

Hydrogeologie der Westlichen Karawanken

Hidrogeologija Zahodnih Karavank
Hydrogeology of Western Karawanks

M. BRENČIČ, T. BUDKOVIČ, L. FERJANČIČ¹⁾ & W. POLTNIG²⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	5
2. Durchgeführte Untersuchungen.....	6
2.1. Vorarbeiten.....	6
2.2. Abflußmessungen.....	8
2.3. Hydrogeochemie und Isotopenbeobachtung.....	8
3. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.....	10
3.1. Geologische und tektonische Interpretation.....	10
3.1.1. Lithostratigraphische und tektonische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet.....	11
3.2. Abflußmessungen.....	16
3.3. Hydrogeochemische Typisierung der Wässer.....	20
3.4. Isotopenuntersuchungen.....	22
3.4.1. Untersuchungen des Sauerstoff-18- und Deuterium-Gehaltes.....	22
3.4.2. Untersuchungen des Tritiumgehaltes.....	27
3.4.3. Untersuchungen der Kohlenstoffisotope ¹³ C und ¹⁴ C.....	29
4. Hydrogeologische Interpretation.....	32
4.1. Hydrogeologische Karte.....	33
4.2. Quellen im nördlichen Abschnitt des Straßentunnels.....	35
Zusammenfassung.....	35
Literatur.....	36
Povzetek.....	38
Summary.....	40

1. Einleitung

Der im Jahre 1986 begonnene und Ende 1991 fertiggestellte Bau des Karawanken-Autobahntunnels, der Österreich mit Slowenien verbindet, traf große Wasser-

¹⁾ Dipl. ing. geol. M. BRENČIČ, mag. dipl. ing. geol. T. BUDKOVIČ, ing. geol. L. FERJANČIČ, Institut for Geology, Geotechnics and Geophysics, Dimičeva 14, 61109 Ljubljana, Slovenia.

²⁾ Dr. W. Poltnig, Institut für Hydrogeologie und Geothermie, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Elisabethstraße 16, 8010 Graz, Österreich.

vorkommen an, die z. T. einem tiefliegenden Karstwasserkörper angehören. Die während der Baumaßnahmen durchgeführten ersten Untersuchungen dieser Wässer zeigen, daß verschiedene Wassersysteme angezapft wurden. Aufgrund des nachgewiesenen Alters eines Teiles dieser Wässer, wegen seiner günstigen chemischen Zusammensetzung und hohen Schüttung wurden zwei große Austritte auf österreichischem Staatsgebiet bei Stationierung 2830 m und 2930 m mittels Seitenstollen für eine spätere Trinkwassernutzung gefaßt und aus dem Tunnel ausgeleitet. Auf slowenischer Seite wurde das bei Station 3030 m austretende Wasser für eine Trinkwassernutzung gefaßt.

In einer vom Land Kärnten und von der Republik Slowenien beauftragten Studie wurden diese Karstwasservorkommen in Gemeinschaftsarbeit slowenischer und österreichischer Wissenschaftler untersucht.

Die hydrogeologischen Untersuchungen in den Westlichen Karawanken hatten zum Ziel, die Entwässerungsverhältnisse im slowenisch-kärntnerischen Grenzgebiet im möglichen Einflußbereich des Karawanken-Autobahntunnels zu untersuchen.

Die Arbeiten für den österreichischen Anteil wurden durch das Institut für Hydrogeologie und Geothermie der Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH im Auftrag des Landes Kärnten durchgeführt.

Für die Durchführung der Arbeiten auf slowenischem Staatsgebiet wurde das Institut für Geologie, Geotechnik und Geophysik aus Ljubljana von der Republik Slowenien beauftragt.

Das Ziel der Untersuchungen zur Klärung der Entwässerungsverhältnisse der Westlichen Karawanken war:

- Kartierung der Wasservorkommen,
- Auswahl von Meßstellen für eine monatliche chemisch-isotopenhydrologische Dauerbeobachtung,
- Durchführung und Auswertung der monatlichen chemisch-isotopenhydrologischen Dauerbeobachtung,
- Durchführung von Niederwasserabflußmessungen,
- Kompilierung einer geologischen Karte im Maßstab 1 : 25 000 (siehe Beilagen in der Tasche auf der dritten Umschlagseite des Buches),
- Erstellung einer hydrogeologischen Karte im Maßstab 1 : 25 000 (in der Beilage verkleinerter Maßstab),
- Interpretation der Untersuchungsergebnisse.

