wie sie auch im Tonstein-Untersuchungsgebiet Hoheneggelsen vorhanden sind (Kapitel 7.2.5). Ausgehend von der 541- bzw. 343-m-Sohle bei Schacht Konrad 2 wurden flach geneigte Tonmergelsteine des Barrêmium und Mergelsteine des Albium untersucht. Über den Zusammenhang zwischen Karbonatgehalt und Durchlässigkeit können folgende Feststellungen getroffen werden (WITTKE 1991, Tab. 7-30):

- Die Tonmergelsteine des **Barrêmium** weisen Karbonatgehalte (Kalzit + Dolomit + Siderit; es dominiert Kalzit) um 15 % auf. Die Gebirgsdurchlässigkeit liegt im Mittel (geometrischer Mittelwert und Medianwert der k_f-Werte) bei gut 10^{-09} m/s und damit um etwa zwei Grössenordnungen über derjenigen der Mergelsteine des Albium. Der Karbonatgehalt nimmt innerhalb dieser Einheit vom Hangenden zum Lie-

genden von ca. 10% auf über 20 % zu. In den höchsten Bereichen mit geringen Karbonatgehalten tritt das Karbonat in chemisch gefällter Form als Karbonatlinsen und als organogener Kalzit in Gestalt von Mikrofossilien auf. Die karbonatreicheren tieferen Abschnitte sind teilweise fein laminieniert. Das Karbonat liegt hier überwiegend in Form lagig angereicherter Cocolithen vor ("Blätterton", s. Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen). Charakteristisch für diesen Schichtabschnitt ist der mehrere Meter mächtige sogenannte "Hauptblätterton".

- Die Karbonatgehalte der Mergelsteine des **Albium** liegen zwischen 29 und 38 %. Der Gehalt nimmt vom Hangenden zum Liegenden leicht ab. Das Karbonat ist im Gegensatz zum Barrêmium feinverteilt. Die k_f-Werte liegen im Mittel bei gut 10^{-11} m/s.

Diese Ergebnisse werden durch die auch aus dem Untersuchungsgebiet Hoheneggelsen vorliegenden Befunde bestätigt, wo ebenfalls Blättertonlagen gegenüber der "Normalfazies" höhere Durchlässigkeit aufweisen (Kapitel 7.2.5). Sie deuten darauf hin, dass die Form, in der das Karbonat vorliegt, und die Art seiner Verteilung im Sediment für die Durchlässigkeit bedeutsam sind. Offensichtlich führen insbesondere Kalkbänke oder Kalklinsen zur Durchlässigkeitserhöhung, und zwar auch dann, wenn der Karbonatgehalt der Gesteinseinheit insgesamt gering ist. Fein verteiltes Karbonat wirkt sich nicht in demselben Maße aus, selbst wenn die Gehalte höher sind.

Die gebirgsmechanischen Kennwerte des Gebirges der beiden Einheiten (Tab. 7-30) deuten darauf hin, dass sich die Tonmergelsteine des Barrêmium kompetenter verhalten als die Mergelsteine des Albium; denn Scherfestigkeit (Reibungswinkel, Kohäsion) und Druckfestigkeit sind höher als bei den Mergelsteinen. Sie neigen darum stärker zur bruchhaften Deformation mit Bildung wassergängiger Trennfugen. Auch das Interngefüge der Tonmergelsteine mit Karbonatlagen und -linsen zeigt vermutlich starke Kompetenzkontraste, die sich auf die Wasserwegsamkeit auswirken können. Genaue Untersuchungen darüber liegen dazu aber nicht vor.

Zwischen den feinkörnigen karbonathaltigen Gesteinen des Barrêmium und des Albium bestehen außer dem Karbonatgehalt weitere petrographische Unterschiede, z. B. in der Tonmineralzusammensetzung. Die Frage nach der Beziehung zwischen der Gebirgsdurchlässigkeit von Mergelstein und dem Karbonatgehalt, der Form des Karbonats, der Art seiner Verteilung (z. B. in Bänken bzw. Linsen oder feinverteilt) und letztlich seiner Genese ist daher nicht abschließend beantwortbar. Die hier aufgezeigten Zusammenhänge deuten in eine bestimmte Richtung, können aber noch nicht zuverlässig in ein eindeutiges Kriterium zur Beurteilung der Gebirgsdurchlässigkeit umgesetzt werden.

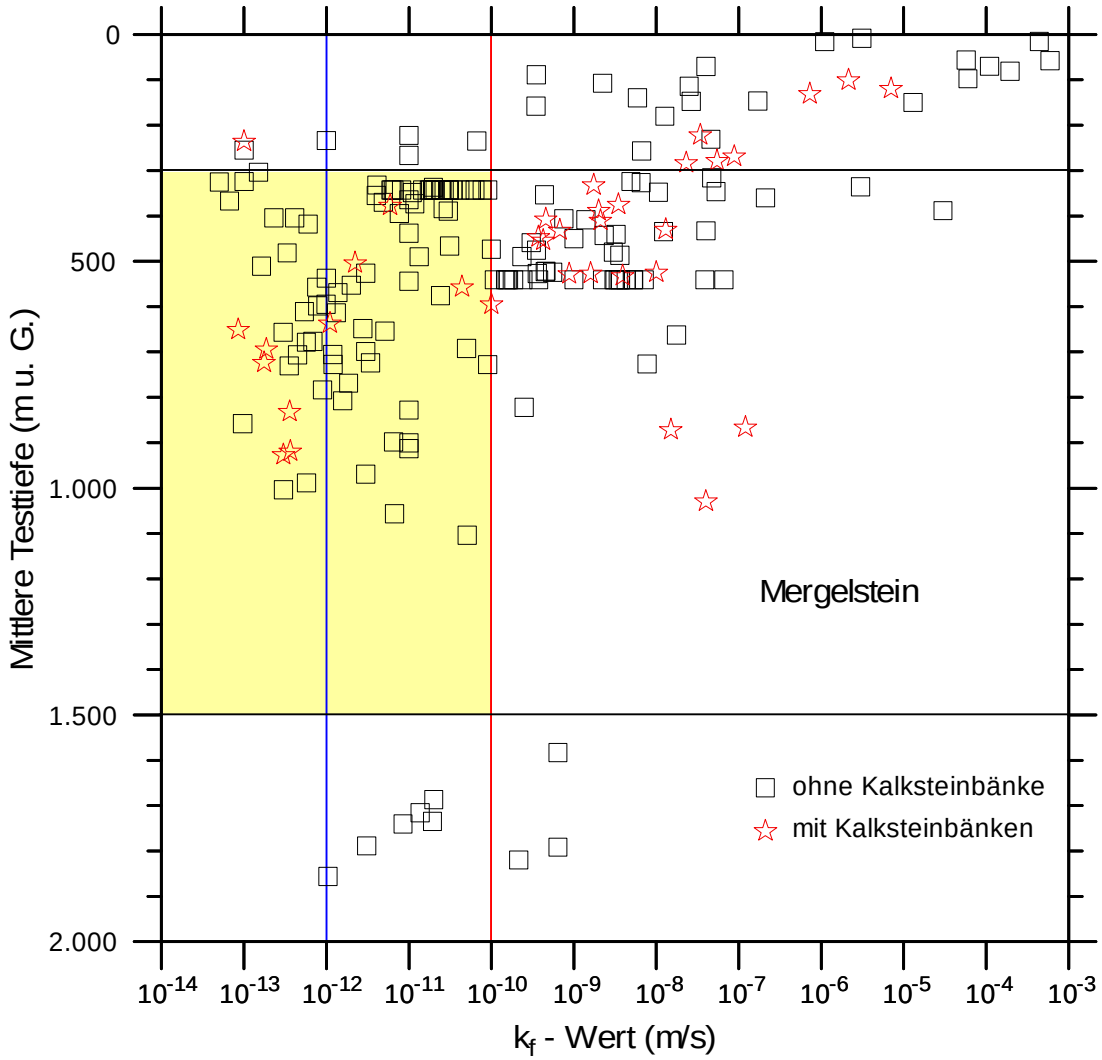


Abb. 7-41 Tiefenverteilung der k_f-Werte für Mergelstein, differenziert nach dem Auftreten von Kalksteinbänken

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
horizontale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen

In Kalksteinlinsen und -bänken in Mergelstein können bei mechanischer Beanspruchung wassergängige Trennfugen entstehen und örtlich zur Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit führen. Im Untersuchungsgebiet Wellenberg ist der Einfluss von Kalksteinlagen und -linsen auf die Gebirgsdurchlässigkeit gezielt untersucht worden. Er ist aus Tab. 7-31 und Abb. 7-42 mit den Histogrammen der Häufigkeitsverteilungen der k_f-Werte für Gesteinsbereiche ohne und mit Kalksteinbänken ersichtlich.

	Tonmergelstein Barrêmium (541-m-Sohle)	**Mergelstein Albium (343-m-Sohle)**
k_f-Werte		
Anzahl Werte	19	22
Minimalwert	$1{,}08 * 10^{-10}$	$6{,}05 * 10^{-12}$
Maximalwert	$6{,}60 * 10^{-08}$	$9{,}05 * 10^{-11}$
Geometr. Mittelwert	$1{,}66 * 10^{-09}$	$2{,}34 * 10^{-11}$
Medianwert	$3{,}17 * 10^{-09}$	$2{,}48 * 10^{-11}$
Felsmechanische Kennwerte		
Karbonatgehalt	ca. 15 %	29 - 39 %
Kohäsion	3 - 4 MN/m^2	1 - 2 MN/m^2
Reibungswinkel	10 - 15°	5 - 10°
einaxiale Druckfestigkeit	7 - 10,5 MN/m^2	2 - 5 MN/m^2
E-Modul	1.500 - 4.000 MN/m^2	2.000 - 4.000 MN/m^2

Tab. 7-30 Untersuchungsgebiet Konrad: k_f-Werte und felsmechanische Kennwerte für Tonmergelstein des Barrêmium und Mergelstein des Albium (Daten aus WITTKE 1991)

Kalkstein-bänke	**Anzahl Mess-werte**	**k_f-Werte (m/s)**			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
ohne	77	$9{,}62 * 10^{-14}$	$1{,}30 * 10^{-05}$	$7{,}60 * 10^{-11}$	$3{,}10 * 10^{-11}$
mit	28	$1{,}75 * 10^{-13}$	$2{,}14 * 10^{-06}$	$8{,}04 * 10^{-10}$	$1{,}87 * 10^{-09}$
alle	105	$9{,}62 * 10^{-14}$	$1{,}30 * 10^{-05}$	$1{,}43 * 10^{-10}$	$3{,}50 * 10^{-10}$

Tab. 7-31 Untersuchungsgebiet Wellenberg: Vergleich der k_f-Werte für Mergelstein ohne und mit Einschaltungen von Kalksteinbänken im Testintervall

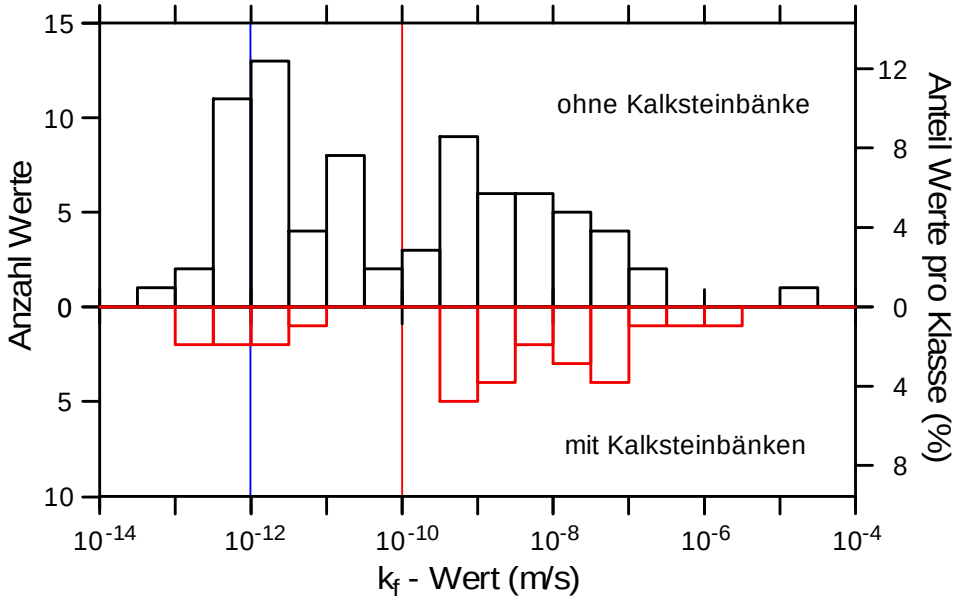


Abb. 7-42 Histogramme der k_f-Werte für Mergelstein ohne und mit Kalksteinbänken

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Die k_f-Werte aus Bereichen mit Kalksteinbänken liegen im Mittel bei etwa 10^{-09} m/s und damit um etwa zwei Größenordnungen über denen aus Bereichen ohne Kalksteinbänke (Medianwert). Der geometrische Mittelwert ist wegen der bemerkenswerten Zweigipfligkeit der Häufigkeitsverteilungen beider Stichproben wenig aussagekräftig. Ihre beiden Maxima liegen in jeweils ähnlichen Bereichen, nämlich bei etwa 10^{-12} bis 10^{-11} m/s bzw. etwa 10^{-09} m/s. Bei den k_f-Werten aus Bereichen ohne Kalksteinbänke ist das Maximum mit den niedrigeren k_f-Werten das prägnantere. Es liegt etwa im Bereich der Werte für Ton/Tonstein. Bei den k_f-Werten für Bereiche mit Kalksteinbänken ist dagegen das Häufigkeitsmaximum mit den höheren k_f-Werten prägnanter. Auf die Anteile der k_f-Werte $<10^{-10}$ m/s (Mindestanforderung AkEnd) wirkt sich diese Differenzierung wie folgt aus: Bei den Messwerten aus Gebirgsbereichen ohne Kalksteineinschaltungen beträgt der Anteil 57 %, bei den Werten aus Bereichen mit solchen Einschaltungen dagegen nur 34 %.

Die Zweigipfligkeit beider Verteilungen zeigt, dass nicht alle Testintervalle eindeutig zugeordnet werden konnten: Auch bei Testintervallen ohne Kalksteinbänke wurden teilweise hohe k_f-Werte ermittelt. Andererseits müssen Kalksteinbänke nicht zwangsläufig hohe k_f-Werte liefern. Teilweise überdecken die Testintervalle beide Gesteinstypen. Besonders lange (über 100 m) Intervalle mit Kalksteinbänken können k_f-Werte ähnlich reinen Mergelsteinsequenzen ergeben. Da die Gesamtmächtigkeit der erfassten Kalksteinbänke kleiner ist als die Gesamtmächtigkeit reiner Mergelsteinpar-

tien, werden bei längeren Testintervallen die Eigenschaften reinen Mergelsteins den integralen Durchlässigkeitswert bestimmen.

Kalkstein-bänke	Anzahl Mess-werte	k_f-Werte (m/s)			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
ohne	164	$5{,}00 * 10^{-14}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$1{,}31 * 10^{-10}$	$3{,}25 * 10^{-11}$
mit	35	$8{,}50 * 10^{-14}$	$7{,}00 * 10^{-06}$	$4{,}61 * 10^{-10}$	$1{,}60 * 10^{-09}$
alle	199	$5{,}00 * 10^{-14}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$1{,}63 * 10^{-10}$	$6{,}67 * 10^{-11}$

Tab. 7-32 k_f-Werte für Mergelstein ohne und mit Einschaltungen von Kalksteinbänken im Testintervall

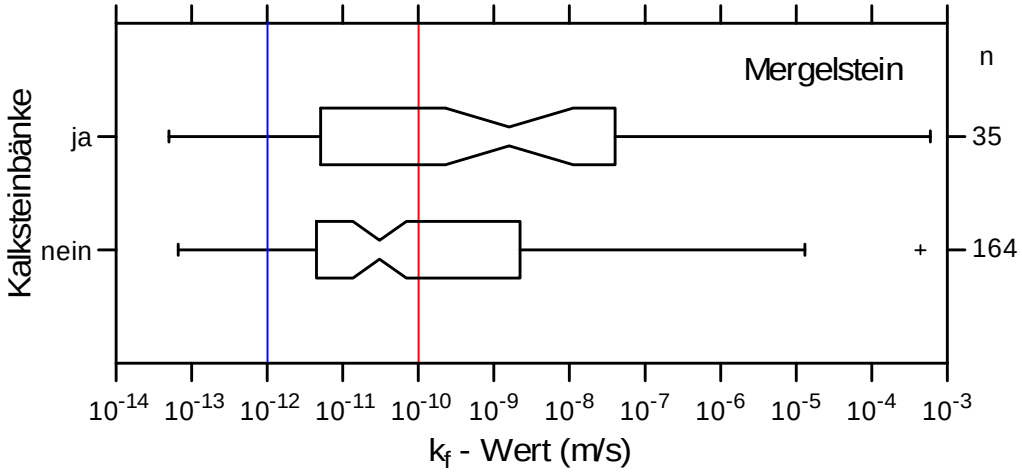


Abb. 7-43 Boxplots der k_f.Werte für Mergelstein, differenziert nach dem Vorhandensein von Kalksteinbänken

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Allein auf Grund der vorliegenden Mergelsteindaten können die Ergebnisse aus dem Untersuchungsgebiet Wellenberg nicht beliebig verallgemeinert werden, da die mit Abstand meisten Daten zu Gebirgsbereichen mit Kalksteinbänken aus diesem Gebiet stammen (28 von 35). Allerdings sind die Wellenbergergebnisse wegen der bekannten Unterschiede zwischen mechanischen Eigenschaften von Mergelstein und Kalkstein einleuchtend. Die Existenz von Kalksteinbänken (oder in ihrer Auswirkung ähnlichen Gesteinstypen) ist bei der Erhebung und Beurteilung von Durchlässigkeitsdaten für Mergelstein auf jeden Fall zu berücksichtigen. Die aus anderen Untersu-

chungsgebieten vorliegenden Daten betreffen weit überwiegend Gebirgsbereiche ohne Einschaltungen von Kalksteinbänken (87),aber nur wenige Bereiche mit Kalksteinbänken (7). Daher stimmen die geometrischen Mittelwerte und Medianwerte der k_f-Werte in den Datensätzen für Mergelstein insgesamt und für das Untersuchungsgebiet Wellenberg nahezu überein (Tab. 7-32 u. 7-31). Die Boxplots in Abb. 7-43 zeigen, dass die resultierenden Unterschiede zwischen den Medianwerten der beiden k_f-Wert-Stichproben ohne und mit Kalksteinbänken und -linsen signifikant sind.

Einflussfaktor Gefüge

Zu Gefügestörungen im Sinne von Kapitel 4.1 liegen nur relativ wenige eindeutige Angaben vor. Wieweit aus dem Fehlen solcher Angaben grundsätzlich auf das Fehlen von wassergängigen Klüften und Störungen geschlossen werden darf, ist unklar. Allerdings liegen die k_f-Werte für gestörte Gebirgsbereiche im Mittel zwei Größenordnungen über den Werten ohne Gefügeangaben (Tab. 7-33). Besonders hohe k_f-Werte (>10^{-05} m/s) haben die Mergelsteine im Untersuchungsgebiet Niedersachsen geliefert (Tab. 7-34).

Gefüge	**Mittl. Testtiefe (m u.G.)**	**n**	**k_f-Werte (m/s)**			
			Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
gestört	15 - 822	26	$1{,}50 * 10^{-13}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$7{,}31 * 10^{-09}$	$3{,}30 * 10^{-09}$
k. A.	70 - 1.855	173	$5{,}00 * 10^{-14}$	$3{,}00 * 10^{-05}$	$9{,}20 * 10^{-11}$	$4{,}15 * 10^{-11}$

Tab. 7-33 k_f-Werte für Mergelstein, differenziert nach den Gefügeklassen "gestört" und "keine Angabe"

k. A.: keine Anhabe
n: Anzahl der Messwerte

Einflussfaktor Untersuchungsgebiet

Die zuvor behandelten Einflussfaktoren haben bei den einzelnen Untersuchungsgebieten für den Hauptgesteinstyp Mergelstein unterschiedliche Bedeutung für die Gebirgsdurchlässigkeit. Nicht bei allen in Tab. 7-34 zusammengestellten Gebieten können die gebietsspezifischen Durchlässigkeitsverhältnisse auf einen bestimmten Einflussfaktor zurückgeführt werden. Gesteine mit besonders hoher Gebirgsdurchlässigkeit finden sich in folgenden Untersuchungsgebieten:

- **Niedersachsen**: Die Messwerte beruhen auf einer kombinierten Auswertung von Pumpversuchen und Flowmeter-Messungen in Tiefen größer als 100 m unter Geländeoberfläche. Angegeben ist jeweils ein mittlerer kf-Wert für alle detektierten Bohrlochzuflüsse einer Bohrung. Er kennzeichnet die Durchlässigkeit der hydrau-

lisch wirksamen Zonen in der getesten Abfolge. Dies erklärt die ungewöhnlich hohen kf-Werte.

- Hoheneggelsen: Die Werte stammen aus einem Lockersediment (quartärzeitlicher Geschiebemergel) mit Sandeinschaltungen. Sie wurden nur aufgenommen, um den deutlichen Unterschied der kf-Werte zu denen von Mergelstein zu dokumentieren.
- Asse: Die k_f-Werte erfassen das Deckgebirge der Salzstruktur Asse in einem Tiefenbereich von 280 bis ca. 900 m unter Geländeoberfläche. Getestet wurden Mergelsteine des Oberen Buntsandstein, des Untereren Muschelkalk und des Mittlereren Muschelkalk. Die höchsten k_f-Werte stammen aus dem Mittleren Muschelkalk (10^{-05} bis 10^{-06} m/s) mit Gips- und Anhydriteinschaltungen sowie Karsthohlräumen.
- **Wellenberg**: Aus diesem Untersuchungsgebiet liegt die größte Anzahl (105) an k_f-Werten für Mergelstein vor. Sie beziehen sich überwiegend die unterkretazische Palfris-Formation. Der Einfluss von Kalksteinbänken und oder gestörtem Gesteinsgefüge auf die Durchlässigkeit wurde gezielt untersucht. Solche Zonen zeigen deutlich höhere Durchlässigkeit als reine bzw. ungestörte Mergelsteinpartien (s. Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen)

Untersuchungs-gebiet	**n**	**Mittlere Testtiefe (m u.G.)**	**kf-Werte (m/s)**			
			Minimal-wert	Maximal-wert	Geometr. Mittelwert	Median-wert
Asse	15	118 - 898	$8{,}50 * 10^{-14}$	$3{,}00 * 10^{-05}$	$3{,}66 * 10^{-10}$	$1{,}00 * 10^{-10}$
Hoheneggelsen *)	2	9 - 16	$1{,}10 * 10^{-06}$	$3{,}10 * 10^{-06}$	$1{,}85 * 10^{-06}$	$2{,}10 * 10^{-06}$
Konrad	49	223 - 914	$6{,}05 * 10^{-12}$	$6{,}60 * 10^{-08}$	$1{,}06 * 10^{-10}$	$3{,}40 * 10^{-11}$
Nieders. Bergl.	6	15 - 98	$5{,}70 * 10^{-05}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$1{,}63 * 10^{-04}$	$1{,}52 * 10^{-04}$
Nordschweiz	6	234 - 1.003	$5{,}00 * 10^{-14}$	$9{,}00 * 10^{-11}$	$1{,}03 * 10^{-12}$	$6{,}50 * 10^{-13}$
Wellenberg	105	71 - 1.856	$9{,}62 * 10^{-14}$	$1{,}30 * 10^{-05}$	$1{,}43 * 10^{-10}$	$3{,}50 * 10^{-10}$
Tournemire	11	235 - 404	$6{,}67 * 10^{-14}$	$3{,}00 * 10^{-11}$	$1{,}01 * 10^{-12}$	$4{,}10 * 10^{-13}$
Meuse/H. Marne	5	406 - 727	$5{,}11 * 10^{-12}$	$1{,}76 * 10^{-08}$	$7{,}82 * 10^{-10}$	$7{,}58 * 10^{-10}$
alle	199	9 - 1.856	$5{,}00 * 10^{-14}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$1{,}63 * 10^{-10}$	$6{,}67 * 10^{-11}$

Tab. 7-34 k_f-Werte für Mergelstein in den einzelnen Untersuchungsgebieten

n: Anzahl Messwerte
*) Hoheneggelsen-Werte gelten für quartärzeitlichen Geschiebemergel, alle anderen für Mergelstein

Niedrige k_f-Werte wurden in folgenden Untersuchungsgebieten bestimmt (Tab. 7-34):

- **Nordschweiz**: An den Bohrungen Riniken und Waiach wurden Mergelsteine bis Kalkmergelsteine aus dem stratigraphischen Bereich Muschelkalk bis Dogger getestet. Die Durchlässigkeit ist, auch bei Kalkmergelsteinen (des Dogger), durchwegs sehr gering (mittlere kf-Werte um 10-12 m/s).
- Tournemire: Die Mergelsteine des Lias im Untersuchungsgebiet Tournemire sind sehr gering durchlässig (mittlere kf-Werte 10-13 - 10-12 m/s) und liegen im Durchlässigkeitsbereich der Tonsteine, mit denen sie vergesellschaftet sind (10-12 m/s, Kapitel 7.2.5).
- Meuse/Haute-Marne: Die Mergelstein des Dogger und Malm (Callovo-Oxfordium) im Grenzbereich der Départements Meuse und Haute-Marne haben mittlere kf-Werte von knapp 10-09 m/s geliefert. Die Durchlässigkeit der benachbarten Tonsteine aus denselben Formationen ist um ca. zwei Größenordnungen geringer (Kapitel 7.2.5).
- Konrad: Die Mergelsteine des Mittelalb und die Mergeltonsteine des Barrême in den Schichten über der ehemaligen Eisenerzgrube Konrad südwestlich von Braunschweig haben einen geometrischen Mittelwert von 10^{-10} m/s (Medianwert gut 10^{-11} m/s) erbracht (s. Einflussfaktor Gesteinszusammensetzung).

Zusammenfassung

Die mit hydraulischen Tests ermittelte Gebirgsdurchlässigkeit von Mergelstein wird generell von der mittleren **Testtiefe** unter Geländeoberfläche bestimmt. Die Gebirgsdurchlässigkeit nimmt generell bis auf eine Tiefe von rund 800 m unter Geländeoberfläche deutlich ab. Die k_f- Werte aus dem Tiefenbereich bis 300 m unter Geländeoberfläche liegen daher im Mittel mit gut 10^{-08} m/s um etwa drei Größenordnungen über denjenigen aus dem Bereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche. Der Anteil der k_f-Werte, die die Mindestanforderung des AkEnd erfüllen nimmt entsprechend zu. In allen Tiefenabschnitten treten allerdings immer auch hohe k_f-Werte auf.

Modifizierend kommen örtlich folgende Einflussfaktoren hinzu:

- Als Mischung aus unterschiedlichen Anteilen von Ton bzw. Tonmineralen und Kalk bzw. Karbonat hat die **Gesteinszusammensetzung** von Mergelstein für die Gebirgsdurchlässigkeit offenbar besonders große Bedeutung. Erhöhte Kalkgehalte führen zu kompetentem Gebirgsverhalten und bei mechanischer Beanspruchung zur Entwicklung wassergängiger Trennfugen mit Durchlässigkeitserhöhung in den kalkreicheren Partien. Für die resultierende Gebirgsdurchlässigkeit ist insbesondere bedeutsam, in welcher Form das Karbonat vorliegt und wie es im Sediment verteilt ist: Lagenweise Anreicherung verursacht trotz insgesamt geringeren Karbonatgehalts höhere Durchlässigkeit als dispers verteiltes Karbonat in größerer Konzentration. Der Unterschied liegt beim hier dargestellten Beispiel aus dem Untersuchungsgebiet Konrad mit Mergelstein des Barrêmium (Kalkanreicherung) und Albium (Kalk dispers verteilt) bei rund zwei Größenordnungen.

- Einsch**altungen von Kalksteinlagen und -linsen** kommen in vielen Mergelsteinserien vor. Die mittlere Gebirgsdurchlässigkeit von Mergelstein mit Kalksteinlagen ist beim hier vor allem betrachteten Beispiel des Untersuchungsgebiets Wellenberg um ca. zwei Größenordnungen höher (10^{-09} m/s) als ohne solche Kalkbänke (10^{-11} m/s). Bei Gesteinen des Barrêmium im Untersuchungsgebiet Konrad ist der Unterschied zwischen Lagen und Linsen mit und ohne Karbonatanreicherung ähnlich. Dabei ist der Karbonatgehalt in den Gesteinsserien ohne lagenweise Anreicherung mit 29-39 % deutlich höher als in den mit Anreicherung (im Mittel um 15 %).
- Gebirgsabschnitte mit "gestörtem" **Gefüge** weisen mit im Mittel 10^{-09} m/s um etwa zwei Größenordnungen höhere k_f-Werte auf als solche, zu denen keine Gefügeangaben vorliegen und die als weitgehend ungestört angesehen werden.

Als Beispiele für die Gebirgsdurchlässigkeit von Mergelstein ohne wesentlichen Einfluss der genannten Faktoren können die Untersuchungsgebiete Tournemire und Nordschweiz gelten. Sie sind durch generell geringe Durchlässigkeit mit k_f-Werten von gut 10^{-13} m/s gekennzeichnet, wie sie in Tiefen von mehreren hundert Metern unter Geländeoberfläche zu erwarten ist. In Abhängigkeit von den örtlichen geologischen Gegebenheiten kann aber die tiefenabhängige Abnahme der Gebirgsdurchlässigkeit durch die genannten Faktoren so überlagert werden, dass bis in größere Tiefe höhere Durchlässigkeit und entsprechend engräumige Durchlässigkeitsunterschiede resultieren.

7.2.7 Sandstein/Tonstein-Wechselfolgen

Bei den Ergebnissen hydraulischer Tests in Gesteinsfolgen aus im Wechsel gering mächtigen Lagen von Sandstein, Siltstein, Tonstein und/oder Mergelstein kann in der Regel nicht zwischen den verschiedenen beteiligten Gesteinstypen unterschieden werden, da die Testintervalle mehrere Schichtglieder überdecken. In die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit wurden einige charakteristische Gesteinsfolgen mit komplexen Wechsellagerungen der genannten Gesteinstypen unter der Bezeichnung Sandstein-/Tonstein-Wechselfolge zusammengefasst.

Zur Veranschaulichung der Unterschiede zu den Durchlässigkeitsdaten der reinen Gesteinstypen werden nachfolgend drei dieser Wechselfolgen kurz behandelt (Tab. 7-35):

- Die Gesteine der **Unteren Süßwassermolasse** des Schweizer mittelländischen Molassebeckens bestehen im Untersuchungsgebiet Burgdorf aus im Wechsel Sandstein-, Siltstein- und Mergelsteinlagen in unterschiedlicher Mächtigkeit. Die Testintervalle reichen bis ca. 200 m unter Geländeoberfläche. Die kf-Werte liegen zwischen etwa 10-09 und gut 10-06 m/s, im Mittel bei gut 10-07 m/s.
- Die fein- bis mittelkörnigen Sandsteine und Siltsteinen mit gering mächtigen Kohleflözen des Oberkarbon im Untersuchungsgebiet Ruhrgebiet haben relativ einheitliche kf-Werte von gut 10-08 m/s erbracht. Die Daten wurden in einer Tiefe um 1.000 m unter Geländeoberfläche erhoben.
- Die Sand- und Tonstein-Folgen des **Permokarbon** im Untersuchungsgebiet **Nordschweiz** haben k_f-Werte zwischen 10^{-12} m/s und gut 10^{-07} m/s. geliefert. Im Mittel lagen die Werte bei etwa 10^{-10} m/s und damit teilweise deutlich unter den Werten aus den beiden anderen Gebieten.

Bei den Werten aus der Untere Süßwassermolasse und aus dem Ruhrkarbon ist eine Abhängigkeit der k_f-Werte von der Tiefe schon allein wegen der geringen Tiefenbandbreite der Messungen nicht zu erkennen (Abb. 7-44). Die k_f-Werte aus der Nordschweiz zeigen dagegen eine deutliche, wenngleich unregelmäßige Abnahme mit der Tiefe. Allerdings können in diesem Gebiet offenbar auch schon in sehr geringer Tiefe niedrige k_f-Werte auftreten, wie der einzelnen Wert von knapp 10^{-11} m/s aus weniger als 200 m Tiefe unter Geländeoberfläche zeigt. Andererseits kommen aber auch in Tiefen über 1.000 m unter Geländeoberfläche noch k_f-Werte $>10^{-08}$ m/s vor. Es ist unklar, wieweit das Bild der tiefenabhängigen der k_f-Werte im Untersuchungsgebiet Nordschweiz (Abb. 7-44) durch die gerige Anzahl von Werte aus großer Tiefe beeinflusst ist.

Da nur aus dem Gebiet Nordschweiz k_f-Werte aus einen größeren Tiefenbereich vorliegen, sind zverlässige Aussagen zur Tiefenabhängigkeit der k_f-Werte bei den Wechselfolgen nicht möglich; denn die Unterschiede zwischen den k_f-Werten der drei Untersuchungsgebiete können auch andere Ursache haben als nur die Tiefe: Zu den

Anteilen der feinkörnigen und gröber körnigen Gesteinstypen an den einzelnen Testabschnitten liegen keine Informationen vor. Dasselbe gilt für das Vorhandensein und die hydraulische Bedeutung etwaigen Bindemittels oder Zements. Fasst man die k_f-Werte aus den drei Untersuchungsgebieten zusammen und betrachtet sie differenziert nach den drei Tiefenbereichen, so nehmen allerdings die mittleren k_f-Werte zwischen den Tiefenbereichen <300 m, 300 bis 1.500 m und >1.500 m unter Geländeoberfläche um eine Größenordnung bzw. zwei Größenordnungen ab (Tab. 7-36). Dabei ist allerdings die geringe Anzahl von Werten aus dem tiefsten Bereich zu beachten.

