Beiträge zur Hydrogeologie / 54 / Seiten 63–78 / Graz 2003

Erfassung des Kluftnetzwerkes zur Ausweisung hydrogeologischer Homogenbereiche in Festgesteinen am Beispiel Sonnwendstein/Semmering (Österreich)

Recording of the Fracture Network for Determination of Hydrogeological Homogeneous Areas in Hard Rocks in the Area of Sonnwendstein/Semmering (Austria)

G. Winkler[1]) & E. Strobl[2])

Inhalt

Seite

1. Einleitung 63
2. Sonnwendstein/Semmering – geologisch-tektonische Verhältnisse 65
3. Datenerhebung – Aufnahmemethode 68
   3.1. Regionale Datenerhebung 68
   3.2. Lokale Datenaufnahme – Gefügedaten 69
4. Datenanalyse 69
   4.1. Clustering – hydraulische Wirksamkeit 69
   4.2. Ergebnisse – hydrogeologische Homogenbereiche 72
   4.3. Kluftausbildung in Abhängigkeit von der Lithologie 74

Zusammenfassung 76

Literatur 77

Summary 78

1. Einleitung

Für die Beurteilung von Wasserressourcen und in vielen Bereichen der Angewandten Geologie – vor allem der Ingenieurgeologie – ist es notwendig, das System „Wasser/Gestein" zu erfassen und zu beschreiben, um hydrogeologische Fragestellungen beantworten zu können. Die Schwierigkeit bei der Beschreibung dieses hydrogeologischen Systems liegt in dessen Komplexität, welche sich aus der Kombination von statischen und dynamischen Systemkomponenten ergibt.

[1]) Dr. Gerfried Winkler, Institut für WasserRessourcenManagement, Hydrogeologie und Geophysik, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Elisabethstraße 16/II, A-8010 Graz, Österreich. E-Mail: gerfried.winkler@joanneum.at

[2]) Dr. Elmar Strobl, ZT Neubauer, Wiener Straße 253, A-8051 Graz, Österreich. E-Mail: elmar.strobl@zt-neubauer.at

Der Gesteinsverband (statische Systemkomponente) – Festgesteine und Lockersedimente – sowie diesen bedeckende Bodenschichten stellen das Gerüst für die Wasserbewegung dar. Diese erfolgt zum Großteil in den Kluft- bzw. Porenhohlräumen. Die Erfassung und Darstellung der „gesteinsspezifischen Eigenschaften" (z.B. Lithologie, Trennflächensystem) führen zu einem geologischen Modell, in dem für jeden Punkt des Raumes die geologischen Systemeigenschaften angegeben werden können. In Hinblick auf das Ziel einer hydrogeologischen Systembeschreibung müssen diese „gesteinsspezifischen Eigenschaften" hinsichtlich ihres Einflusses auf die Wasserbewegung bewertet und zur besseren Übersicht zu Gruppen – den hydrogeologischen Homogenbereichen – zusammengefasst werden.

Schwieriger ist die Erfassung und Beschreibung der dynamischen Systemkomponente „Wasser". Die „wasserspezifischen Eigenschaften" schwanken mit unterschiedlicher Periodizität (z.B. jahreszeitlich oder langjährig) bzw. ihre Schwankungen können sich auch überlagern. In Wechselwirkung mit dem Gestein, das vom Wasser durchflossen wird, ergeben sich unterschiedliche Entwicklungspfade. Diese gehen von den quantitativen und qualitativen Inputbedingungen (z.B. Grundwasserneubildung, hydrochemische und isotopische Zusammensetzung) aus und führen zu den quantitativen und qualitativen Outputbedingungen (z.B. Quellschüttungen, Grundwasserstände, hydrochemische und isotopische Zusammensetzung). Die Verknüpfung der statischen und dynamischen Systemkomponenten (Fig. 1) ergibt ein „hydrogeologisches Konzeptmodell" (P. Reichl et al., 2002). Das Verständnis dieser Entwicklungspfade auf der Untergrundpassage ermöglicht z.B. Aussagen hinsichtlich Speichereigenschaften der Gesteine.

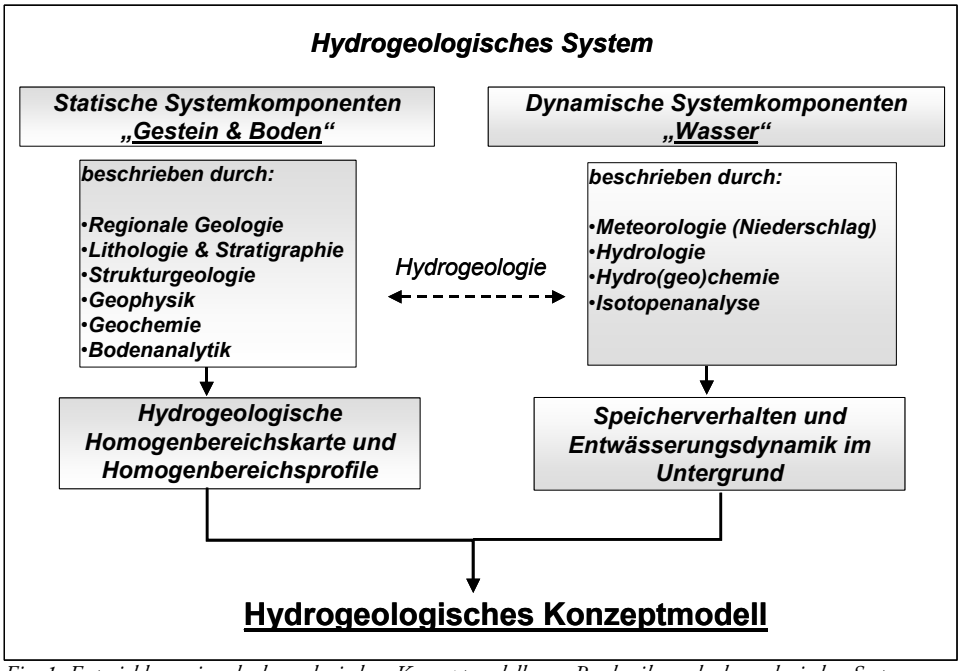

Fig. 1: Entwicklung eines hydrogeologischen Konzeptmodells zur Beschreibung hydrogeologischer Systeme. Development of a hydrogeological conceptional model for description of hydrogeological systems.

Im Bereich von klüftigen Festgesteinen stellt die Erfassung und die Analyse von tektonischen Strukturen (Kluftsystem) eine der Grundlagen für die Erstellung eines solchen hydrogeologischen Konzeptmodells dar. Im Rahmen eines zweijährigen Forschungsprojektes, das aus Mitteln der „Forschungs- und Technologieschwerpunkte der Österreichischen Bundesregierung gemäß Bundesvoranschlag 2001" finanziert wurde (T. HARUM et al., 2001), und der parallel durchgeführten Untersuchungen im Zuge einer Dissertation am Institut für WasserRessourcenManagement, Hydrogeologie und Geophysik (vormals Institut für Hydrogeologie und Geothermie) der JOANNEUM RESEARCH (G. WINKLER, 2003) konnten u.a. Methoden für die Erfassung und hydrogeologische Bewertung des Kluftnetzwerkes in Festgesteinen adaptiert und weiterentwickelt werden. Ziel war es u.a. Ergebnisse hinsichtlich der räumlichen Verteilung von hydrogeologischen bzw. hydraulischen Eigenschaften von klüftigen Festgesteinen zu gewinnen und hydrogeologische Homogenbereiche auszuweisen.