Das Arbeitsgebiet umfaßt die Westlichen Karawanken zwischen dem Savetal im S (Slowenien) und dem Karawankennordfuß (Kärnten) von Gozd Martuljek im W bis Maria Elend (östlich Rosenbach) im E (Fig. 1).

2. Durchgeführte Untersuchungen

2.1. Vorarbeiten

Die ersten detaillierten geologischen Untersuchungen gehen in die Zeit der Bauarbeiten des Karawanken-Eisenbahntunnels zurück (F. TELLER, 1914). Einige spätere Autoren versuchten, diese Resultate zu reinterpretieren (H. SEELMEIER, 1942,

F. KAHLER, 1954). Besondere Aufmerksamkeit wurde den Eisenerzlagerstätten in Savske jame gewidmet (M. ISKRA, 1965). Intensivere regionale Gebietsuntersuchungen wurden von A. RAMOVŠ et al. (1964) begonnen. Später dienten sie als Grundlage bei der Erarbeitung der Geologischen Grundkarte Jugoslawiens (Blätter Klagenfurt und Villach-Pontebba; B. JURKOVŠEK, 1987, S. BUSER, 1980). In Österreich wurden geologische Grundkarten von N. ANDERLE (1977), F. K. BAUER (1985) und A. KERN (1980) erarbeitet.

Im Untersuchungsgebiet wurden in früherern Jahren mehrere hydrogeologische Studien durchgeführt.

Der Bereich zwischen Jesenice und Gozd Martuljek wurde im Rahmen regionaler Studien von Trinkwasserquellen untersucht (F. DROBNE & D. NOVAK, 1973, 1974, 1976).

Ein detaillierter Überblick der hydrologischen und hydrogeologischen Verhältnisse in diesem Gebiet wird von M. VESELIČ (1979) in seiner regionalen Studie von Trinkwasserquellen für das Einzugsgebiet der Flüsse Sava Bohinjka und Sava Dolinka gegeben.

Im Zusammenhang mit dem Karawanken-Straßentunnelbau wurden zahlreiche Studien erarbeitet. Eine Prognose der hydrogeologischen Verhältnisse wurde in der Ideenstudie für den Karawankentunnel verarbeitet (F. DROBNE et al., 1972, 1975, 1979).

Während der Bauarbeiten kam es auch zu einer hydrogeologischen Begleituntersuchung (V. JUVANČIČ, 1990, D. JESINGER & P. J. MÜLLER, 1990). Die durchgeführten Arbeiten wurden im Buch „Karawankentunnel, Geologie und Geotechnik“ veröffentlicht (B. MIKOŠ, 1991), wo auch einzelne hydrogeologische Details angegeben werden. Auch D. KUŠČER & T. BUDKOVIČ (1989) haben die hydrogeologischen Verhältnisse im Tunnelbereich teilweise bearbeitet.

Auf dem Lehrstuhl für Geologie der Naturwissenschaftlichen Fakultät an der Universität in Ljubljana wurde eine Diplomarbeit mit detaillierter hydrogeo-