Untersuchungsgebiet	**n**	**Mittlere Testtiefe (m u.G.)**	**k_f-Werte (m/s)**			
			Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Burgdorf	31	43 - 227	$9{,}00 * 10^{-10}$	$4{,}86 * 10^{-06}$	$3{,}08 * 10^{-07}$	$4{,}20 * 10^{-07}$
Ruhrgebiet	9	1.007	$2{,}30 * 10^{-08}$	$5{,}50 * 10^{-08}$	$3{,}18 * 10^{-08}$	$3{,}10 * 10^{-08}$
Nordschweiz	11	176 - 2.016	$1{,}00 * 10^{-12}$	$3{,}00 * 10^{-07}$	$3{,}63 * 10^{-10}$	$1{,}00 * 10^{-10}$

Tab. 7-35 k_f-Werte für Wechselfolgengesteine in den Untersuchungsgebieten Burgdorf, Ruhrgebiet und Nordschweiz

Tiefenbereich (m u. G.)	**Anzahl Messwerte**	**k_f-Werte (m/s)**			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
<300	32	$1{,}00 * 10^{-11}$	$4{,}86 * 10^{-06}$	$2{,}23 * 10^{-07}$	$3{,}90 * 10^{-07}$
300 - 1.500	16	$6{,}00 * 10^{-11}$	$3{,}00 * 10^{-07}$	$1{,}37 * 10^{-08}$	$3{,}05 * 10^{-08}$
>1.500	3	$1{,}00 * 10^{-12}$	$3{,}00 * 10^{-11}$	$3{,}10 * 10^{-12}$	$1{,}00 * 10^{-12}$

Tab. 7-36 k_f-Werte für Wechselfolgengesteine in den Untersuchungsgebieten Burgdorf, Ruhrgebiet und Nordschweiz, differenziert nach Tiefenbereichen

Vergleicht man die für die Wechselfolgen der drei Untersuchungsgebiete erhobenen k_f-Werte mit denen der "reinen" Gesteinstypen Sandstein, Tonstein und Mergelstein (Kapitel 7.2.4 bis 7.2.6), aus denen sie zusammengesetzt sind, so zeigt sich, dass die Gebirgsdurchlässigkeit offenbar vor allem durch die stärker durchlässige gröbere Komponente (Sandstein) beeinflusst wird. Allerdings ist zu beachten, dass auch bei einigen Untersuchungsgebieten mit Ton/Tonstein hohe k_f-Werte ermittelt worden sind (Kapitel 7.2.5).

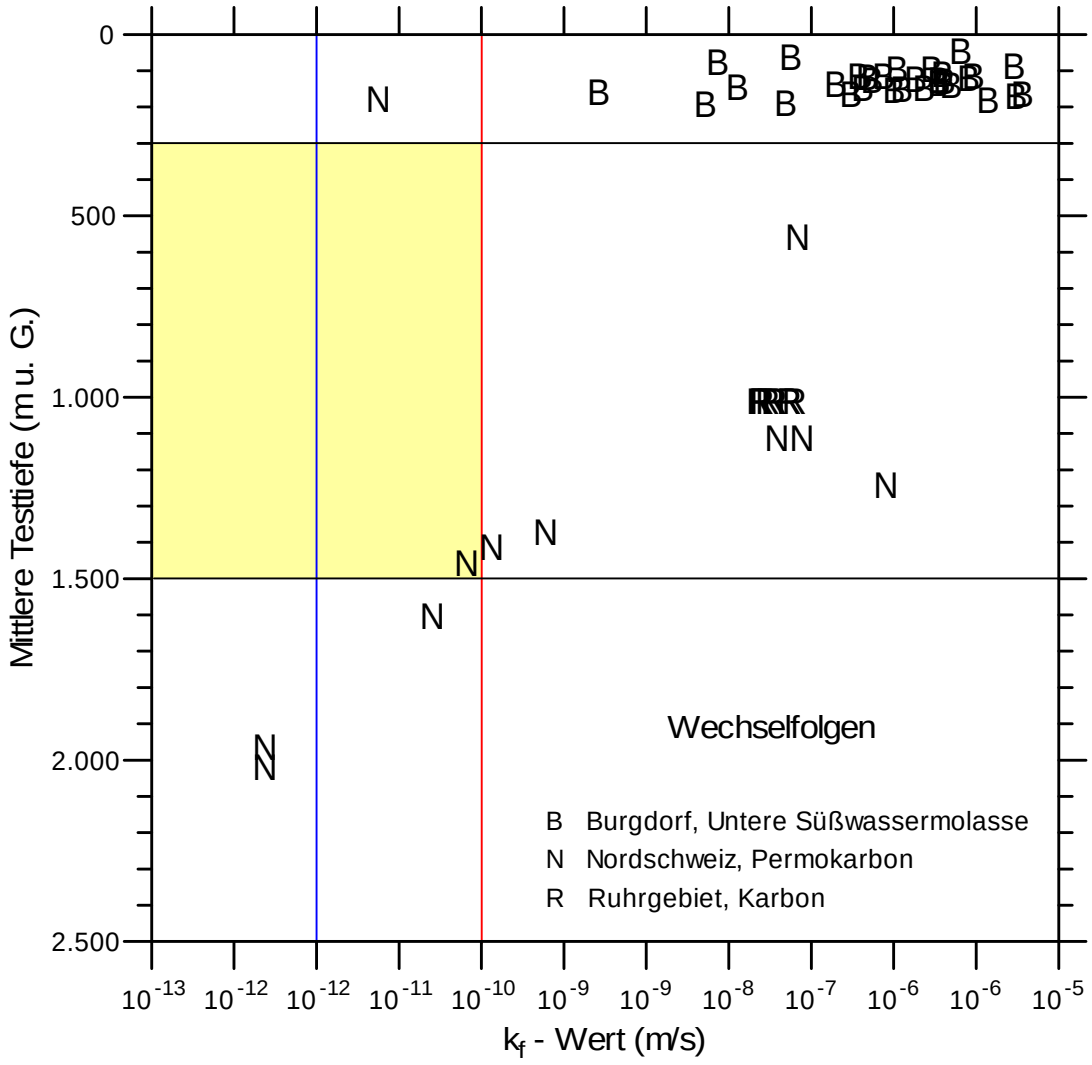


Abb. 7-44 Tiefenverteilung der k_f-Werte für den Gesteinstyp Wechselfolge in den Untersuchungsgebieten Burgdorf, Nordschweiz und Ruhrgebiet

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
horizontale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

7.2.8 Kalkstein

Die k_f-Werte für den Gesteinstyp Kalkstein sind nicht systematisch erhoben und in die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit übernommen worden. Erhebung und Auswertung dienen vielmehr lediglich der Vollständigkeit der Hauptgesteinstypen und ihrem Vergleich. Insgesamt liegen 83 Werte aus den Tiefenbereichen <300 m unter Geländeoberfläche und 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche vor. Die k_f-Werte sind mit im Mittel rund 10^{-07} m/s sehr hoch. Nur 7 % der Werte hält die Mindestanforderung gemäß AkEnd (10^{-10} m/s) ein. Das ist der niedrigste Anteil aller Hauptgesteinstypen.

Einflussfaktor Untersuchungsgebiet

Die k_f-Werte stammen aus sieben Untersuchungsgebieten (Tab. 7-37), in denen jeweils schwerpunktmäßig bestimmte stratgraphische Einheiten untersucht worden sind (hinsichtlich der Abgrenzung der Untersuchungsgebiete Niedersachsen und Asse gelten die Ausführungen in Kapitel 7.2.4.):

- Asse (20 Werte): Muschelkalk,
- Niedersachsen (9 Werte): Trias, vor allem Muschelkalk (auch Malm, Kreide),
- Meuse/Haute Marne (3 Werte): Dogger, Malm,
- Tournemire (8 Werte): Lias und Dogger,
- Nordschweiz (11 Werte): Muschelkalk (auch Malm),
- Schweizer Druckstollen (2 Werte): Mesozoikum,
- Wellenberg (30 Werte): Unterkreide (auch Tertiär).

Da sich die k_f-Werte insgesamt bevorzugt bestimmten stratigraphischen Einheiten zuordnen lassen, wurde geprüft, wieweit die k_f-Werte für diese Einheiten charakteristisch sind. Danach ist eine klare Unterscheidung der k_f-Werte nach der stratigraphischen Einordnung des untersuchten Gebirgsbereichs nicht möglich. Sieht man von den sehr hohen Werten aus dem Untersuchungsgebiet Niedersachsen und den niedrigen aus dem Gebiet Meuse/Haute-Marne ab, sind die k_f-Werte aus den einzelnen Gebieten im Mittel sehr ähnlich (etwa 10^{-07} m/s).

Einflussfaktor Testintervall

Bei gebietsbezogener Betrachtung ist eine (nicht signifikante) Abhängigkeit der k_f-Werte von der Länge des Testintervalls nur bei den Werten aus dem Untersuchungsgebiet Niedersachsen erkennbar. Sie ist undeutlich und weitgehend auf den Zusammenhang zwischen der Testtiefe und der Länge des Testintervalls zurückzuführen. Bei gebietsübergreifender Betrachtung ergibt sich ein undeutlicher Zusammenhang. Er geht vor allem auf die unterschiedlichen Tiefen zurück, aus denen k_f-Werte vorliegen. Danach nehmen die k_f-Werte mit zunehmender Länge des Testin-

tervalls ab. Auf die Beurteilung der Gebirgdurchlässigkeit des Gesteinstyps hat dies keinen Einfluss.

Untersuchungsgebiet	n	Mittlere Testtiefe (m u.G.)	k_f-Werte (m/s)			
			Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Niedersachsen *)	9	31 - 115	$7{,}14 * 10^{-06}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$1{,}09 * 10^{-04}$	$7{,}96 * 10^{-05}$
Tournemire	8	270 - 443	$1{,}20 * 10^{-09}$	$4{,}90 * 10^{-06}$	$1{,}32 * 10^{-07}$	$1{,}10 * 10^{-07}$
Meuse/Haute-M.	3	250 - 800	$1{,}00 * 10^{-10}$	$5{,}50 * 10^{-09}$	$1{,}45 * 10^{-09}$	$5{,}50 * 10^{-09}$
Asse	20	95 - 887	$1{,}00 * 10^{-12}$	$8{,}40 * 10^{-05}$	$4{,}56 * 10^{-08}$	$4{,}90 * 10^{-07}$
Nordschweiz	11	183 - 1.338	$1{,}00 * 10^{-12}$	$2{,}10 * 10^{-06}$	$3{,}51 * 10^{-08}$	$1{,}00 * 10^{-07}$
Wellenberg *)	30	102 - 1.414	$3{,}89 * 10^{-13}$	$1{,}40 * 10^{-04}$	$8{,}45 * 10^{-08}$	$1{,}22 * 10^{-07}$
Schweizer Dr. *)	2	-	$3{,}20 * 10^{-08}$	$3{,}90 * 10^{-07}$	$2{,}11 * 10^{-07}$	$2{,}11 * 10^{-07}$

Tab. 7-37 k_f-Werte für Kalkstein, differenziert nach Untersuchungsgebieten (nach der jeweils höchsten mittleren Testtiefe geordnet)

n: Anzzahl Messwerte
*) Anzahl k_f-Werte nicht identisch mit Anzahl der Tiefenangaben

Einflussfaktor Testtiefe

Die k_f-Werte sind deutlich von der Tiefe abhängig. Nach Abb. 7-45 nehmen sie bis in eine Tiefe von etwa 400 bis 500 m unter Geländeoberfläche deutlich und mehr oder weniger kontinuierlich ab, wobei in jedem Tiefenbereich eine große Wertebandbreite von mehreren Größenordnungen anzutreffen ist. Darunter weisen die k_f-Werte auf Grund der Zunahme niedriger Werte eine Bandbreite von fünf bis sechs Größenordnungen auf, und zwar weitgehend unabhängig von der betrachteten Testtiefe. In der Tiefenverteilung (Abb. 7-47) drückt sich dieser Zusammenhang darin aus, dass sich die Datenpunktwolke der k_f-Werte mit zunehmender Tiefe in Richtung auf niedrige k_f-Werte trichterartig aufweitet. Mit zunehmender Tiefe wird die Bandbreite der Werte dadurch zwar größer, doch treten immer auch hohe k_f-Werte auf, und zwar über den gesamten Tiefenbereich Werte über 10^{-08} m/s.

Diese Tiefenabnahme der k_f-Werte schlägt sich auch in deutlichen Unterschieden der mittleren k_f-Werte der Tiefenbereiche <300 und 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche nieder. Die Werte aus dem flacheren Bereich sind mit etwa $5 * 10^{-06}$ m/s um rund drei Größenordnungen höher als die aus größerer Tiefe (Tab. 7-38). Der Anteil der k_f-Werte, die der Mindetanforderung des AkEnd entsprechen, ist demgemäß mit nur 16 % sehr niedrig. Das ist nach Sandstein der niedrigste Anteil der untersuchten Gesteinstypen.

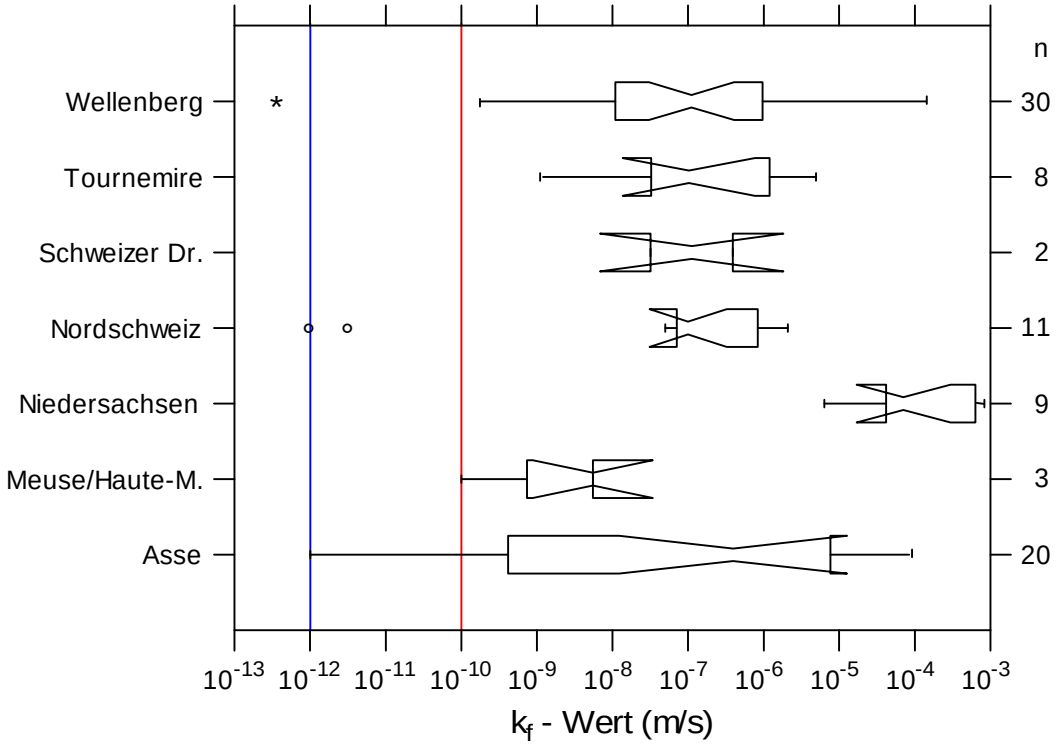


Abb. 7-45 Boxplots der k_f-Werte für Kalkstein aus den einzelnen Untersuchungsgebieten

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Tiefenbereich (m u. G.)	**Anzahl Messwerte**	**k_f-Werte (m/s)**			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
<300	28	$1{,}20 * 10^{-09}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$4{,}51 * 10^{-06}$	$5{,}90 * 10^{-06}$
300 - 1.500	37	$3{,}89 * 10^{-13}$	$1{,}00 * 10^{-05}$	$3{,}70 * 10^{-09}$	$5{,}77 * 10^{-09}$
>1.500	-	-	-	-	-
alle *)	83	$3{,}89 * 10^{-13}$	$1{,}00 * 10^{-03}$	$1{,}28 * 10^{-07}$	$2{,}20 * 10^{-07}$

Tab. 7-38 k_f-Werte des Gesteinstyps Kalkstein, differenziert nach Tiefenbereichen

*) einschließliche 18 Werten ohne Tiefenabgabe

Einflussfaktor Gefüge

Informationen über Gefügestörungen im Sinne von Kapitel 4.1 liegen zu den k_f-Werten für Kalkstein nicht vor. Generell gilt aber für Kalkstein, dass das durchflusswirksame Hohlraumvolumen weitestgehend an Klüfte und andere Trennfugen ge-

bunden ist. Die Trennfugen können durch Verkarstungsvorgänge sogar bis in größere Tiefe aufgeweitet sein. Auch ohne Gefügeinformationen darf daher davon ausgegangen werden, dass insbesondere die sehr hohen k_f-Werte an Kluftzonen gebunden sind.

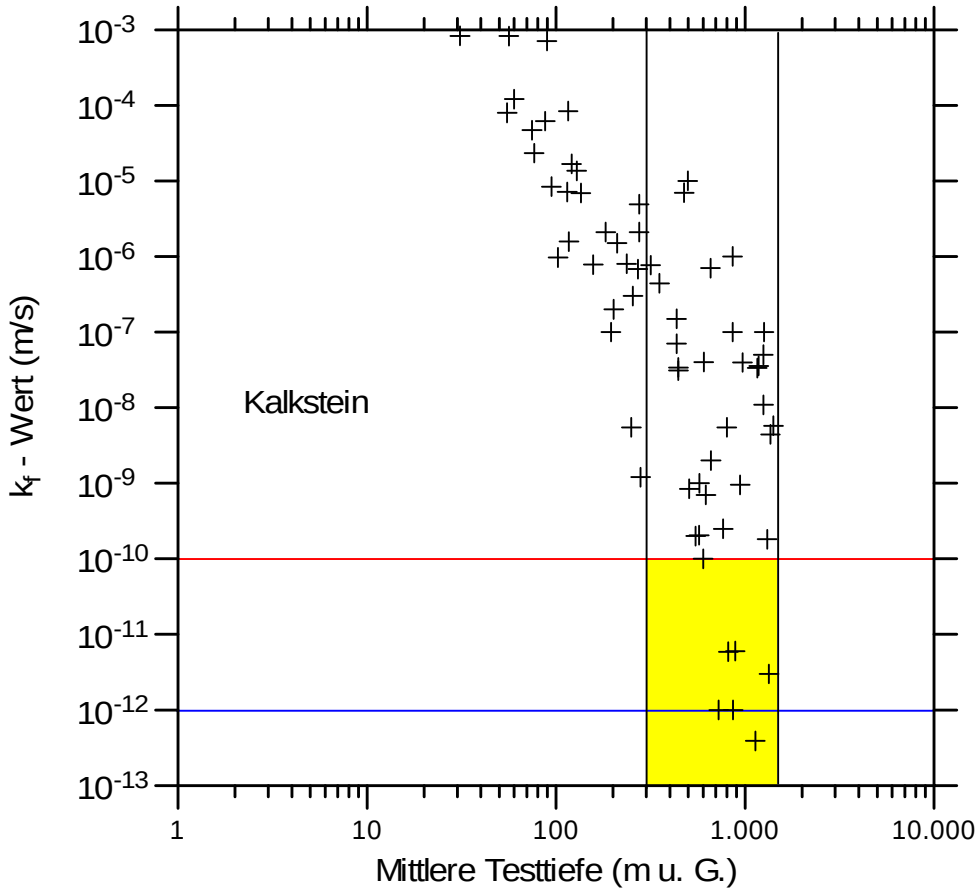


Abb. 7-46 k_f-Werte für Kalkstein in Abhängigkeit von der Tiefe

horizontale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Zusammenfassung

Die Gebirgsdurchlässigkeit von Kalkstein gehört mit k_f-Werten von etwa 10^{-07} m/s für Medianwert und geometrischen Mittelwert zu den höchsten der betrachten Hauptgesteinstypen. Dies äußert sich auch in besonders geringen Anteilen von k_f-Werten unterhalb der Mindestanforderung des AkEnd. Im Tiefenbereich <300 m unter Geländeoberfläche liegen die k_f-Werte im Mittel um rund drei Größenordnungen über denen aus größerer Tiefe. Mit zunehmender Tiefe nimmt lediglich der Anteil niedriger

k_f-Werte zu. Über den gesamten betrachteten Tiefenbereich treten immer aber auch hohe k_f-Werte auf.

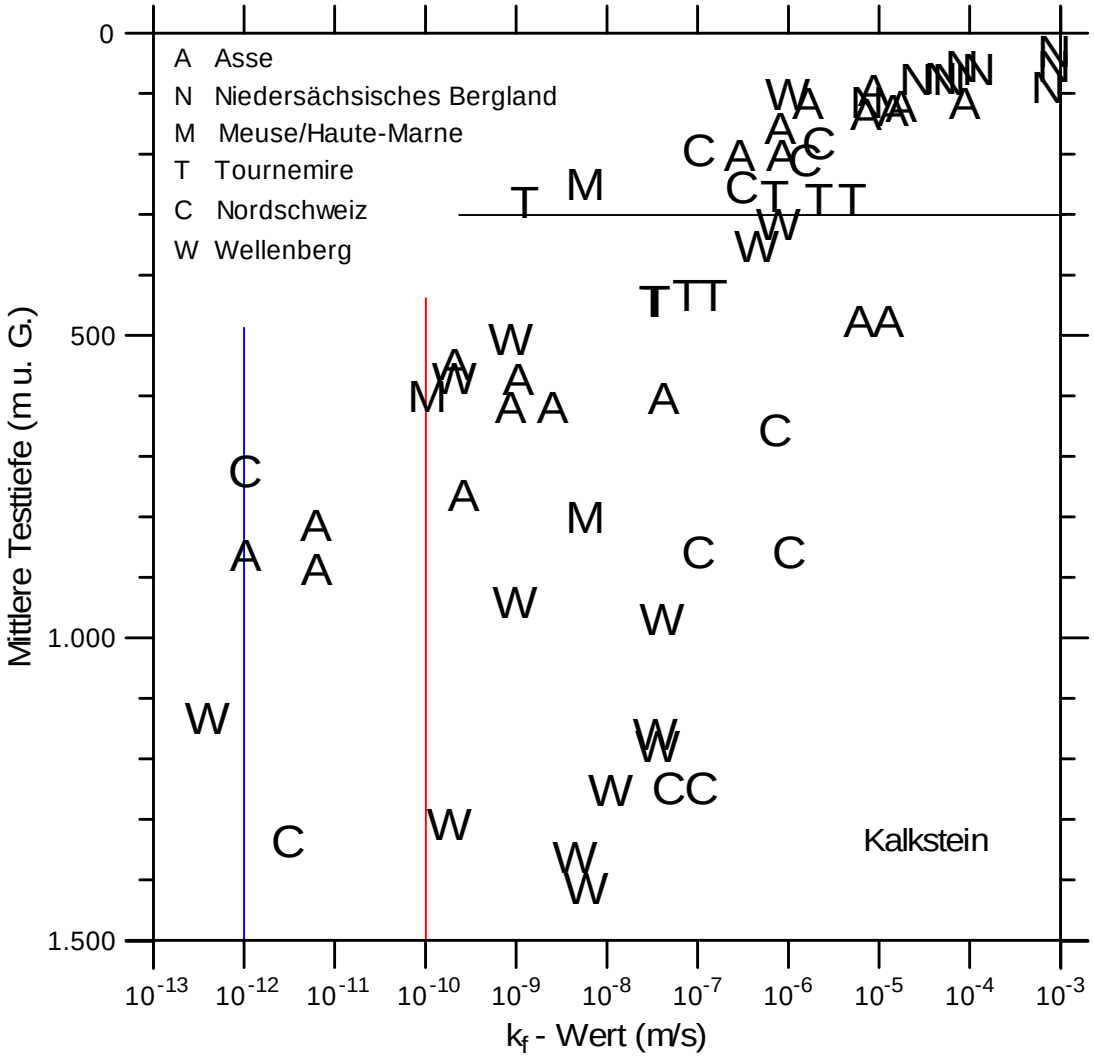


Abb. 7-47 Tiefenverteilung der k_f-Werte für Kalkstein, differenziert nach Untersuchungsgebieten

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
horizontale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

7.2.9 Anhydrit

In-situ-Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit von Anhydrit (petrographisch korrekt: Anhydritstein) sind nicht systematisch, sondern lediglich zum Vergleich mit den anderen Gesteinstypen aufgenommen und ausgewertet worden. Die erfassten 70 k_f-Werte stammen aus nur zwei Untersuchungsgebieten, Morsleben und WIPP (Waste Isolation Pilot Plant). 67 Werte sind im Untersuchungsgebiet Morsleben im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) erhoben worden (Kapitel 7.2.10).

Die k_f-Werte liegen im Mittel (Medianwert und geometrischer Mittelwert) bei gut 10^{-12} m/s (Tab. 7-1 u. 7-39), der Maximalwert allerdings bei 10^{-06} m/s. 74 % der Werte erfüllen die Mindestanforderung des AkEnd ($<10^{-10}$ m/s). Das ist nach Steinsalz der zweithöchste Anteil aller Gesteinstypen (Tab. 7-12).

Einflussfaktor Untersuchungsgebiet

Die Anhydrit-Daten aus dem Untersuchungsgebiet Morsleben stammen aus der Staßfurt-Serie des Zechstein. Die getesteten Bereiche sind teilweise eng mit Steinsalz vergesellschaftet. Die Werte aus dem Gebiet WIPP stammen aus der Rustler-Formation des . Sieht man vom großen Unterschied in der Anzahl der aus den beiden Untersuchungsgebieten Morsleben und WIPP vorliegenden k_f-Werte ab, unterscheiden sich die k_f-Werte aus beiden Gebieten vor allem im Maximalwert. Der für das Untersuchungsgebiet Morsleben liegt um drei Größenordnungen über dem aus dem Gebiet WIPP (Tab. 7-39) Es ist aus den vorliegenden Daten nicht ableitbar, ob die Ursachen dafür in der uneinheitlichen Datenbasis oder aber in den Besonderheiten eines der beiden Gebiete liegen (s. aber Einflussfaktor Gefüge).

Untersuchungsgebiet	n	Mittlere Testtiefe (m u.G.)	k_f-Werte (m/s)			
			Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Morsleben	67	387, 506	$1{,}96 * 10^{-14}$	$1{,}96 * 10^{-06}$	$6{,}95 * 10^{-12}$	$1{,}96 * 10^{-12}$
WIPP	3	200, 1.000	$3{,}47 * 10^{-14}$	$1{,}00 * 10^{-09}$	$5{,}60 * 10^{-12}$	$5{,}05 * 10^{-12}$
alle	70	200 - 1.000	$1{,}96 * 10^{-14}$	$1{,}96 * 10^{-06}$	$6{,}89 * 10^{-12}$	$1{,}96 * 10^{-12}$

Tab. 7-39 k_f-Werte für Anhydrit aus den Untersuchungsgebieten Morsleben und WIPP

Einflussfaktor Gefüge

Informationen zu Gefügestörugen mit möglicherweise durchlässigkeitserhöhender Auswirkung liegen zu den Anhydrit-Daten nicht vor. Zweifellos ist die Durchlässigkeit weit überwiegend an Trennfugen gebunden. Auf Grund des hohen Durchbauungs-

grades des Gebirges im Endlagerbergwerk Morsleben (Kapitel 7.2.10) kann bei den Daten aus dem Untersuchungsgebiet Morsleben nicht ausgeschlossen werden, dass bei den Untersuchungen makroskopisch nicht erkennbare aufgelockerte Gebirgszonen (mit)getestet worden sind. Möglicherweise erklären sich so der hohe Maximalwert und die daraus resultierende große Wertebandbreite der k_f-Werte aus diesem Gebiet (Tab. 7-39 u. Abb. 7-48).

Einflussfaktor Testtiefe

Die weitaus meisten k_f-Werte für Anhydrit, nämlich 68 von 70, stammt aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche. Die statistischen Kennwerte der k_f-Wert-Verteilung für die die Tiefenbereiche <300 und 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche sind daher nahezu identisch (Tab. 7-1 u. 7-40). Die weit überwiegende Anzahl der k_f-Werte wurde von 387-m-Sohle des Bergwerks Morsleben aus erhoben und stammt daher aus weitgehend einheitlicher Tiefe. Zwei weitere Werte stammen aus 200 m Tiefe (Untersuchungsgebiet WIPP), vier weitere von der 506-m-Sohle des Bergwerks Morsleben. Aussagen zum Einfluss der Testtiefe auf die Gebirgsdurchlässigkeit sind auf dieser Basis nicht möglich. Aus der Tiefenverteilung der k_f-Werte in Abb. 7-48 geht ein solcher Einfluss auch nicht hervor.

Tiefenbereich (m u. G.)	**Anzahl Mess-werte**	**k_f-Werte (m/s)**			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
<300	2	$5{,}05 * 10^{-12}$	$1{,}00 * 10^{-09}$	$7{,}11 * 10^{-11}$	$5{,}03 * 10^{-10}$
300 - 1.500	68	$1{,}96 * 10^{-14}$	$1{,}96 * 10^{-06}$	$6{,}43 * 10^{-12}$	$1{,}96 * 10^{-12}$
>1.500	-	-	-	-	-
alle	70	$1{,}96 * 10^{-14}$	$1{,}96 * 10^{-06}$	$6{,}89 * 10^{-12}$	$1{,}96 * 10^{-12}$

Tab. 7-40 k_f-Werte für Anhydrit, differenziert nach Tiefenbereichen

Zusammenfassung

Für den Hauptgesteinstyp Anhydrit liegen insgesamt 70 k_f-Werte aus nur zwei Untersuchungsgebieten und weit überwiegend aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche vor. Rund drei Viertel der Werte erfüllen die Mindestanforderung an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gemäß AkEnd ($<10^{-10}$ m/s). Damit gehört Anhydrit zu den Hauptgesteinstypen mit den im Mittel niedrigsten k_f-Werten (gut 10^{-12} m/s). Gemessen daran ist der Maximalwert recht hoch. Er deutet darauf hin, dass bei entsprechender mechanischer Beanspruchung wassergängige Trennfugen entstehen. Eine differenzierte, gar quantitative Bewertung des Gebirgsdurchlässigkeit von Anhydrit ist auf Grundlage der vorhandenen Daten nicht möglich.

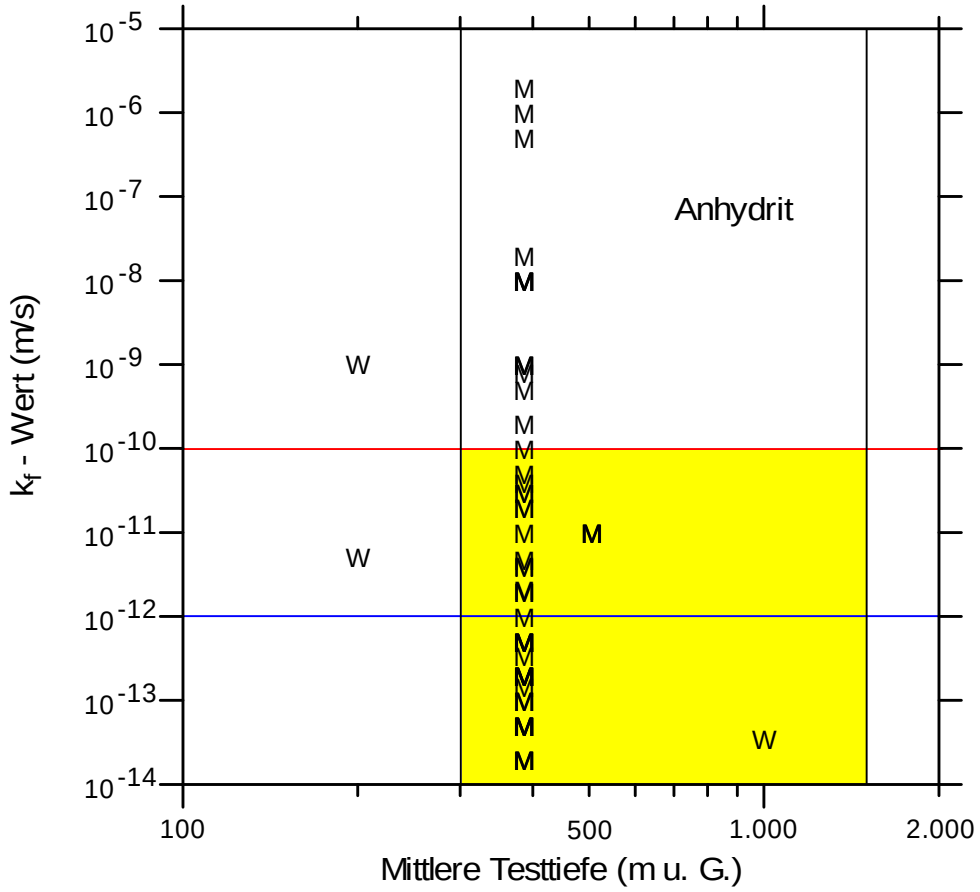


Abb. 7-48 k_f-Werte für Anhydrit in Abhängigkeit von der Tiefe

horizontale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
vertikale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

7.2.10 Steinsalz

Die an Steinsalz gemessenen In-situ-Durchlässigkeiten stammen aus drei Untersuchungsgebieten (Morsleben, Gorleben, WIPP), und zwar aus mindestens 300 m Tiefe unter Geländeoberfläche. Sie beziehen sich auf reines Steinsalz ohne mächtigere Einschaltungen von Anhydrit oder andere Nebengesteinstypen, z. B. Salzton.

Die k_f-Werte liegen zwischen etwa 10^{-16} und 10^{-10} m/s, im Mittel (Medianwert, geometrischer Mittelwert) bei gut $5 * 10^{-14}$ m/s (Tab. 7-1 u- 7-41). Sie sind in Bezug auf die erhobenen Extremwerte, die Bandbreite der Werte und die Mittelwerte (Medianwert, geometrischer Mittelwert) die niedrigsten aller betrachteten Hauptgesteinstypen. Entsprechend hoch ist der Anteil derjenigen k_f-Werte, die die Mindestanforderung des AkEnd von 10^{-10} m/s erfüllen, nämlich 99 %. Dieses Ergebnis bestätigt die aus zahlreichen Untersuchungen belegte geringe Permeabilität des in größerer Tiefe

Einflussfaktor Untersuchungsgebiet

Bei den Untersuchungsgebieten Morsleben und Gorleben (Deutschland) bzw. WIPP (Waste Isolation Pilot Plant, New Mexico, USA) sind die untersuchten Steinsalzkörper sehr unterschiedlich ausgebildet:

- In der Salzstruktur Allertal sind gefaltete Gesteine der Staßfurt-Serie des Zechstein im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) getestet worden. Dabei wurden neben reinen Steinsalzpartien auch solche mit unterschiedlichen Anteilen von Anhydrit und (vereinzelt) Salzton in den Testabschnitten untersucht. Die Daten stammen überwiegend aus 387 m Tiefe, zwei Werte aus bzw. 506 m Tiefe unter Geländeoberfläche. Im Bergwerk Morsleben ist in großem Ausmaß früher Kali- und Steinsalz gewonnen worden. Das Grubengebäude weist daher einen hohen Durchbauungsgrad auf.
- Die Daten aus dem Salzstock Gorleben (Erkundungsbergwerk) beziehen sich vor allem auf Steinsalz (nachgeordnet Carnallitit) der Staßfurt-Serie des Zechstein. Einige Werte kennzeichnen die Leine-Serie. Die Gesteine sind in der Untersuchungstiefe von 840 m unter Geländeoberfläche isoklinal gefaltet und stehen teilweise saiger. Sie sind engräumig untersucht worden.
- Im Untersuchungsgebiet WIPP (Waste Isolation Pilot Plant, USA, New Mexico) sind flach lagernde Steinsalz-Schichten in 300 bzw. 500 m Tiefe unter Geländeoberfläche untersucht worden. Die getesteten Gebirgsabschnitte sind Teil der permischen Salado-Formation des Delaware Beckens.

