

STRUKTURGEOLOGISCHE METHODEN ZUR CHARAKTERISIERUNG VON KARSTGRUNDWASSERWEGEN IM HOCHSCHWABMASSIV

Kurt DECKER & Franz REITER

Zusammenfassung. Am Beispiel einer Modellstudie im Einzugsgebiet der II. Wiener Hochquellenleitung im Hochschwabgebiet werden die Einsatzmöglichkeiten tektonischer und strukturgeologischer Methoden für die Analyse hydrogeologisch bedeutender Strukturen in Karstgrundwasserspeichern gezeigt. Im Hochschwabmassiv führte polyphase Deformation zu einem komplexen, stark anisotropen Netzwerk von Störungen mit unterschiedlichen hydrogeologischen Eigenschaften (Grundwasser leitend oder stauend), das die tiefe Verkarstung und die Fließwege des tiefen Grundwassers bestimmt. Diese Störungssysteme und kleinmaßstäbliche Trennflächen, die für die Speicherung und Migration von Grundwasser in Kluftwasseraquifere von Bedeutung sind, werden mit tektonisch-strukturgeologischen Methoden analysiert. Die Strukturen werden genetisch interpretiert und einem regionalen Deformationsmodell zugeordnet, das die Grundlage für die flächenhafte tektonische Kartierung und Vorhersage hydrogeologisch bedeutender Strukturen bildet. Im Hochschwabmassiv sind Miozäne E- bis ENE-streichende Störungen aufgrund ihrer Häufigkeit, Länge und Ausbildung die bedeutendsten Grundwasser leitenden Strukturen, die lokal durch etwa N-S-streichende, ebenfalls verkarstete Abschiebungen verbunden werden.

EINLEITUNG

Die vorgestellten strukturgeologisch-tektonischen Untersuchungen wurden im Rahmen eines interdisziplinären Karstwasserforschungsprojektes der Stadt Wien und der Steiermärkischen Landesregierung im Hochschwabmassiv zwischen Wildalpen und Gusswerk durchgeführt (KUSCHNIG 2001, dieser Band).

Dafür wurden folgende Ziele definiert: (1) Kartierung von Störungen, die Migrationswege oder Grundwasserbarrieren in Karst- und Kluftwasserspeichern bilden (Abb. 1). Beispiele solcher Strukturen sind Störungen, die durch Verkarstung, Ausbildung von Kataklasten, oder Bildung von Fault Gauges mit Aquitardcharakter für die Grundwasserbewegung ausschlaggebend sind. (2) Tektonisch-strukturgeologische Charakterisierung von Trennflächen (kleinmaßstäbliche Harnische oder Kluftsysteme in Dolomit; Abb. 1), die Speicherung und Migration von Grundwasser in Kluftwasseraquifere bestimmen. (3) Angaben über tiefe Karstwasserwege, Wahrscheinlichkeiten von Fließrichtungen und hydrologische Einzugsgebiete. Tektonische Daten sollten für die integrative Beurteilung der Speichereigenschaften (Kluft- vs. Karstwasserspeicher), Abschätzungen der Fließrichtung und die Abgrenzung hydrologischer Einzugsgebiete einzelner Quellen mit hydrologischen, hydrogeologischen und geologischen Daten zur Verfügung gestellt werden.

Grundlagen der Methodik sind systematische Geländeaufnahmen und die tektonische Interpretation geologischer Karten (BRYDA et al. 2001, dieser Band). Die Strukturen werden genetisch zugeordnet und in ein lokales tektonisches Modell integriert. Dieses ermöglicht deduktive Vorhersagen über Art und Orientierung von hydrologisch wirksamen Strukturelementen (vgl. HEINRICH et al., 1995; DECKER et al., 1998). Die Prognosefähigkeit der Methode stellt einen wesentlichen Vorteil gegenüber rein statistischen Methoden der Trennflächenaufnahmen wie „Kluftmessungen“ und „Lineamentinterpretationen“ dar. Ein vereinfachtes tektonisches Modell, das vier Deformationsereignisse unterscheidet, wird im folgenden Überblick für das Hochschwab-Gebiet dargestellt. Weiters werden die drei Ereignisse, in denen die hydrogeologisch wichtigsten Strukturen ausgebildet wurden, detaillierter beschrieben.

