Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit in den Nördlichen Kalkalpen

Rottach-Egern/Kreuth (Lkr. Miesbach, Bayern) und

Reit im Winkl (Lkr. Traunstein, Bayern)

[118 Seiten, 30 Abbildungen, 19 Tabellen, 14 Anlagen]

Inaugural Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat)

vorgelegt am
Fachbereich Geowissenschaften
der Philipps-Universität Marburg
von
Dipl. Geol. Christian Kassebaum
aus Detmold

Marburg/Lahn - Juli 2006

Vom Fachbereich Geowissenschaften
der Philipps-Universität Marburg am _____ angenommen.

Erstgutachter _____

Zweitgutachter _____

Tag der mündlichen Prüfungen am _____

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation fasst die Ergebnisse meiner vierjährigen geologischen und hydrogeologischen Arbeit in den Nördlichen Kalkalpen zusammen. Mein besonderer Dank in diesem Zusammenhang gilt Prof. Dr. H. Zankl, der meine Begeisterung für das Forschungsgebiet der Hydrogeologie erst geweckt hat, weshalb mir auch an der Übernahme der Betreuung der vorliegenden Arbeit viel lag. Danke zudem für die offenen, konstruktiven Diskussionen und auch persönlich wertvollen Ratschläge während meiner Zeit in Marburg und der zahlreichen gemeinsamen Geländeaufenthalte. All dies hat maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Außerdem bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. A. Schraft vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie für die Zurverfügungstellung als Zweitgutachter und seine hilfreiche inhaltliche und formale Kritik während der Endphase der Arbeit.

Herrn Dr. Roth und besonders Herrn Dr. Wenger vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft möchte ich ebenso meinen Dank aussprechen: Beide initiierten in Kooperation mit Prof. Dr. H. Zankl das Projekt “Grundwassererkundung in Bayern, Kennz. 18.17, Kalkalpine Randzone (KAR)” und ermöglichten damit erst deren Durchführung. Herrn R. Keilwerth vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft bin ich darüber hinaus für die vertrauensvolle Zusammenarbeit während der Bohrprogramme in Kreuth und Reit im Winkl dankbar.

Herrn Dr. A. Klemm (Wasserwirtschaftsamt Traunstein) sowie Herrn G. Ehrenberger (Wasserwirtschaftsamt Rosenheim) möchte ich für das erhaltene Datenmaterial und die gute Zusammenarbeit danken.

Dr. Martin Fellehner danke ich, dass er auch NACH Abschluss seines “Hauptdolomit-Projektes” jederzeit bereitwillig für Fragen zur Verfügung stand.

Der Gemeinde Reit im Winkl sei an dieser Stelle für ihre unbürokratische Unterstützung gedankt, dabei gilt mein besonderer Dank Herrn Bürgermeister F. Schmuck und darüber hinaus Herrn Obinger, der stets schnell und effizient behilflich war.

Phillp Marquart und Frank Grenz trugen dazu bei, die Monate der Bohrarbeiten kurzweilig und nicht zuletzt sehr unterhaltsam werden zu lassen.

Iris Müller und Andreas Kayser vom Fachbereich Geowissenschaften der Philipps-Universität Marburg haben dafür gesorgt, dass ich mich in Marburg und in “5413” so wohl gefühlt habe - dafür sei ihnen herzlichst gedankt. Dabei dürfen natürlich Dr. Nadine Mader, Rainer Inselsberger, Dirk Hellwig und Sven Bökenschmidt nicht unerwähnt bleiben.

Claudia Stratemeier hat sich unermüdlich und prompt (trotz besonderer Umstände) der Korrektur der Arbeit gewidmet - dafür auch ihr herzlichen Dank.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mir während meiner gesamten Ausbildung alle erdenkliche Freiheit und Unterstützung gaben....und nicht nur dafür sondern einfach für einfach alles.....!

Mein persönlich größtes Dankeschön gilt Pamela Blome, die in jeglicher Hinsicht die Arbeit begleitet hat und mir die notwendige seelische Unterstützung gab. Außerdem Dank dafür, mit Dir in den Alpen leben zu dürfen....!

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 11

Einleitung und Aufgabenstellung 13

Teil I Vorerkundung zur Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit

I.1 Lage und Abgrenzung des Vorerkundungsgebietes 17

I.2 Geologischer Überblick des Vorerkundungsgebietes 19

I.2.1 Hydrologisch relevante lithologische Einheiten 19
I.2.1.1 Wettersteinkalk und Wettersteindolomit (Trias, Ladin/Karn) 19
I.2.1.2 Raibler Schichten (Trias, Karn) 19
I.2.1.3 Hauptdolomit (Trias, Nor) 20
I.2.1.4 Plattenkalk (Trias, Nor) 20
I.2.2 Großräumige tektonische Gliederung der Nördlichen Kalkalpen 20

I.3 Vorerkundung zur Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit in den Bayerischen Kalkalpen 22

I.3.1 Untersuchungsgebiete 22
I.3.1.1 Kriterien zur Abgrenzug der Untersuchungsgebiete 22
I.3.1.2 Ausweisung der Untersuchungsgebiete 24
I.3.2 Ausweisung von Explorationsgebieten innerhalb der Untersuchungsgebiete 24
I.3.2.1 Kriterien zur Beurteilung und Abgrenzung der Explorationsgebiete 24
I.3.2.1.1 Lithologische Einheit Hauptdolomit als Kluftwasserleiter 25
I.3.2.1.2 Strukturgeologische Rahmenbedingungen 25
I.3.2.1.3 Chemisch-physikalische Charakteristik von Quellen und Brunnen 25
I.3.2.1.4 Abgrenzung der oberirdischen Einzugsgebiete EZG_o 26
I.3.2.2 Untersuchungsgebiet Ruhpolding/Bergen (Allgäu-Decke) 26
I.3.2.2.1 Explorationsgebiet Haargaß-Berg 26
I.3.2.2.2 Explorationsgebiet Gleichen-Berg 28
I.3.2.2.3 Explorationsgebiet Ägidius-Quellen 29
I.3.2.3 Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth (Lechtal-Decke) 30
I.3.2.3.1 Explorationsgebiet Lange Au 30
I.3.2.3.2 Explorationsgebiet Weißach-Tal 31
I.3.2.3.3 Explorationsgebiet Sagenbachtal 32
I.3.2.3.4 Explorationsgebiet Enterrottach 32
I.3.2.4 Untersuchungsgebiet Reit im Winkl (Tirolikum) 33
I.3.2.4.1 Explorationsgebiet Weißgraben 34
I.3.2.4.2 Explorationsgebiet Rabengschöß 34
I.3.2.4.3 Explorationsgebiet Entfeld 35

Teil II Explorationsmaßnahmen in den Untersuchungsgebieten Rottach-Egern/Kreuth und Reit im Winkl

II.1 Methoden und Maßnahmen für die Exploration von Trinkwasser in den Untersuchungsgebieten Rottach-Egern/Kreuth und Reit im Winkl 37

II.1.1 Klimatologie und hydrologische Bilanzierung in den Einzugsgebieten 37
II.1.1.1 Digitale Geländemodelle (DGM) 38
II.1.1.2 GIS-basierte Ermittlung der oberirdischen Einzugsgebiete EZG_o 38
II.1.1.3 Berechnung der spezifischen Niederschlagsgradienten und der Gebietsniederschläge P 39
II.1.1.4 Berechnung der spezifischen Temperaturgradienten 39
II.1.1.5 Berechnung der potentiellen Evapotranspiration (ET_p) 40
II.1.1.6 Klimatische Wasserbilanz P_0 41
II.1.1.7 Oberflächenabfluss der Einzugsgebiete 42
II.1.1.8 Modellierung des Grundwasserabflusses im Schotterkörper 42

II.1.2 Klassifizierung der hydrochemischen Charakteristik 42
II.1.2.1 Datengrundlage 42
II.1.2.2 Klassifikationsschema zur Charakterisierung von Grundwasser in den Untersuchungsgebieten 43
II.1.2.2.1 Zweistoff- und Dreistoff-Diagramm zur Klassifikation 44
II.1.2.2.2 Fehlerbetrachtung 46
II.1.3 Geophysikalische Erkundungsmethoden 46
II.1.3.1 Gleichstromgeoelektrik 47
II.1.3.2 Grundwasserströmungs-Messungen 47
II.1.3.3 Bohrlochradar 47
II.1.3.4 Bohrlochgeophysik 48
II.1.4 Tests zur Ermittlung der geohydraulischen Eigenschaften des Kluftwasserleiters 49
II.1.4.1 Rahmenbedingungen bei Pumpversuchen im Festgestein 49
II.1.4.2 Modellvorstellungen zu den hydraulischen Verhältnissen in Kluftaquiferen 50
II.1.4.2.1 Statistisch zufällig und gleichmäßig verteilte Klüfte 50
II.1.4.2.2 Aquifer aus bevorzugten Leit- und Speicherschichten 50
II.1.4.2.3 Aquifer aus einer endlich dimensionierten Kluft 51
II.1.4.2.4 Aquifer aus einem Zwei-Porositäts-Medium 53
II.1.4.3 Modellauswahl zur Auswertung der durchgeführten Pumpversuche 57

II.2 Exploration im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth 58
II.2.1 Lage des Explorationsgebietes Sagenbachtal 58
II.2.2 Untersuchungsprogramm im Explorationsgebiet Sagenbachtal 58
II.2.3 Ergebnisse der Explorationsmaßnahmen im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth 59
II.2.3.1 Gleichstrom-Geoelektrische-Sondierungen 59
II.2.3.2 Stereoskopische Luftbildauswertung und tektonische Rahmenbedingungen 60
II.2.3.3 Bohrungen und Bohrlochradar-Messungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal 61
II.2.3.3.1 Lockergesteinsbohrungen GwM 1, GwM 2, GwM 2alt 62
II.2.3.3.2 Festgesteinsbohrungen GwM 3, GwM 4 62
II.2.3.3.3 Bohrlochradar-Messungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal 63
II.2.3.4 Ermittlung der geohydraulischen Eigenschaften im Explorationsgebiet Sagenbachtal 65
II.2.3.4.1 Pumptest an der GwM 1 65
II.2.3.4.2 Pumptest an der GwM 4 65
II.2.3.4.3 Grundwasserströmungsmessungen im Schotterkörper 66
II.2.3.5 Grundwassercharakteristik im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth 67
II.2.3.6 Klimatologie und hydrologische Bilanzierung im Einzugsgebiet Sagenbachtal 70
II.2.3.6.1 Berechnungen und Bilanzierung der Parameter 70
II.2.3.6.2 Fehlerbetrachtung 74
II.2.4 Beurteilung der geohydraulischen Verhältnisse im Sagenbachtal 75

II.3 Exploration im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl 78
II.3.1 Lage der Explorationsgebiete im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl 78
II.3.2 Untersuchungsprogramm in den Explorationsgebieten Weißgraben und Entfeld 78
II.3.3 Ergebnisse der Explorationsmaßnahmen im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl 79
II.3.3.1 Erkundungsbohrungen im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl 79
II.3.3.1.1 Erkundungsbohrungen ER 1 und ER 4 im Explorationsgebiet Weißgraben 79
II.3.3.1.2 Erkundungsbohrung ER 3 im Explorationsgebiet Entfeld 80
II.3.3.2 Pumpversuche zur Erkundung der geohydraulischen Verhältnisse in den Explorationsgebieten 81
II.3.3.2.1 Pumpversuche im Explorationsgebiet Weißgraben (ER 1, ER 4) 81
II.3.3.2.2 Pumptest im Explorationsgebiet Entfeld (ER 3) 82
II.3.3.3 Geophysikalische Bohrlochuntersuchungen und Kamerabefahrungen 82
II.3.3.3.1 Ergebnisse an der Erkundungsbohrung ER 1 83
II.3.3.3.2 Ergebnisse an der Erkundungsbohrung ER 4 84
II.3.3.4 Grundwassercharakteristik im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl 88
II.3.3.5 Klimatologie und klimatische Wasserbilanz im Einzugsgebiet Weißgraben 92
II.3.4 Beurteilung der geohydraulischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl 95

Teil III Bewertung und Folgerungen auf Grundlage der Erschließung von Trinkwasser aus dem Hauptdolomit in den Nördlichen Kalkalpen

III.1 Geologische und strukturgeologische Voraussetzungen zur Erschließung von Trinkwasser aus dem Hauptdolomit ____ 99

III.1.1 Großräumige sowie detaillierte geologische und strukturgeologische Vorerkundung 99

III.1.2 Unterschiedliche Voraussetzungen bei der Exploration von Trinkwasser in der Allgäu-Decke, Lechtal-Decke und des Tirolikums 100

III.2 Bedeutung der hydrologischen Bilanzierung der Einzugsgebiete für die Abschätzung der Grundwasserdargebote ____ 102

III.3 Die hydrochemische Charakteristik als Schlüssel zur erfolgreichen Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit ____ 103

III.3.1 Hydrochemische Klassifikation für konkrete Erkundungsmaßnahmen im Hauptdolomit 103

III.3.2 Großräumige geochemische Klassifikation von Grundwässern (GLA Bayern) 104

III.3.3 Vergleich der Klassifikationen 104

III.4 Charakteristik des Kluftgrundwasserleiters Hauptdolomit ____ 106

III.5 Schematischer Explorationsablauf einer Trinkwasser-Erschließung aus dem Hauptdolomit der Nördlichen Kalkalpen ____ 110

III.6 Chancen und Risiken einer Trinkwasser-Exploration aus dem Hauptdolomit ____ 114

Literaturverzeichnis ____ 115

Anlagen (gesonderter Anlagenband)

1 Übersichtskarten der Explorationsgebiete in den nach der Vorerkundung ausgewiesenen Untersuchungsgebieten — A - 5
- 1.1 Übersichtskarte Untersuchungsgebiet Ruhpolding/Bergen — A - 6
- 1.2 Übersichtskarte Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth — A - 7
- 1.3 Übersichtskarte Untersuchungsgebiet Reit im Winkl — A - 8

2 Explorationsgebiet Sagenbachtal — A - 9
- 2.1 DGM des Explorationsgebietes Sagenbachtal — A - 10
- 2.2 Übersichtskarte des Explorationsgebietes Sagenbachtal — A - 11

3 Explorationsgebiet Weißgraben, Rabengschöß und Entfeld — A - 12
- 3.1 DGM der Explorationsgebiete Weißgraben, Rabengschöß und Entfeld — A - 13
- 3.2 Übersichtskarte der Explorationsgebiete Weißgraben, Rabengschöß und Entfeld — A - 14

4 Luftbildlineamente in den Untersuchungsgebieten — A - 15
- 4.1 Luftbildlineamente im Untersuchungsgebiet Ruhpolding/Bergen — A - 16
- 4.2 Luftbildlineamente im Untersuchungsgebiet Rottach-Egrn/Kreuth — A - 17
- 4.3 Luftbildlineamente im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl — A - 18

5 Schottermächtigkeit im Explorationsgebiet Sagenbachtal — A - 19

6 Hydrochemie — A - 21
- 6.1 Übersicht der Probenpunkte — A - 22
- 6.2 Verzeichnis der Grenzwerte für die analysierten Parameter nach der TrinkwV 2001 und DIN 50930 — A - 24
- 6.3 Chemisch-physikalische Analysen — A - 25
- 6.4 Mikrobiologische Analysen — A - 48
- 6.5 Zusätzlich untersuchte Parameter an ausgewählten Proben — A - 49
- 6.6 Klassifikation im Ca-Mg-Diagramm — A - 50
- 6.7 Klassifikation im Ca-Mg-SO_4-Diagramm — A - 51
- 6.8 Hydrogeochemische Typisierung von Grundwasser nach WAGNER ET AL. (2003) — A - 53
- 6.9 Darstellung der Messunsicherheit im klassifikatorischen Ca-Mg-Diagramm — A - 56
- 6.10 Darstellung der Messunsicherheit im klassifikatorischen Ca-Mg-SO_4-Diagramm — A - 57

7 Profile und Ausbaupläne der Erkundungsbohrungen im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth — A - 58
- 7.1 Erkundungsbohrung GwM 1 — A - 59
- 7.2 Erkundungsbohrung GwM 2 — A - 61
- 7.3 Erkundungsbohrung GwM 2alt — A - 63
- 7.4 Erkundungsbohrung GwM 3 — A - 65
- 7.5 — A - 67

8 Profile und Ausbaupläne der Erkundungsbohrungen im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl — A - 69
- 8.1 Erkundungsbohrung ER 1 — A - 70
- 8.2 Erkundungsbohrung ER 3 — A - 72
- 8.3 Erkundungsbohrung ER 4 — A - 74

9 Siebanalysen der Lockergesteine aus der GwM 1 und GwM 4 (Explorationsgebiet Sagenbachtal) — A - 76
- 9.1 Korngrößenverteilung, Porosität und Durchlässigkeitsbeiwert (GwM 1, GwM 4) — A - 77
- 9.2 Siebkurven (GwM 1, GwM 4) — A - 78

10 Klimatologie und hydrologische Berechnungen für das Einzugsgebiet Sagenbachtal (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth) — A - 79
- 10.1 Niederschlags- und Temperaturgradienten; Niederschlag und Temperatur exemplarischer Höhenstufen im Einzugsgebiet Sagenbachtal — A - 80
- 10.2 Isochromatische Karten der Temperaturverteilung im Einzugsgebiet Sagenbachtal — A - 81
- 10.3 Berechnung von P, ET_p und P_0 für das Einzugsgebiet Sagenbachtal — A - 83

10.4 Isochromatische Karten der P_0-Verteilung im Einzugsgebiet Sagenbachtal A - 84

10.5 Oberflächenabfluss, Abfluss im Schotterkörper (bei exemplarischen Grundwasserständen) A - 86
10.6 Gesamtbilanzierung der klimatologischen und hydrologischen Parameter für das Einzugsgebiet Sagenbachtal A - 87

11 Klimatologie und hydrologische Berechnungen für das Einzugsgebiet Weißgraben (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) A - 88
11.1 Niederschlags- und Temperaturgradienten; Niederschlag und Temperatur exemplarischer Höhenstufen im Einzugsgebiet Weißgraben A - 89
11.2 Isochromatische Karten der Temperaturverteilung im Einzugsgebiet Weißgraben A - 90
11.3 Bilanzierung der klimatologischen Parameter für das Einzugsgebiet Weißgraben A - 92
11.4 Isochromatische Karten der P_0-Verteilung im Einzugsgebiet Weißgraben A - 93

12 Übersicht der durchgeführten Pumpversuche im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl A - 95

13 Geophysikalische Untersuchungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth) A - 97
13.1 Ergebnisse der Gleichstrom-Geoelektrischen Messungen im Sagenbachtal A - 98
13.2 Lageplan der Messpunkte mit zugeordneten Schottermächtigkeiten A - 99
13.3 Bestimmung der komplexen Dielektrizitätskonstante an Hauptdolomit-Kernproben aus der GwM 4 A - 100
13.4 Multishot-Messungen in der GwM 3 und GwM 4 A - 101
13.5 Bohrlochradar-Messungen in der GwM 3 und GwM 4 A - 103
13.6 Grundwasserströmungs-Messungen GwM 1 A - 106

14 Geophysikalische Untersuchungen im Explorationsgebiet Weißgraben (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) A - 110
14.1 Messkurven (Übersicht) der TEMP-Logs, SAL-Logs und FLOW-Logs (ER 1, ER 4) A - 111
14.2 Quantifizierung der Zuflüsse in die Bohrungen (berechnet auf Grundlage der FLOW-Logs) A - 115

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Hierarchische Ordnung der Untersuchungsebene	14
Abb. 2	Struktur der Arbeitsschritte	15
Abb. 3	Übersicht des Vorerkundungsgebietes und Lage der Untersuchungsgebiete	18
Abb. 4	Großtektonische Übersicht im mittleren Abschnitt der Nördlichen Kalkalpen	21
Abb. 5	Darstellbare Grundwassercharakteristiken in den beiden angewandten Diagrammformen, a) Ca-Mg-Diagramm, b) Ca-Mg-SO_4-Diagramm	45
Abb. 6	Entwicklung des REV für verschiedene Aquifertypen	51
Abb. 7	Schematische Darstellung eines idealen Absenkungs- und Wiederanstiegsvorgangs in Zwei-Porositätsmedien	54
Abb. 8	Schema der gebräuchlichsten Zwei-Porositätsmodelle	54
Abb. 9	Schematische Darstellung eines Block-Kluft-Systems mit Kluftskin	56
Abb. 10	Geometrische Konfiguration des (A) plattenförmigen (*slab-shaped*) und des (B) kugelförmigen (*sphere-shaped*) Blocksystems	57
Abb. 11	E-W Profil, Schottermächtigkeit im Sagenbachtal; erstellt auf Grundlage der Auswertung der Gleichstrom-Geoelektrischen Sondierungen sowie des DGM	59
Abb. 12	Morphologische Gliederung des Explorationsgebietes Sagenbachtal	60
Abb. 13	N-S Profil durch das Sagenbachtal	61
Abb. 14	Klassifikation der chemisch-physikalischen Analysen im Zweistoff-Diagramm (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth)	68
Abb. 15	Klassifikation der chemisch-physikalischen Analysen im Dreistoff-Diagramm (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth)	69
Abb. 16	Niederschlags- und Temperaturverteilung im EZG Sagenachtal (Beispielmonat Juli)	71
Abb. 17	Darstellung und Quantifizierung der Bilanzierungsparameter	77
Abb. 18	Exemplarischer Verlauf der Absenkung, des Wiederanstiegs, der Temperatur sowie der Leitfähigkeit an den Erkundungsbohrungen ER 1 und ER 4 (Beispiel Pumpversuch ER4/PV4)	81
Abb. 19	Ergebnisübersicht der Pumpversuchsauswertungen der Bohrungen ER 1 und ER 4	82
Abb. 20	Bereiche der Hauptzuflüsse in die ER 1; a) Z4/ER1: 136,60 m u.GOK; b) Z5/ER1: 158,80 m u.GOK	83
Abb. 21	Bereiche der Hauptzuflüsse in die ER 4; a) Z8/ER4: 109,10 m u.GOK; b) Z10/ER4: 146,80 m u.GOK	85
Abb. 22	Korrelation der Untersuchungsmethoden an der ER 1, graphische Darstellung der Zuflussbereiche	86
Abb. 23	Korrelation der Untersuchungsmethoden an der ER 4, graphische Darstellung der Zuflussbereiche	87
Abb. 24	Klassifikation der chemisch-physikalischen Analysen im Zweistoff-Diagramm (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl)	90
Abb. 25	Klassifikation der chemisch-physikalischen Analysen im Dreistoff-Diagramm (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl)	91
Abb. 26	Niederschlag- und Temperaturverteilung im Einzugsgebiet Weißgraben (Beispielmonat Juli)	94
Abb. 27	Schematische Darstellung von kompressiven und extensiven Kluftbereichen in Sattel- und Muldenstrukturen	100
Abb. 28	Vergleich der GLA-Klassifikation mit dem hydrochemischen Klassifikationsschema der vorliegenden Arbeit	105
Abb. 29	Mögliche Klufwasserwege im Hauptdolomit des Untersuchungsgebietes Reit im Winkl	108
Abb. 30	Schematischer Explorationsablauf einer Trinkwasser-Erschließung aus dem Hauptdolomit in den Nördlichen Kalkalpen	113

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Im Rahmen der Vorerkundung untersuchte Teilgebiete und ausgewiesene Untersuchungsgebiete	17
Tab. 2	Höffige Untersuchungsgebiete im Hinblick auf mögliche Kluftgrundwassererschließungen	24
Tab. 3	Astronomisch mögliche Sonnenscheindauer	41
Tab. 4	Typus-Wässer, Endglieder möglicher Mischreihen	44
Tab. 5	Darstellbare Grundwassercharakteristiken in den angewandten Diagrammformen	45
Tab. 6	Bohrungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal	62
Tab. 7	Ergebnisübersicht der Berechnungen zum Pumptest an der GwM 1	65
Tab. 8	Zusammenstellung der Ergebnisse der Grundwasserströmungs-Messungen	67
Tab. 9	Lage der Temperatur- und Niederschlagsmessstationen für das EZG Sagenbachtal sowie verwendeter Erfassungszeitraum	70
Tab. 10	Berechnete Gebietsniederschlagshöhen, Temperaturen, potentielle Evapotranspiration und klimatische Wasserbilanz P_0 für das Einzugsgebiet EZG_o Sagenbachtal	72
Tab. 11	Erkundungsbohrungen im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl	79
Tab. 12	Bohrklein-Charakteristika zur Bohrgutansprache	80
Tab. 13	Wasserzutritte aus Kluftzonen der ER 1, nach Korrelation der verschiedenen Untersuchungsmethoden	83
Tab. 14	Wasserzutritte aus Kluftzonen der ER 4, nach Korrelation der verschiedenen Untersuchungsmethoden	84
Tab. 15	Gegenüberstellung ausgewählter Parameter der Wasseranalysen an den Erkundungsbohrungen	89
Tab. 16	Lage der Temperatur- und Niederschlagsmessstationen sowie verwendeter Datenbereich für das EZG Weißgraben	92
Tab. 17	Berechnete Gebietsniederschlagshöhen, Temperaturen, potentielle Evapotranspiration und klimatische Bilanz P_0 für das Einzugsgebiet EZG_o Weißgraben	93
Tab. 18	Ruhewasserspiegel ausgewählter Grundwassermessstellen	97
Tab. 19	Ruhewasserspiegel im Explorationsgebiet Weißgraben	106

Zusammenfassung

Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, einen schematischen Ablauf für die Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit der alpinen Trias zu entwickeln. In einer Vorerkundungsphase wurde die Strukturgeologie und Lithologie der Nördlichen Kalkalpen von Inzell im E bis zum Kochelsee im W untersucht, um eine erfolgreiche Trinkwasserexploration aus geklüftetem Hauptdolomit aufzubauen. Störungen aus den jüngsten tektonischen Spannungsphasen der alpinen Tektonik, die ältere Strukturen schneiden und bis in das Alpenvorland zu verfolgen sind, zeigen Wegsamkeiten für Kluftwasser im Hauptdolomit. Geeignete Voraussetzungen für weiterführende Explorationsmaßnahmen wurden in den Untersuchungsgebieten Ruhpolding/Bergen (Allgäu-Decke), Rottach-Egern/Kreuth (Lechtal-Decke) sowie Reit im Winkl (Tirolikum) gefunden.

Im Anschluss an diese Vorerkundungsphase durchgeführte Bohrungen im Festgestein, sowie geophysikalische Untersuchungen und Pumpversuche in den Bohrungen der Untersuchungsgebiete Rottach-Egern/Kreuth und Reit im Winkl lieferten neue Daten zur geohydraulischen Charakteristik des Kluftwasserleiters Hauptdolomit. Die Festgesteinsbohrungen durchteuften im Liegenden der quartären Überdeckung ausschließlich die lithologische Einheit Hauptdolomit. Im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth handelt es sich um kompakten, feinst geklüfteten Hauptdolomit, während im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl z.T. intensiv kataklastisch zerrüttete Zonen lokalisiert werden konnten, die ihren Ursprung in wiederholt aktivierten tektonischen Bewegungsbahnen haben. Die Bohrungen ER 1 und ER 4 (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) durchteuften mehrere wasserführende Kluftsysteme, in denen artesisch gespanntes Grundwasser angetroffen wurde (0,08 - 1,65 bar). Aus den Kennlinien der Pumpversuche wurden integrale k_f-Werte im Bereich von $1x10^{-6}$ m/s bis $8x10^{-7}$ m/s ermittelt. Durch Korrelation von Bohrlochgeophysik mit Kamerabefahrungen konnten in der ER 1 neun, in der ER 4 vierzehn wasserführende Kluftzonen lokalisiert werden. Die Ergebnisse der Pumpversuche ergaben eine Leistung von 17 l/s (ER 4) bis 19 l/s (ER 1). In den übrigen Festgesteinsbohrungen (ER 3 im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl, GwM 3 und GwM 4 im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth) konnte lediglich ein Grundwasserzufluss von < 3 l/s verzeichnet werden. Durch ein ergänzendes Bohrloch-Radar-Verfahren ließ sich im Umfeld der Bohrungen Rottach-Egern/Kreuth (GwM 3, GwM 4) keine erhöhte Klüftigkeit nachweisen, womit die geringe Ergiebigkeit dieser Explorationsbohrungen zu erklären war.

Die Ergebnisse der Bohrungen, der Pumpversuche sowie der geophysikalischen und strukturgeologischen Untersuchungen im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl (ER 1, ER 4) wiesen auf einen anisotropen Kluftgrundwasserleiter im Hauptdolomit hin. Seine besondere Charakteristik resultiert aus der Vernetzung von Kluftsystemen verschiedener Ordnungen, die für Kluftwässer Verbindungen hydraulischer sowie hydrostatischer Natur ermöglichen.

Um die Grundwasserneubildung in den durch die Geländemorphologie vorgegebenen Einzugsgebieten in Reit im Winkl und Rottach-Egern Kreuth abschätzen zu können, wurden digitale Geländemodelle erstellt, auf deren Grundlage die Niederschlags- (P), Temperatur- (T) sowie potenzielle Evapotranspirations-Verteilung (ET_p) berechnet werden konnte. Mit diesen Daten ließ sich eine klimatische Wasserbilanz (P_0) erstellen, die die Menge der Grundwasserneubildung sowie des Oberflächen- und Grundwasserabflusses umfasst (Jahresmittel P_0: Rottach-Egern/Kreuth 936 mm, Reit im Winkl 825 mm). Im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth konnte für das durch die natürlichen Wasserscheiden morphologisch begrenzte Einzugsgebiet (EZG_o) eine hydrologische Bilanzierung des Oberflächenabflusses sowie des oberflächennahen Grundwaserabflusses im

Schotterkörper mit der klimatischen Wasserbilanz P_0 vorgenommen werden. Die resultierende Bilanz ergab, dass aus dem Einzugsgebiet EZG_o mehr Wasser an der Oberfläche und im Schotterkörper abfließt, als ihm durch P_0 zugeführt wird. Unter Berücksichtigung des geologischen und hydrogeologischen Umfeldes muss der Zufluss des zusätzlichen Grundwassers über ein Kluftsystem aus einem unterirdischen Einzugsgebiet EZG_u erfolgen. Durch diese hydrologische Bilanzierung lässt sich nachweisen, dass dem Hauptdolomit im Untersuchugsgebiet Rottach-Egern/Kreuth über das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o hinaus Kluftgrundwasser zugeführt wird.

Um eine Abschätzung der Lage eines unterirdischen Einzugsgebietes vornehmen zu können, hat sich ein hydrochemisches Klassifikationsschema mittels Zweistoff- und Dreistoff-Diagrammen (Ca-Mg- sowie Ca-Mg-SO_4-Diagramm) bewährt. Unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse ist eine hydrochemische Charakterisierung der Grundwässer innerhalb der Untersuchungsgebiete möglich. Dabei können drei Kategorien unterschieden werden: Dolomit-Wasser, Kalziumkarbonat-Wasser, sulfatreiches Wasser. Damit können Zumischungen aus lithologisch gleichen oder lithologisch verschiedenen, erweiterten Einzugsgebieten erkannt werden. Das in Reit im Winkl in der ER 1 und ER 4 erschlossene Grundwasser weist eine typische Dolomitwasser-Charakteristik auf, die auf ein erweitertes Einzugsgebiet mit überwiegend Hauptdolomit hinweist. Die in Rottach-Egern/Kreuth analysierten Grundwässer geben durch z.T. hohe Sulfatgehalte Hinweise auf Raibler Schichten im erweiterten Einzugsgebiet. Im Hinblick auf die Kluftwasserquantität und -qualität haben diese Ergebnisse gezeigt, dass bei Trinkwassererschließungen im Hauptdolomit die erweiterten unterirdischen Einzugsgebiete, über die vorgegebenen morphologisch begrenzten Einzugsgebiete hinaus, in besonderem Maß zu berücksichtigen sind. Ein großräumiges, erweitertes Hauptdolomitgebiet mit Mächtigkeiten von > 500 m ist von Vorteil; Zumischungen aus anderen lithologischen Einheiten können durch die hydrochemische Charakteristik der Grundwässer erkannt werden.

Die Wegsamkeit des Kluftwassers im Hauptdolomit erfolgt über die großräumige, indirekte Vernetzung lokal begrenzter, hydraulisch gut leitfähiger Kluftsysteme. Kern dieser Systeme sind Großklüfte (Klüfte 1. Ordnung), die an Störungszonen der jüngsten alpinen Tektonik gebunden sind. Den Klüften 1. Ordnung wird über Kleinklüfte (Klüfte 2. Ordnung) und engmaschige Feinstklüftung (Klüfte 3. Ordnung) im direkten Umfeld Kluftwasser zugeführt. Lokal begrenzte Vernetzungen um die Klüfte 1. Ordnung sind lediglich durch weiträumige Umläufigkeiten über die Kluftsysteme 2. (hydraulisch, z.T. hydrostatisch) und 3. Ordnung (vorwiegend hydrostatisch) gegeben. Aus der großräumigen Verteilung und Verbindung der Kluftsysteme im Hauptdolomit resultieren anisotrope Wegsamkeiten für das Grundwasser im Kluftkörper, die innerhalb lokal eng begrenzter Bereiche stark variieren können.

Auf Grundlage der im Zuge der Explorationsmaßnahmen gewonnenen Erkenntnisse wurde ein schematischer Explorationsablauf entwickelt, der auf die spezielle Charakteristik des Kluftwasserleiters Hauptdolomit zugeschnitten ist. Der Ablauf ist bis zum Bau eines Brunnens zur Trinkwassergewinnung in 5 Phasen gegliedert, die ihrerseits z.T. verschiedene Erkundungsoptionen bieten. Mithilfe dieses Explorationsablaufs ist es möglich Explorationsprogramme zur Trinkwassererschließung im Hauptdolomit der Nördlichen Kalkalpen zu planen und gut geschütztes und hygienisch einwandfreies Trinkwasser zu gewinnen.

Einleitung und Aufgabenstellung

Die Wasserversorgung nahezu sämtlicher Alpengemeinden beruht ausschließlich auf der Fassung von oberflächennahen Quellen oder Brunnen im Lockergestein. Die Quantität des Grundwassers ist meist ausreichend, jedoch sind viele Gemeinden gezwungen, das Grundwasser aufzubereiten, um die vom Gesetzgeber geforderte Trinkwasserqualität zu gewährleisten. Wenn dies nicht möglich ist, muss eine neue, gut zu schützende Hauptversorgung aufgebaut werden. Darüber hinaus verlangen die Wasserwirtschaftsämter (WWA) von vielen Wasserversorgern in den Alpen, ihre Trinkwasserversorgung durch eine Notwasserversorgung abzusichern.

In der vorliegenden Arbeit “Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit in den Nördlichen Kalkalpen” sollen Möglichkeiten zur Erschließung von qualitativ hochwertigem und gut schützbarem Grundwasser im bayerischen Alpenraum aufgezeigt werden. Hintergrund sind die weit verbreiteten Probleme der Alpengemeinden, hygienisch einwandfreies Grundwasser zu gewinnen, bzw. für die bestehenden Quellen und Brunnen ausreichende Schutzgebiete auszuweisen.

Es gibt im bayerischen Kalkalpenraum nur eine Trinkwassererschließung aus dem Hauptdolomit im größeren Ausmaß, das ist mit 2 Mio m³/a die Trinkwasserversorgung der Stadt Bad Reichenhall. Die weite Verbreitung des Hauptdolomits in den Nördlichen Kalkalpen legt es nahe, Grundsätze für die Exploration von Grundwasser aus dem geklüftetem Hauptdolomit zu entwickeln. Erste Erfahrungen und Erkenntnisse über die Charakteristik des Hauptdolomits als Grundwasserleiter wurden während der Erschließungsarbeiten in Bad Reichenhall gesammelt, die in einer Dissertation wissenschaftlich ausgewertet wurden (Fellehner 2004). Darin ist ein hydrogeologisches Modell für den Kluftwasserleiter Hauptdolomit entwickelt worden, das auf strukturgeologischen und hydrochemischen Untersuchungen beruht. Weiter konnte durch Berechnung klimatologischer Parameter eine Abschätzung der Grundwasserneubildung vorgenommen werden.

Vor diesem Hintergrund wurde vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW Bayern) das Forschungsprojekt *“Grundwassererkundung in Bayern, Kennz. 18.17, Kalkalpine Randzone”* initiiert und finanziert, das zum Ziel hatte, Möglichkeiten zur Grundwassererschließung speziell aus der lithologischen Einheit Hauptdolomit in den bayerischen Kalkalpen zu erkunden. In diesem Projekt sollte als tektonische Vorgabe berücksichtigt werden, jeweils ein Untersuchungsgebiet in den tektonischen Einheiten Allgäu-Decke, Lechtal-Decke und Tirolikum auszuweisen und zu erkunden, um Kenntnis über etwaige hydrogeologische Unterschiede zu erhalten. Die Bearbeitung und Durchführung wurde neben dem Autor dieser Arbeit von Prof. Dr. H. Zankl (Philipps-Universität Marburg, Institut für Geowissenschaften) übernommen. Das Projekt war in eine Vorerkundungsphase (2001-2002) sowie in konkrete Erkundungsprogramme (2002-2004) gegliedert. Die Ergebnisse der Erkundungsschritte bilden die Basis der vorliegenden Dissertation.

In Abbildung 1 ist die hierarchische Ordnung der Untersuchungsebenen (Vorerkundungsgebiet -> Untersuchungsgebiet -> Explorationsgebiet) und in Abbildung 2 die dreiteilige Struktur der Arbeitsschritte schematisch dargestellt.

Der Teil I umfasst die Vorerkundungsmaßnahmen, die im ersten Schritt zur Ausweisung von drei Untersuchungsgebieten (Allgäu-Decke: Ruhpolding/Bergen, Lechtal-Decke: Rottach-Egern/Kreuth, Tirolikum: Reit im Winkl) und im zweiten Schritt zur Abgrenzung von Explorationsgebieten führen, in denen Erkundungsbohrungen zur Trinkwassererschließung im Hauptdolomit durchgeführt werden können.

Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsgebiete sind: Ausweisung von je einem

Untersuchungsgebiet in den drei tektonischen Einheiten (Vorgabe des LfW Bayern), junge strukturgeologische Elemente sowie weiträumige Einzugsgebiete im Hauptdolomit. Innerhalb der Untersuchungsgebiete erfolgt die Abgrenzung von Explorationsgebieten, in denen konkrete Erkundungsmaßnahmen (u.a. Bohrungen, Pumpversuche) durchgeführt werden. Entscheidend für die Begrenzung der Explorationsgebiete sind die Ergebnisse detaillierter strukturgeologischer Untersuchungen (Geländemessungen, stereoskopische Luftbildauswertungen), hydrochemischer Analysen von Quellen und Brunnen sowie quantitativer Bestimmung der Einzugsgebiete.

Im Teil II werden die konkreten Erkundungsmaßnahmen in den Explorationsgebieten Sagenbachtal (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth) sowie Weißgraben und Entfeld (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) dokumentiert und die speziellen Erkenntnisse zu den geohydraulischen Verhältnissen im Hinblick auf eine Trinkwassergewinnung aus dem Hauptdolomit ausgewertet. Dazu dienen die Ergebnisse aus Festgesteinsbohrungen, Pumpversuchen, geophysikalischen Untersuchungen sowie hydrochemischer Analysen. Für die oberirdischen Einzugsgebiete EZG_o werden klimatologische Parameter berechnet, um unter Berücksichtigung von ober- und unterirdischem Abfluss eine hydrologische Bilanzierung vornehmen zu können. Die Erkundungsergebnisse geben Aufschluss über die geohydraulischen Eigenschaften des Kluftwasserleiters, die Quantität und Qualität sowie die hydrochemische Charakteristik des zu erwartenden Grundwassers im Hauptdolomit.

Die Ergebnisse der konkreten Erkundungsmaßnahmen werden im Teil III der Arbeit diskutiert und bewertet. Es resultiert ein exemplarischer Explorationsablauf für eine Grundwassererschließung aus dem Hauptdolomit, welcher der besonderen Charakteristik des Kluftwasserleiters Rechnung trägt.

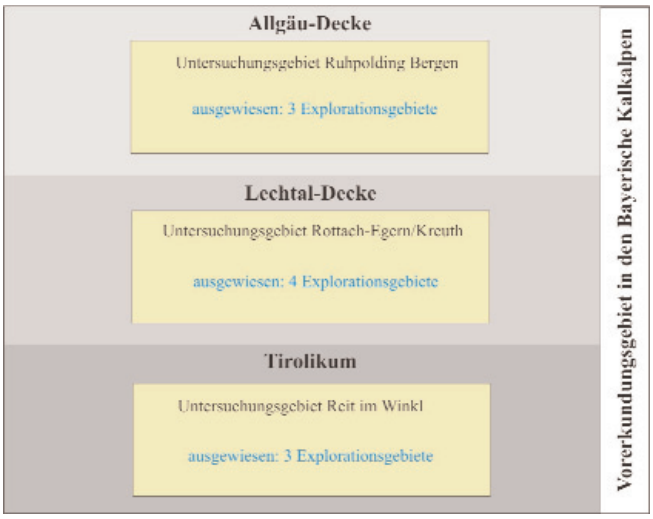


Abb. 1: Hierarchische Ordnung der Untersuchungsebenen

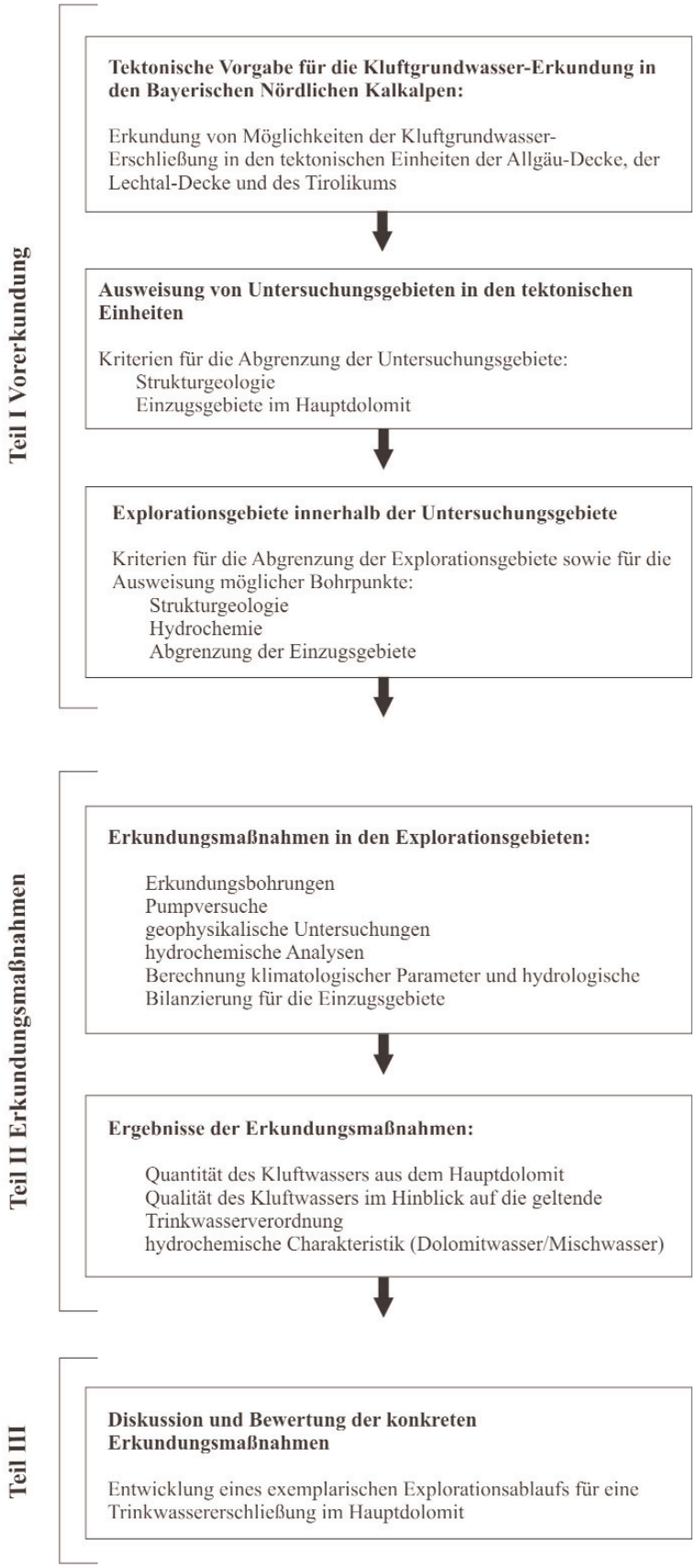


Abb. 2: Struktur der Arbeitsschritte

Teil I

Vorerkundung zur Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit

I.1 Lage und Abgrenzung des Vorerkundungsgebietes

Das zu untersuchende Vorerkundungsgebiet umfasst den bayerischen Teil der Nördlichen Kalkalpen. Es erstreckt sich von der Gemeinde Kochel a. See (Lkr. Weilheim) im Westen bis zur Gemeinde Inzell (Lkr. Traunstein) im Osten (Abb. 3). Im Süden wird das Vorerkundungsgebiet von der Landesgrenze zu Österreich und im Norden vom Kalkalpen-Nordrand begrenzt. Zusätzlich wurde die Gemeinde Garmisch-Partenkirchen (Lkr. Garmisch-Partenkirchen) in das Vorerkundungsprogramm aufgenommen. Das Vorerkundungsgebiet schließt die tektonischen Einheiten Allgäu-Decke, Lechtal-Decke und Tirolikum ein.

Das großräumige Vorerkundungsgebiet ist anhand der Blattschnitte der Geologischen Karten (GK 1:25.000) in Teilgebiete gegliedert worden, welche jeweils gesondert untersucht wurden (Tab. 1, Abb. 3).

Im Verlauf der Vorerkundung wurden Untersuchungsgebiete ausgewiesen, in denen eine Exploration auf Kluftgrundwasser aus dem Hauptdolomit besonders Erfolg versprechend erschien; diese Gebiete sind in Abbildung 3 und Tabelle 1 grün dargestellt.

Teilgebiet	Kartenblatt	zust. Wasserwirtschaftsamt
Garmisch-Partenkirchen	663 Murnau (GK 1:100.000) CC 8726 Kempten (GK 1:200.000)	Weilheim
Kochel am See	8334 Kochel a. See (GK 1:25.000)	Weilheim
Lenggries	8335 Lenggries (GK 1:25.000)	Weilheim
Rottach-Egern/Kreuth	8336 Rottach-Egern (GK 1:25.000)	Rosenheim
Tegernsee	8236 Tegernsee (GK 1:25.000)	Rosenheim
Miesbach	8237 Miesbach (GK 1:25.000)	Rosenheim
Bayrischzell	8338 Bayrischzell (GK 1:25.000)	Rosenheim
Neubeuern	8238 Neubeuern (GK 1:25.000)	Rosenheim
Aschau	8239 Aschau (GK 1:25.000)	Rosenheim
Reit im Winkl	666 Reit im Winkl (GK 1:100.000)	Traunstein
Marquartstein	8240 Marquartstein (GK 1:25.000)	Traunstein
Ruhpolding/Bergen	8241 Ruhpolding (GK 1:25.000)	Traunstein
Inzell	8242 Inzell (GK 1:25.000)	Traunsten

Tab. 1: Im Rahmen der Vorerkundung untersuchte Teilgebiete und ausgewiesene Untersuchungsgebiete (grün)

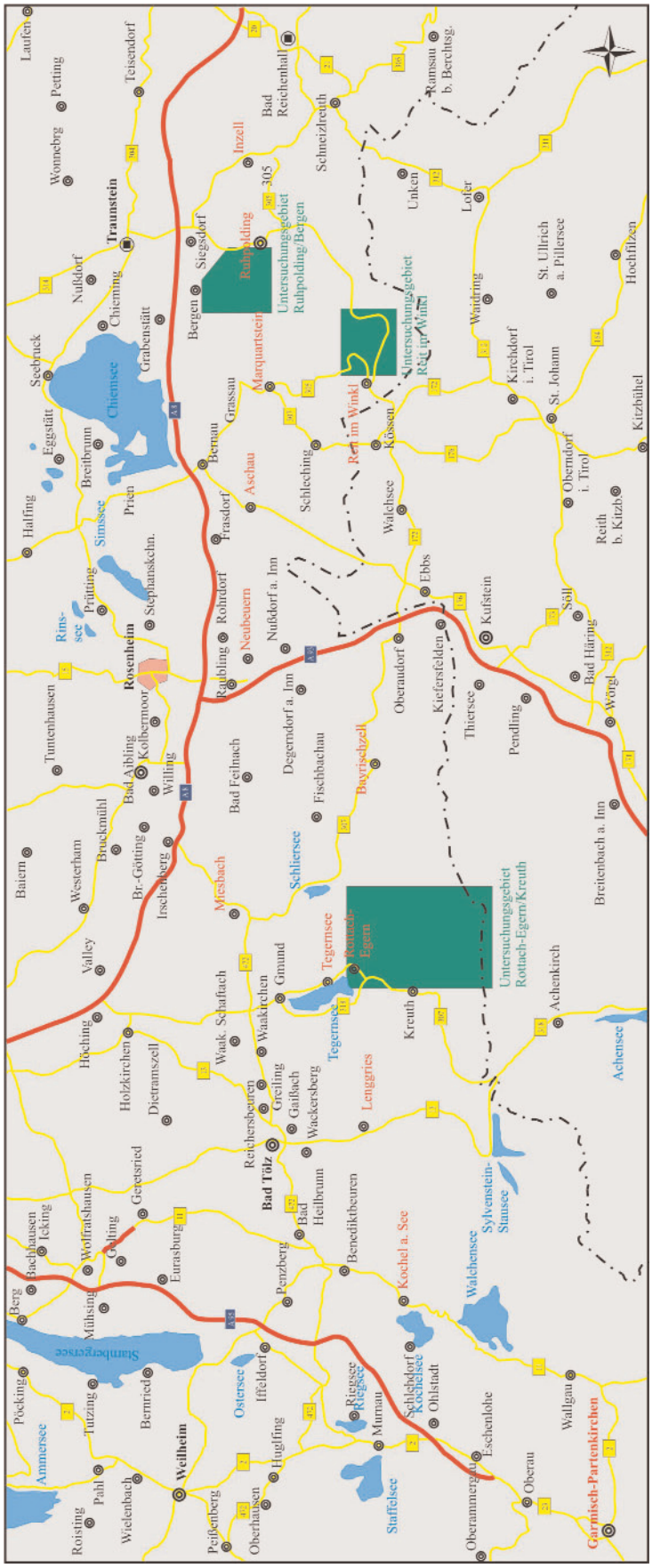


Abb.3: Übersicht des Vorerkundungsgebietes und Lage der Untersuchungsgebiete (rot) bzw. der ausgewiesenen Untersuchungsgebiete (grün)

I.2 Geologischer Überblick des Vorerkundungsgebietes

I.2.1 Hydrologisch relevante lithologische Einheiten

In den folgenden Kapiteln werden die lithologischen Einheiten kurz skizziert, welche für die durchgeführte Grundwassererkundung von Relevanz sind. Diese Gesteinsabfolgen prägen im Wesentlichen den Grundwasserchemismus in den Explorationsgebieten. Sie sind als bestimmender Faktor zur Charakterisierung der untersuchten Grundwässer zu betrachten.

I.2.1.1 Wettersteinkalk und Wettersteindolomit (Trias, Ladin/Karn)

Beim Wettersteinkalk handelt es sich um einen dickbankigen bis massigen, reinen Kalk. Er weist eine weiße bis hellbeige bzw. graue Farbe auf. Die Bankfugen des Gesteins keilen aus und können in einen massigen Riffkalk übergehen, auch synsedimentäre Riffschuttbrekkzien sind zu beobachten. Der Wettersteinkalk prägt als Felsbildner die Morphologie in den Nördlichen Kalkalpen.