Trotz dieser Unterschiede sind die Testergebnisse aus den drei Untersuchungsgebieten mit k_f-Werten von im Mittel 10^{-12} bis 10^{-13} m/s recht ähnlich (Tab. 7-41) und deutlich niedriger als die Werte anderer Gesteinstypen (Tab. 7-1). Beim Untersuchungsgebiet Morsleben fällt allerdings die im Vergleich mit den beiden anderen Gebieten größere Bandbreite der k_f-Werte mit niedrigerem Minimalwert und höherem Maximalwert auf. Wahrscheinlich ist dies auf die größere Anzahl von Messwerten

und die größere Variabilität der untersuchten Gesteine zurückzuführen. Wegen des hohen Durchbauungsgrades können auch in ungestört erscheinendem Gesteinsverband erhöhte k_f-Werte auftreten.

Untersuchungsgebiet	Anzahl Messwerte	k_f-Werte (m/s)			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Morsleben	63	$9{,}81 * 10^{-17}$	$2{,}94 * 10^{-10}$	$5{,}81 * 10^{-14}$	$4{,}90 * 10^{-14}$
Gorleben	10	$1{,}20 * 10^{-14}$	$6{,}00 * 10^{-13}$	$8{,}30 * 10^{-14}$	$1{,}20 * 10^{-13}$
WIPP	2	$5{,}50 * 10^{-14}$	$3{,}00 * 10^{-12}$	$1{,}53 * 10^{-12}$	$1{,}53 * 10^{-12}$
alle	75	$9{,}81 * 10^{-17}$	$2{,}94 * 10^{-10}$	$6{,}41 * 10^{-14}$	$5{,}50 * 10^{-14}$

Tab. 7-41 k_f-Werte für Steinsalz in den Untersuchungsgebieten Morsleben und Gorleben (Deutschland) sowie WIPP (Waste Isolation Plant, USA)

Einflussfaktor Länge Testintervall

Die k_f-Wert-Bestimmungen sind mit weitgehend einheitlichen Testintervallen durchgeführt worden. Eine Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit von der Länge des Testintervalls ist daher nicht zu beobachten.

Einflussfaktor Tiefe

Da die k_f-Werte aus den drei Untersuchungsgebieten jeweils nur aus einem oder zwei engen Tiefenbereichen stammen, sind verlässliche Aussagen zur Tiefenabhängigkeit nicht möglich (Abb. 7-49). Im Untersuchungsgebiet Morsleben wurden die höchsten k_f-Werte bemerkenswerterweise in der größeren Untersuchungstiefe (506-m-Sohle) bestimmt. Dieser Sachverhalt ist nicht mit einer tiefenabhängigen Zunahme der Gebirgsdurchlässigkeit zu erklären, sondern hat seine Ursache wahrscheinlich in örtlichen geologischen oder bergbaulichen Gegebenheiten.

Einflussfaktor Vergesellschaftung mit anderen Gesteinstypen

In Salzstrukturen können Steinsalz und damit vergesellschaftete Gesteinstypen mit anderen mechanischen und daher auch hydraulischen Eigenschaften auf Grund der halokinetischen bzw. halotektonischen Strukturentwicklung engräumig miteinander verfalltet sein. Durchhaltende Stränge solcher Gesteinskörper, z. B. aus geklüftetem Anhydrit, können unter ungünstigen Verhältnisse Zutrittswege für Lauge in ein Endlager und Austrittspfade für belastete Lauge aus dem Endlager darstellen. Daher ist die Nähe zu solchen Gesteinsvorkommen zu meiden. Die Notwendigkeit dazu illustrieren Tab. 7-42 und Abb. 7-50.

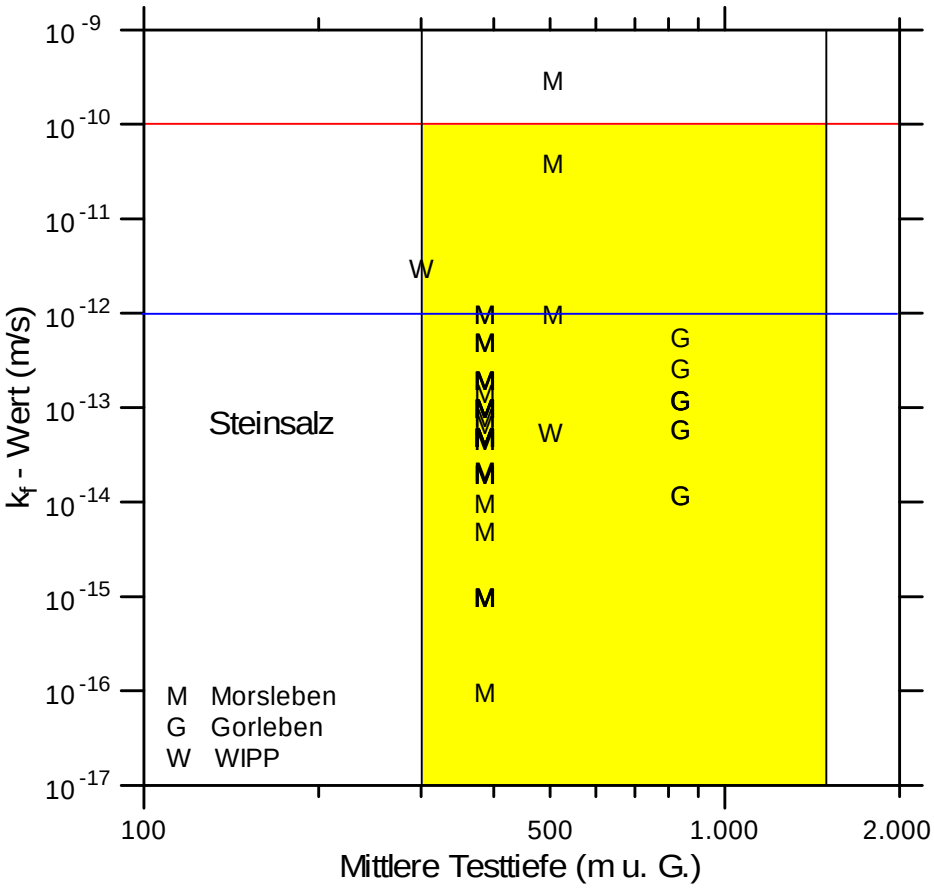


Abb. 7-49 k_f-Werte für Steinsalz in Abhängigkeit von der Tiefe

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)
horizontale Linien bei 300 und 1.500 m u. G.: Grenzen des für die Endlagerung in Frage kommenden Tiefenbereichs (Kapitel 6.2.3)

Zwar stimmen die niedrigsten k_f-Werte für Steinsalz mit Anhydriteinschaltungen und für reines Steinsalz überein, Medianwert und geometrischer Mittelwert für Steinsalz mit Anhydriteinschaltungen entsprechen dagegen den jeweiligen Werten für reinen Anhydrit. Die Boxplots der k_f-Werte für reines Steinsalz, Steinsalz mit Anhydriteinschaltungen und reinen Anhydrit machen den starken Einfluss solcher Einschaltungen auf die Gebirgsdurchlässigkeit deutlich. Der Medianwert der k_f-Werte für reines Steinsalz unterscheidet sich signifikant von denen für Anhydrit und für Steinsalz mit Anhydriteinschaltungen, während die Medianwerte für die beiden letztgenannten Gesteinstypen fast exakt übereinstimmen. Die Anhydrit-Komponente in Steinsalz-Anhydrit-Gesteinsfolgen bestimmt also offensichtlich die Gebirgsdurchlässigkeit.

Gesteinstyp	**n**	**k_f-Werte (m/s)**

		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Steinsalz	75	$9{,}81 * 10^{-17}$	$2{,}94 * 10^{-10}$	$6{,}41 * 10^{-14}$	$5{,}50 * 10^{-14}$
Steinsalz+Anhydrit	22	$9{,}81 * 10^{-17}$	$3{,}92 * 10^{-08}$	$1{,}58 * 10^{-12}$	$2{,}45 * 10^{-12}$
Anhydrit	70	$1{,}96 * 10^{-14}$	$1{,}96 * 10^{-06}$	$6{,}89 * 10^{-12}$	$1{,}96 * 10^{-12}$

Tab. 7-42 k_f-Werte für Steinsalz, Steinsalz mit Anhydritbeimengungen bzw. -einschaltungen und Anhydrit

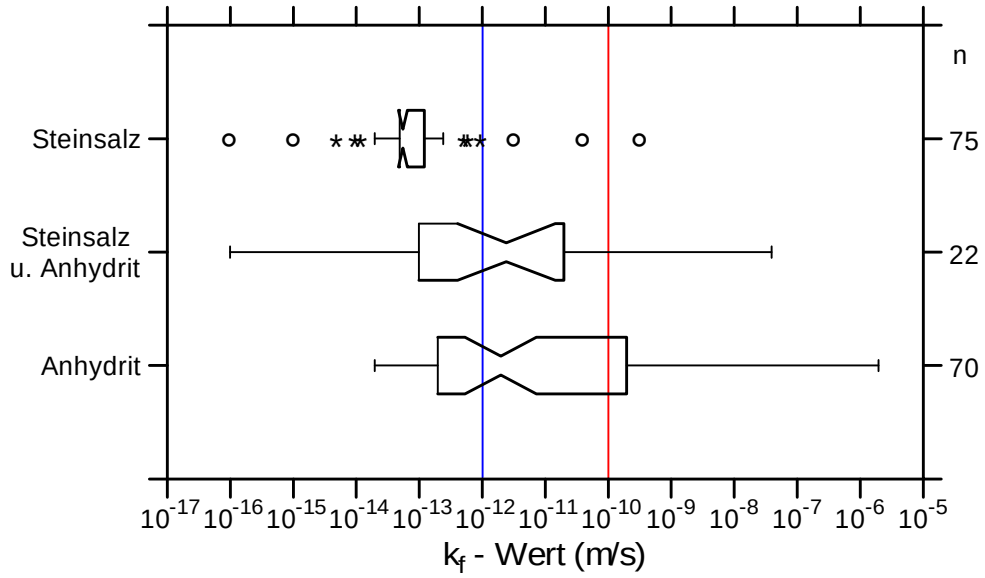


Abb. 7-50 Boxplots mit den k_f-Werten für weitgehend reines Steinsalz und reinen Anhydrit sowie Steinsalz mit Beimenungen von Anhydrit

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Zusammenfassung

Die Steinsalzdaten stammen fast ausschließlich aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche. Bezogen auf die Daten der anderen Gesteinstypen aus diesem Bereich weist Steinsalz die im Mittel geringste Gebirgsdurchlässigkeit auf: Medianwert und geometrischer Mittelwert der k_f-Werte liegen mit ca. 10^{-14} m/s etwa eine Größenordnung unter denen von Ton/Tonstein und um mehrerer Größenordnungen unter denen anderer Gesteinstypen. Die Bandbreite der Werte ist vergleichsweise gering.

Kritischer Faktor im Hinblick auf die Gebirgsdurchlässigkeit ist die Vergesellschaftung von Steinsalz mit geklüftetem Anhydrit (oder anderen klüftigen Gesteinen); denn Ein-

schaltungen solcher Gesteinstypen verursachen eine deutliche Erhöhung der k_f-Werte.

8 Auswertung Spezifischer Speicherkoeffizient

Die In-situ-Bestimmung des effektiven Hohlraumvolumens von Gesteinskörpern ist mit erheblichen methodischen Problemen verbunden und wird daher nur in Ausnahmefällen, und zwar im Zusammenhang mit besonderen Fragestellungen durchgeführt. Soweit Angaben dazu für die Berechnung hydraulischer Größen, insbesondere der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers, benötigt werden, beruhen sie auf Analogieschlüssen oder den Ergebnissen von Laboruntersuchungen oder werden aus Bohrlochmessungen abgeleitet. Zu dem für die Beurteilung der Grundwassergeschwindigkeit wichtigen Parameter durchflusswirksames Hohlraumvolumen (bzw. effektive Porosität) liegen aus diesem Grund keine Ergebnisse von In-situ-Untersuchungen vor. Für die Ableitung eines Kriteriums zur Beurteilung des effektiven Hohlraumvolumens von Gesteinskörpern bei der Standortsuche wurde daher ausgehend von den Ausführunegn in Kapitel 2.2 geprüft, ob ersatzweise der Spezifische Speicherkoeffizient S_s als Parameter für die Beurteilung des effektiven Hohlraumvolumens in Frage kommt.

Die Datenlage zu den verschiedenen Gesteinstypen erwies sich für diesen und die anderen auf das Porenvolumen bezogenen Parameter sehr heterogen, und zwar sowohl hinsichtlich der Gesamtzahl der jeweils vorliegenden Werte als auch hinsichtlich ihrer Tiefenverteilung und Herkunft aus verschiedenen Untersuchungsgebieten (Tab. 5-3):

Von den hier besonders interessierenden Gesteinstypen liegen nur zu Gneis und Granit zahlenmäßig aussagekräftige Datensätze vor. Sie stammen allerdings aus nur drei bzw. zwei Untersuchungsgebieten. Deutliche Einschränkungen hinsichtlich der Anzahl der Werte bestehen bei Tuff/Tuffit, Sandstein, Ton/Tonstein, Mergelstein und Kalkstein. Zu Anhydrit und Steinsalz liegen keine Werte vor.

Auf dieser Basis ist die zuverlässige Ableitung eines Kriteriums zum durchflusswirksamen Hohlraumvolumen nicht möglich. Zudem ist es nicht möglich, eine quantitative Beziehung zwischen Spezifischem Speicherkoeffizienten und effektiver Porosität herzustellen. Dasselbe gilt angesichts der schwachen Korrelation zwischen den Parametern (Tab. 7-4) auch für die Beziehung zwischen Gebirgsdurchlässigkeit (k_f-Wert) und Spezifischem Speicherkoeffizienten. Nur beim Gesteinstyp Granit ist eine deutlichere Korrelation zwischen beiden Größen erkennbar (Pearson-Korrelationskoeffizient: 0,506). Immerhin zeigen die Boxplots mit den Verteilungen der S_s-Werte bei näherer Betrachtung einige plausible Zusammenhänge (Abb. 8-1).

Gesteinstyp	n	Min	Max	Md	*MW*	*VI-95$_{un}$*	*VI-95$_{ob}$*	*SD*	*Sf*	*K*
gesamte Datenbasis										
Gneis	144	$8{,}10 * 10^{-09}$	$3{,}65 * 10^{-06}$	$2{,}10 * 10^{-07}$	$9{,}65 * 10^{-08}$	$7{,}58 * 10^{-08}$	$1{,}23 * 10^{-07}$	4,33	0,51	-0,51
Granit	223	$1{,}49 * 10^{-09}$	$5{,}00 * 10^{-04}$	$7{,}53 * 10^{-07}$	$7{,}50 * 10^{-07}$	$5{,}89 * 10^{-07}$	$9{,}55 * 10^{-07}$	6,24	0,22	0,27
Tuff/Tuffit	5	$7{,}25 * 10^{-09}$	$1{,}65 * 10^{-05}$	$8{,}91 * 10^{-07}$	$3{,}63 * 10^{-07}$	$5{,}17 * 10^{-09}$	$2{,}55 * 10^{-05}$	$3{,}07 * 10^{01}$	-0,24	-2,64
Sandstein	20	$8{,}60 * 10^{-08}$	$9{,}40 * 10^{-06}$	$1{,}50 * 10^{-06}$	$9{,}95 * 10^{-07}$	$5{,}37 * 10^{-07}$	$1{,}84 * 10^{-06}$	3,73	-0,58	0,12
Ton/Tonstein	25	$1{,}42 * 10^{-08}$	$2{,}40 * 10^{-05}$	$1{,}30 * 10^{-06}$	$1{,}11 * 10^{-06}$	$4{,}49 * 10^{-07}$	$2{,}73 * 10^{-06}$	8,89	-0,37	-0,92
Mergelstein	14	$4{,}76 * 10^{-09}$	$3{,}30 * 10^{-06}$	$4{,}54 * 10^{-07}$	$2{,}49 * 10^{-07}$	$1{,}03 * 10^{-07}$	$6{,}01 * 10^{-07}$	4,60	-1,15	2,87
Kalkstein	9	$8{,}60 * 10^{-08}$	$6{,}20 * 10^{-05}$	$3{,}90 * 10^{-07}$	$9{,}91 * 10^{-07}$	$1{,}24 * 10^{-07}$	$7{,}91 * 10^{-06}$	$1{,}49 * 10^{01}$	0,83	-1,04
300 - 1.500 m unter Geländeoberfläche										
Gneis	113	$2{,}10 * 10^{-08}$	$3{,}65 * 10^{-06}$	$4{,}35 * 10^{-08}$	$2{,}28 * 10^{-07}$	$6{,}24 * 10^{-08}$	$1{,}04 * 10^{-07}$	3,90	0,55	-0,54
Granit	184	$1{,}49 * 10^{-09}$	$5{,}00 * 10^{-04}$	$1{,}03 * 10^{-06}$	$6{,}86 * 10^{-06}$	$7{,}68 * 10^{-07}$	$1{,}30 * 10^{-06}$	6,17	0,00	0,61
Tuff/Tuffit	3	$8{,}91 * 10^{-07}$	$1{,}65 * 10^{-05}$	$4{,}07 * 10^{-06}$	$7{,}15 * 10^{-06}$	$1{,}04 * 10^{-07}$	$1{,}47 * 10^{-04}$	4,31	-	-
Sandstein	15	$8{,}60 * 10^{-08}$	$9{,}40 * 10^{-06}$	$1{,}50 * 10^{-06}$	$2{,}29 * 10^{-06}$	$5{,}09 * 10^{-07}$	$2{,}52 * 10^{-06}$	4,24	-0,82	0,24
Ton/Tonstein	14	$1{,}42 * 10^{-08}$	$7{,}10 * 10^{-06}$	$1{,}04 * 10^{-06}$	$1{,}70 * 10^{-06}$	$2{,}29 * 10^{-07}$	$1{,}89 * 10^{-06}$	6,21	-0,99	0,32
Mergelstein	13	$4{,}76 * 10^{-09}$	$3{,}30 * 10^{-06}$	$4{,}40 * 10^{-07}$	$5{,}52 * 10^{-07}$	$9{,}12 * 10^{-08}$	$6{,}11 * 10^{-07}$	4,83	-1,03	2,53
Kalkstein	5	$1{,}00 * 10^{-07}$	$6{,}20 * 10^{-05}$	$3{,}90 * 10^{-07}$	$2{,}49 * 10^{-05}$	$3{,}79 * 10^{-08}$	$1{,}03 * 10^{-04}$	$2{,}41 * 10^{01}$	0,51	-3,18

n - Anzahl Messwerte, Min - Minimalwert [m^{-1}], Max - Maximalwert [m^{-1}], Md - Medianwert [m^{-1}], *MW - Mittelwert [m^{-1}]*, *VI-95$_{un}$ - Untergrenze des 95-%-Vertrauensintervalls des Mittelwerts [m^{-1}]*, *VI-95$_{ob}$ - Obergrenze des 95-%-Vertrauensintervalls des Mittelwerts [m^{-1}]*, *SD - Standardabweichung [m^{-1}]*, *Sf - Schiefe*, *K - Kurtosis*
Sf- bzw. *K*-Felder mit Schummerung kennzeichnen signifikante Werte ([*Sf* bzw. *K*] / [Standardfehler von *Sf* bzw. *K*] >2)

Tab. 8-1 Statistische Kenndaten der Spezifischen Speicherkoeffizienten verschiedener Hauptgesteinstypen, getrennt für die gesamte Datenbasis sowie die Daten aus 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche

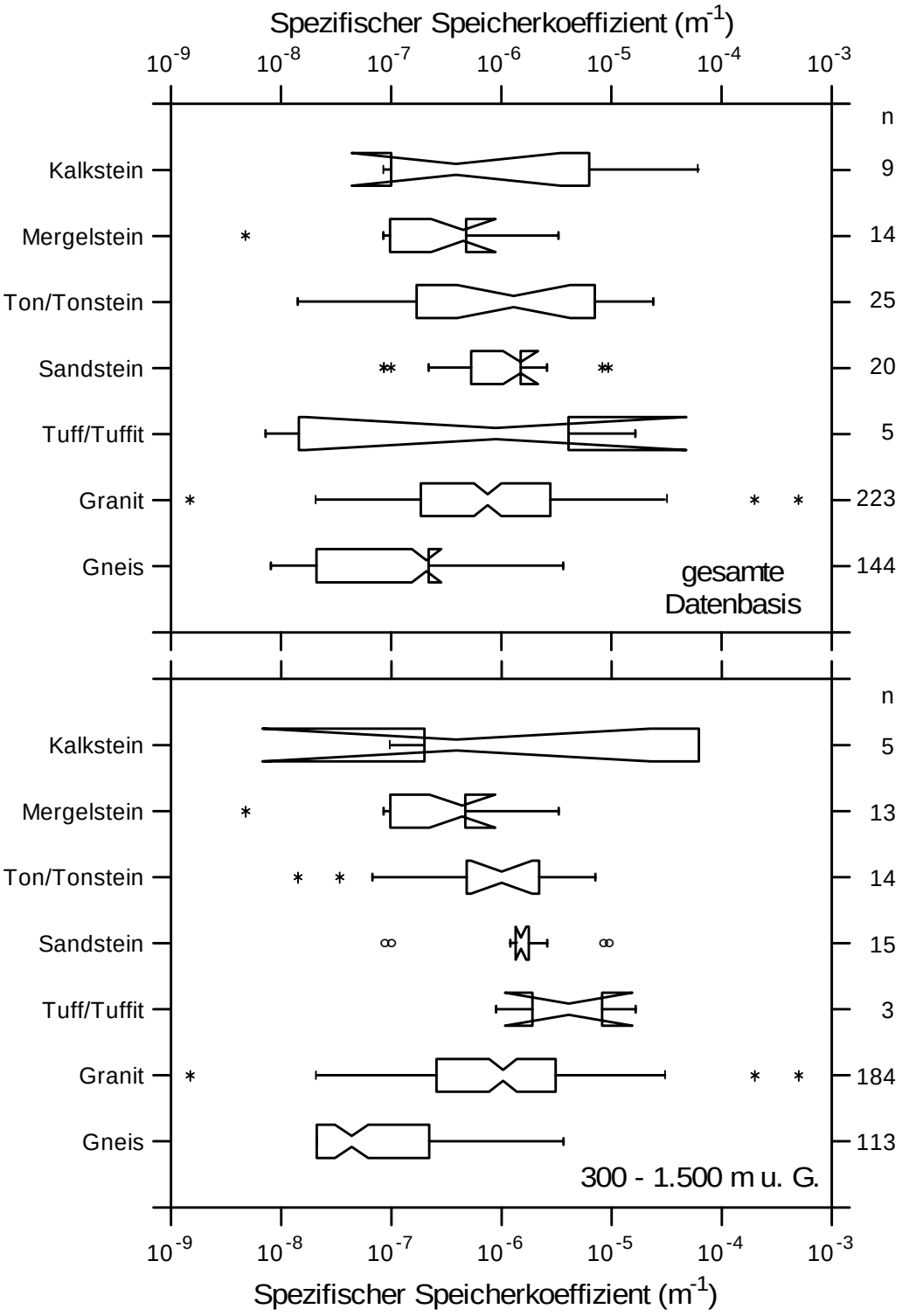


Abb. 8-1 Boxplots für die Spezifischen Speicherkoeffizienten der Hauptgesteinstypen in der Datenbasis insgesamt sowie aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche

Da der größere Teil der vorliegenden Werte bei allen Gesteinstypen aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche stammt, stimmen die Relationen zwischen den Spezifischen Speicherkoeffizienten der einzelnen Gesteinstypen in den Darstellungen für die beiden Tiefenbereiche in Abb. 8-1 weitgehend überein. Stärkere Unterschiede bestehen bei denjenigen Gesteinstypen, zu denen nur sehr wenige Daten vorliegen. Bei ihnen können selbst geringe Veränderungen der Stichprobengröße erhebliche Veränderungen der Verteilung bzw. der im Boxplot dargestellten Merkmale der Verteilung hervorrufen. Davon besonders betroffen sind die Gesteinstypen Tuff/Tuffit und Kalkstein, bei denen sich deshalb eine detaillierte Auswertung und Interpretation erübrigt.

Wenngleich beim vorliegenden Datenmaterial eine quantitative Beziehung zwischen Spezifischem Speicherkoeffizienten und effektiver Porosität nicht hergestellt werden kann, sollten die Relationen zwischen den S_s-Werten der einzelnen Gesteinstypen dennoch etwa denen ihrer effektiven Porositäten entsprechen. In diesem Fall sollten die Spezifischen Speicherkoeffizienten der Sedimentgesteinstypen gemäß der erfahrungsgemäß anzunehmenden Porositätsverhältnisse in der Reihenfolge Sandstein, Ton/Tonstein und Mergelstein abnehmen. Das trifft für die Medianwerte dieser Gesteinstypen und auch für die mittleren 50 % der Werte tatsächlich zu. Die Unterschiede zwischen den Medianwerten sind aber nicht signifikant, da sich die Vertrauensintervalle der Medianwerte überschneiden.

Für den Fall, dass Gesteinsporen im engeren Sinne maßgeblich für den Spezifischen Speicherkoeffizienten sind, sollten die Spezifischen Speicherkoeffizienten der genannten Sedimentgesteine zudem größer sein als die der kristallinen Gesteine Gneis und Granit. Im Hinblick auf Gneis trifft das auch zu - Gneis weist in beiden Datensätzen den niedrigsten Medianwert aller Gesteinstypen auf.

Unerwartet ist dagegen die Verteilung der Spezifischen Speicherkoeffizienten bei Granit. Der Medianwert liegt in Nähe dessen für die Ton/Tonstein-Werte. Die Erklärung ergibt sich aus Abb. 8-2 mit dem Boxplots der Spezifischen Speicherkoeffizienten für Granit, unterschieden nach gestörtem bzw. intaktem Gefüge. Es wird deutlich, dass die - im Verhältnis zu anderen Gesteinstypen - unerwartet großen Werte für S_s weit überwiegend an Gebirgsbereiche mit gestörtem Gefüge, in Form von Klüften und anderen Trennfugen, gebunden sind. Hier liegt auch die Ursache für die erwähnte Korrelation zwischen k_f-Werten und S_s-Werten. Die hohen Spezifischen Speicherkoeffizienten bestätigen damit indirekt die Beurteilung von Granit anhand der k_f-Werte (Kapitel 7.2.2).

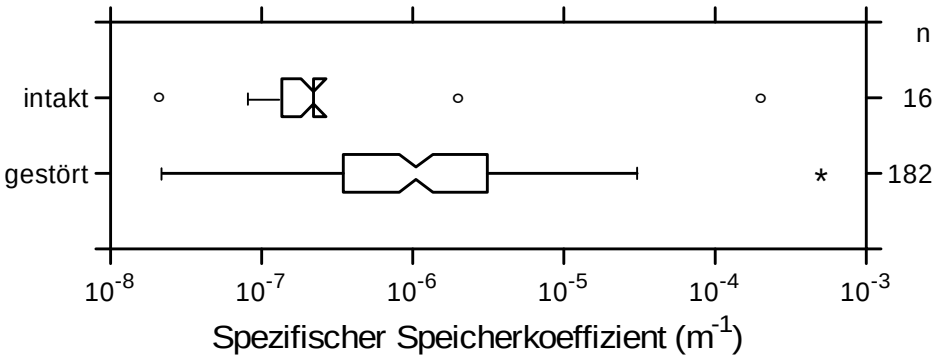


Abb. 8-2 Boxplots der Spezifischen Speicherkoeffizienten für Granit diffenziert nach intaktem und gestörtem Gebirge

9 Kriterienableitung Gebirgsdurchlässigkeit

Auf Grund der heterogenen Datenlage ist die angestrebte Entwicklung von Kriterien zur Quantifizierung der Gebirgsdurchlässigkeit bzw. des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens von Gesteinskörpern anhand ihres Gesteinstyps nur für die Gebirgsdurchlässigkeit möglich. Zum durchflusswirksamen Hohlraumvolumen liegen keine Ergebnisse von In-situ-Untersuchungen vor. Daher wurde geprüft, ob ersatzweise für den als Indikator für das durchflusswirksame Hohlraumvolumen geeigneten Spezifischen Speicherkoeffizienten ein Kriterium abgeleitet werden kann. Dem steht jedoch die hinsichtlich Datenanzahl und Repräsentativität unzureichende Datenbasis für diesen Parameter entgegen (Kapitel 8).

9.1 Rahmenbedingungen und Vorgaben

Günstige geologische Gesamtsituation

Der AkEnd hat bei der Entwicklung seines Verfahrens zur Standortauswahl für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland u. a. die Anforderung formuliert, dass die Abfälle für einen Zeitraum von größenordnungsmäßig einer Million Jahre sicher isoliert werden sollen (AKEND 2002a). Diese Forderung kann nur an Standorten eingehalten werden, die durch das Vorhandensein einer sogenannten günstigen geologischen Gesamtsituation gekennzeichnet sind. Diese ergibt sich aus den für den Radionuklidtransport relevanten Eigenschaften von Gesteinen und Grundwasser im Bereich des Endlagers sowie der Konfiguration der die geologische Barriere im Endlagerumfeld aufbauenden Gesteinskörper.

Zur systematischen Identifizierung und Beurteilung günstiger Konfigurationen von Gesteinskörpern unterscheidet AKEND (2002a) funktional zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich. Das Wirtsgestein muss in erster Linie die sichere Errichtung und den sicheren Betrieb eines Endlagers erlauben. Daraus ergeben sich besondere gebirgsmechanische Anforderungen an das Gestein. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss dagegen die Radionuklide in den endgelagerten Abfällen für den geforderten Zeitraum sicher einschließen. Der Gesteinskörper (bzw. die Gesteinskörper mit sicherheitsmäßig übereinstimmenden Eigenschaften) des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist also das für die Langzeitsicherheit entscheidende Element der geologischen Barriere. Er muss daher Eigenschaften aufweisen, die den Radionuklidtransport verhindern oder in ausreichendem Maße verzögern. Darüber hinaus muss der einschlusswirksame Gebirgsbereich möglichst große Ausdehnung und günstigen Lagebezug zu Gesteinskörpern mit ungünstigeren Eigenschaften aufweisen, insbesondere auch zum Wirtsgesteinskörper, sofern er keine Isolationseigenschaften aufweist.

Wird funktional nicht zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich unterschieden, muss das Wirtsgestein vor allem die im Hinblick auf die Lang-

zeitsicherheit bestehenden Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfüllen. Um während des Endlagerbetriebs die Standsicherheit der Bergwerkshohlräume zu gewährleisten, können bei manchen Gesteinen (und ab einer bestimmten Tiefenlage des Bergwerks) Ausbaumaßnahmen erforderlich sein.

Da der Radionuklidtransport aus einem Endlager in die Biosphäre vor allem advektiv mit dem strömenden Grundwasser erfolgt, sind die aktuelle und die langfristig mögliche Grundwasserbewegung für die Endlagersicherheit von besonderer Bedeutung. Eine günstige geologische Gesamtsituation ist daher durch langsame Grundwasserbewegung bzw. stagnierende Grundwasserverhältnisse in der Endlagertiefe gekennzeichnet (AKEND 2002a).

Zur Grundwasserbewegung in der vorgesehenen Endlagertiefe liegen zum Zeitpunkt der Standortauswahl keine flächendeckenden Informationen vor, so dass deren Beurteilung bis zur Erkundung des letztlich ausgewählten Standortes nur anhand von Indikatoren möglich ist: Auch langfristig kann langsame Grundwasserbewegung am ehesten dann vorausgesetzt werden, wenn die hydraulischen Eigenschaften der Gesteinskörper im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und in der weiteren geologischen Barriere die Grundwasserbewegung und damit auch den Radionuklidtransport nachhaltig behindern oder sogar verhindern. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn die beteiligten Gesteine dicht und trocken sind oder wenn ihre Wasserdurchlässigkeit sehr gering ist. Dadurch wird bei einer Reihe von Gesteinstypen, bei denen Gebirgsdurchlässigkeit und Porosität voneinander abhängig sind, zugleich die Diffusion behindert. Für die Beurteilung ist die **Gebirgsdurchlässigkeit** maßgeblich.

Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte hat im Hinblick auf die Gebirgsdurchlässigkeit zwei Kriterien formuliert (AKEND 2002a u. 2002b):

- In einem Ausschlusskriterium hat er auf Grundlage modellmäßiger Sicherheitsbetrachtungen als Mindestanforderung festgelegt, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen bestehen muss, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als $1 * 10^{-10}$ m/s zugeordnet werden kann.
- Für die Abwägung zwischen verschiedenen Teilgebieten bei der Identifizierung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen klassifiziert er Gesteinstypen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich als "günstig", wenn sie erfahrungsgemäß k_f-Werte zwischen $<10^{-12}$ m/s aufweisen. Als "bedingt günstig" werden Gesteinstypen mit k_f-Werten zwischen 10^{-10} m/s und 10^{-12} m/s bezeichnet.

Da die Gebirgsdurchlässigkeit nur durch In-situ-Untersuchungen erhoben werden kann, liegen zu Beginn eines Auswahlverfahrens und während der ersten Verfahrensschritte allenfalls zufällig gebiets- oder gar standortspezifische Daten dazu vor.

Früh bekannt sind jedoch die Gesteinstypen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs; denn bei der Auswahl von Endlagerstandorten wird gezielt nach einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit gesucht. Es war daher zu prüfen, ob bestimmten Gesteinstypen bestimmte Bandbreiten von k_f-Werten zugeordnet werden können und ob daher im Zuge des künftigen Auswahlverfahrens aus dem Vorhandensein bekannter Gesteinstypen auf bestimmte, mit den Anforderungen des AkEnd kompatible Durchlässigkeitsverhältnisse geschlossen werden kann. Das wäre Voraussetzung für die Ableitung eines Kriteriums "Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit".