2. Sonnwendstein/Semmering – geologisch-tektonische Verhältnisse

Das Testgebiet liegt geographisch im NE der Steiermark an der Grenze zu Niederösterreich. Das Gebiet erstreckt sich südlich des Semmeringpasses über das Hirschenkogel-Sonnwendstein Massiv und hat eine Gesamtfläche von ca. 9 km^2 (Fig. 2).

Das Testgebiet Semmering weist einen komplexen geologischen Aufbau aus permomesozoischen Gesteinen auf (Fig. 2). Einen Querschnitt durch das Untersuchungsgebiet zeigt das Profil P5 (Fig. 3), dessen Lage in Fig. 2 eingezeichnet ist.

Als tiefste und stratigraphisch älteste Gesteinseinheit stehen im Untersuchungsgebiet Quarzite an, deren Gefüge von geschiefert – in tektonischen Störungsbereichen – über dick gebankt bis massig reicht. Im Nahbereich der Überschiebungszone von Semmeringkristallin auf Wechselkristallin, dies entspricht der Südgrenze des Untersuchungsgebietes, liegt der Quarzit tektonisch bedingt z.T. verfaltet und engscharig geklüftet vor.

Rauhwacken sind vor allem im Bereich südlich der Semmeringstörung aufgeschlossen. Auch Vorkommen innerhalb des Untersuchungsgebietes sind zumeist mit tektonischen Großstrukturen verknüpft. Die gelblichen, ockerbraunen Rauhwacken zeigen eine charakteristische zellig-poröse bzw. sandig-brekziöse Textur. Sie sind vom Erscheinungsbild her massig und weisen nur eine geringe Klüftigkeit auf.

„Geschieferte" Dolomit(-marmor)e stehen im zentralen Teil des Testgebietes an. Hierbei handelt es sich um feinplattige bis „geschieferte" hell- bis dunkelgraubraune Dolomit(-marmor)e, in denen feine schicht-/schieferungsparallele Zwischenlagen mit Tonmineralbelag vorkommen, die bevorzugte Bewegungshorizonte darstellen. Diese Schichten sind tektonisch stark beansprucht, wobei in den feinschichtigen Gesteinskörpern schichtparallel gestreckte Linsen aus dunkelgrauen bzw. hellgrauen Dolomit (-marmor)en der hangenden Gesteinseinheiten eingebettet sind. Die Größe dieser Linsen variiert zwischen einigen Zentimetern und mehreren Zehnermetern. Lokal zeigen die Schichten einen hohen Kalkgehalt.

Neben diesen „geschieferten" Dolomit(-marmor)en sind Bänderkalke mit einem ähnlichen strukturellen Erscheinungsbild aufgeschlossen. Es sind hell- bis mittelgraue Kalkmarmore mit einem plattigen bis dünnbankigen Gefüge. Das Gestein ist bereichsweise stark tektonisch beansprucht und kleinstückig (Zentimeterbereich) zerlegt. Das texturelle Erscheinungsbild ist fein- bis mittelkörnig und teilweise ist eine Lamination zu erkennen.

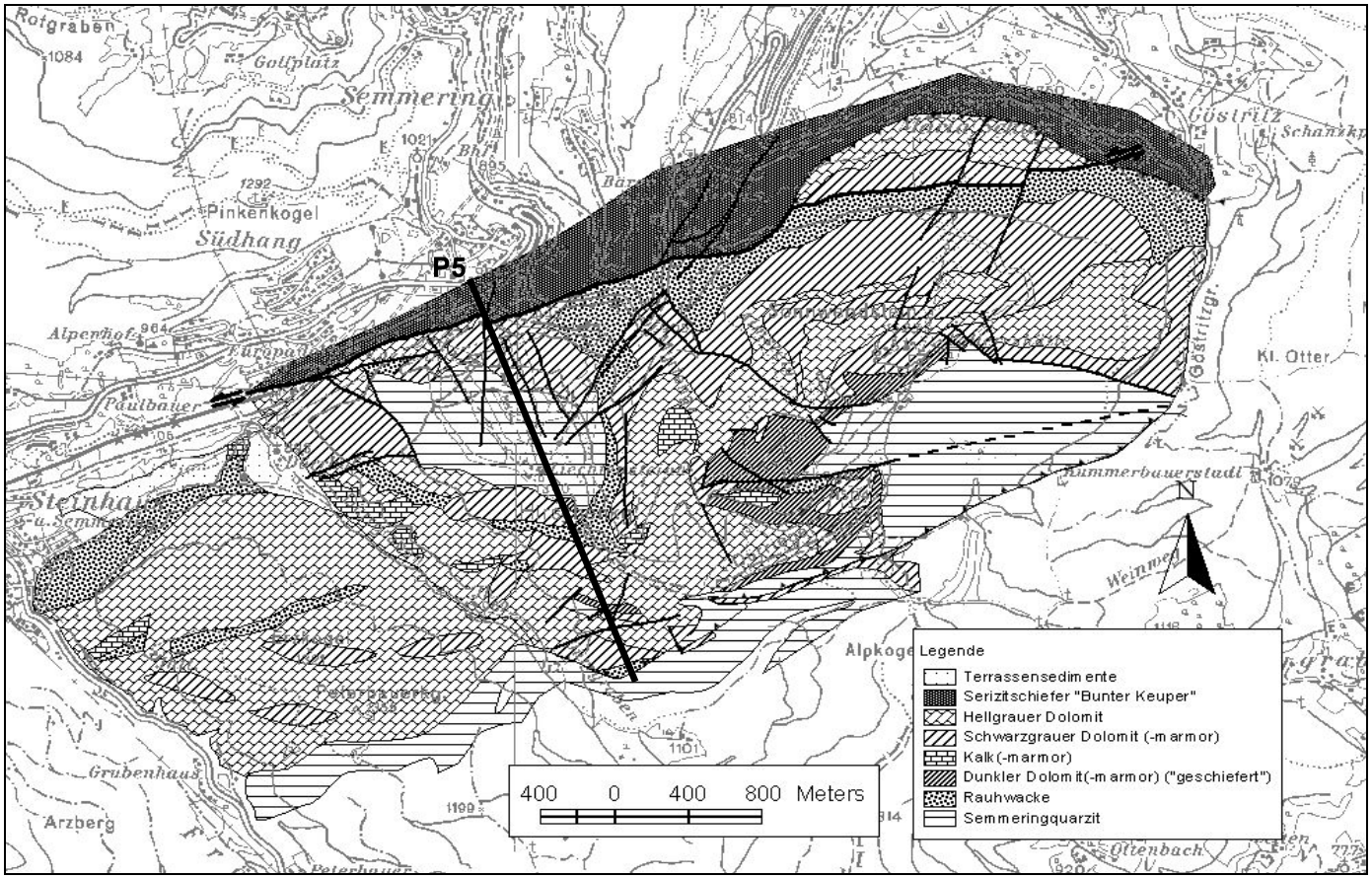

Fig. 2: Geologische Übersichtskarte Sonnwendstein/Semmering mit Lage des Profils P5 von Fig. 3 (P. Reichl et al., 2002).
Geological map Sonnwendstein/Semmering with the position of the profile P5 shown in fig. 3 (P. Reichl et al., 2002).