Teilweise ist der Wettersteinkalk dolomitisiert, es sind alle Übergänge von schwach dolomitisiertem Wettersteinkalk bis zu einem reinen Wettersteindolomit vorhanden. Der Wettersteindolomit ist dabei nicht ganz niveaubeständig, innerhalb des tieferen Teils der Wettersteinkalkserie jedoch häufiger. Der Wettersteindolomit hat eine hellgraue bis weißliche, z.T. leicht bräunliche Farbe. Hinsichtlich des Verwitterungsverhaltens unterscheidet sich der Wettersteindolomit vom Wettersteinkalk. Der Dolomit verwittert mit rauher Oberfläche zu splittrigem Schutt und Grus, der Wettersteinkalk dagegen neigt zur intensiven Verkarstung und zeigt mit Napfkarren, Rinnenkarren, Karrenfeldern und Dolinen häufig typische Karsterscheinungen.

I.2.1.2 Raibler Schichten (Trias, Karn)

Im Hangenden der Wettersteinkalkserie folgen die Raibler Schichten. Sie gehen ohne deutlich fassbaren lithologischen Übergang in den Hauptdolomit über. Der Raibler Dolomit hat eine gelblich braune Färbung. Eine biostratigraphische Abgrenzung zum Hauptdolomit ist kaum möglich.

Bedingt durch die von Festlandeinflüssen geprägten, flachmarinen Sedimente nehmen die Raibler Schichten in der alpinen Trias eine Sonderstellung ein. So liegt innerhalb der Raibler Schichten eine kleinräumige Verzahnung von Sandsteinen, Schiefertonen, Mergeln, Kalken, Dolomiten, Rauhwacken und Evaporiten (bes. Gips) vor (Jerz 1966). Im Gelände treten vor allem die Rauhwacken als Felsbildner auf, während Sandsteine und Mergel leicht verwittern.

Durch den heterogenen lithologischen Aufbau zeigen die Raibler Schichten auch keine einheitlichen hydrologischen Eigenschaften. Häufig sind Quellhorizonte an stauenden Schichten zu beobachten. Die Raibler Rauhwacken sind hydrologisch sehr wirksam, aus ihnen entspringen Quellen, die große Schüttungen aufweisen können. Durch Lösung aus den Evaporiten weist das Grundwasser aus den Raibler Schichten einen charakteristischen Chemismus auf (hoher Sulfatgehalt, hohe Leitfähigkeit bzw. elektrische Leitfähigkeit; siehe Kap. II.1.2.2).

I.2.1.3 Hauptdolomit (Trias, Nor)

Der hellgelblich graue bis braungraue Hauptdolomit zeigt in ungestörten Bereichen häufig eine Bankung, deren Mächtigkeit vom dm-Bereich bis m-Bereich schwanken kann. Bankweise ist eine Feinschichtung im mm-Bereich zu beobachten, die auf Materialwechsel bzw. auf unterschiedlich hohen Bitumengehalt zurückzuführen ist.

Der Hauptdolomit besteht meist aus reinem Dolomit, örtlich kann der Dolomitgehalt jedoch zurücktreten und es wechseln Kalk- und Dolomitbänke.

Der Hauptdolomit ist vom µm- bis m-Bereich intensiv geklüftet, daraus resultiert die charakteristische Verwitterung zu einem feinen Grus. Die Kluftflächen sind oft mit Kalzit oder Dolomit verheilt. In tektonischen Zerrüttungszonen ist häufig eine feine Kataklase des Dolomits zu beobachten.

Die für den Hauptdolomit typische Klüftung prägt seine hydrologischen Eigenschaften. Die Analyse der Kluftsysteme bildet einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Der Hauptdolomit ist nicht verkarstet, lediglich in den untergeordnet auftretenden Kalkbänken sind Karstlösungen möglich.

I.2.1.4 Plattenkalk (Trias, Nor)

Der Plattenkalk geht in unterschiedlichen Übergangszonen aus dem Hauptdolomit hervor. Der dicht bis feinkörnige Kalkpelit weist eine graue bis dunkelgraue, z.T. fast schwarze Färbung auf, die durch Verwitterungsvorgänge in eine hellgraue Färbung wechselt. Der Plattenkalk ist typischerweise im dm-Bereich deutlich gebankt. Untergeordnet sind dünne Mergellagen im cm-Bereich eingeschaltet. Der verkarstungsfähige Plattenkalk zeigt dem Wettersteinkalk ähnliche hydrologische Eigenschaften.

I.2.2 Großräumige tektonische Gliederung der Nördlichen Kalkalpen

Die im Zuge dieser Arbeit hydrogeologisch untersuchten Explorationsgebiete liegen ausschließlich im Bereich der Nördlichen Kalkalpen (Abb. 4). Diese bilden einen Falten- und Deckengürtel, der dem nördlichen Teil des austroalpinen Deckenkomplexes angehört. Der Aufbau der Nördlichen Kalkalpen lässt sich vom Liegenden zum Hangenden in vier großtektonische Einheiten gliedern: (1) das Bajuvarikum (Allgäu-Decke, Lechtal-Decke), (2) das Tirolikum (Staufen-Höllengebirgs-Decke), (3) das Tiefjuvavikum (Hallstatt-Decken) und (4) das Hochjuvavikum (Berchtesgaden- und Dachstein-Decke). Der stratigraphische Umfang der Gesteinseinheiten reicht vom Oberperm bis zum Eozän.

Im Folgenden wird ein kurzer allgemeiner Überblick über die wichtigsten tektonischen Ereignisse in den Nördlichen Kalkalpen gegeben, die prägend für das heutige Bild der Nördlichen Kalkalpen waren.

Die rezente Position und Struktur der Nördlichen Kalkalpen ist im Wesentlichen auf zwei großtektonische Ereignisse zurückzuführen, zum Einen auf die nach NW gerichtete Deckenstapelung während der Oberkreide bis ins Eozän (Linzer et al. 1995) und zum Anderen auf die laterale, oberoligozäne bis miozäne Extension (Ratschenbacher et al. 1991a, b, Peresson & Decker 1997).

Durch die NW' gerichtete Deckenstapelung erfolgte keine orthogonale, sondern eine in Bezug auf die lange Achse der Alpen schief verlaufende Kompression, wodurch es zu einer lateralen Extension der Deckenkomplexe durch dextrale WNW streichende Blattverschiebungen kam.

Die miozäne Extrusion der Nördlichen Kalkalpen in den pannonischen Raum basiert auf der fort-

schreitenden N-S Verkürzung zwischen dem rheologisch starren Block des europäischen Vorlandes und dem südalpinen adriatischen Block (RATSCHENBACHER et al. 1991a, b, PERESSON & DECKER 1997). Die Extrusion ist dabei in den Nördlichen Kalkalpen in sinistrale, NE streichende Blattverschiebungen, N-NE gerichtete Überschiebungen sowie E gerichtete Abschiebungen transferiert worden.

Die jüngsten Deformationen der Nördlichen Kalkalpen sind für die Hydrogeologie von besonderer Bedeutung. Im Bereich miozäner Störungszonen (strike-slip-faults) sind häufig offene Kluftsysteme vorhanden, die Grundwasserwegsamkeiten im Festgestein bieten. Daher ist die junge Tektonik zur Ausweisung höffiger Untersuchungs- bzw. Explorationsgebiete ein wichtiges Kriterium.

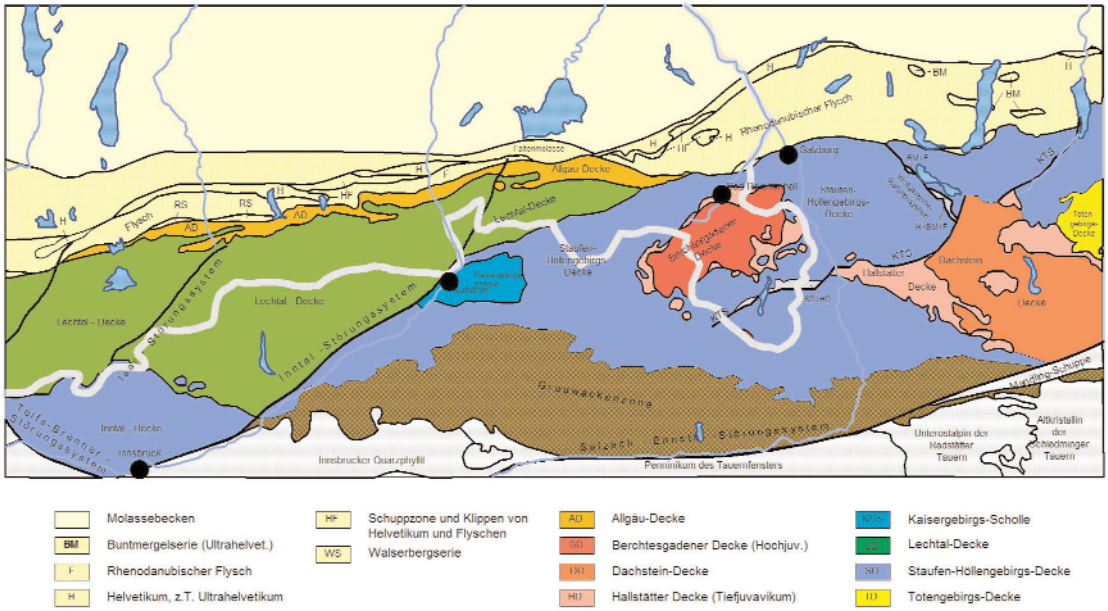


Abb. 4: Großtektonische Übersicht im mittleren Abschnitt der Nördlichen Kalkalpen

I.3 Vorerkundung zur Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit in den Bayerischen Kalkalpen

Während der Vorerkundungsphase des Forschungsprojektes *"Grundwassererkundung in Bayern, Kennz. 18.17, Maßnahme Kalkalpine Randzone (KAR)"* wird unter Berücksichtigung der Vorgabe vom LfW Bayern (s. Einleitung und Aufgabenstellung) jeweils ein Untersuchungsgebiet in den tektonischen Einheiten Allgäu-Decke, Lechtal-Decke und Tirolikum ausgewiesen. In diesen Einheiten werden Explorationsgebiete mit potenziellen Bohrpunkten zur Grundwassererkundung abgegrenzt (Abb. 1).

I.3.1 Untersuchungsgebiete

I.3.1.1 Kriterien zur Abgrenzung der Untersuchungsgebiete

Für die Exploration von Grundwasser in den Bayerischen Kalkalpen wurde der Hauptdolomit als Grundwasserleiter ausgewählt, da er als nicht verkarsteter Kluftkörper die notwendige Verweildauer des Grundwassers gewährleistet und so gute Voraussetzungen für die Erschließung hygienisch unbedenklichen Trinkwassers bietet.

In dem durch bruchhafte Deformation geprägten Hauptdolomit ist ein charakteristisches Kluftsystem wirksam, welches, basierend auf den Öffnungsweiten der Klüfte, in drei Ordnungen gegliedert werden kann (Fellehner 2004): Großklüfte (1. Ordnung), an Störungen gebundene Scherklüfte (2. Ordnung) und Kleinklüfte (3. Ordnung), die den Hauptdolomit kleinräumig zerteilen.

Die Klüfte der 1. Ordnung sind dadurch charakterisiert, dass sie die Schichtung des Hauptdolomits sigmoidal queren und Öffnungsweiten von mehreren dm aufweisen. Durch Flowmetermessungen in den Hauptdolomitbrunnen in Bad Reichenhall (Erschließungsgebiet Listsee) konnte nachgewiesen werden, dass die Hauptzuflüsse über Klüfte der 1. Ordnung erfolgen (Fellehner 2004). Nach Auswertung der Pumpversuche wurde weiter belegt, dass die Klüfte der 1. Ordnung nicht direkt untereinander in Verbindung stehen und der Anstrom des Kluftgrundwassers über Klüfte der 2. und 3. Ordnung erfolgt. Geländebeobachtungen zeigten, dass es sich bei den Klüften der 1. Ordnung um die jüngsten Elemente bei der Anlage des Kluftsystems handelt. Der offene, nicht verstürzte Zustand der Klüfte unterstützt diese Annahme. Strukturgeologisch sind die Großklüfte der 1. Ordnung den jüngsten tektonischen Bewegungen der alpinen Orogenese zuzuordnen. Sie entstanden als Scherklüfte zu jungen, sinistralen Verschiebungsflächen, die sich bis in die Molassezone verfolgen lassen (Ratschenbacher et. al 1991b, Schweigl & Neubauer 1997, Peresson & Decker 1997).

Die Öffnungsweite der Klüfte der 2. Ordnung liegt im cm-Bereich, die Länge kann mehrere 10er Meter betragen. Diese Klüfte sind an Störungen gebunden und stehen im steilen Winkel zur Bankung des Hauptdolomits. Oft sind die Klüfte der 2. Ordnung mit Reibungsbrekkzien verfüllt und die Kluftflächen weisen Harnische auf. Fehllehner (2004) zeigte, dass die Klüfte der 2. Ordnung während Faltungen und Überschiebungen wiederholt als Scherflächen in unterschiedlichen

Bewegungsphasen der alpinen Orogenese gedient haben.

Die Klüfte der 3. Ordnung durchziehen den Hauptdolomitkörper in weiten Bereichen engmaschig, gehen im Oberflächenbereich in die bodennahe Vergrusung über und ermöglichen so einen großräumigen Zutritt des Oberflächenwassers in den Gesteinskörper. Durch die geringen Öffnungsweiten (im Mittel ca. 30 μm) ist eine lange Verweildauer des Grundwassers im Gesteinskörper gewährleistet. Die Klüftung der 3. Ordnung zeigt einen mittleren Kluftabstand von 10 mm. Aus der mittleren Öffnungsweite und dem Kluftabstand ergibt sich ein Kluftraumvolumen von etwa 3 %. Da die Klufträndер häufig Dolomittapeten zeigen, kann das Porenvolumen reduziert sein (Fellehner 2004). Nach Hoek & Bray (in: Domenico & Schwartz 1990) wurde eine hydraulische Leitfähigkeit von ca. $2x10^{-4}$ bis $2x10^{-6}$ m/s abgeschätzt (Fellehner 2004). Dabei wurde eine Halbierung des Kluftraumes durch die Dolomittapeten angenommen. Die Feinklüfte (3. Ordnung) sind dem rupturellen Verhalten des Dolomitgesteins während der alpinen Gebirgsbildung zuzuordnen.

Fellehner (2004) bewertet die hydrogeologische Relevanz der Klüfte der 1., 2. und 3. Ordnung folgendermaßen:

Die Klüfte der 1. Ordnung stehen untereinander nicht direkt in Verbindung, erst durch die Vernetzung mit Klüften der 2. und 3. Ordnung kann ein Grundwasserstrom entstehen. Die Klüfte der 1. Ordnung dienen als Sammler, aus denen die Hauptzuflüsse in die Brunnen erfolgen. Aufgrund der unterschiedlichen Verteilung der Klüfte der 2. und 3. Ordnung muss der Hauptdolomit als ein weitgehend anisotrop hydrogeologisch wirksamer Kluftkörper angesehen werden. Die Klüftung der 3. Ordnung repräsentiert die Grundwasserspeicherkapazität des Kluftkörpers. Weiter ermöglicht die Klüftung der 3. Ordnung den Zutritt von Oberflächenwasser in den Gesteinskörper.

Die Auswertung geologischer Karten und Satellitenbilder erbringen die notwendigen Informationen über die hydrogeologisch relevanten, strukturgeologischen Merkmale in den Untersuchungsgebieten (Tab. 1). Dabei sind die jüngsten Störungssysteme (s.o), aus denen die Anlage der Klüfte der 1. Ordnung resultiert, wichtigstes Kriterium. Schnittbereiche von unterschiedlich streichenden Störungssystemen sind von besonderem Interesse. Weiter lassen weit gespannte Muldenstrukturen im Hauptdolomit Wegsamkeiten erwarten. In Kombination mit Dehnungsklüften, die auf junge sinistrale Verschiebungszonen zurückzuführen sind, können ebenfalls gute hydraulische Wegsamkeiten vorhanden sein (Fellehner 2004).

Bedingung für die Exploration im Hauptdolomit sind ausreichend große Einzugsgebiete. Dabei muss einerseits die Ausdehnung und andererseits die Mächtigkeit des Hauptdolomits berücksichtigt werden, damit dem Grundwasserstrom entsprechend große Sickerflächen zur Verfügung stehen. Liegt das Gebiet der Grundwasserneubildung in den Gebirgsregionen oberhalb der Talsohlen, entsteht ein hydrostatisch gesteuertes Drucksystem, welches zu artesisch aufsteigenden Grundwässern führt. Günstige Voraussetzungen für eine erhöhte Grundwasserneubildung bilden verkarstungsfähige Kalke (z.B. Plattenkalk oder Wettersteinkalk), deren Karstwässer in den Kluftwasserkörper des Dolomites eingespeist werden und auf diese Weise die notwendige Verweildauer des Grundwassers gewährleistet wird.

Für die Abgrenzung der Untersuchungsgebiete ist eine Mindestmächtigkeit des Hauptdolomits von 500 m angesetzt, die potenziellen Einzugsgebiete sollten eine Fläche von mindestens 5 km^2 aufweisen.

I.3.1.2 Ausweisung der Untersuchungsgebiete

Basierend auf den in Kap. I.3.1.1 erläuterten Beurteilungskriterien werden Untersuchungsgebiete ausgewiesen, in welchen weitere und detailliertere Untersuchungen im Hinblick auf eine mögliche Grundwassererschließung aus dem Hauptdolomit aussichtsreich erscheinen. Unter Berücksichtigung der Vorgabe vom LfW Bayern, Maßnahmen in der Allgäu-Decke, der Lechtal-Decke und dem Tirolikum durchzuführen, werden die Untersuchungsgebiete Ruhpolding/Bergen (Allgäu-Decke), Rottach-Egern/Kreuth (Lechtal-Decke) und Reit im Winkl (Tirolikum) ausgewählt (Tab. 2).

Aschau
Bayrischzell
Garmisch-Partenkirchen
Kochel a. See
Lenggries
Marquartstein
Reit im Winkl
Rottach-Egern/Kreuth
Ruhpolding/Bergen

Tab. 2: Höffige Untersuchungsgebiete im Hinblick auf mögliche Kluftgrundwassererschließungen (grün: Untersuchungsgebiete, in denen weiterführende Maßnahmen durchgeführt wurden)

I.3.2 Ausweisung von Explorationsgebieten innerhalb der Untersuchungsgebiete

Im Folgenden ist die Ausweisung von Explorationsgebieten innerhalb der Untersuchungsgebiete (Kap. I.3.1; Tab. 2) erläutert, in denen Bohrprogramme zur weiteren Kluftwassererkundung Erfolg versprechend erscheinen.

I.3.2.1 Kriterien zur Abgrenzung und Beurteilung der Explorationsgebiete

Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten Vorerkundungsphase (Kap. I.3.1) werden zur Abgrenzung und Beurteilung der Explorationsgebiete folgende Kriterien herangezogen:

1. Lithologische Einheit Hauptdolomit als Kluftwasserleiter in ausreichender Mächtigkeit
2. Strukturgeologische Rahmenbedingungen für die Wegsamkeit von Grundwasser
3. Chemisch-physikalische Charakteristik von Quellen und Brunnen
4. Abschätzung der Ausdehnung der hydrologisch relevanten Einzugsgebiete

I.3.2.1.1 Lithologische Einheit Hauptdolomit als Kluftwasserleiter

Die spezielle Charakteristik der lithologischen Einheit Hauptdolomit, die ihn als höffigen Grundwasserleiter auszeichnet, wurde in Kap. I.3.1.1 erläutert. Während dieser Erkundungsphase gilt es, durch eine kombinierte Bewertung aller Untersuchungskriterien zu belegen, dass in den auszuweisenden Explorationsgebieten der Hauptdolomit als Grundwasserleiter wirksam ist.

I.3.2.1.2 Strukturgeologische Rahmenbedingungen

Die Analyse der strukturgeologischen Rahmenbedingungen möglicher Explorationsgebiete baut auf den Ergebnissen zur Ausweisung der Untersuchungsgebiete auf (Kap. I.3.1.1). Für die Abgrenzung der Explorationsgebiete unter strukturgeologischen Gesichtspunkten sind, neben den vorangegangenen Auswertungen (Geologische Karten, Satellitenbilder) detaillierte Luftbildanalysen sowie Geländemessungen durchgeführt worden.

Aus der Kombination von Kartenauswertung, Geländemessung sowie stereoskopischer Luftbildanalyse resultieren strukturgeologische Übersichtskarten der Untersuchungsgebiete (Anl. 4.1, 4.2, 4.3).

Es gilt Bereiche zu lokalisieren, in denen sich Störungssysteme unterschiedlicher Streichrichtungen schneiden. Von besonderem Interesse sind junge Störungselemente, aus denen die Anlage der Klüfte der 1. Ordnung resultiert. Weiter wird der Verlauf von Sattel- und Mulden-Achsen herausgearbeitet, die im Zusammenhang mit der Kluftwasserführung im Hauptdolomit bedeutsam sind (s. Kap. I.3.1.1). Junge Störungselemente, die ältere Sattel- und Muldenstrukturen queren, können die Permeabilität des Hauptdolomits erhöhen, woraus sich günstige Erschließungsmöglichkeiten für Kluftwasser ergeben.

Einige Luftbildlineamente können z.T. eindeutig dem Streichen von Sattel- und Muldenachsen, bzw. dem Verlauf von Überschiebungsbahnen einzelner Schuppen zugeordnet werden. Weiter zeichnen Luftbildlineamente häufig Schwächezonen der Gesteinskörper nach und geben so Hinweise auf Störungsverläufe. Die Streichrichtungen kleinräumiger Linearstrukturen in den Untersuchungsgebieten, lassen sich mit großräumigen Strukturen aus Satellitenbildern und Störungen aus geologischen Übersichtskarten (1 : 100.000 und 1 : 200.000) korrelieren.

Bei der Abgrenzung der Explorationsgebiete werden Hauptdolomit-Sattelstrukturen gemieden, da durch Aufwölbung des im Liegenden folgenden Grundwasserleiters Raibler Schichten eine Kontamination mit sulfatreichem Grundwasser wahrscheinlich ist (Kap. I.2.1.2 und I.3.2.1.3). Der strukturelle Aufbau von Hauptdolomitmulden ist im Hinblick auf eine Grundwassererschließung günstiger. Durch kompressive Bedingungen auf der konkaven Seite der Mulde ist die Struktur gegenüber Oberflächenwasser geschützt, während mit zunehmender Tiefe Dehnungsklüfte auftreten, die Wegsamkeiten für Kluftwasser bieten (Abb. 27) (Fellehner 2004).

I.3.2.1.3 Chemisch-physikalische Charakteristik von Quellen und Brunnen

An ausgewählten Quellen innerhalb der Untersuchungsgebiete erfolgt eine Bewertung der chemisch-physikalischen Parameter, um Rückschlüsse auf die Lage unterirdischer Einzugsbereiche bzw. Grundwasserwege ziehen zu können. Dazu wurden chemisch-physikalische Analysen bei den lokalen Wasserversorgern und zuständigen WWA recherchiert, die durch eigene Probennahmen und Analysen ergänzt wurden (Anl. 6.3).

Neben dem pH-Wert und der Elektrischen Leitfähigkeit gilt die Temperatur eines Grundwassers als ein wichtiges Charakteristikum, da diese Rückschlüsse auf die Lage bzw. Höhe des Einzugsgebietes zulässt, bzw. Hinweise auf eine Mischung mit Oberflächenwässern gibt.

Ein eindeutiges Kriterium zur Charakterisierung von Dolomitwässern stellt das Kalzium/Magnesium-Verhältnis dar (umgerechnet auf mmol/l). Als Bezugsgrößen werden die Analysen eines reinen Hauptdolomitwassers (Höllenbach-Quelle bei Weißbach/Inzell an der Alpenstraße) und eines reinen Wettersteinkalkwassers (Wasserloch bei Inzell) herangezogen (FELLEHNER 2004) (Anl. 6.3). Das Ca/Mg-Verhältnis des Hauptdolomitwassers liegt bei ca. 1:1 (Höllenbach), das des kalziumkarbonatischen Wassers bei ca. 3:1. Ein Verschieben des Verhältnisses in Richtung Kalzium weist auf die Zumischung von mehr kalziumkarbonatisch beeinflussten Wässern zum Hauptdolomitwasser hin. Der Ursprung dieser Mischkomponente ist durch Bewertung der geologischen Rahmenbedingungen zu klären (z.B. Ursprung aus anderen lithologischen Einheiten oder Beeinflussung durch Oberflächenwässer). Die im Liegenden des Hauptdolomits folgenden Raibler Schichten können sich wegen ihres hohen Gipsgehaltes negativ auf die Qualität des Grundwassers auswirken. Eine Zumischung von Raibler Wasser wird durch eine erhöhte Sulfat-Komponente, ein hohes Δx zwischen Karbonathärte und Gesamthärte sowie einer höheren Elektrischen Leitfähigkeit bzw. Gesamtmineralisation deutlich.

Detaillierte Ausführungen zur chemisch-physikalischen Charakteristik der vorkommenden Grundwässer in den Untersuchungsgebieten erfolgen in Kapitel II.1.2.

I.3.2.1.4 Abgrenzung der oberirdischen Einzugsgebiete EZG_o

Die Größe der durch Oberflächenwasserscheiden begrenzten oberirdischen Einzugsgebiete EZG_o (DIN 4049, Teil 1, 1.20) wird mittels GIS auf Grundlage totpgraphischer Karten ermittelt. Bei Bewertung der Einzugsgebiete muss berücksichtigt werden, dass für das Kluftwasser ein deutlich erweitertes, unterirdisches Einzugsgebiet EZG_u (DIN 4049, Teil 1, 1.20; DIN 4049, Teil 3, 3.6.14) vorliegen kann.

I.3.2.2 Untersuchungsgebiet Ruhpolding/Bergen (Allgäu-Decke)

Im Untersuchungsgebiet Ruhpolding/Bergen (Allgäu-Decke) können, unter Anwendung der in Kap. I.3.2.1 erläuterten Kriterien, drei höffige Explorationsgebiete ausgewiesen werden:

1. Explorationsgebiet Haargaß-Berg
2. Explorationsgebiet Gleichen-Berg
3. Explorationsgebiet Ägidius-Quellen

I.3.2.2.1 Explorationsgebiet Haargaß-Berg

Das Explorationsgebiet Haargaß-Berg ist dem Gemeindegebiet Ruhpolding zugehörig. Es befindet sich W' des Haargaß-Bergs (1205 m ü.NN), ca. 0,5 km N' von Ruhpolding, an der Straße von Ruhpolding in Richtung Siegsdorf (Anl. 1.1).

Das Explorationsgebiet Haargaß-Berg liegt im E' Teil der Allgäu-Decke auf dem Kartenblatt 8241 Ruhpolding (GK 1:25.000). Die Allgäu-Decke wird durch das Tal der N-S streichenden Weißen

Traun unterbrochen, nach S öffnet sich das Becken von Ruhpolding. Im Tal der Weißen Traun und im Becken von Ruhpolding liegen pleistozäne und holozäne Sedimente vor.

Im W der Weißen Traun ist der charakteristische Schuppenbau der Allgäu-Decke gut aufgeschlossen. Es ist eine Abfolge von sieben Schuppen zu beobachten, deren Bau nach N zunehmend engständiger und differenzierter wird. Die Abscherhorizonte der durch Überschiebungen getrennten Schuppen stellen i.d.R. die Raibler Rauhwacken dar.

In der Haargaß-Schuppe (südlichste Schuppe der Allgäu-Decke) reicht die stratigraphische Abfolge von der karnischen Raibler Rauhwacke (N) bis zum unterkretazischen Neokom (S). Intern wird die Haargaß-Schuppe durch Sattel- und Muldenstrukturen aufgebaut. Der Haargaß-Berg repräsentiert mit den Raibler Rauhwacken und dem Hauptdolomit die N' Muldenflanke, die Schichten fallen generell steil nach S ein. Der Hauptdolomit stellt hier als relativer Härtling einen Höhenrücken dar, der ungefähr E-W streicht. Nach S folgen in ordentlicher stratigraphischer Abfolge die Kössener Schichten sowie die Schichten des Jura und der Kreide, die der Erosion weniger Widerstand bieten und so das Landschaftsbild durch ihre weichere Morphologie prägen. Die Jura- und Kreidesedimente zeigen interne Sattel- und Muldenstrukturen, deren Achsen parallel verlaufen. Das Streichen zeigt WNW'-ESE' Richtung (Anl. 4.2).

Die N' folgenden kleinräumigen Schuppen reichen ebenfalls von den Raibler Rauhwacken an der Basis im N bis zum Lias-Fleckenmergel. Die Schichten stehen z.T. saiger oder fallen steil nach S ein. Die Ausnahme bildet die Lohen-Schuppe N' der Haargaß-Schuppe, die Schichten fallen hier nach N ein. Das engere Explorationsgebiet befindet sich am Ostrand der Haargaß-Schuppe und der Lohen-Schuppe.

Im Rahmen der strukturgeologischen Auswertung kann ein weitreichendes N-S Lineament entlang des Tales der Weißen Traun identifiziert werden, das sich bis in das Tirolikum verfolgen lässt. Weitere N-S Strukturen treten innerhalb der Allgäu-Einheit wiederholt auf.

Ein N-S Linear streicht direkt durch das Explorationsgebiet, subparallel zu dem Hauptlinear im zentralen Teil des Tales. Es exponiert drei kleine Hauptdolomitköpfe, einen im N der Rabenstein-Schuppe, einen im Bereich der Lohen-Schuppe/Rabenstein-Schuppe und einen Dritten am E-Fuß des Haargaß-Bergs. Eine weitere häufig auftretende Linearrichtung streicht SW-NE. Diese Richtung kann mit vielen kartierten Störungen (geologische Übersichtskarten) korreliert werde, die z.T. bis in das Untersuchungsgebiet hineinreichen. Diese Störungen haben überwiegend einen sinistralen Bewegungssinn. Im W des Kartenblattes ist ein solches Lineament entlang der Urschlauer Ache und weiter im S im Tirolikum entlang der B 305 in Richtung Reit im Winkl zu verfolgen. Kleinere Lineamente mit dieser SW-NE Richtung werden W' des Explorationsgebietes deutlich. Durch das Zusammentreffen der beiden Linear-Hauptrichtungen (N-S und SW-NE) im Explorationsgebiet Haargaßberg kann eine Auflockerung des Untergrundes vermutet werden, die notwendige Grundwasserwegsamkeiten bietet.

Die Eisenärzt-Quelle im Explorationsgebiet Haargaß-Berg ist ein weiteres Indiz für solche Wegsamkeiten. Die Quelle mit einer Schüttung von ca. 5-8 l/s entspringt unter geringer Bodenbedeckung direkt dem Hauptdolomit. Die chemisch-physikalischen Parameter (Anl. 6.3) zeigen eine typische Dolomitwasser-Charakteristik (vgl. Kap. I.3.2.1.3 und II.1.2). Ein Einfluss sulfathaltiger Wässer aus den 300 m N' anstehenden Raibler Schichten, bzw. von Oberflächenwasser kann ausgeschlossen werden.

Die Größe des oberirdischen Einzugsgebietes EZG_o beträgt ca. 1 km^2, es wird jedoch, dem Streichen des Hauptdolomits folgend, ein erweitertes unterirdisches Einzugsgebiet vorliegen.

I.3.2.2.2 Explorationsgebiet Gleichen-Berg

Das Explorationsgebiet Gleichen-Berg liegt im Gemeindegebiet Bergen, bei Kohlstadt im Tal der Weißen Ache, SW' von Maximilianshütte (Anl. 1.1). Das Gebiet befindet sich im W' Teil der Allgäu-Decke auf dem Kartenblatt 8241 Ruhpolding (GK 1:25.000). E' ist der Gleichen-Berg (1084 m ü.NN), W' der Zinn-Kopf (1229 m ü.NN) gelegen.

Der typische Schuppenbau der Allgäu-Decke differiert E' und W' der Weißen Ache. Während auf der Seite des Gleichen-Bergs (E') eine enge Abfolge von Schuppen zu beobachten ist, ist die W' Seite durch die weitgespannte Zinnkopf-Mulde geprägt. In der Zinnkopf-Mulde lagern im Muldenkern Neokom-Sedimente, umgeben von jurassischen Sedimenten. An der N' Muldenflanke streichen Hauptdolomit, sowie an der Basis der Mulde Raibler Schichten aus. E' der Weißen Ache reicht die stratigraphische Abfolge vom Hauptdolomit (Gleichen-Berg Sattel) bis zum Cenoman (zentraler Teil der Gleichenalm-Mulde). Der Gleichen-Berg gehört tektonisch zu derselben tektonischen Struktur wie die Haargaß-Schuppe (Explorationsgebiet Haargaß-Berg). Der Gleichen-Berg ist eine Sattelstruktur, deren Nordflanke abgeschert ist. Die S-Flanke fällt zur Gleichenalm-Mulde steil nach S ein. Auf der Luftbildkarte (Anl. 4.1) ist der Verlauf des Gleichen-Berg - Scheichen-Berg-Sattels gut zu verfolgen, S' streicht parallel die Gleichenalm-Mulde.

Das Tal der Weißen Achen zeichnet eine SW-NE streichende Schwächezone nach, die die tektonischen Komplexe W' und E' des Tales trennt. Entlang dieses Linears lässt sich ein sinistraler Versatz rekonstruieren, dessen Richtung und Bewegungssinn bereits in E' Teilen des Blattgebietes beschrieben werden konnte. Ebenso werden in diesem Teil des Blattgebietes N-S-Elemente deutlich, die mit Strukturen im Explorationsgebiet Haargaß-Berg zu korrelieren sind (Anl. 4.1). Es kann eine starke Auflockerung des Untergrundes angenommen werden.

In der direkten Umgebung des Explorationsgebietes Gleichen-Berg streichen die Raibler Schichten nicht aus. Die Auswertung der geologische Karte und der strukturgeologischen Verhältnisse ergibt jedoch, dass die Raibler Schichten im Gleichen-Berg-Sattel oberflächennah anstehen. Die chemisch-physikalischen Analysen der Schipfl- und der Kohlstadt-Quelle (Anl. 6.3) bestätigen diese Situation. Die chemische Charakteristik der Schipfl-Quelle zeigt deutlich, dass es sich um sulfatreiches Raibler Wasser handelt. Die relevanten chemischen Parameter der Kohlstadt-Quelle weisen dagegen auf eine deutliche Hauptdolomit-Komponente hin. Das Ca/Mg-Verhältnis lässt jedoch eine Zumischung von Oberflächenwasser vermuten. Die oberflächennahe Fassung der Quelle sowie die variierende Schüttung unterstützen diese Annahme. Unter Berücksichtigung der chemisch-physikalischen Analysen wird die N' Begrenzung des Explorationsgebiets so gewählt, dass der Kern des Gleichenberg-Sattels nicht im Explorationsgebiet gelegen ist. Dadurch kann die Gefahr der Sulfatbelastung minimiert werden.

Das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o des Explorationsgebietes Gleichen-Berg weist eine Fläche von ca. 1,7 km^2 auf. Es schließt neben Hauptdolomit, Kössener Schichten, jurassische und kretazische Sedimente ein. Das erweiterte unterirdische Einzugsgebiet EZG_u wird sich weniger nach S in Richtung Gleichenberg-Alm-Mulde erstrecken, sondern im weiteren Streichen des Hauptdolomitzuges (Gleichen-Berg und Scheichen-Berg) verlaufen.

I.3.2.2.3 Explorationsgebiet Ägidius-Quellen

Das Explorationsgebiet Ägidius-Quellen liegt innerhalb der Gemeindegrenzen von Bergen. Es befindet sich ca. 1 km SW‘ des Ortsteiles Maximilianshütte, an dem Fahrweg von Maximilianshütte in das Weiße Ache-Tal (Anl. 1.1). Die Trinkwassererschließung aus den Ägidius-Quellen stellt derzeit die Trinkwasserversorgung der Gemeinde Bergen sicher. Die Quellen liegen direkt W' der Mündung der Schwarzen Ache in die Weißen Ache.

Das Explorationsgebiet Ägidius-Quellen liegt im N' Teil der Allgäu-Decke, in dem die Schuppenabfolge immer engständiger wird. Der S' Abschnitt des Explorationsgebietes gehört zur Rabenstein-Schuppe. Der Rabenstein (924 m ü.NN), der als relativer Härtling einen charakteristischen Höhenzug darstellt, wird von Raibler Rauhwacken aufgebaut und bildet die Basis bzw. den Abscherhorizont der Rabenstein-Schuppe. Im Hangenden folgen Hauptdolomit, Plattenkalk und Kössener Schichten. Sedimente des Lias sind lediglich partiell eingeschuppt. Die Schichten der Rabenstein-Schuppe fallen steil, parallel zur Überschiebungsbahn nach S ein, bzw. stehen z.T. auch saiger. Die senkrecht stehenden Schichten sind am Weg entlang der Schwarzen Ache aufgeschlossen. Die Raibler Rauhwacken stehen ca. 30 m hinter der Quellfassung der Ägidius-Quellen an. Die Rauhwacken erreichen hier eine Mächtigkeit von etwa. 75 m, der Hauptdolomit im Hangenden ist ca. 250 m mächtig.

Das tief eingeschnittene Tal der Schwarzen Ache zeichnet eine für das Gebiet charakteristische N-S-Struktur nach, welche bereits in den vorangegangenen Explorationsgebieten beschrieben wurde. Ein lateraler Versatz entlang dieser Struktur ist nicht nachweisbar. Im Bereich des Explorationsgebietes biegt ein Lineament, welches dem Talverlauf der Weißen Ache folgt, um (von WSW-ENE nach SW-NE). Im Bereich des Umbiegepunktes wird dieses Lineament von der N-S-Struktur geschnitten (Anl. 4.1).

Die chemisch-physikalischen Analysen der Ägidius-Quellen I - III weisen eine fast identische Charakteristik auf (Anlage 6.3). Die analysierten Parameter zeigen typische Werte eines sulfatbetonten Wassers (Kap. II.1.2), d.h. der Hauptgrundwasserleiter ist die Raibler Rauhwacke des Rabensteinzuges.

Durch die geologischen Verhältnisse mit steil bis saiger stehenden Raibler Schichten und Hauptdolomit, müsste im Explorationsgebiet Ägidius-Quellen eine S’ ausgerichtete Horizontalbohrung angesetzt werden. Die Raibler Schichten würden zunächst durchteuft, um den im S anstehenden Hauptdolomit zu erreichen.

Um den Hauptdolomit in einer ausreichenden Mächtigkeit zu erschließen, wäre eine horizontale Bohrstrecke von mindestens 250 m erforderlich. Alternativ wäre auch eine Schrägbohrung nach S denkbar, mit einer entsprechenden Verlängerung der Bohrstrecke.

Das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o weist eine Fläche von 5,3 km^2 auf. Bei der Abschätzung des unterirdischen Einzugsgebietes EZG_u ist zu beachten, dass Wegsamkeiten durch Überschiebungsbahnen, steil stehende Kössener Schichten und mergelige liassische Schichten unterbrochen sein können. Es ist davon auszugehen, dass das unterirdische Einzugsgebiet sich auf den E-W streichenden Hauptdolomit und Plattenkalk beschränkt.

I.3.2.3 Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth (Lechtal-Decke)

Im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth (Lechtal-Decke) können, unter Anwendung der in Kap. I.3.2.1 erläuterten Kriterien, vier höffige Explorationsgebiete ausgewiesen werden:

1. Explorationsgebiet Lange Au
2. Explorationsgebiet Weißach-Tal
3. Explorationsgebiet Sagenbachtal
4. Explorationsgebiet Enterrottach

I.3.2.3.1 Explorationsgebiet Lange Au

Das Explorationsgebiet Lange Au befindet sich im Gemeindegebiet Kreuth, es ist von Wildbad Kreuth über Forststraßen in Richtung E zu erreichen (Anl. 1.2).

Das Explorationsgebiet Lange Au liegt vollständig im Hauptdolomit der Lechtal-Decke (GK 1:25.000 Blatt 8336 Rottach-Egern). Es befindet sich an der S-Flanke der N' gelegenen Wallberg-Setzberg-Doppelmulde. Die Sattel- und Muldenachsen der Spezialfalten innerhalb der S-Flanke zeigen Streichrichtungen von W-E bis WSW-ENE. Diesen Elementen ist bei der Abgrenzung des Explorationsgebietes besondere Bedeutung beizumessen, da in Sattelstrukturen oberflächennah anstehende Raibler Schichten das Grundwasser negativ beeinflussen könnten.

Im Explorationsgebiet treffen tektonische Strukturen zusammen, die sich in Alter und Streichrichtung unterscheiden und potenzielle Wegsamkeiten für Kluftwasser bieten. Neben den erwähnten Sattel- und Muldenstrukturen existieren weitere deutliche Lineamente, welche Schwächezonen im Hauptdolomit nachzeichnen (Anl. 4.2). Tief eingeschnittene Täler und stark zerrütteter Hauptdolomit geben im Gelände Hinweise auf die Tektonik. Auf der E' Seite des Explorationsgebietes streicht die Scheuerer-Alm-Mulde in Richtung WSW-ENE und im SW der Hohlenstein-Sattel, der das Explorationsgebiet nach E hin begrenzt. Gequert werden beide Strukturen von einem deutlichen Linear, das entlang der Langen Au NW-SE streicht und die tektonischen Komplexe trennt. Weiter sind zahlreiche untergeordnete Lineare im Luftbild und im Gelände nachzuweisen, die senkrecht zu der NW-SE-Richtung verlaufen.

Die geschilderte tektonische Situation lässt im Explorationsgebiet auf eine durch bruchhafte Deformation - hervorgerufen durch ältere Sattel- und Muldenstrukturen mit Querung jüngerer Störungselemente - hohe Klüftigkeit des Hauptdolomits schließen.

Darüber hinaus spricht auch die Bewertung der chemisch-physikalischen Analysen des Brunnens Lange Au (Gde. Kreuth) (Anl. 6.3, 6.6, 6.7) eindeutig für einen Zufluss von Hauptdolomitwässern aus Klüften im Bereich des Explorationsgebietes.

Das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o hat eine Größe von mehr als 13 km^2. Das unterirdische Einzugsgebiet EZG_u für das Explorationsgebiet Lange Au wird auf Grund der intensiven Tektonik und der großen Verbreitung des Hauptdolomits in diesem Bereich eine wesentlich größere Ausdehnung haben.

I.3.2.3.2 Explorationsgebiet Weißach-Tal

Das Explorationsgebiet Weißach-Tal liegt an der B 307 von Rottach-Egern nach Achensee, an der Einmündung des Schwarzbach-Tales (Anl. 1.2).

Das Untersuchungsgebiet Weißach-Tal befindet sich am Fuß der S-Flanke der Buchstein-Hirschberg-Doppelmulde. Die Schichten der S-Flanke fallen generell nach N ein und bestehen an der Basis aus Hauptdolomit. Zum Muldenkern folgen der Plattenkalk und die Kössener Schichten. Nach S, über das Weißach-Tal hinaus, ist ausschließlich Hauptdolomit aufgeschlossen. Der Hauptdolomit ist in E-W streichende Sättel und Mulden gegliedert, deren Achsen sich anhand von Luftbildlineamenten verfolgen lassen. Das E-W streichende Weißach-Tal zeichnet annähernd die Muldenachse der Weißach-Mulde nach, die bis kurz vor Wildbad Kreuth reicht (Anl. 4.2). Die Muldenachse ist in Bezug auf das Weißach-Tal leicht nach N verschoben. S' der Weißach-Mulde verläuft WSW-ENE subparallel eine Sattelachse. W' des Siebenhüttentals handelt es sich um den Klammberg-Gernberg-Sattel, der über das Siebenhütten-Tal bis in den Hohlenstein-Sattel zu verfolgen ist.

Als Explorationsgebiet bietet sich die Muldenstruktur der Weißach-Mulde an. Da die Muldenachse leicht nach N in die Bergflanke des Buchsteins und des Leonhardtsteins verschoben ist, kommt die N' Talseite des Weißach-Tals in Betracht. NW-SE streichende Schwächezonen, die sich aus relevanten Störungslinearen ableiten, könnten die Klüftigkeit des Hauptdolomits erhöhen und damit notwendige Grundwasserwegsamkeiten bieten. Dabei ist besonders der Verlauf des Schwarzbachtals zu beachten, dessen N' Teil N-S streicht und im unteren Bereich in eine NW-SE Richtung umbiegt.

Im Bereich des Explorationsgebietes wurden drei Quellen auf ihre chemisch-physikalischen Eigenschaften hin analysiert (Anl. 1.2, 6.3). Die Bayerwald-Quelle und die Vorderalm-Quelle sind Kluftquellen, die direkt dem Hauptdolomit entspringen. Die Bayerwald-Quelle ist gefasst und wird zur Trinkwasserversorgung der Anwesen bei Bayerwald verwandt. Die beiden Hauptdolomit-Kluftquellen erreichen eine abgeschätzte Schüttung von bis zu ca. 5 l/s, die Schüttung ist relativ beständig. Bei der Schwarzenbachtal-Quelle (ca. 10 l/s) im Schwarzenbachtal handelt es sich um eine Schicht-Quelle im Plattenkalk, deren Schüttung je nach Niederschlagsverhältnissen variiert. Die chemisch-physikalische Analyse (Anl. 6.3) zeigt die typische Charakteristik eines Kalziumkarbonatwassers - vergleichbar mit dem Wasserloch bei Inzell (Kap. I.3.2.1.3 und II.1.2). Die Analysen der Kluftquellen aus dem Hauptdolomit (Vorderalm-Quelle, Bayerwald-Quelle) zeigen sehr ähnliche chemisch-physikalische Eigenschaften (Anl. 6.3, 6.6, 6.7). Darüber hinaus sind sie hinsichtlich ihrer Charakteristik mit dem Standard des Höllenbachs vergleichbar. Der Sulfatgehalt ist äußerst gering, wie es bei den geologischen Verhältnissen (Muldenstruktur) zu erwarten ist.

Das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o des Explorationsgebietes Weißbach-Tal hat eine Fläche von ca. 17 km^2. Die höchste Erhebung innerhalb des Einzugsgebiets stellt der Buchstein mit 1698 m ü.NN dar. Die den Hauptdolomit überlagernde lithologische Einheit Plattenkalk kann durch Verkarstung große Mengen Niederschläge aufnehmen und diese dem feinklüftigen Hauptdolomit zuführen. Im Vergleich zu reinen Hauptdolomitgebieten kann dies zu einer erhöhten Grundwasserneubildung führen. Das erweiterte unterirdische Einzugsgebiet EZG_u wird den Hauptdolomit und den Plattenkalk der Weißbach-Mulde umfassen.

I.3.2.3.3 Explorationsgebiet Sagenbachtal

Das Explorationsgebiet Sagenbachtal liegt im Gemeindegebiet Kreuth, Ortsteil Wildbad Kreuth. Es reicht vom W' Taleingang der Langen Au bis ca. 300 m hinter die Schwaiger Alm (Anl. 1.2).

Das Explorationsgebiet Sagenbachtal liegt S' der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde und ist vollständig vom Hauptdolomit umgeben.

Direkt im N befindet sich die Riedlerspitze (1429 m ü.NN), deren Gipfelbereich aus Plattenkalk aufgebaut ist. Nach S hin ist das Explorationsgebiet durch den Hohlenstein (1230 m ü.NN) begrenzt, an dem nur Hauptdolomit an der Oberfläche ausstreicht. Die Talsohle im Explorationsgebiet ist mit holozänen und quartären Sedimenten verfüllt, die im zentralen Teil eine Mächtigkeit von bis zu 75 m erreichen können.

Die Riedlerspitze im N repräsentiert mit den steil nach N einfallenden Schichten die S' Muldenflanke der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde. Der Hohlenstein zeigt eine Sattelstruktur und stellt die Fortsetzung des Klammberg-Gernberg-Sattels W' des Siebenhüttentales dar (Anl. 4.2). Die Talsohle bzw. der zentrale Teil des Explorationsgebietes zeichnet den Verlauf der Muldenachse der Schwaiger-Alm-Mulde nach. Die Schwaiger-Alm-Mulde kann dabei genetisch mit der Weißbach-Tal-Mulde (Anl. 4.2) in Zusammenhang gebracht werden. Beiden Strukturen sind durch das junge N-S Element der Rottach-Egern - Kreuth Aufwölbung sinistral leicht versetzt. Dieser leichte Versatz kann auch zwischen dem Klammberg-Gernberg-Sattel und dem Hohlstein-Sattel nachgewiesen werden. Weiter wird die Schwaiger-Alm-Mulde von NE-SW Strukturen geschnitten. Unter hydrogeologischen Gesichtspunkten sind die strukturgeologischen Rahmenbedingungen als günstig anzusehen. Auf engstem Raum treffen, bzw. schneiden sich zahlreiche tektonische Strukturen, die eine intensive Auflockerung des Hauptdolomits in diesem Bereich vermuten lassen. Für eine Erschließung besonders aussichtsreich sind Ansatzpunkte für Pegelbohrungen im Überschneidungsbereich der alten Muldenachsen und der jungen N-S verlaufenden und nach S abtauchenden Gewölbeachse.

Im Bereich des Hohlstein-Sattels wurden drei Quellen beprobt (Max-Quelle, Hohlstein-Quelle, Heiligkreuz-Quelle) (Anl. 6.3), die eine konstant hohe Schüttung (10-15 l/s) aufweisen und damit auf eine erhöhte Klüftigkeit des Hauptdolomits schließen lassen. Am Klammberg-Gernberg-Sattel konnte die chemische Charakteristik der Gernberg-Quelle analysiert werden (Anl. 6.3). Die Bewertung der Analyseergebnisse ergibt, dass die Quellwässer eindeutig dem Grundwasserleiter Raibler Schichten zugeordnet werden können, bzw. eine Zumischung von stark sulfathaltigem Wasser zu Dolomit Wasser vorliegt (Anl. 6.7). Durch die chemisch-physikalischen Analysen konnte die S' Begrenzung des Explorationsgebietes festgelegt werden, indem potentielle Bohrpunkte möglichst weit N' des Hohlenstein-Sattels festgelegt wurden, um eine negative Beeinflussung durch den Grundwasserleiter Raibler Rauhwacke auszuschließen.

Das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o hat eine Größe von über 17 km^2.

I.3.2.3.4 Explorationsgebiet Enterrottach

Das Explorationsgebiet Enterrottach liegt im Gemeindegebiet Rottach-Egern (Ortsteil Enterrottach). Das Gebiet befindet sich SE' der Brunnen Unterwallberg, die zur Trinkwasserversorgung der Gemeinden Rottach-Egern und Tegernsee dienen. Das Explorationsgebiet ist über die Suttenstraße (in Richtung Wallberg) zu erreichen (Anl. 1.2).

Das Explorationsgebiet wird im W, E und S von Hauptdolomit-Bergflanken begrenzt. Im E befinden sich die Wasserspitz (1552 m ü.NN) und die Rinnerspitz (1611 m ü.NN), deren Westflanken von

Hauptdolomit sowie Plattenkalk aufgebaut werden.

Im S handelt es sich um die N-Flanke der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde, die an die Grenze Allgäu-Decke/Lechtal-Decke grenzt. Die Basis der Doppelmulde bildet der Muschelkalk gefolgt von den Raibler Schichten, die den Hauptdolomit und den Plattenkalk unterlagern. Die Raibler Schichten streichen am Fuß des Wallberges und am Kühzagl-Graben aus. Die Raibler Schichten und der überlagernde Hauptdolomit vom Wallberg können mit den Schichten des Kühzagl-Grabens parallelisiert werden.