9.2 Vorgehen

Grundlage für die Ableitung eines Kriteriums "Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit" ist die statistische Auswertung der in der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit enthaltenen k_f-Werte (Kapitel 7 u. 8). Die Prüfung, wieweit die Ableitung eines solchen Kriteriums sinnvoll ist, und die Kriterienableitung selbst beziehen sich allein auf diejenigen Gesteinstypen, die (auch) in Deutschland für die Endlagerung grundsätzlich in Frage kommen bzw. in diesem Zusammenhang diskutiert werden. Das sind die in Kapitel 7 und 8 behandelten Hauptgesteinstypen Gneis, **Granit, Ton/Tonstein, Mergelstein** und **Steinsalz**. Die Formulierung eines Kriteriums ist dann sinnvoll, wenn sie sich hinsichtlich ihrer spezifischen Gebirgsdurchlässigkeit signifikant unterscheiden.

Charakteristische Bandbreite

Da die Gebirgsdurchlässigkeit selbst in weitgehend einheitlich entwickelten Gesteinskörpern eine gewisse Bandbreite aufweist, muss es sich auch bei der zur Charakterisierung und Unterscheidung der Gesteinstypen herangezogenen Größe um eine Bandbreite handeln. Als Größe zur Charakterisierung von spezifischer Gebirgsdurchlässigkeit bzw. spezifischem Speicherkoeffizienten wurde das 95-%-Vertrauensintervall um den sogenannten **Erwartungswert** der für die Ableitung "maßgeblichen Stichprobe" eines Gesteinstyps gewählt. Der Erwartungswert ist je nach der angenommen statistischen Verteilung (Kapitel 7.1.1) der auf statistische Normalverteilung der dekadischen Logarithmen der k_f-Werte bezogene, verteilungsabhängige geometrische Mittelwert bzw. der verteilungsunabhängige Medianwert der maßgeblichen Stichprobe (s. u.). Als signifikant werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Gesteinstypen dann angesehen, wenn sich die Vertrauensintervalle der Erwartungswerte nicht überschneiden und zusätzliche Hypothesenprüfungen die Signifikanz des Unterschieds zwischen den Erwartungswerten der Gesteinstypen bestätigen.

Maßgebliche Stichprobe

Die für diese Prüfung maßgebliche Stichprobe eines jeden Gesteinstyps besteht aus denjenigen k_f-Werten in der Datenbank, die für den wahrscheinlichen Tiefenbereich eines Endlagers in Deutschland vorliegen. Dafür wurden 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche festgelegt, da nach den Vorstellungen des AkEnd (AKEND 2002a) in diesem Bereich ein mögliches Endlager liegen wird (Kapitel 6.2.3).

Für die Zuordnung der k_f-Werte zu diesem Tiefenbereich muss die Mitte des zugrundeliegenden Testintervalls ("mittlere Testtiefe") in diesem Tiefenbereich liegen. Außerdem muss sich die Oberkante des Testintervalls in einer Tiefe ≥300 m unter Geländeoberfläche befinden. Durch den Ausschluss von Werten aus Testintervallen, die in geringerer Tiefe als 300 m unter Geländeoberfläche beginnen, reduziert sich die Datenbasis. Damit wird aber zuverlässig ausgeschlossen, dass Werte aus oberflächennahen, möglicherweise auf Grund von Auflockerung durchlässigeren Gebirgsbereichen das Ergebnis beeinflussen (allerdings liefert die Einbeziehung solcher Werte beim vorliegenden Datenmaterial ein ganz ähnliches Bild).

Die Art des Tests spielte für die Einbeziehung in die Auswertung keine Rolle: Packertests haben bei weitem den Hauptanteil der vorliegenden k_f-Werte geliefert. Die Durchlässigkeitsunterschiede zwischen den betrachteten Gesteinstypen sind deutlich größer als bei den mit bestimmten Varianten von Packertests oder gänzlich anderen Testverfahren erarbeiteten Ergebnissen.

Bei einzelnen Gesteinstypen gelten für die Zuordnung von Werten zur maßgeblichen Stichprobe gewisse Besonderheiten:

- Bei den kristallinen Gesteinen **Granit** und **Gneis** wurden Werte aus Gebirgsabschnitten mit Gefügestörungen einbezogen, obwohl sie bei diesen Gesteinstypen gezielt untersucht werden und daher gegenüber den Werten für intaktes Gebirge überrepräsentiert sind. Daher sind zwar die für Granit und Gneis errechneten charakteristischen Wertebandbreiten korrekt, nicht aber die zugehörigen statistischen Kennwerte, insbesondere Mittelwert und Medianwert. Beide sind gegenüber den tatsächlichen Werten zu groß. Das gewählte Vorgehen ist aber vertretbar, weil mit einer Ausnahme bei allen Untersuchungsgebieten entsprechend hohe Werte ermittelt worden sind (Kapitel 7.2.2). Das Vorhandensein hoher k_f-Werte stellt also ein Charakteristikum der kristallinen Gesteine dar. Das gilt in besonderem Maße für Granit.
- Bei **Mergelstein** wurden Werte aus Gebirgsabschnitten mit Kalksteinbänken oder -linsen einbezogen, da nicht immer bekannt bzw. dokumentiert ist, ob diese Einschaltungen höhere Durchlässigkeit und möglicherweise höheres Speichervermögen aufweisen als der umgebende Mergelstein. Die für Mergelstein ermittelte charakteristische Wertebandbreite kann dadurch höher sein als der Realität entspricht (Kapitel 7.2.6).

Wenn sich die k_f-Werte der maßgeblichen Stichproben der betrachteten Gesteinstypen signifikant unterscheiden, werden die zugehörigen Erwartungswerte zu den Anforderungen des AkEnd in Beziehung gesetzt und daraus das Kriterium abgeleitet.

9.3 Einflussfaktoren

Die inhaltlichen bzw. statistischen Voraussetzungen für das in Kapitel 9.2 beschriebene Vorgehen sind an die Einhaltung bestimmter Bedingungen gebunden. Sie betreffen einerseits die "technische" Qualität der vorliegenden Daten, die im Rahmen des Projektes nur allgemein geprüft werden konnte (Kapitel 3.2 u. 5.2) und die Erfüllung bestimmter statistischer Anforderungen; andererseits sind einige technische und geowissenschaftliche Voraussetzungen für die Kriterienableitung zu beachten:

Repräsentanz

Die k_f-Werte zur Unterscheidung der Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen müssen wegen ihres Bezugs zur Langzeitsicherheit hinsichtlich ihrer "technischen Richtigkeit" zum Zeitpunkt der Erhebung sowie ihrer räumlichen und langzeitigen zeitlichen Übertragbarkeit repräsentativ sein. Das gilt auch für die zwischen verschiedenen Gesteinstypen festgestellten Unterschiede der Gebirgsdurchlässigkeit.

Die "technische Zuverlässigkeit" der ausgewerteten In-situ-Untersuchungen konnte im Detail nicht überprüft werden und wird hier entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.2 und 5.2 vorausgesetzt.

Hinsichtlich der **zeitlichen Repräsentanz** können aus den hier ausgewerteten Versuchsergebnissen selbst keine Aussagen abgeleitet werden. Da alle ausgewerteten Daten von Gesteinskörpern mit mindestens einigen Zehnermillionen Jahren Alter stammen, darf zumindest für die absehbare Zukunft von einer gewissen zeitlichen Repräsentanz ausgegangen werden. Sie hängt aber im einzelnen von den Auswirkungen ab, die an einem bestimmten Endlagerstandort als Folge künftiger geologischer Prozesse und Ereignisse auftreten werden bzw. zu erwarten sind. Die tatsächliche zeitliche Repräsentanz langzeitrelevanter Aussagen zur Endlagersicherheit wird also erst im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit für einen bestimmten Standort zu prüfen sein.

Die **räumliche Repräsentanz** von k_f-Werten wird u. a. durch die Reichweite des zugrundeliegenden Tests und die Länge des Testintervalls. Beide Größen bestimmen das Einflussvolumen des Versuchs und damit - neben den Gebirgseigenschaften selbst - die Ausdehnung des Gebirgsbereichs für den der ermittelte k_f-Wert charakteristisch ist. Von diesen Parametern ist regelmäßig nur die **Länge des Testintervalls** bekannt.

Da bei wichtigen hydraulischen Bohrlochtests, insbesondere Packertests, in der Regel die integrale Durchlässigkeit über das Testintervall, also die Transmissivität, erhoben und daraus und der Länge des Messintervalls dann die Gebirgsdurchlässigkeit errechnet wird, besteht zudem ein rechnerischer Zusammenhang zwischen der Länge des Testintervalls und dem zugehörigen k_f-Wert. Daneben kann die Länge des Testintervalls den k_f-Wert aber auch auf Grund der hydraulischen Charakteristika eines Gesteinskörpers beeinflussen: Bei Gesteinskörpern mit geringer Matrixdurchlässigkeit und nur einzelnen hydraulisch wirksamen Klüften oder sonstigen Trennfugen kann sich der in einem Bohrloch bestimmte k_f-Wert mit zunehmender Intervalllänge dem Wert der Matrixdurchlässigkeit annähern. Daher war vor der Auswertung zu prüfen, wieweit systematische Zusammenhänge zwischen k_f-Wert und Länge des Testintervalls bestehen.

Diese Prüfung hat gezeigt, dass die k_f-Werte aus dem betrachteten Tiefenbereich von 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche nicht oder - bei einigen Gesteinstypen - nur geringfügig durch die Intervalllänge beeinflusst sind. Das Ausmaß der Beeinflussung ist für die Kriterienentwicklung vernachlässigbar (Kapitel 7.2).

Im Hinblick auf die statistische Datenauswertung setzt die Erfüllung der Forderung nach räumlicher Repräsentanz der ermittelten gesteinstypspezifischen Bandbreiten von k_f-Werten einerseits voraus, dass die einfließenden Daten eine hinreichend große Anzahl von Gesteinskörpern des jeweiligen Gesteinstyps umfassen, damit dessen Variationsbreite hinsichtlich der betrachteten Eigenschaft Gebirgsdurchlässigkeit zweifelsfrei erfasst wird. Andererseits muss zusätzlich jeder Gesteinskörper des jeweiligen Gesteinstyps räumlich repräsentativ durch Daten belegt sein. Beide Bedingungen sind zweifellos nicht erfüllt:

- Bislang sind überhaupt nur an einer sehr kleinen Anzahl der insgesamt existierenden Gesteinskörper bestimmter Gesteinstypen In-situ-Daten systematisch erhoben worden.
- Bei den untersuchten Gesteinskörpern war die Untersuchung oft gerade nicht auf Repräsentanz ausgerichtet. Vielmehr sind Gesteinsbereiche mit vermuteter hoher Wasserdurchlässigkeit bevorzugt untersucht worden. Dies gilt insbesondere für die Untersuchung kristalliner Gesteinskörper hinsichtlich ihrer Eignung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (aber auch für wasserwirtschaftliche Untersuchungen).

Diese Mängel schränken die Aussagekraft der Auswertungsergebnisse zwar ein, sprechen jedoch nicht grundsätzlich gegen die gewählte Vorgehensweise: Wegen der ähnlichen oder sogar übereinstimmenden Entstehungsbedingungen können verschiedene Gesteinskörper eines Gesteinstyps hinsichtlich der interessierenden Eigenschaften durchaus so ähnlich sein, dass ihre zuverlässige Beschreibung und Abgrenzung von anderen Gesteinstypen möglich wird. Das gilt insbesondere für Gesteinstypen mit "definierter" Entstehung und Zusammensetzung, wie etwa Granit.

Zweifel bestehen in dieser Hinsicht vor allem bei solchen Gesteinstypen, unter deren Bezeichnung Gesteinskörper mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammen gefasst werden. Beispielsweise muss beim Gesteinstyp Mergelstein auf Grund der durch die Bezeichnung abgedeckten Bandbreite des möglichen Kalkanteils mit unterschiedlichen mechanischen und als Folge davon auch hydraulischen Eigenschaften gerechnet werden (Kapitel 7.2.6).

Dieser Zusammenhang wurde durch differenzierte Auswertung des Datenmaterial bestätigt. Bei den Gesteinstypen Ton/Tonstein sowie Mergelstein ist mit einer gewissen Variationsbreite dieser Eigenschaften allein auf Grund unterschiedlicher Gesteinszusammensetzung oder wegen der Vergesellschaftung mit Gesteinstypen mit anderen hydraulischen Eigenschaften zu rechnen. Diese Faktoren wurden bei der gesteinstypbezogenen Auswertung in Kapitel 7.2.5 u. 7.2.6 gezielt betrachtet. Sie sind danach für die Ableitung charakteristischer Bandbreiten der k_f-Werte und der spezifischen Speicherkoeffizienten von nachrangiger Bedeutung:

- Beim Gesteinstyp Ton/Tonstein haben die mit unterschiedlichem diagenetischen Verfestigungsgrad oder entlastungsbedingter Entfestigung verbundenen hydraulischen Auswirkungen für die Kriterienentwicklung nachrangige Bedeutung; denn sie sind im wesentlich auf oberflächennahe Gebirgsbereiche beschränkt. In der vorgesehenen Endlagertiefe spielen sie keine erkennbare Rolle mehr, da dort allenfalls lokal noch mit dem Vorhandensein von Ton zu rechnen ist. Ausgenommen sind die mechanischen und - resultierend daraus - hydraulischen Auswirkungen etwaiger Wärmebelastungen. Dazu liegen nur von einem oberflächennahen Gesteinskörper (Standort Münchehagen in Deutschland) Erkenntnisse vor.
- Das Auftreten von Kalksteinbänken in Mergelsteinserien kann - je nach hydraulischer Bedeutung - zum Ausschluss des betreffenden Gesteinskörpers führen. Kalksteinbänke geringerer hydraulischer Bedeutung sind gesteinstypspezifischer Bestandteil von Mergelsteinserien und werden daher als in die Kriterienableitung einbezogen. Mergelsteinserien, die nachweislich keine oder nur hydraulisch unwirksame Kalksteineinschaltungen enthalten und geringen "dispersen" Karbonatgehalt aufweisen, ähneln im Hinblick auf die Wasserdurchlässigkeit den Tonsteinserien. Der Zusammenhang zwischen Kalkgehalt und k_f-Wert konnte allerdings nicht quantitativ geklärt werden.

Gesteinstypunabhängige Einflussfaktoren

Die gesteinstypspezifischen Bandbreiten der Gebirgsdurchlässigkeit können nachträglich durch **natürliche Prozesse** (Kapitel 4.1) und durch hier nicht behandelte menschliche Einwirkung verändert werden. Insbesondere sind die Konsequenzen natürlicher Vorgänge zu beachten, die im lokalen oder regionalen Maßstab zur Vergrößerung der Durchlässigkeit und des effektiven Hohlraumvolumens führen können. Ihre Bedeutung für Gebirgsdurchlässigkeit und Hohlraumvolumen muss wenigstens

näherungsweise beurteilt werden können, damit nicht lokale oder regionale Besonderheiten fälschlicherweise den Gesteinstypen generell zugeschrieben werden.

Bei den für die Endlagerung im vorgesehenen Tiefenbereich in Frage kommenden Gesteinen handelt es sich um Festgesteine. Bei den meisten dieser Gesteine sind vor allem diejenigen Prozesse bedeutsam, die mit einer mechanische Beanspruchung der Gesteinskörper verbunden sind; denn sie beeinflussen unmittelbar die Dichte und Gestalt von Trennfugen und damit die Gebirgsdurchlässigkeit.

Um die Bedeutung solcher Vorgänge abschätzen zu können, wurde der Einfluss folgender Faktoren auf die Gebirgsdurchlässigkeit der Gesteinstypen gesondert untersucht (s. 7.2):

- "mechanischer Zustand" des Gesteinsverbandes ("gestörtes" oder "intaktes" Gefüge, als Hinweis auf das mögliche Vorhandensein von Bereichen mit erhöhter Wasserdurchlässigkeit (betrifft insbesondere die kristallinen Gesteine Granit und Gneis),
- Einschaltungen von Gesteinen mit abweichenden Eigenschaften innerhalb des normalen Gesteinsverbandes, die sich bei mechanischer Beanspruchung anders verhalten als der betrachtete Gesteinstyp (insbesondere "kompetente" Kalksteinbänke in Mergelstein, s. o.),
- die Tiefe der Messung unter Geländeoberfläche, da der mit der Tiefe zunehmende Gebirgsdruck zur Reduzierung der Gebirgsdurchlässigkeit und des Hohlraumvolumens führen kann (ausgedrückt als mittlere Testtiefe unter Geländeoberfläche),
- der geographische Ort der Messung, über den im einzelnen nicht bekannte lokale oder regionale Einflüsse auf die Gesteinseigenschaften erfasst werden (Untersuchungsgebiet).

Zu den beiden erstgenannten Aspekten liegen nur bei einem Teil der Messwerte entsprechende Informationen vor. Sie wurden bei der gesteinstypbezogenen Auswertung in Kapitel 7.2 berücksichtigt. Die Ergebnisse fließen in die Kriterienentwicklung ein. Die Tiefenlage der Messung ist dagegen in den meisten Fällen bekannt:

Die **Testtiefe** hat bei allen in Kapitel 7.2 untersuchten Hauptgesteinstypen mehr oder weniger deutlichen Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit. Generell gilt, dass die k_f-Werte mit der Tiefe abnehmen. Die tiefenabhängige Differenzierung der k_f-Werte kann bei einzelnen Gesteinstypen durchaus das Ausmaß der Unterschiede zwischen den verschiedenen Gesteinstypen erreichen. Betroffen ist insbesondere Ton/Tonstein, bei dem eine geradezu sprunghafte Abnahme der Durchlässigkeit in etwa 200 m Tiefe unter Geländeoberfläche zu beobachten ist (Kapitel 7.2.5). Die Konzentration auf die k_f-Werte aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche bei der Kriterienentwicklung ist daher nicht nur auf Grund der wahrscheinlichen Tiefenlage eines Endlagers in diesem Bereich geboten. Sie verbessert auch die Aussicht, ei-

nen Gebirgsbereich mit geringer Durchlässigkeit zu identifiziere und mildert durch die Begrenzung des betrachteten Tiefenabschnitts auch die bei den verschiedenen Gesteinstypen unterschiedlichen Auswirkungen der Tiefe auf die k_f-Werte.

Die unterschiedliche geographische Herkunft der k_f-Werte aus bestimmten Untersuchungsgebieten spielt für die Bewertung insbesondere dann eine Rolle, wenn die "eigentlichen" technischen und/oder geowissenschaftlichen Ursachen für auffällige Durchlässigkeitsverhältnisse nicht geklärt werden können. Das ist beim vorliegenden Datenmaterial ausnahmsweise der Fall, beeinträchtigt aber die Kriterientwicklung nicht.

Statistisch ausreichende Datenbasis

Die Umsetzung der Ergebnisse in Kriterien setzt eine ausreichend große Datenanzahl pro maßgeblicher Stichprobe voraus, damit die errechneten Erwartungswerte und Vertrauensintervalle nicht Zufallscharakter bekommen. Diese Bedingung ist nicht bei allen Gesteinstypen (z. B. Steinsalz, Ton/Tonstein), bzw. nicht für alle bei einzelnen Gesteinstypen unterschiedenen Werteklassen (z.B. bei Granit und Gneis: "gestörtes" / "intaktes" Gefüge) erfüllt. In diesen Fällen muss die Ableitung von Erwartungswerten bzw. die Unterscheidung von anderen Gesteinstypen auch auf Grund von Plausibilitätsbetrachtungen erfolgen.

Das gilt insbesondere für Gesteinstypen, bei denen die meisten der vorliegenden Daten im Rahmen von Auswahl oder Erkundung potenzieller Endlagerstandorte für radioaktive Abfälle erhoben worden sind und bei den die Datenerhebung nach statistischen Prinzipien nicht möglich ist bzw. zur Beeinträchtigung der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen würde. Betroffen sind insbesondere Gesteinstypen mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit, bei denen In-situ-Daten aus anderen Erhebungszusammenhängen, etwa der Wasserwirtschaft, nur untergeordnet vorliegen. Hier werden üblicherweise geowissenschaftliche Verfahren, etwa 3-D-Seismik, zu Gewährleistung ausreichenden Repräsentativität benutzt. Bei den hier berücksichtigten Daten ist das der Fall.

Verteilungsfunktion

Die Anwendung von auf der Annahme Normalverteilung beruhender Auswerteansätze, z. B. die Benutzung des 95-%-Vertraunesintervalls um den geometrischen Mittelwert der k_f-Werte, ist zur Unterscheidung der Gesteinstypen nur dann gerechtfertigt, wenn die Verteilungsfunktion der k_f-Werte bekannt sind und so die differenzierte Auswertung und wichtige statistische Prüfverfahren erlauben (Kapitel 6.1). Diese Voraussetzung ist nur teilweise erfüllt; denn die k_f-Werte weisen nicht bei allen hier betrachteten Gesteinstypen Normalverteilung auf (s. Abb. 9-1). Daher wurden sowohl verteilungsbezogene als auch verteilungsunabhängige Verfahren zur Prüfung der signifikanten Unterscheidung der Erwartungswerte angewendet.

Abb. 9-1 zeigt, dass - allerdings mit einigen Unregelmäßigkeiten - am ehesten bei Steinsalz und Ton/Tonstein mit Normalverteilung zu rechnen ist, bei Gneis, Granit und Mergelstein dagegen nicht.

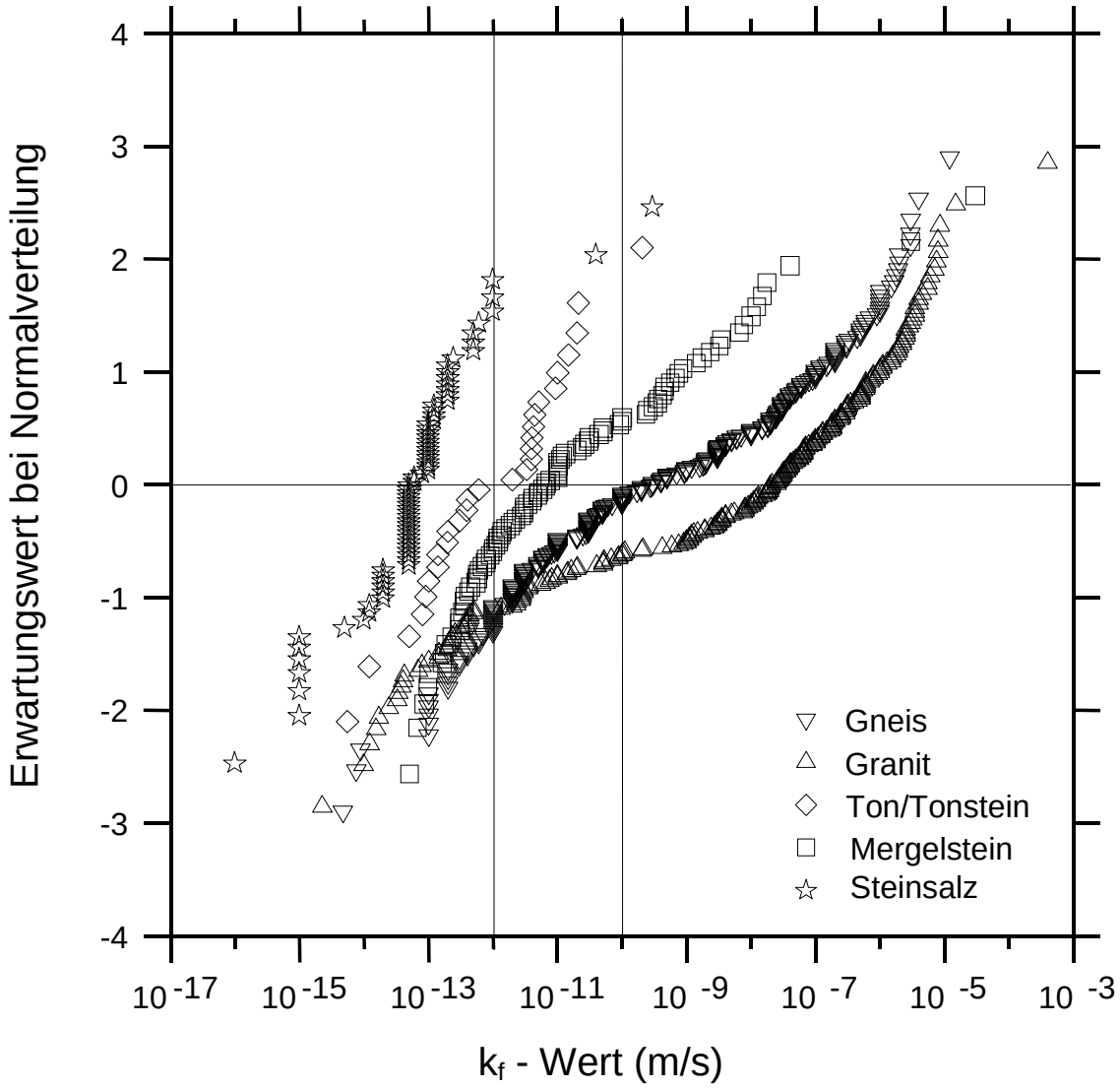


Abb. 9-1 Wahrscheinlichkeitsdiagramme für die Hauptgesteinstypen

horizontale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

9.4 Kriterium Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die zur Kriterienableitung herangezogenen maßgeblichen Stichproben der k_f-Werte der betrachteten Gesteinstypen Gneis, Granit, Ton/Tonstein, Mergelstein und Steinsalz haben entsprechend der Darstellung in Kapitel 9.3 folgende übereinstimmende Merkmale:

- Mittlere Testtiefe (Mitte des Testintervalls): 300 - 1.500 m unter Geländeoberfläche,
- Oberkante des Testintervalls (in der Datenbank: "Top"): ≥300 m unter Geländeoberfläche,
- Länge des Testintervalls: keine Einschränkung,
- Testverfahren: keine Einschränkung,
- Petrographische Besonderheiten (Gefüge "intakt" oder "gestört", Einschaltungen fremder Gesteine): keine Einschränkung.

Die Stichproben sind bei den einzelnen Gesteinstypen unterschiedlich groß (Abb. 9-2): Relativ umfangreich sind sie bei Gneis und Granit, während für Ton/Tonstein nur eine geringe Anzahl Messwerte vorhanden ist. Mit dieser Einschränkung sowie den in Kapitel 9.3 diskutierten Ausnahmen bzw. Besonderheiten sind die Bedingungen für die Kriterienableitung erfüllt.

Die charakteristischen Bandbreiten der k_f-Werte, der jeweilige Erwartungswert (Medianwert) und die zugehörigen 95-%-Vertrauensintervalle sind für die maßgeblichen Stichproben der fünf Gesteinstypen in Abb. 9-2 dargestellt. Die Vertrauensintervalle beruhen auf der Berechnung unter Annahme der Normalverteilung der dekadischen Logarithmen der Originalwerte (Kapitel 6.1). Es ergibt sich folgendes Bild:

- Die Medianwerte (dasselbe gilt für die geometrischen Mittelwerte) der betrachteten Gesteinstypen unterscheiden um mehrere Größenordnungen. Ausgenommen sind Ton/Tonstein und Mergelstein, bei denen der Unterschied etwa eine Größenordnung beträgt. Die 95-%-Vertrauensintervalle der Medianwerte überschneiden sich nicht. Die Unterschiede sind signifikant.
- Bei Gneis und insbesondere bei Granit liegen die Medianwerte (und die geometrischen Mittelwerte) sowie die zugehörigen 95-%-Vertrauensintervalle der k_f-Werte oberhalb des vom AkEnd festgelegten zulässigen Bereichs der k_f-Werte ($<10^{-10}$ m/s). Die Wertebandbreiten sind bei beiden Gesteinstypen sehr groß. Mit einer Ausnahme bei Granit (Untersuchungsgebiet Lac du Bonnet, Kanada) treten bei allen Granit- und Gneis-Vorkommen neben niedrigen immer auch hohe k_f-Werte auf. Das gilt auch für als ungestört charakterisierte Gesteinsbereiche. Wenngleich bei den hydraulischen Tests Gebirgszonen mit mutmaßlich hoher Durchlässigkeit gezielt untersucht werden, sind hohe k_f-Werte doch offenkundig ein charakteristi-

sches Merkmal dieser Gesteinstypen. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit den zu diesen Gesteinstypen aus Wasserwirtschaft und Endlagerung vorliegenden Erfahrungen und Einschätzungen. Die Voraussetzungen zur Auffindung von Gesteinskörpern mit der geforderten geringen Gebirgsdurchlässigkeit sind damit relativ ungünstig.

- Die Bandbreiten der k_f-Werte von Ton/Tonstein und Steinsalz sind deutlich schmaler als bei den anderen Gesteinstypen. Medianwert (und geometrischer Mittelwert) der Steinsalz-Daten liegen noch deutlich unter denen von Ton/Tonstein. Die weitaus meisten Messwerte für diese Gesteinstypen erfüllen die Mindestanforderung des AkEnd (Tab. 7-12). Im Hinblick auf die Gebirgsdurchlässigkeit stellt Steinsalz zweifelsfrei den günstigsten Gesteinstyp dar. Die Tonsteinwerte erfüllen mit einer Ausnahme die Mindestanforderung ($<10^{-10}$ m/s), fallen aber nur zum geringen Teil in den günstigsten Wertebereich ($<10^{-12}$ m/s). Hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit ist Ton/Tonstein aber zweifelsfrei günstiger zu beurteilen als die übrigen Gesteine (außer Steinsalz).

  Die gemessenen k_f-Werte stehen bei beiden Gesteinstypen in Einklang mit Beobachtungen und Erfahrungen zur Barrierewirksamkeit der Gesteine (Endlagerung, Kohlenwasserstoffindustrie). Bei Ton/Tonstein bestehen noch Informations- bzw. Kenntnislücken im Hinblick auf den tatsächlichen Einfluss von geowissenschaftlichen Faktoren auf die Gebirgsdurchlässigkeit.

- Bei Mergelstein liegen Medianwert (und geometrischer Mittelwert) der kf-Werte noch unterhalb der Mindestanforderung des AKEnd. Die Bandbreite der Werte reicht aber weit in den Bereich höherer Werte hinein. Die verursachenden k_f-Werte stammen überwiegend, aber nicht ausschließlich (Kapitel 7.2.6) aus Gesteinskörpern mit Kalksteineinschaltungen oder Bereichen mit relativ hohem Karbonatgehalt. Unter dem Gesichtspunkt Gebirgsdurchlässigkeit ist daher bei Mergelstein mit dem Auftreten ungeeigneter Gesteinsabschnitte zu rechnen.

Die Unterschiede zwischen den Erwartungswerten (Medianwert) der einzelnen Gesteinstypen sind signifikant.

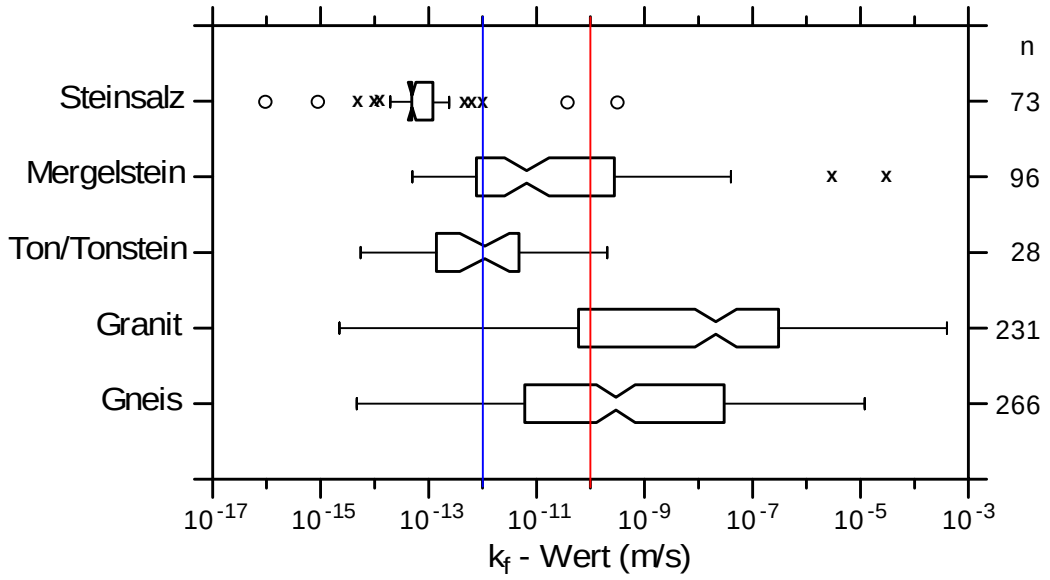


Abb. 9-2 Boxplots der für die Kriterientwicklung maßgeblichen Stichproben der k_f-Werte für die Gesteinstypen Gneis, Granit, Ton/Tonstein, Mergelstein und Steinsalz

n: Anzahl der Messwerte
vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

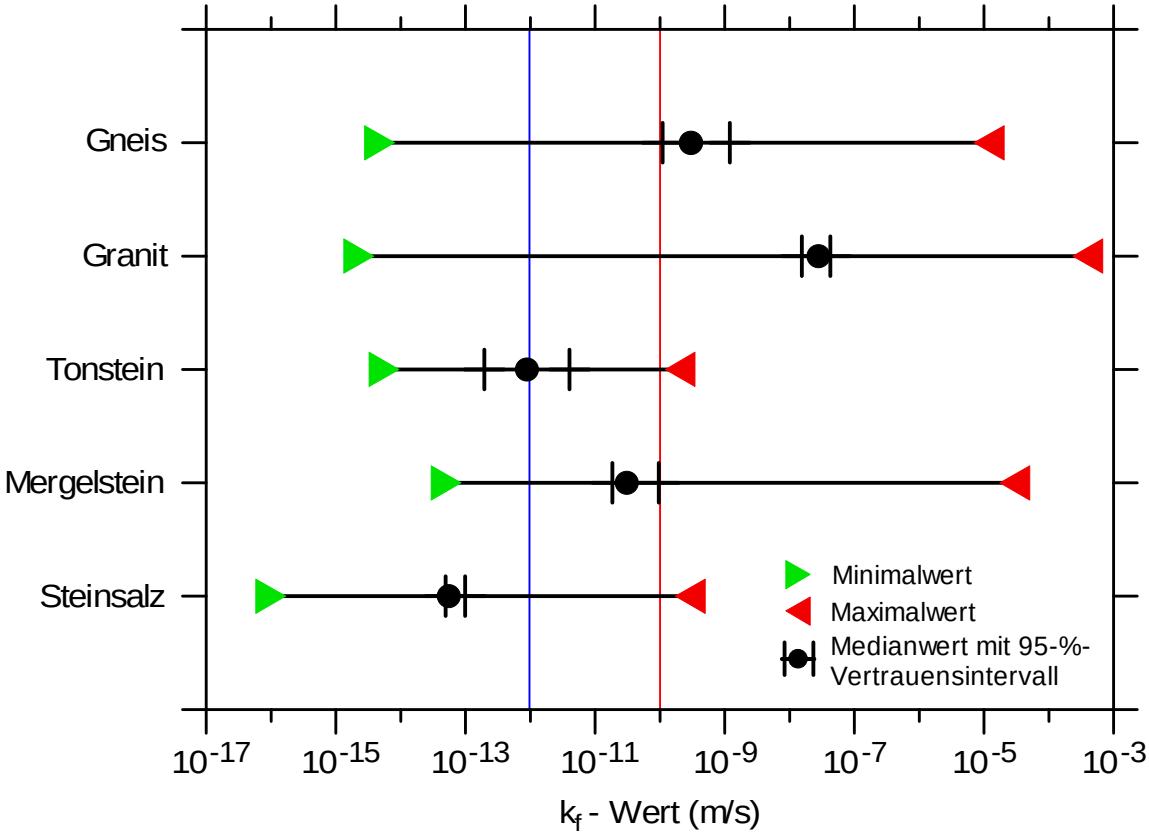


Abb. 9-3 Bandbreiten und Medianwerte (mit Grenzen des 95-%-Vertrauensintervalls) der k_f-Werte von Gesteinstypen in der vorgesehenen Endlagertiefe (300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche)

vertikale Linien bei 10^{-10} bzw. 10^{-12} m/s: Mindestanforderung bzw. Grenze zwischen Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig" bei Abwägung gemäß AkEnd (Kapitel 6.2.4)

Zur Überprüfung dieses Ergebnisses wurden die Vertrauensintervalle zusätzlich mit "bootstrapping" (Kapitel 6.2.2) berechnet. Bei diesem verteilungsunabhängigen Verfahren wurde ein Datensatz verwendet, der abweichend von der maßgeblichen Stichprobe alle k_f-Werte aus dem Tiefenbereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche umfasst (Anzahl jeweils gemäß Tab. 7-1), also auch solche, bei denen das zugrundeliegende Testintervall in geringerer Tiefe als 300 m unter Geländeoberfläche beginnt. Damit sollte die Empfindlichkeit des Ansatzes gegen Datenveränderungen geprüft werden. Das Ergebnis ist in Abb. 9-3 dargestellt. Die Unterschiede zwischen den Erwartungswerten (Medianwert) sind auch in diesem Fall signifikant.