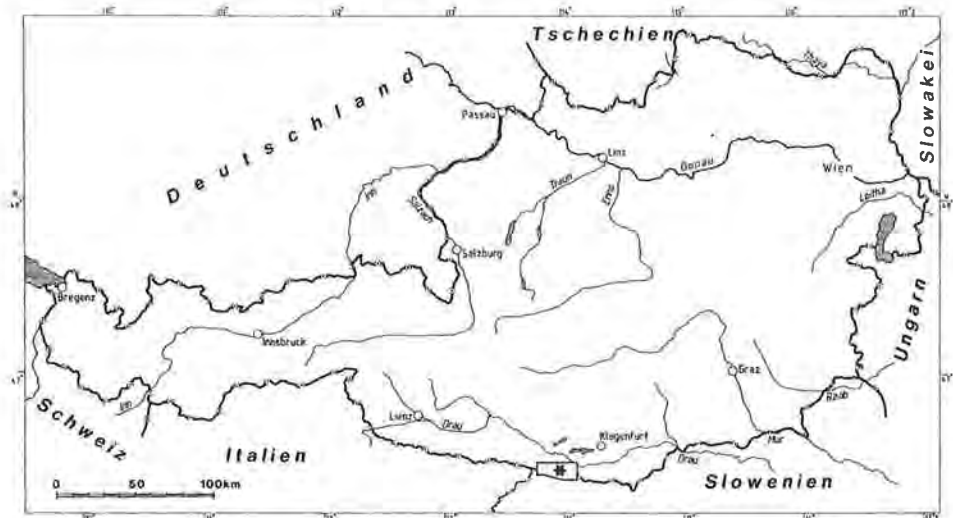


Fig. 1: Lage des Untersuchungsgebietes.
Location of the study area.

chemischer Studie des Untersuchungsgebietes erarbeitet (M. BRENČIČ, 1992). Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen dieses Projektes durchgeführt. Desgleichen wurde am Institut für Hydrogeologie und Geothermie der Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH Graz eine Diplomarbeit vergeben (M. PREMSTALLER, 1991), die unter anderem eine detaillierte Quellaufnahme des österreichischen Karawankenanteils im Untersuchungsgebiet zum Ziel hatte.

2.2. Abflußmessungen

Im Untersuchungsgebiet befinden sich keine Abflußmeßstationen, die eine kontinuierliche Aufzeichnung der Oberflächenabflüsse liefern. Es wurden daher Meßpunkte an allen Bächen festgelegt, an denen bei Niederwasser Abflußmessungen zur Erfassung der Abflußspenden von Teileinzugsgebieten und des Gesamtabflusses erfolgten. Diese Messungen sollten Hinweise auf den Basisabfluß sowie die einzugsgebietsübergreifende Entwässerung geben.

Die Messungen wurden auf slowenischer Seite an folgenden Bächen durchgeführt: Jurežev potok, Jermanov potok, Hladnik, Sedučnik, Mlinca, Belca, Dobršnik, Beli und Črni potok, Raten und Jesenica.

Auf österreichischer Seite erfolgten die Abflußmessungen am Outschenabach, Worounitzabach, Gratschenitzenbach, Ardeschitzabach, Karawankentunnel, Bärengrabenbach, Radischbach und Großer Dürrebach (Lage der Meßstellen siehe Fig. 2).

Aufgrund der turbulenten Fließstrecken wurden die Abflußmessungen mit der Salzverdünnungsmethode mittels elektrischem Leitfähigkeitsmeßgerät durchgeführt (Integrationsverfahren, siehe R. BENISCHKE & T. HARUM, 1984).

2.3. Hydrogeochemie und Isotopenbeprobung

Eine Reihe von Wasseraustritten wurde längerzeitig, meist in monatlichem Rhythmus, beprobt. Die Meßstellenauswahl erfolgte in Abhängigkeit des geologischen Aufbaues und der Erreichbarkeit. Weil sich auf der slowenischen Seite relativ wenige Quellen befinden, wurden fast alle größeren Quellen in den Beprobungsplan eingeschlossen.

Die Probenahme erfolgte an folgenden Quellen: Jurežev potok, Jermanov potok, Rotovnikova žaga, Sedučnik, Hrušenska planina, Dovška baba, Planina pod Golico und an der Fassung im Straßentunnel bei Station 3033 m. Gelegentlich wurden auch Proben am Quellaustritt vom Hladnik, im Mlincatal und an den Oberflächenwässern vom Hladnik, von der Mlinca und Belca entnommen.

Auf österreichischer Seite wurden die Quellaustritte Kar 2 im Radischgraben, Kar 73, Kar 78, Kar 84, Kar 88 und Kar 108 im Bärengraben, Kar 95, Kar 102 auf der Roschitzaalm, Kar 126, Kar 130 und Kar 133 im Ardeschitzgraben, Kar 178 im Gratschenitzengraben, Kar 266 im Worounitzgraben und die beiden Stollenfassungen bei Stationierung 2830 m und 2930 m beprobt. Darüberhinaus wurden jeweils die Oberflächenwässer Bärengrabenbach, Ardeschitzabach und Gratschenitzenbach mitbeprobt.