Während die Schichtlagerung an der N-Flanke des Wallberges ein einheitliches Einfallen nach S aufweist, ergibt sich E' der Suttenstraße ein tektonisch inhomogenes Bild. Die Bergflanke E' des Explorationsgebietes zeigt eine Abfolge von zwei Sätteln sowie einer Mulde (Anl. 4.2), welche sich innerhalb einer überregionalen Muldengroßstruktur (die nach E bis zum Inn-Tal zu verfolgen ist) befinden. Dieser überregionalen Struktur gehört auch die Wallberg-Setzberg-Doppelmulde an. Im N liegt der Kühzagl-Sattel, nach S folgt die Wasserspitz-Mulde und der Rinnerspitz-Sattel. Die Sattel- und Muldenachsen streichen wie auf dem übrigen Blattgebiet W-E. Diese drei Strukturen werden im W vom jüngeren Suttenstraßen-Lineament, das NW-SE streicht, abgeschnitten und vom Wallberg-Massiv getrennt. Begleitet wird das Lineament, wie auch in anderen Explorationsgebieten beschrieben, von untergeordneten NE-SW streichenden Störungszonen. Im Gelände ist das Suttenstraßen-Lineament deutlich zu erkennen, das Tal ist tief eingeschnitten, der anstehende Hauptdolomit tektonisch stark beansprucht und derart zerklüftet und vergrust, dass eine Schichtung nicht zu erkennen ist. Das Explorationsgebiet wurde in dem Schnittbereich der W-E verlaufenden Strukturen im E mit dem Suttenstraßen-Lineament festgelegt.

Im Explorationsgebiet sind keine Quellen vorhanden, die weitere Kriterien zur Festlegung des Explorationsgebietes liefern könnten. Lediglich die vorhandenen Lockergesteinsbrunnen (Wallberg Brunnen I-V) liefern Aussagen über die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Grundwassers im weiteren Bereich des Explorationsgebietes (Anl. 6.3, 6.6, 6.7). Die chemisch-physikalischen Parameter der Unterwallberg-Brunnen zeigen kein klares Bild. Es handelt sich nach den Ca/Mg-Verhältnisse um Dolomit- und Kalkwässer, die einen leichten Sulfat-Einfluss durch die Raibler Schichten aufweisen.

Das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o des Explorationsgebietes Enterrottach weist eine Größe von ca. 18 km^2 auf. Es reicht im Süden bis zum Blankenstein an das Einzugsgebiet des Explorationsgebietes Lange Au heran. Auch in diesem Explorationsgebiet ist wahrscheinlich, dass der hangende Plattenkalk als Zulauf in das Kluftsystem des Hauptdolomits eine wesentliche Rolle spielt.

I.3.2.4 Untersuchungsgebiet Reit im Winkl (Tirolikum)

Im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl (Tirolikum) können, unter Anwendung der in Kap. I.3.2.1 erläuterten Kriterien, drei höffige Explorationsgebiete ausgewiesen werden:

1. Explorationsgebiet Weißgraben
2. Explorationsgebiet Rabengschöss
3. Explorationsgebiet Entfeld

I.3.2.4.1 Explorationsgebiet Weißgraben

Das Explorationsgebiet Weißgraben (Gde. Reit im Winkl) liegt E' der Bundesstraße B 305 von Reit im Winkl in Richtung Marquartstein. Das Gebiet befindet sich im Bereich der Einmündung des Weißgrabens in die Weißlofer (Anl. 1.3).

Das Explorationsgebiet Weißgraben liegt am Rand des Tirolikums zur unterlagernden Lechtal-Decke, die Deckengrenze ist ca. 300 - 500 m entfernt. Im direkten Bereich des Explorationsgebietes ist ausschließlich Hauptdolomit aufgeschlossen, erst in Richtung Deckengrenze folgen mit den Raibler Schichten und dem Wettersteinkalk die liegenden Schichten. Durch die Nähe zur Deckengrenze ist der Hauptdolomit stark zerrüttet und z.T. vergrust, diese Situation ist am Weißgraben in Richtung Pankratius-Quelle gut aufgeschlossen (Anl. 1.3). In der Luftbildkarte (Anl. 4.3) ist ein deutliches und lang durchhaltendes Lineament zu erkennen, welches WSW-ESE durch den Weißgraben streicht. Es schneidet die Sutur, die den E' Rand des Beckens von Reit im Winkl begrenzt. Weitere Lineamente streichen vom Bereich der unmittelbaren Deckengrenze in die nähere Umgebung des Explorationsgebietes. Der Reitberg (1146 m ü.NN, SE' des Explorationsgebietes) stellt die N-Flanke einer Muldenstruktur dar, deren Muldenachse nach SW abtaucht. Im Bereich des ausgewiesenen Explorationsgebietes ist eine Überschneidung mehrerer Lineamente bzw. tektonischer Elemente vorhanden, sodass mit einer erhöhten Klüftigkeit gerechnet werden kann.

Ein Hinweis für vorhandenes Kluftwasser gibt die Pankratius-Quelle, die E' im Weißgraben gefasst ist und für die Trinkwasserversorgung der Gemeinde Reit im Winkl genutzt wurde. Die Quelle entspringt einer Hauptdolomitkluft und zeigt eine Schüttung von ca. 9-14 l/s. Die Schüttung hängt stark von Niederschlagsereignissen ab, sodass von einem deutlichen Oberflächenwassereinfluss ausgegangen werden muss.

Dies wird durch die chemisch-physikalischen Parameter bestätigt. Es handelt sich um ein Mischwasser aus den Komponenten Dolomit-Wasser und Oberflächenwasser (Anl. 6.3, 6.6, 6.7). Das geologische Umfeld zeigt, dass hier durch die hohe Klüftigkeit des Hauptdolomits Oberflächenwasser über Störungssysteme der Quelle zuströmt, unter anderem auch aus dem Oberlauf des Weißgrabens, der direkt an der Fassung der Quelle vorbeifließt.

Das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o des Explorationsgebietes Weißgraben weist eine Fläche von ca. 6 km^2 auf, wobei das unterirdische Einzugsgebiet nach E und SE erweitert sein dürfte.

I.3.2.4.2 Explorationsgebiet Rabengschöß

Das Explorationsgebiet Rabengschöß (Gde. Reit im Winkl) befindet sich N' von Reit im Winkl an der Bundesstraße B 305 von Reit im Winkl nach Marquartstein (Anl. 1.3).

Es liegt lediglich wenige Hundert m S' des Explorationsgebietes Weißgraben. Daher ist die geologische Gesamtsituation des Gebietes mit dem Explorationsgebiet Weißgraben vergleichbar.

Der Bereich liegt vollständig im Hauptdolomit, in geringer Entfernung zur Überschiebungsbahn Lechtal-Decke/Tirolikum. Im Vergleich zum Explorationsgebiet Weißgraben besteht hier mit dem großen Lineament, welches das Becken von Reit im Winkl begrenzt, eine besondere tektonische Situation, da dieses direkt durch das Explorationsgebiet streicht. Darüber hinaus streicht die von NE abtauchende Achse der Reitberg-Mulde auf das ausgewiesene Explorationsgebiet zu (Anl. 4.3). Sie wird dort von dem N-S streichenden Beckenlineament abgeschnitten. Nach S hin wird das Explorationsgebiet durch den Pötsch-Alm-Sattel begrenzt. Von NNW-SSE streicht eine deutliche Schwächezone vom Maserer Pass in das Explorationsgebiet. So laufen in diesem Bereich erneut

zahlreiche deutliche Lineamente und Schwächezonen zusammen, welche die Klüftigkeit des Hauptdolomits erhöhen.

E' des Explorationsgebietes befindet sich, 50 m über der Talsohle gelegen, die Rabengschöß-Quelle (3-4 l/s). Die gefasste Quelle wird zur Versorgung des Ortsteiles Entfelden (Wasserversorgungsverband Entfelden) genutzt. Die Quelle ist bakteriologisch einwandfrei, es bedarf keiner Aufbereitung des Wassers. Die Quelle entspring direkt einer Hauptdolomit-Großkluft, die eine Öffnungsweite von mehr als 1 m aufweist. Die Kluft ist bergwärts offen und die Quellfassung ist in die Spalte gemauert. Es handelt sich um gespanntes, aufsteigendes Grundwasser, das an Großklüften aufsteigt und als Quelle zutage tritt. Die chemisch-physikalischen Parameter zeigen eindeutig eine Dolomit-Wasser Charakteristik (Anl. 6.3, 6.6, 6.7).

Die hydrogeologische Situation der Rabengschöß-Quelle bietet gute Chancen, mit einer Bohrung in Kluftsystemen aufsteigende Wässer zu erschließen.

Das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o des Explorationsgebietes Rabengschöß weist eine Größe von ca. 7,5 km^2 auf.

I.3.2.4.3 Explorationsgebiet Entfeld

Das Explorationsgebiet Entfeld (Gde. Reit im Winkl, Ortsteil Entfeld) liegt N' von Reit im Winkl an der Bundesstraße B 305 von Reit im Winkl nach Marquartstein (Anl. 1.3).

Die großtektonische Situation im Explorationsgebiet Entfeld ist mit den übrigen Explorationsgebieten im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl vergleichbar. In der weiteren Umgebung des Explorationsgebietes Entfeld steht ausschließlich Hauptdolomit an. E’ befindet sich die Reiterberg-Mulde sowie der Pötschalm-Sattel, deren Achsen SW-NE streichen. Die Mulde und der Sattel werden von jüngeren Querstrukturen wiederholt geschnitten. W’ des Explorationsgebietes verläuft ein großes Linear, welches das Becken von Reit im Winkl vom W’ gelegenen Hauptdolomit trennt. Aufgrund der Häufung von Schwächezonen in diesem Bereich kann von einer erhöhten Klüftigkeit des Hauptdolomits ausgegangen werden.

Das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o des Explorationsgebietes Entfeld weist eine Größe von ca. 3 km^2 auf.

Teil II

Explorationsmaßnahmen in den Untersuchungsgebieten Rottach-Egern/Kreuth und Reit im Winkl

II.1 Methoden und Maßnahmen für die Exploration von Trinkwasser in den Untersuchungsgebieten Rottach-Egern/Kreuth und Reit im Winkl

Auf Basis der Vorerkundungsergebnisse (Teil I) wurden für die Explorationsgebiete Sagenbachtal (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth) sowie Weißgraben und Entfeld (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) konkrete Programme zur Exploration von Kluftwasser aus dem Hauptdolomit entwickelt und durchgeführt. Bei Erstellung der Explorationsprogramme wurde das von FELLEHNER 2004 erarbeitete hydrologische Modell für den Kluftwasserleiter Hauptdolomit berücksichtigt und weiterentwickelt.

Zur Erschließung von Kluftgrundwasser aus dem Hauptdolomit sind 5 Festgesteinsbohrungen (bis zu 250,00 m u.GOK) abgeteuft worden. Die Ergebnisse aus den Bohrungen liefern die Grundlage für geophysikalische Untersuchungen sowie für Pumpversuche, die zur Erkundung der geohydraulischen Bedingungen im Hauptdolomit beitragen. Die Bohrungen sind so ausgebaut, dass Grundwasserzuflüsse bis ca. 100,00 m u.GOK sicher abgedichtet werden konnten, um etwaige Kontaminationen durch Oberflächenwässer auszuschließen.

Zur hydrologischen Gesamtbilanzierung des Einzugsgebietes Sagenbachtal dienten Lockergesteinsbohrungen, um den Oberflächenabfluss durch Daten des oberflächennahen Grundwasserabflusses im Schotterkörper zu ergänzen.

Folgende Methoden und Maßnahmen zur Bewertung der Hydrogeologie finden Anwendung:

1. Berechnung klimatologischer Parameter und hydrologische Bilanzierung für die Einzugsgebiete
2. Klassifizierung der hydrochemischen Charakteristik
3. Geophysikalische Untersuchungen
4. Pumpversuche

II.1.1 Klimatologie und hydrologische Bilanzierung in den Einzugsgebieten

Um die Bedeutung des geklüfteten Hauptdolomits als Grundwasserleiter im hydrologischen Gesamtsystem beurteilen zu können, werden mittels nummerischer Verfahren (MÜLLER-WESTERMEIER 1995) Klimamodelle berechnet. Die berechneten klimatologischen Parameter bilden die Grundlage für anschließende klimatologische und hydrologische Bilanzierungen. Aufgrund fehlender Abflussdaten kann eine vollständige hydrologische Bilanzierung Hy_{Bil} (Bilanzierung der klimatischen Wasserbilanz P_0 mit dem Oberflächenabfluss Q sowie Grundwasserabfluss Q_i) lediglich für das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o (DIN 4049, Teil 1, 1.20) Sagenbachtal (Rottach-Egern/Kreuth) berechnet werden.

Basis für die Erstellung der Klimamodelle und der hydrologischen Bilanzierungen bilden folgende Parameter und Berechnungen:

1. Digitale Geländemodelle (DGM) der großräumigen Untersuchungsgebiete
2. GIS-basierte Ermittlung der Einzugsgebiete EZG_o (durch Oberflächenwasserscheiden begrenzte oberirdische Einzugsgebiete)

3. Niederschlagsdaten ausgewählter Klimastationen im Bereich der Untersuchungsgebiete, Berechnung der lokalen Niederschlagsgradienten sowie der Gebietsniederschläge P (DIN 4049, Teil 3, 1.5.4) auf Basis der DGM
4. Temperaturdaten ausgewählter Klimastationen im Bereich der Untersuchungsgebiete und Berechnung der lokalen Temperaturgradienten sowie der Temperaturverteilungen auf Basis der DGM
5. Berechnung der potenziellen Evapotranspiration ET_p (DIN 4049, Teil 3, 1.5.14) auf Basis des DGM
6. Klimatische Wasserbilanz P_0 (DIN 4049, Teil 3, 1.5.2)
7. Oberflächenabfluss Q des Einzugsgebietes EZG_o (DIN 4049, Teil 3, 2.2.13 b) (EZG_o Sagenbachtal)
8. Modellierung des Grundwasserabflusses Q_i (DIN 4049, Teil 3, 3.6.13) im Schotterkörper (EZG_o Sagenbachtal)

II.1.1.1 Digitale Geländemodelle (DGM)

Die Berechnungen der Klimamodelle basieren auf einem DGM, um die höhenabhängigen Veränderungen der klimatologischen Faktoren zu berücksichtigen. Für die Berechnungen lagen DGM-Daten (räumliche Auflösung 50 m) des Bayerischen Landesvermessungsamtes vor, die den größten Teil der Untersuchungsgebiete abdecken, fehlende Bereiche wurden basierend auf topographischen Karten digitalisiert und 50m-Raster interpoliert (Anl. 2.1, 3.1). Die Rasterberechnungen erfolgten mit dem Programm *Golden Software Surfer 7* (Krigging-Methode). Zum Teil mussten die digitalisierten Daten von der österreichischen Projektion Bundesmeldenetz (ÖBMN, landeseigene Projektion des Militär-Geographischen Institutes, MGI) in die Gauss-Krüger-Projektion DHDN-Zone 4 transformiert werden.

Durch die orographische Gliederung der Untersuchungsgebiete und der damit verbundenen vertikalen Veränderung der klimatologischen Faktoren wird die räumliche Auflösung von 25 m als sinnvoll erachtet, und somit das Basis DGM (50m-Auflösung) zu einem 25m-Raster interpoliert (Krigging-Methode, *Golden Software Surfer 7*). Jeder Rasterpunkt des resultierenden DGM beschreibt eine Fläche von 625 m^2, welchem in den Berechnungen des Klimamodelles spezifische Werte für Temperatur, Niederschlag, potenzieller Evapotranspiration sowie klimatische Wasserbilanz P_0 zugewiesen wird.

II.1.1.2 GIS-basierte Ermittlung der oberirdischen Einzugsgebiete EZG_o

Unter Verwendung der Programme *Golden Software SURFER 7* und *MapInfo Professional 7.0* wurden aus den Höheninformationen des DGM (xyz-Werte, ASCII-Datensatz) Isolinienkarten berechnet. Basierend auf den Isolinien lassen sich die durch oberirdische Wasserscheiden begrenzten Einzugsgebiete (EZG_o) ermitteln sowie für diese Gebiete die spezifischen DGM erstellen.

Die resultierenden Datensätze bilden die Grundlage der klimatologischen Berechnungen.

II.1.1.3 Berechnung der spezifischen Niederschlagsgradienten und der Gebietsniederschläge P

Die innerhalb der Alpen gelegenen Untersuchungsgebiete weisen mit durchschnittlichen jährlichen Niederschlagshöhen von 1868 mm (Klimastation Kreuth) bzw. 1730 mm (Klimastation Reit im Winkl) deutlich höhere Werte auf als das deutschlandweite Mittel von 670 mm (WEISCHET 1977). Die Gebiete sind charakterisiert durch niederschlagsreiche Sommer und niederschlagsarme Winter.

Da die Niederschläge mit steigender Höhe zunehmen, muss die vertikale Verteilung der Niederschläge bei den Berechnungen und Bilanzierungen für die Einzugsgebiete berücksichtigt werden. Die maximalen Höhenunterschiede liegen zwischen 605 m im EZG_o Entfeld und 1031 m im EZG_o Sagenbachtal.

Für die Berechnung der Niederschlagsgradienten liegen Daten von Niederschlagsmessstationen in der Umgebung der Einzugsgebiete vor, sowie von Stationen, deren Höhenlage und geographische Breite für die Einzugsgebiete charakteristisch sind (Tab. 9, 16).

Als Datengrundlage dienen Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Es liegen z.T. Messwerte über zwei Normalperioden (1931/60 und 1960/90; EZG_o Sagenbachtal) bzw. langjährige Messwertreihen von über 30 Jahren vor (EZG_o Weißgraben und Entfeld).

Auf Basis der Höheninformation der Messstationen sowie der gemessenen Niederschlagshöhen werden für die Einzugsgebiete EZG_o die monatlichen Niederschlagsgradienten in Bezug auf die Höhe bestimmt (Anl. 10.1, 11.1). Die Gradienten beruhen auf Linearfunktionen:

$$hP = a * H + b \quad [mm]$$

hP Niederschlagshöhe [mm]
H Geländehöhe
a Dezimalzahl
b Dezimalzahl

Die monatlich individuellen Gradienten (Linearfunktionen) wurden mittel *MS Excel 2002* berechnet und sind in Anlage 10.1 und 11.1 dokumentiert.

Durch Kombination der Niederschlagsgradienten mit den DGM kann für jeden Rasterpunkt (repräsentiert 625 m²) die Niederschlagshöhe hP berechnet, sowie der Gebietsniederschlag P (DIN 4049, Teil 3, 1.5.4) innerhalb der abgegrenzten Einzugsgebiete EZG_o quantitativ bestimmt (Kap. II.2.3.6 und II.3.35, Tab. 10, 17, Anl. 10.3, 11.3).

Dabei ist zu beachten, dass aufgrund windbedingter Messfehler die räumliche Interpolation von Niederschlägen in den Alpen fehlerhaft sein kann (BAUMGARTNER ET AL. 1983, RICHTER 1995).

II.1.1.4 Berechnung der spezifischen Temperaturgradienten

Der Temperatur kommt bei der Berechnung der Grundwasserneubildung, bzw. der potentiellen Evapotranspiration eine zentrale Bedeutung zu, da diese die Verdunstung wesentlich beeinflusst. Bedingt durch die Lage im Alpenraum und dem damit zusammenhängenden Wirken des hypsometrischen Formenwandels herrscht im Untersuchungsgebiet der advektive Niederschlagstyp vor (LAUTENSACH 1952).

In dieser geographischen Lage ist es nicht legitim, einen allgemeinen oder dem hypsometrischen Temperaturgradienten angelehnten Gradienten zu verwenden. Daher ist es notwendig, für die Untersuchungsgebiete die lokalen Temperaturgradienten zu bestimmen. Denn es kommt in Richtung des Hauptkammes der Alpen zu einer lokalen Überwärmung, nach dem Gesetz der

Massenerhebung. Diese Überwärmung reicht bis in das Untersuchungsgebiet hinein.

Den Berechnungen liegen Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zugrunde. Neben den innerhalb der Untersuchungsgebiete gelegenen Stationen werden zusätzlich Daten von Messstationen vergleichbarer Höhe und ähnlicher geographischer Breite herangezogen (Tab. 9, 16).

Auf Basis der Höheninformation der Messstationen sowie der gemessenen Temperaturen werden für die Einzugsgebiete EZG_o die monatlichen Temperaturgradienten in Bezug auf die Höhe bestimmt (Anl. 10.1, 11.1). Die Gradienten beruhen auf Linearfunktionen:

$$T = a * H + b \quad [°C]$$

T Temperatur [°C]
H Geländehöhe
a Dezimalzahl
b Dezimalzahl

Die monatlich individuellen Gradienten (Linearfunktionen) wurden mittel *MS Excel 2002* berechnet und sind in Anlage 10.1 und 11.1 dokumentiert.

Mittels der berechneten lokalen Temperaturgradienten (Anl. 10.1, 11.1) und des DGM kann für jeden Rasterpunkt (repräsentiert 625 m²] die Temperatur berechnet werden und damit die Temperaturverteilung innerhalb der Einzugsgebiete EZG_o (Kap. II.2.3.6 und II.3.35, Anl. 10.2, 11.2).

II.1.1.5 Berechnung der potentiellen Evapotranspiration (ET_p)

Die potenzielle Evapotranspiration ET_p (DIN 4049, Teil 3, 1.5.14) stellt bei der Erstellung der Grundwasserbilanzierung eine bestimmende Größe dar. Eine direkte Messung der Evapotranspiration im Gelände ist nicht möglich.

Es existieren zahlreiche indirekte Berechnungsmethoden zur Ermittlung der potenziellen Evapotranspiration. In der Literatur wird die potenzielle Evapotranspiration in Abhängigkeit der Verfügbarkeit der notwendigen Eingangsdaten nach unterschiedlichen Verfahren ermittelt. Nach einem Vergleich verschiedener gängiger Berechnungsmethoden (HAUDE 1955, BLANEY & CRIDDLE 1950, BLANEY-CRIDDLE mit Korrektur nach SCHRÖDTER 1985, TURC 1961, MAKKINK 1957, PENMAN 1948 mit Vereinfachung nach WENDLING 1991) hinsichtlich der im Untersuchungsgebiet vorkommenden geographischen Parameter sowie erhobener Klimadaten wird im Rahmen der vorliegenden Auswertungen das Verfahren von BLANEY-CRIDDLE (1950) mit der SCHRÖDTER-Korrektur (1985) angewandt (FELLEHNER 2004).

Bei der Berechnung der potenziellen Evapotranspiration nach BLANEY-CRIDDLE [$ET_{p\ Blan\text{-}Crid}$] wird der Temperatur sowie der Sonnenscheindauer Rechnung getragen. In die Berechnung geht neben den monatlichen Lufttemperatur-Mittelwerten [T] und der astronomisch möglichen mittleren täglichen Sonnenscheindauer [S_0] (Tab. 3) der Jahreswert der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer [$S_{0\ Jahr}$] (Tab. 3) ein. Die Werte der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer sind dem DVWK (1996) entnommen, es handelt sich um Breitengrad abhängige Werte. Die Untersuchungsgebiete liegen im Bereich von 47° N' Breite.

Neben den Daten des DVWK (1996) gehen die ermittelten Werte der reliefabhängigen Temperaturverteilung in die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration der untersuchten Einzugsgebiete ein. Für die abgegrenzten Einzugsgebiete EZG_o kann so die Verteilung der potenziellen Evapotranspiration unter Berücksichtigung der orographischen Gegebenheiten ermittelt wer-

den.

Die $ET_{p\ (Blan\text{-}Crid)}$ wird nach folgender empirischer Formel berechnet:

$$ET_{p\ (Blan\text{-}Crid)} = (8{,}128 + 0{,}457 * T) * ((S_0 * 100) / S_{0\ Jahr}) \quad [mm]$$

Die anschließend durchzuführende SCHRÖDTER-Korrektur wird angewendet, um die Ergebnisse der Berechnung nach BLANEY-CRIDDLE den mitteleuropäischen Verhältnissen anzupassen. Die empirische Korrekturformel nach SCHRÖDTER lautet:

$$ET_{p\ Blan\text{-}Crid\text{-}Schr} = -1{,}55 + 0{,}96 * ET_{p\ Blan\text{-}Crid} \quad [mm]$$

Die Berechnungen der potentiellen Evapotranspiration wurden mit *MS Excel 2002* durchgeführt und mit *MapInfo Professionel 7.0* weiterverarbeitet und ausgewertet. Die Ergebnisse (Tab. 10, 17, Anl. 10.3, 11.3) für die bilanzierten Einzugsgebiete EZG_o sind in Kapitel II.2.3.6 sowie II.3.3.5 erläutert.

Breite	Jan [h/d]	Feb [h/d]	Mrz [h/d]	Apr [h/d]	Mai [h/d]	Jun [h/d]	Jul [h/d]	Aug [h/d]	Sep [h/d]	Okt [h/d]	Nov [h/d]	Dez [h/d]	Jahr [h/a]
47°	9,0	10,3	11,9	13,6	15,1	15,8	15,5	14,2	12,6	10,9	9,4	8,6	4470
48°	8,9	10,2	11,9	13,7	15,2	16,0	15,6	14,3	12,6	10,8	9,3	8,5	4473
49°	8,8	10,2	11,9	13,7	15,3	16,1	15,7	14,3	12,6	10,8	9,2	8,3	4476
50°	8,6	10,1	11,9	13,8	15,4	16,3	15,9	14,4	12,6	10,8	9,1	8,2	4480
51°	8,5	10,0	11,9	13,8	15,5	16,5	16,0	14,5	12,6	10,7	9,0	8,0	4483

Tab. 3: Astronomisch mögliche Sonnenscheindauer (DVWK 1996)

II.1.1.6 Klimatische Wasserbilanz P_0

Die klimatische Wasserbilanz P_0 (DIN 4049, Teil 3, 1.5.2) ergibt die Niederschlagsmenge, welche dem Grundwasserleiter und dem Abflusssystem zugeführt wird, ohne durch potenzielle Evapotranspiration dem hydrologischen System verloren zu gehen.

Die Eingangsdaten für die Berechnung ist der Gebietsniederschlag P sowie die potenzielle Evapotranspiration ET_p (Kap. II.2.3.6 und II.3.3.5, Tab. 10, 17, Anl. 10.3, 11.3). Die klimatische Wasserbilanz P_0 wird nach folgender Formel berechnet:

$$P_0 = P - ET_p$$

Als räumliche Bezugsgrößen dienen erneut die reliefabhängigen 25m-Raster. Dabei stehen die Werte des Gebietsniederschlages P sowie der potenziellen Evapotranspiration $ET_{p\ Blan\text{-}Crid\text{-}Schr}$ für jede definierte Rasterfläche (625 m^2) zur Verfügung, wodurch eine höhendifferenzierte Erfassung von P_0 gewährleistet wird. Die Berechnungen zur der klimatischen Wasserbilanz wurden mit *MS Excel 2002* durchgeführt und mit *MapInfo Professionel 7.0* weiterverarbeitet und ausgewertet. Die Ergebnisse (Tab. 10, 17, Anl. 10.3, 11.3) für die bilanzierten Einzugsgebiete EZG_o sind in Kapitel II.2.3.6 sowie II.3.3.5 erläutert.

Bei der Bewertung der Ergebnisse bleibt zu berücksichtigen, dass die in die Berechnungen einge-

henden Daten der maximal möglichen Evapotranspiration (potenzielle Evapotranspiration) höhere Werte aufweisen als die tatsächliche Verdunstung (DIN 4049, Teil 3, 1.5.15), d.h. die reale P_0-Menge ist höher als die berechneten Werte.

Nach dieser Berechnung stehen die positiven Daten für eine hydrologische Bilanzierung der Einzugsgebiete EZG_o zur Verfügung.

II.1.1.7 Oberflächenabfluss der Einzugsgebiete

Der Oberflächenabfluss Q ist lediglich für das Einzugsgebiet EZG_o Sagenbachtal (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth) zu ermitteln. Für dieses Einzugsgebiet liegen langjährige Messreihen des Abflusspegels Sagenbach vor (Kap. II.2.3.6, Anl. 10.6).

Für die Einzugsgebiete EZG_o Weißgraben und EZG_o Entfeld (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) sind keine Abflussdaten vorhanden.

II.1.1.8 Modellierung des Grundwasserabflusses im Schotterkörper

Der Grundwasserabfluss Q_i im Schotterkörper kann für das Einzugsgebiet EZG_o Sagenbachtal näherungsweise quantifiziert werden (Anl. 10.5, 10.6, Kap. II.2.3.6.1).

Es wird auf die Ergebnisse der Gleichstrom-Geoelektrischen Sondierungen zurückgegriffen, durch welche die Verteilung der Schottermächtigkeit über dem Hauptdolomit interpoliert werden kann (Kap. II.2.3.1). Weiter gehen die Daten des Pumpversuches im Schotterkörper (Pumpversuch an der GwM 1) sowie die Messung der Grundwasserströmung (Kap. II.2.3.4.3) in die Berechnungen ein.

II.1.2 Klassifizierung der hydrochemischen Charakteristik

Durch Analyse und Bewertung der hydrochemischen Charakteristik der untersuchten Grundwässer wird ein Klassifikationsschema entwickelt, anhand dessen eine Beurteilung hinsichtlich des Grundwasserleiters erfolgt.

Auf Grundlage der geltenden Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) (Anl. 6.2) wird die chemisch-physikalische sowie hygienische Qualität der Grundwässer beurteilt.

II.1.2.1 Datengrundlage

Im Rahmen des Projektes "*Grundwassererkundung in Bayern, Maßnahme Kalkalpine Randzone*" des LfW Bayern wurden im Verlauf der Vorerkundungsphase sowie der Explorationsarbeiten in den Untersuchungsgebieten Rottach-Egern/Kreuth und Reit im Winkl Wasserproben auf ihre chemisch-physikalischen (und z.T. mikrobiologischen) Parameter hin untersucht. Die Daten wurden ergänzt durch Recherchen bei lokalen Wasserversorgern sowie den zuständigen Wasserwirtschaftsämtern Rosenheim und Traunstein. Weitere Analysedaten stammen aus dem Grundwassererschließungsprojekt der Stadt Bad Reichenhall (Fellehner 2004) sowie den Grundwassererkundungsprogrammen der Gemeinden Inzell und Piding.

Insgesamt stehen 184 hydrochemische Analysen zur Auswertung zur Verfügung, welche als Basis für die Einteilung des Klassifikationsschemas dienen. In Anlage 6.1 sind die Quellen bzw. Brunnen aufgeführt, deren Daten dieser Arbeit zugrunde liegen. Die vollständigen Analyseergebnisse sind in Anlage 6.3 dokumentiert.

II.1.2.2 Klassifikationsschema zur Charakterisierung von Grundwasser in den Untersuchungsgebieten

Im Rahmen des Projektes zur Erkundung von Kluftgrundwasser im Hauptdolomit bestand die Notwendigkeit, Einflüsse von Grundwasser aus benachbarten lithologischen Einheiten nachzuweisen sowie Grundwasserleitern zuzuordnen. Durch ein Klassifikationsschema, basierend auf charakteristischen hydrochemischen Parametern, sollten Grundwässer aus bestimmten lithologischen Einheiten sicher indentifiziert sowie Mischungen qualitativ beschrieben werden.

Grundgedanke bei der Interpretation und Beurteilung der Wasseranalysen ist, dass sich der Niederschlag auf dem Weg durch die Bodenzone und die folgenden Grundwasserleiter bis zu seinem Austritt mit gelösten Stoffen und Gasen anreichert. Dabei bestimmt die Petrologie des Grundwasserleiters, welcher die Stoffe zur Lösung bereitstellt, die chemisch-physikalische Charakteristik des Grundwassers. Aus den lokalen geologischen und tektonischen Verhältnissen innerhalb der Explorationsgebiete ergeben sich als Grundwasserleiter: *Plattenkalk, Dachsteinkalk, Wettersteinkalk, Hauptdolomit, Raibler Rauhwacke* sowie *Moräne, alluviale Schotter* und *Oberflächenwasser.*

Petrologisch lassen sich die Karbonate Kalk und Dolomit anhand ihres differierenden Ca^{2+}-Mg^{2+}-Verhältnisses unterscheiden; Rauhwacken (Kap. I.2.1.2) sind durch evaporitische Einlagerungen ($CaSO_4$, $CaSO_4$*H_2O) charakterisiert. Durch Lösung der Karbonate bzw. Sulfate (bes. Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}) im Grundwasser, wird die genannte petrologische Charakteristik auch durch die hydrochemischen Parameter deutlich und ermöglicht eine Klassifikation.

Kirchhoff (1988) führte experimentelle Untersuchungen zur Aufklärung der Reaktionsmechanismen bei der Auflösung von Karbonaten durch. Es wurden Experimente an reinem Kalzit und reinem Dolomit in offenen sowie geschlossenen Systemen untersucht. Das geschlossene System beschränkt sich prinzipiell auf einen kompakten Gesteinsverband, d.h. eine CO_2-Gasphase kann weitgehend ausgeschlossen werden. Das offene System hingegen setzt eine unendlich große CO_2-Gasphase über dem Wasserkörper voraus; diese Bedingung wird praktisch nur in der Bodenzone erfüllt. Nach Langmuir (1971) und Deines et al. (1974) ist unter natürlichen Bedingungen eine Differenzierung der Modelle anhand der Hauptkomponenten nicht möglich. Erst unter Berücksichtigung der Kohlenstoffisotope ^{12}C und ^{13}C kann von natürlichen Grundwässern auf die vorliegenden Systembedingungen geschlossen werden. Der zentrale Teil der Arbeit von Kirchhoff (1988) ist die experimentelle Verifikation von Isotopenmodellen, welche ausschließlich auf Grundlage von Feldmessungen erstellt wurden (Kirchhoff & Usdowski 1985, Schaefer 1985, Michaelis 1987). Die Untersuchungen basieren auf den kinetischen und thermodynamischen Beziehungen der Systeme $CaCO_3$-CO_2-H_2O und $CaCO_3$-$MgCO_3$-CO_2-H_2O. Buhmann & Dybrodt (1986) konnten nachweisen, dass der Einfluss von Fremdionen (z.B. Na^+, Mg^{2+}, SO_4^{2-} oder Cl^-) auf die Lösungskinetik des Kalzits gering ist. Kirchhoff (1988) konnte die Charakteristik der Kalzit- und Dolomitauflösung anhand der Hauptkomponenten beurteilen. Es zeigte sich, dass die

Auflösungscharakteristik des Dolomits ein inkongruentes Verhalten aufweist - Kalzium geht etwas schneller in Lösung als Magnesium. Weiter konnte nachgewiesen werden, dass die Auflösungsgeschwindigkeit des Dolomits deutlich vor Erreichen der Dolomitsättigung der Lösung abnimmt. Das thermodynamische Gleichgewicht zwischen Festkörper und Lösung wird offenbar erst nach langen Reaktionszeiten erreicht. Im Gegensatz zum Kalzit können zwei Reaktionsabschnitte unterschieden werden. In der Initialperiode lösen sich Dolomit und Kalzit mit ähnlicher Geschwindigkeit, im weiteren Verlauf tritt jedoch eine Änderung der Lösungskinetik ein, die die langsame Annäherung an die Dolomitsättigung widerspiegelt. Das typische Kalzium/Magnesium-Verhältnis in der Lösung von ca 1:1 zeigt sich jedoch bereits kurz nach Beginn des Lösungsprozesses.

II.1.2.2.1 Zweistoff- und Dreistoff-Diagramm zur Klassifikation

Das entwickelte hydrochemische Klassifikationsschema beruht auf Darstellung der Ca^{2+}-, Mg^{2+}- und SO_4^{2-}-Konzentrationen (mmol/l) des Grundwassers in Zweistoff- (Ca-Mg) und Dreistoffdiagrammen (Ca-Mg-SO_4). Die Klassifikation basiert auf der Auswahl von Typusquellen, deren Grundwasserleiter in hydrogeologischer sowie geologischer und strukturgeologischer Hinsicht eindeutig einer lithologischen Einheit zugeordnet werden konnte. Die Typusquellen zeigen charakteristische Ca^{2+}-Mg^{2+}-SO_4^{2-}-Verhältnisse eines Kalziumkarbonat-Wassers (*Plattenkalk, Dachsteinkalk, Wettersteinkalk*), Dolomit-Wassers (*Hauptdolomit*) sowie sulfatreichen Wassers (*Raibler Rauhwacke*). Die definierten Typusquellen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Typus-Wasser	Typusquelle	Grundwasserleiter
Dolomit-Wasser	Höllenbach (Weißbach)	Hauptdolomit
Kalziumkarbonat-Wasser	Wasserloch (Inzell)	Wettersteinkalk
sulfatreiches Wasser	Gernberg-Quelle (Wildbad Kreuth)	Raibler Rauhwacke

Tab. 4: Typus-Wässer, Endglieder möglicher Mischreihen

Unter Berücksichtigung der gesamten Datenbasis in Verbindung mit den definierten Typus-Wässern erfolgt im Zweistoff- und Dreistoff-Diagramm die Abgrenzung von Typusbereichen (Anl. 6.6). Die Typusbereiche zeigen die hydrochemische Charakteristik (Ca^{2+}-Mg^{2+}-SO_4^{2-}-Verhältnisse) von Grundwasser aus einem speziellen Grundwasserleiter oder die von Mischwässern. Dabei können in den jeweiligen Diagrammformen (Zweistoff-Diagramm Ca-Mg-Verhältnis, Dreistoff-Diagramm Ca-Mg-SO_4-Verhältnis) unterschiedliche Typusbereiche bzw. Mischbereiche dargestellt werden (Abb. 5, Tab. 7).

Eine sensitive Abgrenzung von Dolomit-Wasser zu Kalziumkarbonat-Wasser ist über das Zweistoff-Diagramm (Abb. 5a) möglich. Das typische Dolomit-Wasser zeigt idealerweise ein Kalzium-Magnesium-Verhältnis von 1:1 (mmol/l Konzentrationen), während in reinem Kalziumkarbonat-Wasser (z.B. Wettersteinkalk oder Plattenkalk) der Kalzium- gegenüber dem Magnesium-Anteil stark dominiert. Der Mischbereich zwischen Dolomit-Wasser und Kalziumkarbonat-Wasser lässt sich hinsichtlich des Grundwasserleiters nicht weiter differenzieren. Einzig die Wässer aus alluvia-

len Schottern und Moränen können in einem weiteren Typus-Bereich abgegrenzt werden (Abb. 5a, Anl. 6.6). Bedingt durch die hohen Ca^{2+}- und Mg^{2+}-Konzentrationen ist die Darstellung von sulfatreichen Wässern im Zweistoff-Diagramm nicht praktikabel.

Die weitere Differenzierung des Mischwasserbereichs sowie die Abgrenzung der sulfatreichen Wässer ist jedoch im Dreistoff-Diagramm möglich (Abb. 5b, Tab. 5, Anl. 6.7). Zwischen den Typusbereichen *Dolomit-Wasser*, *Kalziumkarbonat-Wasser* sowie *sulfatreichem Wasser* (Raibler Rauhwacken) werden die Mischbereiche *sulfatbetontes Dolomit-Wasser* und *sulfatbetontes Kalziumkarbonat-Wasser* charakterisiert. Bei der Beurteilung der Misch-Wässer ist jedoch zu

Ca - Mg - Diagramm		Ca - Mg - SO_4 - Diagramm
Dolomit-Wasser		Dolomit-Wasser
		Kalziumkarbonat-Wasser
Kalziumkarbonat-Wasser		Raibler-Rauhwacken-Wasser
		Moränen/alluviale Schotter-Wasser
Moränen/alluviale Schotter-Wasser		Dolomit-Kalziumkarbonat-Mischwasser (bzw. Dolomit-Wasser mit Oberflächen-Wasser)
Mischwasser		Dolomit-Wasser mit Raibler-Komponente
		Raibler-Wasser mit geringem Rauhwackenanteil bzw. Dolomit-Wasser mit starkem Raibler Einfluss

Tab. 5: Darstellbare Grundwassercharakteristiken in den angewandten Diagrammformen

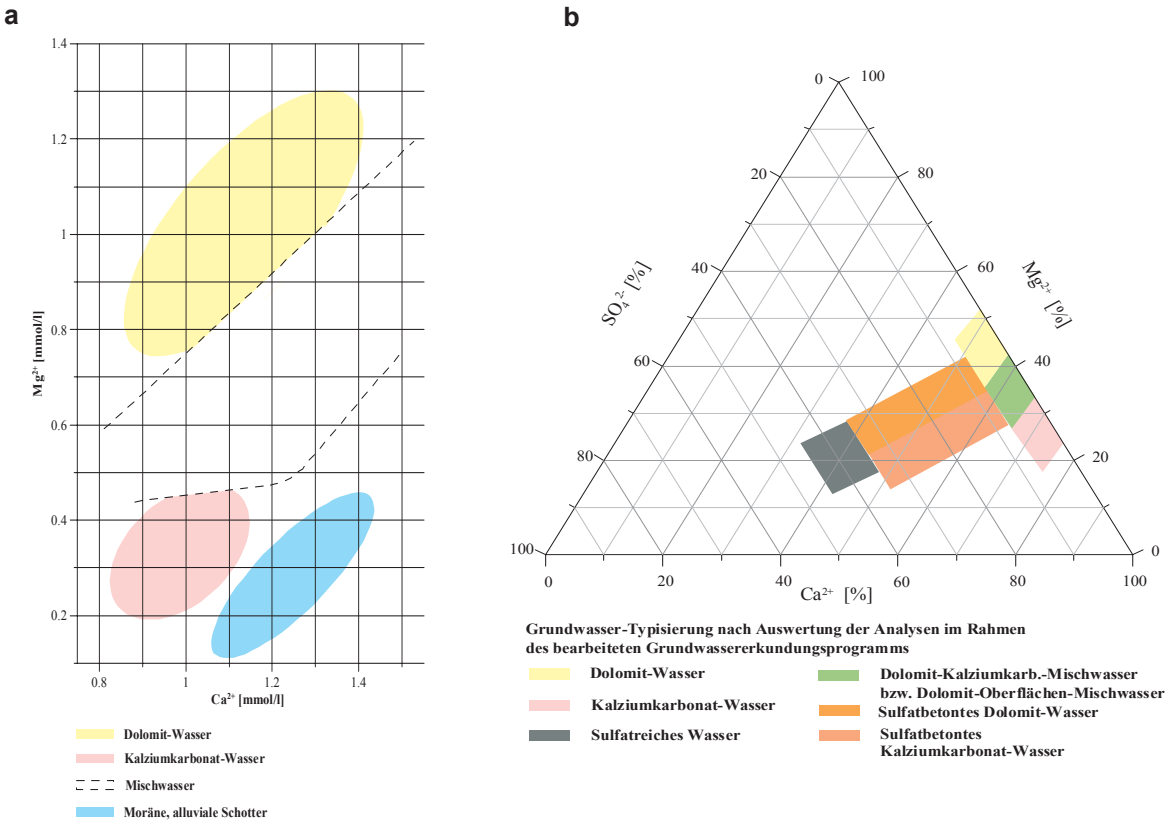


Abb. 5: Darstellbare Grundwassercharakteristiken in den beiden angewandten Diagrammformen, a) Ca - Mg-Diagramm; b) Ca-Mg-SO_4-Diagramm

beachten, dass sie durch Mischung der Typus-Wässer oder durch die Raibler Schichten selbst geprägt sein können. Hintergrund ist der heterogene Aufbau der Raibler Schichten mit variierendem Gips- bzw. Anhydritgehalt (Kap. I.2.1.2). Ähnliches gilt bei der Bewertung des Mischbereiches zwischen *Dolomit-Wasser* und *Kalziumkarbonat-Wasser* (Abb. 5b). Neben einer Mischung beider Typus-Wässer, kann eine Kontamination des *Dolomit-Wassers* durch *Oberflächenwasser* vorliegen.

In der Anwedung des Klassifikationsschemas sind immer die stratigraphischen, lithologischen und strukturgeologischen Rahmenbedingungen im Bereich des Probennahmepunktes zu berücksichtigen. Erst Kombination des hydrochemischen Klassifikationsschemas unter Berücksichtigung geologischer Erkenntnisse ermöglicht eine sichere hydrogeologische Zuordnung der Grundwässer.

II.1.2.2.2 Fehlerbetrachtung

Da sich die Differenzierung bzw. Klassifizierung der beprobten Wässer in einem sehr engen Wertebereich bewegt (i.d.R. Ca^{2+} 0,8 - 1,4 mmol/l, Mg^{2+} 0,2 - 1,3 mmol/l), kommt einer qualitativen Beurteilung der durchgeführten Analysen bezüglich der Messgenauigkeit bzw. der Streubereiche eine wichtige Funktion zu.

Als mögliche Fehlerquelle ist neben der Probennahme die Analysetechnik anzusehen. Hinsichtlich der durchgeführten Analysen werden von unterschiedlichen Laboren differierende Vertrauensbereiche angegeben. Innerhalb der Labore schwanken zudem die Messunsicherheiten bzgl. der untersuchten Elemente. Sämtliche im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Auftrag gegebenen Analysen wurden von einem Probennehmer sowie einem Labor durchgeführt, um die oben genannten Fehlerquellen zu minimieren (*Labor Blasy & Busse, Eching am Ammersee*). Lediglich Analysen, die von lokalen Wasserversorgern bzw. Wasserwirtschaftsämtern in Auftrag gegeben wurden, sind z.T. durch andere Labore übernommen worden. In der vorliegenden Arbeit beträgt der Anteil der im Labor Blasy & Busse analysierten Proben bei 81,5 %.

Bei den Eigenanalysen durch das Labor *Blasy & Busse* muss von einer statistisch ermittelten Messunsicherheit von +/- 5 % bei Ca^{2+}, von +/- 7 % bei +/- Mg^{2+} und +/- 2 % bei SO_4^{2-} ausgegangen werden (mündl. Mitt. Dr. Busse). Um die Auswirkungen der genannten Messunsicherheit auf die definierten Typus-Bereiche beurteilen zu können, wurden für alle Analysen die möglichen Streubereiche berechnet und im Zweistoff- und Dreistoff-Diagramm dargestellt (Anl. 6.9, 6.10).

Es zeigt sich, dass die Streubereiche der statistischen Messungenauigkeiten innerhalb der definierten Typusbereiche liegen. So kann ein negativer Einfluss der Messungenauigkeiten auf die das Klassifikationsschemas ausgeschlossen werden.

II.1.3 Geophysikalische Erkundungsmethoden

In den Explorationsgebieten Sagenbachtal (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth) und Weißgraben (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) wurden verschiedene geophysikalische Erkundungsmaßnahmen durchgeführt. Methoden zur Festlegung von Bohrpunkten und zur Lokalisierung von Kluftwasserzuflüssen fanden Anwendung.

II.1.3.1 Gleichstromgeoelektrik

Im Vorfeld der Bohrungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal erfolgten gleichstromgeoelektrische Sondierungen (GGS), um Informationen über die Schottermächtigkeit und -verteilung zu erhalten.
Die Messungen (Schlumberger-Methode) wurden vom *GLA Bayern* durchgeführt. Die Auswertung und Interpretation der Rohdaten erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit (Kap. II.2.3.1). In Kombination mit den DGM-Daten des Explorationsgebietes wird die Schottermächtigkeit im Explorationsgebiet modelliert (Abb. 11, Anl. 5, 13.1, 13.2).

II.1.3.2 Grundwasserströmungs-Messungen

In einer Lockergesteinsbohrung (GwM 1, Explorationsgebiet Sagenbachtal; Kap. II.2.3.3.1) wird die Grundwasserströmungsrichtung sowie die horizontale Grundwasserdurchströmung in verschiedenen Teufen bestimmt (Kap. II.2.3.4.3, Anl. 13.6). Die Firma *Phrealog (Hürth)* führte die Untersuchung mit dem Grundwasser-Fluss-Visualisierungs-Messsystem (GFV-Messsystem) durch. Mit dem GFV-Messsystem können Untersuchungen innerhalb einer einzelnen Grundwassermessstelle erfolgen. Es sind keine Markierungsstoffe notwendig.
Die Grundwasserdurchströmung wird in verschiedenen Teufen gemessen, indem das Messsystem mit Packern in den zu untersuchenden Teufen nach oben und unten isoliert wird. Die Filterrohrabschnitte werden aufgrund der sehr geringen Grundwasserfließbewegung laminar und korrespondierend zur umgebenden Grundwasserfließgeschwindigkeit durchströmt. Gemessen wird die Durchströmungsgeschwindigkeit v_H durch die optische Aufnahme der Schwebstoffe mittels eines Kamerasystems. Die Driftbewegungen der vom Grundwasser mitgeführten, natürlichen Schwebstoffe werden im jeweiligem Messabschnitt vom Kamerasystem erfasst und die Bilder mit einem Präzisionskompass eingeordnet. Anhand der Bilddaten werden Schwebstoffmuster definiert, die über eine zeitliche Abfolge verfolgt werden. Ausgehend von einer Bildabfolge wird der Versatz eines Schwebstoffmusters in Strömungsvektoren umgerechnet. Die so erhaltenen Strömungsvektoren werden in Richtungs- und Geschwindigkeitsvektoren zerlegt, und als zusammenhängende Punktlinien in Richtungs- und Geschwindigkeitsdiagrammen dokumentiert (Anl. 13.6).

II.1.3.3 Bohrloch-Radar

Nach Fertigstellung der Erkundungsbohrungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal erfolgte eine Untersuchung der Festgesteinsbohrungen mittels Bohrloch-Radar (Kap. II.2.3.3.3, Anl. 13.5), um in der Umgebung der beiden Bohrungen eine evtl. vorhandene erhöhte Klüftigkeit des Hauptdolomits zu erkunden. Die Untersuchungen wurden von der Firma *BORATEC (Weimar)* durchgeführt.

Das Bohrloch-Radar-Verfahren zählt zu den Impuls-Reflexionsverfahren. Über eine Sendeantenne werden kurze elektromagnetische Impulse abgestrahlt. Diese breiten sich im Gestein aus und werden an Schichtgrenzen oder Klüften, die sich in ihren elektrischen Eigenschaften unterscheiden (Dielektrizitätskonstante, elektrische Leitfähigkeit), teilweise reflektiert. Die Reflexionssignale werden von einer Empfangsantenne erfasst. Aus der gemessenen Laufzeit zwischen Sende- und Empfangssignal kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Untergrund nach entsprechender Signalbearbeitung auf die Teufenlage nachgewiesener Reflektoren geschlossen werden.

Bei dem Georadar-Verfahren (Bohrlochradar-Verfahren) handelt es sich um ein kontinuierliches bzw. quasi-kontinuierliches Verfahren, es kann daher mit hoher Geschwindigkeit gemessen werden. Die Sende- und Empfangsantenne wird entlang des Bohrloches bewegt. Spezielle Ankopplungsbedingungen der Antennen an das Gestein sind nicht erforderlich. Die Wahl der Aufzeichnungsgeschwindigkeit bestimmt dabei die Messdichte. Bei herkömmlichen Untersuchungen sind Messpunktdichten im Dezimeter- bis Meterbereich üblich.

Es wird zwischen der ungerichteten (Dipol-) Reflexionsmessung und der tomographischen Messung unterschieden. Bei der ungerichteten Reflexionsmessung werden Transmitter und Receiver im gleichen Bohrloch bewegt, die Sondenkonfiguration wird schrittweise im Bohrloch versetzt. An jedem Messpunkt wird ein elektromagnetischer Impuls durch den Transmitter erzeugt, die Zentralfrequenzen betragen 22, 60, 100 und 250 MHz. Über niedrigere Frequenzbereiche lassen sich höhere Eindringtiefen erreichen (zulasten der Auflösung), während mit höheren Frequenzen eine bessere Auflösung möglich ist (zulasten der Eindringtiefe).

Die Impulse werden an Diskontinuitäten z.T. reflektiert, diese Energie wird vom Receiver empfangen. Die empfangenen Signale werden ähnlich wie in der Reflexionsseismik aufgezeichnet und als Radargramm dargestellt.

Die Erkundungstiefe ist hauptsächlich vom elektrischen Widerstand sowie der Dielektrizitätskonstanten der Gesteine abhängig. Es gelten folgende allgemeine Richtwerte:

- wenige Meter oder darunter in tonigen und schluffigen Gesteinen
- 10 bis 40 m in normal geklüfteten Gesteinen
- 40 bis 150 m in massiven Gesteinen
- bis zu 300 m und mehr bei Messungen unter speziellen Bedingungen (z.B. reines Steinsalz, ungestörter Kalkstein, Dolomit oder Granit, Eis)

Bei der tomographischen Messung befinden sich Transmitter und Receiver in zwei separaten Bohrlöchern. Die vom Transmitter gesendeten Signale laufen durch das Gestein zwischen den Bohrlöchern zum Receiver. Für jede Transmitter- und Receiverposition werden Laufzeit und Amplitude des Signals aufgezeichnet. Aus der großen Anzahl der Signaldaten wird auf numerischem Weg ein kontinuierliches Bild (Tomogramm) der Radarwellengeschwindigkeit oder Radardämpfung der durchstrahlten Gesteinsebene berechnet.