Im Detail ergeben sich aus der größeren Fallzahl bei einigen Gesteinstypen gewissen Unterschiede zur Auswertung der maßgeblichen Stichproben (z. B. Mergelstein). Die Bewertung der Gesteinstypen im Hinblick auf die durch die Mindestanforderung und das Abwägungskriterium des AkEnd festgelegten k_f-Wert-Bereiche und die Relationen zwischen den Gesteinstypen bleiben davon jedoch unberührt.

Kriterium

Auf Grund der geschilderten Auswertungsergebnisse wird das Kriterium "Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit" wie folgt formuliert:

- Günstig sind die Voraussetzungen, einen Gesteinskörper mit der geforderten geringen Gebirgsdurchlässigkeit aufzufinden, bei den Gesteinstypen Steinsalz und Ton/Tonstein.
- Bedingt günstig sind die Voraussetzungen, einen Gesteinskörper mit der geforderten geringen Gebirgsdurchlässigkeit aufzufinden, beim Gesteinstyp Mergelstein.
- Weniger günstig sind die Voraussetzungen, einen Gesteinskörper mit der geforderten geringen Gebirgsdurchlässigkeit aufzufinden, bei den Gesteinstypen Granit und Gneis.

Diese Bewertung schließt nicht aus, dass auch bei den hier als bedingt günstig bzw. weniger günstig eingestuften Gesteinstypen Mergelstein, Gneis und insbesondere Granit Gesteinskörper existieren und auch aufgefunden werden können, die die geforderte geringe Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen. Das zeigt beispielsweise für Granit das Beispiel Lac du Bonnet (Kapitel 7.2.2). Das Risiko, dass die Nachweisführung fehl schlägt, ist nach den vorliegenden Daten allerdings relativ groß.

9.5 Hinweise zur Anwendung des Kriteriums

Zu Gneis und Granit liegen zahlreiche, teilweise umfangreiche Datensätze vor, die ein weitgehend einheitliches Bild liefern. Es steht in Einklang mit den aus verschiedenen Anwendungsgebieten vorliegenden Erfahrungen zur intensiven kluftgebundenen Wasserführung und -bewegung in diesen Gesteinen. Deutliche Abweichungen in Richtung auf geringe Gebirgsdurchlässigkeit liegen im ausgewerteten Datenmaterial nur lokal bzw. in begrenztem Umfang vor. Auch dies entspricht den vorliegenden Erfahrungen.

Entsprechend zuverlässig wird die Aussagekraft der k_f-Werte zu Steinsalz bewertet, obwohl sie von lediglich drei Standorten stammen. Auch hier entsprechen die Befunde den umfangreichen Erfahrungen mit Wasserführung bzw. Gebirgsdurchlässigkeit von Steinsalz. Allerdings ist zu betonen, dass die Einschaltung von Fremdgesteinen, insbesondere von Anhydrit, (bekanntermaßen) zu deutlicher Erhöhung der Gebirgsdruchlässigkeit führen kann.

Zu Ton/Tonstein bislang vergleichsweise wenige Daten aus der vorgesehenen Endlagertiefe vor. Die Ergebnisse stehen in Einklang mit Beobachtungen zur Barrierewirkung von Tonstein in verschiedenen Bereichen, sie sind aber derzeit noch durch relativ wenige konkrete Untersuchungsergebnisse belegt. Untersuchungen zur Barrierewirksamkeit von Tonstein, auch zu den hydraulischen Eigenschaften sind bisher auf wenige Untersuchungsgebiete beschränkt.

Bei Mergelstein ist die Gebirgsdurchlässigkeit offenbar von der Höhe des Karbonatgehalts sowie von der Art seiner Verteilung im Sediment abhängig, wenngleich der Zusammenhang nicht quantifiziert werden konnte.

Auf Grund der genannten Unzulänglichkeiten bzw. Unsicherheiten und Kenntnisdefizite kann derzeit bei keinem der behandelten Gesteinstypen, selbst bei Steinsalz und Tonstein nicht, ausgeschlossen werden, dass im Laufe von Auswahl- und Erkundungsverfahren Werte ermittelt werden, die über die erwartete Bandbreite hinausgehen und mehr oder weniger deutlich von den jeweiligen Erwartungswerten abweichen. Es ist daher unerlässlich, dass der Umgang mit solchen Befunden rechtzeitig vor Entscheidungen, die auf der Bewertung von Durchlässigkeitsdaten beruhen, eindeutig geregelt wird.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass gerade bei denjenigen Gesteinstypen, für die auf Grund der vorliegenden Auswertung oder auf Grund von Erfahrung mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit gerechnet wird, ein ausschließlich statistischer Ansatz für die Datenauswertung und den Umgang mit unerwarteten Werten nicht ausreicht. Wegen der auch in Zukunft vergleichsweise relativ kleinen Fallzahlen von In-situ-Werten muss die Aussagekraft von Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit auf jeden Fall durch zusätzliche geowissenschaftliche Betrachtungen abgesichert werden.

10 Zitierte Schriften

Nachfolgend werden nur die in den Kapiteln 1 bis 9 zitierten Schriften angegeben. Die Quellen der in die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit übernommenen Informationen sind in der Datenbank enthalten und über die Untersuchungsgebiete bzw. die Autorennamen aufrufbar.

ABELIN, H., NERETNIEKS, I., TUNBRANT, S. & MORENO, L. (1985): Final report of the migration in a single fracture - Experimental results and evaluation.- NAGRA - Technical Report 85-55; Wettingen (Schweiz).

ADAMS, J. & WYSS, E. (1994): Hydraulic Packer Testing in the Wellenberg Boreholes SB1 and SB2 Methods and Field Results.- NAGRA - Technical Report 93-38; Wettingen (Schweiz).

AKEND - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (2002a): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis AuswahlverfahrenEndlagerstandorte. Die Rahmenbedingungen - Vorgehen, Kriterien, Bewertungen; Das Auswahlverfahren - Beteiligung der Öffentlichkeit.- Dezember 2002 ("Broschüre").

AKEND - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (2002b): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis AuswahlverfahrenEndlagerstandorte.- Dezember 2002.

AMMANN, M., BIRKHÄUSER, P., BLÄSI, H. R., LAVANCHY, J.-M., LÖW, S., MEIER, B. & MÜLLER, W. H. (1993): Untere Süsswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf - Charakterisierung mittels Geologie Petrophysik und Fluid Logging.- NAGRA - Technical Report 92-03; Wettingen (Schweiz).

ANTTILA, P. (1986): Loviisa Power Station - final disposal of reactor waste - geological and hydrogeological conditions of the island of Hästholmen.- Imatran Voima Oy (IVO), Report YJZ-86-05; Helsinki (Finnland).

ANTTILA, P., AHOKAS, H., FRONT, K., HEIKKINEN, E., HINKKANEN, H., JOHANSSON, E., PAULAMÄKI, S., RIEKKOLA, R., SAARI, J., SASKA, J., SNELLMAN, M., WIKSTRÖM, L. & ÖHBERG, A. (1999): Final disposal of spent nuclear fuel in Finnish bedrock - Kivetty site report.- POSIVA 00-09; Helsinki (Finnland).

APPEL, D. & HABLER, W. (2001): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Phase 1: Überprüfung der Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit.- Ausarbeitung für den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte - AkEnd.

APPEL, D. & KRABBE, H. (1996): Anorganische und organische Spurenstoffe in Gesteinen und Grundwasser im Umfeld niedersächsicher Deponien.- Im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

APPEL, D. & KREUSCH, J. (2000): Günstige Konfiguration des Gesteinskörpers in der geologischen Barriere - ein strukturorientierter Ansatz zur Auswahl von Endlagerstandorten.- Ausarbeitung für den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte - AkEnd.

BARBREAU, A. & BOISSON, J.-Y (1994): Caractérisation d´une formation argileuse - Synthése des principaux résultats obtenus à partir du tunnel de Tournemire.- Commission européenne, scienes et techniques nucléaires, Rapport d´activité 1991-1993, EUR 15756 FR; Luxembourg.

BELANGER, D. W., CAUFFMAN, T. L., LOLCAMA, J. L., LONGSINE, D. E. & PICKENS, J. F. (1989a): Interpretation of hydraulic testing in the sediments of the Riniken borehole.- NAGRA - Technical Report 87-17; Wettingen (Schweiz).

BELANGER, D. W., FREEZE, G. A., LOLCAMA, J. L. & PICKENS, J. F. (1989b): Interpretation of hydraulic testing in crystalline rock at the Leuggern borehole.- NAGRA - Technical Report 87-19; Wettingen (Schweiz).

BJORLYKKE, K. (1999): Principal aspects of compation and fluid flow in mudstones.- In: APLIN, A. C., FLEET, A. J. & MACQUAKER, J. H. S. (Eds): Mud and Mudstones: Physical and Fluid Flow Properties.- Geol. Society, Sp. Publ. 158, S. 73-78; London.

CLAUSER, C. (1992): Permeability of Cristalline Rocks.- EOS, Transactions, American Geophysical Union, Vol 73 (21), S. 233 u. 237.

DE CANNIÈRE, P., PUT, M. J. & NEERDAEL, B. (1994): Hydraulic Characterization of the Boom Clay Formation from the HADES Underground Laboratory in Mol: Evolution and Assessment of the Piezometric Techniques.- In: Proceedings of an International Workshop: Hydraulic and Hydrochemical Characterisation of Argillaceous Rocks, OECD Documents, S. 159-166; Nottingham (UK).

DEUTLOFF, O., TEICHMÜLLER, M., TEICHMÜLLER, R. & WOLF, M. (1980): Inkohlungsuntersuchungen im Mesozoikum des Massivs von Vlotho (Niedersächsisches Tektogen).- N. Jb. Geol. Paläont., Mh, S. 321 - 241.

GEOUM - Büro Geowissenschaften & Umwelt GbR (1999): Studie zur Beurteilung der Langzeitsicherheit der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen.- Unveröffentlicht.

GRONEMEIER, K. (1990): Ergebnisbericht hydrogeologische Erkundung zur Sicherung der SAD Münchehagen.- Dr. Pieles + Dr. Gronemeier Consulting GmbH, 420 S.; unveröffentlicht.

GUYONNET, D., KELLEY, V., LAVANCHY, J.-M., LÖW, S. & MISHRA, S. (1992): Interpretation of crosshole hydraulic tests and a pilot fluid logging test for se-

lected boreholes within the BK-Site.- In: VOMVORIS, S. & FRIEG, B. (Eds): NAGRA - Technical Report 91-01; Wettingen (Schweiz).

HEKEL, U. (1992): Forschungsprojekt "Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien" (FGmT).- Textband, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 190 S..

HOEHN, E., FIERZ, TH. & THORNE, P. (1990): Grimsel Test Site - Hydrogeological characterisation of the migration experimental area at the Grimsel Test Site.- NAGRA - Technical Report 89-15; Wettingen (Schweiz).

HÖLTING, B. (1989): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie.- Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag), 3. Auflage.

LEECH, R. E. J., KENNEDY, K. G. & GEVAERT, D. (1984): Sondierbohrung Böttstein - Hydrogeologic testing of crystalline rocks.- NAGRA - Technischer Bericht 85-09, 156 S.; Baden (Schweiz).

LÖFMAN, J. (1999): Site Scale Groundwater Flow in Hästholmen.- Posiva Oy 99-12, S. 123; Helsinki, Finnland.

LOHMANN, S. W. (1972): Groundwater Hydraulics.- U.S. Geol. Survey Prof. Paper 708; Washington (U.S. Government Print Office).

LONG, J. C. S., WITHERSPOON, P. A., WILSON, C. R. & DUBOIS, A. O. (1981): Large-Scale Permeability Testing at Stripa.- In: 3rd Invitational Well-Testing Symposium "Well Testing in Low Permeability Environments", National Technical Information Service, Proceedings, S. 38-44; Berkeley (Kalifornien, USA).

LOUIS, C. (1967): Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels.- Veröffentl. des Inst. f. Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 121 S.; Karlsruhe.

LUX, K.-H. (2002a): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten".- Ausarbeitung für den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte - AkEnd.

LUX, K.-H. (2002b): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige Gebirgsmechanische Voraussetzungen, Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen".- Ausarbeitung für den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte - AkEnd.

NEUMANN, S. P. (1990): Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media.- Water Resour. Res., 26(8), S. 1749.

NLFB - Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (1986): Geowissenschaftliche Vorsorgeuntersuchungen zur Standortfindung für die Ablagerung von Sonderabfällen.

OSTROWSKI, L. P. & KLOSKA, M. B. (1989): Final interpretation of hydraulic testing at the Siblingen borehole.- NAGRA - Technischer Bericht, 89-10, 95 S.; Baden (Schweiz).

POTERI, A. & LAITINEN, M. (1999): Site to canister scale flow and transport in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara.- Posiva Report 99-15, 156 S.; Helsinki (Finnland).

RHODE, P. (1985): Geologische Karte Niedersachsen, Blatt Niedernwöhren Nr 3620, mit Erläuterungen.

SCHÄDEL, K. & STOBER, I. (1987): Zur Wasserführung des kristallinen Grundgebirges in Südwestdeutschland.- Geol. Jb. C 50, S. 3-23.

SCHULZE-MAKUCH, D. & MALIK, P. (2000): The scaling hydraulic properties in granitic rocks.- In: STOBER, I. & BUCHER, K. (Hrsg.): Hydrogeology of Crystalline Rocks.- S. 127-138; Kluwer (Netherlands).

STOBER, I (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.- 191 S.; Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag).

TSANG, C.F. & HUFSCHMIED, P. (1988): A borehole fluid conductivity logging method für the determination of fracture inflow parameters.- Nagra Technischer Bericht 88-13, 37 S.; Baden (Schweiz).

WITTKE - Prof. Dr.-Ing. W. Wittke., Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH (1991): Endlager Konrad - Schachtverfüllung / Alte Bohrungen, Teil AI und AII: Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (343 m-Sohle und 541 m-Sohle), unveröffentl. Bericht; Aachen.

Detlef Appel & Walter Habler

Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung

Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung

Anhang

Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit

Detlef Appel & Walter Habler

Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit

Inhalt

		Seite
A-1	**Einleitung**	**A-1**
A-2	**Installation und Start des Datenbankprogramms**	**A-3**
A-3	**Aufbau der Datensammlung (Tabellen)**	**A-4**
A-4	**Abfragen**	**A-12**
A-5	**Formulare**	**A-14**
A-6	**Arbeiten mit der Datenbank**	**A-19**
A-6.1	**Formular "Start"**	**A-19**
A-6.2	**In der Datenbank blättern und Berichte abrufen**	**A-20**
A-6.2.1	Formular "Untersuchungsgebiete"	A-20
A-6.2.2	Formular "Versuchsreihen"	A-21
A-6.2.3	Formular "Versuche"	A-22
A-6.2.4	Formulare für die Markierungsversuche Münchehagen und Grimsel	A-22
A-6.2.5	Formular "Quellen"	A-24
A-6.3	**Neue Datensätze eingeben**	**A-25**
A-6.3.1	Formular "Dateneingabe"	A-25
A-6.3.2	Formular "Dateneingabe Untersuchungsgebiete"	A-27
A-6.3.3	Formular "Dateneingabe Versuchsreihen"	A-27
A-6.3.4	Formular "Dateneingabe Quellen"	A-28
A-6.3.5	Formular "Dateneingabe Versuche"	A-30
A-6.4	**Nach Datensätzen suchen und Suchauswahl exportieren**	**A-30**
A-6.4.1	Formular "Datensuche"	A-31
A-6.4.2	Formular "Quellen suchen"	A-33
A-6.5	**Löschen und Bearbeiten von Daten**	**A-33**
A-6.5.1	Formular "Löschen/Bearbeiten"	A-34
A-6.5.2	Formular "Untersuchungsgebiete Löschen/Bearbeiten"	A-35
A-6.5.3	Formular "Versuchsreihen Löschen/Bearbeiten"	A-35
A-6.5.4	Formular "Quellen Löschen/Bearbeiten"	A-35
A-6.5.5	Formular "Versuche Löschen/Bearbeiten"	A-35

Seite

Tabellenverzeichnis

Tab. A-1	Generelle Struktur von Access-Tabellen	A-4
Tab. A-2	Access-Tabellen der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit	A-5
Tab. A-3	Inhalt der Tabelle "Untersuchungsgebiete"	A-7
Tab. A-4	Inhalt der Tabelle "Versuchsreihen"	A-7
Tab. A-5	Inhalt der Tabelle "Versuche"	A-8
Tab. A-6	Inhalt der Tabelle "Markierungsversuche Grimsel"	A-10
Tab. A-7	Inhalt der Tabelle "Markierungsversuche Münchehagen"	A-10
Tab. A-8	Inhalt der Tabelle "Quellen"	A-11
Tab. A-9	Inhalt der Tabelle "Versuchsreihen-Quell-ID"	A-11
Tab. A-10	Formulare, ihre Aufgaben und Zugriffsrechte auf den Datenbestand	A-16
Tab. A-11	Schaltflächen des Formulars "Start"	A-19
Tab. A-12	Schaltflächen des Formulars "Versuchsreihen"	A-21
Tab. A-13	Schaltflächen des Formulars "Dateneingabe"	A-26
Tab. A-14	Eingabefelder des Formulars "Versuchsreihen"	A-28

Abbildungsverzeichnis

Abb. A-1	Verknüpfungsschema der Datentabellen	A-5
Abb. A-2	Tabellenverknüpfungen über Schlüsselfelder	A-6
Abb. A-3	Formularschema	A-15
Abb. A-4	Formular "Start"	A-19
Abb. A-5	Formular "Untersuchungsgebiete"	A-20
Abb. A-6	Formular "Versuchsreihen" 1. Registerkarte	A-21
Abb. A-7	Formular "Versuche" 1. Registerkarte	A-22
Abb. A-8	Formular "Markierungsversuche Münchehagen"	A-23
Abb. A-9	Formular "Markierungsversuche Grimsel"	A-24
Abb. A-10	Formular "Quellen"	A-24
Abb. A-11	Formular "Dateneingabe"	A-26
Abb. A-12	Schema der Dateneingabe	A-26
Abb. A-13	Formular "Dateneingabe Untersuchungsgebiete"	A-27
Abb. A-14	Formular "Dateneingabe Versuchsreihen"	A-29
Abb. A-15	Formular "Dateneingabe Quellen"	A-29
Abb. A-16	Formular "Dateneingabe Versuche"	A-31
Abb. A-17	Formular "Datensuche"	A-32
Abb. A-18	Formular "Quellen suchen"	A-33
Abb. A-19	Formular "Löschen/Bearbeiten"	A-34
Abb. A-20	Formular "Untersuchungsgebiete Löschen/Bearbeiten"	A-36
Abb. A-21	Formular "Versuchsreihen Löschen/Bearbeiten"	A-36
Abb. A-22	Formular "Quellen Löschen/Bearbeiten"	A-37
Abb. A-23	Formular "Versuche Löschen/Bearbeiten"	A-37

A-1 Einleitung

Die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit enthält die Datensammlung des Projektes "Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung". Die Daten umfassen die Ergebnisse von In-situ-Versuchen zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit sowie Angaben zur Lokalisierung der Versuchsorte und zur Charakterisierung der Rahmenbedingungen der Versuche. Die einzelnen Versuche sind in Versuchsreihen zusammengefasst und Untersuchungsgebieten zugeordnet.

Die Datenbank wurde mit dem relationalen Datenbankprogramm Access 2000 von Microsoft erstellt. Die Datenbank kann mit Access 2000 oder einer Laufzeit-Version von Access 2000 benutzt werden (Kapitel A-2). Die Laufzeit-Version ist zusammen mit der Datensammlung auf der CD-ROM untergebracht.

Die innere Struktur von Access-Datenbanken wird durch eine Reihe von Objekten gebildet. Für die Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit wurden Objekte folgender Objektgruppen erzeugt, die in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben werden:

- Tabellen (enthalten die Datensammlung),
- Abfragen (zur Datenselektion),
- Formulare (Bildschirmfenster zur Arbeit mit der Datenbank),
- Berichte (Ausgaben von ausgewählten Datenteilen für Drucker und Datei).

Auf die Objektgruppe "Tabellen" wird ausführlich in Kapitel A-3 eingegangen, auf die Gruppen "Abfragen" und "Formulare" in den Kapiteln A-4 und A-5. Die Operationen mit diesen Objektgruppen sowie die Erstellung von Berichten werden im Detail in Kapitel A-6 beschrieben.

Mit der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit können folgende Operationen durchgeführt werden:

Auffinden von Einzeldaten, Sortieren, Filtern und Extrahieren des Datenbestandes

Jeder Datenwert ist über sogenannte Schlüsselfelder und Spaltenbezeichnungen eindeutig im Tabellensystem ansprechbar. Daten können auf zwei verschiedene Weisen aufgefunden werden:

- **Top-down-Suche:** Damit können über Untersuchungsgebiete und Versuchsreihen die Daten einzelner Versuche selektiert werden. Die Auswahl kann in Berichten ausgedruckt oder in andere Datenformate exportierten werden (Kapitel A-6.2).
- **Filtersuche:** In einer besonderen Bildschirmmaske können Datensätze nach verschiedenen Kriterien gefiltert werden (Beispiel: alle k_f-Werte aus dem Tiefenbe-

reich 300 bis 1.500 m für den Gesteinstyp Granit). Die resultierenden Datensätze werden in Tabellenform dargestellt und lassen sich in Excel-Tabellen exportieren (Kapitel A-6.4).

Aufnahme neuer Datensätze

Zur Aufnahme neuer Daten kann das Formular "Dateneingabe" aufgerufen werden. Darin kann in weitere Formulare zur Dateneingabe verzweigt werden (Kapitel A-6.3).

Datenkorrektur und Löschen von Datensätzen

Für das Löschen und Korrigieren von Datensätzen sind eine Reihe spezieller Formulare (Bildschirmmasken) vorgesehen. Sie ermöglichen die strikte Trennung dieser Datenbankoperationen von anderen Datenbankbereichen, wo diese Möglichkeiten ausgeschlossen sind (Kapitel A-6.5).

Zur **Verminderung von Datenredundanz** und **Verhinderung von Dateninkonsistenz** ist jeder Datenwert in der Datenbank nur einmal vorhanden. Dies wird durch die Tabellenstruktur mit 1:n-Beziehungen ermöglicht. Die Tabellen sind über Schlüsselfelder mit referentieller Integrität miteinander verbunden. Dadurch können beim Löschen und Aktualisieren der Daten Inkonsistenzen verhindert werden (Kapitel A-3).

A-2 Installation und Start des Datenbankprogramms

Installation und Benutzung der Datenbank können über zwei Wege erfolgen:

1) Arbeiten unter Access

Ist das Datenbankprogramm Access von Microsoft (Version 2000 oder höher) auf dem PC vorhanden, kann die Datenbank mit folgenden Schritten geöffnet werden:

1. Starten Sie Access.
2. Klicken Sie auf "Datei" und "Öffnen".
3. Wählen Sie das CD-ROM-Laufwerk und
4. Doppelklicken Sie auf den Dateinamen "Gebirgsdurchlässigkeit.mdb" oder klicken Sie auf "Öffnen".

Access wird darauf hinweisen, dass keine Änderungen an der Datenbank vorgenommen werden können. Soll der Datenbestand verändert und abgespeichert werden, muss die Datei "Gebirgsdurchlässigkeit.mdb" zuvor auf die Festplatte des PC kopiert werden. Die Datenbank kann dann durch Doppelklicken auf die Kopie geöffnet werden. Als erstes Datenbankfenster erscheint automatisch das Formular "Start" (Kapitel A-6.1), von dem aus die Formulare für Datenbankoperationen zugänglich sind.

2) Arbeiten mit der Laufzeit-Version von Access

Wenn Access nicht auf Ihrem PC eingerichtet ist, muss vor dem Start der Datenbank die Access-Laufzeit-Version (Runtime-Version) installiert werden:

1. Öffnen Sie den Ordner "Runtime" auf der CD-ROM.
2. Starten Sie das Programm "Setup". Die Laufzeit-Version von Access (einschließlich benötigter Dateien des Internet-Explorers) wird auf der Festplatte installiert.
3. Doppelklicken Sie auf den Dateinamen "Gebirgsdurchlässigkeit.mdb". Es erscheint das erste Datenbankfenster (Formular "Start"). Wenn Daten bearbeitet werden sollen, muss die Datei "Gebirgsdurchlässigkeit.mdb" auf die Festplatte kopiert und von dort aus gestartet werden.

Die Laufzeit-Version kann durch nochmaliges Ausführen von "Setup" wieder deinstalliert werden.

Bearbeitung der Datenbankstruktur

Für die Bearbeitung der Datenbankstruktur sind die Objekte, Tabellen Abfragen, Formulare und Berichte, im Datenbankfenster zugänglich. Unter Access gelangt man dorthin durch Schließen des Formulars "Start", das sich automatisch beim Programmstart öffnet. Mit der Laufzeit-Version ist die Bearbeitung der Datenbankstruktur nicht möglich.

A-3 Aufbau der Datensammlung (Tabellen)

Kern der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit ist die Datensammlung. Wie generell bei relationalen Datenbanken setzt sie sich aus einer Reihe von miteinander verknüpften Tabellen zusammen. Jede Tabelle enthält nur eine bestimmte Teilmenge des gesamten Datenbestandes. Durch die Verknüpfung der Tabellen wird erreicht, dass bestimmte übergeordnete Parameter nicht in jedem Datensatz wiederholt werden müssen. Beispielsweise brauchen erläuternde Angaben zum Untersuchungsgebiet nicht in jeden Datensatz der zugehörigen Einzelversuche aufgenommen zu werden. Dadurch werden die Datenredundanz gemindert und Dateninkonsistenzen verhindert.

Jede Zeile einer Tabelle entspricht einem Datensatz (Tab. A-1). Die Zeilen werden durch Spalten untergliedert, die die Datenwerte der erfassten Parameter enthalten. Jede Tabelle enthält zudem die sogenannte Primärschlüssel-Spalte mit den Kennungen eines jeden Datensatzes. Durch diese Kennwerte ist jeder Datensatz eindeutig gekennzeichnet. Da jede Spalte als Überschrift eine Spaltenbezeichnung aufweist, kann zudem jeder einzelne Datenwert eines Datensatzes durch das Primärschlüssel-Feld einer Zeile und die Spaltenüberschrift eindeutig angesprochen werden. Die Primärschlüssel-Spalten sind außerdem das wesentliche Element zur Verknüpfung verschiedener Tabellen (s. u.). Die in der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit enthaltenen Tabellen und die Namen der zugehörigen Primärschlüssel-Spalten sind in Tab. A-2 aufgeführt.

Datensatz	Primärschlüssel	Fremdschlüssel	Parameter A	Parameter B
1	Versuchskennung	Versuchsreihen-kennung	Datenwert	Datenwert
2	Versuchskennung	Versuchsreihen-kennung	Datenwert	Datenwert
3	Versuchskennung	Versuchsreihen-kennung	Datenwert	Datenwert
n	Versuchskennung	Versuchsreihen-kennung	Datenwert	Datenwert

Tab. A-1 Generelle Struktur von Access-Tabellen (Beispiel Tabelle "Versuche")

Zwischen den Tabellen bestehen genau festgelegte hierarchische Beziehungen, die schematisch in Abb. A-1 dargestellt sind.

Die Verknüpfung zwischen den verschiedenen Ebenen in Abb. A-1 erfolgt dergestalt, dass die Tabellen einer nachgeordneten Ebene (z. B. "Versuche") auch die zugehörige Kennung der Primärschlüssel-Spalte der nächsthöheren Ebene ("Versuchsrei-

hen") enthalten, wie dies beispielhaft in Tab. A-1 dargestellt ist. Auf diese Weise wird jeder Versuch mit der zugehörigen Versuchsreihe verknüpft. Da jeder Versuch auch mit dem entsprechenden Untersuchungsgebiet verknüpft sein muss, enthält die Tabelle "Versuchsreihen" auch den Primärschlüssel aus der Tabelle "Untersuchungsgebiete". Dieser wird in der Tabelle "Versuchsreihen" als "Fremdschlüssel" bezeichnet, da er aus der "fremden" Tabelle "Untersuchungsgebiete" stammt. Insgesamt ergeben sich so die in Abb. A-2 dargestellten Beziehungen zwischen den Tabellen.

Tabellenname	**Name der Primärschlüssel-Spalte**
Untersuchungsgebiete	Untersuchungsgebiet
Versuchsreihen	Versuchsreihe
Versuche	Versuchskennung
Versuchsreihen-Quell-ID	Hilfs-ID
Quellen	Quell-ID
Markierungsversuche Münchehagen	Versuchskennung
Markierungsversuche Grimsel	Versuchskennung

Tab. A-2 Access-Tabellen der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit

(die Primärschlüssel-Spalten enthalten die eindeutigen Kennungen für jeden Datensatz der Tabellen)

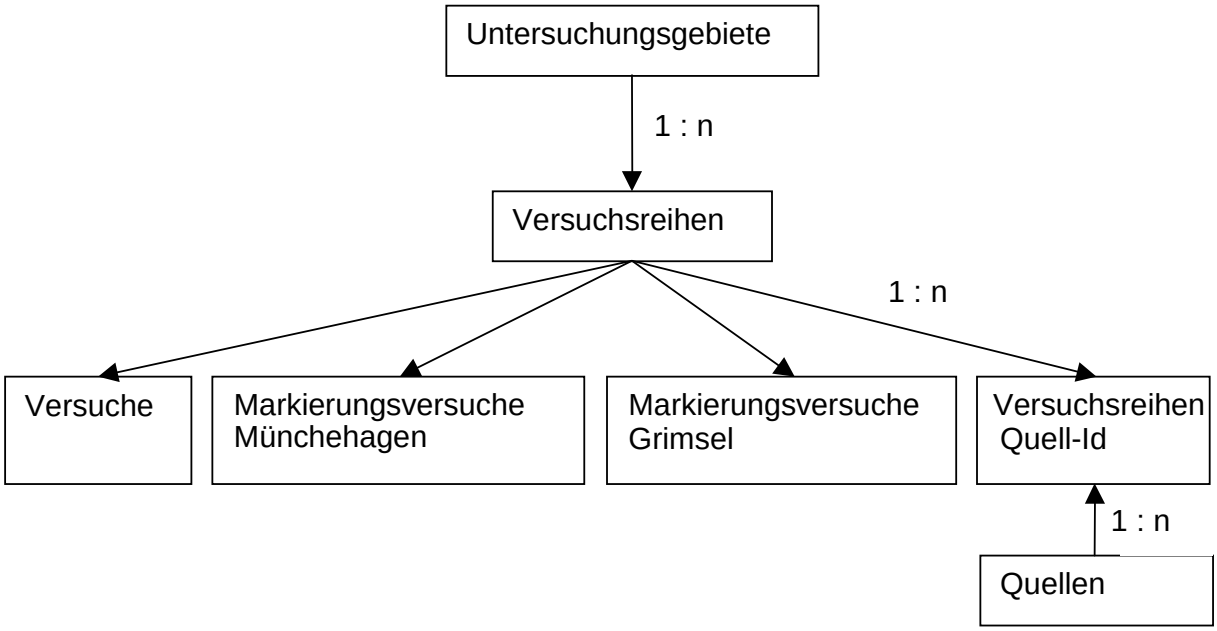


Abb. A-1 Verknüpfungsschema der Datentabellen

Die Angaben "1 : n" in Abb. A-1 bedeuten, dass jeweils einem Datensatz in einer höheren Ebene der Tabelle mehrere (n) Datensätze in der nächsttieferen Ebene zugeordnet sein können. Beispielsweise sind dem Untersuchungsgebiet "Grimsel" vier Versuchsreihen zugeordnet. Mit jeder dieser Versuchsreihen ist wiederum eine bestimmte Anzahl zugehöriger Versuche in der Tabelle "Versuche" verknüpft. Von dieser generellen Struktur gibt es zwei Abweichungen:

- Die Daten der beiden Markierungsversuche "Grimsel" und "Münchehagen" lassen sich wegen ihrer von den übrigen Daten abweichendem Aufbau nicht in die Struktur der Tabelle "Versuche" integrieren. Sie erfordern andere Spaltenbeschriftungen. Deswegen wurden die Daten dieser Versuche in zwei gesonderten Tabellen abgelegt. Die Tabelle "Versuchsreihen der Markierungsversuche" verweist daher auf die Versuche in den Tabellen "Markierungsversuche Grimsel" bzw. "Markierungsversuche Münchehagen" und nicht auf die Tabelle "Versuche".
- Jede Versuchsreihe in der Datenbank kann aus einer oder mehreren Quellen stammen. Andererseits kann jede Quelle mehr als eine Versuchsreihe enthalten. Daher entspricht die Beziehung zwischen der Tabelle "Versuchsreihen" und der Tabelle "Quellen" einem Verhältnis "m : n". Dieser Beziehungstyp kann nur über eine Hilfstabelle verwirklicht werden, die zwischen Versuchsreihen und Quellen vermittelt. Sie hat die Bezeichnung "Versuchsreihen-Quell-ID". Auf diese Weise wird die Beziehung "m : n" zwischen Versuchsreihen und Quellen durch zwei Beziehungen "1 : n" aufgelöst.