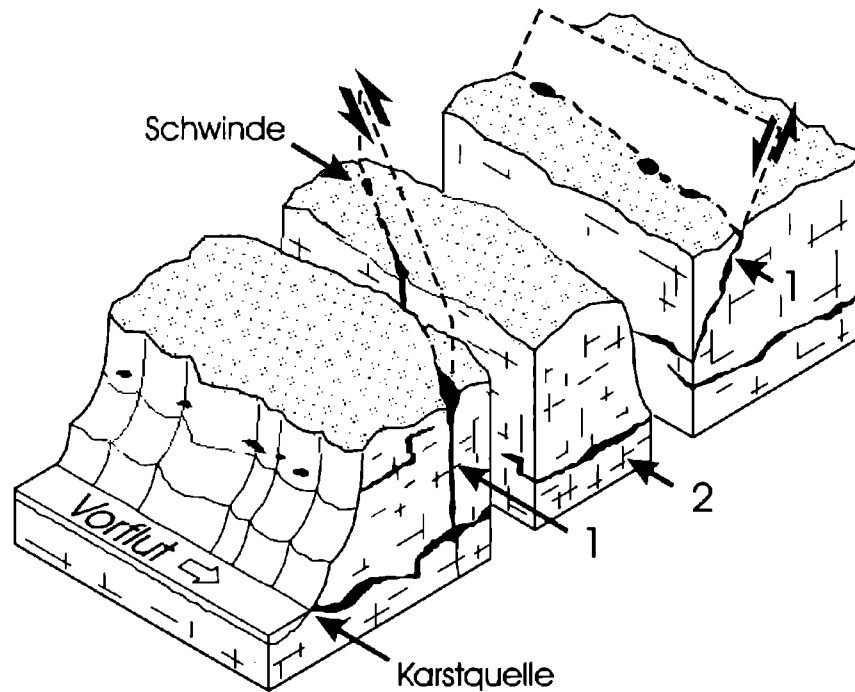


Abb. 1. Konzeptionelles Modell für die Speicherung und Durchlässigkeit in einem Karstgrundwassersystem (nach SAUTER et al., 2000). 1: Störungsgebundene Karströhrensysteme mit geringem Speicherkoeffizient und sehr hoher Durchlässigkeit. 2: Feinkluftsystem mit hohem Speicherkoeffizient und geringer Durchlässigkeit.

REGIONALER TEKTONISCHER ÜBERBLICK

Das Einzugsgebiet der Quellen der II. Wiener Hochquell-Wasserleitung liegt im Falten- und Überschiebungssystem der tirolischen und juvavischen Einheiten der Nördlichen Kalkalpen mit dem Göller- und Mürzalpen-Deckensystem. Die Decken werden in eine Reihe von tektonischen Einheiten mit unterschiedlichen stratigraphisch-faziellen Inhalten und basalen Abscherhorizonten untergliedert, die jeweils durch Überschiebungen oder Blattverschiebungen begrenzt werden (BRYDA et al. 2001, dieser Band). Der Falten- und Überschiebungsbau erfolgte in zwei wesentlichen Ereignissen. In der Unteren Kreide wurden die Sedimentdecken von ihrem Basement abgesichert und großmaßstäbliche Rampen und Flachbahnen angelegt. (W)NW-gerichtete Verkürzung führte zur Ausbildung (W)NW-vergenger Falten- und Überschiebungsstrukturen, die mit WNW-streichenden dextralen Grenzblättern verbunden sind (LINZER et al., 1995). Zwischen Eozän und Miozän wurden ältere Falten und Überschiebungen innerhalb der Kalkalpen überprägt und die kalkalpinen Decken auf die nördlich liegenden Einheiten der Rhenodanubischen Flyschzone, des Helvetikums und der Molasse überschoben (DECKER et al., 1993).