Der realisierbare Erkundungsabstand der Bohrungen ist bei tomographischen Messungen besser als bei Reflexionsmessungen: auch in bindigen, gut leitfähigen Gesteinen und Sedimenten können bei Bohrlochentfernungen von 20 m und mehr gute Ergebnisse erzielt werden.

II.1.3.4 Bohrlochgeophysik

Aus den Festgesteinsbohrungen im Explorationsgebiet Weißgraben (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) liegen die Ergebnisse von drei Bohrlochgeophysik-Verfahren vor: Temperatur-Log (TEMP-Log), Leitfähigkeits-Log (SAL-Log) sowie Flowmeter-Log (FLOW-Log). Die Messungen wurden von der Firma *German Geo Services (Niederlindach)* durchgeführt. Bedingt durch den artesischen Überlauf an den Bohrungen konnten die Messungen im Ruhezustand durchgeführt werden. Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit und Qualitätskontrolle der Messdaten wurden die Flowmetermessungen wiederholt gefahren.

Aus den Ergebnissen der Einzelmessungen, sowie durch Korrelation der Messungen werden Rückschlüsse auf Grundwasserzuflussbereiche in die Bohrungen gezogen (Kap. II.3.3.3, Anl. 14).

II.1.4 Tests zur Ermittlung der geohydraulischen Eigenschaften des Kluftgrundwasserleiters

Pumptests sowie kurze Pumpversuche in den Untersuchungsgebieten Sagenbachtal (Kap. II.2.3.4) und Reit im Winkl (Kap. II.3.3.2) ergeben Informationen über die geohydraulische Charakteristik des Hauptdolomits.

Bei der Durchführung und insbesondere bei der Auswertung von Pumpversuchen in Festgesteinsaquiferen sind im Vergleich zu Pumpversuchen in Lockergesteinen einige Besonderheiten zu beachten. Im Folgenden werden die wesentlichen Modelle vorgestellt, die als Ansatz zur Auswertung von Festgesteinspumpversuchen dienen.

II.1.4.1 Rahmenbedingungen bei Pumpversuchen im Festgestein

Um Auskunft über die Leit- und Speichereigenschaften eines Aquifers oder eines Brunnens zu erhalten, stellen Pump- und Injektionsversuche die am häufigsten verwendeten Methoden dar. Mit einem bekannten Signal (Wasserentnahmen, Wassereingaben) wird auf ein unbekanntes System (Aquifer) eingewirkt. Aus den Eingabesignalen und der Reaktion des Systems ist auf die geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Aquifers zu schließen. Die Interpretation der Messungen beruht dabei immer auf einer Modellvorstellung, die der Realität bzw. dem tatsächlichen Aquifer am nächsten kommt, d.h. der Aquifer der Modellvorstellung muss auf die entsprechenden Eingabesignale mit denselben charakteristischen Ausgabesignalen reagieren wie der tatsächliche Aquifer.

Es besteht die Möglichkeit, Pumpversuche stationär auszuwerten, d.h. es wird so lange mit konstanter Pumprate gefördert, bis sich eine Beharrung des Grundwasserspiegels einstellt (Dupuit 1863, Thiem 1906). Der Nachteil in der Anwendung dieser Methode bei Pumpversuchen in Kluftaquiferen besteht in der Erfordernis langer Pumpzeiten. Instationäre Pumpversuche sind durch das Fehlen eines Beharrungszustandes charakterisiert. Theis (1935) befasste sich als Erster mit der Auswertung unter instationären Bedingungen. Auf Basis der Theisschen Brunnenfunktion wurde eine Reihe von abgewandelten Modellen entwickelt, welche weitere bzw. zusätzliche Randbedingungen berücksichtigen.

Die Schwierigkeit bei der Durchführung von Pumpversuchen im Festgestein besteht zum Einen in der Wahl eines adäquaten Verfahrens zur Auswertung und zum Anderen, dass meist ein Messnetz mit Grundwassermessstellen fehlt. Dadurch ist es nicht möglich, die räumliche und zeitliche Ausbreitung des Absenktrichters im Aquifer zu beobachten. Die Wasserführung in Festgesteinsaquiferen ist zudem meist auf einzelne Kluft-, Störungs- und Verkarstungszonen beschränkt. Sind Grundwassermessstellen im Festgestein im Bereich des Pumpbrunnens vorhanden, besteht die Möglichkeit, dass die Messstellen unvollkommen an den oder die vom Brunnen durchteuften Aquifere angeschlossen sind. Dies kann dazu führen, dass die Messstellen mit zu geringen Absenkbeträgen reagieren und so zu hohe Transmissivitäten vorgetäuscht werden. Eine Auswertung der Pumpversuche ist somit meist auf die Daten am Pumpbrunnen selbst beschränkt. Jedoch besteht bei Pumpversuchen im Festgestein häufig die Schwierigkeit die Förderrate konstant zu halten (insbesondere bei hohen Absenkbeträgen), was jedoch für Aquifertests unabdingbar ist.

II.1.4.2 Modellvorstellungen zu den hydraulischen Verhältnissen in Kluftaquiferen

Das Homogenitätskriterium ist in Kluftaquiferen sehr viel seltener erfüllt als in Porenaquiferen, da die Orientierung und Geometrie der Klüfte in weiten Grenzen variiert, bzw. die Wasserführung an einzelne Horizonte oder Zonen gebunden ist. Um derartige Aquifere quantitativ auswerten zu können, stehen unterschiedliche Modelle zur Verfügung. Für die Auswertung ist ein Modell zu verwenden, dessen Rahmenbedingungen dem des zu charakterisierenden Aquifers entsprechen.

Folgende Modelle werden für die Pumpversuche im Explorationsgebiet Weißgraben berücksichtigt (Kap. II.1.4.2.1 bis II.1.4.2.4):

1. Statistisch zufällig und gleichmäßig verteilte Klüfte
2. Aquifer aus bevorzugten Leit- und Speicherschichten
3. Aquifer aus einer endlich dimensionierten Kluft
4. Aquifer aus einem Zwei-Porositäts-Medium

Für die Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit wurde das Modell für ein Zwei-Porositäts-Medium ausgewählt. Das Modell wird (Kap. II.1.4.2.4) im Gegensatz zu den übrigen Modellen ausführlicher erläutert.

II.1.4.2.1 Statistisch zufällig und gleichmäßig verteilte Klüfte

Der Modellvorstellung statistisch und gleichmäßig verteilter Klüfte ist ein repräsentatives Elementarvolumen (REV) zugrunde zu legen. Das REV beschreibt einen Quader, welcher sämtliche hydraulische Eigenschaften des Aquifers repräsentiert. STRAYLE (1983) zeigt am Beispiel von drei Aquifertypen die Größenordnung solcher REV auf (Abb. 6). Die größten REV treten bei Kluftaquiferen auf. Daraus resultiert, dass ein großräumiges Messstellennetz erforderlich ist, um über den gesamten Aquifer gemittelte Durchlässigkeiten und Speichereigenschaften zu erhalten. In diesem Modell erfolgt eine raumzeitliche Auswertung nach THEIS (1935).

Bei konkreter regionaler Betrachtung wird jedoch rasch die Gültigkeitsgrenze dieser Definition erreicht, falls geologische Grenzen vorliegen (HUBER 1992). Diese Modellvorstellung darf aufgrund des inhomogenen Aufbaus des Hauptdolomitaquifers (Verteilung der verschiedenen Kluftordnungen) nicht angewendet werden.

Ist das kleinräumige Fließsystem in einzelnen Klüften von Interesse, sind Kluftstatistiken oder Platten- bzw. Röhrenmodelle anzuwenden (STOBER 1986).

II.1.4.2.2 Aquifer aus bevorzugten Leit- und Speicherschichten

Der Aquifer aus bevorzugten Leit- und Speicherschichten ist gekennzeichnet durch schmale, stark Wasser führende Horizonte sowie mächtige Horizonte geringer Durchlässigkeit. Die hydraulisch bevorzugte Leitschicht weist fast die gesamte Durchlässigkeit auf, während die Speichereigenschaften auf ein Minimum reduziert sind. HANTUSH (1956, 1964, 1967) und BERKALOFF (1967) entwickelten Modelle für einen solchen Aquifer.

HANTUSH (1956) entwickelte eine analytische Lösung für ein Drei-Schicht-Modell, ausgehend von zwei Aquiferen und einer dazwischen liegenden semipermeablen Schicht. Dem unteren Aquifer wird Wasser entnommen, der obere ungespannte Aquifer wird davon nicht beeinflusst, während der

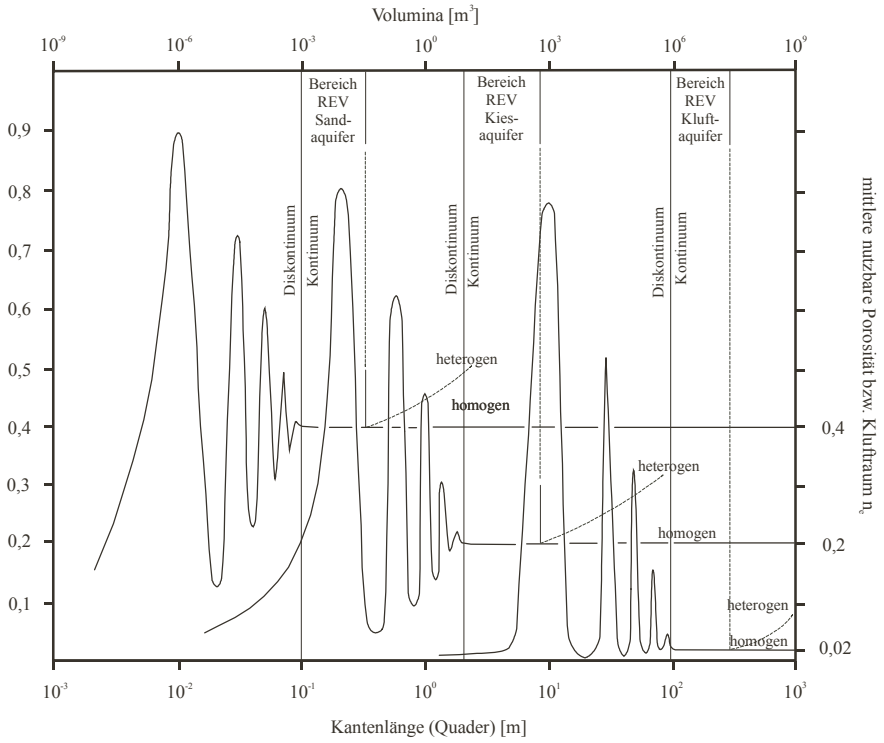


Abb. 6: Entwicklung des REV für verschiedene Aquifertypen (STRAYLE 1983)

semipermeable Horizont einen Leakage-Effekt zeigt; d.h., es erfolgt ein vertikaler Zustrom in den unteren Aquifer.

Für ein Zwei-Schicht-Modell gibt HANTUSH (1964) eine analytische Lösung, welche sich für mehrere Phasen des Absenkungsvorgangs anwenden lässt. Hangend zum artesischen Hauptaquifer befindet sich eine semipermeable Schicht mit Leakage-Effekt. Von BERKALOFF (1967) wird für diesen Fall eine Näherungslösung entwickelt, die von der Annahme ausgeht, dass das Speichervermögen des Hauptaquifers sowie das Leitvermögen der semipermeablen Schicht (Speicherschicht) vernachlässigbar gering ist. Daraus resultieren bei halblogarithmischem Auftragen der Absenkung zwei geradlinige Abschnitte. Innerhalb der zweiten Absenkphase ist dabei die Steigung der Geraden doppelt so hoch wie innerhalb der ersten Absenkphase. Beim Wiederanstieg sind umgekehrte Verhältnisse zu beobachten.

HANTUSH (1967) stellt darüber hinaus ein Modell vor, welches von einer Drei-Schicht-Situation ausgeht, in der unvollkommen ausgebaute Brunnen und/oder Messstellen berücksichtigt werden.

Die hydraulische Situation im Hauptdolomit, mit der charakteristischen Verteilung der Klüfte über den Gesamtaquifer, ist mit den hier vorgestellten Modellvorstellungen eines Zwei- bzw. Dreischichtmodells nicht vereinbar. Bei diesen Modellen blieben die Klüfte der 2. und 3. Ordnung unberücksichtigt.

II.1.4.2.3 Aquifer aus einer endlich dimensionierten Kluft

Basierend auf einer Vertikalkluft mit endlicher Leitfähigkeit entwickeln CINCO & SAMANIEGO (1977) ein komplexes Modell, welches in vier Teilmodelle gegliedert ist. Die Kluft befindet sich in einem unendlich ausgedehnten Aquifer, der Förderbrunnen liegt im Zentrum des Aquifers. In diesem

Modell werden Brunnenspeicherung und Skineffekt in Kluftnähe berücksichtigt. Bei Förderung aus dem Brunnen erfolgt der Zufluss aus der Kluft. Die Kluft durchdringt den gesamten gespannten Aquifer, im Bereich um die Kluft existiert eine definierte Zone verminderter Durchlässigkeit (Skin in Kluftnähe).

Das Modell wird von CINCO ET AL. (1976, 1978) vereinfacht, indem der Skinbereich sowie die Brunnenspeicherung unberücksichtigt bleiben. Aus diesem abgewandelten Modell lassen sich vier Fließperioden ableiten:

1. *Lineares Fließen in der Kluft:* Während des Förderbeginns stammt die gesamte Entnahmemenge (Druckentlastung) aus der Kluft. Das lineare Fließen ist beim doppellogarithmischen Abtrag der Absenkung durch eine Steigung von m = 0,5 charakterisiert.
2. *Bilineare Fließperiode:* Nach einer Übergangszeit kann sich eine bilineare Fließperiode einstellen. Diese setzt sich aus einem linearen, inkompressiblen Fließen in der Kluft und einem linearen, kompressiblen Fließen in der Formation zusammen. Der doppellogarithmische Abtrag ergibt eine Gerade mit der Steigung m = 0,25.
3. *Formationslineare Fließperiode:* Es kann sich nach einer Übergangszeit die formationslineare Fließperiode einstellen, welche eine doppellogarithmische Steigung von m = 0,5 aufweist.
4. Es kann sich nach langer Pumpzeit eine pseudoradiale Fließperiode einstellen, in diesem Fall hat die Kluft keinen Einfluss mehr auf den Absenkungsvorgang. Die Transmissivität kann anhand dieser Fließperiode bestimmt werden.

GINGARTEN & RAMEY (1974) entwickeln ein Modell für eine horizontale Kluft. Der Aquifer und der Brunnen sind dabei wie bei CINCO & SAMANIEGO (1976) charakterisiert. Eine horizontale Kluft schneidet den Brunnen zentral mit einer Erstreckung r_f und einer Weite w_f. Für Messstellen außerhalb der Horizontalkluft ist es unerheblich, ob die Kluft endlich oder unendlich leitfähig ist. Die Entnahme erfolgt über diese Horizontalkluft. Während der Absenkung lassen sich vier Fließperioden unterscheiden:

1. *Speicherperiode:* In der ersten Phase stammt das geförderte Wasser aus der radial symmetrischen Kluft. Werden die Messwerte doppellogarithmisch aufgetragen, resultiert eine Gerade mit der Steigung m = 1 (analog zur Brunnenspeicherung).
2. *Lineare vertikale Fließperiode:* Bei längerer Pumpversuchsdauer kommt es zu einem Zustrom aus der Formation in die Kluft. Es handelt sich um einen linearen vertikalen Zufluss, der bewirkt, dass die doppellogarithmisch abgetragene Absenkung der Steigung m = 0,5 folgt.
3. *Übergangsperiode*
4. *Radiale Fließperiode:* Zum Ende des Pumpversuchs setzt die radiale Fließperiode ein, der Einfluss der Horizontalkluft dominiert nicht weiter. Bei halblogarithmischem Abtrag folgen die Daten einer Geraden, aus deren Steigung die Transmissivität ermittelt werden kann.

Bei einem Vergleich der Charakteristika der Absenkungsvorgänge bei Vertikalkluft-Aquiferen und Horizontalkluft-Aquiferen zeigt sich, dass in beiden Fällen eine lineare Fließperiode (doppellogarithmisch Steigung m = 0,5) und nach längerer Förderzeit eine radiale Fließperiode auftritt. Der Unterschied zwischen diesen besteht darin, dass nur bei Horizontalklüften bei Förderbeginn eine

doppellogarithmische Geradensteigung von m = 1 vorhanden ist.

Auch in diesem Modell bleiben die besonderen Charakteristika des Hauptdolomits unberücksichtigt: die heterogene Verteilung lokal eng begrenzter wasserführender Klüfte, der Einfluss der Klüfte der 2. und 3. Ordnung auf die Charakteristik des Gesamtaquifers.

II.1.4.2.4 Aquifer aus einem Zwei-Porositäts-Medium

Von BARRENBLATT ET AL. (1960) wurde das Zwei-Porositäts-System in die Literatur eingeführt. Die Modellvorstellung des Zwei-Porositäts-Systems geht von der Annahme aus, dass der Aquifer aus zwei statistisch verteilten, porösen Bereichen besteht: der Kluft- und der Matrixporosität. Dabei ist die hydraulische Leitfähigkeit der Klüfte größer als die der Matrix. Der Matrixaquifer übt einen Leakage-Effekt auf den Kluftaquifer aus. BARRENBLATT ET AL. (1960) betrachtet die Druckverteilung innerhalb der Klüfte und der Matrix separat. WARREN & ROOT (1963) entwickelten darüber hinaus eine vollständige Lösung für den in einem Brunnen (mit unendlich kleinem Radius) gemessenen Druck (Absenkung). Es wird gezeigt, dass die Druckverhältnisse bei der Entnahme in einem Zwei-Porositäts-System von zwei Parametern abhängig sind. Zum einen von dem Koeffizienten λ, welcher charakterisiert, wie leicht die Flüssigkeit von der Matrix in die Klüfte gelangt und zum anderen von ω, der das Verhältnis des Kluftspeichervermögens zum Speichervermögen des Gesamtsystems darstellt. Wird der Absenkungsvorgang halblogarithmisch aufgetragen, zeigt die Näherungslösungen des Modells von WARREN & ROOT (1963) parallele Geraden, die durch eine Horizontale miteinander verbunden sind. Dieses charakteristische Bild für ein Zwei-Porositäts-Medium erklärt sich folgendermaßen:

Während der ersten Pumpphase wird ausschließlich Wasser aus den Klüften entnommen (erste halblogarithmische Gerade); in der zweiten Pumpphase (Horizontale) wird der Zufluss aus der Matrix aktiviert, sodass die Absenkung stagniert; in der dritten Pumpphase (zweite halblogarithmische Gerade) setzt das radiale Fließen des Gesamtsystems ein. Die Matrix ist quasi leer gepumpt, das Leitvermögen der Klüfte dominiert erneut (Abb. 7).

Aus der ersten Gerade kann der Speicherkoeffizient S_f sowie aus den Steigungen beider Geraden die Transmissivität T_f des Kluftsystems ermittelt werden.

Die analytische Lösung von WARREN & ROOT (1963) lässt sich durch Transformationen nach KAZEMI (1969) und BOULTON & STRELTSOWA (1977) in den Lösungsweg für Speicher- und Leitschichten überführen. In Abb. 8 sind die drei erwähnten Zwei-Porositäts-Modelle schematisch dargestellt. Abb. 7 zeigt den idealen Absenkungsverlauf der Modelle.

Das Verhältnis ω (Kluftspeichervermögen zu Gesamtspeichervermögen) wird dabei durch den horizontalen Abstand beider Geraden bestimmt:

$$\omega = t_2 / t_1 = S_f / S_{m+f}$$

(t_1 und t_2 stellen die Zeitpunkte dar, welche durch Extrapolation der ersten und der zweiten Gerade bis zur Absenkung s = 0 zu ermitteln sind.)

Das Fließverhalten von der Matrix in die Klüfte, welches durch den Parameter λ definiert ist, kann über das Ende der ersten und den Beginn der zweiten Gerade ermittelt werden (MAVOR & CINCO 1979):

über das Ende der ersten Gerade:

$$t = (\omega * (1 - \omega) * r_w^2 * S_{m+f}) / (3{,}6 * \lambda * T_f) \quad [s]$$

über den Beginn der zweiten Gerade:

$$t = 0{,}77 * ((1 - \omega) * r_w^2 * S_{m+f}) / (\lambda * T_f) \quad [s]$$

WARREN & ROOT (1963) entwickelten ein abweichendes Verfahren zur Bestimmung von λ:

$$\lambda = \alpha * r_w^2 * (T_m / T_f)$$

Der hier eingehende Parameter α [m^{-2}] charakterisiert das geklüftete poröse Medium (abhängig

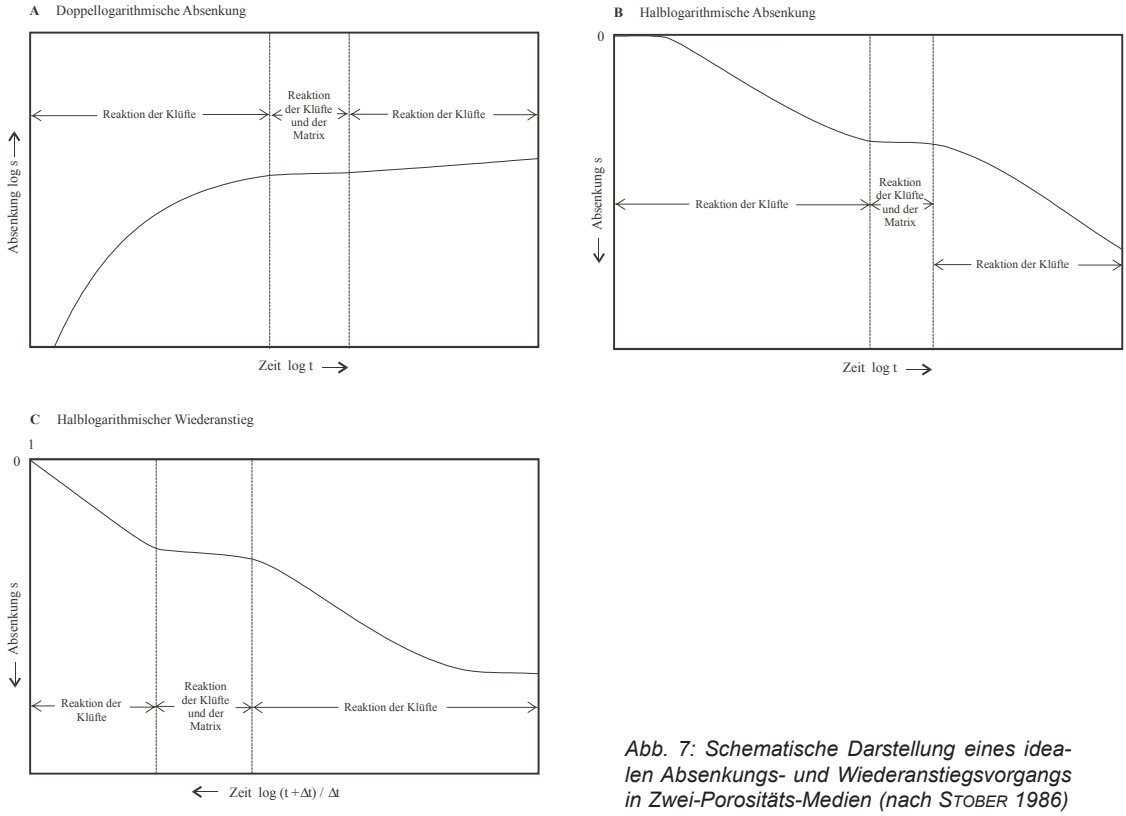


Abb. 7: Schematische Darstellung eines idealen Absenkungs- und Wiederanstiegsvorgangs in Zwei-Porositäts-Medien (nach STOBER 1986)

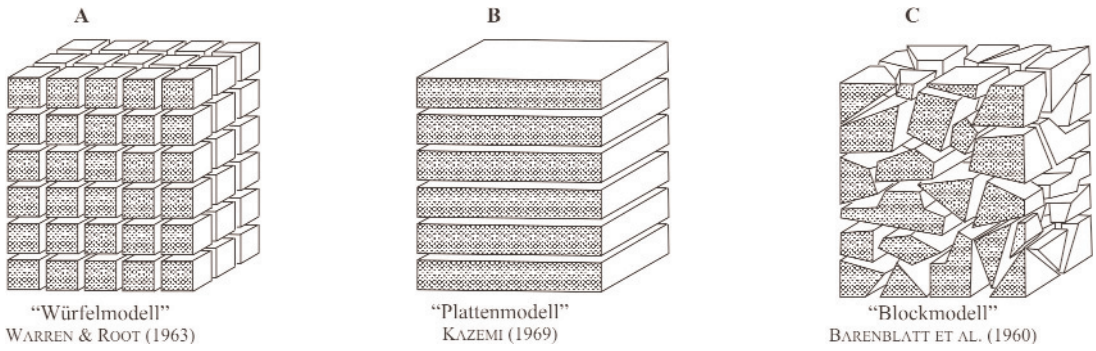


Abb. 8: Schema der gebräuchlichsten Zwei-Porositäts-Modelle (nach STRAYLE et al. 1994)

von der Größe und Form der Matrixblöcke).

Es ist möglich, dass sich innerhalb eines Zwei-Porositäts-Systems lediglich die erste oder die zweite Gerade entwickelt. In einem solchen Fall liegen folgende Verhältnisse vor:

- $\lambda >/= 10^{-4}$, gleich nach Pumpbeginn setzt die Reaktion der Matrix ein, da die Transmissivität sehr groß ist. Die Folge ist, dass sich die erste halblogarithmische Gerade nicht einstellt.
- $\lambda </= 10^{-7}$, die Transmissivität der Matrix ist so gering, dass sich die zweite halblogarithmische Gerade nicht einstellt.

MAVOR & CINCO (1979) beschrieben den Einfluss der Brunnendimension sowie des Skins auf den Absenkvorgang in einem Zwei-Porositäts-System analytisch, die Typkurven erwiesen sich für die Auswertung von Pumpversuchen als unpraktikabel. BOURDET & GRINGARTEN (1980) entwickelten jedoch auf dieser Grundlage anwendbare Typkurven.

MOENCH (1984) geht in seinem Modell von einem Kluftgrundwasserleiter aus, der durch die unterschiedliche Geometrie der Blöcke und Klüfte charakterisiert ist. Dabei kann ein Skineffekt sowohl an den Klüften und als auch an dem Brunnen auftreten. An der Oberfläche der Blöcke wird eine dünne Schicht aus schwer durchlässigem Material angenommen, die den freien Austausch zwischen Block und Kluft verhindert. Dieses wird als Kluftskin bezeichnet (Abb. 9).

Das von MOENCH (1984) entwickelte Modell lässt sich in zwei Varianten gliedern. In der ersten Variante wird von plattenförmigen, in der zweiten Variante von kugelförmigen Blöcken ausgegangen. Zwischen den Blöcken verlaufen die Klüfte (Abb. 10).

Die dimensionslose Absenkung im Entnahmebrunnen wird nach folgender Lösung berechnet (MOENCH 1984):

$$h_{wD} = 2[K_0(x) + xS_wK_1(x)] / p\{pW_D[K_0(x) + xS_wK_1(x)] + xK_1(x)\}$$

Für einen Beobachtungspegel gilt für die dimensionslose Absenkung:

$$h_D = 2K_0(r_Dx) / p\{pW_D[K_0(x) + xS_wK_1(x)] + xK_1(x)\}$$

wobei

$$x = (p + q_D)^{1/2}$$

Der dimensionslose Quellterm für plattenförmige Blöcke (slab-shaped blocks) lautet:

$$q_D = \gamma^2 m \tanh(m)$$

während für kugelförmige Blöcke (sphere-shaped blocks) gilt:

$$q_D = 3\gamma^2[\coth(m) - 1]$$

Dabei gelten für die dimensionslose Absenkung und die Quellterme folgende dimensionslose Reservoir-Parameter:

$$\gamma = (r_w / b')(K' / K)^{1/2}$$

$$m = (\sigma p)^{1/2} / \gamma$$

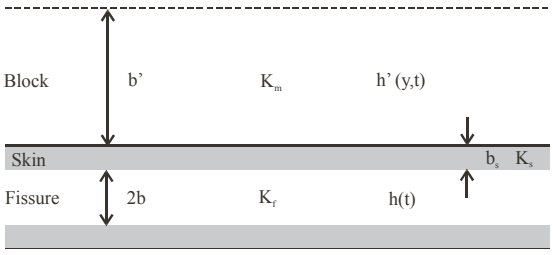
$$\sigma = S_s' / S_s$$

$$S_F = K'b_s / K_sb'$$

sowie der dimensionslose Brunnenspeicherungsfaktor:

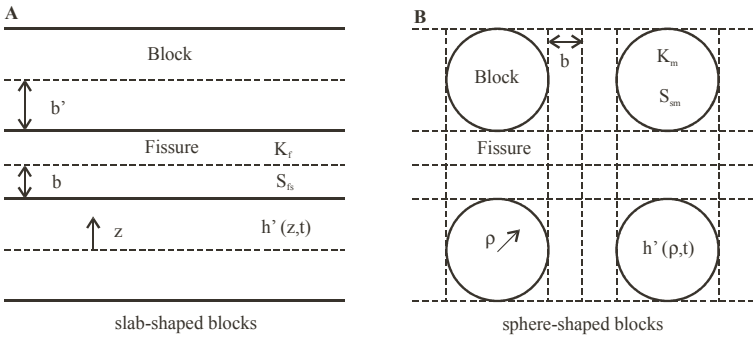
$$W_D = C / 2\pi r_w^2 S_s H \quad mit \quad C = \pi r_c^2$$

$2b$	*average aperture of fissures*
$2b'$	*average thickness or diameter of blocks*
b_s	*average thickness of fracture skin*
C	*well bore storage coefficient*
H	*reservoir thickness*
h	*hydraulic head in fissure*
h'	*hydraulic head in block*
K_0	*modified Bessel function of the second kind and order unity*
K_1	*modified Bessel function of the second kind and order unity*
K	*hydraulic conductivity of the fissure system*
K'	*hydraulic conductivity of the block system*
K_f	*hydraulic conductivity of an average fissure*
K_m	*hydraulic conductivity of an average block*
K_s	*hydraulic conductivity of fracture skin*
p	*Laplace transform variable*
q	*source term for transient block-to-fissure flow*
r	*radial distance measured from center of pumped well*
r_c	*internal radius of pumped well casing*
r_w	*effective radius of pumped well*
S_s,	*specific storage of the fissure system*
S_s	*specific storage of the block system*
S_{sf}	*specific storage of an average fissure*
S_{sm}	*specific storage of an average block*
S_w	*dimensionless well bore skin*
S_F	*dimensionless fracture skin*
t	*time since start pumping*
W_D	*dimensionless well bore storage*
y	*generalized block coordinate*
z	*distance measured from center of a slab-shaped block to fissure*
p	*distance measured from center of a sphere-shaped block to fissure*
D	*(as a subscript) dimensionless parameter*



$2b$	*average aperture of fissures*
$2b'$	*average thickness or diameter of blocks*
h	*hydraulic head in fissure*
h'	*hydraulic head in block*
K_f	*hydraulic conductivity of an average fissure*
K_m	*hydraulic conductivity of an average block*
t	*time since start pumping*
y	*generalized block coordinate*

Abb. 9: Schematische Darstellung eines Block-Kluft-Systems mit Kluftskin (nach MOENCH 1984)



2b	*average aperture of fissures*
2b'	*average thickness or diameter of blocks*
h'	*hydraulic head in block*
K_f	*hydraulic conductivity of an average fissure*
K_m	*hydraulic conductivity of an average block*
S_{fs}	*specific storage of an average fissure*
S_{sm}	*specific stprage of an average block*
t	*time since start of pumping*
z	*distance measured from center of a slab-shaped block to the fissure*
ρ	*distance measured from center of a sphere-shaped block to fissure*

Abb. 10: Geometrische Konfiguration des (A) plattenförmigen (slab-shaped) und des (B) kugelförmigen (sphere-shaped) Blocksystems (nach MOENCH 1984)

II.1.4.3 Modellauswahl zur Auswertung der durchgeführten Pumpversuche

Die Reaktion des Hauptdolomit-Kluftkörpers bei den durchgeführten Pumpversuchen (Kap. II.3.3.2), sowie dessen struktureller Aufbau lässt sich mit dem Modell für ein Zwei-Porositäts-Medium nach MÖNCH (1984) korrelieren. Die Klüfte der 1. und 2. Ordnung entsprechen der Kluftporosität, die Feinklüftung (Klüfte der 3. Ordnung) der Matrixporosität. Die für das Zwei-Porositäts-Modell typischen Absenkverläufe konnten während der Kurz-Pumpversuche im Ansatz nachgewiesen werden. Eine weiterführende Korrelation der tatsächlichen Absenkverläufe mit den Modellkurven ist jedoch erst nach Durchführung eines Langzeit-Aquifertests möglich.

Die Auswertung nach MOENCH (1984) für Zwei-Porositäts-Medien bzw. Kluftgrundwasserleiter ist in die Programme *Geologik Hydro Tec 2002* und *Geologik Hydro Tec 5.0* integriert, die zur Auswertung der Pumpversuche herangezogen wurden.

II.2 Exploration im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth

II.2.1 Lage des Explorationsgebietes Sagenbachtal

Das Explorationsgebiet Sagenbachtal ist im Gemeindegebiet Kreuth (Abb. 3) bei Wildbad Kreuth gelegen (Landkreis Miesbach, Bayern). Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf der topographischen Karte 1:25.000 TK 8336/8436 Rottach-Egern.

Das den W' Teil des Sagenbachtales (Langenau) umfassende Explorationsgebiet ist von der Bundesstraße B 307 über die Forststraße in die Langenau in Höhe von Wildbad Kreuth zu erreichen (Anl. 2.2).

Der Sagenbach entwässert in die Weißach, welche dem Tegernsee zufließt. Im Mündungsbereich des Sagenbaches in die Weißach ist ein Abfluss-Pegel installiert, der vom Wasserwirtschaftsamt Rosenheim (WWA Rosenheim) betreut wird.

S' des Sagenbaches befindet sich am Talausgang eine im Abbau befindliche Kiesgrube (Firma Buchner), während N' der Kiesgrube sowie des Sagenbaches eine offen gelassene Kiesgrube liegt, die heute als Parkplatz "Alte Kiesgrube" genutzt wird. Im E' Verlauf des Sagenbachtales bzw. des Untersuchungsgebietes liegt die bewirtschaftete Schwaiger-Alm (Anl. 2.2).

Das morphologisch abgegrenzte, vollständig im Hauptdolomit gelegene Einzugsgebiet EZG_o erstreckt sich über das gesamte Sagenbachtal (Anl. 2.2).

II.2.2 Untersuchungsprogramm im Explorationsgebiet Sagenbachtal

Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorerkundungsmaßnahmen (Kap. I.3) wurde im Hinblick auf eine mögliche Trinkwassererschließung aus dem Hauptdolomit für das Explorationsgebiet Sagenbachtal ein konkretes Untersuchungsprogramm entwickelt und durchgeführt.

Das Untersuchungsprogramm umfasst die im Folgenden genannten Maßnahmen. Die Ergebnisse der Explorationsmaßnahmen werden in Kap. II.2.3 erläutert:

1. Gleichstrom-Geoelektrische-Sondierungen
2. Detaillierte stereoskopische Luftbildauswertung in Kombination mit strukturgeologischen Gefügemessungen
3. Lockergesteinsbohrungen (GwM 1, GwM 2), Festgesteinsbohrungen (GwM 3, GwM 4)
4. Pumpversuche
5. Klassifizierung der Grundwassercharakteristik
6. Klimamodellierung sowie hydrologische Bilanzierung des Einzugsgebietes

II.2.3 Ergebnisse der Explorationsmaßnahmen im Unterschungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth

II.2.3.1 Gleichstrom-Geoelektrische-Sondierungen

Zur Erkundung der Schottermächtigkeit und -verteilung im Explorationsgebiet bzw. potenziellen Bohrbereich wurden Gleichstrom-Geoelektrische-Sondierungen durchgeführt. In den Auswertungen kann für nahezu sämtliche Messpunkte das Festgestein bzw. die Hauptdolomit-Oberkante (hd-OK) unter der Schotterbedeckung sicher lokalisiert werden.

Im Zuge der Messungen zeigen sich i.d.R. Sprünge des scheinbaren spezifischen Widerstandes von 50-600 Ωm im Schotter zu > 1000 Ωm im Hauptdolomit. Dem hochohmigen Festgestein geht im Allgemeinen eine verhältnismäßig niedrigohmige Schicht voran, wodurch die Locker-/Festgesteinsgrenze sicher identifiziert werden kann. In Anlage 13.2 sind die gemessenen Punkte mit den erkundeten Schottermächtigkeiten dargestellt, die detaillierten Ergebnisse der Rohdatenauswertung sind in Anlage 13.1 tabellarisch aufgeführt.

Aus den Messergebnisse resultieren 3 Profilschnitte (Abb. 11, Anl. 5) durch das Explorationsgebiet. Darüber hinaus wird basierend auf dem DGM die räumliche Verteilung der Schottemächtigkeit bzw. das Hauptdolomitrelief im Untergrund interpoliert.

Der Auswertung der Gleichstrom-Geoelektrischen Sondierungen zufolge ist das Sagenbachtal im Messbereich in einen durch die Schwaigeralm-Schwelle getrennten E' und einen W' Teil zu gliedern (Abb. 11). Der Verlauf der Schwaigeralm-Schwelle lässt sich auf Höhe des Schwaigeralm-Wirtshauses unter einer Schotterbedeckung von ca. 1,00 - 7,00 m verfolgen (Anl. 13.2), sie weist eine E-W Erstreckung von ca. 170 m auf. Im S schließt sie an den Hohlenstein-Sattel, im N an die Wallberg-Setzberg-Mulde an. Der Sagenbach bzw. das Grundwasser im Lockergestein muss diese Schwelle überwinden. Quellaustritte im Bereich des Sagenbach-Wasserfalles (am Fußweg vom Parkplatz "Alte Kiesgrube" zum Schwaigeralm-Wirtshaus), dokumentieren, dass ein Teil des Grundwassers die Schwelle durch Klüfte im Hauptdolomit passiert.

Die Schottermächtigkeit nimmt E' der Schwaigeralm-Schwelle weniger stark zu als in Richtung W. Die größte Schottermächtigkeit E' der Schwaigeralm-Schwelle liegt im Bereich der GwM 4 vor (25,00 bis 30,00 m), in Richtung GwM 3 (10,00 bis 17,00 m) nimmt sie wieder ab (Abb. 11). W' der

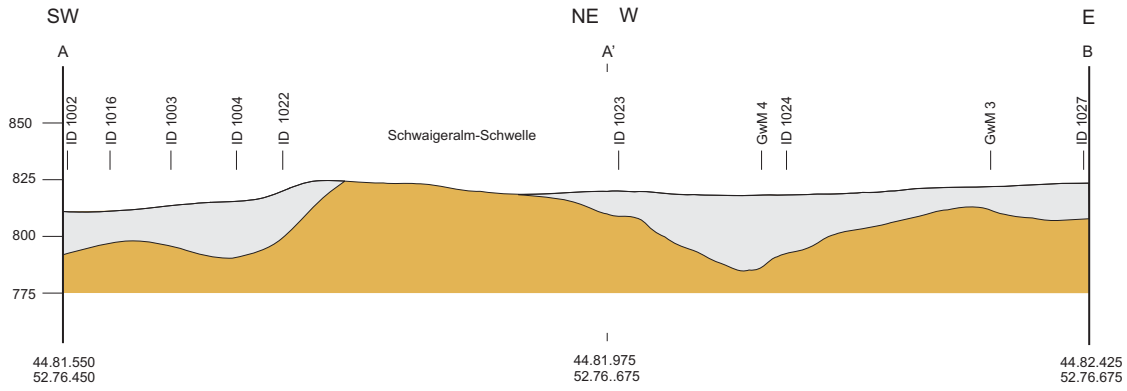


Abb. 11: E-W Profil, Schottermächtigkeit im Sagenbachtal; erstellt auf Grundlage der Auswertung der Gleichstrom-Geoelektrischen Sondierungen sowie des DGM (Profillinie s. Anl. 13.2, weitere Profile zur Schottermächtigkeit Anl. 5)

Schwaigeralm-Schwelle tieft der Hauptdolomit zunächst sehr stark ein (ID 1004 35,50 m, Abb. 11, Anl. 13.2), W' anschließend, im Bereich des Parkplatzes "Alte Kiesgrube", wird die Mächtigkeit des Schotters wieder geringer (10,00 - 20,00 m). Zum Weißachtal hin ist ein erneutes Abfallen der hd-OK zu verzeichnen (Schottermächtigkeit > 30 m). Zwei N-S Profile (Anl. 5) stellen die Schottermächtigkeit W' der Schwaigeralm-Schwelle dar.

II.2.3.2 Stereoskopische Luftbildauswertung und tektonische Rahmenbedingungen

Das Explorationsgebiet lässt sich durch stereoskopische Luftbildauswertung unter Einbeziehung von Geländebefunden in verschiedene geomorphologische Komplexe gliedern, die durch tektonische, sedimentäre oder erosiv-tektonische Prozesse entstanden. Die Grenzverläufe der jeweiligen Einheiten wurden im Luftbild festgelegt (Abb. 12).

In Abbildung 12 werden als Großeinheiten die S-Flanke der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde und der Hohlenstein-Komplex abgegrenzt. Im SW der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde ist durch deutliche Lineamente der Schwaigeralm-Kopf abgetrennt, der als tektonisch isoliert von der Großstruktur Wallberg-Setzberg-Doppelmulde gelten kann.

Des Weiteren lassen sich die Schuttfächer der Bergflanken gegen die Sagenbach-Schotter abgrenzen. Der geophysikalisch nachgewiesene Hauptdolomit-Riegel (Schwaigeralm-Schwelle) tritt lediglich teilweise morphologisch hervor.

Das Sagenbachtal wird im N von der großen Muldenstruktur der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde

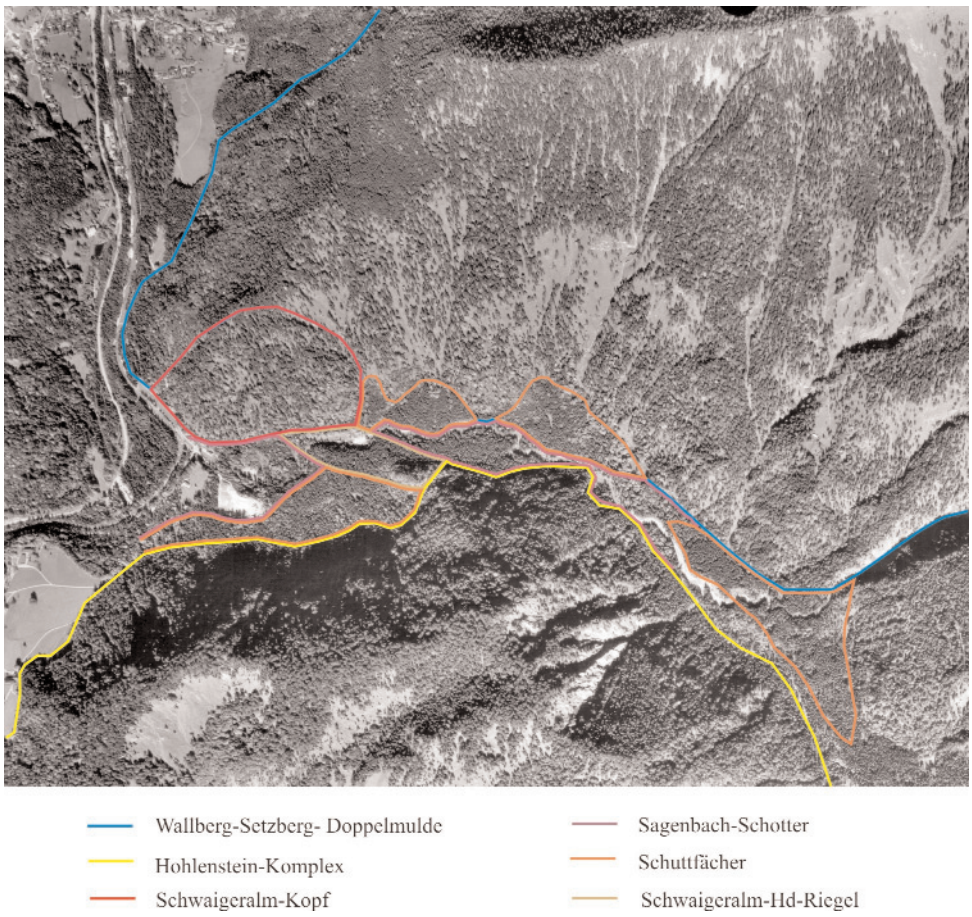


Abb. 12: Morphologische Gliederung des Explorationsgebietes Sagenbachtal

und im S durch den Hohlenstein-Sattel begrenzt. Basierend auf der Auswertung der Geologischen Karte 8336/8436 Rottach-Egern, befindet sich im zentralen Teil des Sagenbachtales eine Muldenstruktur, welche genetisch die Fortsetzung des S' anschließenden Hohlenstein-Sattels darstellt. N' dieser Muldenstruktur folgt das steile N' Abtauchen der Hauptdolomit-Schichten der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde. Diese beiden Strukturen werden nicht explizit mit einer Störung, sondern durch eine Muldenstruktur, deren Muldenachse dem Talverlauf folgt (Schwaigeralm-Mulde), getrennt. Diese Verhältnisse können durch die im Rahmen der Arbeit erhobenen Geländedaten jedoch nicht bestätigt werden. Es ergeben sich keine Hinweise auf ein Umbiegen der Schichten in eine Muldenstruktur. Gefügemessungen an der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde und dem Hohlenstein-Sattel ergeben, dass die generell nach N einfallenden Schichten (zwischen 340° und 20°) unterschiedliche Fallwinkel aufweisen. Die Fallwinkel liegen an der S-Flanke der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde zwischen 60° und 80°, während sich die Werte an der N-Flanke des Hohlensteinsattels zwischen 50° und 65° bewegen.

Im Bereich der Schwaigeralm-Schwelle ist Hauptdolomit aufgeschlossen, der nach N einfallende Schichten mit deutlichen E-W streichenden Klüften zeigt, die das Streichen des Sagenbachtales nachzeichnen.

Die Geländebefunde belegen, dass der Verlauf des Sagenbachtales nicht die Achse der Schwaigeralm-Mulde nachzeichnet. sondern in diesem Bereich ein Störungselement vorliegt, welches den Komplex der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde vom Hohlenstein-Komplex trennt (Abb. 13).

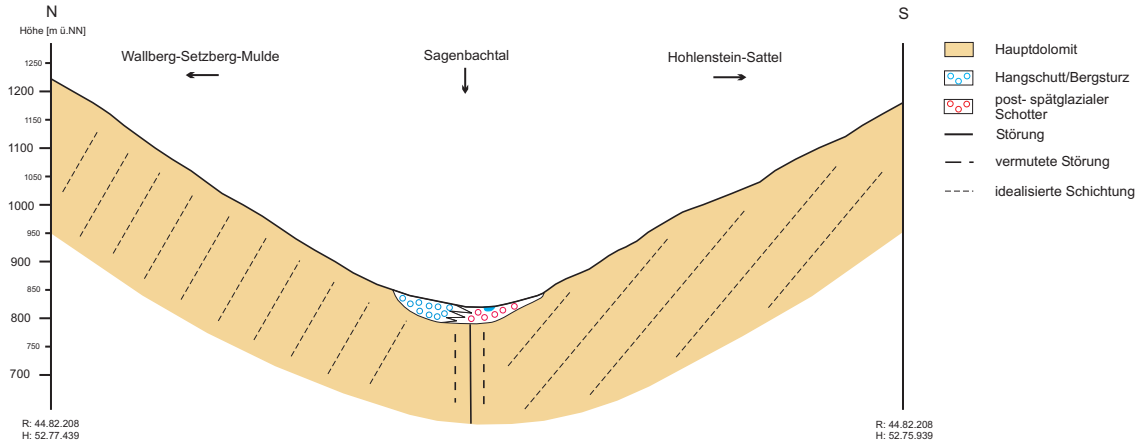


Abb. 13: N-S Profil durch das Sagenbachtal

II.2.3.3 Bohrungen und Bohrlochradar-Messungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal

Im Explorationsgebiet Sagenbachtal wurden im Zeitraum von Oktober 2002 bis Januar 2003 fünf Bohrungen abgeteuft. Lage und Charakteristika der Bohrungen sind Tabelle 6 zu entnehmen. Die Bohrpunkte sind in Anlage 2.2 dargestellt. Die Festgesteinsbohrungen dienen der Erkundung von Trinkwasser im Hauptdolomit. Die Lockergesteinsbohrungen am Ausgang des Sagenbachtales erbringen Informationen über die hydraulischen Eigenschaften des Schotterkörpers.

Mittels Bohrlochradar-Messungen in den Festgesteinsbohrungen sollen aufgelockerte Bereiche im Hauptdolomit lokalisiert werden.

Bohrung	Gauß-Krüger-Koordinaten		Höhe	Endteufe	Art der Bohrung
	[R-Wert]	[H-Wert]	[m ü.NN]	[m u.GOK]	
GwM 1	44.81.434	52.76.546	795,75	22,50	Lockergesteinsbohrung
GwM 2	44.81.498	52.76.527	797,20	15,00	Lockergesteinsbohrung
GwM 2alt	44.81.570	52.76.529	798,11	16,00	Lockergesteinsbohrung
GwM 3	44.82.324	52.76.725	823,92	150,00	Festgesteinsbohrung
GwM 4	44.82.111	52.76.725	822,54	200,00	Festgesteinsbohrung

Tab. 6: Bohrungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal

II.2.3.3.1 Lockergesteinsbohrungen GwM 1, GwM 2, GwM 2alt

Die Lockergesteinsbohrungen wurden am Ausgang des Sagenbachtales in der Nähe des Abflusspegels Sagenbach abgeteuft und sollten den Grundwasserkörper im Schotter erreichen. Die Endteufe wurde durch den anstehenden Hauptdolomit markiert. Die Bohrprofile und Ausbaupläne sind in Anlage 7.1, 7.2 und 7.3 dokumentiert.

In den Bohrungen GwM 1, GwM 2 und GwM 2alt liegen homogene Schotter vor, größtenteils scharfkantige, nicht gerundete Hauptdolomitschotter. Die Schotter sind makroskopisch mit dem Schotter aus der *Kiesgrube Buchner* (Anl. 2.2) vergleichbar. Gerundeter Kies ist in den Bohrungen nur untergeordnet zu beobachten. Vor Erreichen des anstehenden Hauptdolomits treten z.T. gerundete bis gut gerundetete Hauptdolomitblöcke mit Durchmessern von bis zu 30 cm auf.

Während der Bohrungen wurden im Abstand von jeweils 10 m Eimerproben genommen sowie im Meterabstand Schachtelproben. Die Eimerproben aus der GwM 1 wurden mittels Siebanalysen weitergehend untersucht und nach verschiednen Verfahren analysiert (Hazen 1893, Beyer 1964, Nahrgang (in DVGW 1983), Bialas et. al 1970, Pekdeger & Schulz 1975). Im Bereich der GwM 1 handelt es sich um einen Feinkies, der einen mittleren Korndurchmesser von 5,2 mm sowie eine Gesamtporosität n von 10,2 % bzw. 11,6 % zeigt. Die Siebkurven und Gewichtsprozente der Kornfraktionen sowie die ermittelten k_f-Werte sind in Anlage 9 dargestellt. Der k_f-Wert beträgt durchscnittlich 2,5 x 10^{-3} m/s.