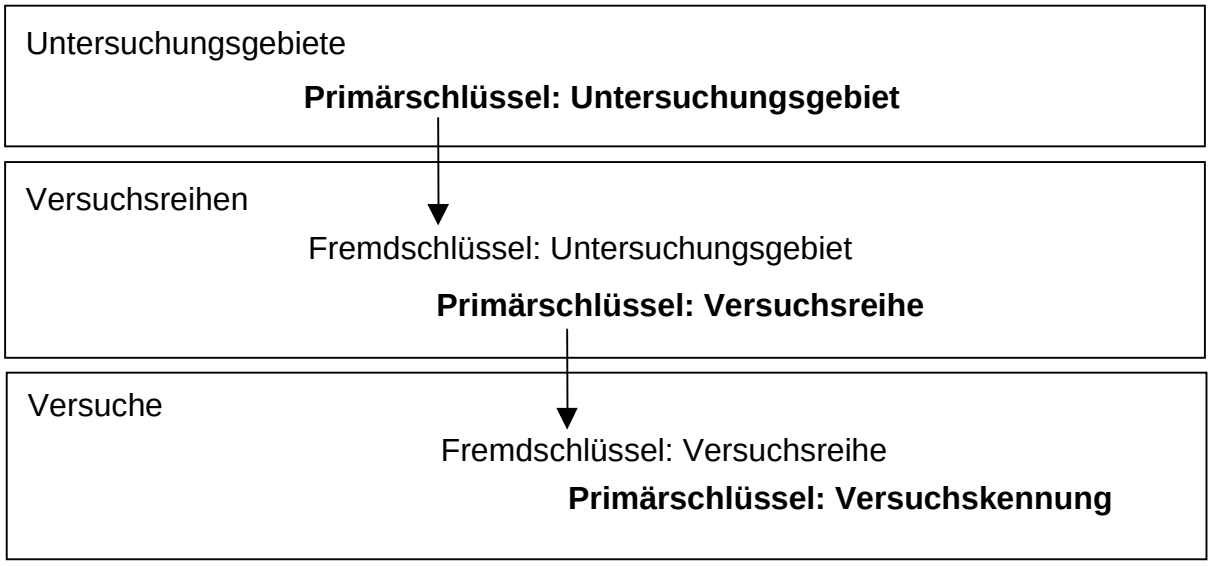


Abb. A-2 Verknüpfungen zwischen Tabellen über Schlüsselfelder

In den Tabellen A-2 – A-8 sind die Daten-Tabellen der Datenbank, die Bezeichnungen der Spalten, der zugehörige Datentyp und Bemerkungen zum Inhalt der Spalten aufgelistet. Es werden folgende Datentypen verwendet:

- Text (maximal 255 Zeichen),
- Memo (maximal 64000 Zeichen),
- Double (Bruchzahlen mit einer Genauigkeit von 15 Dezimalstellen),
- long Integer (nur ganze Zahlen von -2.147.483.648 bis +2.147.483.647).

Spaltenbezeichnung	**Datentyp**	**Bemerkung**
Untersuchungsgebiet	Text	Primärschlüssel
Lage	Memo	Lagebeschreibung
Land	Text	

Tab. A-3 Inhalt der Tabelle "Untersuchungsgebiete"

Spaltenbezeichnung	**Datentyp**	**Bemerkung**
Untersuchungsgebiet	Text	Fremdschlüssel von Tabelle "Untersuchungsgebiete"
Versuchsreihe	Text	Primärschlüssel
Überschrift	Text	Kurze Aussage über die Art der Versuchsreihe
Ortsangabe	Memo	Angaben zur Lage der Versuchsreihe
Gesteine	Memo	Beschreibung der untersuchten Gesteinstypen
Gesteinsgefüge	Memo	Beschreibung der Lagerung und des Gefüges der untersuchten Abfolge
Testbereich	Text	Aussagen zum Testbereich der gesamten Versuchsreihe
Testarten	Memo	Beschreibung
Testauswertung	Memo	Beschreibung
Skalenbereich	Text	Kleinskalig, mittelskalig, großskalig
Erfasster Bereich	Text	Z. B. nähere Bohrlochumgebung
Versuchsreihe: Bemerkungen	Memo	

Tab. A-4 Inhalt der Tabelle "Versuchsreihen"

Spaltenbezeichnung	**Datentyp**	**Bemerkung**
Versuchsreihe	Text	Fremdschlüssel von Tabelle "Versuchsreihen"
Versuchskennung	Text	Primärschlüssel
Testtyp	Text	Z. B. Packertest
Test	Text	Z. B. Pulstest
Top [m]	Double	Bei Packertests: Oberkante des Testintervalls in m unter Geländeoberfläche
Bottom [m]	Double	Bei Packertests: Unterkante des Testintervalls in m unter Geländeoberfläche
Intervall [m]	Double	Bei Packertests: Länge des getesteten Abschnitts im Bohrloch
Transmissivität (min)	Double	Transmissivität [m^2/s], Minimalwert des Versuchs
Transmissivität (max)	Double	Transmissivität [m^2/s], Maximalwert des Versuchs
Transmissivität (bester Versuchswert)	Double	Transmissivität [m^2/s], in der Quelle als bester Versuchswert aufgeführt
k_f-Wert (min)	Double	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s], Minimalwert des Versuchs
k_f-Wert (max)	Double	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s], Maximalwert des Versuchs
k_f-Wert (bester Versuchswert)	Double	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s], in der Quelle als bester Versuchswert aufgeführt
Speicherkoeffizient (min)	Double	Minimalwert des Versuchs
Speicherkoeffizient (max)	Double	Maximalwert des Versuchs
Speicherkoeffizient (bester Versuchswert)	Double	In der Quelle als bester Versuchswert aufgeführt
Spezifischer Speicherkoeffizient (min)	Double	Minimalwert des Versuchs
Spezifischer Speicherkoeffizient (max)	Double	Maximalwert des Versuchs
Spezifischer Speicherkoeffizient (bester Versuchswert)	Double	In der Quelle als bester Versuchswert aufgeführt

Tab. A-5 Inhalt der Tabelle "Versuche" (Fortsetzung auf Seite A-9)

Spaltenbezeichnung	**Datentyp**	**Bemerkung**
Transmissivität	Double	Bester Versuchswert oder vorliegender Einzelwert; wenn Minimal- und Maximalwerte vorliegen: (min + max) / 2
k_f-Wert	Double	Bester Versuchswert oder vorliegender Einzelwert; wenn Minimal- und Maximalwerte vorliegen: (min + max) / 2
Speicherkoeffizient	Double	Bester Versuchswert oder vorliegender Einzelwert; wenn Minimal- und Maximalwerte vorliegen: (min + max) / 2
Spezifischer Speicherkoeffizient	Double	Bester Versuchswert oder vorliegender Einzelwert; wenn Minimal- und Maximalwerte vorliegen: (min + max) / 2
Mittlere Testtiefe [m]	Double	Aus Quelle übernommen oder Top + (Intervall / 2)
Gesteinstyp	Text	Z. B. Ton/Tonstein
Gesteinsmerkmale	Text	Z. B. mit Kalkbänken
Stratigraphie: System (Serie)	Text	Z. B. Trias (Buntsandstein)
Stratigraphie: Stufe, Zone, Gesteinsname	Text	Z. B. Aalenium, Opalinuston
Gefügeklasse	Text	Gefüge "gestört" oder "intakt" oder "keine Angabe"
Gesteinsgefüge, Lagerung, Tektonik	Text	Z. B. Klüfte, Bruchzone
Datenart	Text	Einzelwerte oder Mittelwerte
Datenherkunft	Text	Originalbericht oder zitierte Daten
Skala (Reichweite)	Text	Kleinskalig oder mittelskalig oder großskalig
Versuche: Bemerkung	Text	

Tab. A-5 Inhalt der Tabelle "Versuche" (Fortsetzung von Seite A-8)

Spaltenbezeichnung	**Datentyp**	**Bemerkung**
Versuchsreihe	Text	Fremdschlüssel
Versuchskennung	Text	Primärschlüssel
Testtyp	Text	Z. B. Markierungsversuch
Entfernung [m]	Double	Horizontale Entfernung zwischen Eingabe- und Messort
Erstankunftszeit (min)	Double	Erstes Auftreten des Tracers am Messort nach x Minuten
Erstankunftszeit [h]	Double	Erstes Auftreten des Tracers am Messort nach x Stunden
Abstandsgeschwindigkeit bei Erstankunftszeit [m/h]	Double	Aus dem ersten Tracer-Auftreten am Messort errechnete Abstandsgeschwindigkeit
Bemerkungen	Text	

Tab. A-6 Inhalt der Tabelle "Markierungsversuche Grimsel"

Spaltenbezeichnung	**Datentyp**	**Bemerkung**
Versuchsreihe	Text	Fremdschlüssel
Versuchskennung	Text	Primärschlüssel
Testtyp	Text	Z. B. Markierungsversuch
Testzeitraum	Text	Anfangs- und Enddatum des Versuchs
Eingabe-, Förderbrunnen: Abstand	Text	Z. B. 4/8: 18 m (Abstand Eingabebrunnen Nr. 4 - Förderbrunnen Nr. 8)
Tracer, Substanz: Menge Eingabevolumen	Text	Z. B. Lithium
Art der Eingabe	Text	Z. B. kontinuierlich
Ersteinsatz [h]	Double	Erstes Tracer-Auftreten nach x Stunden
Abstandsgeschwindigkeit bei Ersteinsatz [m/h]	Double	Aus erstem Tracer-Auftreten am Förderbrunnen errechnete Abstandsgeschwindigkeit
Max Konzentration nach h	Double	Auftreten der Maximalkonzentration nach x Stunden
Abstandsgeschwindigkeit bei Konz. max [m/h]	Double	Aus dem Auftreten der Maximalkonzentration am Förderbrunnen errechnete Abstandsgeschwindigkeit
Bemerkungen	Text	

Tab. A-7 Inhalt der Tabelle "Markierungsversuche Münchehagen"

Spaltenbezeichnung	**Datentyp**	**Bemerkung**
Quell-ID	long Integer	Primärschlüssel, Auto-Wert (wird automatisch gesetzt)
Autor(en)	Text	
Erscheinungsjahr	Double	
Titel	Text	
Erschienen in	Text	

Tab. A-8 Inhalt der Tabelle "Quellen"

Spaltenbezeichnung	**Datentyp**	**Bemerkung**
Hilfs-ID	long Integer	Primärschlüssel, Auto-Wert (wird automatisch gesetzt)
Quell-ID	long Integer	Fremdschlüssel von Tabelle "Quellen"
Versuchsreihe	Text	Fremdschlüssel von Tabelle "Versuchsreihen"

Tab. A-9 Inhalt der Tabelle "Versuchsreihen-Quell-ID"

A-4 Abfragen

Um Daten nach bestimmten Kriterien aus dem Datenbestand filtern zu können, werden Abfragen eingesetzt. Sie sind, wie die Tabellen, als Objekte definiert und unter der Objektgruppe "Abfragen" des Datenbankfensters aufgelistet (zur Bearbeitung s. Kapitel A-2). Werden in Formularen oder Berichten bestimmte Datensätze angezeigt, wurden sie vorher über eine Abfrage aus dem Datenpool gefiltert. Der Anwender muss sich nicht direkt mit den Abfragevorgängen befassen. Sie laufen im Hintergrund ab, wenn Formulare geöffnet, Suchkriterien eingegeben oder bestimmte Schaltflächen betätigt werden.

Abfragen stellen also das Bindeglied zwischen der Datensammlung (Tabellen) und den Darstellungsformen der Daten auf dem Bildschirm (Formulare) bzw. in Exportformaten (Papierform, Dateiform) dar. Diese Darstellungsformen werden in Kapitel A-6 ausführlich behandelt. Wichtige Abfragen der Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit sind:

Abfrage zur Selektion aller Versuche einer ausgewählten Versuchsreihe

Diese Abfrage wird ausgeführt, wenn im Formular "Versuchsreihen" auf die Schaltfläche "Versuche anzeigen" geklickt wird. Suchkriterium ist die ausgewählte Versuchsreihe. Das sich dabei öffnende Formular "Versuche" zeigt das Ergebnis der Abfrage. Die Bezeichnung der Abfrage lautet "Versuche filtern nach Text 27 in Form Versuchsreihe". Text 27 ist die interne Bezeichnung des Feldes "Kennung" im Formular "Versuchsreihen".

Abfrage zur Anzeige der Quellen einer ausgewählten Versuchsreihe

Diese Abfrage entspricht der oben beschriebenen Abfrage, nur dass als Ergebnis das Formular "Quellen" mit den Quellenangaben (Literaturzitaten usw.) erscheint. Interne Bezeichnung der Abfrage: "Abfrage-Versuchsreihen-Quell-ID-Quellen".

Abfrage zur Datenselektion mit Hilfe verschiedener Suchkriterien

Die Abfrage wird automatisch ausgeführt, wenn das Formular "Datensuche" aufgerufen wird. Die Ergebnisse der Abfrage erscheinen in Tabellenform im unteren Teil des Formulars. Dabei werden in Kurzform alle vorhandenen Versuche aufgelistet. Die Abfrage wird erneut ausgeführt, wenn auf die Schaltfläche "Suchen" im Hauptformular geklickt wird. Werden vorher in den Auswahlfeldern bestimmte Suchkriterien eingestellt, wird die Abfrage mit diesen Kriterien durchgeführt und das Ergebnis wieder in Tabellenform angezeigt. Interne Bezeichnung der Abfrage: "abfSuchen".

Abfrage, die Daten zweier Tabellen verknüpft

Diese Abfrage verknüpft die Spalten der Tabelle "Untersuchungsgebiete" und "Versuchsreihen". Sie bildet die Datengrundlage des Berichtes "Überblick: Untersu-

chungsgebiete und Versuchsreihen". Die Abfrage hat den Zweck, alle Datensätze beider Tabellen bereitzustellen. Interne Bezeichnung der Abfrage: "qryÜbersichtUntersuchungsgebieteUndVersuchsreihen".

Weitere Abfragen sind (interne Bezeichnungen):

- "Gefügeklasse-ohne-Duplikate",
- "Gesteinstyp-ohne-Duplikate",
- "Länder-ohne-Duplikate",
- "Skalohne-Duplikate",
- "Strat1-ohne-Duplikate",
- "Strat2-ohne-Duplikate",
- "Testtyp ohne Duplikate".

Diese Abfragen werden aufgerufen, wenn Auswahlschaltflächen in den Formularen angezeigt werden. Diese Schaltflächen liefern beim Anklicken eine Liste möglicher Eingaben z. B. eine Liste von Testtypen. Damit in diesen Listen alle Tabelleneinträge nur einmal angezeigt werden, sind diese speziellen Abfragen dazwischen geschaltet. Dadurch werden alle Duplikate ausgefiltert.

A-5 Formulare

Formulare werden dazu verwendet, Daten in Bildschirmfenstern darzustellen bzw. sie zu bearbeiten. Insgesamt gibt es fünf Formulargruppen: Start, Datensichtung, Dateneingabe, Datensuche und Löschen/Bearbeiten von Daten. Mit Hilfe der zugehörigen Formulare (s. Tab. A-10) können Daten angezeigt, gesucht, bearbeitet oder gelöscht sowie ausgewählte Daten in Textverarbeitungsprogramme und Tabellenkalkulationsprogramme exportiert oder als sogenannte Berichte ausgedruckt werden. Wie die Formulare untereinander verknüpft sind, geht aus Abb. A-3 hervor.

Über das Formular "Start", das automatisch beim Öffnen der Datenbank angezeigt wird, kann auf die einzelnen Formulare zugegriffen werden. Der Umgang mit ihnen wird in Kapitel A-6 im Detail beschrieben. Dort ist auch ihr Erscheinungsbild auf dem Bildschirm abgebildet (Abb. A-4 - A-11 u. A-13 - A-23). Im Folgenden werden einige für alle Formulare zutreffende Merkmale erläutert:

Registerflächen

Formulare können aus mehreren Seiten bestehen. Sie werden auf dem Bildschirm als graue Registerflächen dargestellt. Um eine andere Seite bzw. eine andere Registerfläche anzuzeigen, muss auf die Registerbeschriftungen in der obersten Zeile des Registers geklickt werden (Beispiel in Abb. A-7: Im Formular "Versuche" wird durch Klicken auf die Beschriftung "Gestein" oder "Messwerte" die entsprechende Registerfläche angezeigt).

Schaltflächen

In den Formularen werden Schaltflächen mit **Piktogrammen** (Icons) für wiederkehrende Aufgaben verwendet. Die Aktionen, die von diesen Schaltflächen gestartet werden, sind auf allen Formularen gleich:

Schließt das Formular und kehrt zum vorher gehenden Formular zurück

Vorschau auf eine druckbare Liste (Berichtsvorschau)

Bericht drucken (vordefinierte Datenliste)

Export des Berichts in verschiedene wählbare Dateiformate (s. u.)

Senden des Berichts in verschiedenen Dateiformaten als Anhang zu einer e-mail. Innerhalb der MS-Office-Umgebung wird Outlook mit der Berichtsdatei als Anhang zu einer leeren e-mail geöffnet.

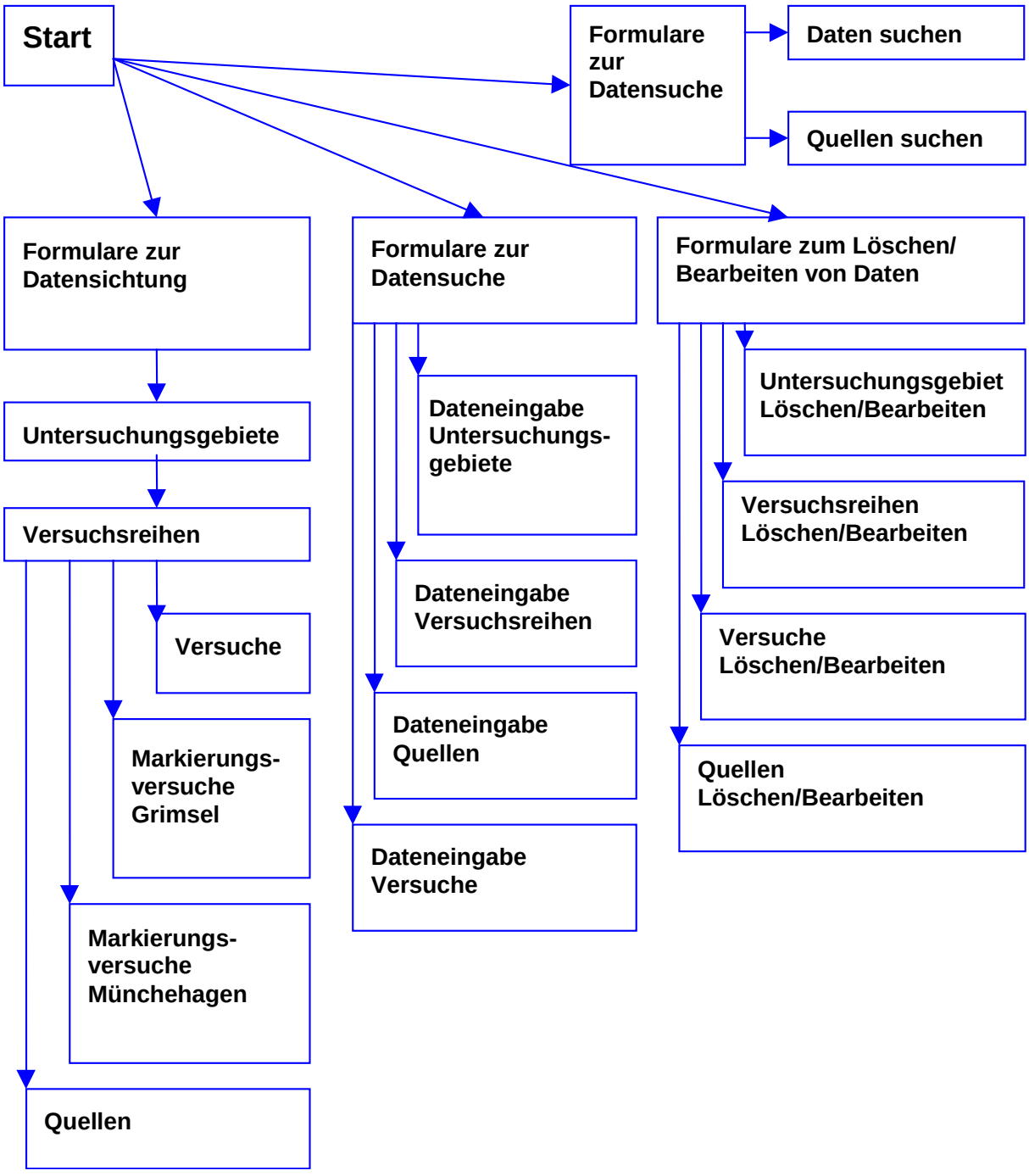


Abb. A-3 Formularschema

Formularname	**Aufgaben**	**Einschränkungen**
Start	Einstieg in die Datenbank	Keine
Untersuchungsgebiete	Untersuchungsgebiete anzeigen, Berichte	Nicht bearbeiten, nicht löschen
Versuchsreihen	Versuchsreihen anzeigen, Berichte	Nicht bearbeiten, nicht löschen
Quellen	Quellen anzeigen	Nicht bearbeiten, nicht löschen
Versuche	Versuche anzeigen, Berichte	Nicht bearbeiten, nicht löschen
Dateneingabe	Einstieg in die Dateneingabe	Keine
Dateneingabe Untersuchungsgebiete	Neues Untersuchungsgebiet anlegen und speichern	Nur anfügen möglich
Dateneingabe Versuchsreihen	Neue Versuchsreihen anlegen und speichern	Nur anfügen möglich
Dateneingabe Quellen	Neue Quellen anlegen und speichern	Nur anfügen möglich
Dateneingabe Versuche	Neue Versuche anlegen und speichern	Nur anfügen möglich
Datensuche	Nach Datensätzen suchen und als Tabelle exportieren	Nicht bearbeiten, nicht löschen
Unterformular Datensuche	Selektierte Datensätze in Tabellenform anzeigen	Nicht bearbeiten, nicht löschen
Quellen suchen		Nicht bearbeiten, nicht löschen
Markierungsversuche Grimsel	Versuche anzeigen, Berichte	Nicht bearbeiten, nicht löschen
Markierungsversuche Münchehagen	Versuche anzeigen, Berichte	Nicht bearbeiten, nicht löschen
Löschen/Bearbeiten	Einstiegsformular zur Datenmanipulation	Keine
Untersuchungsgebiete Löschen/Bearbeiten	Bearbeiten und Löschen von Untersuchungsgebieten mit allen Versuchsreihen und Versuchen	Bearbeiten und Löschen möglich

Tab. A-10 Formulare, ihre Aufgaben und Zugriffsrechte auf den Datenbestand

(Fortsetzung auf Seite A-17)

Formularname	Aufgaben	Einschränkungen
Versuchsreihen Löschen/Bearbeiten	Bearbeiten und Löschen von Versuchsreihen mit allen Versuchen	Bearbeiten und Löschen möglich
Quellen Löschen/Bearbeiten	Bearbeiten und Löschen von Quellen	Bearbeiten und Löschen möglich
Versuche Löschen/Bearbeiten	Bearbeiten und Löschen von Versuchen	Bearbeiten und Löschen möglich

Tab. A-10 Formulare, ihre Aufgaben und Zugriffsrechte auf den Datenbestand

(Fortsetzung von Seite A-16)

Daneben gibt es Schaltflächen mit **Texten**, aus denen die durch Anklicken der Schaltfläche veranlasste Aktion hervorgeht (z. B. Schaltflächen des Formulars "Start" (s. Abb. A-4 u. Tab. A-11).

Dateiformate für den Export von Berichten

Für den Export von Berichten (Listen) stehen folgende Dateiformate zu Verfügung:

- **Snapshot Format**: Entspricht dem Access-Format, wie es beim Ausdruck von Berichten erscheint. Dieses Format eignet sich, um eine elektronische Kopie eines Berichtes zu speichern oder als Anhang zu einer e-mail zu versenden. Mit dem Snapshot-Viewer von MS-Office können diese Berichte betrachtet, gedruckt oder versendet werden.
- **Rich Text Format (RTF)**: Speichert alle Formatierungen und konvertiert Formatierungen zu Anweisungen, die von anderen Programmen, einschließlich kompatiblen Microsoft-Programmen, gelesen und interpretiert werden können. Dieses Format eignet sich, um Berichte im Textverarbeitungsprogramm MS-Word (oder kompatibel) weiter zu verarbeiten. Teilweise wird aber das Access-Berichtsformat nicht korrekt wiedergegeben, Korrekturen von Hand sind dann nötig.
- **MS-DOS Text**: Verwendet den erweiterten ASCII-Zeichensatz, der standardmäßig in MS-DOS-basierten Programmen verwendet wird. Dieses Format ist nur ein Notbehelf, da viele Access-Formatierungen verloren gehen.
- **Microsoft Excel**: Reines Tabellenformat, eignet sich für den Export von Berichtstabellen wie sie im Formular "Daten suchen" bereitgestellt werden.
- **HTML**: Webseiten Format. Die einzelnen Seiten des Berichtes werden als Webseiten exportiert, die mit einem Browser betrachtet und ins Internet gestellt werden können.

Popup-Fenster

Wenn mit dem Mauszeiger auf Schaltflächen oder Eingabefelder gezeigt wird, werden teilweise spezielle Fenster (Popup-Fenster) mit weiteren kurzen Erläuterungen zu den Schaltflächen oder den erwarteten Eingaben geöffnet (Beispiele: gelbe Felder in Abb. A-13 u. A-16).

Navigationsleisten

Erscheint in der untersten Zeile des Formularfensters die Bezeichnung "Datensatz", kann mit den Pfeiltasten auf dieser Navigationsleiste zwischen den Datensätzen hin und her geschaltet werden. Was ein Datensatz ist, hängt vom Inhalt des aktuellen Formulars ab. Beispielsweise gehören im Formular "Versuchsreihe" alle Angaben einer Versuchreihe zu einem Datensatz, im Formular "Versuche" entspricht ein Datensatz den Daten eines Versuches.

A-6 Arbeiten mit der Datenbank

A-6.1 Formular "Start"

Das Formular "Start" wird automatisch beim Öffnen der Datenbank angezeigt (Kapitel A-2). Es enthält Schaltflächen für das Anzeigen, Suchen, Eingeben, Bearbeiten und Löschen von Datensätzen (Abb. A-4). Die Schaltflächen öffnen die in Tab. A-11 angegebenen Formulare.

Abb. A-4 Formular "Start"

Schaltfläche	**Aktion beim Anklicken**
In der Datenbank blättern und Berichte abrufen	Öffnet Formular "Untersuchungsgebiete"
Neue Datensätze eingeben	Öffnet Formular "Dateneingabe"
Nach Datensätzen suchen und Suchauswahl exportieren	Öffnet Formular "Daten suchen"
Nach Quellen suchen	Öffnet Formular "Quellen suchen"
Datensätze löschen oder bearbeiten	Öffnet Formular "Löschen/Bearbeiten"
Datenbank schließen	Beendet das Datenbankprogramm

Tab. A-11 Schaltflächen des Formulars "Start"

A-6.2 In der Datenbank blättern und Berichte abrufen

Unter der Schaltfläche "In der Datenbank blättern und Berichte abrufen" des Formulars "Start" sind Formulare zusammengefasst, die ein Blättern und Erkunden der Datenbank von der obersten Ordnungsebene bis hinunter zum Einzelversuch erlauben. Für die ausgewählten Datensätze stehen auf den einzelnen Formularseiten vorgefertigte Berichte (Listen) zum Ausdruck oder zum Export bereit. Als Einstiegsformular in diese Gruppe dient das Formular "Untersuchungsgebiete".

A-6.2.1 Formular "Untersuchungsgebiete"

Das Formular "Untersuchungsgebiete" (Abb. A-5) erscheint beim Klicken auf die Schaltfläche "In der Datenbank blättern und Berichte abrufen" des Formulars "Start". Es ist verknüpft mit der Tabelle "Untersuchungsgebiete". Im Auswahlfeld "Untersuchungsgebiet" können die Eintragungen für die einzelnen Untersuchungsgebiete ausgewählt werden, Land und Lage erscheinen dann in den beiden Textfeldern darunter.

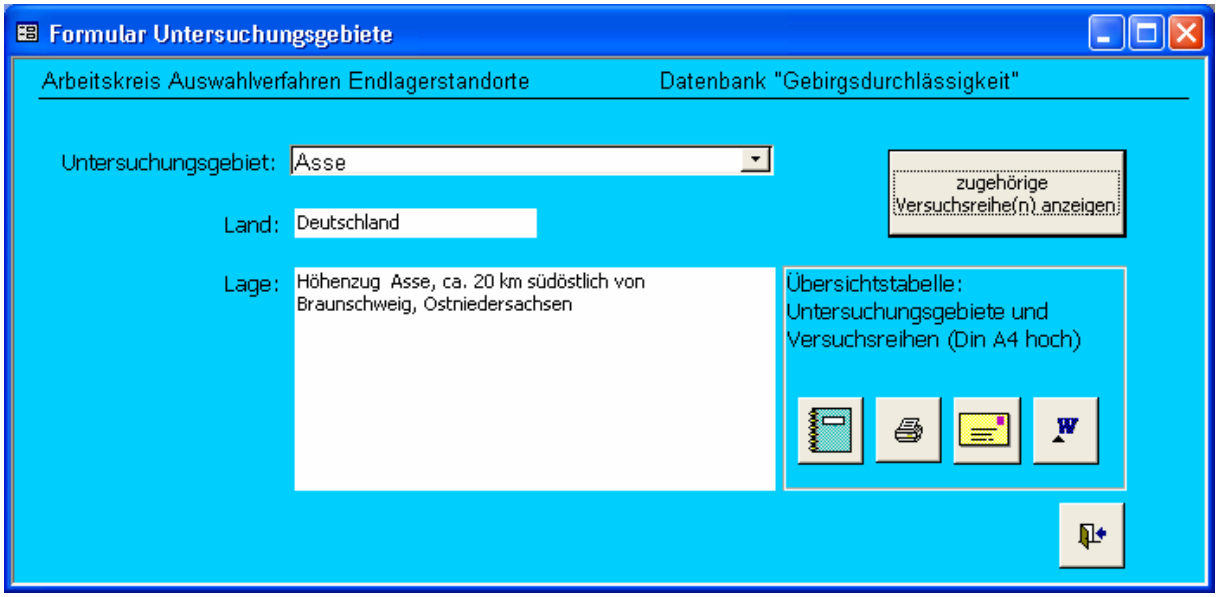


Abb. A-5 Formular "Untersuchungsgebiete"

Die Schaltfläche "zugehörige Versuchsreihe(n) anzeigen" öffnet das Formular "Versuchsreihen" mit den Versuchsreihen des ausgewählten Untersuchungsgebietes. Die Piktogramm-Schaltflächen sind in Kapitel A-5 erläutert.

A-6.2.2 Formular "Versuchsreihen"

Das Formular "Versuchsreihen" erscheint beim Klicken auf die Schaltfläche "zugehörige Versuchsreihe(n) anzeigen" des Formulars "Untersuchungsgebiete" (Abb. A-6). Es zeigt alle Angaben zu den Versuchsreihen. Sind mehrere Versuchsreihen vorhanden, kann mit der Navigationsleiste zwischen den entsprechenden Datensätzen hin und her geschaltet werden. Die Angaben zu den Versuchsreihen sind auf mehrere Registerkarten verteilt. Auf der Registerkarte "Berichte" können die Angaben zu der angezeigten Versuchsreihe im Din-A4-Format zusammen mit den Quellen gedruckt bzw. exportiert werden. Auf der ersten Registerkarte befinden sich die in Tab. A-12 aufgeführten Schaltflächen.