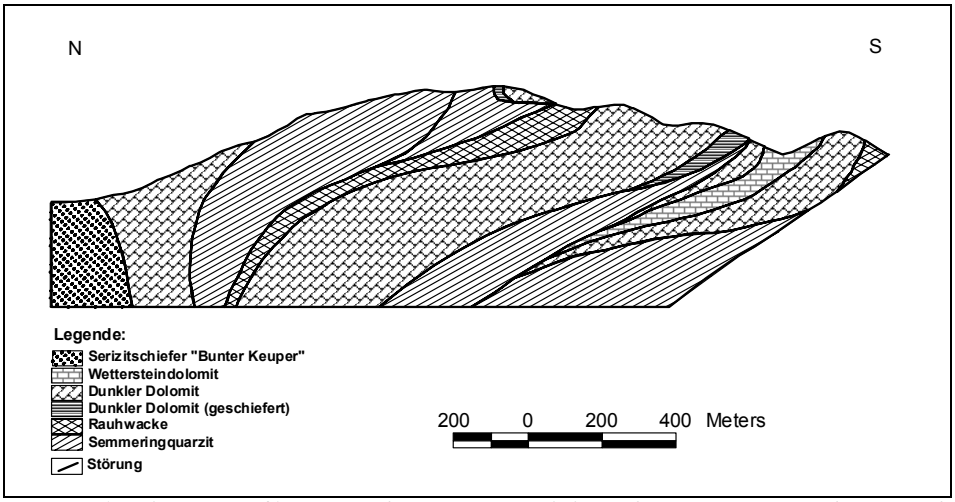

Fig. 3: Geologisches N-S-Profil (P5) von der Semmeringpasshöhe in den Hinteren Dürrgraben (Lage des Profils siehe Fig. 2).
Geological N-S cross section (P5) from Semmering pass to rear part of Dürrgraben (the position is shown in fig. 2).

Schwarzgraue und hellgraue Dolomit(-marmor)e nehmen den größten Teil des Testgebietes ein. Die dunklen Dolomit(-marmor)e treten dünn gebankt bis massig auf. Es handelt sich um feinkörnige Gesteine, die durch ein engständiges meist kalzitisch verheiltes Kleinkluftgefüge charakterisiert sind. Die Übergänge zu den hellgrauen Dolomit(-marmor)en sind teilweise fließend. Lokal treten die Dolomit(-marmor)gesteine auch laminiert auf.

Die hellgrauen, teilweise leicht hellbräunlichen Dolomit(-marmor)gesteine werden im Testgebiet in der Literatur als Wettersteindolomite geführt. Sie sind dünn gebankte bis massige Gesteine mit feinkörniger Textur. Sie treten in Wechsellagerung mit den dunkelgrauen Dolomit(-marmor)gesteinen auf, wobei den hellgrauen Dolomit(-marmor)en das engständige Kleinkluftgefüge weitgehend fehlt.

Tektonisch wird das Testgebiet von Strukturen, die im Zusammenhang mit der lateralen Extrusion der Ostalpen (L. RATSCHBACHER et al., 1991) stehen, geprägt. Demzufolge erfolgte im N eine Relativbewegung der zentralalpinen Einheiten an der sinistralen Salzachtal-Ennstal-Mariazell-Puchberg-Linie (SEMP), im S an der dextralen Periadriatischen Naht, in den pannonischen Raum. Zahlreiche zu diesen Hauptstörungen angelegte parallele Strukturen gliedern den Bereich des Alpenostrandes.

Die WSW-ENE-streichende Semmeringstörung ist eine der großen Seitenverschiebungen, an der diese Extrusion stattfand, und begrenzt das Testgebiet im N. Es handelt sich hierbei um eine fast saiger stehende sinistrale Blattverschiebung, die parallel zur Mur-Mürz-Semmering-Hauptstörung verläuft.

Basierend auf vorhandenen geologischen Karten, ergänzenden Kartierungen und den im Gelände erhobenen strukturgeologischen Messdaten wurde eine geologisch-tektonische Modellvorstellung für das Testgebiet entwickelt (Fig. 4). Demnach prägen sinistrale Blattverschiebungen – parallel zum Mur-Mürz-Semmering-Störungssystem – mit z.T. bedeutenden Aufschiebungskomponenten das tektonische Erscheinugsbild. Ältere S- bis SE-gerichtete (Rück)Überschiebungen werden im Zuge der lateralen Extru-

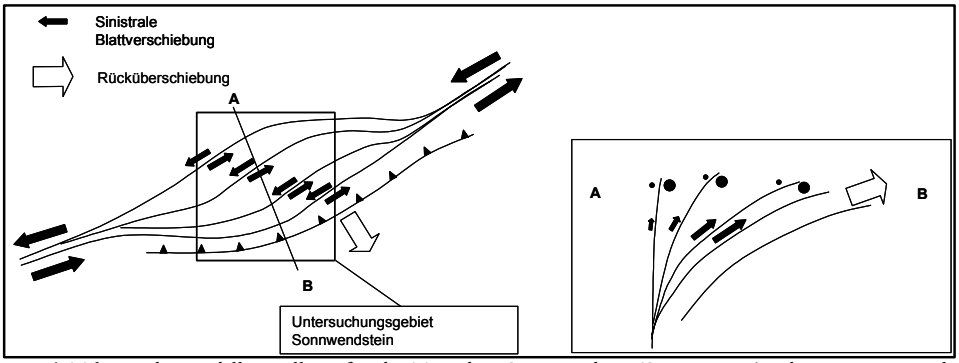

Fig. 4: Tektonische Modellvorstellung für das Testgebiet Sonnwendstein/Semmering (nach P. Reichl et al., 2002).
Tectonic model of the investigation area Sonnwendstein/Semmering (after P. Reichl et al., 2002).

sion wieder aktiviert (Fig. 4). Durch die Aufschiebungen an diesem konvergenten Störungssystem gelangen stratigraphisch ältere Schichten auf jüngere und ergeben so das Bild einer positiven „flower structure". Dieser Vorgang führt zu einer Vervielfachung der stratigraphischen Abfolge (Duplexbildung), wie sie auch im Profil P5 (Fig. 3) ersichtlich ist.

Durch die starke tektonische Beanspruchung kommt es auch zu Versätzen an den Grenzen von stratigraphisch übereinander liegenden Einheiten, sodass heute die meisten lithologischen Grenzen tektonisch überprägt vorliegen (Fig. 3).

Die südliche Begrenzung des Testgebietes ist eine Störungszone, die, mittelsteil nach NW einfallend, das liegende Wechselsystem vom Semmeringsystem trennt. Der Verlauf der südlichen Begrenzung ist annähernd parallel zur nördlichen Begrenzung.

3. Datenerhebung – Aufnahmemethode

Die Erhebung der Daten gliedert sich in zwei hierarchische Schritte. Im Zuge der „regionalen Datenerhebung" wird ein konzeptionelles Gebirgsmodell erstellt und davon abgeleitet werden die Aufschlüsse bestimmt, an denen das Kluftsystem erfasst wird. Die Eigenschaften des Kluftsystems werden im Zuge der „lokalen Datenerhebung" an den jeweiligen ausgewählten Aufschlüssen aufgenommen.