Der Südrand der Kalkalpen und die tektonische Grenze zur Grauwackenzone ist von SE- und/oder S-gerichteten Rücküberschiebungen geprägt. Die Geometrie der Strukturen belegt in vielen Fällen Out-of-Sequence Überschiebungen, die bereits vorher gefaltete und überschobene Einheiten betreffen. Im unteren und mittleren Miozän wechselt der Deformationsstil von Falten- und Überschiebungsbau und Rücküberschiebungen zu ostgerichteter lateraler Extrusion (RATSCHBACHER et al., 1991; LINZER et al., 1995, 1997; PERESSON & DECKER, 1997). Dabei werden störungsbegrenzte Schollen an ENE- bis E-streichenden sinistralen Blattverschiebungen, nach E bzw. ENE verschoben. Die Tektonik des nördlichen Hochschwab wird wesentlich von solchen Scherzonen, die dem Salzachtal-Ennstal-Mariazell-Puchberg (SEMP) Störungssystem

zuzuordnen sind, geprägt. Gleichzeitige und nachfolgende E-W-gerichtete Extension (mittleres Miozän) führt zur Ausbildung von E- und W-gerichteten Abschiebungen, sowie damit verbundenen Kleinstrukturen wie Zerrspalten und Kluftsystemen.

KINEMATIK UND HYDROGEOLOGISCHE BEDEUTUNG AUSGEWÄHLTER STRUKTUREN

Im Rahmen des Karstwasserprojektes wurde ein vereinfachtes Deformationsmodell für das Hochschwabgebiet ausgearbeitet, mit dem 80-90% der im Gelände gemessenen Kleinstrukturen und die in der geologischen Karte ausgewiesenen Strukturen erklärt werden können (Abb. 2). Dieses Modell bildet die Grundlage für die Zuordnung hydrogeologisch relevanter Strukturen sowie für Prognosen von Orientierung und hydrogeologischen Eigenschaften tektonischer Trennflächen. Das Modell ist eine, aufgrund des derzeitigen Kenntnisstandes als zulässig erachtete, Vereinfachung der tektonischen Entwicklung der Kalkalpen (LINZER et al., 1995; 1997; PERESSON & DECKER, 1997). In der Folge werden drei der Deformationsereignisse (D1, D3 und D4), die für die Hydrologie der Karst- und Kluftwasserspeicher des Hochschwabs größte Bedeutung haben, mit ihrer Kinematik, den zugeordneten Strukturen, und deren hydrogeologische Bedeutung beschrieben.

D1 (Kreide - Eozän): WNW-gerichteter Falten- und Überschiebungsbau und Anlage WNW-streichender dextraler Blattverschiebungen (Tear Faults). D1 ist im Hochschwabmassiv durch die Anlage kartenmaßstäblicher WNW-streichender dextraler Blattverschiebungen gekennzeichnet. Bedeutende dextrale Scherzonen wurden bei Wildalpen an der Grenze zwischen der Göllerdecke und Mürzalpen-Decke und innerhalb der Mürzalpen-Decke kartiert. Die Störungszonen werden von Trennflächengefügen mit WNW-streichenden dextralen Störungen und synthetischen und antithetischen Riedel-Scherflächen charakterisiert. Die hydrogeologischen Eigenschaften der Störungen und der ausgebildeten Störungsgesteine (Fault Gauge, Kataklasit, Kakirit) hängen in erster Linie von Lithologie und Fazies der umgebenden Karbonatgesteine ab. In Kalkserien sind WNW-streichende Blattverschiebungen durch die Ausbildung von Kataklasiten und störungsgebundenen Karststrukturen teilweise bedeutende Zonen erhöhter Porosität und Permeabilität. In Dolomiten können kataklastische Störungen durch die Ausbildung von kohäsiven Kataklasiten (zementierten und/oder sehr feinkörnigen Dolomitkataklasiten) Aquitardcharakter besitzen. Die Störungen werden von Strukturen von D3 und D4 geschnitten und versetzt.