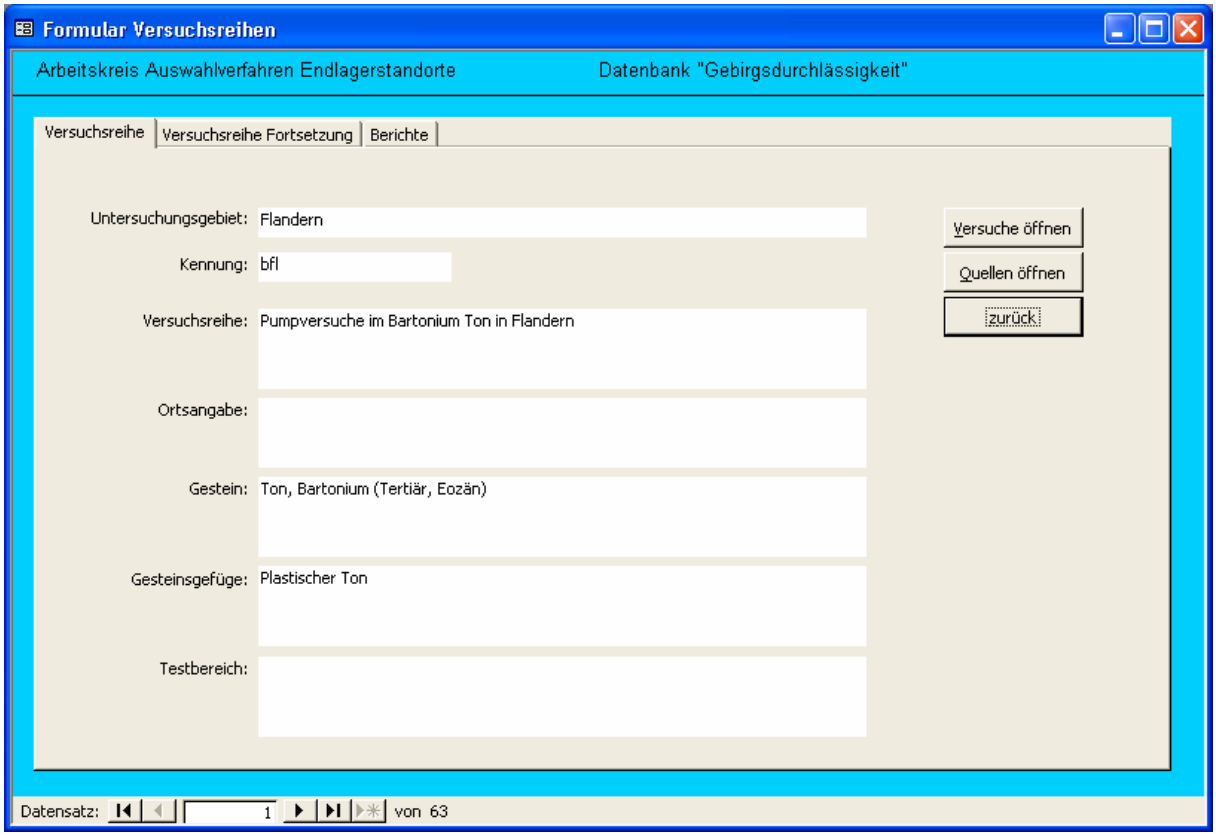


Abb. A-6 Formular "Versuchsreihen" (1. Registerkarte)

Schaltfläche	**Aktion beim Anklicken**
Versuche öffnen	Öffnet das Formular "Versuche"
Quellen öffnen	Öffnet das Formular "Quellen"
zurück	Schließt das aktuelle Formular und kehrt zum vorherigen Formular zurück

Tab. A-12 Schaltflächen des Formulars "Versuchsreihen"

A-6.2.3 Formular "Versuche"

Das Formular "Versuche" wird geöffnet, wenn die Schaltfläche "Versuche öffnen" des Formulars "Versuchsreihen" angeklickt wird (Abb. A-7). Es enthält die Messwerte für alle Versuche der entsprechenden Versuchsreihe. Die Daten sind in mehreren Registerblättern abgelegt. Mit der Navigationsleiste kann zwischen den Datensätzen zu den einzelnen Versuchen gewechselt werden. Die Registerkarte "Berichte" enthält vier vorgefertigte Berichte (Tabellen), um die Versuchsdaten mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und unterschiedlicher Themenausrichtung auszudrucken bzw. in andere Programme zu exportieren:

- Tabelle mit Messwerten, Gesteinstyp, Testtyp und Versuchskennung (Din A4 hoch),
- Tabelle mit Messwerten im Detail und Versuchskennung (Din A4 quer),
- Tabelle mit Angaben zur Versuchsdurchführung (Din A4 hoch),
- Tabelle zum Gestein im Testbereich (Din A4 hoch).

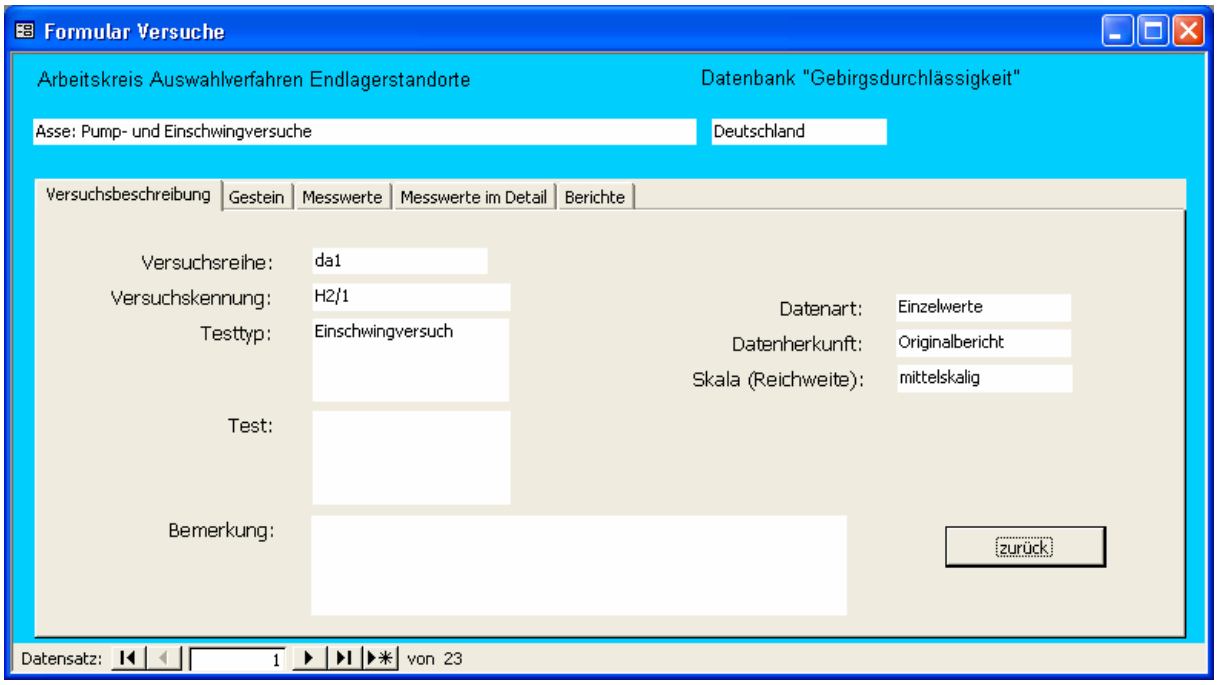


Abb. A-7 Formular "Versuche" 1. Registerkarte

A-6.2.4 Formulare für die Markierungsversuche Münchehagen und Grimsel

Für die Untersuchungsgebiete Münchehagen und Grimsel sind auch Ergebnisse von Markierungsversuchen in die Datenbank aufgenommen worden. Markierungsversuche liefern wichtige Aussagen zur Wasserbewegung im Gestein. Die Darstellung der Versuchsergebnisse ist aber nicht kompatibel mit der Spalteneinteilung der In-situ-

Versuche zur Wasserdurchlässigkeit (Kapitel A-3), so dass eine eigene Tabelle und ein eigenes Formular erforderlich sind.

Formular "Markierungsversuche Münchehagen"

Werden die Versuche der Versuchsreihe "Münchehagen: Markierungsversuche" geöffnet (Schaltfläche "Versuche öffnen" auf dem Formular "Versuchsreihen"), erscheint das Formular "Markierungsversuche Münchehagen". Die eingetragenen sechs Versuche können mit der Navigationsleiste angezeigt werden (Abb. A-8).

Formular "Markierungsversuche Grimsel"

Dieses Formular erscheint, wenn beim Untersuchungsgebiet "Grimsel" die Versuchsreihe "Grimsel: Markierungsversuche" ausgewählt wird. Es werden die Ergebnisse von 24 Markierungsversuchen dargestellt, die auch als Bericht oder Datei exportiert werden können (Abb. A-9).

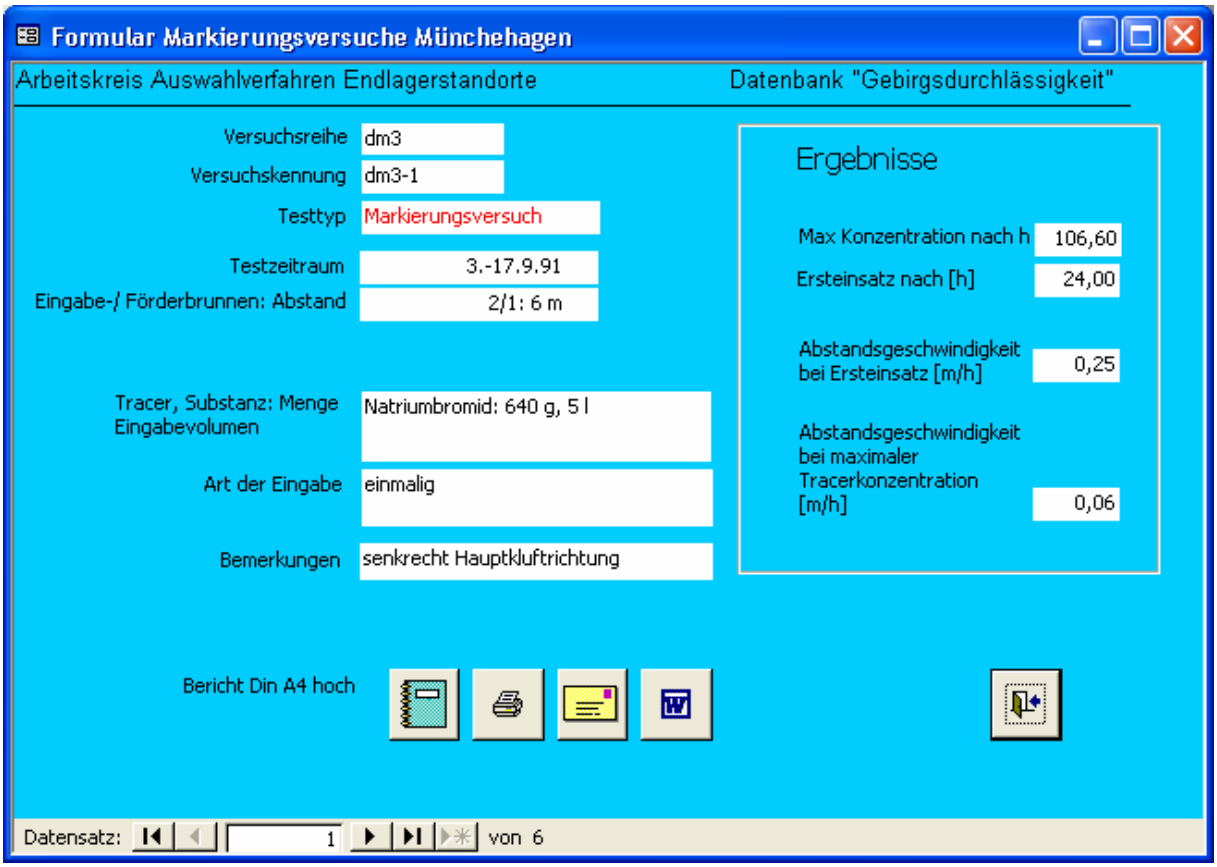


Abb. A-8 Formular "Markierungsversuche Münchehagen"

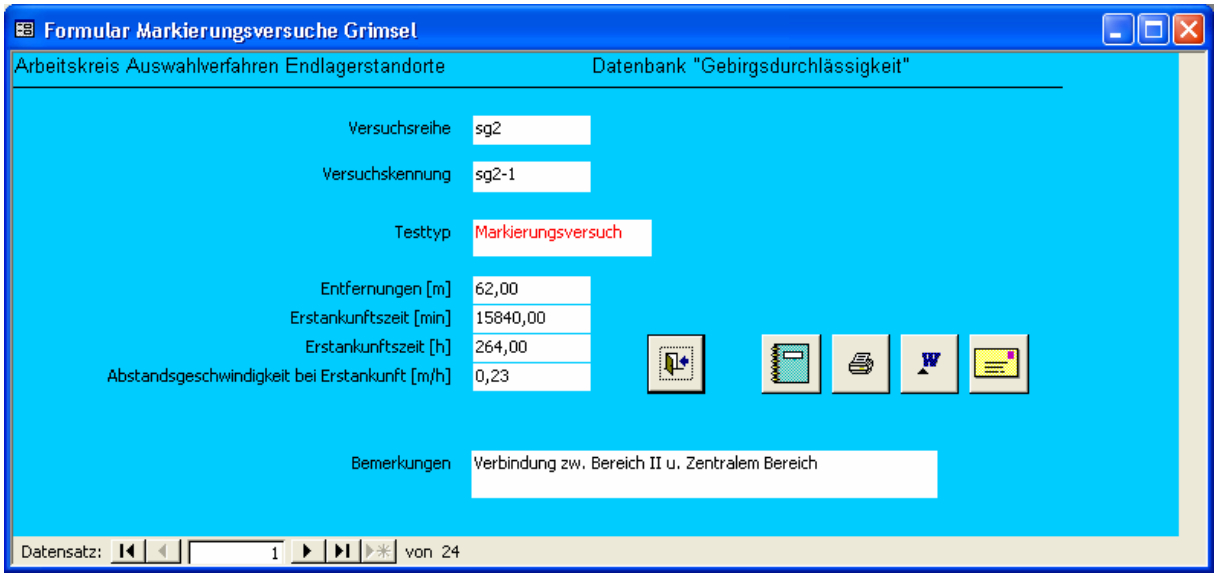


Abb. A-9 Formular "Markierungsversuche Grimsel"

A-6.2.5 Formular "Quellen"

Über die Schaltfläche "Quellen öffnen" des Formulars "Versuchsreihen" kann das Formular "Quellen" (Abb. A-10) geöffnet werden. Es zeigt zu den einzelnen Datenquellen folgende Angaben: Autor(en), Erscheinungsjahr, Titel und Serien- bzw. Berichtsangaben. Sind mehrere Quellen angegeben, können sie mit der Datensatznavigationsleiste ausgewählt werden.

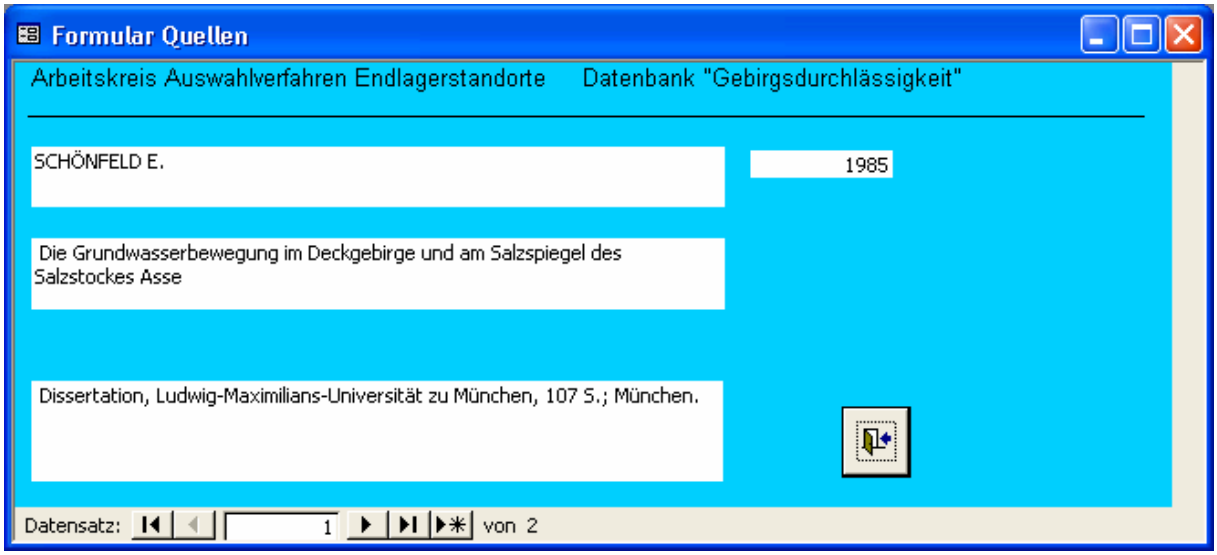


Abb. A-10 Formular "Quellen"

A-6.3 Neue Datensätze eingeben

Die Formulargruppe "Neue Datensätze eingeben" ermöglicht die Eingabe von neuen Datensätzen. Als Einstieg in die Formulargruppe dient das Formular "Dateneingabe".

Bei der Eingabe von Werten über die Tastatur werden die Daten temporär zwischengespeichert. Erst beim Betätigen der Schaltfläche "Speichern" erfolgt die Anlage eines neuen Datensatzes in der Datenbank. Bei formal fehlerhaften Eingaben wird eine Fehlermeldung angezeigt. Durch Anklicken von "OK" wird die Fehlermeldung ausgeblendet und der Cursor springt auf das Eingabefeld mit der fehlerhaften Eingabe. Beispielsweise kommt es im Formular "Dateneingabe Untersuchungsgebiete" zu Fehlermeldungen, wenn im Feld "Name Untersuchungsgebiet" (Abb. A-13) kein Eintrag erfolgt ist oder ein schon vorhandener Name für ein Untersuchungsgebiet angegeben wurde. Nach Änderung des Eintrags kann erneut auf "Speichern" gedrückt werden. Beim Betätigen der Schaltfläche "Abbrechen" wird nachgefragt, ob das Formular geschlossen werden soll, ohne die Eingaben zu speichern.

Nach dem Speichern der Daten wird die Speicherung bestätigt und gefragt, ob ein neuer Datensatz eingegeben werden soll. Wird auf diese Frage mit "ja" geantwortet, springt das Programm auf das aktuelle Formular zurück. Vorher wird noch darauf hingewiesen, dass die Versuchskennung schon vorhanden ist, mit Klicken auf "OK" wird auf die zu ändernde Kennung von Untersuchungsgebiet, Versuchsreihe oder Versuch fokussiert. Alle anderen Angaben aus den vorherigen Eingaben können übernommen oder überschrieben werden. Dadurch ist die schnelle Eingabe von Datensätzen mit vielen übereinstimmenden Feldern möglich.

Bei Antwort "nein", wird das Formular verlassen. Bei einem erneuten Aufruf sind dann alle Felder auf "leer" geschaltet, wie auch beim Verlassen über die Schaltfläche "Abbrechen".

A-6.3.1 Formular "Dateneingabe"

Über die Schaltfläche "Neue Datensätze eingeben" des Formulars "Start" wird das Formular "Dateneingabe" aktiviert (Abb. A-11). Es enthält vier Schaltflächen zur Eingabe von Daten zu Untersuchungsgebieten, Versuchsreihen, Quellen und Versuchen (Tab. A-13).

Die Eingabe erfolgt in einer festgelegten Reihenfolge. Sollen Versuchsreihen für ein neues Untersuchungsgebiet angelegt werden, muss vorher das neue Untersuchungsgebiet erstellt werden. Entsprechend können neue Versuchsdaten nur eingegeben werden, wenn die zugehörige Versuchsreihe existiert. Die Quellenangaben werden den Versuchsreihen zugeordnet, so dass das in Abb. A-12 dargestellte Eingabeschema entsteht.

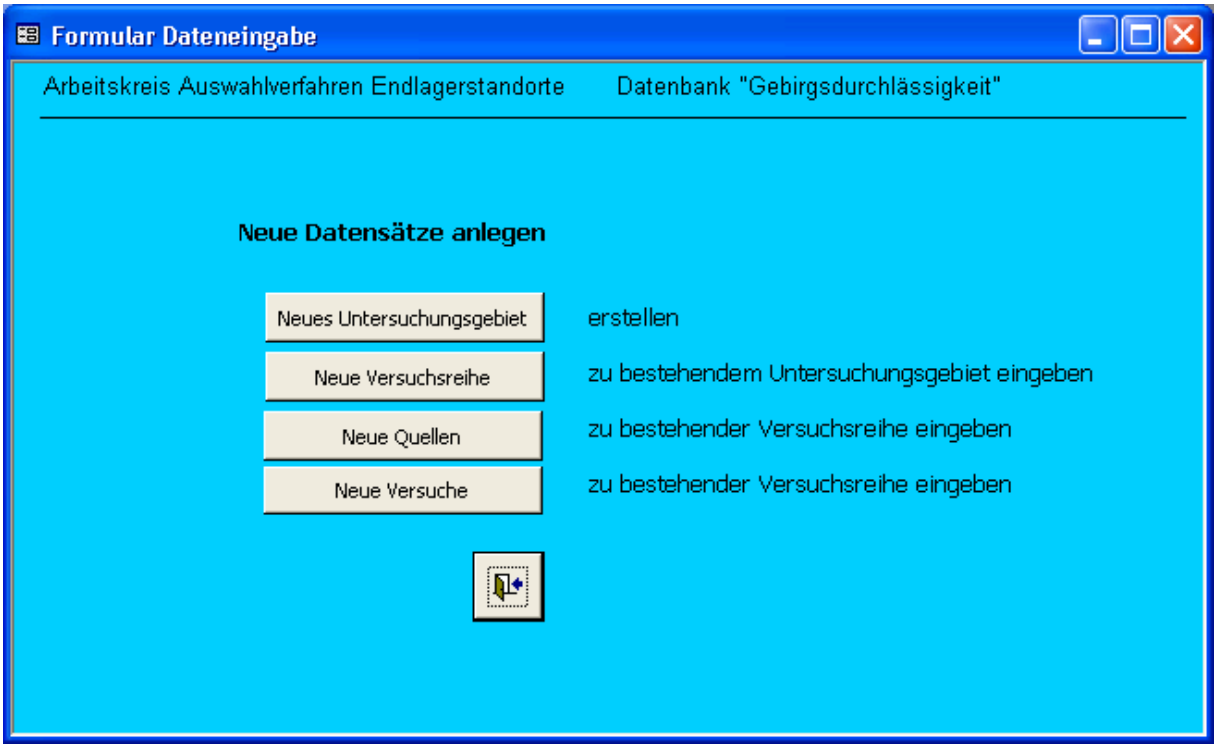


Abb. A-11 Formular "Dateneingabe"

Schaltfläche	**Aktion beim Anklicken**
Neues Untersuchungsgebiet	Öffnet das Formular "Dateneingabe Untersuchungs-gebiet"
Neue Versuchsreihen	Öffnet das Formular "Dateneingabe Versuchsreihen"
Neue Quellen	Öffnet das Formular "Dateneingabe Quellen"
Neue Versuche	Öffnet das Formular "Dateneingabe Versuche"

Tab. A-13 Schaltflächen des Formulars "Dateneingabe"

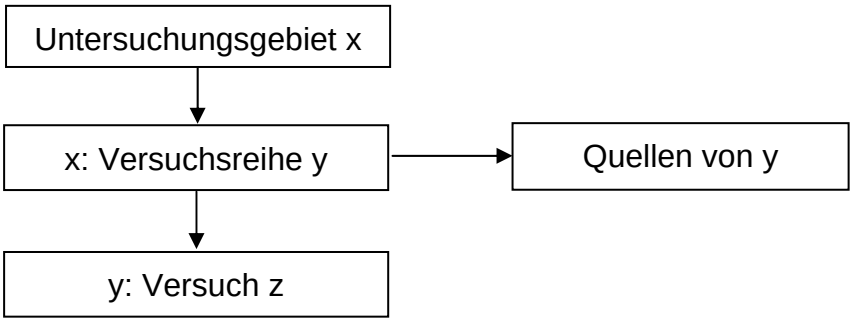


Abb. A-12 Schema der Dateneingabe

A-6.3.2 Formular "Dateneingabe Untersuchungsgebiete"

Mit dem Formular "Dateneingabe Untersuchungsgebiete" werden neue Untersuchungsgebiete in die Datenbank aufgenommen (Abb. A-13). Als Mindesteingabe ist die Angabe des Namens für das neue Untersuchungsgebiet erforderlich. Der Name darf noch nicht in der Datenbank vorhanden sein. Wird diese Anforderung nicht erfüllt, wird beim Speichern eine Fehlermeldung angezeigt und die Eingabe kann korrigiert werden. Im Eingabefeld "Land" kann entweder aus einer Länderliste ein Land ausgewählt oder ein Land über die Tastatur eingegeben werden. Im Eingabefeld "Lage" kann eine geographische Lagebeschreibung des Untersuchungsgebietes eingetragen werden.

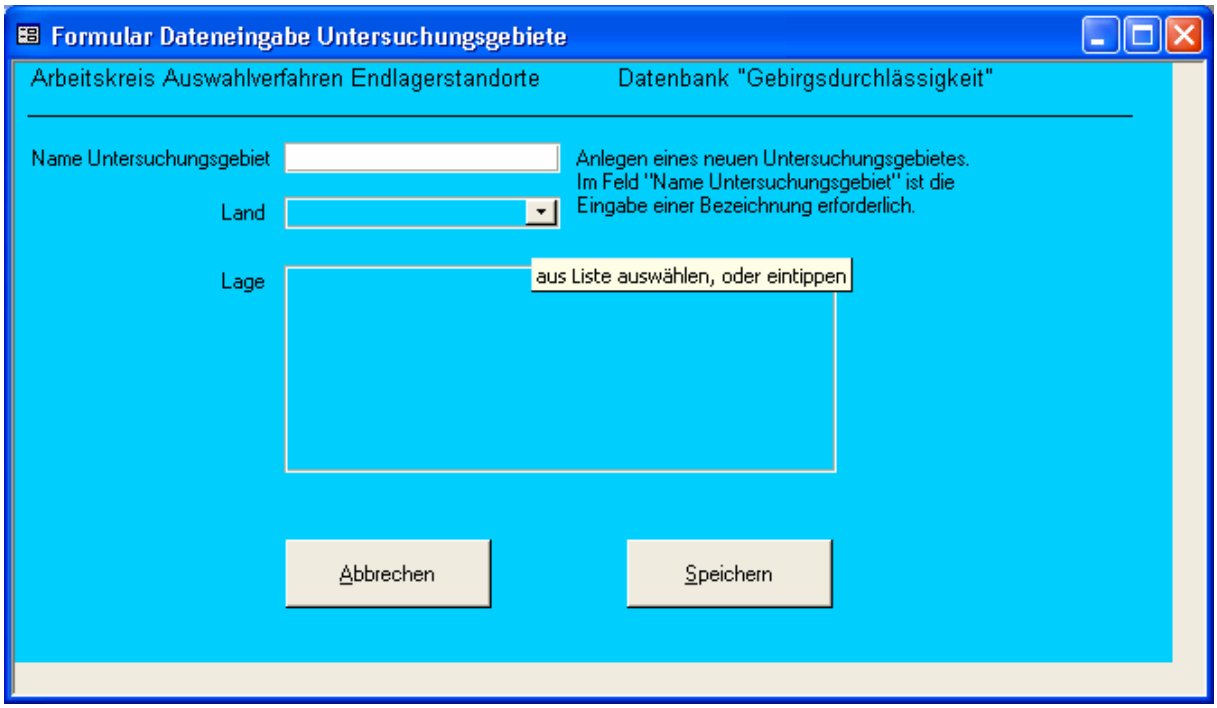


Abb. A-13 Formular "Dateneingabe Untersuchungsgebiete"

A-6.3.3 Formular "Dateneingabe Versuchsreihen"

Formular "Dateneingabe Versuchsreihen" dient der Eingabe einer neuen Versuchsreihe (Abb. A-14). Eine Versuchsreihe ist eindeutig mit einem Untersuchungsgebiet verknüpft. In der aufklappbaren Liste "Untersuchungsgebiet auswählen" sind alle bereits vorhandenen Untersuchungsgebiete aufgelistet, auch das soeben neu erstellte Untersuchungsgebiet. Danach ist ein neuer Name (Kennung) für die Versuchsreihe anzugeben. Die Kennung ist frei wählbar, darf aber nicht schon vorhanden sein. Alle weiteren Eingaben sind optional und sollen die Versuchsreihe zusammenfassend beschreiben (Tab. A-14). Die Schaltflächen "Speichern" und "Abbrechen" werden am Anfang von Kapitel A-6.3 beschrieben.

Eingabefeld	**Eingabe**
Kennung	Name der Versuchsreihe, kann auch ein Kürzel sein (Beispiele: sg1, sg2, Gr5, Asse)
Versuchsreihe	Knappe Charakterisierung der Versuchsreihe (Beispiel: Gorleben, Pumpversuche im Deckgebirge)
Ortsangabe	Geographische Lage der Versuchsreihe im Bereich des Untersuchungsgebietes (Beispiel: Grimsel, Bereich II Bohrlochkranzversuch)
Gesteine	Gesteinsarten und Gesteinsbeschreibungen, die gesamte Versuchsreihe betreffend (Beispiel: Sykesville Gneis-Formation, Boulder Gneis)
Gesteinsgefüge	Beschreibung der Lagerung und des Gefüges der untersuchten Abfolge (Beispiel: flache Lagerung, gesamte Abfolge intensiv geklüftet)
Testbereich	Aussagen zum Testbereich der gesamten Versuchsreihe (Beispiel: unverwitterter Bereich des Opalinustons zwischen ca. 20 und 60 m Tiefe unter Gelände)
Testarten	Beispiele: Slug-Test, Pulse-Test
Testauswertung	Beispiel: analytisch mit Typkurven
Skalenbereich	Reichweite der Versuche (kleinskalig, mittelskalig, großskalig), s. Kapitel A-6.3.5 "Dateneingabe Versuche"
Erfasster Bereich	Beispiel: nähere Bohrlochumgebung, oberflächennaher Bereich
Bemerkungen	Sonstige Anmerkungen

Tab. A-14 Eingabefelder des Formulars "Versuchsreihen"

A-6.3.4 Formular "Dateneingabe Quellen"

Das Formular "Dateneingabe Quellen" dient zur Eingabe der in Tab. A-8 aufgeführten Quelleninformationen (Abb. A-15). Da die Quellenangaben den jeweiligen Versuchsreihen zugeordnet sind, muss zuerst eine Versuchsreihe ausgewählt werden.

Im Eingabefeld "Erschienen in" können Abkürzungen, wie sie auch bei Literaturverzeichnissen üblich sind, verwendet werden.

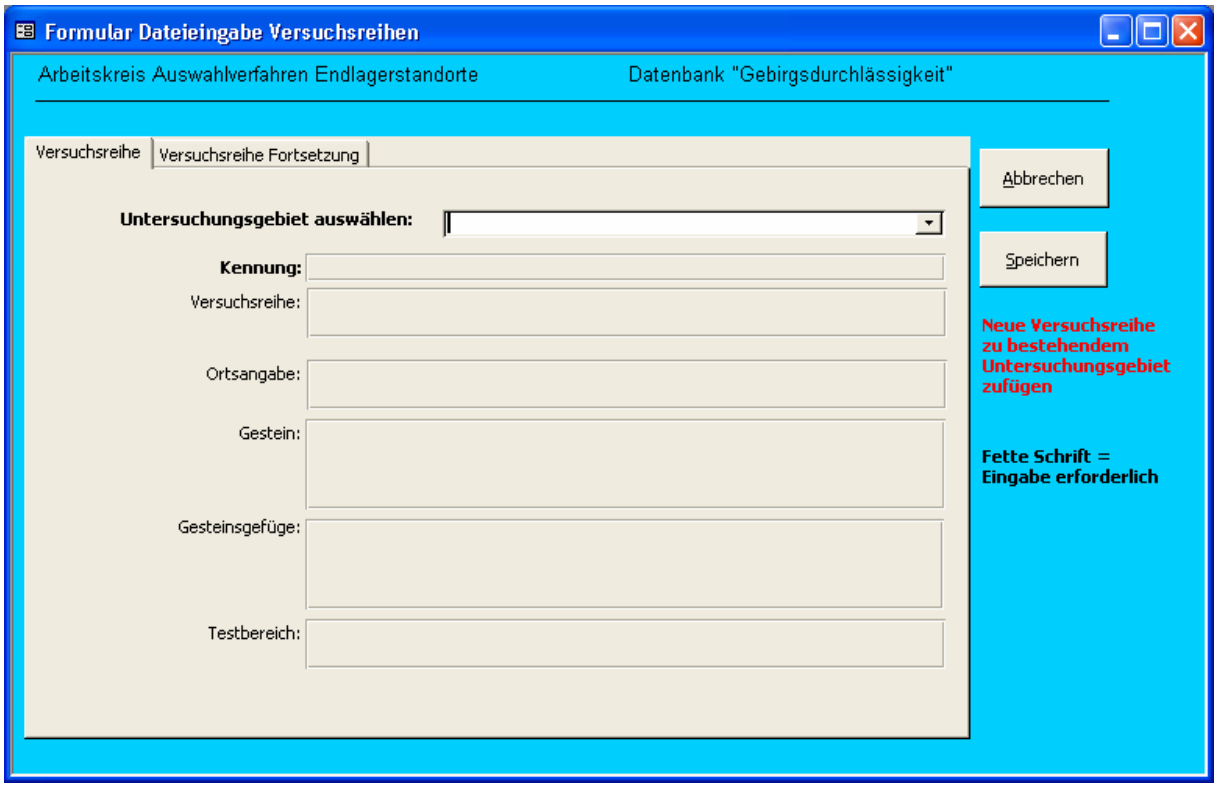


Abb. A-14 Formular "Dateneingabe Versuchsreihen"

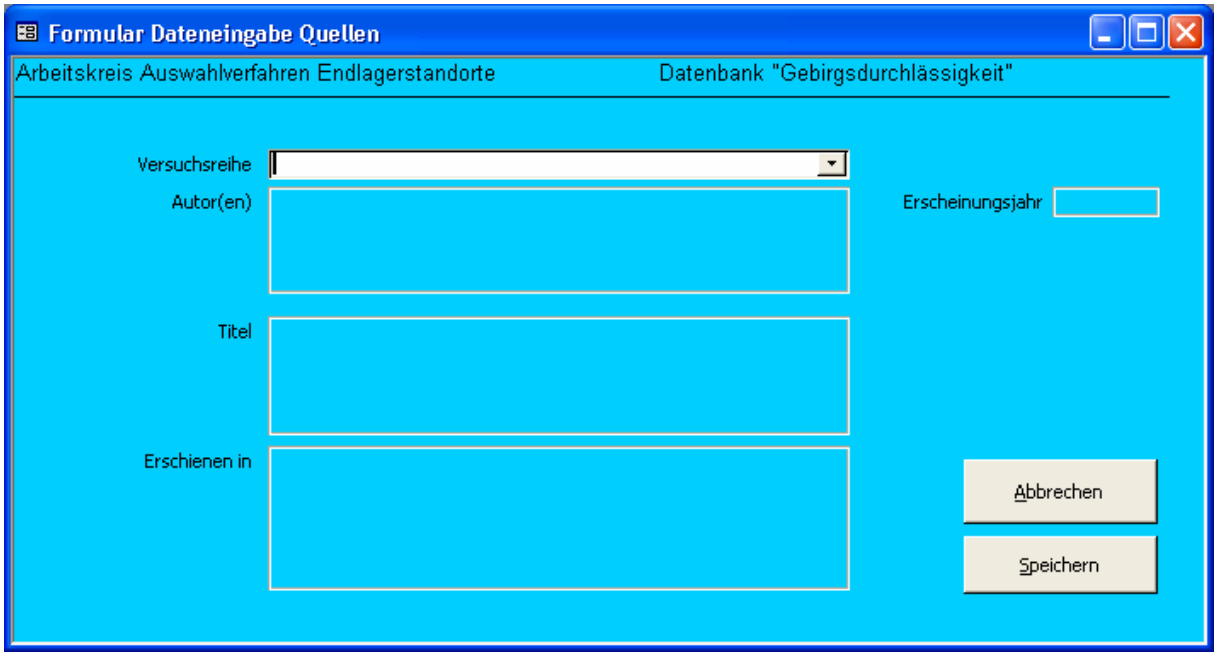


Abb. A-15 Formular "Dateneingabe Quellen"

A-6.3.5 Formular "Dateneingabe Versuche"

Das Formular "Dateneingabe Versuche" (Abb. A-16) dient zur Eingabe von Einzelversuchen. Da Versuche mit einer Versuchsreihe verknüpft sind, muss zuerst aus der aufklappbaren Liste eine Versuchsreihe ausgewählt werden. Die Versuchskennung kann frei gewählt werden, sie muss nur eindeutig sein. Alle mit fetter Schrift bezeichneten Felder müssen ausgefüllt sein, bevor abgespeichert werden kann. Bei Feldern wie "Testtyp" oder "Gesteinstyp" können die Vorschläge übernommen oder neue Einträge erzeugt werden. Bei den Feldern "Datenart", "Datenherkunft" und "Skala (Reichweite)" können dagegen nur die angebotenen Listeneinträge ausgewählt werden. Die für "ena (Reichweite)" angegeben Vorschläge bedeuten:

- Kleinskalig: Laterale Reichweite bis ca. 10 m; gilt insbesondere für Packerversuche (einschließlich Bohrloch-Logging),
- mittelskalig: Laterale Reichweite ca. 10 m bis 100 m; gilt für Interferenzversuche, wie hydraulische Mehrbohrlochversuche und Tracerversuche,
- großskalig: Laterale Reichweite mehr als 100 m (Langzeitpumpversuche und Ventilationsversuche).