3.1. Regionale Datenerhebung

Das Ziel der regionalen Datenerhebung ist es, repräsentative Aufschlüsse in einzelnen lithologisch und strukturgeologisch ähnlichen Bereichen („lithologische" Homogenbereiche) herauszufiltern. Die Grundlage hierfür und für das konzeptionelle Gebirgsmodell war eine geologische Aufschlusskarte, Maßstab 1 : 10 000 (in: T. Harum et al., 2001).

Jede lithologische Einheit wurde als ein eigener Bereich erfasst. Traten innerhalb der lithologischen Einheit tektonische Großstrukturen wie Störungszonen auf, wurde dem Rechnung getragen, indem auch aus dem gestörten Bereich, der nun seinerseits als eigenständige Einheit anzusprechen war, nach Möglichkeit ein Aufschluss ausgewählt wurde.

Vorweg ist es notwendig Kriterien für die Auswahl der Aufschlüsse zu definieren. Demnach darf in einem Aufschluss nur eine lithologische Einheit vorkommen und eine Mindestgröße für die Festlegung entsprechender Messlinien (Scan-Lines) muss vorliegen. Nach Möglichkeit soll eine dreidimensionale Aufschlussaufnahme möglich sein, wobei zu berücksichtigen ist, dass der Gesteinsverband durch Verwitterung oder lokale Auflockerungen nicht zu stark beeinträchtigt vorliegt. Die regionale Datenaufnahme und -auswertung ergab 17 Aufschlüsse für das Testgebiet Sonnwendstein/Semmering, die in weiterer Folge für die lokale Datenaufnahme herangezogen wurden. Die Lage der Aufschlüsse ist Fig. 6 zu entnehmen.

3.2. Lokale Datenaufnahme – Gefügedaten

Die Datenaufnahme an den Aufschlüssen erfolgte nach möglichst objektiven, standardisierten Kriterien (G. Winkler, 2003). Neben der Objektivität war auch der Zeitfaktor in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit einer praxisorientierten Aufnahmemethode von Bedeutung. Aufgrund der beiden Anforderungen erfolgte die Datenaufnahme mittels Scan-Line-Verfahren. Die Standards und Kriterien für die Scan-Line-Aufnahme sind vorab spezifisch auf die jeweiligen Anforderungen und Fragestellungen zu definieren. Die Trennflächen wurden in ihrer Raumlage (Azimut, Fallwinkel) erfasst und die Parameter Öffnung, lineare Durchtrennungslänge und Oberflächenbeschaffenheit (Welligkeit, Rauhigkeit) bzw. etwaige Füllungen erhoben.

Insgesamt wurden im Testgebiet entlang von 126,5 m Scan-Line 1998 Trennflächen und deren Parameter erfasst und in einer den konkreten Anforderungen angepassten Datenbank archiviert.

In St. J. Priest (1993) werden Scan-Line-Aufnahmemethoden näher erläutert. Im Zuge des Scan-Line-Verfahrens wird eine große Anzahl von Daten im Gelände aufgenommen. Eine wesentliche Voraussetzung für die weitere Bearbeitung, den Vergleich mit anderen Datensätzen und die Interpretation gewonnener Daten ist die für die konkrete Fragestellung erforderliche Kenntnis über Aussagekraft und Qualität der Daten. Die erforderliche Datenqualität soll unabhängig von den aufnehmenden Personen, dem Zeitpunkt und den Umständen während der Aufnahme gewährleistet sein. Dies inkludiert, dass eine Reproduzierbarkeit der Datengewinnung möglich sein muss. Aufgrund dieser Anforderungen wurden vorab Standards zur Aufnahme der einzelnen Aufschlüsse und der dazugehörenden Scan-Lines bzw. deren Trennflächen entworfen.

4. Datenanalyse

4.1. Clustering – hydraulische Wirksamkeit

Um die Hauptkluftrichtungen und deren hydraulische Wirksamkeiten zu beschreiben, sind für die statistische Analyse der hydrogeologischen Klufteigenschaften zwei Gruppen von Variablen relevant:

– Die erste Gruppe der Variablen umfasst die Raumlage der Trennflächen, gegeben durch Azimut und Fallwinkel, und deren Häufigkeit.
– Die zweite Gruppe der Variablen betrifft die Attribute Öffnung, Länge und linearer Durchtrennungsgrad, Parameter, die die hydraulische Wirksamkeit der Trennflächen beschreiben.

Für geologische Fragestellungen werden die richtungsrelevanten Attribute wie Azimut, Fallwinkel und Häufigkeit in der statistischen Analyse herangezogen. Aus den beobachteten Trennflächen werden die Hauptkluftrichtung bzw. einzelne Gruppen (Cluster) bestimmt. Aussagen über richtungsspezifische Eigenschaften der einzelnen Cluster (Schwerpunktsfläche, Regelungsgrad u.ä.) werden davon abgeleitet.

Für hydrogeologische Fragestellungen ist es wesentlich, die Attribute Öffnung und lineare Durchtrennungslänge der Trennflächen bei der Analyse mit zu berücksichtigen. Die entwickelte Methodik kombiniert beide Gruppen der Variablen und ermöglicht in weiterer Folge die Abschätzung der richtungsbezogenen Kluftvolumina (T. Harum et al., 2001).

Im Vorfeld zu den statistischen Clusteranalysen wurden die nicht vermeidbaren Beobachtungsfehler (P. H. W. Kulitulake et al., 1993), die beim Aufnehmen der Trennflächeneigenschaften nach dem Scan-Line-Verfahren auftreten, mittels geeigneter Gewichtungen korrigiert (T. Harum et al., 2001, G. Winkler, 2003). Die Häufigkeit, mit der Klüfte einer Kluftschar bei konstanten Kluftabständen entlang einer Scan-Line beobachtet werden, ist vom Winkel zwischen Kluft und Scan-Line abhängig. Je spitzer der Winkel, desto weniger Trennflächen werden erfasst. Dies wurde mittels Gewichtung der Orientierung der Trennflächen bezogen auf die Richtung der Scan-Line korrigiert. Öffnung und lineare Durchtrennungslänge von Klüften, die der Aufschlusswand entsprechen, sind im Allgemeinen nicht messbar. Daher wurden sie unter Berücksichtigung von Daten paralleler Klüfte, die im Zuge einer möglichst normal zur Aufschlusswand stehenden Scan-Line desselben Aufschlusses aufgenommen wurden, statistisch ermittelt. Die Erfassbarkeit der Größe von durchgehend offenen Klüften hängt oft von der Größe des Aufschlusses ab. Daher wurde eine sich daraus ergebende Übergewichtung von Klüften großer Aufschlüsse mittels Normierung korrigiert.

Mittels hierarchischem und fuzzy-c-mean Clustering wurde die hydrogeologische Wirksamkeit der einzelnen Cluster objektiv ermittelt und unter Einbindung der Attribute Öffnung und Durchtrennungslänge auf die hydrogeologische Fragestellung abgestimmt (J. Hofrichter & G. Winkler, 2002, 2003).