D3 (unteres - mittleres Miozän): ostgerichtete laterale Extrusion und Ausbildung (EN)E-streichende sinistrale Blattverschiebungen. Die miozäne Deformation ist durch (EN)E-gerichtete Bewegung von störungsgebundenen Blöcken an ENE- und E-streichenden sinistralen Blattverschiebungen gekennzeichnet, die dem Salzachtal-Ennstal-Mariazell-Puchberger Störungssystem (SEMP-Linie, LINZER et al., 1995) im weiteren Sinne zugeordnet werden. Die sinistralen Störungen schneiden und versetzen ältere dextrale Blattverschiebungen und Überschiebungen. Miozäne Störungen und zugeordnete Kleinstrukturen sind im Hochschwabmassiv die bei weitem häufigsten und hydrogeologisch wichtigsten Trennflächen. Eine von LINZER et al. (1995) kartierte sinistrale Störung bildet über ca. 20 Kilometer die tektonische Grenze zwischen der Mürzalpendecke und der Göllerdecke und ist von Hinterwildalpen über den Säusenstein und das Salzatal in den Bärengraben verfolgbar. Die Blattverschiebung ist durch Werfener Schichten und Haselgebirge markiert, die an nach oben konvexen sinistralen Schrägaufschiebungen in einer positiven Flower Structure auf stratigraphisch jüngere Serien überschoben wurden (PERESSON & DECKER, 1997). Ein weiteres sinistralen Störungssystem mit NNE- und E-streichenden Blattverschiebungen bildet die Grenze zwischen Türnach- und Hochschwabeinheit. Auch für dieses System sind konvergente Störungen mit positiven Flower Structures charakteristisch.