Die GwM 2alt wurde nach Abschluss der Untersuchungen verfüllt, die GwM 1 und GwM 2 als Grundwassermessstellen ausgebaut.

II.2.3.3.2 Festgesteinsbohrungen GwM 3, GwM 4

Die Festgesteinsbohrungen GwM 3 und GwM 4 liegen E' der Schwaigeralm im Sagenbachtal (Anl. 2.2). Bei der Positionierung der Bohrpunkte war die im Zuge eines zukünftigen Wasserrechtrechtsverfahrens mögliche Schutzgebietsausweisung zu berücksichtigen. Daher wurde die Lage der Bohrpunkte so gewählt, dass das Einzugsgebiet die Kiesgrube Buchner und die Schwaigeralm nicht einschließt.

Die Bohrung GwM 3 erreicht eine Endteufe von 150,00 m u.GOK, die Bohrung GwM 4 von 200,00 m u.GOK (Tab. 6). Die Bohrungen stehen im Festgestein frei im Hauptdolomit. Die Bohrprofile sowie die Ausbaupläne sind in Anlage 7.4 und 7.5 dargestellt.

Die durchteufte Schottermächtigkeit (reiner Hauptdolomitschotter) beträgt an der GwM 3 9,50 m und an der GwM 4 36,00 m. Während der Bohrungen wurden im Abstand von jeweils 10 m

Eimerproben genommen sowie im Meterabstand Schachtelproben. Siebanalysen (GwM 4) ergeben einen mittleren Korndurchmesser von 6,3 bis 12,0 mm (Mittelkies). Die Gesamtporosität bewegt sich zwischen 11,5 % und 15,5 % (Anl. 9). In Anlage 9 sind die ermittelten kf-Werte nach verschiedenen Berechnungsmethoden dargestellt (HAZEN 1893, BEYER 1964, NAHRGANG (in DVGW 1983), BIALAS ET. AL 1970, PEKDEGER & SCHULZ 1975). Der durchschnittliche k_f-Wert beträgt 2,9 x 10^{-2} m/s.

Während der Bohrung im Festgestein wurden im Abstand von 1 m Schachtelproben des ausgetragenen Bohrkleins gesichert. Kernproben wurden in der GwM 3 von 148,00 - 150,00 m u.GOK und in der GwM 4 von 99,00 - 101,00, 149,00 -151,00 und 198,00 - 200,00 m u.GOK gewonnen. Der Hauptdolomit erweist sich als fest und kompakt.

Im Gegensatz zu den ursprünglichen Erwartungen zeigt die Untersuchung der Bohrkerne lediglich Feinstklüftung, die keinen ausreichenden Grundwasserzufluss ermöglicht. Die Auswertung der Bohrkerne zeigt darüber hinaus, dass die Hauptdolomit-Schichten in den entsprechenden Teufen nahezu saiger stehen. Bei diesen Verhältnisen wird somit über weite Strecken in ein und derselben Schicht gebohrt, wodurch die Wahrscheinlichkeit, Kluftzonen zu durchteufen, sehr gering ist. Eine derart steile Lagerung des Hauptdolomits war nach Interpretation der Geländebefunde und tektonische Analysen nicht zu erwarten.

Die Bohrungen GwM 3 und GwM 4 wurden nach Abschluss der Untersuchungen verfüllt.

II.2.3.3.3 Bohrlochradar-Messungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal

Zur Erkundung eventuell vorhandener Klüfte im Umfeld der Bohrungen GwM 3 und GwM 4 wurde das Bohrlochradar-Verfahren (Kap. II.1.3.3) angewandt.

Basierend auf der ausgearbeiteten Erkundungskonzeption sollen durch omnidirektionale Bohrloch-Radar-Reflexionsmessungen Einzelklüfte bzw. Kluftscharen, die Teufenlage und Erstreckung, der Abstand zum Bohrloch sowie das Einfallen erfasst werden. Weiter ermöglichen die Reflexionsmessungen qualitativ-quantitative Aussagen über Kluftöffnungsweiten. Mit Hilfe von Crosshole- und tomographische Messungen können eventuell vorhandene großräumige Kluftscharen zwischen den Bohrungen GwM 3 und GwM 4 visualisiert weden. Der geophysikalische Nachweis einer Einzelkluft ist bei dieser Methode jedoch nicht möglich. Die Auflösung solcher anomaler Zonen hängt im Wesentlichen vom Abstand der beiden Bohrungen ab. Im Verlauf der Messungen zeigte sich, dass der Abstand der Festgesteinsbohrungen mit ca. 215 m zu groß war. Entgegen den ursprünglich prognostizierten Werten ergab die erste Vor-Ort-Auswertung eine Eindringtiefe von wenigen Deka-Metern. Darauf hin wurden die Crosshole- bzw. tomographische Messung im Exsplorationsgebiet nicht durchgeführt.

Die Ursache der geringen Eindringtiefe sowie geringen Auflösung ist darauf zurückzuführen, dass offene, wassergefüllte Klüfte sowie dolomitisch verheilte Klüfte infolge identischer Vorzeichen in Bezug auf den Kontrast der dielektrischen Eigenschaften keinen Phasensprung im Reflexionssignal verursachen. Die Ursache ist in dem in situ anstehenden Wasser zu sehen, welches mit einer mittleren elektrischen Leitfähigkeit von ca. 300 mS/cm zu einem gewissen Grad mineralisiert und damit leitfähig ist. Eine luftgefüllte, offene Kluft würde sich im Phasenverhalten infolge des inversen Dielektrizitätskontrastes von einer wassergefüllten Kluft abgrenzen lassen.

Ebenso wirken sich die großkaliberigen Bohrlöcher (in Verbindung mit dem mineralisierten Wasser) negativ auf die Messungen aus. Ein kleineres Sonden-/Bohrlochverhältnis hätte zu genaueren Ergebnissen führen können.

Beide Bohrungen wurden mit Reflexionsmessungen im Frequenzbereich von 22 MHz, 60 MHz und

100 MHz untersucht. Mit der Untersuchung im Frequenzbereich von 22 MHz sollte die physikalisch größtmögliche Eindringtiefe um die Bohrungen realisiert werden. Die ergänzende Vermessung der beiden Bohrungen mit den Frequenzen 60 MHz und 100 MHz diente dem Zweck, nach entsprechender Signalverarbeitung, Informationen zum Zustand und evtl. zur Öffnungsweite der geophysikalisch nachgewiesenen Reflexionsstrukturen, welche auf Klüfte oder Kluftscharen hindeuten, zu gewinnen. Zur Bestimmung der korrekten Lage und des Verlaufes der ausgegliederten Reflektoren wurden in beiden Bohrungen Multishotmessungen (Anl. 13.4) durchgeführt.

In der Anlage 13.5 sind die Ergebnisse in Form endbearbeiteter Radargramme (60 MHz Messung) sowie ausgegliedeter Reflektoren (kumulative Auswertung aller Messfrequenzen) dargestellt. Die Teufenskala basiert auf der Geschwindigkeit der sich im Gestein ausbreitenden Radarwellen. Die Geschwindigkeit wurde durch laborative Bestimmung der elektrischen Eigenschaften an zwei Kernproben der GwM 4 bestimmt. Die Untersuchungen wurden an der *TU Clausthal-Zellerfeld (Institut für Geophysik*) durchgeführt (Anl. 13.3).

Für die aus dem Radargramm ausgegliederten Reflektoren (Anl. 13.5) wird die Entfernung der Reflexionsstrukturen zur Bohrlochachse in Abhängigkeit von der Bohrlochteufe bestimmt. Bei linear angenommenen Reflexionsstrukturen kann der Einfallwinkel gegenüber dem Bohrloch sowie der theoretische Schnittpunkt mit der Bohrlochachse ermittelt werden (Bezugspunkt für den Einfallwinkel stellt die Horizontale mit 0° dar) (Anl. 13.5). Die Daten zeigen, dass es sich bei den ausgegliederten Reflexionen überwiegend um steil stehende Elemente handelt. Aus den Radargrammen (Anl. 13.5) geht hervor, dass die theoretischen Schnittpunkte mit der Bohrlochachse in einer Teufe von 90 m u.GOK eine gewisse Häufung zeigen, in der GwM 4 deutet sich eine weitere Häufung in einer Teufe um 60 m u.GOK an. Eine direkte Zuordnung zu geologischen oder tektonischen Ursachen dieser Reflexionen ist aus geophysikalischer Sicht nicht möglich. Unter Berücksichtigung der im Explorationsbiet erfassten geologischen und tektonischen Befunde lassen sich die langen, parallelen und steil stehenden Reflexionen (besonders deutlich in der Auswertung der GwM 4, Anl. 13.5) der Hauptdolomitschichtung zuordnen. Die kürzer aushaltenden Reflektoren (GwM 3 um 90 m u.GOK; GwM 4 um 60 m u.GOK; Anl. 13.5) sind eher als Klüfte oder Kluftzonen zu charakterisieren.

Die Kluftöffnungsweiten können durch Signalanalyse gleicher Reflexionselemente abgeschätzt werden, welche mit unterschiedlichen Frequenzen nachgewiesen wurden. Trotz aufwendiger Signalbearbeitung lässt sich bedingt durch den negativen Einfluss der großen Bohrlochkaliber in Verbindung mit dem relativ hoch mineralisierten Wasser keine vertretbare Berechnung der Kluftöffnungsweiten einzelner Elemente vornehmen. Eine näherungsweise Bestimmung der Kluftöffnungsweiten kann lediglich über die Verwendung einer empirischen Formel (Mindestmächtigkeit der Kluft entspricht 1/30 der Wellenlänge der verwendeten Messfrequenz) abschätzen. Diesen Berechnungen zufolge kann der vorsichtige Schluss gezogen werden, dass die nachgewiesenen Reflexionsstrukturen Schichten bzw. Klüfte widerspiegeln, die eine minimale Mächtigkeit von 5,6 cm aufweisen. Dabei kann es sich neben Einzelklüften ebenso um eine Schar von geringermächtigen Klüften handel, welche durch Interferenz eine gleiche oder ähnliche Reflexionsstruktur im Radargramm erzeugen wie Einzelklüfte.

II.2.3.4 Ermittlung der geohydraulischen Verhältnisse im Explorationsgebiet Sagenbachtal

II.2.3.4.1 Pumptest an der GwM 1

Zur Erfassung der geohydraulischen Eigenschaften des Schotteraquifers wurde an der GwM 1 ein kurzer Pumptest durchgeführt. Der Ruhewasserspiegel lag zu Beginn des Pumpversuches bei 8,19 m u.GOK. Die Geamtpumpdauer betrug 4h 35min, die Pumpleistung durchschnittlich 59 m^3/h (ca. 16 l/s). Der Wiederanstieg wurde 1h 25min aufgezeichnet. Als Grundwassermessstelle zur Beobachtung der Absenkung für den Pumpversuch diente die GwM 2. Nach 35 s stellte sich bei konstanter Förderleistung die Absenkung von 0,06 m in der GwM 1, in der GwM 2 am Ende des Pumpversuches (4h 27min Pumpdauer) von 0,02 m ein .

Der Pumpversuch wurde nach Dupuit-Thiem ausgewertet. Die Ergebnisse der Berechnungen aus den Daten des Pumptests sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Durchlässigkeitsbeiwert aus der Entnahmemenge	$k_f = 2{,}23 \times 10^{-2}$ m/s
Durchlässigkeitsbeiwert nach Dupuit-Thiem	$k_f = 3{,}52 \times 10^{-2}$ m/s
Transmissivität	$T = 4{,}34 \times 10^{-1}$ m^2/s
Filtergeschwindigkeit	$v_f = 7{,}91 \times 10^{-5}$ m/s
Durchflusswirksames Porenvolumen (Marotz 1968)	$n_e = 0{,}311$
Grundwasserabstandsgeschwindigkeit	$v_a = 2{,}54 \times 10^{-4}$ m/s

Tab. 7: Ergebnisübersicht der Berechnungen zum Pumptest an der GwM 1

II.2.3.4.2 Pumptest an der GwM 4

Bedingt durch den geringen Grundwasserzufluss an der GwM 4 wurden nach Fertigstellung der Bohrung lediglich ein kurzer Pumptest durchgeführt.

Die Einbautiefe der Unterwasserpumpe betrug 80,00 m u.GOK, der Ruhewasserspiegel lag bei 6,23 m u.GOK. Die Absenkung auf 72,51 m u.GOK stellte sich nach einer Pumpzeit von ca. 1 h 50 min ein, jedoch konnte keine konstante Förderleistung eingestellt werden. Die Fördermenge zu Beginn des Pumpversuches betrug ca. 15 m³/h, bei Beendigung des Pumpversuches lag sie bei etwa 8 m³/h. Eine konstant niedrige Förderleistung (die dem geringen Zulauf in die Bohrung entsprach) ließ sich während des Pumpversuches nicht einstellen.

Die Pumpe wurde nach 5 h 10 min Förderdauer abgestellt, der Zeitraum des Wiederanstieges bis zum Ausgangs-Ruhewasserspiegel betrug 1,5 h.

Der Pumpversuch lieferten keine Ergebnisse, die zu einer Auswertung hernagezogen werden können.

II.2.3.4.3 Grundwasserströmungs-Messungen im Schotterkörper

Unter Verwendung des GFV-Messsystem wurden in der GwM 1 10 Messungen in unterschiedlichen Teufen durchgeführt.

Sämtliche Messungen zeigen ein anhaltend instationäres Durchströmungsverhalten (Anl. 13.6), weshalb sich eine Beruhigungsphase nicht eindeutig dokumentieren lässt; daher wird diese Phase bei Einsetzen der mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit angesetzt.

Durch die Streben im Messabschnitt sowie die Beeinflussung der Schlitz/Steganordnung der Filterrohre, ist von einer Richtungsabweichung zwischen der gemessenen Fließrichtung und der Fließrichtung im umgebenden Aquifer von +/- 5° auszugehen.

Die Filtergeschwindigkeit v_f [m/s] wird aus der gemessenen horizontalen Filterrohrdurchströmung v_H [m/s] und einem Korrekturfaktor berechnet (PHREALOG 2003). Dieser gesetzmäßige Korrekturfaktor α lässt sich ausschließlich aus in Porengrundwasserleitern durchgeführten Messungen bestimmen, er wird aus den Brunnenausbaudaten berechnet. Der dimensionslose α-Faktor beschreibt den Einfluss des Brunnenausbaus auf die Strömungsgeometrie sowohl im als auch am Filterrohr. In Porengrundwasserleitern weist die Strömung im Filterrohr generell höhere Werte auf als im Aquifer ($v_f<v_H$).

Die Filtergeschwindigkeit ergibt sich aus:

$$v_f = v_H / \alpha \quad [m/s].$$

Als zusätzlicher Korrekturfaktor wird der γ-Faktor eingesetzt, welcher die räumliche Verzerrung des Grundwasserströmungsfeldes durch die Packer der Messsonden berücksichtigt. Die vollständige Geschwindigkeitskorrektur resultiert dabei aus der Multiplikation von α- und γ-Faktor:

$$v_f = v_H / (\alpha * \gamma) \quad [m/s].$$

Bei bekanntem, für die Grundwasserbewegung nutzbarem Porenanteil n_e [%] des umgebenden Sediments im jeweiligen Messbereich, kann aus der errechneten Filtergeschwindigkeit v_f [m/s] näherungsweise die Grundwasserabstandsgeschwindigkeit v_a [m/s] bestimmt werden (Tab. 8):

$$v_a = v_f / (n_e / 100) \quad [m/s].$$

Die Ergebnisse der Messungen bzw. der Berechnungen sind in Tabelle 8 zusammenfassend dargestellt.

Die ermittelten Filtergeschwindigkeiten können nur dann in Bezug zur Grundwasserbewegung im Aquifer gesetzt werden, wenn die Grundwassermessstelle einen weitestgehend sauberen Zustand aufweist und die Strömung relativ richtungsstabil verläuft. Bei kontinuierlich umlaufenden Fließrichtungen beziehen sich die gemessenen Geschwindigkeiten nicht auf die Geschwindigkeit der Grundwasserbewegung in die Hauptfließrichtung, sondern auf den umlaufenden Bewegungsimpuls. Diese Messwerte werden in Tabelle 8 hervorgehoben (rot).

Aus den Messreihen ist keine eindeutige Fließrichtung abzuleiten, da die Fließrichtungen sowie die Fließgeschwindigkeiten aufgrund instationären Strömungsverhaltens streuen. Erst die statistische Auswertung zeigt eindeutige Ergebnisse. Signifikant ist das Ergebnis der Messung in 12,9 m u.GOK. Über statistische Auswertungen und Wichtungen lassen sich bei vier der erfolgten Messungen sowohl Fließrichtung als auch Fließgeschwindigkeit relativ gut eingrenzen. Weitere fünf Messungen zeigen lediglich Fließrichtungstendenzen, die jedoch in Beziehung zu den ermittelten Fließrichtungen gesetzt werden können.

Die über das gesamte Vertikalprofil der Messungen gemittelte Durchströmungsgeschwindigkeit ist mit v_H = 1 x 10^{-4} m/s relativ gleichförmig. Zusammenfassend kann eine generelle Fließrichtung nach WSW (245°) angegeben werden.

Messtiefe	mittl. Fließricht.	mittl. v_H	Korrekturfaktor	mittl. v_f	mittl. v_f
[m u.POK]	[°]	[m/s]		[m/s]	[m/d]
9,1	T: SE	4,5 x 10^{-5}	2,72	1,7 x 10^{-5}	1
10,2	T: 230	1,2 x 10^{-4}	2,72	4,4 x 10^{-5}	--
11,4	T: 240	6,9 x 10^{-5}	2,72	2,5 x 10^{-5}	--
11,8	T: 210	2,0 x 10^{-4}	2,72	7,4 x 10^{-5}	6
12,5	T: 330	7,1 x 10^{-5}	2,72	2,6 x 10^{-5}	2
12,9	270	1,5 x 10^{-4}	2,72	5,5 x 10^{-5}	5
14,1	T: 220	6,8 x 10^{-5}	2,72	2,3 x 10^{-5}	2
15,2	T: 230	1,4 x 10^{-5}	2,72	5,1 x 10^{-6}	--
19,3	T: 225	9,0 x 10^{-5}	2,72	3,3 x 10^{-5}	--
20,4	T: 275	1,5 x 10^{-4}	2,72	5,5 x 10^{-5}	--
Nutzbarer Proenanteil n_e (Siebanal. GwM 1 10-20m)			11,5 %		
Filtergeschwindigkeit v_f (üb. Messber. gemittelt)			3,93 x 10^{-5} m/s		
Grundwasserabstandsgeschwindigkeit v_a			3,40 x 10^{-4} m/s		

Tab. 8: Zusammenstellung der Ergebnisse der Grundwasserströmungs-Messungen

II.2.3.5 Grundwassercharakteristik im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth

Im Untersuchungsgebiet Rottach-Egern erfolgten chemisch-physikalische Analysen von Wasserproben aus den abgeteuften Bohrungen sowie von Quellen und Brunnen in der weiteren Umgebung des Explorationsgebietes (Anl. 6.1, 6.3).

Die graphische Darstellung und Klassifikation der Analysen erfolgt (Kap II.1.2.2) im Ca-Mg-Diagramm sowie im Ca-Mg-SO_4-Diagramm. Diese sind in Abbildung 14 und 15 sowie, im Vergleich mit den übrigen Analysen, in Anlage 6.6 und 6.7 dokumentiert.

Die Grundwassercharakteristik im Untersuchungsgebiet zeichnet die geologischen Verhältnisse nach. Es treten Dolomit-Wasser (Bayerwald-Quelle, Vorderalm-Quelle), Kalziumkarbonat-Wasser (Schwarzenbachtal-Quelle), Sulfatreiches-Wasser (Gernberg-Quelle, Max-Quelle) sowie Mischwässer der genannten Endglieder auf.

Eine wichtige Stellung nehmen dabei besonders die sulfatreichen Wässer im Explorations- und Untersuchungsgebiet ein. Die nachgewiesenen hohen Sulfatwerte lassen sich auf die Raibler Schichten bzw. Raibler Rauhwacken zurückzuführen. Die Raibler-Schichten streichen nicht in der direkten Umgebung der Probennahmepunkte aus, dennoch sind diese mittels der untersuchten Quellen eindeutig nachzuweisen. Die Raibler-Schichten befinden sich im Liegenden des Hauptdolomits wodurch diese besonders in Sattelstrukturen den Grundwasserchemismus beeinflussen. So tritt z.B. an der Max-Quelle aus einer Hauptdolomitkluft ein typisches Raibler-Rauhwacken-Wasser aus. Mit den hydrochemischen Daten der Quellen lagen bereits in der Vorerkundungsphase Informationen über die Verbreitung der Raibler Schichten im Untergrund vor, so dass bei Planung der Bohrungen Bereiche abgegrenzt werden konnten, in denen Grundwasser-

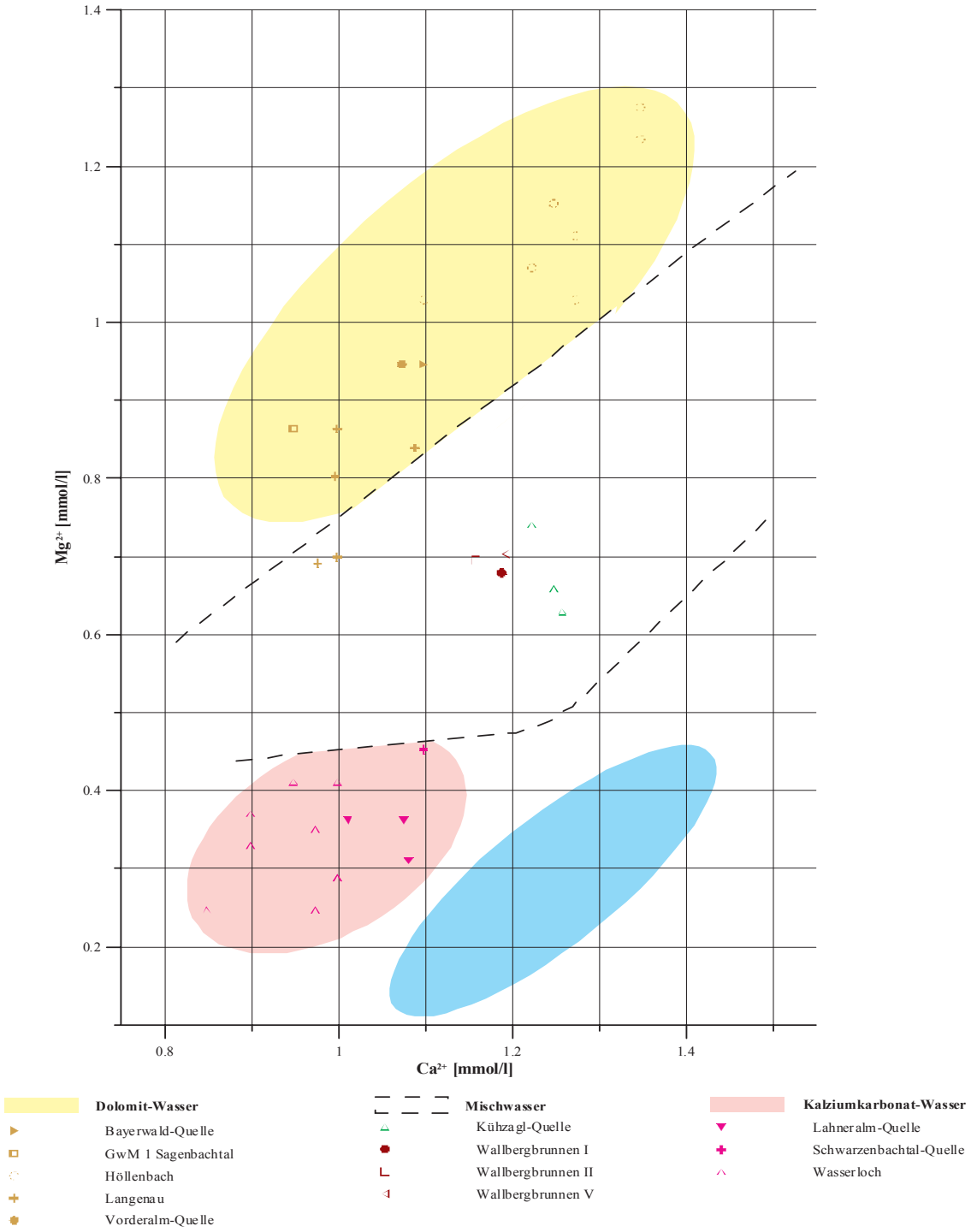
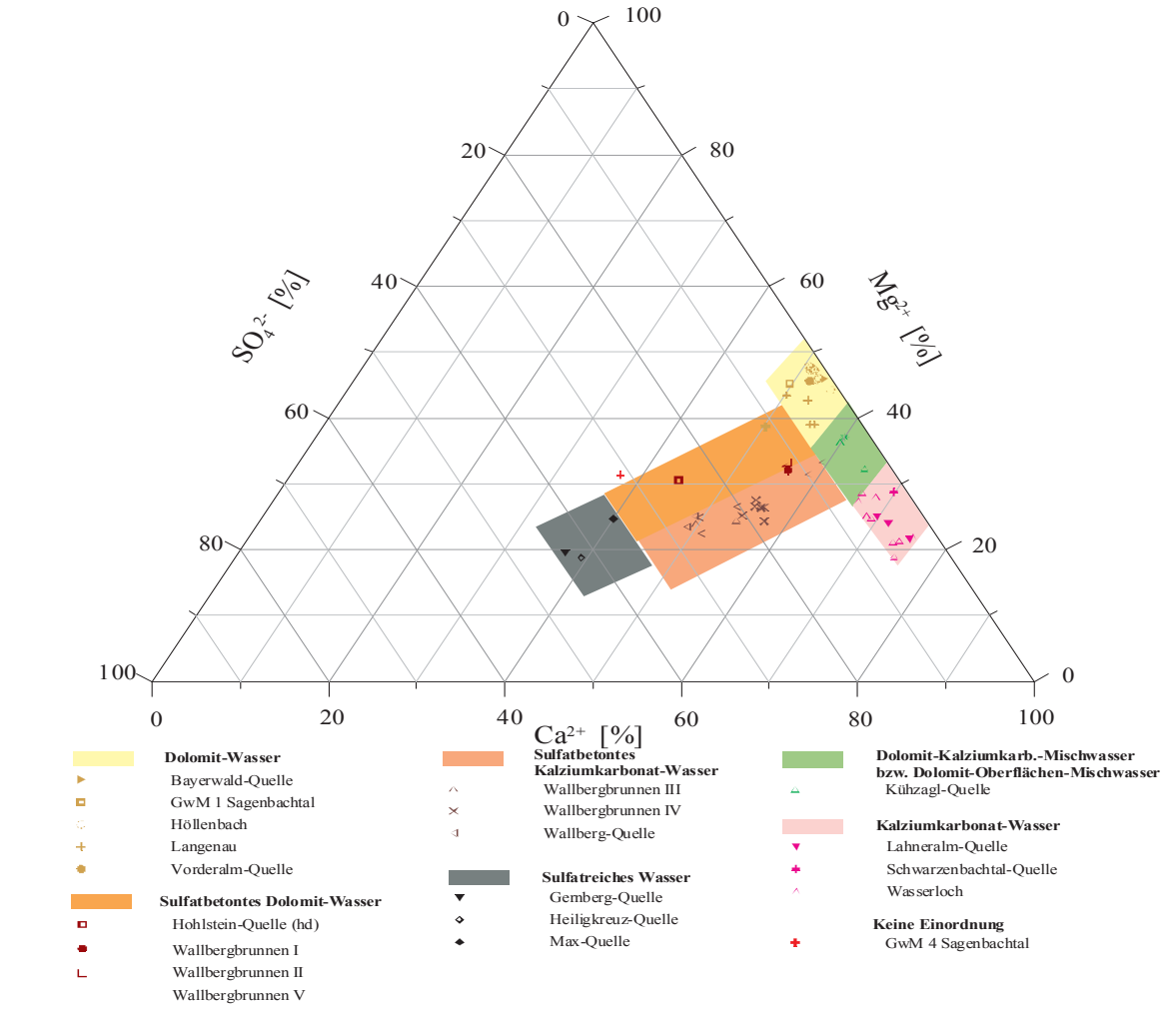


Abb. 14: Klassifikation der chemisch-physikalischen Analysen im Zweistoff-Diagramm (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth)



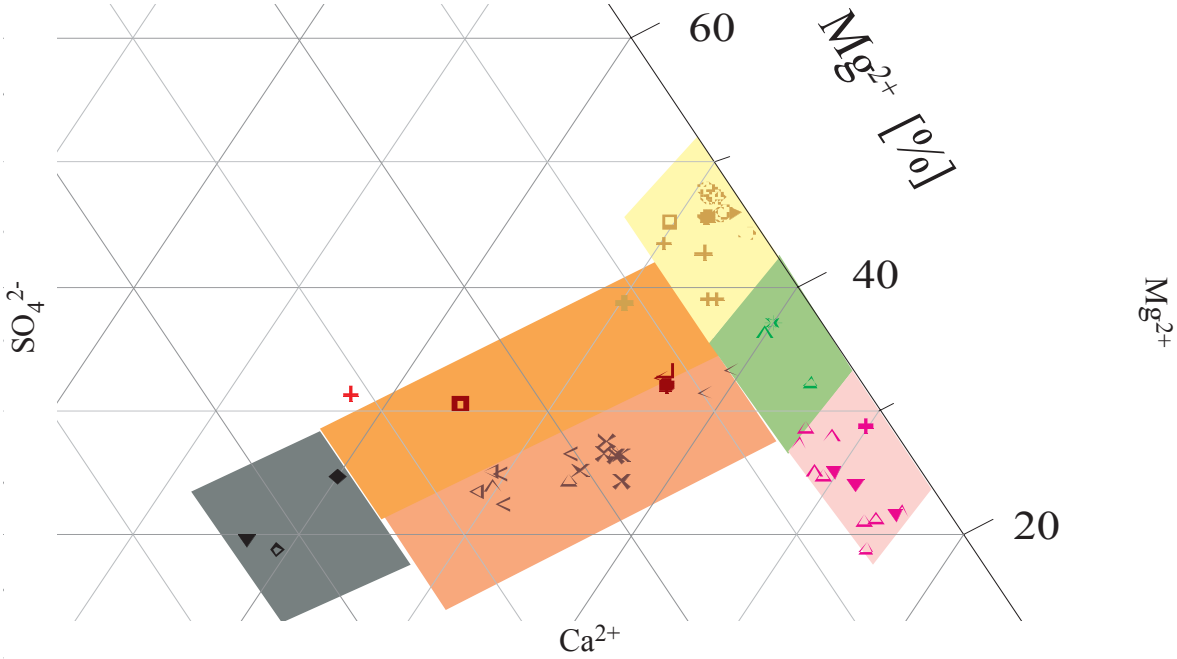


Abb. 15: Klassifikation der chemisch-physikalischen Analysen im Dreistoff-Diagramm (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth)

Erkundungsbohrungen nicht zweckmäßig waren.

Der Brunnen Langenau (Anl. 2.2, 6.3) ist im Hauptdolomitschotter gegründet, das geförderte Grundwasser zeigt Dolomit-Chemismus, das Ca/Mg-Verhältnis weist leicht zum Mischwasser hin verschobene Werte auf (Abb. 14), was auf einen geringen Oberflächeneinfluss hindeutet. Die Analyse aus der ebenfalls im Hauptdolomitschotter gegründeten GwM 1 zeigt einen typischen Dolomit-Chemismus ohne Hinweise auf Einfluss von Oberflächenwasser. Die Analyse an der GwM 4 (Probennahme zum Ende des Pumptests) lässt sich nicht mit dem entwickelten Klassifikationsschema (Kap. II.1.2.2) korrelieren (Abb. 15). Die Probe ist mit einem absoluten Ca/Mg-Quotienten von 1,20 zu charakterisieren (Anl. 6.3), dies würde für ein Hauptdolomit-Wasser sprechen. Untypisch ist, sowohl für ein Hauptdolomit- als auch für sulfatbetontes Dolomit-Wasser ein Mg/SO_4-Quotient von 1,00. Dieses Wasser lässt sich keiner der Gruppen im Klassifikationsschema zuordnen.Da in der Bohrung nur ein sehr geringer Grundwasserzufluss zu verzeichnen war, könnte es sich um "altes Kluftwasser" handeln, welches der Bohrung über Fein- bis Feinstklüftung zuströmt. Die Verweilzeit des Kluftwassers im Hauptdolomit wäre in diesem Fall, kombiniert mit einem sehr geringen Grundwasseraustausch, sehr hoch, wodurch sich der ungewöhnliche Chemismus erklären ließe.

II.2.3.6 Klimatologie und hydrologische Bilanzierung im Einzugsgebiet Sagenbachtal

II.2.3.6.1 Berechnungen und Bilanzierung der Parameter

Für das morphologisch begrenzte Einzugsgebiet Sagenbachtal EZG_o wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Klimamodell erstellt. Unter Einbeziehung des Oberflächenabflusses Q sowie des oberflächennahen Abflusses Q_i im Schotterkörper konnte mittels des Modelles eine hydrologische Bilanzierung vorgenommen werden, mit der sich Grundwasserzuflüsse aus dem geklüfteten Hauptdolomit in den Schotterkörper des Sagenbachtales nachweisen ließen.

Die in die Analysen eingehenden Parameter und verwendete Methodik sind in Kap. II.1.1 erläutert. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Klimamodells sowie der hydrologischen Bilanzierung aufgeführt.

Das als Grundlage dienende Einzugsgebiet EZG_o Sagenbachtal umfasst eine Gesamtfläche von 19,01 km^2 und weist eine Reliefenergie von 1030,50 m auf (max. 1820 m ü.NN, min. 789,50 m

Station	Höhe	Lage	Erfassungszeitraum	
	m ü.NN	Länge/Breite WGS 84	Temperatur	Niederschlag
Rottach-Egern	747	L 11°46' B 47°40'	1958-2002	1931 - 1990
Kreuth	789	L 11°44' B 47°38'	1971-1996	--
Schwarzenkopfhütte	1336	L 11°54' B 47°39'	--	1931 - 1990
Wendelstein	1836	L 12°00' B 47°42'	1951-2002	1931 - 1990

Tab. 9: Lage der Temperatur- und Niederschlagsmessstationen für das EZG Sagenbachtal sowie jeweiliger Erfassungszeitraum

ü.NN) (Anl. 2.1, 2.2).

In Tabelle 9 ist die Lage der für die Berechnungen im EZG_o Sagenbachtal herangezogenen Messstationen aufgeführt. Auf Datenbasis dieser Messstationen erfolgt die Berechnung der höhenabhängigen monatlichen Niederschlags- und Temperaturgradienten (Kap. II.1.1.3 und II.1.1.4, Anl. 10.1, 10.2). Aus der Verschneidung der Gradienten mit dem DGM resultieren die spezifische Niederschlags- und Temperaturverteilungen (Abb. 16) für das EZG_o Sagenbachtal. Weiter lässt sich

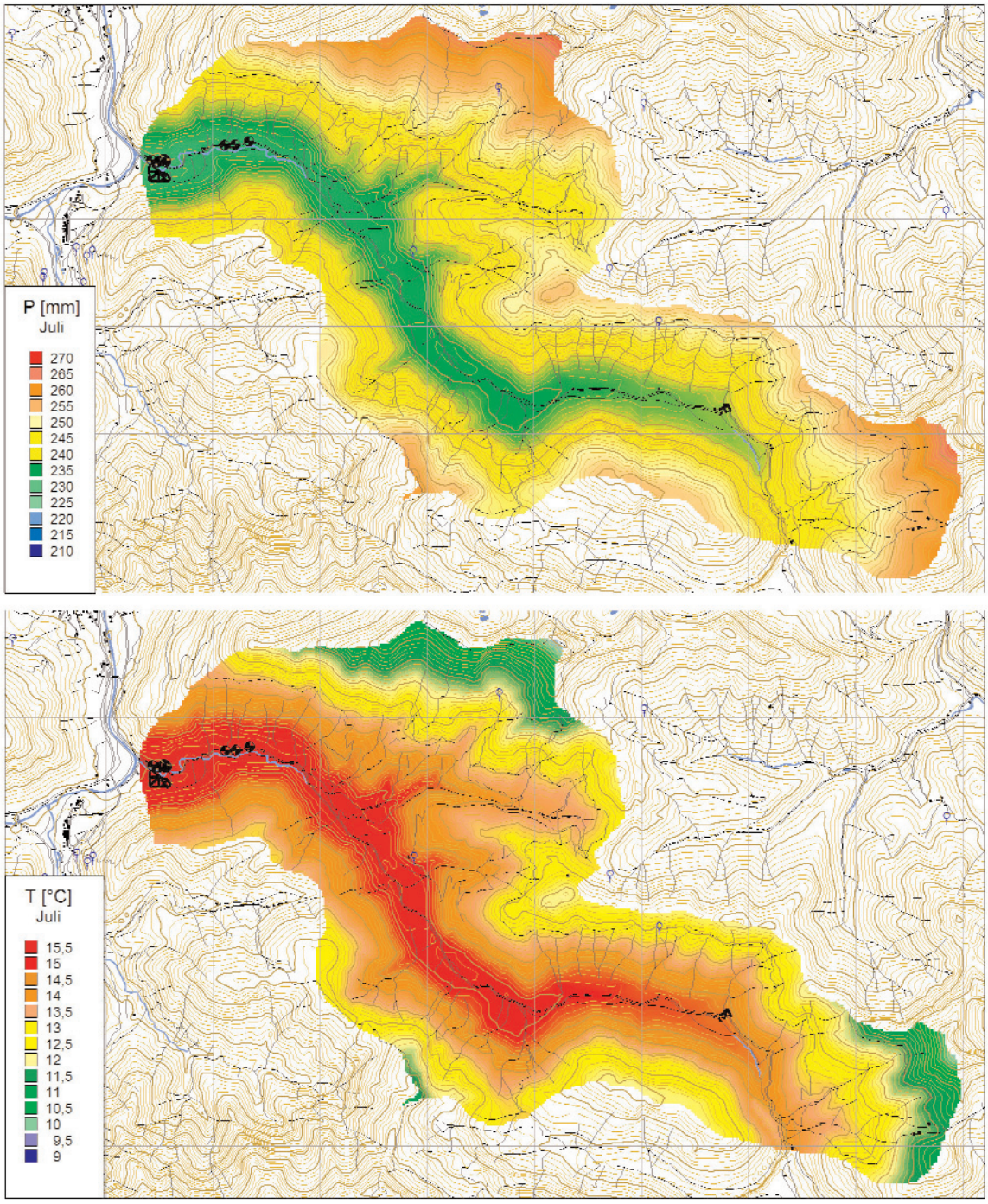


Abb. 16: Niederschlags- und Temperaturverteilung im EZG_o Sagenbachtal (Beispielmonat Juli)

der kumulative Gesamtniederschlag berechnen.

Für das betrachtete Einzugsgebiet EZG_o Sagenbachtal beträgt die mittlere jährliche Gebietsniederschlagshöhe 1998 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 5,07 °C.

Die Werte der mittleren monatlichen Gebietsniederschlagshöhen (P) und -Temperaturen (T), deren Minima und Maxima sowie das ΔP und ΔT zwischen niedrigstem und höchstem Punkt des Einzugsgebietes sind in Tabelle 10 aufgeführt. Die Niederschlags- und Temperaturdifferenzen zeigen deutlich die Auswirkung der variierenden monatlichen Niederschlags- und Temperaturgradienten.

Die geringsten höhenabhängigen Niederschlagsdifferenzen weisen mit Werten von 7,43 bzw. 8,14 mm die Monate November und Dezember auf, die größten Differenzen sind im Juli (37,03 mm) und Februar (30,83 mm) zu verzeichnen.

Die höhenabhängigen Temperaturdifferenzen sind von November bis Januar am geringsten, in den Sommermonaten sind die größten Temperaturunterschiede gegeben. In Anlage 10.2 ist die Temperaturverteilung (Jan. - Dez.) im EZG_o Sagenbachtal in Form isochromatischer Karten dargestellt.

Die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration nach Blaney-Criddle (1950) mit Schrödter-Korrektur (1985) basieren entsprechend den vorangegangenen Berechnungen ebenfalls auf dem DGM, sodass auch hinsichtlich der potenziellen Evapotranspiration höhendifferenzierte Ergebnisse möglich sind (Kap. II.1.1.5). Die durchschnittliche, jährliche potenzielle Evapotranspiration im untersuchten Einzugsgebiet beträgt 1029,26 mm (Tab. 10). Die Monatswerte sowie deren Minima und Maxima sind Tabelle 10 zu entnehmen.

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Niederschlag P [mm]													
Min P	140,39	123,00	122,49	136,98	165,53	224,42	231,39	202,26	151,79	117,84	126,27	131,53	1873,89
Max P	161,02	153,83	150,75	159,16	186,98	247,11	268,42	229,07	162,41	129,60	133,70	139,67	2121,72
Δ P	20,63	30,83	28,26	22,18	21,45	22,69	37,03	26,81	10,62	11,76	7,43	8,14	247,83
Ø P	147,89	134,35	132,90	145,15	173,43	232,77	245,02	212,13	155,70	122,17	129,01	134,53	1997,80
Temperatur T [°C]													
Min T	-4,05	-4,51	-2,52	-0,06	4,62	7,46	9,71	9,78	7,46	4,61	-0,60	-3,08	2,40
Max T	-1,88	-1,10	2,02	5,41	10,50	13,44	15,69	15,04	11,80	7,50	2,19	-1,02	6,63
Δ T	2,17	3,40	4,54	5,47	5,88	5,98	5,98	5,26	4,33	2,89	2,78	2,06	4,23
Ø T	-2,68	-2,36	0,35	3,40	8,33	11,24	13,49	13,11	10,20	6,44	1,16	-1,78	5,07
potentielle Evapotranspiration ET_p [mm]													
Min ET_p	36,06	36,04	51,95	69,44	101,39	115,88	128,11	117,55	92,13	72,74	46,03	36,93	904,25
Max ET_p	41,99	45,67	67,85	91,33	128,40	143,71	156,31	140,28	108,20	82,31	53,73	42,33	1102,11
Δ ET_p	5,93	9,63	15,90	21,89	27,01	27,83	28,20	22,73	16,07	9,57	7,70	5,40	197.86
Ø ET_p	39,81	42,12	62,00	83,27	118,45	133,46	145,93	131,91	102,28	78,79	50,90	40,34	1029,26
Klimatische Wasserbilanz P_0 [mm]													
Min P_0	98,40	77,33	54,64	45,66	37,13	80,71	75,08	61,98	43,59	35,53	72,54	89,20	771,79
Max P_0	124,95	117,80	98,80	89,72	85,59	131,23	140,31	111,52	70,29	56,86	87,67	102,75	1217,49
Δ P_0	26,55	40,47	44,16	44,60	48,46	50,52	65,23	49,54	26,70	21,33	15,13	13,55	446,24
Ø P_0	108,17	92,23	70,89	61,88	54,97	99,31	99,09	80,22	53,42	43,38	78,11	94,19	935,86

Tab. 10: Berechnete Gebietsniederschlagshöhen P, Temperaturen T, potenzielle Evapotranspiration ET_p und klimatische Wasserbilanz P_0 für das EZG Sagenbachtal

Anhand der Ergebnisse der Niederschlags- und Temperaturmodellierung sowie der Berechnung der potenziellen Evapotranspiration lässt sich die klimatische Wasserbilanz P_0 (Kap. II.1.1.6) erstellen, welche denjenigen Teil des Gebietsniederschlages darstellt, der zur Grundwasserneubildung beiträgt bzw. ober- und unterirdisch aus dem Einzugsgebiet EZG_o abfließt (Tab. 10). Insgesamt ergibt sich ein P_0 von 935,86 mm pro Jahr (Tab. 10). Mithilfe des DGM lässt sich die klimatische Wasserbilanz P_0 für das konkrete EZG_o Sagenbachtal kumulativ berechnen, für ein Jahr ergeben sich 17,8 Mio m^3 (Anl. 10.3). Die ermittelte geländeabhängige P_0-Verteilung im EZG_o Sagenbachtal wird in Form isochromatischer Karten (Jan. - Dez.) dargestellt (Anlage 10.4).

Der Oberflächenabfluss Q des EZG_o Sagenbachtal wird aus den Daten des Abflusspegels Sagenbach ermittelt. Die vom WWA Rosenheim erhobenen Daten umfassen die Zeitreihe von 1952 - 1998 (Anl. 10.5).

Für die Quantifizierung des Grundwasserabflusses Q_i im Schotterkörper des Sagenbachtales wird ein Jahreswert berechnet. Die Berechnung basiert auf der Modellierung des Grundwasser führenden Bereichs (Querschnitt) des Schotterkörpers (Eingangsdaten: Gleichstrom-Geoelektrische Messungen, durchflusswirksamer Hohlraumanteil n_e aus Siebanalysen, Pegelstände GwM 1) sowie die Grundwasserabstandsgeschwindigkeit v_a (GFV-Messungen, durchflusswirksamer Hohlraumanteil). Der Grundwasserabfluss wurde dabei für exemplarische Grundwasserstände berechnet (Anl. 10.5).

Bei Annahme eines geschlossenen Systems für das EZG_o Sagenbachtal, muss aus der Bilanzierung sämtlicher positiver (klimatische Wasserbilanz P_0) und negativer (Abfluss Q und Q_i) Parameter ein Ergebnis von +/- 0 resultieren. Bei Bewertung der Bilanzierung ist zu beurteilen, in wieweit die einzelnen eingehenden klimatologischen und hydrologischen Parameter Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Genauigkeit bergen oder ob zusätzliche, in der Berechnung nicht berücksichtigte Faktoren auf das hydrologische System Sagenbachtal einwirken. Bei der vorliegenden Fragestellung ist besonders der Einfluss des Kluftkörpers Hauptdolomit auf das System einzuschätzen.

Die Gesamtbilanzierung Hy_{Bil} des hydrologischen Systems Sagenbachtal lässt, bedingt durch die vorhandenen Datenlagen, ausschließlich Aussagen über das gesamte Jahr zu. Der begrenzende Faktor ist der Grundwasserabfluss im Schotterkörper Q_i, für den lediglich ein Jahreswert interpoliert werden kann. Für die Parameter Gebietsniederschlag P, potenzielle Evapotranspiration ET_p und Oberflächenabfluss Q können einzelne Monatswerte bilanziert werden.

Eine Übersicht sämtlicher eingehender Bilanzierungsparameter sowie alle Berechnungsergebnisse sind in Anlage 10.6 zusammenfassend aufgeführt.

Bilanzierung sämtlicher Parameter (Jahresbilanz):

$$Hy_{Bil} = P - ET_p - Q - Q_i$$

$$Hy_{Bil} = 37{,}36 - 19{,}57 - 22{,}90 - 2{,}61 \quad [Mio\ m^3]$$

$$Hy_{Bil} = -7{,}72\ Mio\ m^3$$

Im Sinne der hydrologischen Gesamtbilanz (Hy_{Bil}) liegt im System Sagenbachtal eine positive Bilanz vor. Dies bedeutet, dass dem EZG_o im Jahresverlauf mehr Wasser zugeführt wird, als ihm durch P_0 (klimatische Wasserbilanz, P - ET_p) zur Verfügung steht (Abb. 17). Die Differenz von ca. 7,5 Mio m^3 kann in dem unterirdischen Einzugsgebiet (DIN 4049, Teil 3, 3.6.14) begründet sein. Bei

den vorliegenden hydrologischen und geologischen Verhältnissen im Explorationsgebiet Sagenbachtal ist der Zufluss weitestgehend auf den Kluftkörper Hauptdolomit im unterirdischen Einzugsgebiet EZG_u zurückzuführen.

II.2.3.6.2 Fehlerbetrachtung

Bei der Bewertung der hydrologischen und klimatologischen Bilanzierungen ist deren genereller Modellcharakter zu berücksichtigen. Die eingehenden Daten sind hinsichtlich ihrer jeweiligen Aussagekraft zu beurteilen. Im Folgenden werden mögliche Fehlerquellen einzelnener Parameter erläutert.

Der Gebietsniederschlag P beruht auf Daten, die den Zeitraum von 1931 bis 1990 umfassen. Die Berechnung der Niederschlagsgradienten und der daraus resultierenden Gebietsniederschlagsdaten zeigen bezüglich der orographischen Charakteristik des konkreten Einzugsgebietes typische Werte (Tab. 10, Anl. 10.1); weshalb von einer guten Annäherung des höhenabhängigen Gebietsniederschlagsmodells an das reale Niederschlagsaufkommen auszugehen ist.

Der modellierte, oberflächennahe Grundwasserabfluss Q_i stellt in der Bilanz den kleinsten Unsicherheitsfaktor dar, wenngleich dessen Berechnung auf vielen Annahmen beruht (konstanter Grundwasserspiegel, homogener Schotterkörper, einheitliche Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeit). Um zu verdeutlichen, dass der Grundwasserstand quantitativ keinen entscheidenen Einfluss auf die hydrologische Gesamtbilanzierung Hy_{Bil} ausübt, wird der oberflächennahe Grundwasserabfluss Q_i exemplarisch für unterschiedliche Grundwasserstände berechnet (Anl. 10.5). Für einen Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels um +/- 2,00 m (ausgehend von 788,00 m ü.NN, Pegelstand PV 10.12.02) werden die jeweiligen hydrologischen Gesamtbilanzen berechnet. Auf den Gesamtniederschlag P bezogen schwankt der Anteil des Grundwasserabflusses Q_i zwischen 5,8% (Grundwasserstand von 786,00 m ü.NN) und 8,1% (Grundwasserstand von 790,00 m ü.NN).

Die potentielle Evapotranspiration ET_p wirkt sich in der Gesamtbilanz wesentlich stärker aus. Der ET_p-Anteil beträgt bezogen auf den Gesamtniederschlag P 52,38%. Bei der Beurteilung gilt es zu berücksichtigen, dass die maximal mögliche Verdunstung in die Bilanzierung eingeht, die jedoch real nicht erreicht wird.

Der Term des Oberflächenabflusses Q hat einen Anteil von 61,3% bezogen auf den Gesamtniederschlag P. Da die Daten auf langjährigen Zeitreihen basieren, können diese als gesichert gelten.

Unter Berücksichtigung und Abschätzung der Auswirkungen möglicher Fehlerquellen konnte bei der Entwicklung des hydrologischen Modelles eine Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse im EZG Sagenbachtal erreicht werden. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Berechnung eines hydrologischen Modells immer eine Verallgemeinerung der Realität impliziert. Daher ist das Ergebnis der hydrologischen Bilanzierung des EZG Sagenbach nicht streng quantitativ sondern eher qualitativ zu beurteilen.

II.2.4 Beurteilung der geohydraulischen Verhältnisse im Sagenbachtal

Das zur Erkundung von Kluftgrundwasser im Hauptdolomit im Sagenbachtal durchgeführte Bohrprogramm hat nicht die Ergebnisse erbracht, die nach den Vorerkundungsmaßnahmen zu erwarten waren.