Für die ermittelten Cluster können unter Berücksichtigung der normierten Öffnungsbeträge und linearen Durchtrennungslängen mit Hilfe von Gewichtungen die richtungsbezogenen Kluftscharvolumina bezogen auf ein Einheitsvolumen abgeschätzt werden (J. Hofrichter & G. Winkler, 2002, 2003).

Die praktische Anwendung der Methodik zeigte, dass die Clusterergebnisse der oben beschriebenen statistischen Verfahren sich teilweise von den Ergebnissen der klassischen strukturgeologischen Clusteranalysen unterscheiden. Als Beispiel ist der Aufschluss SA65 in Fig. 5 angeführt. Bei beiden Plots ergeben sich vier Cluster. Die Kenngrößen der Cluster der Fig. 5b sind in Tab. 1 aufgelistet. Bei eindeutigen Clustern wie CL 1 und CL 2 (Fig. 5) sind keine Unterschiede zwischen dem Gefügeplot in Fig. 5a und dem Ergebnis der Clusteranalyse unter Einbindung der hydrogeologisch relevanten Attribute in Fig. 5b zu erkennen. Eine deutlich unterschiedliche Clusterverteilung zeigt sich bei CL 3 und CL 4. Aufgrund der Berücksichtigung der hydraulisch relevanten Attribute können eine hydrogeologisch dominante Kluftschar (CL 3) und eine Kluftschar mit geringem Kluftvolumen (CL 4) unterschieden werden (Tab. 1). Die Raumlage der Clusterschwerpunktfläche von CL 3 und CL 4 auf den beiden Plots unterscheidet sich deutlich.

Als Ergebnis liegen analog dem Aufschluss SA65 für jeden Aufschluss des Untersuchungsgebietes die Anzahl der Cluster, deren richtungsbezogene Kluftvolumina und das Gesamtkluftvolumen vor. Die Lage der Aufschlüsse ist der Fig. 6 zu entnehmen. Zudem

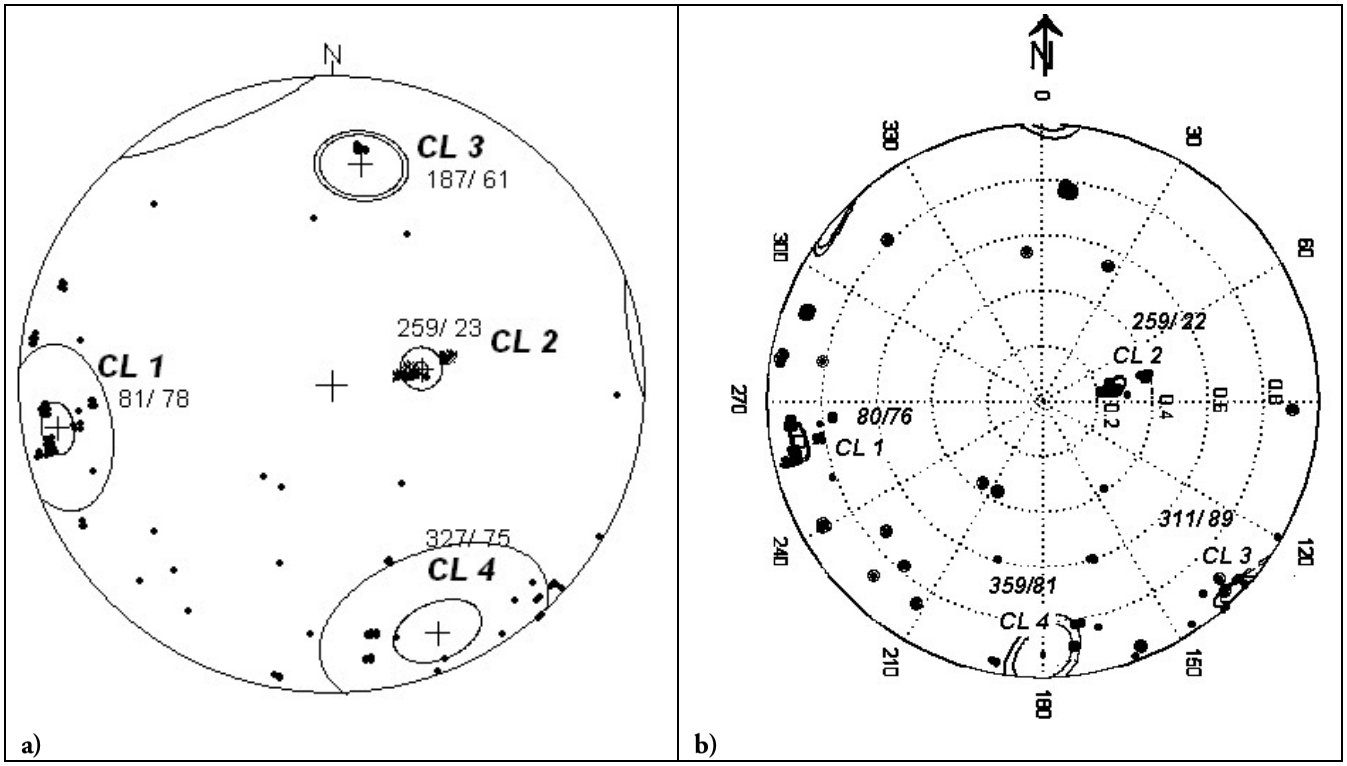

Fig. 5: Vergleich zwischen geologischem Gefügeplot (a) und dem Ergebnis der hydrogeologischen Clusteranalyse (b).
Correlation between a structural geological plot (a) and the result of hydrogeological cluster analysis (b).

Tab. 1: Clustereigenschaften des Aufschlusses SA65.
Cluster attributes of the outcrop SA65.

Bezeichnung	Azimut	Fallwinkel	Konzentrationsmaß	Klufvolumen [%]
CL 1	80	76	0,973	1,33
CL 2	259	22	0,973	0,14
CL 3	311	89	0,968	1,68
CL 4	359	81	0,908	0,02

sind die Cluster durch ihre Eingangsparameter Raumlage, Öffnungsweite und lineare Durchtrennungslänge der Trennflächen charakterisiert, woraus sich typische Eigenschaften für jeden Cluster definieren lassen.

4.2. Ergebnisse – hydrogeologische Homogenbereiche

Für die Ausweisung der hydrogeologischen Homogenbereiche wurden im Untersuchungsgebiet Semmering 17 Aufschlüsse erfasst und deren Kluftsystem mittels Scan-Line-Verfahren aufgenommen. Die statistische Auswertung ergab für die Aufschlüsse deren richtungsbezogenen Cluster und ihre Kluftscharvolumina.

Auf Grund der statistischen Gewichtungen bei der Berechnung der Kluftvolumina sind Cluster mit hohen Kluftvolumina durch Trennflächen gekennzeichnet, die eine große Öffnungsweite und eine hohe lineare Durchtrennungslänge aufweisen. Bei der Analyse aller Clustervolumina zeigte sich, dass zwischen ca. 0,8 Vol% und 1,0 Vol% ein signifikanter Grenzwert liegt. Das heißt, dass die meisten Volumina entweder deutlich darüber oder deutlich darunter liegen. Davon abgeleitet wurden Cluster mit einem Kluftvolumen über 0,8 Vol% als hydrogeologisch gut wirksam definiert. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die an den Aufschlüssen ermittelten Cluster und deren berechnete Volumina.