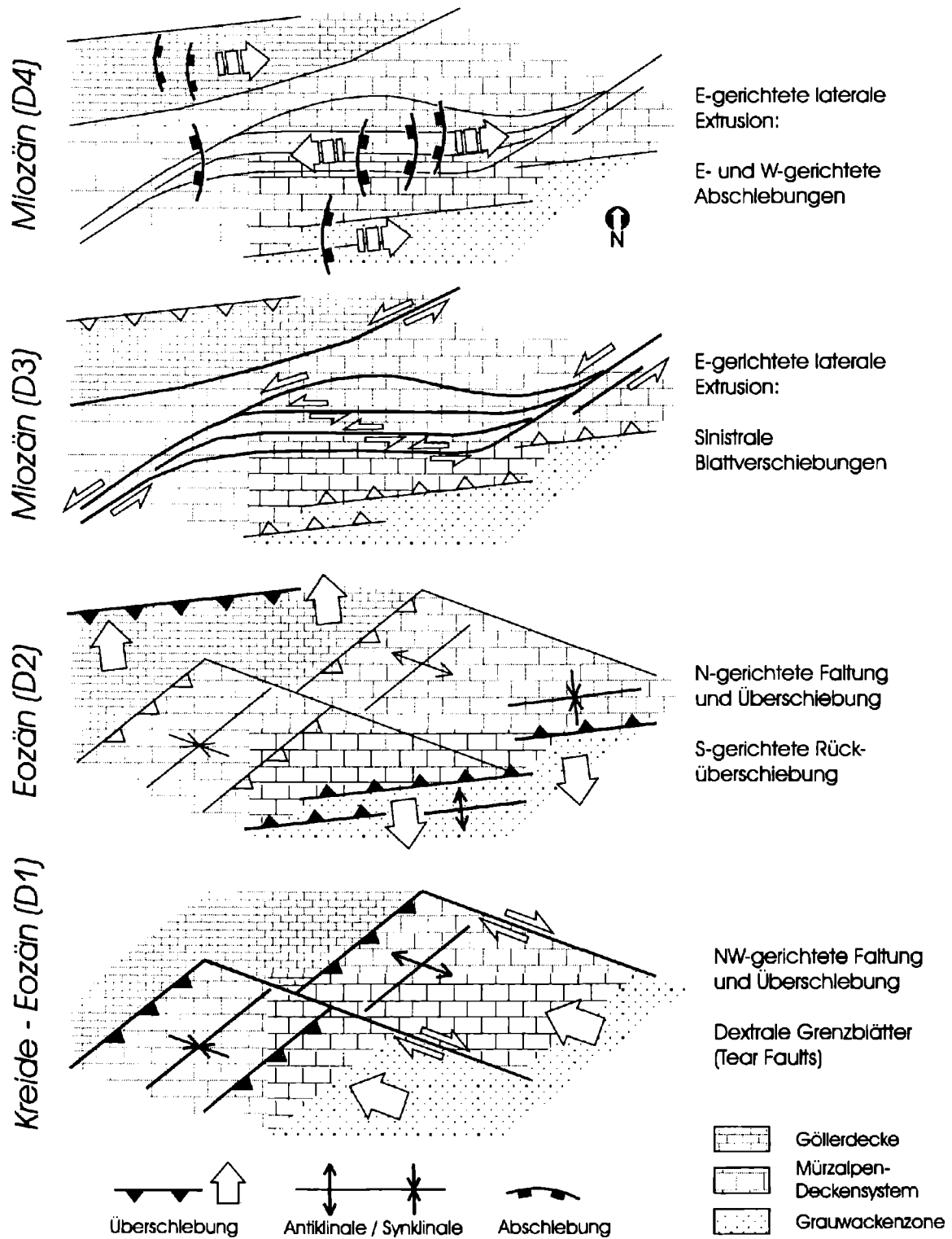


Abb. 2. Vereinfachte Deformationsabfolge (Kreide bis Miozän) der kalkhochalpinen Decken im Bereich des Hochschwabmassivs. Siehe Text zur Erklärung.

Mehrere hydrogeologisch äußerst bedeutende, in Abständen von etwa 300 bis 1000 m parallel E-streichende Störungen durchtrennen die Hochschwabeinheit zwischen Brunntal und Gollrad. Die subvertikalen parallelen Störungen sind durch Verkarstung, bevorzugte Erosion und lithologische Unterschiede zwischen störungsbegrenzten Blöcken ausgezeichnet kartierbar und über Distanzen bis 15 km verfolgbar. Die E-streichenden Blattverschiebungen bilden die kinematische Verbindung zweier ENE-streichender Störungszonen, die westlich und östlich des Hochschwabs aufgeschlossen sind. Im regionalen Maßstab markieren sie einen E-streichenden Restraining Bend, an dem sinistrale Transpression zur Ausbildung von rhombusförmigen konvergenten Blattverschiebungsduplexen führt.

Die beschriebenen Störungen sind die hydrogeologisch wichtigsten Strukturen im nördlichen Hochschwabmassiv. Drei Gruppen von Störungen mit unterschiedlichen hydrogeologischen Eigenschaften werden definiert: (1) Störungen mit positiven Flower Structures, in denen Serien mit Aquitardcharakter (Werfener Schichten, Haselgebirge) in der Scherzone gehoben wurden. Für die Störungsabschnitte werden grundwasserstauende Eigenschaften angenommen. (2) Störungen in Dolomiten, die durch Kataklastite und durch intensive Verkarstung Zonen bevorzugter Wasserwegigkeit sind. Bedeutende Dolomitekataklastite mit bis zu 150 m Mächtigkeit wurden östlich des Hochschwabs bei Gollrad dokumentiert. Im Unterschied zu den dextralen Blattverschiebungen der Deformation D1 wurden keine kohäsiven Kataklastite mit Aquitardcharakter gefunden. (3) (E)E-streichende sinistrale Störungen in Kalkserien mit störungsgebundenen Karstspalten, Dolinenzügen und Karsthöhlen sind die häufigsten Großstrukturen in der Hochschwabeinheit. Beispiele solcher störungsgebundener Karststrukturen sind Höhlen (z.B., Langstein-Höhle; Abb. 3) und E-W-streichende Dolinenzüge (Edelbodenalm, Hochschwab-Hochfläche, Graualm). Hydrogeologische Bewertungen der Blattverschiebungen müssen die hohe Störungsdichte mit geringen Abständen zwischen größeren Scherzonen und die laterale Beständigkeit der Strukturen, die meist über mehrere Kilometer in E-W-Richtung verfolgbar sind, berücksichtigen.