In den Festgesteins-Bohrungen GwM 3 und GwM 4 ist ein Grundwasserzulauf von max. 2-3 l/s zu verzeichnen. Basierend auf der Bewertung des Bohrfortschrittes sowie der gewonnenen Bohrkerne ist von festem feinstklüftigem Hauptdolomit auszugehen. Kluftsysteme, welche Öffnungsweiten im Dezimeterbereich aufweisen, wurden nicht durchteuft. Die Lagerung des Hauptdolomites zeigt in den Bohrungen ein deutlich steileres Fallen, als es in der Vorerkundung nach Geländemessungen erwartet werden konnte. Auf Grundlage dieser Analysen war es wahrscheinlich, dass die Bohrungen Hauptdolomitschichten durchteufen, die mit ca. 60° nach N einfallen. Die Bohrungen wurden in der S' Mulden-Flanke der Wallberg-Setzberg-Doppelmulde niedergebracht. In dieser geologisch-tektonischen Situation waren klüftige Bereiche senkrecht zur Schichtung sowie junge Störungselemente zu erwarten. Die gewonnenen Bohrkerne belegen jedoch, dass die Hauptdolomitschichten fast saiger stehen, wodurch offene Klüfte, die durch Entspannungen während der Einmuldung geöffnet wurden, unwahrscheinlich sind. Des Weiteren erbringen die jungen Störungselemente, welche sowohl durch tektonische als auch Luftbild-Analyse herausgearbeitet wurden, nicht die erwartete Auflockerung des Hauptdolomits innerhalb der Bohrbereiche. Offensichtlich handelt es sich bei diesen Störungszonen um lokal sehr begrenzte Bereiche. Um eventuell vorhandene Störungszonen in der direkten Umgebung der Bohrungen zu lokalisieren, wurde das Bohrloch-Radar-Verfahren eingesetzt. Durch die Kombination geophysikalischer und geologischer Interpretation können Klüfte von Schichtgrenzen unterschieden werden. Größere Kluftzonen, die eine Wasserführung vermuten lassen, sind jedoch nicht nachzuweisen. Bedingt durch die geringe Eindringtiefe und räumliche Auflösung der Messungen sowie darüber hinaus die ungünstige Konfiguration der Bohrungen, lassen sich keine detaillierten Aussagen hinsichtlich des Kluftregimes treffen.

Es ist wahrscheinlich, wie bereits während der Vorerkundung herausgearbeitet wurde, dass sich die Situation am W' Ausgang des Sagenbachtales, im Bereich der N-S gerichteten Rottach-Egern - Kreuth Aufwölbung (Kap. I.3.2.3) günstiger darstellt, da hier Hinweise auf Wasser führende Klüfte vorliegen (Hohlenstein-Quelle, Max-Quelle; Anl. 2.2). Eine Positionierung der Bohrpunkte in diesem Bereich konnte nicht vorgenommen werden, da die Anlieger durch Auflagen für ein Trinkwasserschutzgebiet stärker betroffen wären.

Der Untersuchung der vorliegenden hydraulischen Verhältnisse im Schotterkörper des Sagenbachtales zufolge, lässt sich der oberflächennahe Grundwasserabfluss am Ausgang des Sagenbachtales in zwei Bereiche gliedern. Die Grenze zwischen den Bereichen bildet die Schwaigeralm-Schwelle. Der Grundwasserspiegel E' der Schwaigeralm-Schwelle tritt in Form des Sagenbaches direkt an die Oberfläche. Bei auftretenden Niederschlagsereignissen bzw. Trockenperioden verlagert sich der Ursprung des Sagenbaches. Bei Niederschlägen führt der gesamte Sagenbach Wasser, während bei längeren Trockenzeiten der Sagenbach erst ca. 200 m E' des Schwaigeralm-Wirtshauses aus dem Schotterkörper austritt (Anl. 2.2). Die Ruhewasserspiegel (im Schotterkörper) der GwM 3 und der GwM 4 lassen sich nach Nivellements mit dem Wasserspiegel des Sagenbaches korrelieren. W' der Schwaigeralm-Schwelle hängt der Wasserspiegel des Sagenbaches nicht unmittelbar mit dem Grundwasserspiegel zusammen. Das Bachbett ist abgedichtet, wodurch ein direkter Austausch ausgeschlossen werden kann. Den durch-

geführten Nivellements zufolgen erfolgt der Grundwasserabfluss in Richtung Weißach, die Grundwasserstände der GwM 1 und GwM 2 korrespondieren mit dem Wasserspiegel der Weißach.

Wie in Kap. II.2.3.6.1 erläutert, liegt für das EZG_o Sagenbachtal eine postive hydrologische Bilanz vor; d.h. es fließt mehr Wasser an der Oberfläche und im oberflächennahen Grundwasserstockwerk ab, als dem topographisch begrenzten Einzugsgebiet EZG_o über Niederschläge (abzüglich der Evapotranspiration, bzw. P_0 klimatische Wasserbilanz) zugeführt wird (Abb. 17). Das unterirdische Einzugsgebiet (EZG_u) muss daher erheblich größer sein als das durch die oberirdischen Wasserscheiden begrenzte Einzugsgebiet (EZG_o) des Sagenbachtales. Den Berechnungen zufolge strömen dem System Sagenbachtal aus dem unterirdischen Einzugsgebiet bis zu 7,5 Mio m^3 Grundwasser zu. Bedingt durch die geologischen Verhältnisse im Sagenbachtal und im weiteren Umfeld kommt als Grundwasserleiter für das zuströmende Grundwasser nur der Hauptdolomit in Betracht. Da der Hauptdolomit nicht verkarstungsfähig ist, muss der Zufluss des Grundwassers über Wegsamkeiten im geklüfteten Hauptdolomit erfolgen. Im Bereich des Wasserfalls W' der Schwaigeralm sind derartige Austritte von Grundwasser aus Klüften zu beobachten. Solche Kluftwasseraustritte müssen auch im Schotterkörper des Sagenbachtales vorhanden sein, die Ursache für die positive hydrologische Bilanz (Hy_{Bil}) im oberflächen- und oberflächennahen-Abfluss sind.

Der berechnete Überschuss von 7,5 Mio m³ darf nicht als absolute Menge der Kluftwasserzuflüsse bewertet werden, da eventuell vorhandene Abflüsse in den Kluftgrundwasserleiter Hauptdolomit nicht bekannt sind.

Auf Grundlage der Bilanzierung des hydrologischen Systems Sagenbachtal kann sicher angenommen werden, dass der Hauptdolomit als Kluftgrundwasserleiter und -speicher gelten kann, obwohl die abgeteuften Bohrungen dies nicht direkt bestätigen konnten. Die positive hydrologische Bilanzierung zeichnet jedoch ein deutliches Bild von einem unterirdischem Einzugsgebiet mit erheblichen Zuflüssen von Kluftgrundwasser aus dem Hauptdolomit jenseits der Grenzen der topographischen Wasserscheiden.

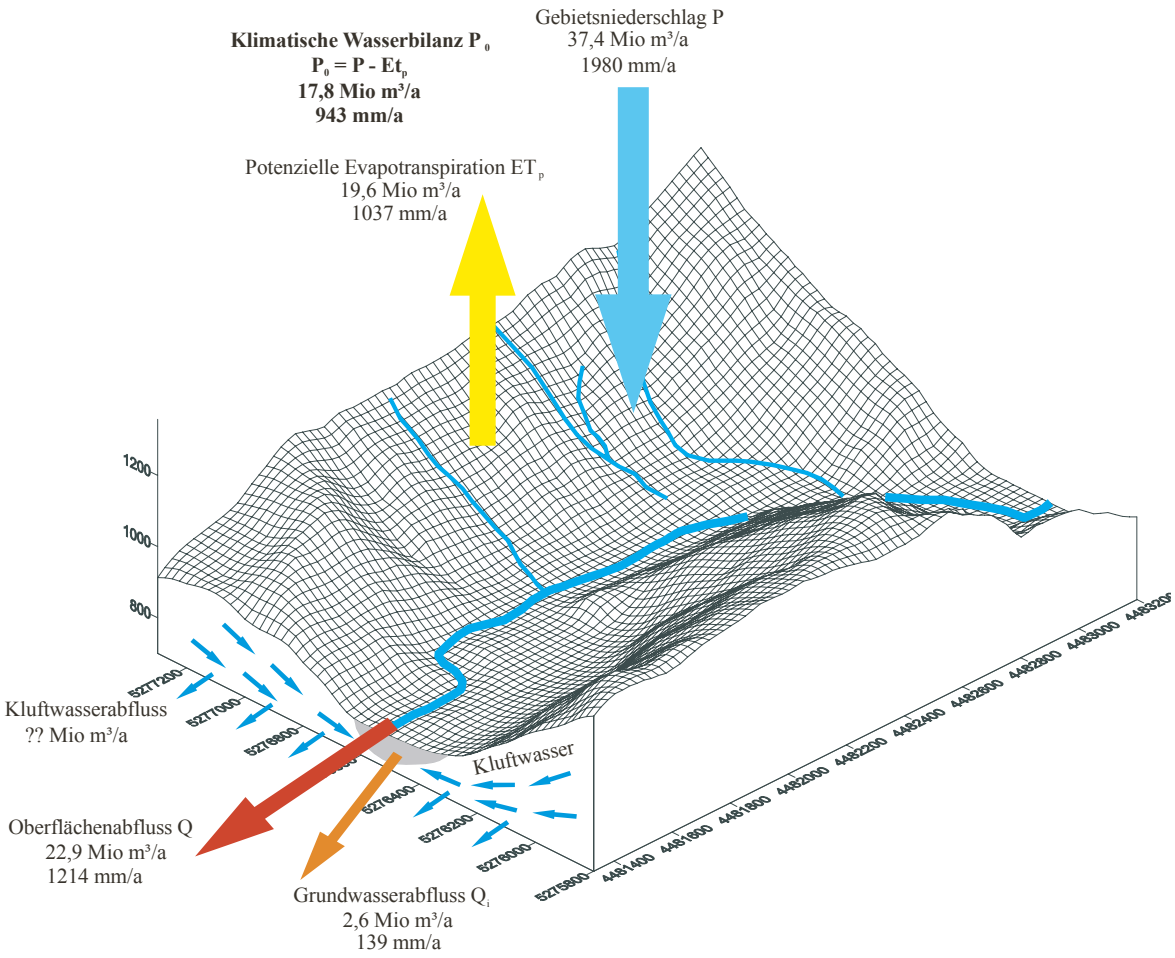


Abb. 17: Darstellung und Quanitfizierung der Bilanzierungsparameter

II.3 Exploration im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl

II.3.1 Lage der Explorationsgebiete im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl

Die Explorationsgebiete Weißgraben und Entfeld liegen im Gemeindegebiet Reit im Winkl (Lkr. Traunstein, Bayern) (Abb. 3), E' der Bundesstraße B 305 von Reit im Winkl nach Marquartstein. Sie befinden sich auf den topographischen Karten 8340 Reit im Winkl und 8341 Seegatterl (TK 1 : 25.000). Das weitere Explorationsgebiet wird im N durch den Masererpass und im S durch den Ortsteil Entfeld begrenzt. Die Explorationsgebiete sind an der Weißlofer gelegen, die das Arbeitsgebiet vom Masererpass nach S entwässert (Anl. 3.2).

II.3.2 Untersuchungsprogramm in den Explorationsgebieten Weißgraben und Entfeld

Resultierend aus den, im Hinblick auf eine mögliche Trinkwassererschließung aus dem Hauptdolomit, günstigen strukturgeologischen und hydrogeologischen Voraussetzungen (Kap. I.3.2.4) wurde für die Explorationsgebiete Weißgraben und Entfeld ein Untersuchungsprogramm entwickelt und durchgeführt.

Das Untersuchungsprogramm umfasst folgende Maßnahmen, deren Ergebnisse im Folgenden vorgestellt werden (Kap. II.3.3):

1. 3 Festgesteinsbohrungen im Hauptdolomit mit Endteufen von 200 - 250 m u.GOK (Explorationsgebiet Weißgraben: Erkundungsbohrungen ER 1 und ER 4; Explorationsgebiet Entfeld: Erkundungsbohrung ER 3)
2. Pumpversuche in unterschiedlichen Aquiferbereichen
3. Beweissicherung an der Rabengschöß-Quelle
4. Bohrlochgeophysikalische Messungen (TEMP-Log, SAL-Log, FLOW-Log)
5. Kamerabefahrung
6. Klassifizierung der Grundwassercharakteristik
7. Berechnung der klimatischen Bilanz P_0 für das Einzugsgebiet EZG_o Weißgraben

II.3.3 Ergebnisse der Explorationsmaßnahmen im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl

II.3.3.1 Erkundungsbohrungen im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl

Zur Erkundung und Erschließung von Kluftwasser im Hauptdolomit wurden in den Zeiträumen 08/2003 bis 01/2004 sowie 05/2004 bis 08/2004 insgesamt 3 Festgesteinsbohrungen im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl abgeteuft. Die geographische Lage der einzelnen Bohrungen sind Tabelle 11 sowie Anlage 3.2 zu entnehmen.

Bohrung	Gauß-Krüger-Koordinaten		Höhe	Endteufe	Explorationsgebiet
	[R-Wert]	[H-Wert]	[m ü.NN]	[m u.GOK]	
ER 1	45.38.041	52.83.509	759,60	250,00	Weißgraben
ER 3	45.37.488	52.82.196	718,66	212,00	Entfeld
ER 4	45.38.056	52.83.538	760,33	247,00	Weißgraben

Tab. 11: Erkundungsbohrungen im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl

II.3.3.1.1 Erkundungsbohrungen ER 1 und ER 4 im Explorationsgebiet Weißgraben

Die Erkundungsbohrungen ER 1 und ER 4 weisen Endteufen von 250,00 bzw. 247,00 m u.GOK auf. Da die Distanz zwischen den Bohrungen lediglich 32,8 m beträgt, zeigen deren geologische Profile große Ähnlichkeiten (Anl. 8.1, 8.3).

Die Mächtigkeit des Lockergesteins beträgt 16,00 m (ER 1) bzw. 11,50 m (ER 4). Der anstehende Hauptdolomit wird von einem hell- bis dunkelgrauen, sehr homogenen Ton/Schluff-Stein überlagert, der keine größeren Komponenten enthält. Innerhalb des Tones sind z.T. < 1 mm mächtige Schlufflagen vorhanden. Im Hangenden des Ton/Schluff-Steins ist Moränenmaterial mit gut gerundeten, kalkigen und dolomitischen Komponenten zu beobachten, welche eine Größe von bis zu 50 cm Durchmesser erreichen. Die Matrix ist sandig/schluffig, z.T. tonig mit hellbrauner bis beiger Farbe (Anl. 8.1, 8.3). Der Bereich der Lockersedimente zeigt keine Wasserführung, erst unmittelbar an der Grenze Lockergestein/Festgestein tritt Wasserführung in Form aufsteigenden Kluftwassers aus dem Hauptdolomit auf.

Wie bei der Prospektion erwartet, werden im Festgestein ausschließlich Schichten der lithologischen Einheit Hauptdolomit durchteuft. Basierend auf der Analyse des ausgetragenen Bohrkleins sowie Beurteilung des Bohrfortschritts lassen sich unterschiedliche petrologische Charakteristika des Hauptdolomits näherungsweise beschreiben (Anl. 8.1, 8.3). In Tabelle 12 sind die Parameter aufgeführt, nach denen das ausgetragene Bohrklein klassifiziert wird.

Das durchteufte Hauptdolomitprofil ist durch einen Wechsel von kompaktem Hauptdolomit, der häufig verheilte Klüfte (dolomitisch, weiß) aufweist, sowie Störungs- bzw. Zerrüttungszonen geprägt. Die Störungszonen sind dabei durch Harnische und Reibungsbrekkzien charakterisiert.

Den Zerrüttungszonen sind meist Wasserzutritte zuzuordnen, belegt durch Fe-Oxide als Kluftbeläge sowie durch Veränderungen des Ruhewasserspiegels während des Bohrfortschritts. Untergeordnet kommen jedoch auch in vorwiegend kompaktem Dolomit Fe-Oxide auf Kluftflächen

vor, die auf Kluftwasserzuläufe hinweisen. Hellbraune, tonige Kluftfüllungen, die gehäuft in intensiven Störungs- und Zerrüttungszonen auftreten, deuten eher auf verschlossene Klüfte hin, welche jedoch durch Druckentlastung bzw. das Bohrverfahren (“Imloch-Hammer-Bohrung”) aktiviert sein können.

Durch die Bohrungen ER 1 und ER 4 sind im Festgestein Wasser führende Klüfte erschlossen worden; an beiden Bohrungen liegen artesische Verhältnisse vor. Der artesische Überlauf an der ER 1 beträgt ca. 1,0 - 1,5 l/s, an der ER 4 ca. 3,0 - 3,5 l/s. Pumpversuche und geophysikalischen Messungen ermöglichen detaillierte Aussagen hinsichtlich der hydrologischen Eigenschaften des Kluftwasserleiters (Kap. II.3.3.2 und II.3.3.3).

Die Bohrungen ER 1 und ER 4 sind als Messstellen ausgebaut (Anl. 8.1, 8.3).

1.	Farbe; dunkelgrau bis schwarz -> fester, kompakter Hauptdolomit, hellbraun bis braun -> verwitterter Hauptdolomit (an Störungszonen gebunden)
2.	Größe und Form des Bohrkleins
3.	Kataklasite, zerrütteter Hauptdolomit (Komponenten i.d.R. bis 1mm) gebunden in sekundärer dolomitscher Matrix; Anzeichen für intensive Störungszonen; Wegsamkeiten für Grundwasser möglich
4.	weiße, dolomitische Kluftfüllungen als Beleg für verheilte Klüfte
5.	hellbraune, tonige Kluftfüllungen; Kluft- und Störungszonen; Wasserführung möglich
6.	hellgraue, schluffige Kluftfüllungen, Kluft- und Störungszonen
7.	Harnische; Störungszonen; Wegsamkeiten für Kluftgrundwasser gegeben
8.	Fe-Oxide als Kluftbeläge; Wasserführung

Tab. 12: Bohrklein-Charakteristika zur Bohrgutansprache

II.3.3.1.2 Erkundungsbohrung ER 3 im Explorationsgebiet Entfeld

Die Erkundungsbohrung ER 3 weist eine Endteufe von 212,00 m u.GOK auf. Die vorliegenden geologischen Verhältnisse sind aus dem Bohrprofil in Anlage 8.2 ersichtlich. Eine teufenbezogene Probenahme war, bedingt durch den bis zu einer Teufe von ca. 120 m u.GOK nur sehr geringen Wasserzulauf und dem Fehlen eines kontinuierlichen Förderstromes des Bohrguts, nur eingeschränkt bzw. z.T. nicht möglich.

Die Hauptdolomit-Oberkante wurde in einer Teufe von 15,30 m u. GOK erreicht. Die Lockergesteinsauflage lässt sich in zwei Abschnitte gliedern:

Von der Hauptdolomit-Oberkante bis zu einer Teufe von 7,00 m u. GOK steht hellgrauer bis braunbeiger Schluff bzw. schluffiger Ton an; teilweise sind millimetermächtige Schlufflagen vorhanden. Kalkige und dolomitische Kiese treten untergeordnet und dispers verteilt auf.

Von 7,00 m u.GOK bis GOK dominieren Blöcke (bis 100 cm Durchmesser) in einer Matrix aus schluffig-tonigem Material mit gerundeten kiesigen Komponenten (vorwiegend Kalk bzw. Dolomit).

Im Festgestein durchteuft die Bohrung ER 3 die lithologische Einheit Hauptdolomit. Es handelt sich hier um überwiegend kompakten grauen bis hellgrauen Dolomit, z.T. treten grau-hellbraune Bereiche auf. Der Bohrkern (101,00 - 102,20 m u. GOK) zeigt einen feinst geklüfteten Hauptdolomit, die Klüfte sind jedoch vollständig geschlossen und mit weißem Dolomit verheilt.

In der Bohrung ER 3 liegen leicht artesische Verhältnisse vor. Es ist ein artesischer Überlauf von ca. 0,1 - 0,5 l/s zu verzeichnen.

Die Bohrung ER 3 wurde nach Beendigung der Untersuchungen verfüllt (Anl. 8.2).

II.3.3.2 Pumpversuche zur Erkundung der geohydraulischen Verhältnisse in den Explorationsgebieten

II.3.3.2.1 Pumpversuche im Explorationsgebiet Weißgraben (ER 1, ER 4)

Zur Untersuchung der hydraulischen Charakteristik des Kluftwasserleiters wurden im Explorationsgebiet Weißgraben im ausgebauten und unausgebauten Zustand insgesamt acht Pumpversuche durchgeführt (Anl. 12).

Die Erkundungsbohrungen sind von GOK bis ca. 100,00 m u.GOK gegen Grundwasserzuflüsse abgedichtet, innerhalb der abgedichteten Bereiche eingebrachte Pegelrohre ermöglichen Messungen dieser Aquiferabschnitte (Anl. 8.1, 8.3). Die Abfolge sowie die Konfiguration der Pumpversuche erbringt Ergebnisse über die höher und den tiefer gelegenen Aquiferbereich. Die Förderleistungen werden dabei durch die Bohrdurchmesser bzw. den Ausbau der Bohrungen begrenzt.

Nach Ausbau der Bohrungen zeigt sich, dass sämtliche Aquifere artesische Verhältnisse bei unterschiedlichem Ruhewasserspiegel aufweisen (Abb. 19), weshalb eine direkte hydraulische Verbindung auszuschließen ist.

Die Absenk- und Wiederanstiegsverläufe an der ER 1 und ER 4 sind vergleichbar. In Abbildung 18 ist beispielhaft der Verlauf des Pumpversuches ER4/PV4 (Bohrung ER 4/Pumpversuch 4) dargestellt. Die Aquifere reagieren sensibel auf Entnahme- bzw. Druckänderungen. Der jeweils bepumpte Aquifer reagiert sowohl bei Pumpbeginn als auch bei Änderung der Entnahmerate unmittelbar mit großen Absenkbeträgen, während an den Beobachtungsmessstellen lediglich geringe Beträge zu verzeichnen sind (Abb. 18).

Die Beharrung des Ruhewasserspiegels wurde bei keinem Pumpversuch erreicht, die

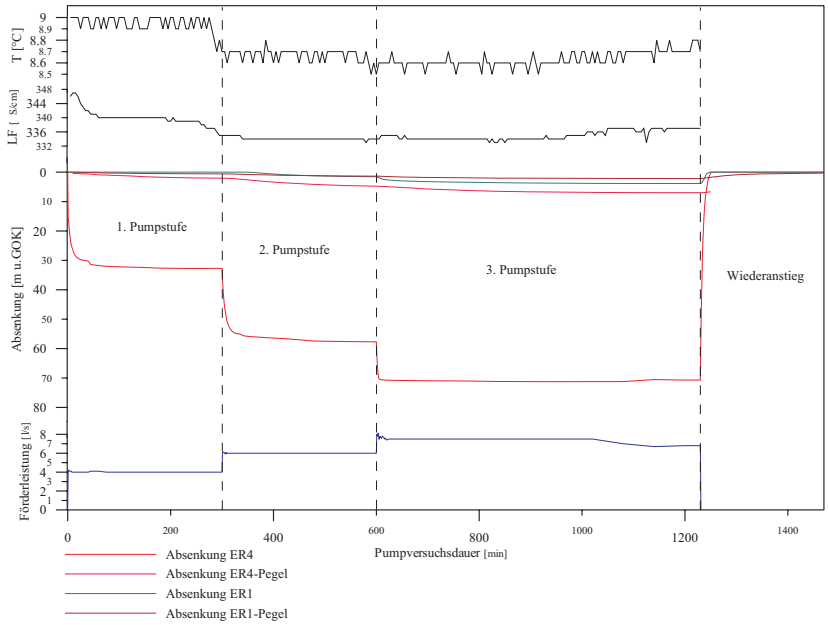


Abb. 18: Exemplarischer Verlauf der Absenkung, des Wiederanstiegs, der Temperatur und der Leitfähigkeit an den Erkundungsbohrungen ER 1 un d ER 4 (am Beispiel ER4/PV4)

Schwankungen betrugen +/- 1 - 5 cm/h, was auf die variierende Förderleistung der Pumpe bei großen Absenkbeträgen sowie die Dauer der Pumpversuche (max. 38 h) zurückzuführen ist.

Die Wiederanstiegszeiten der bepumpten Aquifere betrugen minimal 6 min bis GOK (Absenkung 80,00 m u.GOK).

Die Auswertung der gewonnenen Daten erfolgen nach unterschiedlichen Methoden (AGARWAL 1980, LOGAN 1964, MOENCH 1984), Berechnungen zur Leistungscharakteristik, zum Durchlässigkeitsbeiwert sowie zur Transmissivität werden durchgeführt. In Abbildung 19 ist eine Übersicht der Ergebnisse für die einzelnen Aquifere dargestellt. Bei der Bewertung der Durchlässigkeitsbeiwerte und der Transmissivitäten gilt es zu beachten, dass die Resultate für Kluftwasserleiter eingeschränkte Aussagekraft haben, da lediglich die integrale Charakteristik der Aquifere beschrieben werden kann.

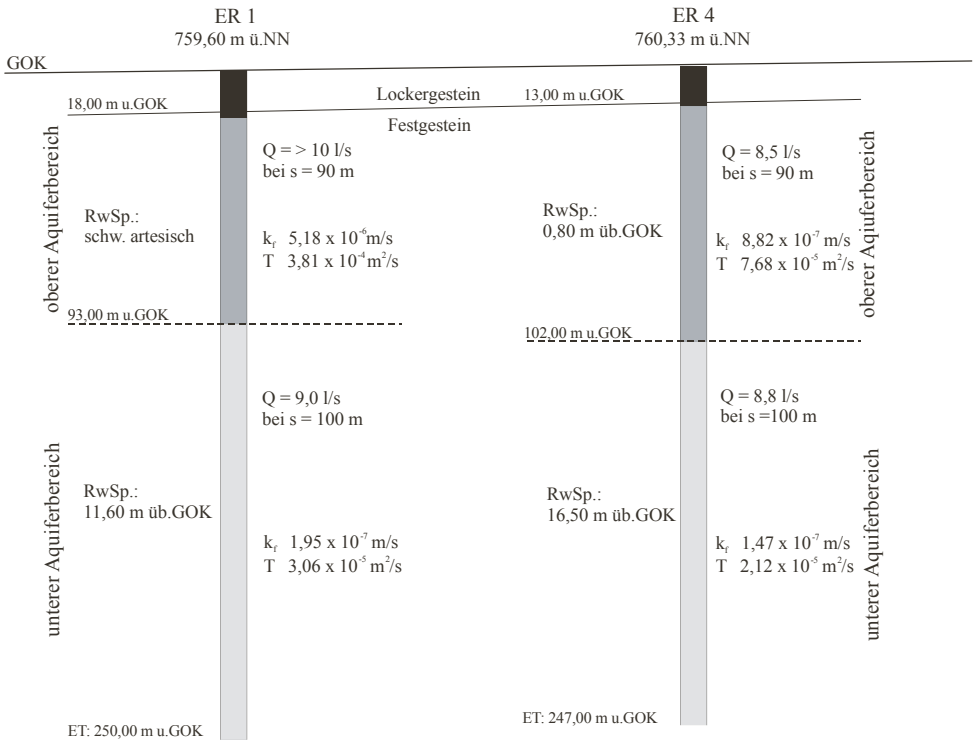


Abb. 19: Ergebnisübersicht der Pumpversuchsauswertungen der Bohrungen ER 1 und ER 4

II.3.3.2.2 Pumptest im Explorationsgebiet Entfeld (ER 3)

An der Bohrung ER 3 wurde lediglich ein kurzer Pumptest nach Erreichen der Endteufe durchgeführt. Aufgrund des geringen Zulaufs von < 3,0 l/s waren keine weiteren Versuche sinnvoll.

II.3.3.3 Geophysikalische Bohrlochuntersuchungen und Kamerabefahrungen

An den Bohrungen ER 1 und ER 4 (Explorationsgebiet Weißgraben) wurden Temperatur-Logs, Leitfähigkeit-Logs, Flowmeter-Logs (Anl. 14.1) sowie Kamerabefahrungen durchgeführt, um durch Korrelation der Methoden Zuflussbereiche lokalisieren und quantifizieren zu können.

II.3.3.3.1 Ergebnisse an der Erkundungsbohrung ER 1

Die Korrelation der Bohrlochgeophysik mit der Kamerabefahrung ermöglicht die Lokalisierung von 9 Zuflussbereiche (Z1/ER1 bis Z9/ER1) in die ER 1.

Die Bereiche zeigen deutliche Temperaturänderungen sowie eindeutige Flowmeterdaten, die auf Kluftwasserzuflüsse schließen lassen. Die Auswertung der Kamerabefahrung zeigt in diesen Zonen offene Klüfte. In Tabelle 13 sowie Abbildung 22 sind diejenigen Zuflusszonen aufgeführt, welche

Zufluss	Teufe	Korrelation mit			
	[m u. GOK]	Temp-Log	Sal-Log	Flow-Log	Kamera
Z1/ER1	115,00 - 123,00	$Z2_{TEMP}$ $Z3_{TEMP}$	--	$Z1_{FLOW}$	$Z4_{KAM}$
Z2/ER1	125,25 - 127,75	$Z4_{TEMP}$	--	$Z2_{FLOW}$	$Z5_{KAM}$
Z3/ER1	130,25 - 131,75	$Z5_{TEMP}$	--	($Z2_{FLOW}$)	$Z6_{KAM}$
Z4/ER1	136,50 - 139,50	$Z6_{TEMP}$	--	$Z3_{FLOW}$	$Z7_{KAM}$
Z5/ER1	156,50 - 159,50	$Z8_{TEMP}$	$Z1_{SAL}$	$Z4_{FLOW}$	$Z8_{KAM}$
Z6/ER1	183,50 - 186,50	$Z12_{TEMP}$	--	$Z5_{FLOW}$	$Z9_{KAM}$
Z7/ER1	206,00 - 208,00	--	--	$Z6_{FLOW}$	$Z10_{KAM}$
Z8/ER1	212,00 - 214,00	$Z14_{TEMP}$	--	$Z7_{FLOW}$	$Z11_{KAM}$
Z9/ER1	227,25 - 230,75	$Z16_{TEMP}$	--	--	$Z12_{KAM}$

Tab .13: Wasserzutritte aus Kluftzonen in der ER1, nach Korrelation der verschiedenen Untersuchungsmethoden

sich aus der zusammenfassenden Bewertung der Methoden ergeben.

In der ER1 liegen ausgeglichene Salinitätsverhältnisse vor (Anl. 14.1), daher lässt sich lediglich die Zone $Z1_{SAL}$ mit dem Flowmeter-, Temperatur-Log und der Kamerabefahrung korrelieren (Z5/ER1; Abb. 22, Tab. 13).

Die Ergebnisse der Flowmetermessungen korrelieren gut mit den Kluftzonen, die über die Auswertung der Kamerabefahrung lokalisiert werden. Lediglich in $Z1_{FLOW}$ sind visuell keine offenen Klüfte nachweisbar, erst in einem etwas tieferen Bereich ist eine erhöhte Klüftigkeit vorhanden ($Z4_{KAM}$). Das TEMP-Log zeigt hier jedoch deutliche Anomalien ($Z2_{TEMP}$, $Z3_{TEMP}$), was auf Zuflüsse aus Kleinklüften und größeren Klüften ($Z4_{KAM}$) zurückzuführen ist. Der Zuflussanteil dieser Zone Z1/ER1 beträgt der Flowmetermessung zufolge 16 % des Gesamtzuflusses.

Bei der singulären Flowmeterauswertung handelt es sich bei den Bereichen $Z3_{FLOW}$ und $Z4_{FLOW}$

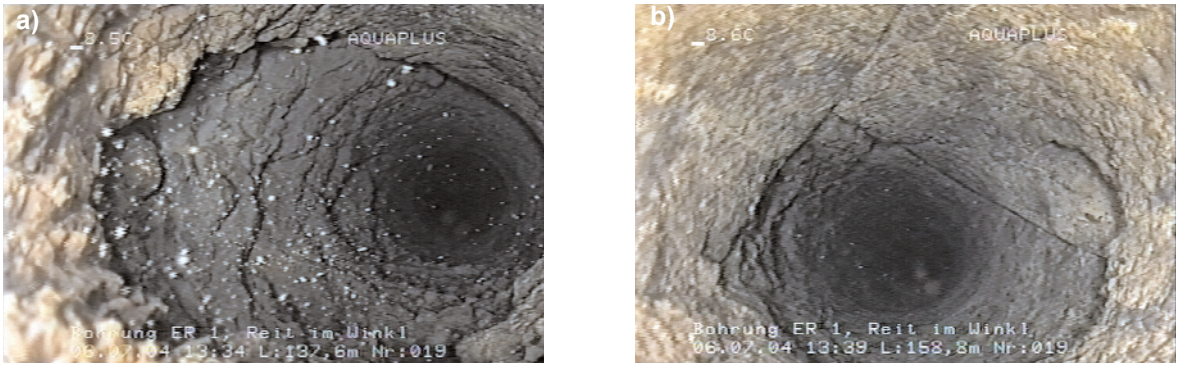


*Abb .20: Bereiche der Hauptzuflüsse in die ER 1; a) **Z4/ER1:** 137,6 m u.GOK, b) **Z5/ER1:** 158,8 m u.GOK*

mit einem Zuflussanteil von je 20 % um die Hauptzuflüsse (Anl. 14.2), die zugeordneten Klüfte sind in Abbildung 20 dargestellt. In der Gesamtauswertung entsprechen sie den Zuflüssen Z4/ER1 und Z5/ER1 (Abb. 22). Es gilt zu beachten, dass auch in Teufen > 200,00 m u.GOK eine deutliche Klüftigkeit des Gebirges vorliegt, welche teilweise Wasser führend ist.

II.3.3.3.2 Ergebnisse an der Erkundungsbohrung ER 4

Mittels Korrelation und gemeinsamer Bewertung der Untersuchungsmethoden können in der Erkundungsbohrung ER 4 insgesamt 14 Zuflussbereiche (Z1/ER4 - Z14/ER4) lokalisiert werden. Im Gegensatz zur Auswertung an der ER 1 weist das Salinitäts-Log in der ER 4 deutlich charakteristische Gradienten auf, die zur Auswertung herangezogen werden können (Anl. 14.1, Abb. 23). So kann hier in Kombination mit den Temperatur- und Flowmeterdaten sowie der Kamerabefahrung die Zuordnung der Zuflusszonen erfolgen. Diese sind in Tabelle 14 und Abbildung 23 zusammengestellt.

Die anhand der Flowmeterdaten ermittelten Zuflusszonen weisen große Übereinstimmungen mit den per Kamerabefahrung erfassten Kluftsystemen überein; diese Zonen können z.T. in Verbindung mit den übrigen geophysikalischen Messungen höher aufgelöst werden (Tab. 14, Abb. 23). Den Zonen $Z2_{FLOW}$ und $Z4_{FLOW}$ sind jeweils zwei Klüfte zuzuordnen. Darüber hinaus können auf diese Weise zusätzliche, untergeordnete Zuflussbereiche lokalisiert werden, welche durch die Flowmetermessung nicht erfasst worden sind, jedoch deutliche Temperatur- und Leitfähigkeitsgradienten zeigen (Z5/ER4, Z6/ER4, Z9/ER4, Z14/ER4).

Die Auswertung der Flowmetermessung zeigt die Hauptzuflüsse in die ER 4 im Bereich $Z4_{FLOW}$ (32 %) und $Z5_{FLOW}$ (22 %) (Anl. 14.2, Abb. 23). Diese Zonen entsprechen in der kombinierten Auswertung den Bereichen Z8/ER4 bzw. Z10/ER4. In Abbildung 21 sind exemplarisch diese Zonen aus der Kamerabefahrung dargestellt.

Zufluss	Teufe	Korrelation mit			
	[m u. GOK]	Temp-Log	Sal-Log	Flow-Log	Kamera
Z1/ER4	19,50 - 21,00	$Z1_{TEMP}$	--	$Z1_{FLOW}$	$Z2_{KAM}$
Z2/ER4	38,50 - 39,00	--	--	$Z2_{FLOW}$	$Z4_{KAM}$
Z3/ER4	42,00 - 43,50	$Z3_{TEMP}$	$Z1_{SAL}$	$Z2_{FLOW}$	$Z5_{KAM}$
Z4/ER4	65,00 - 67,50	--	--	$Z3_{FLOW}$	$Z10_{KAM}$
Z5/ER4	72,00 - 73,50	$Z5_{TEMP}$	$Z2_{SAL}$	--	$Z11_{KAM}$
Z6/ER4	98,50 - 99,00	$Z7_{TEMP}$	$Z3_{SAL}$	--	$Z12_{KAM}$
Z7/ER4	104,00 - 105,50	$Z8_{TEMP}$	$Z4_{SAL}$	$Z4_{FLOW}$	$Z14_{KAM}$
Z8/ER4	109,00 - 111,00	$Z9_{TEMP}$	$Z5_{SAL}$	$Z4_{FLOW}$	$Z15_{KAM}$
Z9/ER4	129,50 - 133,00	$Z10_{TEMP}$	$Z6_{SAL}$	--	$Z17_{KAM}$
Z10/ER4	146,50 - 150,00	$Z11_{TEMP}$	$Z7_{SAL}$	$Z5_{FLOW}$	$Z18_{KAM}$
Z11/ER4	195,50 - 200,00	$Z14_{TEMP}$	$Z8_{SAL}$	$Z6_{FLOW}$	$Z21_{KAM}$
Z12/ER4	205,50 - 207,50	$Z15_{TEMP}$	$Z9_{SAL}$	$Z7_{FLOW}$	$Z22_{KAM}$
Z13/ER4	218,50 - 222,50	$Z16_{TEMP}$	$Z10_{SAL}$	$Z8_{FLOW}$	$Z24_{KAM}$
Z14/ER4	237,00 - 239,00	$Z18_{TEMP}$	$Z11_{SAL}$	--	keine Sicht

Tab. 14: Wasserzutritte aus Kluftzonen in der ER 4, nach Korrelation der verschiedenen Untersuchungsmethoden

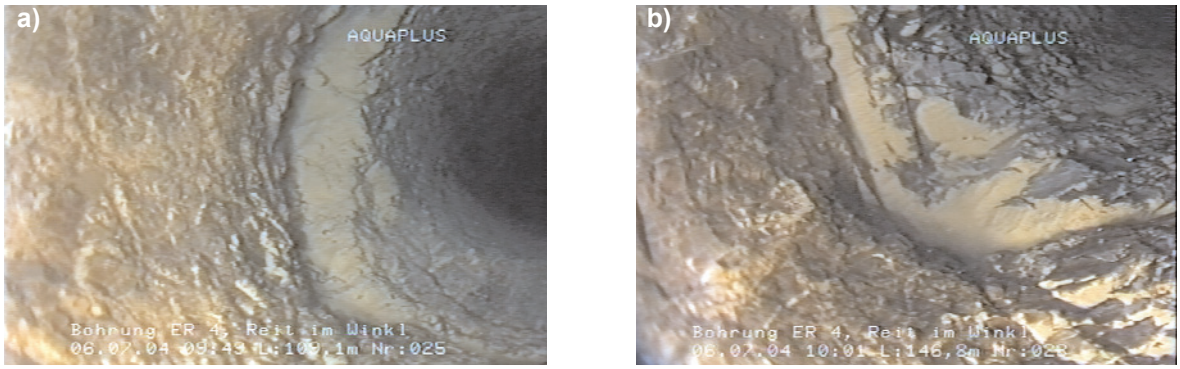


Abb. 21: Bereiche der Hauptzuflüsse in die ER 4; a) ***Z8/ER4:*** *109,1 m u.GOK, b)* ***Z10/ER4:*** *146,8 m u.GOK*

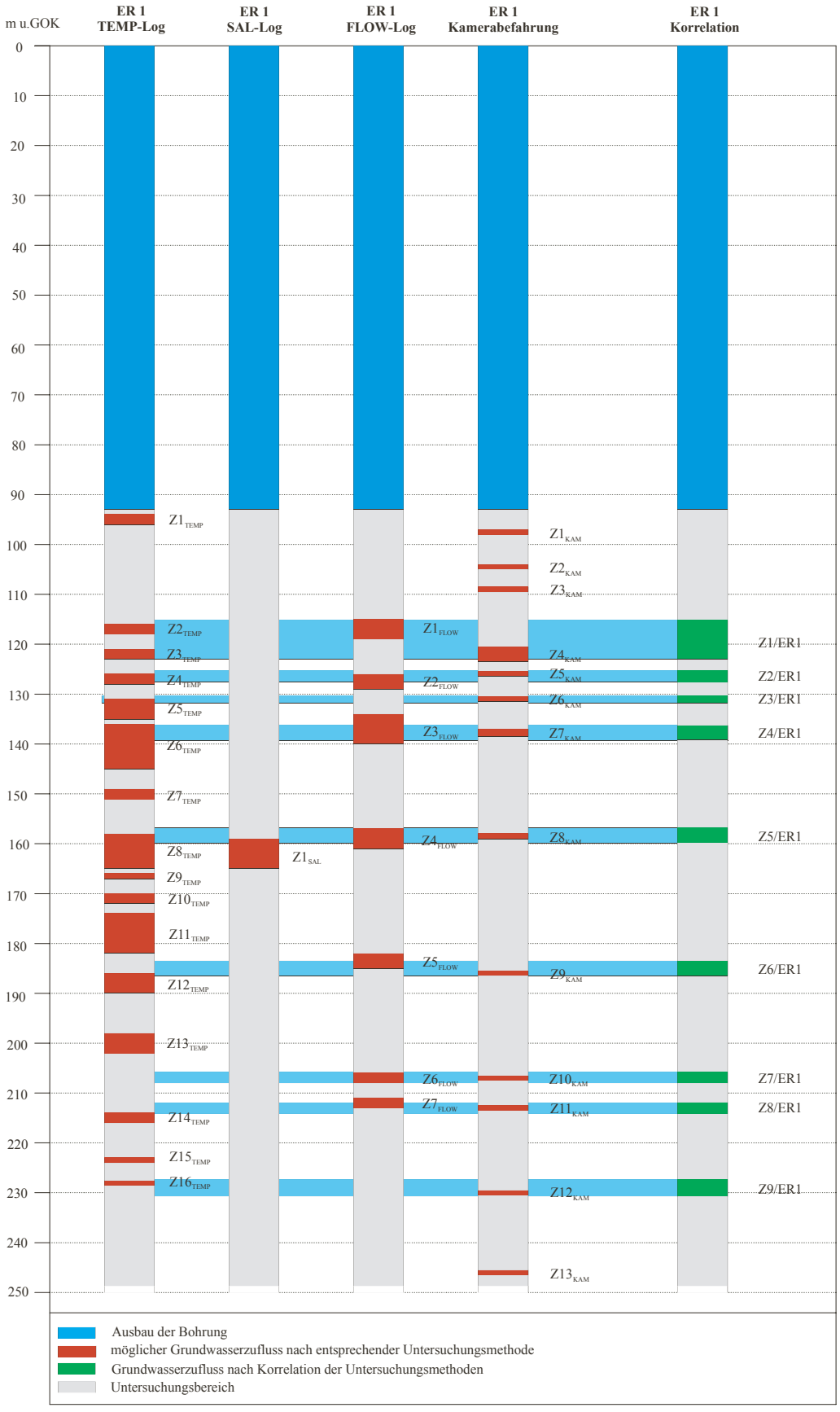


Abb. 22: Korrelation der Untersuchungsmethoden an der ER 1, graphische Darstellung der Zuflussbereiche

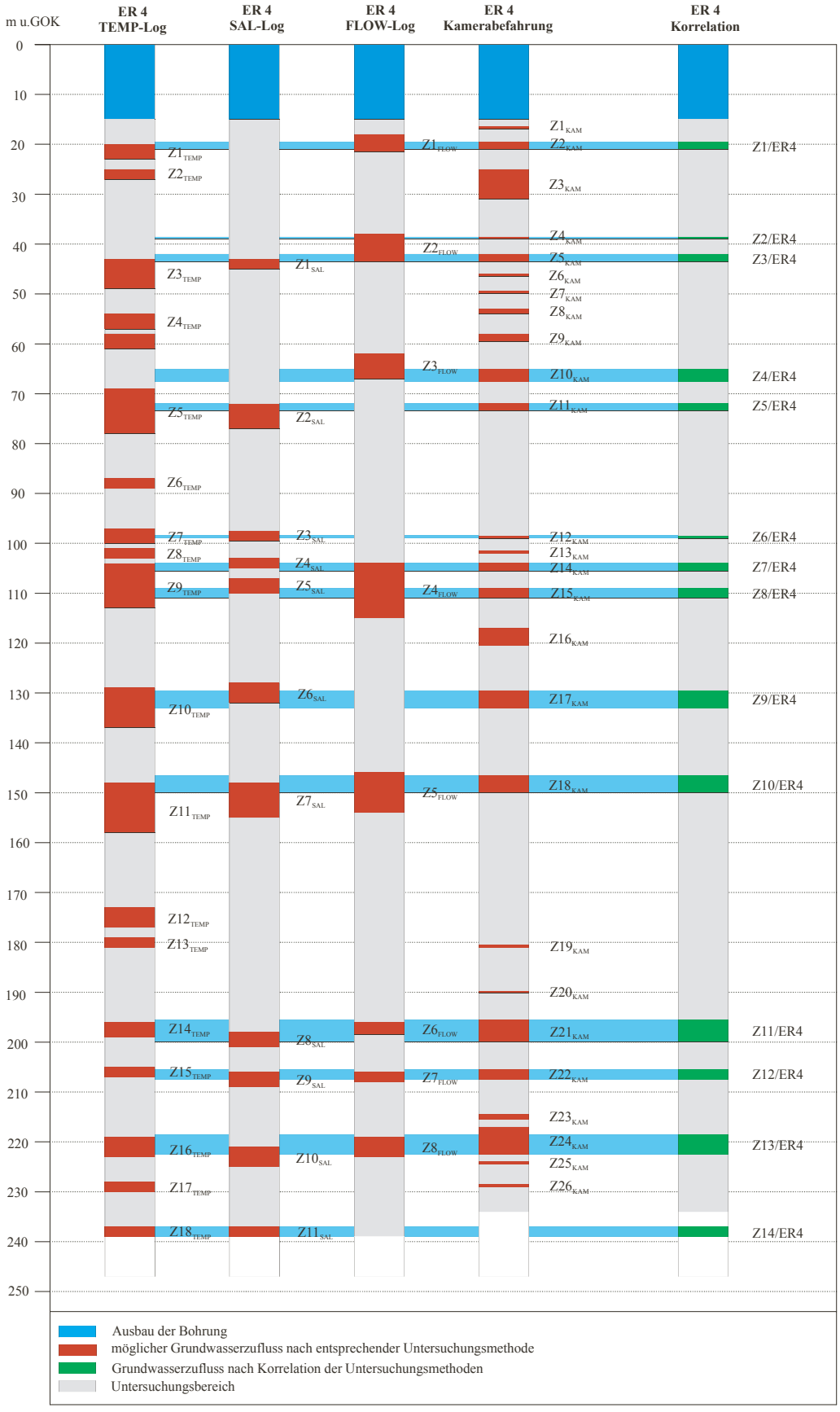


Abb. 23: Korrelation der Untersuchungsmethoden an der ER 4, graphische Darstellung der Zuflussbereiche

II.3.3.4 Grundwassercharakteristik im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl

Im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl wurden im Zuge der Pumpversuche an den Bohrungen ER 1, ER 3 und ER 4 chemisch-physikalische und z.T. mikrobiologische Analysen durchgeführt (Anl. 6.1, 6.3, 6.4, 6.5). Darüber hinaus liegen Analysedaten von Quellen und Brunnen aus der weiteren Umgebung des Untersuchungsgebietes vor (Anl. 6.1, 6.3).

Sämtliche Daten aus dem Untersuchungsgebiet sind im Zweistoff-Diagramm (Ca-Mg) sowie im ternären Diagramm (Ca-Mg-SO_4) dargestellt und klassifiziert (Abb. 24, 25).

Das Untersuchungsgebiet Reit im Winkl liegt in der tektonischen Einheit Tirolikum, die Deckengrenze zur liegenden Lechtal-Decke befindet sich lediglich 500 m N' des Bohrbereiches Weißgraben. Das Explorationsgebiet ist vorwiegend aus Hauptdolomit aufgebaut, im Hangenden folgt der Plattenkalk, im Liegenden die Raibler-Schichten. Die Raibler Schichten könnten, aufgrund der Nähe zur tektonischen Grenze Tirolikum/Lechtal-Decke und der damit einhergehenden Auflockerung des Untergrundes, den Grundwasserchemismus im Bereich der Erkundungsbohrungen ER 1 und ER 4 beeinflussen. Gleiches gilt für den N' der Deckengrenze gelegenen Wettersteinkalk.

Sowohl die Pankratius-Quelle als auch die Rabengschöss-Quelle (Anl. 3.2) lieferten im Vorfeld der Bohrungen erste Erkenntnisse bezüglich der chemisch-physikalischen Charakteristik des Kluftwassers im Explorationsgebiet. Die Rabengschöss-Quelle entspringt einer Hauptdolomitkluft; Wasseranalysen zeigen typischen Dolomitwasser-Chemismus (Abb. 24, 25, Anl. 6.3, 6.6, 6.7). Die Pankratius-Quelle ist ebenfalls im Hauptdolomit gefasst, jedoch kann das Wasser nicht als Dolomitwasser klassifiziert werden. Durch das Ca-Mg-SO_4-Verhältnis ist das Wasser als ein Dolomit-Wasser mit deutlich erhöhtem Ca-Anteil und geringer SO_4-Komponente zu charakterisieren (Abb. 24, 25, Anl. 6.3, 6.6). Der erhöhte Ca-Anteil ist auf Oberflächenwasser-Einfluss zurückzuführen. Die Quellfassung befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Weißgraben, eine Kontamination durch diesen ist wahrscheinlich. Bakteriologische Belastungen und Trübungen bei Starkregenfällen bestätigen die Annahme.

Die Klassifizierung der erschlossenen Kluftwässer der ER 1 und ER 4 identifizieren sie eindeutig als Dolomitwässer (Abb. 24, 25). Die Wässer weisen ein für Dolomitwasser nahezu ideales Ca/Mg-Verhältnis (in mmol/l-Konzentrationen) von 0,99 bis 1,13 auf (Anl. 6.3) sowie keine signifikanten Sulfatwerte. Eine Kontamination der getesteten Aquifere während der Pumpversuche durch den Weißgraben lässt sich durch Vergleichsanalysen ausschließen (Anl. 6.3).

Der Chemismus der Analysen an der ER 1 und ER 4, die aus unterschiedlichen Teufen und variierenden Förderraten stammen, weisen alle einen sehr ähnlichen Chemismus auf (Tab. 15). Lediglich die Probe ER1/PV1-Probe 1 zeigt leicht abweichende Werte (erhöhter Kalzium- und Sauerstoff-Wert); diese Probe wurde direkt am Beginn des Pumpversuches (zu testender Bereich 18,00 - 91,50 m u.GOK) genommen.

Sämtliche Proben aus der ER 1 und ER 4 erfüllen alle die geforderten Grenzwerte nach TrinkwV 2001 und DIN 50930 (Anl. 6.2). Lediglich die Probe ER4/PV3 überschreitet den Trübungsgrenzwert (1,0 NTU) mit einem Wert von 1,03 NTU. Die zum Zeitpunkt der Probennahme durchgeführten Pumpversuche wiesen kurze Pumpzeiten auf, wodurch die Bohrung noch nicht freigepumpt worden war. Bei dem letzten Pumpversuch im ausgebauten Zustand (ER4/PV5) lag ein Trübungswert von 0,02 NTU vor, welcher für einen Kluftwasserleiter charakteristisch ist.