Anhand der Anzahl der Cluster, der Anzahl der hydrogeologisch dominanten Kluftrichtungen (Kluftvolumina > 0,8 Vol%) und dem Gesamtkluftvolumen konnten die Aufschlüsse zu drei hydrogeologischen Gruppen zusammengefasst werden. In Verbindung mit der geologischen Karte (Fig. 2) und den tektonischen Gegebenheiten kann so das Untersuchungsgebiet in drei hydrogeologische Homogenbereiche unterteilt werden (Fig. 6).

Hydrogeologischer Homogenbereich: „gut“

Folgende Aufschlüsse wurden zur hydrogeologisch wirksamsten Gruppe zusammengefasst: SA9a, SA53, SA56, SA65 und SA71. Alle Aufschlüsse haben zwei hydrogeologisch dominante Kluftrichtungen, vier oder fünf Cluster und ihr Gesamtkluftvolumen liegt deutlich über 2,30 Vol%. Die Aufschlüsse sind den lithologischen Einheiten „dunkelgrauer Dolomitmarmor“, „hellgrauer Dolomit(-marmor)“ und „Bänderkalk“ zuzuordnen. Die Aufschlüsse liegen nicht in oder unmittelbar an Störungszonen.

Hydrogeologischer Homogenbereich: „mittel“

Die Aufschlüsse SA13, SA21, SA26, SA27 und SA64 bilden die zweite hydrogeologische Gruppe. Sie sind gekennzeichnet durch eine dominante Kluftrichtung und Gesamtkluftvolumina zwischen 1,7 und 2,1 Vol%. Die Aufschlüsse sind den lithologischen Einheiten „Semmeringquarzit“ und „Dolomitmarmor“ zuzuordnen. Die Auf-

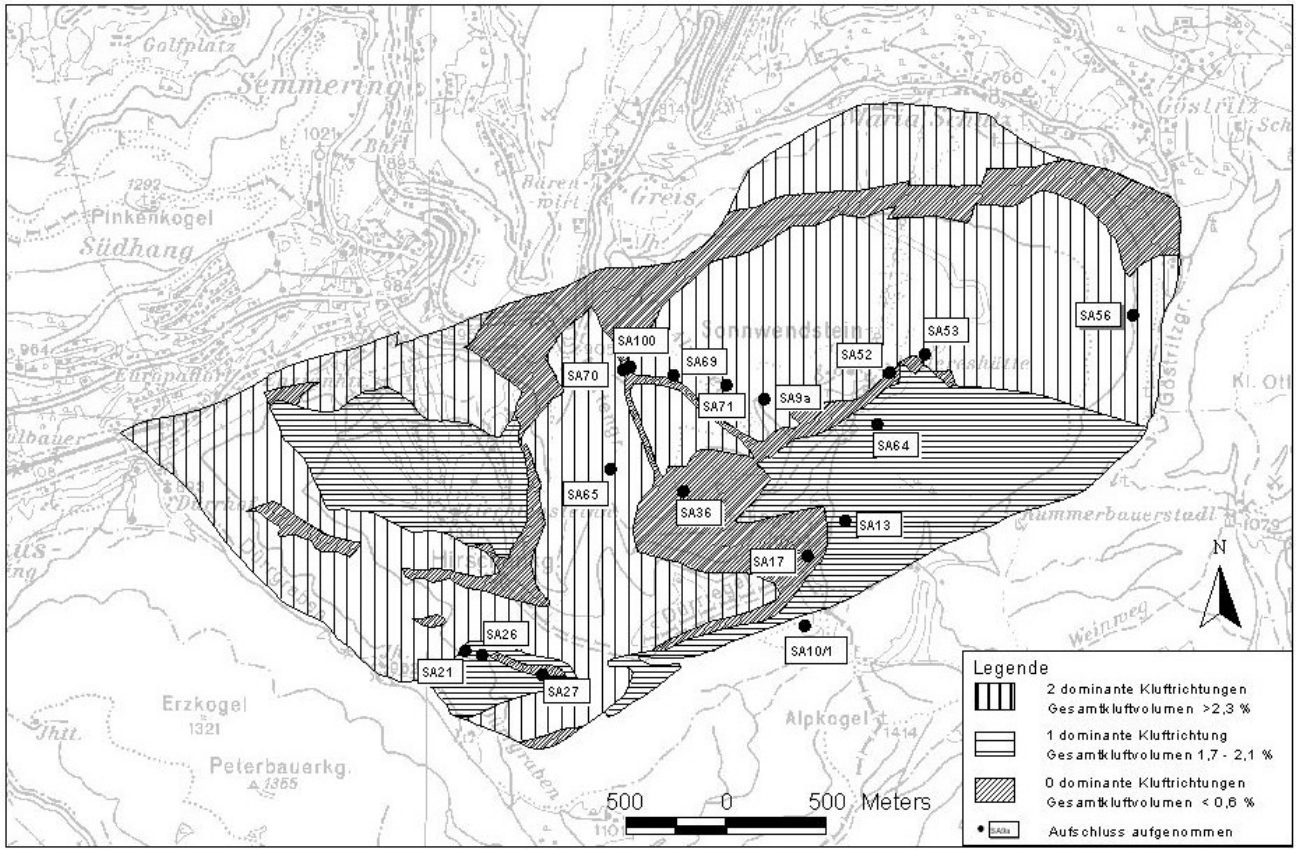

Fig. 6: Hydrogeologische Homogenbereichskarte des Testgebietes Sonnwendstein/Semmering mit der Lage der analysierten Aufschlüsse (nach P. REICHL et al., 2002).
Map of hydrogeological homogeneous areas of the investigation area Sonnwendstein/Semmering and position of the analysed outcrops (after P. REICHL et al., 2002).

Tab. 2: Kluftvolumina (in Vol%) der Cluster der einzelnen Aufschlüsse.
Fracture volumes (in vol%) of the clusters of the outcrops.

Aufschluss	CL 1	CL 2	CL 3	CL 4	CL 5	CL 6	ΣKluftvolumina
SA9a	0,47	2,02	0,13	0,38	0,17	–	3,16
SA10/1	0,2	0,51	0,16	–	–	–	0,87
SA13	0,25	1,40	0,15	–	–	–	1,80
SA17	0,03	0,01	0,17	–	–	–	0,20
SA21	0,09	1,73	0,2	0,12	–	–	2,14
SA26	0,30	1,03	0,05	0,28	–	–	1,66
SA27	0,39	0,04	0,81	0,20	0,04	0,52	2,00
SA36	0,17	0,13	0,25	0,01	–	–	0,56
SA52	0,12	0,12	–	–	–	–	0,23
SA53	1,41	0,03	0,90	0,04	–	–	2,38
SA56	2,07	0,74	0,01	1,25	–	–	4,06
SA64	0,55	1,14	0,13	–	–	–	1,82
SA65	1,33	0,14	1,68	0,02	–	–	3,16
SA69	0,36	0,39	0,05	–	–	–	0,79
SA70	0,02	0,08	0,04	–	–	–	0,13
SA71	0,01	0,81	0,24	1,03	0,26	–	2,34
SA100	0,05	0,01	0,23	–	–	–	0,28

schlüsse SA13, SA21, SA26 und SA27 liegen im Nahbereich der südlichen Überschiebungszone des Untersuchungsgebietes.