Um die Eingabe übersichtlicher zu gestalten, sind die Eingabefelder auf mehrere Registerflächen verteilt, die durch Anklicken der Registerüberschrift ausgewählt werden können. Auf der Registerfläche "Messwerte" können in die blau beschrifteten Felder Messwerte im E-Format (z. B. 1,2e-05) eingetragen werden. Alternativ sind auch Eingaben wie 0,0000002 möglich, sie werden dann automatisch in das E-Format umformatiert. Wenn möglich, wird die mittlere Testtiefe aus Top, Bottom und Intervall berechnet und erscheint direkt im Feld. Sie kann aber auch von Hand eingetragen werden.

Das Registerblatt "Berechnete Messwerte" enthält nur Daten, die aus den Eingaben im Registerblatt "Messwerte" übernommen bzw. berechnet werden. Die berechneten Werte können nicht von Hand geändert werden. Die Versuchsergebnisse bestehen oft aus mehreren Werten für einen Versuch. Ist für den Versuch ein "bester Versuchswert" angegeben, wird dieser direkt übernommen. Sind nur Minimal- und Maximalwert vorhanden, wird der Mittelwert gebildet. Ist nur entweder Minimal- oder Maximalwert eingetragen, wird dieser Wert übernommen.

Beim Anklicken der Schaltfläche "Speichern" startet eine Prüfung auf formale Eingabefehler, bevor der Datensatz gespeichert wird.

A-6.4 Nach Datensätzen suchen und Suchauswahl exportieren

Mit "nach Daten suchen" ist hier das Auffinden von Datensätzen gemeint, die nach verschiedenen Kriterien aus dem Datenpool herausgefiltert werden, z. B. alle Versu-

che mit mittleren Testtiefen zwischen 2.000 und 5.000 m unter Geländeoberfläche. Hauptsächliches Ziel dieser Suche ist das Zusammenstellen von Versuchsreihen für den Export, um sie mit anderen Programmen weiterverarbeiten zu können.

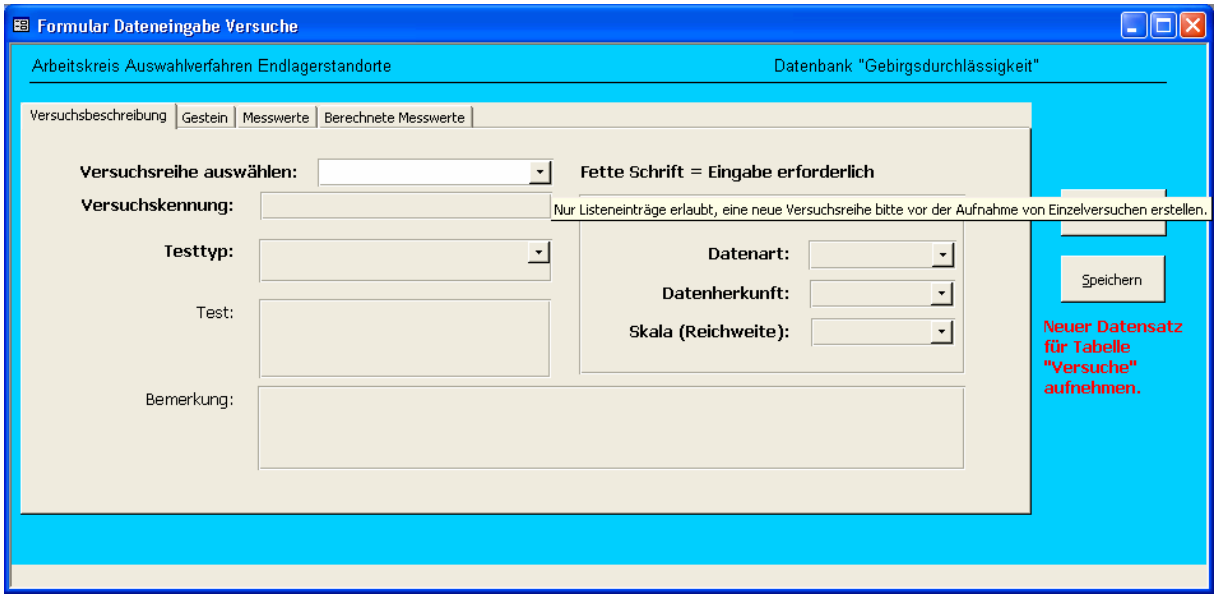


Abb. A-16 Formular "Dateneingabe Versuche" (mit Pop-up-Fenster)

A-6.4.1 Formular "Daten suchen"

Über die Schaltfläche "nach Datensätzen suchen und Suchauswahl exportieren" wird das Formular "Daten suchen" angezeigt (Abb. A-17). Sein unterer Teil besteht aus einem Tabellenfenster, in dem die Datensätze angezeigt werden. Beim Öffnen des Formulars werden alle Datensätze angezeigt. Jede Zeile im Tabellenfenster entspricht einem Datensatz. Jeder Datensatz repräsentiert die Werte eines Versuchs aus der Datenbank.

Im linken oberen Bereich des Formulars wird eine Reihe von Auswahl- und Eingabefeldern angezeigt. Mit diesen Feldern können, um Datensätze zu selektieren, Kriterien ausgewählt oder eingetragen werden. Nachdem auf die Schaltfläche "Suchen" geklickt wurde, erscheint die Suchauswahl im Tabellenfenster.

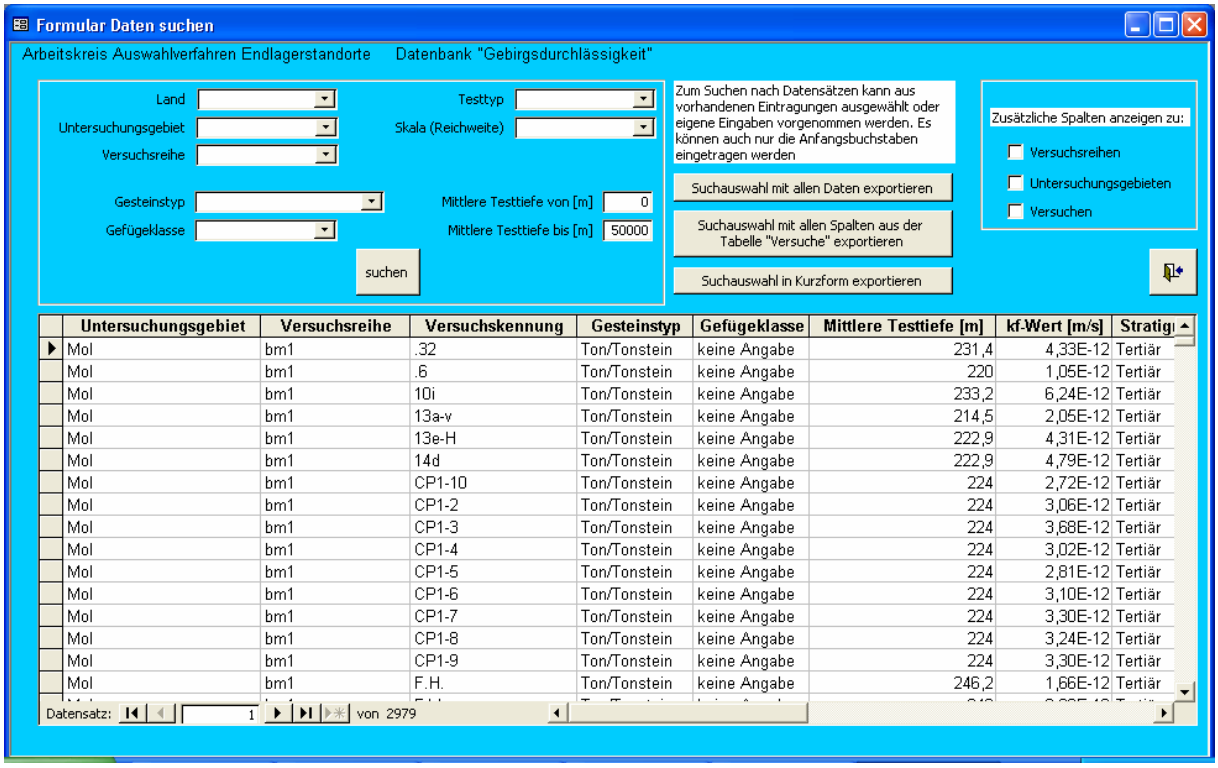
In der relationalen Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit sind die Daten auf mehrere Tabellen verteilt (Kapitel 2). Im Tabellenfenster dieses Formulars können Daten aus verschiedenen Tabellen auf Basis der Datensätze "Versuche" zu neuen Tabellen zusammengestellt werden.

Durch Anklicken der Kästchen im oberen rechten Formularabschnitt ("Zusätzliche Spalten anzeigen zu:") werden zusätzliche Spalten angezeigt. Sind alle drei Käst-

chen aktiviert, erscheinen alle Spalten aus den Datenbanktabellen "Untersuchungsgebiete", "Versuchsreihen" und "Versuche" im Tabellenfenster. In der Standardeinstellung des Tabellenfensters (alle drei Kästchen deaktiviert), werden die Datensätze in Kurzform mit folgenden Spalten angezeigt:

- Untersuchungsgebiet,
- Versuchsreihe,
- Versuchskennung,
- Gesteinstyp,
- Gesteinsgefüge,
- Mittlere Testtiefe,
- k_f-Wert,
- Stratigraphie: System (Serie),
- Datenart,
- Datenherkunft.

Um über die im Tabellenfenster sichtbaren Spalten oder Zeilen hinaus weitere anzuzeigen, kann die Tabelle mit den Bildlaufleisten am unteren und am seitlichen Rand verschoben werden.



Untersuchungsgebiet	Versuchsreihe	Versuchskennung	Gesteinstyp	Gefügeklasse	Mittlere Testtiefe [m]	kf-Wert [m/s]	Stratig
Mol	bm1	.32	Ton/Tonstein	keine Angabe	231,4	4,33E-12	Tertiär
Mol	bm1	.6	Ton/Tonstein	keine Angabe	220	1,05E-12	Tertiär
Mol	bm1	10i	Ton/Tonstein	keine Angabe	233,2	6,24E-12	Tertiär
Mol	bm1	13a-v	Ton/Tonstein	keine Angabe	214,5	2,05E-12	Tertiär
Mol	bm1	13e-H	Ton/Tonstein	keine Angabe	222,9	4,31E-12	Tertiär
Mol	bm1	14d	Ton/Tonstein	keine Angabe	222,9	4,79E-12	Tertiär
Mol	bm1	CP1-10	Ton/Tonstein	keine Angabe	224	2,72E-12	Tertiär
Mol	bm1	CP1-2	Ton/Tonstein	keine Angabe	224	3,06E-12	Tertiär
Mol	bm1	CP1-3	Ton/Tonstein	keine Angabe	224	3,68E-12	Tertiär
Mol	bm1	CP1-4	Ton/Tonstein	keine Angabe	224	3,02E-12	Tertiär
Mol	bm1	CP1-5	Ton/Tonstein	keine Angabe	224	2,81E-12	Tertiär
Mol	bm1	CP1-6	Ton/Tonstein	keine Angabe	224	3,10E-12	Tertiär
Mol	bm1	CP1-7	Ton/Tonstein	keine Angabe	224	3,30E-12	Tertiär
Mol	bm1	CP1-8	Ton/Tonstein	keine Angabe	224	3,24E-12	Tertiär
Mol	bm1	CP1-9	Ton/Tonstein	keine Angabe	224	3,30E-12	Tertiär
Mol	bm1	F.H.	Ton/Tonstein	keine Angabe	246,2	1,66E-12	Tertiär

Abb. A-17 Formular "Daten suchen"

Die drei grauen Schaltflächen rechts im Formular ermöglichen den Export der selektierten Datensätze in drei verschiedenen Darstellungsformen. Die Kurzform entspricht dabei der in Standardeinstellung angezeigten Tabelle ohne zusätzliche Spalten. Der Datenexport ist hauptsächlich zur Erzeugung einer Excel-Datei gedacht, um den selektierten Datensatz als Tabelle weiterverarbeiten zu können. Für die Ausgabe von Berichten stehen in anderen Formularen entsprechende Möglichkeiten zur Verfügung. Nicht dargestellt werden die beiden Versuchsreihen mit den Markierungsversuchen, da der Spaltenaufbau dieser Versuche sich stark von der übrigen Spaltenstruktur unterscheidet. Diese können auf den entsprechenden Formularen eingesehen und dort auch exportiert werden (Kapitel A-6.2.4).

A-6.4.2 Formular "Quellen suchen"

Das Formular "Quellen suchen" (Abb. A-18) dient dazu, Versuchsreihen zu finden, die auf bestimmten Quellen basieren. Es wird über die Schaltfläche "Nach Quellen suchen" im Formular "Start" geöffnet. Das obere Auswahlfeld "Autor(en)" zeigt die vorhandenen Quellen nach Autoren alphabetisch sortiert. Durch Anklicken der Autorennamen werden die Quelle und die damit verbundene Versuchsreihe(n) angezeigt. Quellen, denen keine Versuchsreihe zugeordnet ist, werden zwar in Beschreibungen zitiert, es wurden aber keine Daten aus diesen Quellen übernommen.

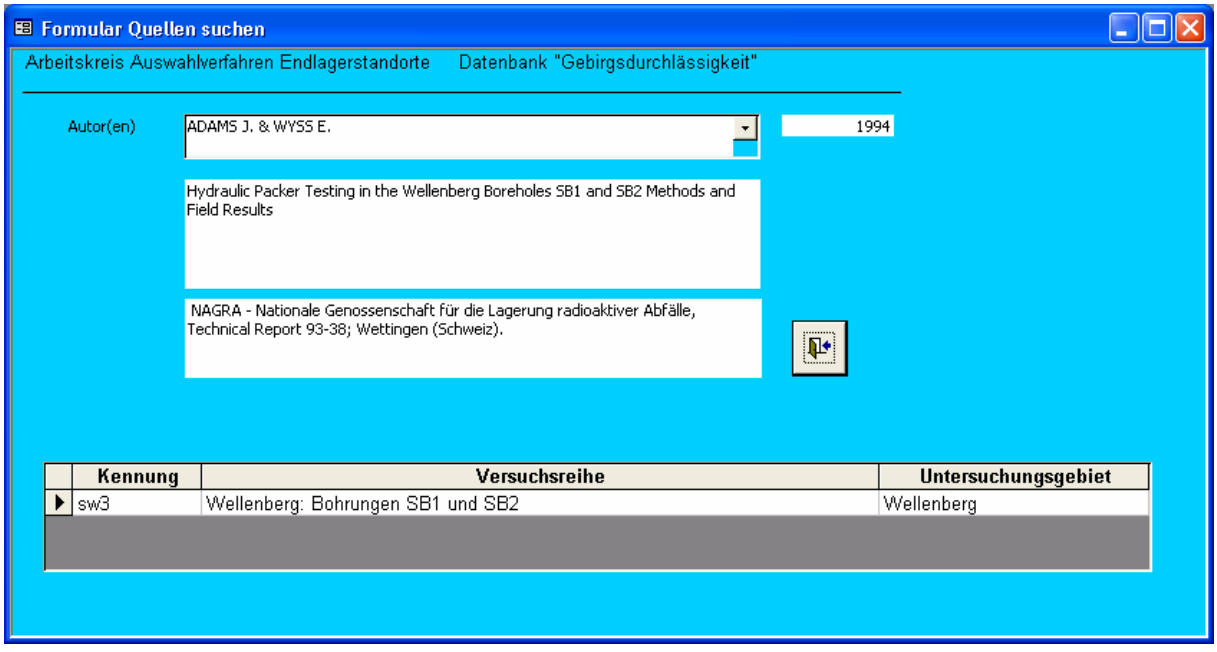


Abb. A-18 Formular "Quellen suchen"

A-6.5 Löschen und Bearbeiten von Daten

Die Formulargruppe "Löschen und Bearbeiten von Daten" bietet die Möglichkeit zum Löschen und Bearbeiten von Untersuchungsgebieten, Versuchsreihen und Versuchen. Durch Anklicken der entsprechenden Schaltflächen werden die zu bearbeitenden Datensätze geöffnet. Es wird empfohlen, vor der Arbeit mit diesen Formularen, eine Sicherheitskopie der Datenbank zu erstellen. Eine Sicherheitskopie kann dadurch erzeugt werden, dass die Datei "Gebirgsdurchlässigkeit.mdb" kopiert und unter einem anderen Dateinamen (z. B. "Kopie 1 Gebirgsdurchlässigkeit.mdb") abgespeichert wird. Die Optionen dieser Formulargruppe stehen nur zur Verfügung, wenn die Datei "Gebirgsdurchlässigkeit.mdb" von der Festplatte aus geöffnet wurde. Um sie auch visuell gut von anderen Formulargruppen unterscheiden zu können, sind alle Formulare dieser Gruppe in roter Hintergrundfarbe angelegt.

A-6.5.1 Formular "Löschen/Bearbeiten"

Das Formular "Löschen/Bearbeiten" (Abb. A-19) wird mit der Schaltfläche "Datensätze löschen oder bearbeiten" des Formulars "Start" geöffnet. Es bietet über Schaltflächen vier Möglichkeiten der Datenmanipulation an. Werden Untersuchungsgebiete gelöscht, werden auch die dazu gehörigen Versuchsreihen und Versuche gelöscht. Beim Löschen von Versuchsreihen werden auch die zugehörigen Versuche gelöscht. Datensätze aus der Tabelle "Quellen" müssen gesondert gelöscht werden. Sie können aber auch in der Datenbank belassen werden, um sie später wieder neu mit einer Versuchsreihe verknüpfen zu können.

A-6.5.2 Formular "Untersuchungsgebiete Löschen/Bearbeiten"

Das Formular "Untersuchungsgebiete Löschen/Bearbeiten" kann große Bereiche der Datensammlung gleichzeitig löschen, entsprechende Vorsicht ist geboten. Wird auf die Schaltfläche "Datensatz löschen" geklickt (Abb. A-20), erscheint eine Nachfrage, ob die Daten wirklich gelöscht werden sollen. Erst wenn dann auf "Ja" geklickt wird, werden die Daten gelöscht.

Um das zu löschende Untersuchungsgebiet auszuwählen, kann mit der Navigationsleiste in den Datensätzen geblättert werden.

A-6.5.3 Formular "Versuchsreihen Löschen/Bearbeiten"

Das Formular "Versuchsreihen Löschen/Bearbeiten" (Abb. A-21) kann zum Bearbeiten oder Löschen von Versuchsreihen eingesetzt werden. Die Daten jeder Versuchsreihe sind auf zwei Registerflächen verteilt. Die Handhabung entspricht dem Formular "Untersuchungsgebiete Löschen/Bearbeiten" (Kapitel A-6.5.3).

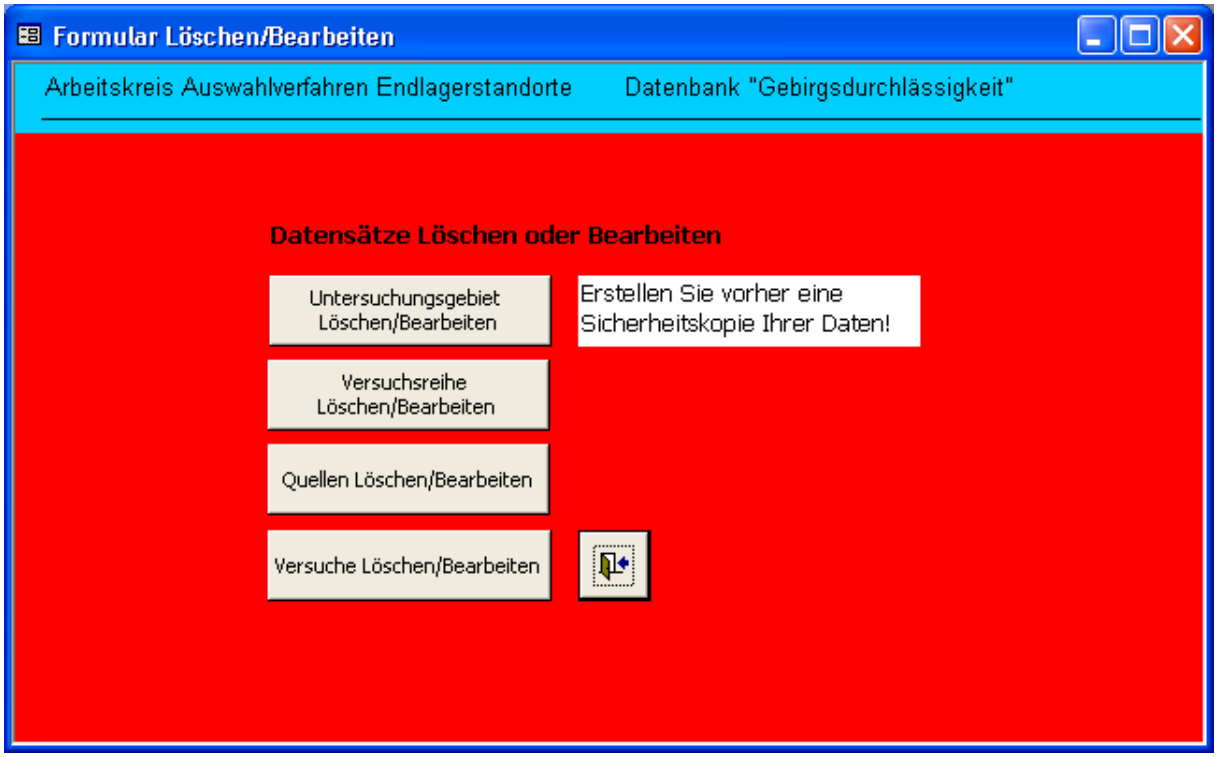


Abb. A-19 Formular "Löschen/Bearbeiten"

A-6.5.4 Formular "Quellen Löschen/Bearbeiten"

Das Formular "Quellen Löschen/Bearbeiten" (Abb. A-22) dient der Bearbeitung der Tabelle "Quellen". Werden einzelne Datensätze gelöscht, werden auch die Eintragungen in der Tabelle "Versuchsreihen-Quell-ID" gelöscht und damit die Verknüpfung zur Tabelle "Versuchsreihen".

A-6.5.5 Formular "Versuche Löschen/Bearbeiten"

Das Formular "Versuche Löschen/Bearbeiten" (Abb. A-23) kann verwendet werden, um einzelne Versuche zu bearbeiten bzw. zu löschen. Wird auf der Schaltfläche "Versuchsreihe" eine Versuchsreihe ausgewählt, werden im Formular alle dazu gehörigen Versuche angezeigt. Zwischen den Versuchen kann mit der Navigationsschaltfläche gewechselt werden. Das Löschen von einzelnen Versuchen aus der Tabelle "Versuche" bewirkt keine Löschungen in anderen Tabellen, da keine weiteren Verknüpfungen bestehen.

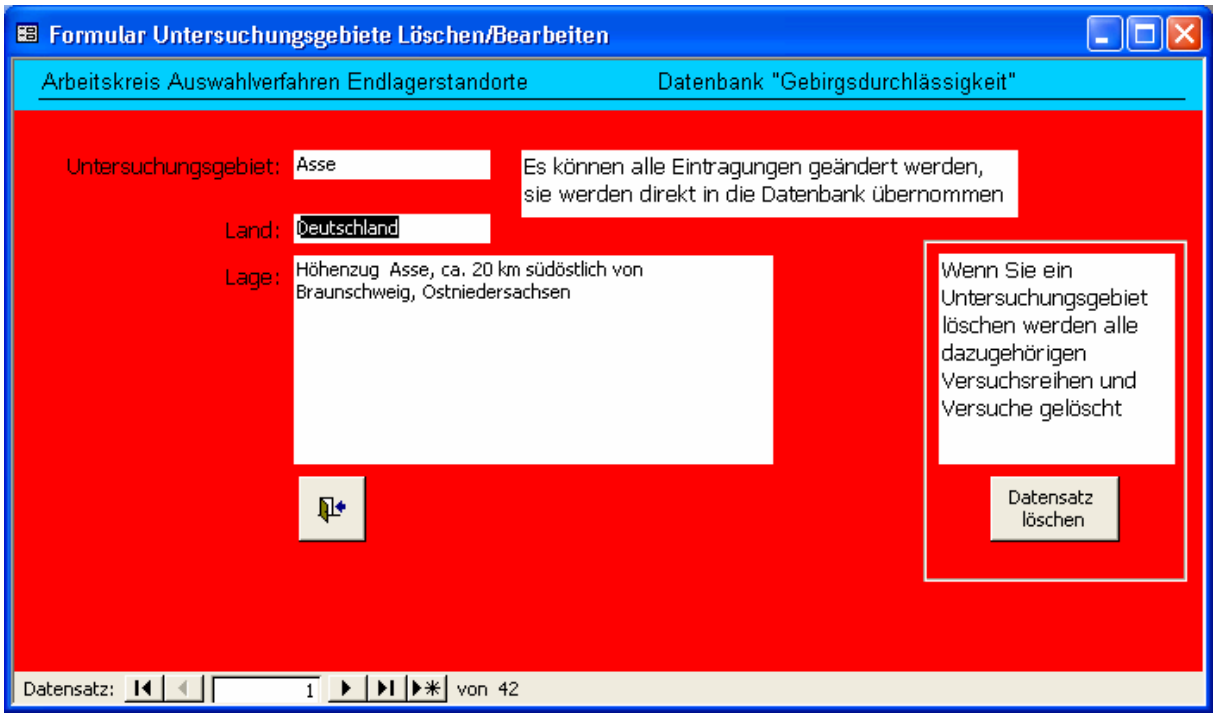


Abb. A-20 Formular "Untersuchungsgebiete Löschen/Bearbeiten"

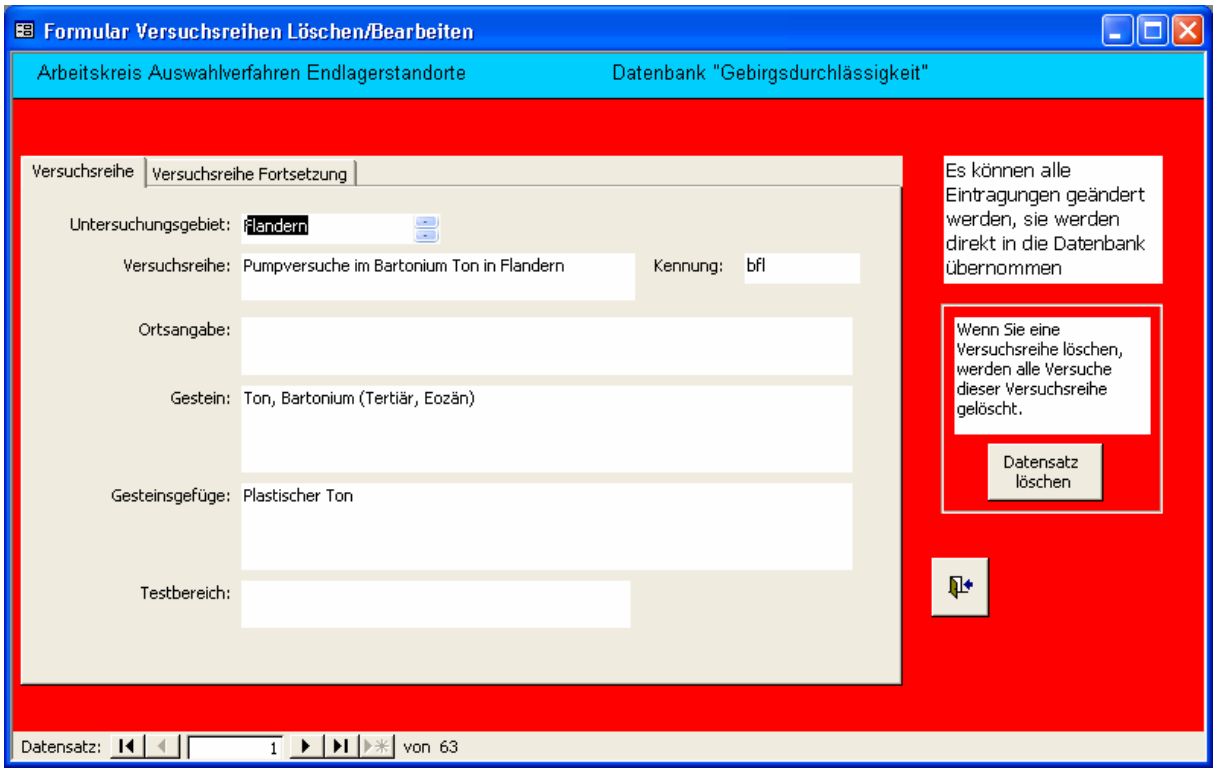


Abb. A-21 Formular "Versuchsreihen Löschen/Bearbeiten"

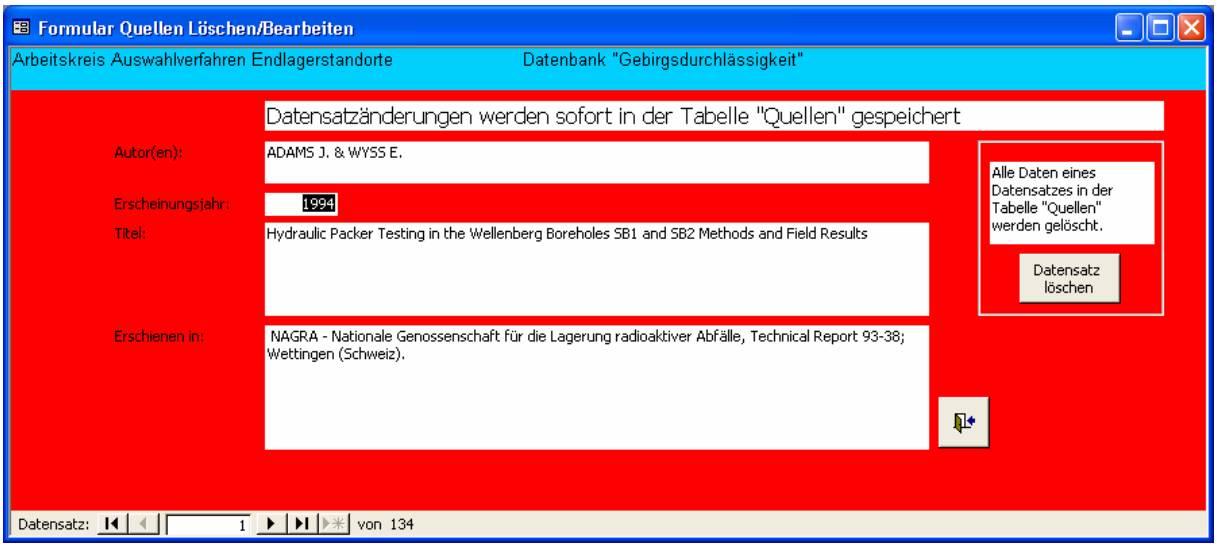


Abb. A-22 Formular "Quellen Löschen/Bearbeiten"

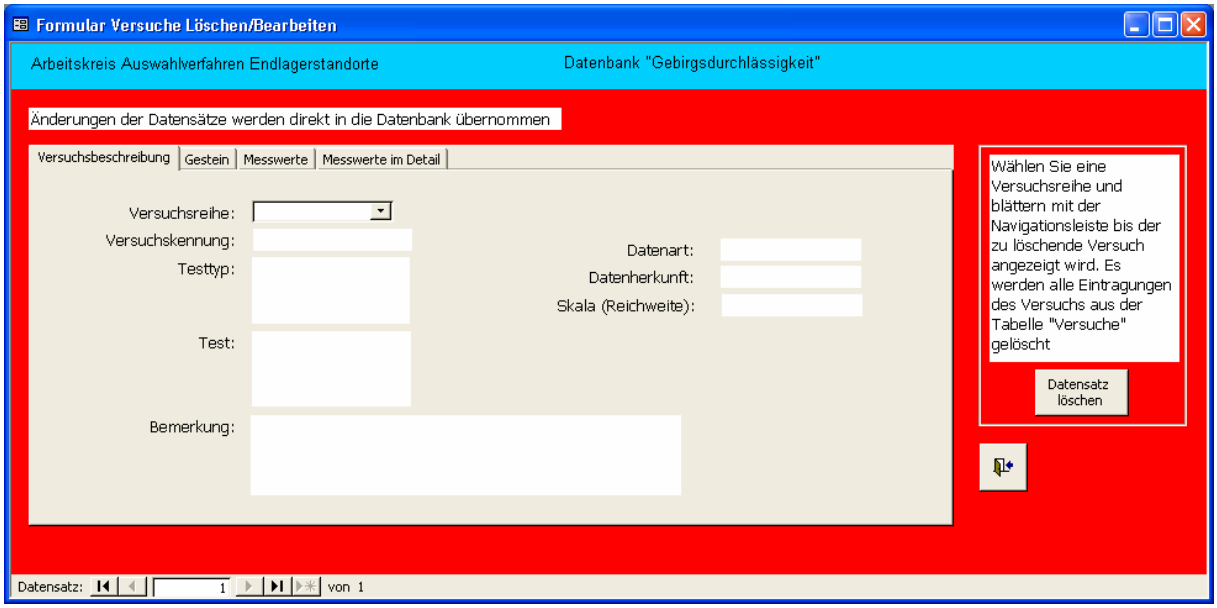


Abb. A-23 Formular "Versuche Löschen/Bearbeiten"