Der Chemismus des geförderten Kluftwassers aus der ER 3 zeigt, im Vergleich zur ER 1 und ER 4 einen deutlich unterschiedlichen Chemismus, es handelt sich um ein sehr hoch mineralisiertes Wasser (Tab. 5, Anl. 6.3). Die mit 637 bzw. 659 mg/l hohe Sulfatkonzentration würde für ein Raibler-

Parameter	Einheit	ER1/PV1-Probe1	ER1/PV1-Probe2, ER1/PV3	ER3/PV1, ER3	ER4/PV1-5	Weißgraben (Bachlauf)
Leitfähigkeit	µS/cm	331	318 - 334	2778 - 2912	332 - 339	305
pH-Wert (vor Ort)		8,23	7,77 - 7,86	7,52 - 7,68	7,5 - 7,84	8,56
Sauerstoff	mg/l	8,4	5,0 - 5,2	0,2 - 1,5	4,8 - 6,2	n.a.
Gesamthärte	°dH	13,3	11,2 - 11,3	73,7 - 79,5	11,3 - 11,9	11,1
Gesamtmineralisation	mg/l	323	304 - 313	1991 - 2008	312 - 318	294
Ca	mg/l	54,3	42,1 - 44,0	229,0 - 241,0	41,1 - 43,8	54,1
Mg	mg/l	25	22 - 23,3	181 - 199	24,0 - 24,4	15,4
SO_4	mg/l	4,1	2,2 - 9,4	637 - 659	8,5 - 10,6	16,0
Nitrat	mg/l	1,6	1,5 - 1,8	< 1	2,2 - 2,5	3,6

Tab. 15: Gegenüberstellung ausgewählter Parameter der Wasseranalysen an den Erkundungsbohrungen (Gesamtanalysen sind in Anlage 6.3 aufgeführt)

Rauhwacken-Wasser sprechen. Jedoch wird bei der Darstellung im ternären Diagramm (Abb. 25) deutlich, dass die Analysen nicht durch die definierten Klassifikationsfelder zu charakterisieren sind. Im Wasser der ER 3 ist eine auffallend hohe Konzentration von Natrium (194 bzw. 209 mg/l) und Chlorid (552 bzw. 608 mg/l) nachzuweisen. Diese ist für Raibler-Rauwacken-Wasser untypisch, da die Raibler Schichten im Untersuchungsgebiet nicht die hohen Evaporitfolgen (Chlorid-Folge) erreichen. Weiter sind die Grenzwerte nach der TrinkwV 2001 bei den Parametern Eisen und Mangan überschritten. Aufgrund des auffallenden Chemismus wurden ergänzend zum Standard-Analyseprogramm zusätzliche Parameter untersucht (Anl. 6.5), die jedoch keine gesicherteten Hinweise auf die Herkunft des Grundwassers geben.

Sämtliche mikrobiologische Analysen während der Pumpversuche an der ER 1 und ER 4 (Parameter: E.coli, coliforme Keime, Enterokokken und Clostridium perfringens) erfüllen die Grenzwerte nach TrinkwV 2001 (Anl. 6.2). In der Probe ER1/PV3-Probe1 wurden 15 KBE coliforme Keime (Kolonienzahl bei 22°C), bei der Probe ER1/PV3-Probe2 1 KBE sowie bei der Probe ER4/PV1-Probe2 1 KBE nachgewiesen (Grenzwert nach der TrinkwV 2001 100 KBE). Die übrigen Proben liefern hinsichtlich der untersuchten Parameter Null-Ergebnisse. Die vollständigen Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen sind in Anlage 6.4 aufgeführt.

Die erschlossenen Kluftwässer weisen in Bezug auf chemisch-physikalische sowie hygienische Grenzwerte sehr gute Trinkwasserqualität auf.

Bei der Bewertung der hygienischen Untersuchungen ist zu berücksichtigen, dass die Proben lediglich nach kurzen Pumpzeiten genommen wurden. Gesicherte Aussagen über die hygienische Qualität des Kluftwassers lassen sich erst während der Durchführung eines Langzeitpumpversuchs treffen.

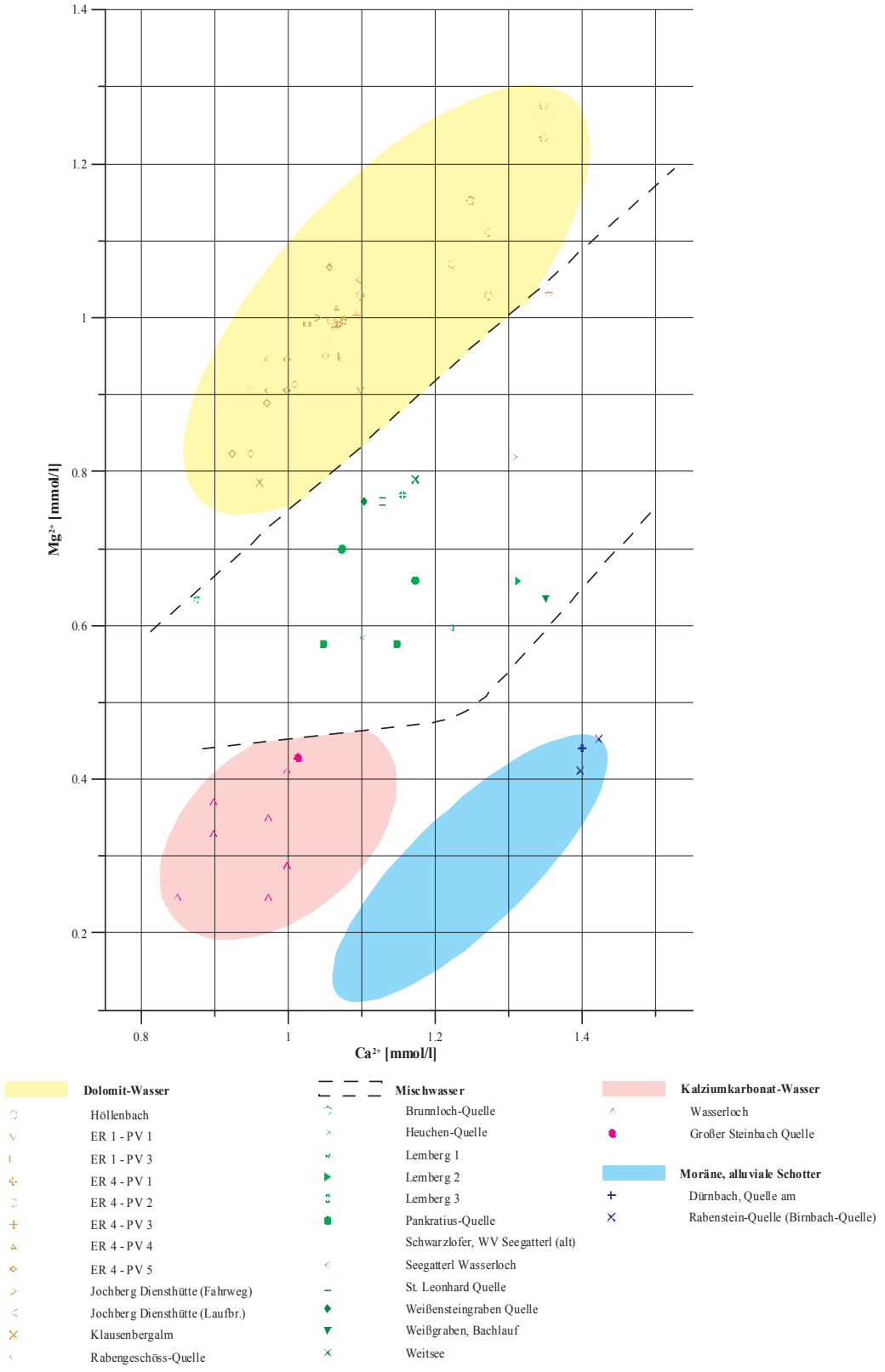


Abb. 24: Klassifikation der chemisch-physikalischen Analysen im Zweistoff-Diagramm (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl)

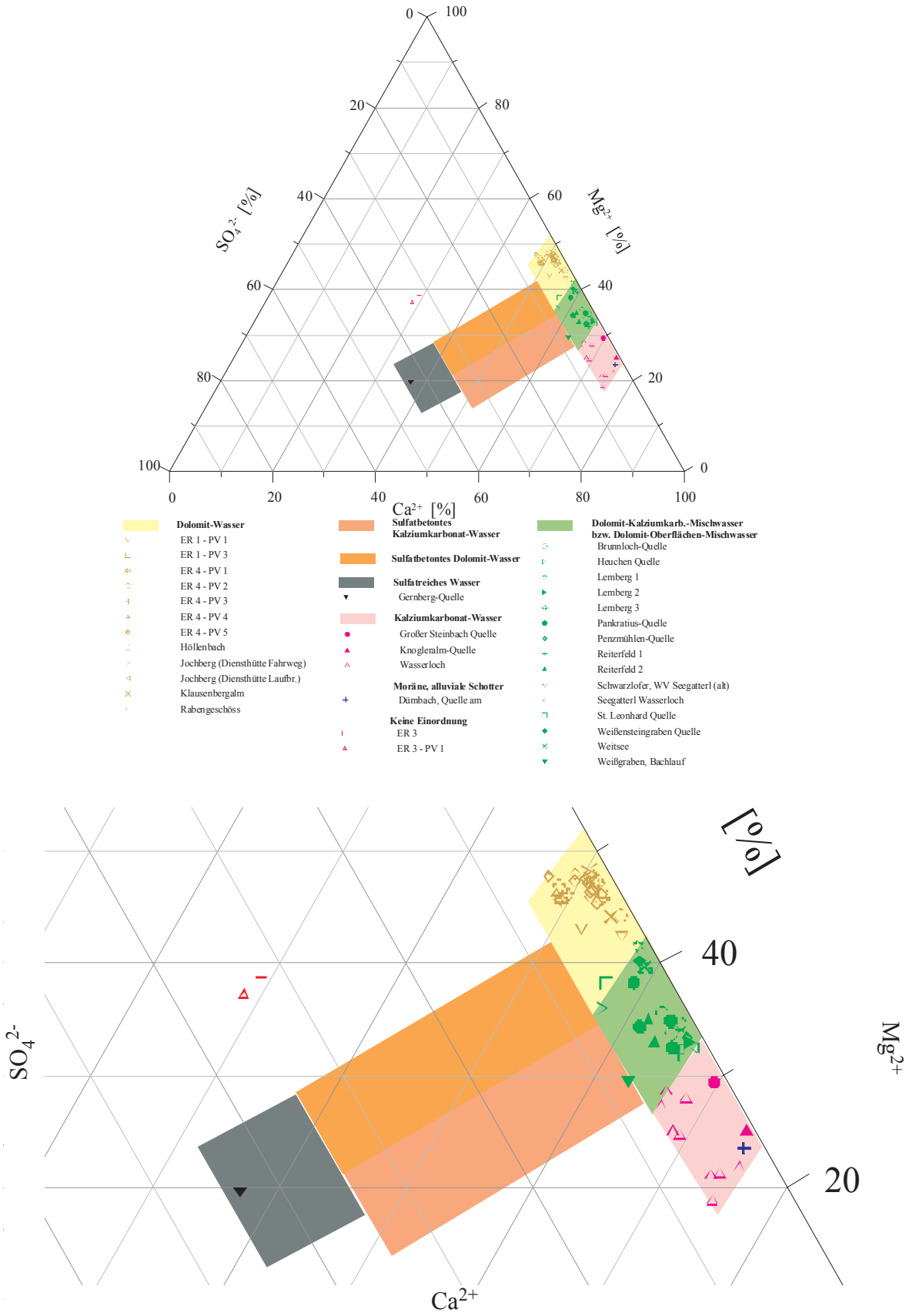


Abb. 25: Klassifikation der chemisch-physikalischen Analysen im Dreistoff-Diagramm (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl)

II.3.3.5 Klimatologie und klimatische Wasserbilanz im Einzugsgebiet EZG_o Weißgraben

Für das oberirdische Einzugsgebiet EZG_o Weißgraben (Bohrungen ER 1 und ER 4) wurde ein Klimamodell berechnet, um den Anteil des Niederschlags zu quantifizieren, der zur Grundwasserneubildung sowie zum Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet beiträgt (klimatische Wasserbilanz P_0, DIN 4049, Teil 3, 1.5.2). Bedingt durch nicht erhobene Abflussdaten des Weißgrabens konnte eine vollständige hydrologische Bilanzierung Hy_{Bil} (im Gegensatz zum EZG Sagenbachtal) nicht durchgeführt werden.

Die in die Modellierung eingehenden Parameter sowie die verwendeten Berechnungsmethoden sind in Kap. II.1.1 erläutert. Die Geländeparameter der zur Auswertung herangezogenen Messstationen sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Das als Berechnungsgrundlage verwendete Einzugsgebiet Weißgraben (EZG_o Weißgraben) umfasst eine Größe von insgesamt 6,48 km^2 (Anl. 3.1, 3.2). Die Reliefenergie beträgt 692 m (min. 759 m ü.NN, max. 1451 m ü.NN).

Station	Höhe	Lage	Erfassungszeitraum	
	m ü.NN	Länge/Breite WGS/84	Temperatur	Niederschlag
Oberwössen/ Hinterwössen	650	L 12°28' B 47°42'	--	1963-1998
Reit im Winkl	672	L 12°27' B 47°40'	1963-1998	1963-1998
Schwarzenkopfhütte	1336	L 11°54' B 47°39'	--	1963-1998
Rauschberg b. Ruhpolding	1640	L 12°41' B 47°44'	1963-1998	--

Tab 16: Lage der Temperatur- und Niederschlagsmessstationen sowie verwendeter Datenbereich für das EZG_o Weißgraben

Die monatlichen Niederschlags- sowie Temperaturgradienten werden geländeabhängig auf Datenbasis der Messstationen (Tab. 16) berechnet (Kap. II.1.1.3 und II.1.1.4, Anl. 11.1). Mittels des DGM erfolgt zudem die Modellierung der spezifischen Niederschlags- und Temperaturverteilung (Abb. 26), sowie die kumulativen Gebietsniederschlagsmengen.

Die jährliche Gebietsniederschlagshöhe P des EZG_o Weißgraben beträgt 1868 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur 5,3°C. Die Werte der gemittelten, monatlichen Gebietsniederschlagshöhen und Temperaturen sowie deren Minima und Maxima (begründet durch die morphologische Gliederung) sind in Tabelle 17 aufgeführt. Darüber hinaus ist das ΔP und ΔT zwischen niedrigstem und höchstem morphologischem Punkt im Einzugsgebiet berechnet (Tab. 17), hier wird die Auswirkung der variierenden monatlichen Niederschlags- und Temperaturgradienten deutlich. Die Temperaturen weisen im Dezember/Januar, die Niederschlagsverteilung von September bis November die ausgeglichensten Werte auf. Die Temperaturverteilung im Jahresverlauf (Januar-Dezember) ist für das EZG_o Weißgraben in Form isochromatischer Karten modelliert (Anlage 11.2).

Die ebenfalls geländeabhäng ermittelte potenzielle Evapotranspiration (nach BLANEY & CRIDDLE 1950 mit Korrektur nach SCHRÖDTER 1985) weist einen durchschnittlichen Jahreswert von 1043 mm, die Monatswerte sowie die Minima und Maxima sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Anhand der Berechnungen zur Niederschlags-, Temperatur- und potentiellen Evapotranspirations-Verteilung lässt sich mit der klimatischen Wasserbilanz P_0 (P_0 = P - ET_p) der Teil des Gebietsniederschlages ermitteln, welcher für die Grundwasserneubildung und den Oberflächenabfluss verfügbar ist . Es ergeben sich über das gesamte Einzugsgebiet gemittelt 825 mm im Jahr (Tab. 17) bzw. kumulativ 2,35 Mio m^3 (Anl. 11.3). In Anlage 11.4 ist die höhendifferenzierte P_0-Verteilung im EZG Weißgraben durch isochromatische Karten (Jan. - Dez.) dargestellt.

Die für die Durchführung einer vollständigen hydrologischen Bilanzierung (Hy_{Bil}, vgl. Kap. II.2.3.6) zusätzlich notwendigen Parameter Oberflächenabfluss Q und oberflächennaher Grundwasserabfluss Q_i liegen für das EZG_o Weißgraben nicht vor, weshalb dieser Bilanzierungschritt im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht vorgenommen kann.

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Gebietsniederschlag P [mm]													
Min P	116,98	98,81	124,70	132,69	141,76	208,78	211,45	200,81	133,57	101,60	126,30	126,11	1723,56
Max P	159,31	137,12	150,74	165,87	179,44	241,69	248,44	227,90	146,74	117,39	138,90	159,36	2072,90
Δ P	42,32	38,31	26,05	33,18	37,68	32,90	36,99	27,09	13,16	15,79	12,61	33,25	349,33
Ø P	134,52	114,68	135,49	146,12	157,40	222,41	226,77	212,03	139,03	108,14	131,52	139,88	1867,99
Temperatur T [°C]													
Min T	-3,46	-3,01	-1,04	1,97	6,97	9,84	12,25	12,07	9,31	6,05	0,64	-2,81	4,07
Max T	-3,11	-2,04	1,25	5,09	10,44	13,44	15,51	14,91	11,66	7,09	1,33	-2,39	6,16
Δ T	0,35	0,97	2,29	3,12	3,46	3,60	3,26	2,84	2,36	1,04	0,69	0,42	2,03
Ø T	-3,32	-2,44	0,30	3,80	9,00	11,95	14,16	13,73	10,69	6,66	1,05	-2,63	5,25
potenzielle Evapotranspiration ET_p [mm]													
Min ET_p	37,68	40,29	59,9	77,57	112,20	126,97	140,12	127,42	98,96	77,50	49,45	37,64	984,88
Max ET_p	38,63	43,03	67,37	90,05	128,11	143,73	155,47	139,69	107,70	80,95	51,37	38,73	1084,82
Δ ET_p	0,95	2,75	8,28	12,48	15,91	16,76	15,35	12,27	8,74	3,45	1,92	0,05	98,90
Ø ET_p	38,07	41,89	63,94	84,88	121,52	136,79	149,11	134,61	104,08	79,52	50,57	38,09	1043,07
Klimatische Wasserbilanz P_0 [mm]													
Min P_0	79,31	55,78	57,33	54,64	13,65	65,06	55,98	61,12	25,88	20,65	74,93	88,47	640,78
Max P_0	120,38	96,83	91,65	88,31	67,24	114,72	108,32	100,48	47,78	39,89	89,45	120,63	1085,98
Δ P_0	41,38	41,05	34,32	45,66	53,60	49,66	52,34	39,36	21,90	19,24	14,52	32,16	445,19
Ø P_0	96,45	72,79	71,55	61,56	35,85	85,63	77,66	77,42	34,95	28,62	80,95	101,79	825,22

Tab. 17: Berechnete Gebietsniederschlagshöhen P, Temperaturen T, potenzielle Evapotranspiration ET_p und klimatische Wasserbilanz P_0 für das EZG_o Weißgraben

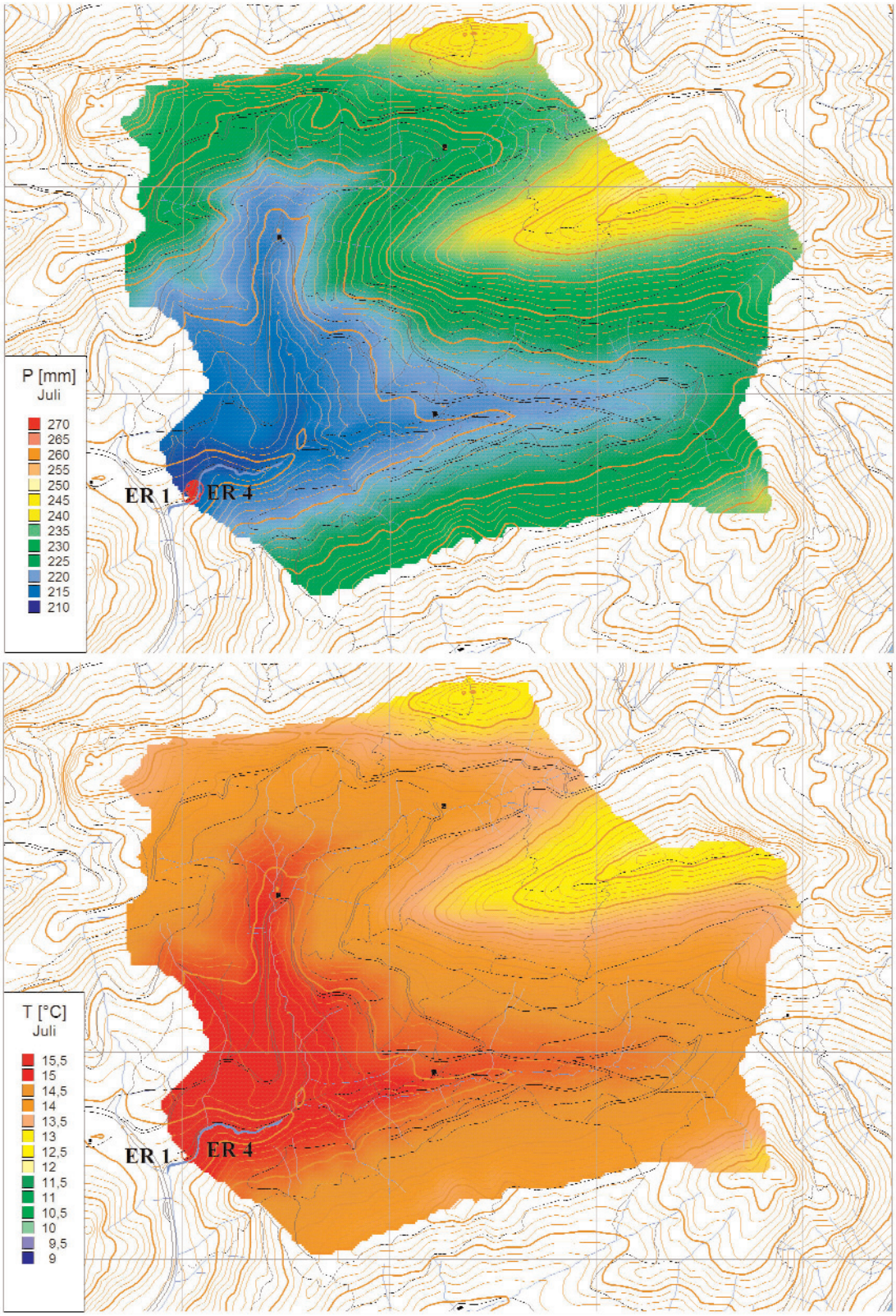


Abb. 26: Niederschlags- und Temperaturverteilung im Einzugsgebiet Weißgraben (Beispielmonat Juli)

II.3.4 Beurteilung der geohydraulischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl

Unter dem Aspekt einer möglichen Kluftwassererschließung zur Trinkwassergewinnung ist die Erkundung im Explorationsgebiet Weißgraben als erfolgreich zu bezeichnen; im Explorationsgebiet Entfeld ist nach Bewertung der Ergebnisse eine Trinkwassergewinnung nicht möglich.

Die im Zuge der Vorerkundung erfassten geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse im Explorationsgebiet Weißgraben konnten durch die Bohrarbeiten, Pumpversuche und geophysikalischen Untersuchungen bestätigt werden. In der Vorerkundung wurde eine durch junge Störungssysteme zerrüttete Hauptdolomitzone nachgewiesen, welche Wegsamkeiten für Kluftgrundwasser vermuten ließ. Im Bohrbereich Weißgraben können bis zu einer Teufe von 250,00 m u.GOK offene, Wasser führende Klüfte erschlossen werden. Geophysikalische Untersuchungen und Kamerabefahrungen ergeben, dass die Hauptzuläufe in die Bohrungen an lokal eng begrenzte Bereiche gebunden sind. Die Öffnungsweiten der Klüfte innerhalb der Zulaufbereiche können anhand der Kamerabefahrungen abgeschätzt werden, sie liegen mit maximal 10 - 20 cm im Zentimeterbereich. Zwischen den Zulaufzonen befinden sich kompakte Bereiche von mehreren Zehner Meter Mächtigkeit, die durch Feinklüftung charakterisiert sind.

Die Bohrungen ER 1 und ER 4 weisen eine räumliche Distanz von 32,80 m auf. Die gemessenen hydraulischen Eigenschaften in den Bohrungen zeigen neben Parallelen auch deutliche Differenzen. Im derzeitigen Ausbauzustand (Anl. 8.1, 8.3) erfolgen die Wasserzutritte in den tieferen Aquiferabschnitten (ER 1 93,00 - 250,00 m u.GOK; ER 4 103,00 - 247,00 m u.GOK) unter artesischen Bedingungen. Am 06.10.04 wurde an der ER 1 ein Ruhewasserspiegel von 11,60 m üb.GOK, an der ER 4 von 16,50 m üb.GOK sowie an der ER4-Gw-Messstelle (13,00 - 60,00 m u.GOK) von 0,80 m üb.GOK gemessen. An der ER1-Gw-Messstelle (15,00 - 45,00 m u.GOK) ist kein Manometer installiert, weshalb hier keine Quantifizierung des Überdrucks möglich ist. Es ist jedoch ein leichter artesischer Überdruck vorhanden. Vor Beginn des Abteufens der ER 4 lag an der ER 1 mit ca. 13,50 üb.GOK ein höherer Ruhewasserspiegel vor, weshalb von einer hydrostatischen Verbindung zwischen den Bohrungen auszugehen ist.

An der Bohrung ER 1 stellten sich ab einer Teufe von ca. 130,00 - 145,00 m u.GOK artesische Verhältnisse ein. Ab dieser Teufe war ein Überlauf von ca. 1,5 l/s vorhanden. In der ER 4 war spätestens ab einer Teufe von 70,00 m u.GOK ein artesischer Überlauf von ca. 3 l/s vorhanden.

Die Auswertungen der Absenk- und Wiederanstiegsverläufe der Pumpversuche an der ER 4 legen den Schluss einer bestehenden hydrostatischen Vervindung nahe, nicht aber einer direkten hydraulischen Verbindung beider Bohrungen. Die Grundwassermessstellen zeigen während der Pumpversuche an der ER 4 zwar deutliche Reaktionen, die Absenkbeträge innerhalb der Messstellen weisen jedoch im Vergleich zum Pumpbrunnen geringe Beträge auf. Basierend auf der Auswertung der Pumpversuchdaten lassen sich innerhalb beider Bohrungen jeweils zwei Aquiferbereiche unterschieden, die über eine hydrostatische Verbindung verfügen. Die Ursache liegt in der Zugehörigkeit der Aquiferbereiche zu unterschiedlichen Kluftsystemen; über die Vernetzung durch Feinstklüfte erfolgt (Klüfte 3. Ordnung, Kluftweiten im Bereich von 50 μm) die hydrostatische Verbindung, welche jedoch nicht hydraulisch wirksam ist.

Während der Explorationsarbeiten wurden sowohl die höheren als auch die tieferen Aquiferbereiche getestet, wobei die tieferen Aquiferbereiche (> ca. 100,00 m u.GOK) detaillierter untersucht wurde, da hier der Trinkwasserschutz in hohem Maße gewährleistet ist. Die erfolgte Auswertung der Pumpversuche hinsichtlich ihrer Leistungscharakteristik ergibt an der ER 1 für den

Teufenbereich von 93,00 - 250,00 m u.GOK eine mögliche Entnahmemenge von ca. 9,0 l/s (Absenkung 100,00 m). An der ER 4 (Teufenbereich 102,00 - 247,00 m u.GOK) ist bei einer Absenkung von 100,00 m eine kontinuierliche Entnahme von ca. 8,5 l/s zu erwarten. Rechnerisch kann bei einer gemeinsamen Nutzung der tieferen Aquifere der Bohrungen ER 1 und ER 4 eine maximale Förderung von 17,5 l/s (bei einer Absenkung auf 100 m) angenommen werden. Die Ermittlung der Höhe tatsächlicher Entnahmemengen bei Förderung aus beiden Bohrungen ist jedoch erst über die Durchführung weiterer Pumpversuche möglich.

Über die oberen Aquiferbereiche lassen sich lediglich eingeschränkt Aussagen treffen, da der Verlauf der Pumpversuche eine detaillierte Auswertung nicht ermöglicht. Für den Aquiferbereich der ER 1 von 15,00 - 93,00 m u.GOK kann basierend auf den vorliegenden Daten eine maximale Förderleistung von > 10 l/s (Absenkung ca. 80,00) abgeschätzt werden. Der im höheren Aquiferbereich der ER 4 (13,00 - 102,00 m u.GOK) durchgeführte Packer-Pumpversuch kann aufgrund von Umläufigkeiten nicht zur Auswertung herangezogen werden. Daher basiert die Abschätzung der Ergiebigkeit ausschließlich auf den Pumpversuchen über den gesamten Aquiferbereich sowie den Pumpversuchen des tieferen Aquiferbereiches. Es ist eine Entnahmemenge von 8,5 l/s zu erwarten (bei einer Absenkung auf ca. 90 m u.GOK).

Um potenzielle Entnahmemengen aus den Erkundungsbohrungen im Bohrbereich Weißgraben unter Berücksichtigung der Grundwasserneubildung beurteilen zu können, ist eine Oberflächenwasserabfluss-Pegel am Weißgraben zu installieren. Erst mit diesen Abflussdaten ist es möglich, eine hydrologische Gesamtbilanzierung des Einzugsgebietes Weißgraben zu erstellen.

Die ermittelten Quantitäten der höheren und tieferen Aquiferbereiche der ER 1 und ER 4 sind für eine Gewinnung zur Trinkwasserversorgung interessant. Im weiteren Verlauf muss mit Hilfe von Langzeit-Pumpversuchen, chemisch-physikalischer sowie mikrobiologischer Analysen untersucht werden, ob der Trinkwasserschutz gewährleistet ist. Dies gilt in besonderem Maße für die höheren Aquiferbereiche. Da im derzeitigen Ausbauzustand der ER 1 und ER 4 die weitere Untersuchung des höheren Bereiches nicht möglich ist, würde sich im Explorationsgebiet Weißgraben eine weitere Grundwassermessstelle anbieten. Die Bohrung für die Grundwassermessstelle müsste jene Teufe erreichen, die den gesamten abgesperrten Bereich der Bohrungen ER 1 und ER 4 umfasst (je nach Positionierung 100,00 - 110,00 m u.GOK).

Die vorliegenden geologischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen sind im Hinblick auf den Grundwasserschutz als ideal anzusehen. Im direkten Fassungsbereich bietet die Lockergesteinsüberdeckung (> 8 m mächtige Tonschicht) einen sehr guten Trinkwasserschutz. Die artesischen Verhältnisse schließen dabei eine negative Beeinflussung durch Oberflächenwasser im weiteren Fassungsbereich aus. Begründet durch das spezielle Kluftsystem im Hauptdolomit, die anisotropen hydraulischen Verhältnisse während der Pumpversuche, die chemisch-physikalische Charakteristik (typisches Dolomitwasser ohne Mischkomponenten) sowie der mikrobiologischen Negativbefunde, ist von einer hohen Verweildauer des Grundwassers im Kluftkörper Hauptdolomit auszugehen. Durch Vergleich der chemisch-physikalischen Analysen aus den Bohrungen (während der Pumpversuche) mit den chemisch-physikalischen Befunden aus dem Bachlauf des Weißgrabens kann eine Zumischung von Bachwasser ausgeschlossen werden.

Bei der Betrachtung des Kluftaquifers im großräumigen Untersuchungsgebiet ist die Rabengschöss-Quelle und der Weitsee (an der B 305 Reit im Winkl - Ruhpolding) (Anl. 3.2) von Interesse. Die Rabengschöss-Quelle ist eine aufsteigende Kluftquelle im Hauptdolomit, welche im Jahresverlauf keine große Schwankungen aufweist; die Schüttung liegt bei ca. 3,5 l/s. Der Weitsee (Anl. 3.2) wird durch Quellaustritte im Untergrund gespeist, daher kann der Wasserspiegel des

Weitsees als Ruhewasserspiegel eines großräumigen Aquifers angesehen werden. In Tabelle 18 sind die absoluten Höhen der Ruhewasserspiegel des Weitsees, der Rabengschöss-Quelle und der abgeteuften Bohrungen aufgeführt. Diese Daten belegen, dass innerhalb des Hauptdolomitkörpers von sehr heterogenen Grundwasserverhältnissen auszugehen ist. Eine weiträumige Korrelation verschiedener Grundwassermessstellen bzw. Modellierung eines Gesamtaquifers ist schwer umzusetzen. Bereits die Korrelation innerhalb eines lokal sehr eng begrenzten Gebiet (Bohrungen Reit im Winkl, Rabengschöss-Quelle) ist kaum möglich. Aus den in Tabelle 18 aufgeführten Daten lässt sich eine unterirdische Kluftgrundwasserscheide im Bereich des Reitberges ableiten (Anl. 3.2), die Grundwassergleichen würden in Richtung Weitsee und in Richtung Weißgraben abfallen. Um detaillierte Aussagen zu treffen, müsste jedoch ein engeres Messstellennetz zur Verfügung stehen.

	Gauß-Krüger-Koordinaten		Ruhewasserspiegel
			[m ü.NN]
Weitsee	45.42.803,55	52.83.339,05	754,29
Rabengschöss-Quelle	45.38.181,84	52.83.168,04	803,05
ER 1	45.38.041,20	52.83.509,44	771,20
ER 4	45.38.056,43	52.83.538,48	776,83
ER4-Gw-Messstelle	45.38.056,43	52.83.538,48	761,13

Tab. 18: Ruhewasserspiegel ausgewählter Grundwassermessstellen

Teil III

Bewertung und Folgerungen auf Grundlage der Erschließung von Trinkwasser aus dem Hauptdolomit in den Nördlichen Kalkalpen

III.1 Geologische und strukturgeologische Voraussetzungen zur Erschließung von Trinkwasser aus dem Hauptdolomit

III.1.1 Großräumige sowie detaillierte geologische und strukturgeologische Vorerkundung

Für die Durchführung von Trinkwassererschließungen aus dem Hauptdolomit sind detaillierte Kenntnisse hinsichtlich der strukturgeologischen wie geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet unabdingbar. Mittels der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Vorerkundungen lassen sich bereits im Vorfeld der Bohrungen erste Rückschlüsse auf mögliche Störungssysteme bzw. Kluftgrundwasser-Wegsamkeiten ziehen.

Anhand der Analyse von Satellitenbildern sowie Luftbildern werden weiträumige Hauptdolomitgebiete herausgearbeitet, welche im Bereich von Störungssystemen der jüngsten Bewegungsphasen (Spät-Miozän) der alpinen Tektonik liegen, die bis in den Flysch und die Molasse hineinreichen (Ratschenbacher et. al 1991b, Schweigl & Neubauer 1997, Peresson & Decker 1997). An diesen großräumigen Seitenverschiebungen treten extensive Kluftsysteme auf, die Wegsamkeiten für Kluftwasser bieten.

In einem nächsten Schritt erfolgt die weitere Eingrenzung des großräumigen Untersuchungsgebietes. Über detaillierte stereoskopische Auswertungen der Luftbilder im Umfeld der jungen Störungssysteme sowie durch Gefügemessungen im Gelände lassen sich Zonen eingrenzen, in welchen mit einer hohen Auflockerung des Untergrundes durch offene Kluftsysteme zu rechnen ist.

Die Bewertung der räumlichen Verbreitung des Hauptdolomites sowie der liegenden und hangenden lithologischen Einheiten lässt eine erste qualitative Abschätzung bezüglich des Grundwasserdargebotes und darüber hinaus Rückschlüsse auf den zu erwartenden Grundwasserchemismus zu. Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Beurteilung eines Explorationsgebietes zur Kluftwassererschließung stellt die Lagerung des Hauptdolomites dar. So zeigen beispielsweise die im Explorationsgebiet Sagenbachtal durchgeführten Erkundungen, dass steil bzw. saiger stehende Hauptdolomitschichten für Erschließungen höffiger Zonen ungünstig sind. Unter diesen Verhältnissen ist die Wahrscheinlichkeit zahlreiche offene Klüfte zu durchteufen gering, da über lange Strecken in einer einzelnen Schicht gebohrt wird und so z.B. offene Klüfte an Schichtgrenzen (die als Schwächezonen anzusehen sind) nur untergeordnet erschlossen werden können. Hauptdolomit-Muldenstrukturen, welche durch junge Störungssysteme tektonisch aufgelockert sind, bieten günstigere Voraussetzungen. In Muldenstrukturen ist in zunehmenden Tiefen mit offenen, extensiven Kluftsystemen zu rechnen, während in oberflächennäheren Bereichen kompressive Verhältnisse dominieren, wodurch die Gefahr einer Zumischung von Oberflächenwässern verringert ist (Abb. 27). Als Beispiel für eine erfolgreiche Exploration von Kluftgrundwasser im Hauptdolomit aus einer weiträumigen Muldenstruktur dient die Erschließung in Bad Reichenhall (Fellehner 2004). Die Lagerung des Hauptdolomits im Explorationsgebiet Weißgraben (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) zeigt hingegen keine einheitliche Struktur. Es handelt sich um intensiv zerrütteten und tektonisch beanspruchten Hauptdolomit im Umfeld einer tektonischen

Deckengrenze (Lechtal-Decke/Tirolikum). Hier ist von einem kleinräumigen Wechsel von kompressiven und extensiven Zonen auszugehen, wodurch die geringere Quantität der Grundwasserzufuhr im Vergleich zu Bad Reichenhall begründet ist.

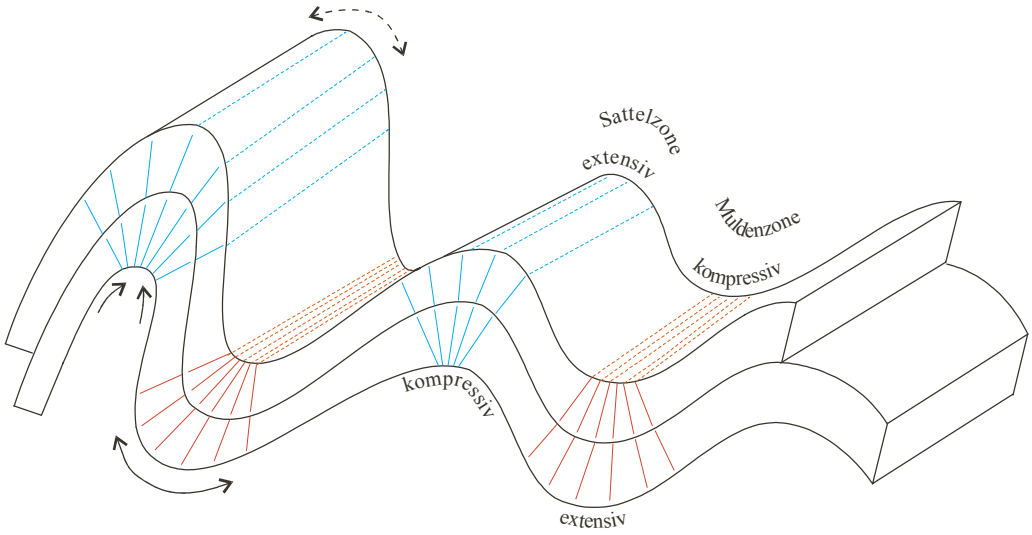


Abb. 27: Schematische Darstellung von kompressiven und extensiven Kluftbereichen in Sattel- und Muldenstrukturen

III.1.2 Unterschiedliche Voraussetzungen bei der Exploration von Trinkwasser in der Allgäu-Decke, der Lechtal-Decke und des Tirolikums

Die Untersuchungen in den tektonischen Einheiten Allgäu-Decke, Lechtal-Decke und Tirolikum zeigen, dass jeweils unterschiedliche Voraussetzungen in Bezug auf eine Trinkwasserexploration gegeben sind.

Die Erschließungsmöglichkeiten in der Allgäu-Decke sind generell geringer und kleinräumiger im Vergleich zu den überlagernden tektonischen Einheiten. Weiträumige Hauptdolomit-Vorkommen, mit größeren Mächtigkeiten, sind i.d. R nicht vorhanden, wodurch die Größe der ober- und unterirdischen Hauptdolomit-Einzugsgebiete und damit das Grundwasserdargebot einschränkt ist. Die räumlich eng begrenzten Hauptdolomitvorkommen resultieren aus dem für die Allgäu-Einheit charakteristischen engständigen Schuppenbau. Es liegen vorwiegend kompressive tektonische Verhältnisse vor, welche Kluftwasserwegsamkeiten stark einschränken. Bedingt durch kleinräumige Lithologiewechsel ist mit der Erschließung von Grundwasser mit typischer Dolomitwasser-Charakteristik (Kap. II.1.2) weniger zu rechnen. Typisch sind Mischwässer, die aus einer Zumischung in das Dolomitwassers aus hangenden und liegenden Grundwasserleitern resultieren. Dabei sind insbesondere die Raibler Schichten zu nennen, welche die Grundwasserqualität durch Lösung evaporitischer Minerale negativ beeinflussen. Aufgrund der genannten Einschränkungen ist in der Allgäu-Decke lediglich eine Erschließung für kleinere Trinkwasserversorgungen sinnvoll.

Im Gegensatz dazu sind die Voraussetzungen in der Lechtal-Decke und dem Tirolikum für eine Exploration von Trinkwasser aus den Hauptdolomit günstiger. Innerhalb dieser tektonischen Einheiten sind ausgedehnte Hauptdolomitgebiete verbreitet, die durch weiträumige Sattel- und Muldenstrukturen geprägt sind. Schichtmächtigkeiten von > 500 m sind häufig. Daraus resultieren große ober- und unterirdische Einzugsgebiete, die sowohl ein ausreichendes

Grundwasserdargebot als auch lange Verweildauer des Kluftwassers bieten. Eine negative Beeinflussung des Grundwasser-Chemismus durch evaporitische Einlagerungen kann auch innerhalb dieser Einheiten auftreten. In der Lechtal-Decke und dem Tirolikum kann die Kontamination durch die liegenden Raibler Schichten sowie zusätzlich im Tirolikum durch das Haselgebirge erfolgen. Das Haselgebirge kann in den Hauptdolomit durch seine duktilen Eigenschaften in Klüfte bzw. den Schuppenbau eingepresst sein (Fellehner 2004). Einer möglichen Grundwasser-Kontamination aus hangenden oder liegenden Schichten kann durch eine aus den Ergebnissen der Vorerkundung resultierenden sinnvollen Festlegung der Bohrpunkte begegnet werden.

III.2 Bedeutung der hydrologischen Bilanzierung der Einzugsgebiete für die Abschätzung der Grundwasserdargebote

Als ein Instrument für erste quantitative Beurteilungen hinsichtlich des Grundwasserdargebotes eines Explorations- bzw. eines Einzugsgebietes eignen sich hydrologische Bilanzierungen. Zudem lassen sich die aus den Berechnungen resultierenden Ergebnisse für die Festlegung maximaler Entnahmemengen bei potenzieller zukünftiger Grundwasser-Nutzung unterstützend heranziehen.

Bei Durchführung einer Erschließung von Kluftgrundwasser ergeben sich bei der Abgrenzung des realen Einzugsgebietes große Schwierigkeiten. Während das morphologisch begrenzte Einzugsgebiet EZG_o leicht durch Oberflächenwasserscheiden zu erfassen ist, lässt sich das unterirdische Einzugsgebiet EZG_u im Kluftkörper nur näherungsweise beschreiben.

Während der Vorerkundung gibt lediglich die lokale Tektonik erste Hinweise über die hydraulischen Verhältnisse und damit über das unterirdische Einzugsgebiet im Kluftkörper. Erst im Anschluss an die Erschließungsarbeiten liegen mit den Ergebnissen aus hydrochemischen Analysen, Pumpversuchen sowie eventuell Tracerversuchen und isotopenhydrochemischen Analysen detailliertere Informationen vor, um auf Kluftwasser-Einzugsgebiet zu schließen. Eine konkrete Abgrenzung bzw. Quantifizierung ist jedoch nicht möglich. Die hydrologische Bilanzierung wird daher auf Basis des oberirdischen Einzugsgebietes berechnet, um indirekt Informationen über das unterirdische Einzugsgebiet zu erhalten.

Bedingt durch die Lage des Arbeitsgebietes im Alpenraum und der damit einhergehenden orographischen Gliederung werden die klimatologischen Berechnungen geländeabhängig unter Verwendung eines DGMs durchgeführt (Kap. II.1.1). Das Ergebnis der klimatologischen Berechnungen beschreibt klimatische Wasserbilanz P_0, die dem Oberflächenabflusssystem sowie der Grundwasserneubildung zugeführt wird. Eine vollständige hydrologische Bilanzierung Hy_{Bil} des Einzugsgebietes EZG_o lässt sich bei Vorliegen von Oberflächenabfluss- sowie den oberflächennahen Abfluss-Daten berechnen.

Das Einzugsggebiet EZG_o des Explorationsgebietes Sagenbachtal (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth) erfüllt diese Voraussetzungen. Durch die Bilanzierung Hy_{Bil} kann auf indirekte Weise nachgewiesen werden, dass dem hydrologischen System Sagenbachtal Kluftwasser aus einem unterirdischen Einzugsgebiet zuströmt (Kap. II.2.3.6.1). Es sei zu beachten, dass der Zufluss von Kluftwasser über Berechnungen zwar quantitativ erfasst wird, jedoch darf aufgrund des Modellcharakters und den damit einhergehenden Generalisierung das Ergebnis nur qualitativ interpretiert werden.

III.3 Die hydrochemische Charakteristik als Schlüssel zur erfolgreichen Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit

Zur Erkundung von Trinkwasser im Hauptdolomit findet ein speziell für die Untersuchungsgebiete entwickeltes Klassifikationsschema Anwendung, mit dem die Differenzierung vorkommender Grundwässer in den Untersuchungsgebieten möglich ist (Kap. II.1.2.2, III.3.1). Die hydrogeochemische Klassifikation des GLA Bayern (WAGNER ET AL. 2003) (Kap. III.3.2) konnte im Zusammenhang mit der hier relevanten Fragestellung nicht angewandt werden (Kap. III.3.3).

III.3.1 Hydrochemische Klassifikation für konkrete Erkundungsmaßnahmen im Hauptdolomit

Während des Forschungsprojektes erwies sich die Klassifizierung von Grundwässern bezüglich ihrer jeweiligen Grundwasserleiter für die Exploration von Trinkwasser aus dem Hauptdolomit von elementarer Bedeutung. Mithilfe des Ca-Mg-Verhältnisses sowie des Ca-Mg-SO_4-Verhältnisses können Typus-Wässer sowie Mischkomponenten identifiziert werden (Kap. II.1.2.2). Das entwickelte Klassifikationsschema ermöglicht die Differenzierung von *Dolomit-Wasser*, *Kalziumkarbonat-Wasser*, *sulfatreichem Wasser*, *Moränen-* (*alluviale Schotter-*)*Wasser* sowie Mischungen zwischen diesen Komponenten. Das erstellte Klassifikationsschema erfolgt auf Grundlage einer *hydrochemischen-hydrogeologischen Klassifikation*, d.h. die hydrochemische Typisierung muss durch geologische und hydrogeologische Geländebefunde begründet werden, da eine rein hydrochemisch basierte Klassifikation der Analysen zu Fehlinterpretationen führen kann.

Die systematische Beprobung von Quellen und Brunnen im weiteren Untersuchungsgebiet sowie deren anschließende Klassifikation nach erläuterter Methode ermöglicht bereits während der Vorerkundung Gebiete für potenzielle Hauptdolomit-Kluftgrundwasser-Explorationen auszuschließen bzw. in hydrochemisch (und hydrogeologisch) interessanten Bereichen weiterführende Untersuchungen durchzuführen. Im weiteren Verlauf einer Exploration gibt die Klassifizierung des Kluftgrundwassers aus Erkundungsbohrungen Hinweise auf das erweiterte Einzugsgebiet bzw. erschlossene Grundwasserleiter.

Die für die Zuordnung zur jeweiligen Klasse notwendigen Parameter werden i.d.R. bei jeder Standardanalyse ermittelt. Daher kann bereits während der Vorerkundungsphase auf Daten von Wasserversorgern, Wasserwirtschaftsämtern, Gesundheitsämtern sowie Landesämtern zurückgegriffen werden. Dabei gilt zu beachten, dass bei einem Vergleich von Analysen verschiedener Labore sowohl die Analysegenauigkeit und als auch die Fehlerbereiche differieren (Kap. II.1.2.2.2). Aufgrund dessen sollten Vergleichsproben analysiert werden, die wie die weiterführenden Analysen im Erschließungsprojekt ausschließlich von einem Labor und Probennehmer durchgeführt werden. Damit kann der Fehlerbereich minimiert werden.

III.3.2 Großräumige geochemische Klassifikation von Grundwässern (GLA Bayern)

Vor dem Hintergrund des im Jahr 1999 in Kraft getretenen Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) und der EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000) war die Notwendigkeit gegeben, Kenntnis über die natürlichen, geogenen Hintergrundwerte der hydrogeochemischen Grundwassereigenschaften zu erhalten. Auf der Grundlage von Auswertungen vorhandener sowie neuer Grundwasseranalysen wurde durch das GLA Bayern (WAGNER ET AL. 2003) ein umfassender Fachbericht erarbeitet. Aus diesem resultieren insgesamt 32 hydrogeologische Einheiten, welche nach lithologischen, stratigraphischen sowie strukturgeologischen Kriterien differenziert wurden. Deren typische hydrochemische Charakteristik gründet auf statistisch ermittelten Werten (Anl. 6.8). Drei der hydrogeologischen Einheiten beschreiben Grundwassertypen, welche für die bearbeiteten Untersuchungsgebiete von Relevanz sind (Anl. 6.8):

(1) *"Kalkalpen in vorwiegend karbonatischer Fazies"*

(2) *"Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies"*

(3) *"Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies"*

III.3.3 Vergleich der Klassifikationen

Die nach WAGNER ET. AL. (2003) charakterisierten Grundwässer sind in Dreiecksdiagrammen ($Mg^{2+}/Ca^{2+}/NA^{+}/K^{+}$ sowie $HCO_3^{-}/Cl^{-}+NO_3^{-}/SO_4^{2-}$) und klassifikatorischen Vierstoffdiagrammen von FURTAK & LANGGUTH (1967) dargestellt. Aufgrund fehlender Analyseparameter können die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erhobenen Daten in diese Darstellungsform nicht eingearbeitet werden. Daher werden die typischen chemischen Charakteristika der in Kapitel III.3.2 genannten hydrogeologischen Einheiten (WAGNER ET AL. 2003) in das in dieser Arbeit entwickelte Klassifikationsschema eingefügt (Zweistoff-Diagramm Ca^{2+}/Mg^{2+} und Dreistoff-Diagramm $Ca^{2+}/Mg^{2+}/SO_4^{2-}$), um einen Vergleich zu ermöglichen (Abb. 28). Es wird deutlich, dass die hydrochemischen Eigenschaften der drei ausgewählten hydrogeologischen Einheiten nach WAGNER ET AL. nicht mit dem hier verwendeten Klassifikationsschema korrelieren. Generell zeigen die Mittelwerte nach WAGNER ET AL. geringere Mg^{2+}-Konzentrationen. Im Ca^{2+}/Mg^{2+}-Diagramm ist das "*Wasser in vorwiegend dolomitischer Fazies"* der GLA-Typisierung als *Mischwasser* zu charakterisieren (Abb. 28a). Der Mittelwert für "*Wasser in vorwiegend karbonatischer Fazies"* (GLA-Typisierung) liegt zwischen der *Kalziumkarbonat-* und *Moräne/alluviale Schotter*-Klassifikation (Abb. 28a, Kap. II.1.2). Ein ähnliches Bild zeigt sich im $Ca^{2+}/Mg^{2+}/SO_4^{2-}$-Diagramm. Das "*Wasser in vorwiegend dolomitischer Fazies"* (GLA-Typisierung) befindet sich im Dreistoff-Diagramm der angewendeten Klassifikation im Übergangsbereich *Dolomit-Wasser - Dolomit-Kalziumkarbonat-Mischwasser* bzw. *Dolomit-Oberflächen-Mischwasser* (Abb. 28b), während das "*Wasser in vorwiegend karbonatischer Fazies"* (GLA-Typisierung) außerhalb des Typusfeldes *Kalziumkarbonat-Wasser* (Abb. 28b) liegt. Die *"salinare Fazies-Typisierung"* könnte mit dem abgegrenzten Feld *sulfatreiches Wasser* korreliert werden, da für die Abgrenzung dieses Klassifikationsfeldes nur wenige Analysen im Rahmen des bearbeiteten Erkundungsprogrammes vorliegen. Für eine endgültige Bewertung müsste weitere Vergleichsanalysen von Grundwasser aus den Raibler Schichten herangezogen werden.

Die Differenzen der beiden Klassifikationen lassen sich durch die verwendeten Datengrundlagen

sowie die unterschiedlichen Fragegestellungen der Projekte erklären.