Hydrogeologischer Homogenbereich: „schlecht"

Die hydrogeologisch am geringsten wirksame Gruppe umfasst die Aufschlüsse SA17, SA36, SA52, SA69, SA70 und SA100. Diese Gruppe ist gekennzeichnet durch ein geringes Gesamtkluftvolumen (< 0,6 Vol%), und es liegt keine hydrogeologisch dominante Kluftrichtung (> 0,8 Vol%) pro Aufschluss vor. Die Aufschlüsse sind tektonisch stark beanspruchten Schichtkomplexen zuzuordnen. SA69, SA70 und SA100 stehen in oder unmittelbar neben Störungszonen an. Die Schichten der Einheit „geschieferter Dolomit(-marmor)" zeigen in den Aufschlüssen Spuren deutlicher tektonischer Beanspruchung. Alle Aufschlüsse dieser lithologischen Einheit, SA36, SA52 und SA17, entsprechen der selben Clustergruppe. Zu dieser Gruppe wurden auch die im Untersuchungsgebiet vorliegenden massigen, gering klüftigen Rauhwacken gestellt, sie treten zumeist in Nahelage zu Großstörungen auf und sind als gering durchlässig anzusprechen.

4.3. Kluftausbildung in Abhängigkeit von der Lithologie

Im Vorfeld bzw. parallel zu den statistischen Clusterauswertungen wurden die kumulativen Häufigkeitsverteilungen der Öffnungsbeträge bzw. linearen Durchtrennungslängen der einzelnen Aufschlüsse analysiert. Die Analysen wurden unter mehreren Gesichtspunkten durchgeführt, um die Aufschlussgruppen mit ähnlichen Klufteigenschaftsverteilungen herausfiltern zu können.

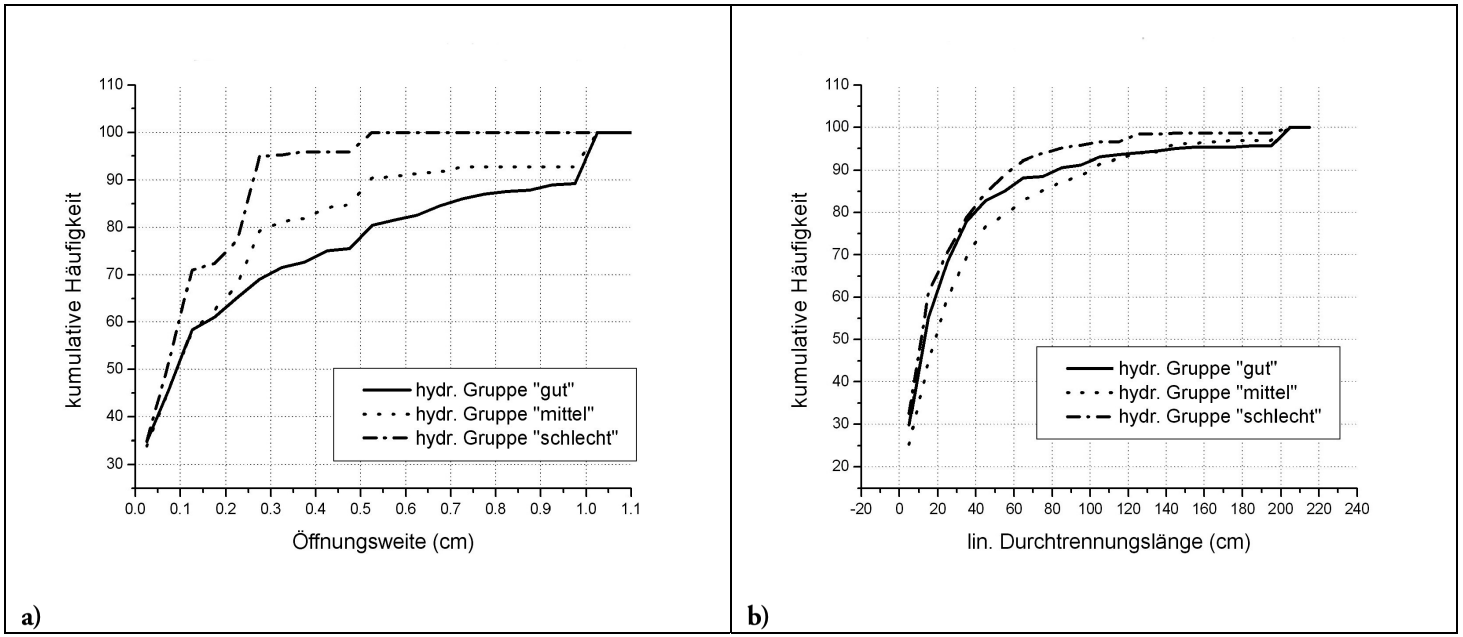

Fig. 7: Kumulative Häufigkeitsverteilung der Öffnungen (a) und linearen Durchtrennungen (b) der hydrogeologischen Homogenbereiche aus Kap. 4.2.
Cumulative frequency distribution of aperture (a) and linear degree of separation (b) of the hydrogeological homogeneous units described in chap. 4.2.

Im ersten Schritt wurden die Aufschlüsse zu Gruppen in Abhängigkeit ihrer lithologischen Zugehörigkeit – also den lithologischen Einheiten „Dolomit(-marmor)“, „geschieferter Dolomit(-marmor)“ und „Quarzit“ – zusammengefasst und ausgewertet. Der Vergleich der durchschnittlichen kumulativen Häufigkeitsverteilungen der lithologischen Einheiten zeigt, dass die Einheit „Quarzit“ prozentuell die größten Öffnungsbeträge und linearen Durchtrennungslängen aufweist. Die Einheit „Dolomit(-marmor)“ unterscheidet sich nur bei den Öffnungsbeträgen größer als 0,255 cm von der Einheit „geschieferter Dolomit(-marmor)“. Eine Unterscheidung anhand der linearen Durchtrennungslängen ist nicht möglich.

Im nächsten Untersuchungsschritt wurden die tektonischen Aspekte insofern berücksichtigt, dass Dolomit(-marmor)-Aufschlüsse in oder in unmittelbarer Nähe zu Störungszonen zu der Gruppe „geschieferter Dolomit(-marmor)“ hinzugezählt wurden. Es zeigte sich, dass deutliche Unterschiede bei den kumulativen Häufigkeitsverteilungen der Öffnungsweiten der unterschiedlichen Dolomit(-marmor)-Gruppen vorliegen. Aufschlüsse in oder in Nahelage zu Störungszonen zeigen prozentuell deutlich geringere Öffnungsbeträge. Die Häufigkeitsverteilungen der linearen Durchtrennungslängen ergeben bei den störungsgebundenen wie ungestörten Dolomit(-marmor)-Aufschlüssen sehr ähnliche Kurvenverläufe. Zudem ist festzustellen, dass die Öffnungsweiten der kompakten, tektonisch weniger beanspruchten Dolomit(-marmor)-Aufschlüsse ähnlich denen der Quarzit-Aufschlüsse ausgebildet sind.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Klufteigenschaften der Festgesteine im Untersuchungsgebiet Sonnwendstein/Semmering stärker durch die tektonische Beanspruchung als durch die lithologischen Eigenschaften beeinflusst werden.