D4 (unteres bis mittleres Miozän): E-W-gerichtete Extension. Die Deformation D4 ist durch die Ausbildung E- und W-gerichteter Abschiebungen gekennzeichnet. Die Abschiebungen schneiden sinistrale Blattverschiebungen der Deformation D3 und reaktivieren NE-streichende Störungen als Schrägabschiebungen. Aufschlüsse in den Wänden des Hochschwabmassivs, in denen Abschiebungen über größere Höhenunterschiede eingesehen werden können, zeigen ausschließlich planare und keine listrischen Flächen. Die Abschiebungen haben maximale Störungslängen von wenigen Kilometern und damit deutlich geringere laterale Erstreckungen als die sinistralen Blattverschiebungen der Deformation D3. D4 ist durch die Ausbildung von Zonen intensiver Klüftung (Zerrspalten, Extensions- und Scherklüfte) und durch die Verkarstung größerer Abschiebungen hydrogeologisch bedeutend. Die Störungen bilden Zonen erhöhter Wasserwegigkeit, die parallele E(NE)-streichende Blattverschiebungen verbinden.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Hochschwabmassiv führt mehrphasige Deformation zur Ausbildung eines komplexen, stark anisotropen Netzwerks von Störungen, die die Bewegung des Grundwassers maßgeblich beeinflussen. Miozäne E- bis ENE-streichende Störungen sind aufgrund ihrer Häufigkeit, Länge und Ausbildung die hydrogeologisch bedeutendsten Strukturen, die zusammen mit jüngeren miozänen N-S-streichenden Abschiebungen die tiefe Verkarstung bestimmen. Die Bedeutung der beiden miozänen Störungssysteme für die Ausbildung tiefer Karststrukturen wird durch den Verlauf der Gangsysteme der Frauenmauer-Langstein-Höhle mit bevorzugt ENE- und etwa N-S-streichenden Karsthöhlenräumen illustriert (Abb. 3). Aufgrund der großen Länge bis zu 15 km, der geringen Abstände zwischen einzelnen Störungen von wenigen hundert Metern, der intensiven

Verkarstung von Störungen, und der Ausbildung permeabler Kataklastite in Dolomiteinheiten bilden E- bis ENE-streichende sinistrale Blattverschiebungen ein System, das E- oder W-gerichtete Fließrichtungen parallel zum morphologischen Streichen des Massivs stark begünstigt (Abb. 3).