WAGNER ET AL. beschränken sich in ihrer Arbeit auf eine großräumige Übersicht der hydrogeochemischen Charakteristik der Grundwässer in Bayern, in die keine detaillierten hydrogeologischen und strukturgeologischen Untersuchungen der einzelnen Probennahmepunkte eingehen. Aus der großen Datenmenge resultieren Mittelwerte, welche die jeweiligen hydrogeologische Einheiten charakterisieren.

Die Intention des innerhalb dieser Arbeit entwickelten Klassifikationsschemas liegt in der Charakterisierung von Grundwässern kleinräumiger, spezifischer lithologischer Einheiten, welche die lokale Hydrochemie der Untersuchungsgebiete prägen. Es ist eine wesentlich sensitivere Abgrenzung notwendig, welche insbesondere durch Berücksichtigung der speziellen lokalen geologischen und tektonischen Gegebenheiten realisiert wird.

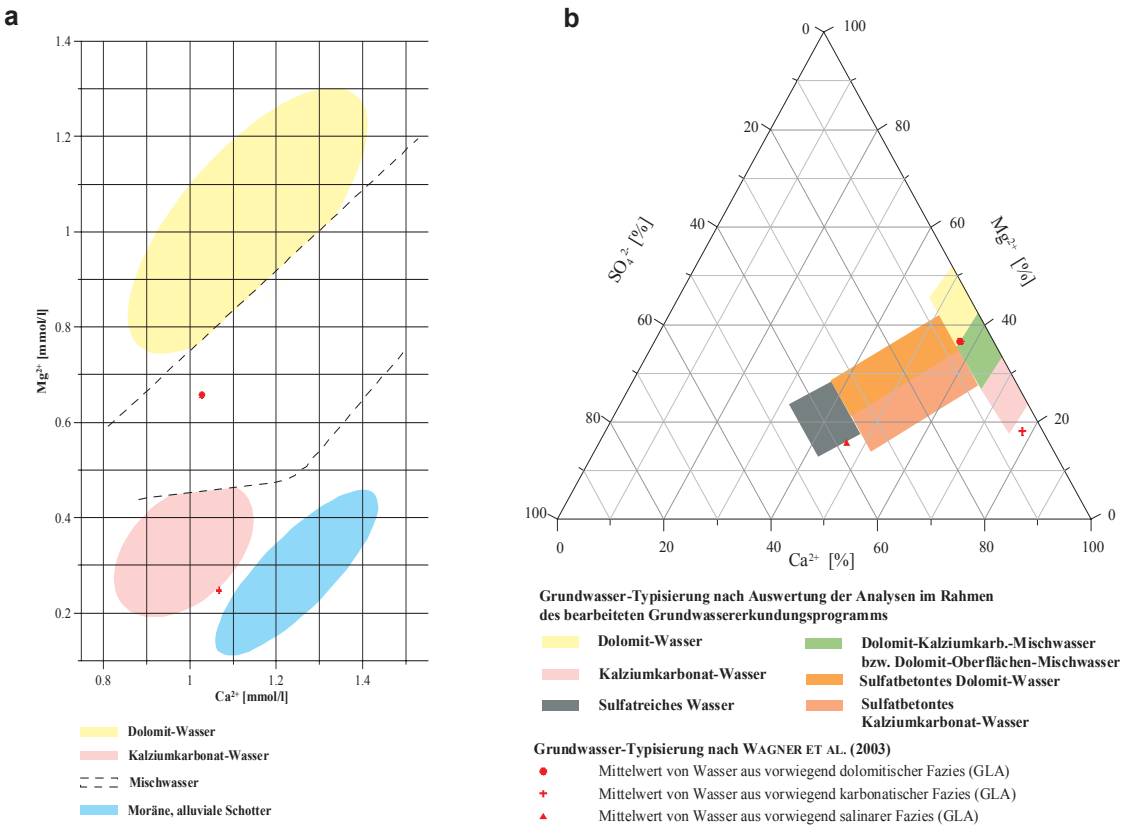


Abb 28a, 28b: Vergleich der GLA-Klassifikation mit dem hydrochemischen Klassifikationschema der vorliegenden Arbeit

III.4 Charakteristik des Kluftgrundwasserleiters Hauptdolomit

Die Resultate der Erkundungsprogramme in den Untersuchungsgebieten Rottach-Egern/Kreuth und Reit im Winkl haben die Erkenntnisse über den Kluftgrundwasserleiter Hauptdolomit aus der Exploration in Bad Reichenhall (FELLEHNER 2004) wesentlich erweitert.

Es handelt sich beim Grundwasserleiter Hauptdolomit um ein nicht verkarstetes, geklüftetes Gestein, welches durch ein Kluftsystem mit 3 Ordnungen charakterisiert ist (Kap. I.3.1.1 und I.3.2.1.2). Die Klüfte der 1. und 2. Ordnung sind nicht homogen im Hauptdolomitkörper verteilt, typisch ist ein Wechsel zwischen kompakten, massigen, z.T. deutlich gebankten Bereichen sowie tektonisch stark beanspruchten, intensiv geklüfteten Zonen. Im Gegensatz dazu weist die engmaschige Feinstklüftung der 3. Ordnung eine nahezu homogene Verteilung auf und stellt dabei den größten Teil der Grundwasserspeicherkapazität des Hauptdolomits dar. Die Feinstklüftung ermöglicht weiter den flächenhaften Zutritt von Oberflächenwasser in den Gesteinskörper und damit die Grundwasserneubildung.

Die Korrelation bohrlochgeophysikalischer Untersuchungen mit Kamerabefahrungen zeigen in der ER 1 neun und in der ER 4 vierzehn Zuflusszonen (Kap. II.3.3.3, Abb. 20, 21). Die Hauptzuflüsse in die Bohrungen erfolgen über Klüfte der 1. Ordnung. Über Klüfte der 2. und 3. Ordnung wird den Klüften 1. Ordnung Grundwasser zugeführt, während der direkte Zufluss in die Bohrung über Klüfte der 2. und 3. Ordnung quantitativ vernachlässigt werden kann.

Sämtliche Messstellen (Anlage 8) im Explorationsgebiet Weißgraben (Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) zeigen artesisch gespannte Grundwasserverhältnisse, jedoch mit unterschiedlichen Druckspiegelhöhen (Tab. 19).

	Datum	Rwsp.	Rwsp.
		[m ü.GOK]	[m ü.NN]
ER 1	06.10.2004	11,60	771,20
ER 1-Gw-Messstelle	06.10.2004	artes. Überlauf	xx
ER 4	06.10.2004	16,50	776,83
ER 4-Gw-Messstelle	06.10.2004	0,80	761,13

Tab. 19: Ruhewasserspiegel im Explorationsgebiet Weißgraben

Ebenso belegen die Ergebnisse der Pumpversuche in unterschiedlichen Aquiferbereichen der Erkundungsbohrungen ER 1 und ER 4 (Abstand der Bohrungen ca. 32 m) das Fehlen einer direkten hydraulischen Verbindung zwischen den Bohrungen sowie zwischen den höheren und tieferen Aquiferbereichen innerhalb einer Bohrung (Kap. II.3.31.1). Es lässt sich lediglich eine direkte hydrostatische Verbindung nachweisen, eine hydraulische Verbindung besteht über eine starke Umläufigkeit, die zu einem verzögerten Durchfluss und zu einer höheren Verweildauer führt. Die Erkenntnisse aus den Pumpversuchsdaten ließen sich über weiterführende Untersuchungen mittels Tracer-Versuchen erweitern.

Die während der Pumpversuche gemessenen Absenkungen des Wasserspiegels in den Bohrungen im Explorationsgebiet Weißgraben lassen sich mit der Charakteristik eines Zwei-Porositäts-Mediums (MOENCH 1984) beschreiben (Kap. II.1.4.2.3). Inhaltlich basiert das Zwei-Porositäts-Modell auf der Annahme zweier statistisch verteilter poröser Bereiche, der Kluft-Porosität

und der Matrix-Porosität. Die Kluft-Porosität weist eine höhere hydraulische Leitfähigkeit als die Matrix auf, wobei diese einen Leakage-Effekt auf den Kluftaquifer ausübt. Der typische Absenkungsverlauf eines Zwei-Porositäts-Mediums (Abb. 7) zeigt eine erste Phase, in welcher zunächst ausschließlich die Klüfte auf die Entnahme reagieren, eine zweite Phase, in welcher der Absenkungsverlauf bedingt durch die Aktivierung der Matrix stagniert sowie eine dritte Phase, in der das radiale Fließen des Gesamtsystems einsetzt (WARREN & ROOT 1963). Auf das Hauptdolomit-Kluftsystem übertragen sind die Klüfte der 1. und 2. Ordnung mit der Kluftporosität, die Klüfte der 3. Ordnung (Kluftweiten ca. 30 μm) mit der Matrix-Porosität vergleichbar.

Die Auswertung der Pumpversuche ergibt für die Bohrungen ER 1 und ER 4 im Explorationsgebiet Weißgraben eine hydraulische Leitfähigkeit von k_f $1x10^{-6}$ m/s bis $1x10^{-7}$ m/s. Die ermittelten Werte beschreiben jedoch integrale hydraulische Leitfähigkeiten, welche nur eine eingeschränkte Aussage in Bezug auf die hydraulische Charakteristik des gesamten Kluftkörpers zulassen. Im Bereich der Hauptzuläufe (Kluftzonen der 1. Ordnung, untergeordnet der 2. Ordnung) ist der k_f-Wert deutlich höher, während er in kompakten Zonen (keine Klüftung bzw. Klüfte der 3. Ordnung) sehr viel niedriger liegt.

Die Quantität einer Grundwassererschließung im Hauptdolomit beruht auf der Anzahl und Ausdehnung der erschlossenen Klüfte 1. Ordnung sowie dem Zustand der Klüfte 2. Ordnung. Diejenigen der 1. Ordnung, die den jüngsten Störungssystemen der alpinen Tektonik angehören, sind i.d.R. offen und nicht verstürzt. Im Gegensatz dazu sind die Klüfte 2. Ordnung, die oft durch mehrere Bewegungsphasen geprägt sind (FELLEHNER 2004), durch Kataklasite verfüllt. Unter diesen Bedingungen ist die hydraulische Verbindung von Klüften 2. Ordnung in Klüfte 1. Ordnung, die als Sammler fungieren, eingeschränkt bzw. nicht vorhanden. Die Bohrungen im Explorationsgebiet Weißgraben zeigen zum Teil diese Verhältnisse. Die Analyse des Bohrguts dokumentiert ein erhöhtes Vorkommen kataklastischer Bereiche innerhalb von Kluftzonen (Anl. 8.1, 8.3), welche auf die starke tektonische Beanspruchung des Hauptdolomits im Bereich der Deckengrenze Lechtal-Decke/Tirolikum zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu treten innerhalb des in einer Muldenstruktur gelegenen Erschließungsgebietes Bad Reichenhall deutlich weniger kataklastische Zone auf, die Quantität des erschlossenen Grundwassers ist unter solchen Bedingungen höher (FELLEHNER 2004).

Für das Verständnis der anisotropen hydrogeologischen Verhältnisse im Kluftkörper Hauptdolomit muss der großräumige Hauptdolomitbereich im Umfeld eines Erschließungsgebietes betrachtet werden. Eine Skizze möglicher Kluftwasserwege im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl soll als Beispiel dienen (Abb. 29). Das vereinfachte Kluftsystem 1. Ordnung in Abbildung 29 basiert auf experimentell entwickelten Darstellungen von Pull-Apart-Becken (DOOLEY & MCCLAY 1997), das Muster der Klüfte 2. Ordnung ist lediglich schematisch unterlegt, es dient zur visuellen Darstellung der hydrogeologischen Zusammenhänge.

Strike-slip-faults (NNE-SSW) mit daraus resultierenden Pull-Apart-Becken sind S' des Untersuchungsgebietes Reit im Winkl (Unkener-Mulde, MADER 2001) nachgewiesen. Das System, welches senkrecht zur Achse der Unkener-Mulde verläuft, lässt sich mit Störungssystemen im Untersuchungsgebiet (NE-SW, Becken von Reit im Winkl) korrelieren (Anl. 4.3). Als überregionale Seitenverschiebung im Bereich des Untersuchungsgebietes ist der Saalach-Westbruch (NE-SW) (RATSCHENBACHER ET. AL 1991b, SCHWEIGL & NEUBAUER 1997) zu nennen.

Kluftwasser-Wegsamkeiten (Klüfte 1. Ordnung) im Hauptdolomit sind an Extensionsklüfte der alpinen Bewegungsphasen im Spät-Miozän (Pannonian, Kompression mit strike-slip-faulting, Phase

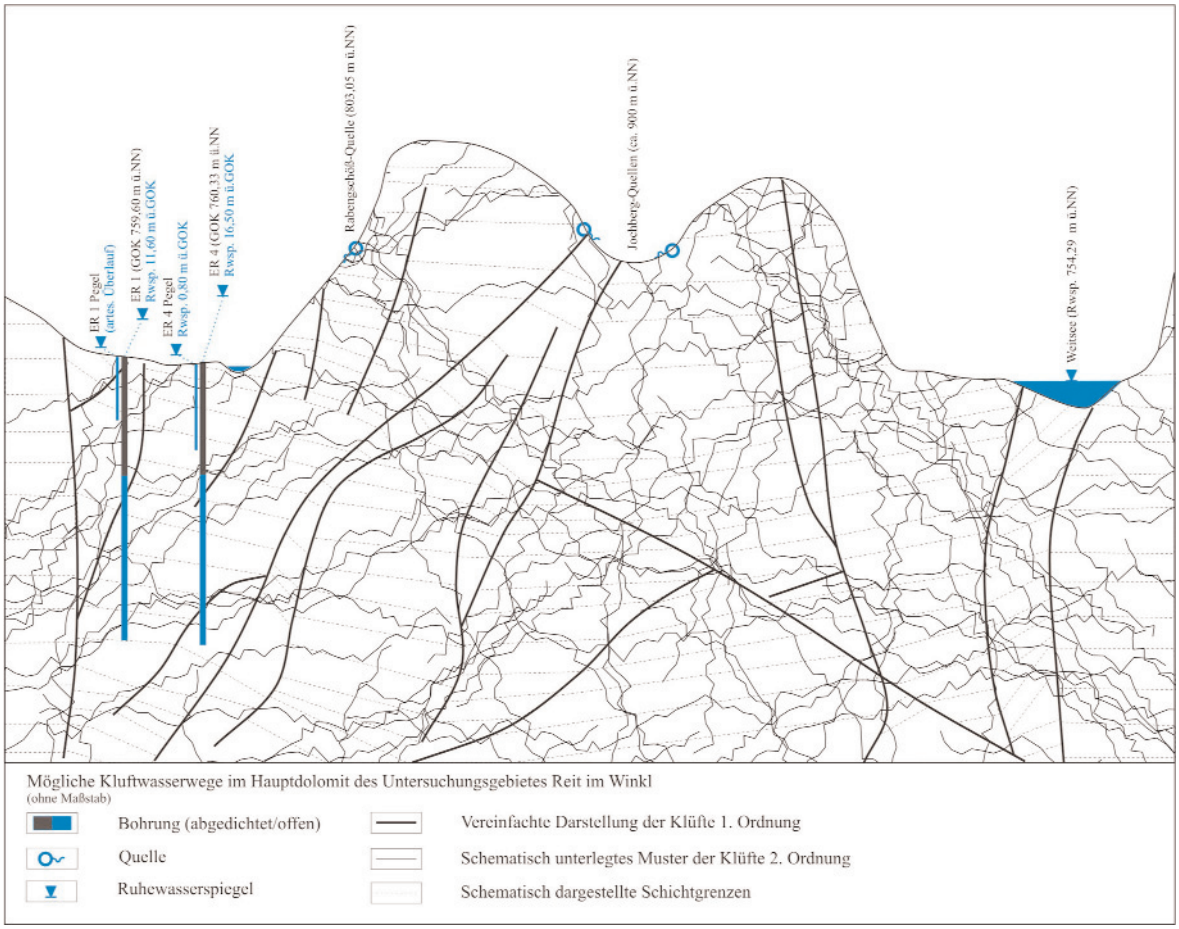


Abb.29: Mögliche Kluftwasserwege im Hauptdolomit des Untersuchungsgebietes Reit im Winkl

T5) und Spät-Miozän bis Post-Miozän (Extension mit normal-faulting, Phase T6) gebunden (PERESSON & DECKER 1997).

Hauptdolomitgebiete zeigen i.d.R wenig Quellaustritte; Bäche und Gräben sind meist trocken und führen nur nach ergiebigen Niederschlägen Wasser. Im Bereich zwischen dem Explorationsgebiet Weißgraben und dem Weitsee befinden sich lediglich die Rabengschöß-Quelle und die Jochberg-Quellen (Abb. 29, Anlage 3.2). Die analysierten Quellwässer lassen sich nach dem hydrochemischen Klassifikationsschema (Kap. II.1.2) als typische Dolomitwässer charakterisieren (II.3.3.4, Abb. 24 u. 25, Anl. 6.3). Ebenso kann der Weitsee als “Hauptdolomit-Quelle” gelten, er weist kaum Oberflächenzuflüsse auf und wird vorwiegend durch Quellen am Seegrund gespeist. Das Zweistoff- und Dreistoff-Diagramm (Kap. II.1.2) ermöglicht die Klassifikation des Weitsee-Wassers als ein Dolomitwasser mit Zumischung von Oberflächenwasser (Abb. 24 u. 25, Anl. 6.3). Voraussetzung für Hauptdolomit-Quellen ist der Geländeanschnitt von Klüften 1. Ordnung (Abb. 29); als typisches Beispiel kann die Rabengschöß-Quelle gelten (Anl. 3.2). Die in einer Großkluft gefassten Quelle zeigt mit einer kontinuierlichen Schüttung von ca. 3,5 l/s keine niederschlagsbedingten Schwankungen.

Die Erkundungsbohrungen ER 1 und ER 4 haben aus Klüften 1. Ordnung weiteres Grundwasser (nach hydrochemischem Klassifikationsschema: Dolomitwasser) aus dem Gebiet erschlossen. Wie bereits dargelegt, sind die Kluftgrundwasserzutritte in die Erkundungsbohrungen an Großklüfte 1. Ordnung gebunden. Innerhalb jeder Bohrung wurden zwei Aquiferbereiche erschlossen, die unter-

schiedliche Druckspiegelhöhen und Charakteristiken bei Pumpversuchen (Abb. 19, Kap. II.3.3.2.1) zeigen. Es bestehen keine direkten hydraulischen Verbindungen zwischen den Aquiferbereichen. Die unterschiedlichen hydraulischen Verhältnisse bei der vorliegenden geringen räumlichen Distanz der Bohrungen bzw. der Aquiferbereiche zeigen deutlich die Heterogenität des Kluftwasserleiters Hauptdolomit.

In Tabelle 18, 19 sowie Abbildung 29 sind die Druckwasserspiegel der Aquiferbereiche der Bohrungen, die Lage der Quellaustritte sowie des Wasserspiegels des Weitsees ü.NN dargestellt. Die großen Differenzen zwischen den Druckspiegeln erlauben keine Korrelation zu einer gemeinsamen Grundwasser-Druckfläche. Die Differenzen resultieren aus dem für den Hauptdolomit charakteristischen großräumigen Kluftsystem verschiedener Ordnungen, bzw. der Verteilung und Vernetzung einzelner kleinräumiger Kluftsysteme innerhalb des Gesamtsystems:

Jeder wasserführenden Schar von Klüften 1. Ordnung sind im direkten Umfeld hydraulisch wirksame Klüfte 2. und 3. Ordnung zugeordnet über die der direkte Zufluss erfolgt (Abb. 29). Ein solches Kluftsystem kann zunächst als Einzel-System betrachtet werden, welches durch eine bestimmte hydraulische Leitfähigkeit und Grundwasserdruckfläche charakterisiert ist. Die Ergiebigkeit eines Einzel-Systems hängt von der Ausdehnung des Kluftsystems, dem Zustand der Klüfte (Öffnungsweiten, verstürzt, kataklastisch gefüllt) sowie der Anbindung der Klüfte 2. und 3. Ordnung an die Klüfte 1. Ordnung ab. Die Grundwasserneubildung im Kluftkörper Hauptdolomit erfolgt über den flächenhaften Zutritt von Oberflächenwasser in die Klüfte 2. Ordnung und 3. Ordnung. Durch weiträumige indirekte Verbindungen über Klüfte 2. und 3. Ordnung erfolgt der Zustrom in die Einzel-Systeme. Über die homogen im Kluftkörper verteilten Klüfte der 3. Ordnung ist die indirekte Verbindung vorwiegend hydrostatisch, über die Klüfte 2. Ordnung weiträumig umläufig auch hydraulisch. Daraus folgt, dass es sich streng genommen nicht um autarke Einzel-Systeme handelt, sondern Verbindungen über großräumige hydraulische und hydrostatische Umläufigkeiten bestehen. Aufgrund der lediglich indirekten großräumigen Verbindungen reagiert der Kluftkörper inhomogen und anisotrop und nicht als homogener Grundwasserkörper. Es handelt sich demnach um “halboffene Einzel-Systeme” aus denen Erschließung von Trinkwasser möglich ist, die sich innerhalb eines großräumigen “Gesamt-Kluftsystems Hauptdolomit” befinden.

Der nicht verkarstungsfähige Kluftkörper Hauptdolomit bietet durch das beschriebene charakteristische Kluftsystem einen sehr guten Grundwasserschutz, da eine lange Verweildauer des Kluftwassers durch großräumige Umläufigkeiten über Klüfte 2. und 3. Ordnung sichergestellt ist. Isotopen-Untersuchungen im Explorationsgebiet Listsee (Bad Reichenhall) ergaben auf Basis von Tritium-Isotopen-Verhältnissen Mischwässer unterschiedlichen Alters; mit einer Komponente aus dem Zeitraum von 1960 - 1975 (Fellehner 2004). Nach den ^{18}O-Werten des Hauptdolomitwassers aus dem Listseegebiet handelt es sich um ein Mischwasser, in dem sich die Wässer über mindestens zwei Jahresgänge durchmischen (Fellehner 2004). Die lange Verweildauer gewährleistet hygienisch gute Qualität sowie eine gleich bleibende chemisch-physikalische Charakteristik des Kluftwassers. Die chemisch-physikalischen sowie mikrobiologischen Analysen des Kluftwassers, die im Rahmen der Pumpversuche im Explorationsgebiet Weißgraben untersucht wurden, belegen gleichbleibendeTrinkwasserqualität nach der TrinkwV 2001.

III.5 Schematischer Explorationsablauf einer Trinkwasser-Erschließung aus dem Hauptdolomit der Nördlichen Kalkalpen

Basierend auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes “Grundwassererkundung in Bayern, Maßnahme Kalkalpine Randzone (KAR)” wird im Folgenden ein schematischer Explorationsablauf für eine Kluftwasser-Erschließung aus dem Hauptdolomit entwickelt. Dieser enthält neben den bereits im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Methoden (Teil II) zusätzliche Maßnahmen, die zu einer erfolgreichen Exploration beitragen können. Der schematische Explorationsablauf ist in Abbildung 30 dargestellt. Dieser zeigt den chronologischen und inhaltlichen Ablauf einzelner Explorationsmaßnahmen sowie die konsequente Kombination und Bewertung der Teilergebnisse im Hinblick auf folgende Explorationsschritte bzw. die Gesamtmaßnahme.

Vorgabe des Explorationsablaufs (Abb. 30) ist ein Untersuchungsgebiet in den Nördlichen Kalkalpen, in welchem eine Trinkwasser-Exploration im Hauptdolomit zu projektieren ist. Die Explorationsmaßnahmen lassen sich bis hin zur Planung und zum Bau eines Trinkwasserbrunnens in insgesamt fünf Phasen gliedern. Dabei ist es von besonderer Bedeutung nach jeder Phase die bisher gewonnenen Ergebnisse erneut zu überprüfen und zu bewerten, bevor mit nächsten Erkundungsschritten fortgefahren wird.

Die wesentlichen Inhalte der jeweiligen Phasen werden im Folgenden kurz skizziert, Details sind der Abbildung 30 zu entnehmen:

Phase I — *Vorerkundungsmaßnahmen zur Ausweisung von Explorationsgebieten für die Erschließung von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit*

- *I/a* Geologische Analyse des Untersuchungsgebietes
- *I/b* Hydrologische und hydrochemische Vorerkundung im Untersuchungsgebiet
- *I/c* Modellierung klimatischer Parameter sowie Quantifizierung des Oberflächenabflusses für das morphologisch begrenzte Einzugsgebiet EZG_o
- *I/d* Geophysikalische Erkundung des Lockergesteins

Phase II — *Ausweisung von Bohrpunkten und Entwicklung eines Bohrprogrammes für das Abteufen pumpfähiger Erkundungsbohrungen im Festgestein*

- *II* *Variante A*
  Abteufen kleinkaliberiger Sondierungsbohrungen mit anschließender Bohrloch-Radar-Messung; kombinierte Bewertung der *Phase I* und *II* für die Planung pumpfähiger Erkundungsbohrungen
- *II* *Variante B*
  Planung pumpfähiger Erkundungsbohrungen auf Grundlage der Ergebnisse der *Phase I*

Phase III — *Untersuchung der hydraulischen Verhältnisse im Kluftkörper; quantitative Berechnung des Aflussregimes sowie Bilanzierung des Abflusses mit klimatologischen Parametern*

- *III/a* Abteufen pumpfähiger Erkundungsbohrungen, Pumpversuche, geophysikalische Untersuchungen im Bohrloch, chemisch-physikalische Analysen

	III/b	Abteufen einer pumpfähigen Erkundungsbohrung im Lockergestein zur Untersuchung der hydraulischen Verhältnisse; Pumpversuch, Bestimmung der Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit
Phase IV		*Durchführung eines Langzeitpumpversuches; zusammenfassende Beurteilung der Explorationsmaßnahmen im Hinblick auf eine Trinkwassererschließung*
Phase V		*Planung und Bau eines Brunnens zur Trinkwassergewinnung*

Die aufgeführten detaillierten Erkundungsmaßnahmen (Abb. 30) sind unter Berücksichtigung der jeweiligen lokalen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten zu prüfen, um je nach Fragestellung zusätzliche Methoden und Maßnahmen zu ergänzen bzw. Maßnahmen zu reduzieren. Das Kosten-/Nutzen-Verhältnis der Maßnahmen ist individuell zu beurteilen. Es gilt jedoch zu beachten, dass gerade im heterogenen Kluftaquifer Hauptdolomit die Reduzierung von Einzelmaßnahmen eine Erhöhung des Gesamtrisikos der Exploration einhergeht.

In den durchgeführten Explorationsprogrammen (Untersuchungsgebiet Rottach-Egern/Kreuth und Reit im Winkl) wurden die *Phasen I, II (Variante B)* und *III* bearbeitet (Teil II). Der schematische Explorationsablauf (Abb. 30) weicht in einigen Punkten von den durchgeführten Maßnahmen ab. Auf die Modifikationen wird im Folgenden eingegangen.

Phase I beinhaltet diejenigen Vorerkundungsmaßnahmen, welche als Datengrundlage für die folgenden Explorationsschritte dienen. Sie ist inhaltlich in die Teil-Phasen *Phase I/a-d* untergliedert, in welchen die geologischen und tektonischen, die hydrologischen sowie hydrochemischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet bearbeitet werden.

Im Vorfeld der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Bohrungen war die Erkundung der Lockergesteinsauflage im Explorationsgebiet Sagenbachtal notwendig (*Phase I/d*), um Informationen über Grenze Lockergestein/Festgestein bzw. die Quartärmächtigkeit zu erhalten sowie um die Quantifizierung des Grundwasserabflusses im Schotterkörper zu berechnen. Als Untersuchungsmethode wurden Gleichstrom-Geoelektrische-Sondierungen durchgeführt. An dieser Stelle wären refraktionsseismische-Messungen sinnvoll, um detaillierte Ergebnisse zu erhalten. Wenn günstige Aufschlussverhältnisse vorliegen (wie im Untersuchungsgebiet Reit im Winkl) kann jedoch ganz auf eine geophysikalische Vorerkundung des Lockergesteins verzichtet werden.

In Abhängigkeit der spezifischen Abflussverhältnisse im morphologisch begrenzten Einzugsgebiet sollten im Hinblick auf eine hydrologische Bilanzierung (*Phase III/b,* Kap. II.1.1) bereits frühzeitig (*Phase I/d*) und möglichst über einen Zeitraum von mind. einem Jahr Oberflächenabfluss-Messungen durchgeführt werden.

Die *Phase II* bietet zwei Varianten (*Variante A / Variante B*, Abb. 30) als folgende Explorationsschritte an. Beide aufgeführten Varianten wurden in dieser Form nicht umgesetzt. Sie stellen eine wichtige Modifikation gegenüber den Explorationen in den Untersuchungsgebieten Rottach-Egern/Kreuth und Reit im Winkl dar. Zum Ende der *Phase II* werden in beiden Varianten Ansatzpunkte für pumpfähige Erkundungsbohrungen festgelegt. In der *Variante B* werden die Bohrpunkte ohne weitere Erkundungsmaßnahmen auf Grundlage der Ergebnisse der *Phase I* festgelegt, während in der *Variante A* die Klüftigkeit des Hauptdolomits durch kleinkaliberige Erkundungsbohrungen mit anschließenden Bohrloch-Radar-Messungen (Tomographische- und

Crosshole-Messungen; Kap. II.1.3.3) detaillierter erkundet wird (Abb. 30). Die Bohrloch-Radar-Messungen werden in Kombination mit strukturgeologischer Geländebefunden bewertet. Diesem Erkundungsschritt kann eine Schlüsselstellung für eine erfolgreiche Kluftwassererschließung im Hauptdolomit zukommen. Kluftzonen lassen sich mittels des genannten Verfahrens dreidimensional darstellen und damit höffige Bohrpunkte für die *Phase III* festgelegen. Für die Bohrloch-Radar-Messungen ist es notwendig, kleinkaliberige Sondierungsbohrungen (mind. 2 Bohrungen) abzuteufen. Die Endteufe muss dabei der potentiellen Endteufe der pumpfähigen Erkundungsbohrungen entsprechen. Um Kluftsysteme mit dem Bohrloch-Radar-Verfahren erfassen zu können, darf der räumliche Abstand der Bohrungen maximal 100 m, der Bohrdurchmesser maximal 100 mm betragen. Die Konfiguration der Sondierungsbohrungen wurde auf Grundlage der Messungen im Explorationsgebiet Sagenbachtal entwickelt; die Messungen an der GwM 3 und GwM 4 erbrachten lediglich Teilergebnisse, da Durchmesser und Abstand der Bohrungen zu groß waren (Kap. II.2.3.3.3).

Für die Gesamtfinanzierung eines Explorationsprogrammes bedeuten die zusätzlichen Sondierungsbohrungen Zusatzkosten, die sich jedoch im Fortgang der Exploration amortisieren können. Im weiteren Verlauf des Projektes kann die Zahl pumpfähiger Erkundungsbohrungen durch zielgerichtetes Abteufen in lokalisierte Kluftzonen reduziert werden. Bei negativem Ergebnis der Bohrloch-Radar-Messungen kann die Exploration frühzeitig abgebrochen werden. Weiter lassen sich die Sondierungsbohrungen im Fortgang der Erschließungsarbeiten als Messstellen nutzen, um die Charakteristik des Kluftwasserleiters während hydraulischer Tests zu erfassen.

Phase III dient zum Einen der Erkundung der hydraulischen Verhältnisse im Hauptdolomit unter dem Aspekt der Trinkwasser-Erschließung (*Phase III/a*) und zum Anderen (*Phase III/b*) der Ermittlung des oberflächennahen Grundwasserabflusses im Quartär.

Die Endteufen der Erkundungsbohrungen im Festgestein sind basierend auf den Ergebnisse aus *Phase II* festzulegen, die Bohrungen im Quartär müssen das Festgestein erreichen. Die detaillierten Einzelmaßnahmen sowie deren kombinierte Auswertung sind Abb. 30 zu entnehmen.

Nach Auswertung und positiver Beurteilung der *Phase III* kann ein Langzeitpumpversuch (*Phase IV*) durchgeführt werden (Abb. 30). Im Zuge des Langzeitpumpversuches wird durch dauerhafte Entnahme von Grundwasser die hydraulischen Charakteristik des zu nutzenden Aquifers getestet. Weiter lassen sich sichere Aussagen bezüglich der chemisch-physikalischen sowie der hygienischen Qualität des Kluftwassers erst durch Analysen während eines Langzeitpumpversuches treffen. Können Sondierungs- oder Erkundungsbohrungen im Umfeld des Pumpbrunnens nicht als Messstellen genutzt werden, sind vor einem Langzeitpumpversuch Beobachtungspegel abzuteufen. Aufgrund der Lage der Untersuchungsgebietes innerhalb des Alpenraumes sollte der Langzeitpumpversuch während der Schneeschmelze (März - Juni) bzw. in den folgenden niederschlagsreichsten Monaten Juni bis August (Kap. II.2.3.6, II.3.3.5) durchgeführt werden. Auf diese Weise lassen sich mögliche Kontaminationen durch Oberflächenwasser in den Kluftwasserkörper registrieren. Ein weiterer Langzeitpumpversuch zur Erfassung der Ergiebigkeit bei geringer Grundwasserneubildungsrate ist während der Trockenperiode (September - Oktober, Kap. II.2.3.6, II.3.3.5) durchzuführen.

In Kombination mit den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen (*Phase I - III*) ermöglichen die Resultate des Langzeitpumpversuches (*Phase IV*) eine Beurteilung, ob mit Beginn der *Phase V* eine Trinkwasserversorgung aus dem Kluftkörper Hauptdolomit aufgebaut werden kann.

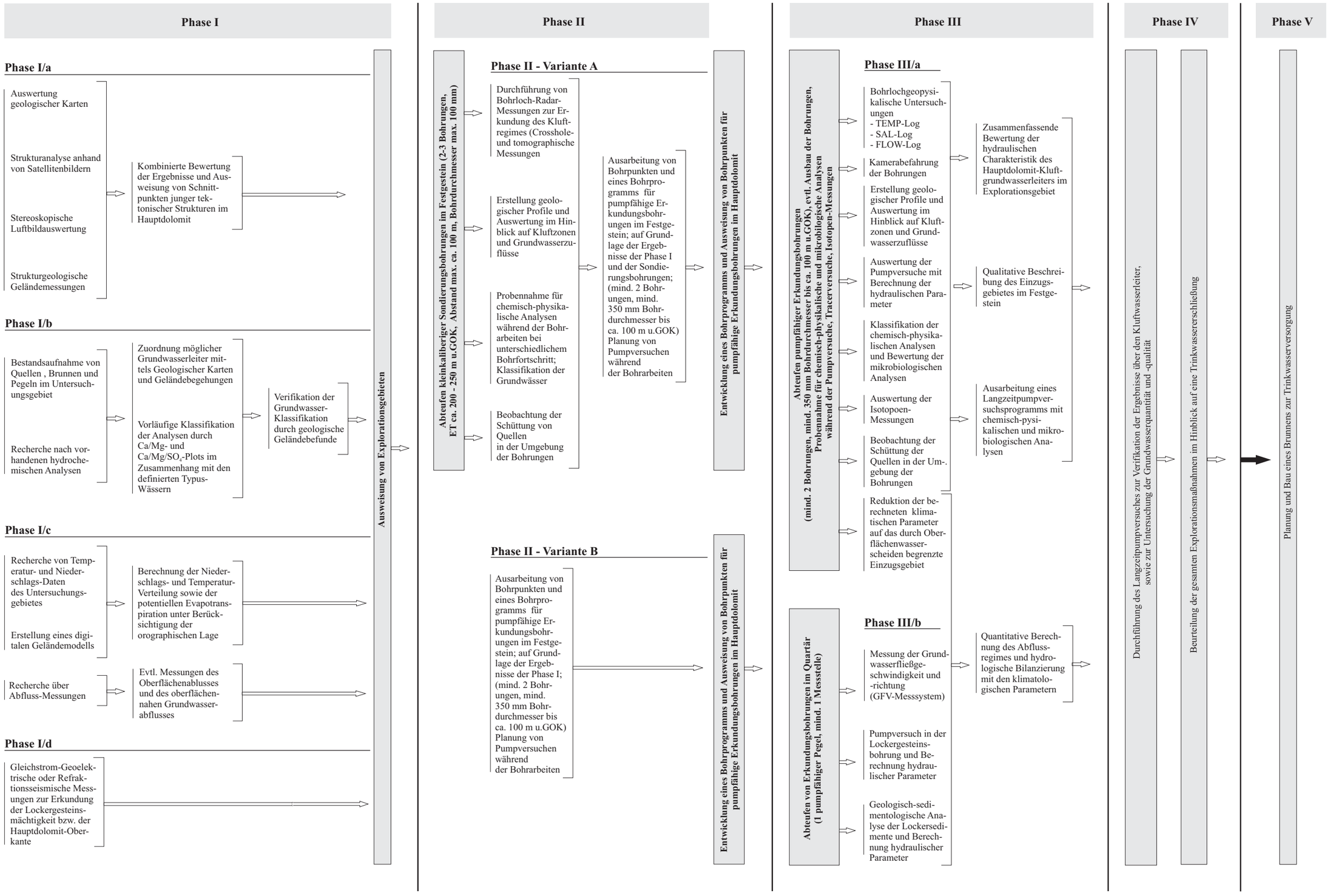


Abb. 30: Schematischer Verlauf einer Trinkwasser-Erschließung aus dem Hauptdolomit in den Nördlichen Kalkalpen

III.6 Chancen und Risiken einer Trinkwasser-Exploration aus geklüftetem Hauptdolomit

Ziel einer Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit ist es Grundwasser zu erschließen, welches aus chemisch-physikalischer sowie hygienischer Sicht sehr gute und vor allem konstante Trinkwasser-Qualität aufweist. Durch die Charakteristik des Kluftaquifers Hauptdolomit (nicht verkarstungsfähig, differenziertes Kluftsystem, hohe Verweildauer des Kluftwassers im Gesteinsverband) sowie die Teufenlage der zu nutzenden Aquifere (i.d.R. > 100 m u.GOK) ist der Grundwasserschutz und damit die Trinkwasser-Qualität zu einem hohen Maße gewährleistet und gesichert. Die Notwendigkeit einer kostspieligen Aufbereitung des Trinkwassers kann ausgeschlossen werden.

Bei einer optimalen Anbindung der Brunnen an das Kluftsystem eines großen unterirdischen Einzugsgebietes im Hauptdolomit können hohe und konstante Förderraten erwartet werden.

Eine Trinkwasser-Erschließung im Hauptdolomit birgt jedoch auch Risiken. Es besteht die Gefahr der Kontamination des Hauptdolomitwassers durch den Einfluss der Raibler Schichten und damit von sulfathaltigen Wässern; je nach Konzentration kann es als Trinkwasser lediglich bedingt oder nicht verwendet werden.

Prinzipiell besteht zudem das Risiko keine ausreichende Anzahl wasserführender Klüfte zu erschließen. Um diesen Risken zu begegnen bzw. sie zu minimieren bedarf es einer intensiven Vorerkundung und eines strukturierten Explorationsprogrammes (Kap. III.5). Nach Abschluss der Vorerkundung (*Phase I*, Kap. III.5) lässt sich bereits eine qualitative Prognose hinsichtlich der Grundwasserhöffigkeit eines Untersuchungsgebietes erstellen.

Der Kosten der Vorerkundung sowie der Erschließung von Kluftgrundwasser ist im Vergleich zu einem Projekt im Lockergestein ungleich größer. Der finanzielle Mehraufwand im Festgestein relativiert sich jedoch unter Berücksichtigung der Folgekosten während des Betriebs der Trinkwassergewinnung: Im Lockergestein muss meist mit einer Kontamination durch Oberflächenwasser bzw. anthropogene Einflüsse gerechnet werden. Die bei bestehenden Wasserversorgungen im deutschen Alpenraum häufig auftretenden Trübungen und/oder hygienischen Belastungen zeigen die Problematik deutlich. Hier muss das Wasser z.B. durch Ultrafiltration, UV-Behandlung oder durch Chlorierung aufbereitet werden. Die finanziell relativ günstige Chlorierung wird jedoch nach Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie nicht mehr zulässig sein. Daher müssen z.T. hohe Anfangsinvestitionen und hohe Betriebskosten für Aufbereitungsanlagen aufgewendet werden. Durch die Charakteristik des Kluftaquifers Hauptdolomit sowie die Teufenlage der zu nutzenden Aquifere kann diese für Lockergesteinsaquifere typische Problematik nahezu ausgeschlossen werden.

Die Ausweisung notwendiger Trinkwasserschutzgebiete für Tinkwasserversorgungen aus Lockergesteinen gestaltet sich oftmals schwierig, da diese meist innerhalb dicht besiedelter Talbereiche gelegen sind. Für Trinkwasserversorgungen aus dem Hauptdolomit bieten sich meist in höheren Regionen außerhalb der Besiedlung an, in denen Trinkwasserschutzgebiete leichter festgelegt werden können.

Literaturverzeichnis

AGARWAL, R.G. (1980): A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyse pressure buildup and other test data. Proc. amerc. Petr. Engineers, SPE 9289.

BARRENBLATT, G. E., ZEHLTOV, J.P., KOCHINA, J.N. (1960): Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks. Journ. appl. Math. Mech. (USSR), 24/5, 1286-1303.

BAUMGARTNER, A., REICHEL, E., WEBER, G. (1983): Der Wasserhaushalt der Alpen. Niederschlag, Verdunstung, Abfluß und Gletscherspende im Gesamtgebiet der Alpen im Jahresdurchschnitt für die Normalperiode 1931-1960. R. Oldenburg-Verlag, 1-343, München.

BERKALOFF, E. (1967): Intérpretation des pompages d'essai. Cas de nappes captives avec une strate conductrice d'eau privilégée. Bull. B.R.G.M. (deuxiéme série), Section III/1, 33-35, Paris.

BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilung. Wasserwirtschaft - Wassertechnik (WWT), 1967, 165-169, Berlin-Ost.

BIALAS, Z.; KLECZKOWSKI, A.S. (1970): O przdydatnosciniektórych wzorów empirycznych dla okreslenia wspoLczynnika filtacji k (Über den praktischen Gebrauch von einigen empirischen Formeln zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffinzienten k). Archiwum Hydrotechniki, 17.3, 405-417, Warschau.

BLANEY, H.F., CRIDDLE, W.D. (1950): Determinating water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. US Deo. Ab r. div. Irrigation and Water Conservation SCS TP, 96, 1-46.

BOULTON, N. S., STRELTSOVA, T.D. (1977): Unsteady flow to a pumped well in fissured water-bearing-formation. Journ. Hydrology, 35, 257-269, Amsterdam.

BOULTON, N. S., STRELTSOVA, T.D. (1977): Unsteady flow into a pumped well in a two-layered water-bearing formation. Journ. Hydrology, 35, 245-256, Amsterdam.

BOURDET, D., GRINGARTEN, A.C. (1980): Determination of fissure volume and block size in fractured reservoirs by type-curve analysis. Soc. Petrol. Engineers of AIME, SPE 9293, 1-22.

BUHMANN, D., DREYBRODT, W. (1986): The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas. Chem. Geology, 53, 109-124, Amsterdam.

CINCO, L. H., SAMANIEGO, F.V., DOMINGUEZ, N.A. (1976): Transient pressure behavior for a well with a finite conductivity vertical fracture. Soc. Petrol. Engineers of AIME, SPE 6014, 1-12.

CINCO, L. H., SAMANIEGO, F.V. (1977): Effect of wellbore storage and damage on the transient pressure behavior of vertically fractured wells. Soc. Petrol. Engineers of AIME, SPE 6752, 1-8.

CINCO, L. H., SAMANIEGO, F.V., DOMINGUEZ, N.A. (1978): Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture. Soc. Petrol. Engineers Jorn, 1978, 253-264.

DEINES, P., LANGMUIR, D., HARMON, R.S. (1974): Stable Carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground waters. Geochim. Cosmochim. Acta, 38, 1147-1164.

DOMENICO, P.A., SCHWARTZ, F.W. (1990): Physical and Chemical Hydrology. Jon Wiley & Sons, 1-824, New York.

DOOLEY, T. & MCCLAY, K. (1997): Analog Modeling or Pull-Apart-Basins. AAPG Bul., 81/11, 1804-1826, Tulsa.

DUPUIT, J. (1863): Études théorique et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et travers les terrains perméables. Dunot, 1-304, Paris.

DVWG (1983): Ermittlung, Darstellung und Auswertung der Korngrößenverteilung wasserleitender Lockergesteine für geohydraulische Untersuchungen und für den Bau von Brunnen. DVWG-Regelwerk,

Arbeitsblatt W 113, 1-17, Frankfurt/M.

DIN 4049-1, Teil 1 (1992): Hydrologie, Grundbegriffe. DIN Deutsches Institut für Normung e.V, Beuth Verlag., Berlin.

DIN 4049-3, Teil 3 (1992): Hydrologie, Begriffe zur quantitativen Hydrologie. DIN Deutsches Institut für Normung e.V, Beuth Verlag., Berlin.

DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK, Merkblätter 238/1996, 1-135, Bonn.

FELLEHNER, M. (2004): Der Hauptdolomit als Grundwasserspeicher in den Nördlichen Kalkalpen. Dissertation an der Philipps-Universität Marburg, Institut für Geowissenschaften, 1-88, Marburg.

FURTAK, H., LANGGUTH, H.R. (1967): Zur hydrogeochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. Mem. IAH-Kongress 1965, 7, 89-96, Hannover.

GRINGARTEN, A. C., RAMEY, H.J. (1974): Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration, or restricted entry. Soc. Petrol. Engineers Jorn, 1974, 413-426 New York.

HANTUSH, M. S. (1956): Analysis of pumping data from tests in leaky aquifers. Trans. amer. geophys. Union, 37/6, 702-716.

HANTUSH, M. S. (1964): Hydraulics of wells. Proc. amerc. Soc. Civil Engineers, 1964, 281-433.

HANTUSH, M. S. (1967): Flow of groundwater in ralatively thick leaky aquifers. Water Resources Research, 3/2, 583-595, Washington D.C..

HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitt. Deutsch. Wetterdienst, 11, Offenbach.

HAZEN, A. (1893): Some physikal properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. Ann. Rep. Mass. State Bd. Health, 24, 541-556, Boston.

HUBER, B. (1992): Einfluss des Trennflächengefüges auf die Grundwasserströmung in Kluftwasserleitern. Hydrogeologie und Umwelt, 5, 1-293.

JERZ, H. (1966): Untersuchungen über Stoffbestand, Bildungsbedingungen und Paläogeographie der Raibler Schichten zwischen Lech und Inn (Nördliche Kalkalpen). Geologica Bavarica, 56, 1-99, München.

KAZEMI, H. (1969): Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution. Trans. Soc. Petrol. Engineers Journ., AIME 4, 451-461, New York.

KIRCHOFF, A., USDOWSKI, E. (1985): Hydrogeochemische und isotopenchemische Untersuchungen an karbonathaltigen Grundwässern im Göttinger Raum. Z. dt. geol. Ges., 136, 575-583, Hannover.

KIRCHOFF, A. (1988): Experimentelle Untersuchungen zur Lösungskinetik von Calcit und Dolomit unter besonderer Berücksichtigung der Kohlenstoffisotope 13C und 12C. Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen, Fachbereich Mathematik-Naturwissenschaften, 1-134, Göttingen.

LANGMUIR, D. (1971): The geochemistry of some carbonate ground waters in central Pennsylvania. Geochim. Cosmochim. Acta, 35, 1023-1045.

LINZER, H.-G., RATSCHENBACHER, L., FRISCH, W. (1995): Transpressional collision structures in the upper crust: the fold-thrust belt of the Northern Calcareous Alps. Tectonophysics, 242, 41-61, Amsterdam.

LOGAN, J. (1964): Estimating transmissibility from routine production test of water wells. Ground Water, 2, 35-37.

MADER, N. (2001): Geologische Kartierung des Scheibelberggebietes (Dreiländereck Bayern-Salzburg-Tirol) mit Untersuchungen zur Fazies und Diagenese der Hauptlithodendronkalkbank (Kössener Schichten, Obertrias). Unveröffentl. Diplomarbeit, Philipps-Universität Marburg, Institut für Geowissenschaften, 103 S., Marburg.

MAKKINK, G.F. (1957): Ekzameno de la formulo de Penman. Netherlands J. Agr. Sci., 5.

Marotz, G. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. Schriftenreihe des KWK, H. 18, 1-228, Hamburg.

MAVOR, M. J., Cinco H. (1979): Trasient pressure behavior of naturally fractured reservoirs. Soc. Petrol. Engineers of AIME, SPE 7977, 1-16, New York.

MICHAELIS, J. (1987): Hydrogeochemische Modellbetrachtungen zur Kalkauflösung und Entwicklung karbonatischer Grundwässer im Göttinger Wald unter spezieller Berücksichtigung der stabilen Isotope des Kohlenstoffs und Schwefels. Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen.

MOENCH, A. F. (1984): Double porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. Water Resources Research, 20, 831-846, Washington D.C..

MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1995): Numerisches Verfahren zu Erstellung klimatologischer Karten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 193, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1-18, Offenbach.

PEKDEGER, A., SCHULZ, H.-D. (1975): Ein Methodenvergleich des kf-Wertes von Sanden. Meyniana, 27, 35-40, Kiel.

PENMAN, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Meteorol. Soc. A., 193, 120-145.

PERESSON, H., DECKER, K. (1997): The Tertiary dynamics of the nothern Eastern Alps (Austria): changing palaeostresses in a collisional plate boundary. Tectonophysics, 272, 125-157, Amsterdam.

PHREALOG 2003: Erkundung der Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit in der Grundwassermessstelle GWM1 am Standort Wildbad Kreuth. Unveröfentl. Untersuchungsbericht der Firma Phrealog (Mainz) a. d. LfW Bayern, 7 S., Mainz.

RATSCHENBACHER, L., MERLE, O, DAYY, P., COBBOLD, P. (1991a): Lateral Extrusion in the Eastern Alps. Part I. Boundary conditions and experiments scaled for gravity. Tectonics, 10, 245-256, Washington D.C..

RATSCHENBACHER, L., FRISCH W., LINZER, H.G., MERLE, O. (1991b): Lateral Extrusion in the Eastern Alps, Part II. Strucural analysis. Tectonics, 10, 257-271, Washington D.C..

RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 194, 1-93. Offenbach.

SCHAEFER, K.-W. (1985): Hydrogeochemische und isotopengeochemische Untersuchungen im Gips-Karbonat-Gebiet von Osterode/Harz - Modelle der Karbonatauflösung und ihre Anwendung. Unveröffentl. Diplomarbeit. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen.

SCHRÖDTER, H. (1985): Verdunstung - Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer-Verlag, 1-186, Berlin.

STOBER, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. Geol. Jb., C 42, 3-204, Hannover.

STRAYLE, G. (1983): Pumpversuche im Festgestein. DVGW-Schriftenr. Wasser, 34, 305-325, Frankfurt/M.

Schweigl, J., Neubauer, F. (1997): Structural evolution of the central Nothern Calcareous Alps: Significance

for the Jurassic to Tertiary geodynamics in the Alps. Eclogae geol. Helv., 90, 303-323, Basel.

THEIS, C. V. (1935): The Relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. AGU, 1935, 519-524, Washington D.C..

THIEM, G. (1906): Hydrogeologische Methoden. Gebhardt, 1-56, Leipzig.

TRINKWV (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001. BGBl 1, 959.

TURC, L. (1961): Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Ann. Agron., 12, 13-49, Paris.

WAGNER, B., TÖPFNER, C., LISCHEID, G., SCHOLZ, M., KLINGER, R., KLAAS, P. (2003): Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns. GLA Fachberichte, 21, 1-250, München.

WARREN J.E., ROOT, P. J. (1963): Behavior of naturally fractured reserviors. Soc. Petrol. Engineers Journ., 1963, 245-255, New York.

WEISCHET, W. (1977): Einführung in die allgemeine Klimatologie. Teubner-Verlag, 1-256, Stuttgart.

WENDLING, U., SCHELLIN, H.-G., THOMÄ, M. (1991): Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. Z. Meteorol., 41, 468-475.