Die Ausweisung der hydrogeologischen Homogenbereiche ergab drei Aufschlussgruppen (Kap. 4.2.). Daher wurden die durchschnittlichen kumulativen Häufigkeitsverteilungen der Öffnungsweiten und der linearen Durchtrennungslängen auch der drei hydrogeologischen Homogenbereichsgruppen berechnet und miteinander verglichen. Figur 7 zeigt die Kurvenverläufe der durchschnittlichen Öffnungsweiten und linearen Durchtrennungslängen der hydrogeologischen Homogenbereiche.

Es zeigt sich, dass die Kluftöffnungsweiten der drei Einheiten deutlich zu unterscheiden sind (Fig. 7a). Der hydrogeologische Homogenbereich „gut“ ist durch die meisten großen Öffnungsweiten gekennzeichnet. Alle Öffnungsweiten des Homogenbereichs „schlecht“ sind kleiner als 0,55 cm. Die kumulativen Häufigkeitsverteilungen der linearen Durchtrennungslängen ergaben ähnliche Kurvenverläufe für alle drei Homogenbereiche, können aber differenziert werden (Fig. 7b). Der Homogenbereich „schlecht“ ist durch die meisten kurzen Durchtrennungslängen gekennzeichnet. Der Homogenbereich „gut“ weist die meisten normierten linearen Durchtrennungslängen über 1,4 m auf.

Die Analyse der Häufigkeitsverteilungen der Öffnungsweiten und linearen Durchtrennungslängen ergab, dass die bestmögliche Differenzierung von Aufschlussgruppen mit der Gruppierung der hydrogeologischen Homogenbereiche zu erreichen ist.

Zusammenfassung

Die Erfassung und die Analyse des Kluftnetzwerkes ist eine der Grundlagen zur Erstellung von hydrogeologischen Konzeptmodellen in klüftigen Festgesteinen. Ziel der Untersuchungen war es, Ergebnisse hinsichtlich der Verteilung von hydrogeologischen

bzw. hydraulischen Eigenschaften von klüftigen Festgesteinen zu gewinnen und daraus resultierend hydrogeologische Homogenbereiche auszuweisen. Die praktische Anwendung wurde im Untersuchungsgebiet Sonnwendstein/Semmering (Österreich) überprüft.

Die regionale Datenaufnahme und -auswertung in diesem Gebiet ergaben 17 Aufschlüsse, die in weiterer Folge für die lokale Datenaufnahme herangezogen wurden. Die Kluftnetzaufnahme an den Aufschlüssen erfolgte mittels Scan-Line-Verfahren nach möglichst objektiven und standardisierten Kriterien.

Die Auswertung der aufgenommenen Daten ergab keine eindeutige Zuordnung von charakteristischen Kluftausbildungen (Öffnungsbeträge bzw. lineare Durchtrennungslängen) zu den verschiedenen betrachteten lithologischen Einheiten. Es zeigte sich jedoch eine Abhängigkeit der Kluftausbildung von der Nahelage zu Störungszonen.

Mit hierarchischem und fuzzy-c-mean Clustering wurde die hydrogeologische Wirksamkeit einzelner Cluster (Hauptkluftscharen) objektiv ermittelt und unter Einbindung der Attribute Öffnung und Durchtrennungslänge auf die hydrogeologische Fragestellung abgestimmt. Als Ergebnis konnten für jeden Aufschluss richtungsbezogene Kluftvolumina und das Gesamtkluftvolumen ermittelt werden.

Auf Grund der Auswertungsergebnisse der einzelnen Aufschlüsse konnten für das Testgebiet Sonnwendstein/Semmering drei hydrogeologische Homogenbereiche ausgewiesen werden.

Literatur

Harum, T., J. Hofrichter, U. Kleb, H. Kupfersberger, W. Poltnig, P. Reichl, S. Reinsdorff, Ch. Ruch, J. Schön, E. Strobl & G. Winkler (2001): Erfassung von Fließprozessen zur hydrogeologischen Bewertung von klüftigen Festgesteinen, Endbericht über Forschungsarbeiten 2001.– Unveröff. Bericht, JOANNEUM RESEARCH, Institut für Hydrogeologie und Geothermie, 124 S., Graz.

Hofrichter, J. & G. Winkler (2002): Statistische Trennflächenanalyse zur Abschätzung richtungsgebundener Kluftvolumina.– Programm & Kurzfassungen, Pangeo Austria 2002 (Erdwissenschaften in Österreich 2002) vom 28.–30. 06. 2002, S. 75, Salzburg.

Hofrichter, J. & G. Winkler, (2003): Statistical analysis for the hydrogeological evaluation of the fracture networks in hard rocks.– IAH/Balkema series International Contribution to Hydrogeology, submitted.

Kulitulake, P. H. W., Wathugala, D. N. & O. Stephansson (1993): Joint network modelling with a valiation exercise in Stripa Mine, Sweden.– International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. **30**, 503–526, Oxford.

Priest, St. J. (1993): Discontinuity Analysis for Rock Engineering.– 473 S., London (Chapman & Hall).

Ratschbacher, L., W. Frisch, H. G. Linzer & O. Merle (1991): Lateral extrusion in the eastern Alps, part II: structural analysis.– Tectonics, **10**, 257–271, Washington D.C.

Reichl, P., E. Strobl & G. Winkler, (2002): Hydrogeologische Systembeschreibung – Eine Grundlage für die Bewertung umweltrelevanter Auswirkungen von Untertagebauwerken.– Felsbau **5/2002** Oktober, Rock and Soil Engineering – Fachzeitschrift für Ingenieurgeologie, Geomechanik und Tunnelbau, 112–120, Essen (Verlag Glückauf GmbH).

Winkler, G. (2003): Fracture network analyses for hydraulic modelling approaches of fractured aquifers.– Ph.D. Thesis, 130 S., University of Technology Graz, Austria.

Summary

The recording and the analysis of the fracture network is the base for hydrogeological conceptional models of hard rocks. It was the goal of the investigations to get results of the distribution of hydrogeological and hydraulic properties of fractured hard rocks. Out of the results it was possible to define hydrogeological homogeneous areas. The method was applied in the area of Semmering/Sonnwendstein, Austria.

The regional data recording and evaluation in the investigation area resulted 17 outcrops, at which the fracture networks were recorded and analysed. The fracture network at the outcrops was adopted with the scan-line method based on objective and standardized criterions.

The evaluation of the recorded data (aperture and linear degree of separation) showed no correlation between a characteristic development of fractures and the different lithological units. But it could be shown that the development of the fractures is connected to the distance to fault zones.

Hierarchic and fuzzy-c-mean clustering was applied for an objective estimation of the hydrogeological effectiveness of the clusters (main fracture set direction). Under respect of the aperture and the linear degree of separation it was adapted to solve hydrogeological problems. For each outcrop it was possible to estimate the volumes of the main orientation related fracture sets, and the total volume of the fracture network.

The final result of the investigations was the definition of three hydrogeological homogeneous areas for the investigation area Sonnwendstein/Semmering.

Schlüsselwörter: Kluftnetzwerk, Festgestein, Clustering, hydrogeologisches System, Scan-Line

Keywords: fracture network, hard rock, clustering, hydrogeological system, scan line