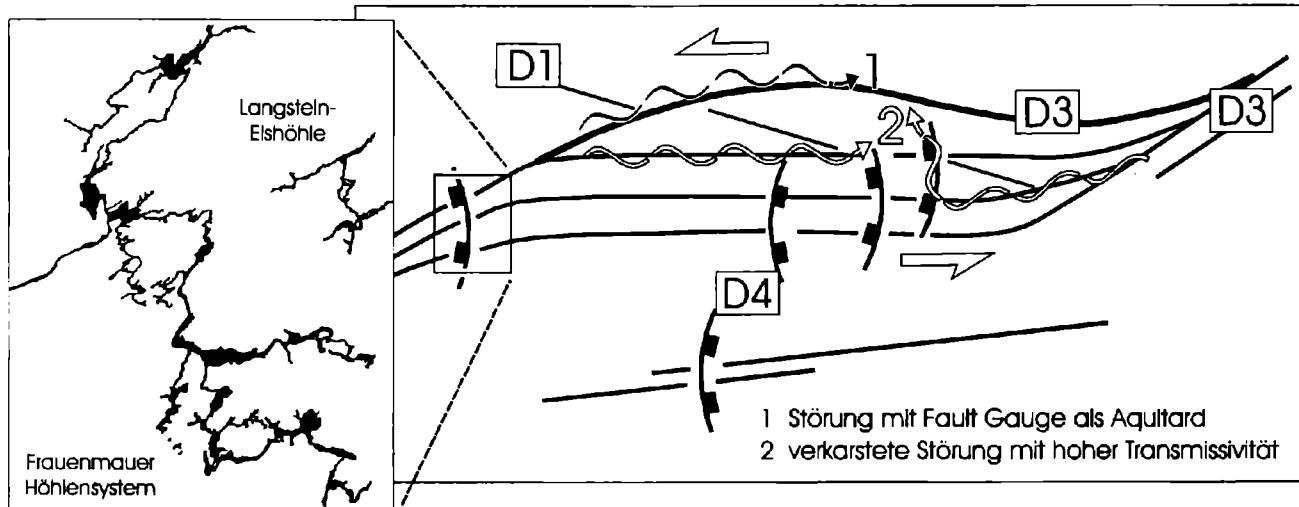


Abb. 3. Schematische Darstellung hydrogeologisch relevanter Strukturen im Hochschwabmassiv. D1: WNW-streichende dextrale Störungen mit Aquitard- oder Aquifercharakter. D3: E- bis ENE-streichende sinistrale Blattverschiebungen mit hoher Transmissivität durch Verkarstung, kataklastische Störungsgesteine und/oder hohe Trennflächendichte. Einzelne Störungsabschnitte wirken durch das Auftreten von Werfener Schichten in Flower Structures als Grundwasserstauer. Bevorzugte Fließwege parallel zu solchen inpermeablen Störungen werden in Zonen hoher Trennflächendichte, die die Störung begleiten, vermutet (1). D4: N-streichende Abschiebungen sind durch Verkarstung und hohe Kluftdichte Zonen hoher Durchlässigkeit. Die Karstwasserwege des Hochschwabmassivs werden maßgeblich durch das anisotrope Netz aus E(NE)- und N-streichenden Störungen bestimmt (2).

Eine geringere Anzahl von Störungszonen im Hochschwabmassiv hat durch die Bildung von inpermeablen Störungsgesteinen (z.B., kohäsive Dolomitkataklastite an dextralen WNW-streichenden Störungen) oder durch das Auftreten von wasserstauenden lithostratigraphischen Einheiten in der Störungszone (Werfener Schichten in konvergenten Flower Structures an sinistralen WNW-streichenden Störungen) Aquitardcharakter. Solche Störungen oder Störungsabschnitte verhindern den Austausch von Grundwasser über die Störung. Gleichzeitig bilden jedoch stark geklüftete oder zerbrochene Bereiche im Nebengestein, die parallel zur Störung streichen, vermutlich Zonen erhöhter Permeabilität (Abb. 3).

Dank. Diese Arbeit wurde durch die Gemeinde Wien, das Land Steiermark und das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung im Rahmen der Bund-Bundesländer-Kooperation über die Geologische Bundesanstalt finanziert (Projekt WA4a / StA 028n). Dr. Gerhard Kuschnig und HR Dr. Hilmar Zetinigg danken wir für die Anregung des Projekts, der Arbeitsgruppe Hochschwab der Geologischen Bundesanstalt (Gerhard W. Mandl, Gerhard Bryda, Otto Kreuss, Michael Moser und Wolfgang Pavlik) für die fachliche Unterstützung und die hervorragende geologische Basiskartierung.

Literatur

- DECKER, K., MESCHEDE, M., & RING, U. (1993) Fault slip analysis along the northern margin of the Eastern Alps (Molasse, Helvetic nappes, North- and South-Penninic flysch, and the Northern Calcareous Alps). *Tectonophysics*, 223 (3-4), 291-312.
- DECKER, K., HEINRICH, M., KLEIN, P., KOCIU, A., LIPIARSKI, P., PIRKL, H., RANK, D. & WIMMER, H., (1998). Karst springs, groundwater and surface runoff in the calcareous Alps: assessing quality and reliance of long-term water supply, *IAHS Publ.*, 248: 149-156.
- HEINRICH, M., KOLLMANN, W. & WIMMER, H. (Red.) (1995) Wasserhöffigkeit und Wasserqualität sowie deren langfristige Sicherung in kalkalpinen Einzugsgebieten am Beispiel eines N-S-Streifens in den niederösterreichischen Kalkalpen zwischen Ybbsitz und Göstling. Projekt N-A-006p/1992-94, 264 S., illustr., 6 Anh., 12 Blg., Wien (Geol. B.-A.)
- LINZER, H.G., RATSCHBACHER, L. & FRISCH, W. (1995) Transpressional collision structures in the upper crust: the fold-thrust belt of the Northern Calcareous Alps. *Tectonophysics*, 242, 41-61.
- LINZER, H.G., MOSER, F., NEMES, F., RATSCHBACHER, L. & SPERNER, B. (1997) Build-up and dismembering of the eastern Northern Calcareous Alps. *Tectonophysics*, 272, 97-124.
- PERESSON, H., & DECKER, K. (1997) The Tertiary dynamics of the northern Eastern Alps (Austria): changing paleostresses in a collisional plate boundary. *Tectonophysics*, 272, 125-157.
- RATSCHBACHER, L., FRISCH, W., LINZER, H.G. and MERLE, O. (1991). Lateral extrusion in the eastern Alps, part II: structural analysis. *Tectonics*, 10: 257-271.