Folgende Laboranalysen wurden durchgeführt: Chemische Analysen der Ionen Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- ; Umwelisotope ^{18}O , ^{13}C und gelegentlich ^2H , ^3H sowie ^{14}C . Im Gelände wurden die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert und die Temperatur gemessen.

Westliche Karawanken

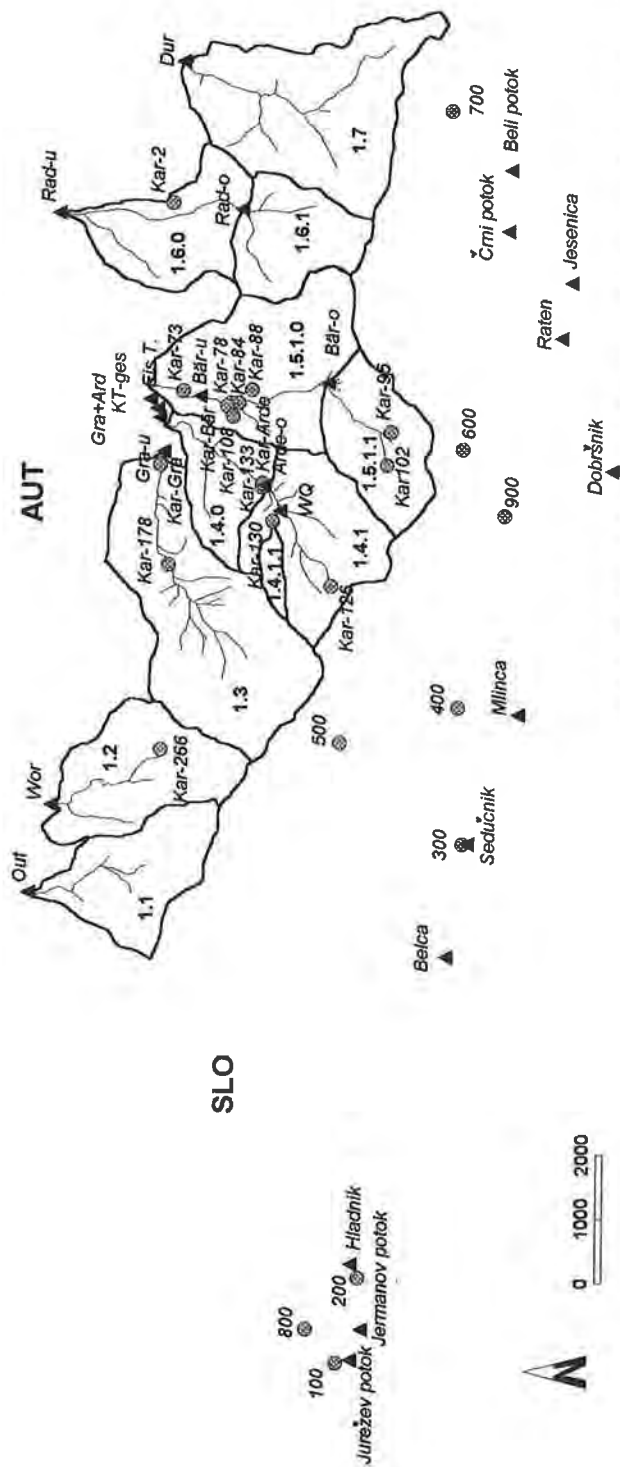


Fig. 2: Lage der Probenabnahmestellen und Abflussmeßstellen. Probenabnahmesstelle: Kar-2 = Quelle, Kar-Arde, Kar-Bär und Kar-Gra = Bachbeprobung Ardeschitzbach, Bärengraben und Gratschenitzenbach; 100 = Jurež, 200 = Rotovnikova žaga, 300 = Sedučnik, 400 = Milnica, 500 = Dovška baba, 600 = Hrusenska planina, 700 = Planina pod Golico, 800 = Jermanov, 900 = Predor 3030 m. Abflussmeßstelle: Our = Outschenabach, Dur = Worowitzabach, Gra = Gratschenitzenbach, Ard = Ardeschitzbach, WQ = Weiße Quelle, Bär = Bärengrabenbach, Rad = Radischbach, Wor = Worowitzabach, KT-ges = Autobahntunnel Gesamtabfluß, Eis. T = Eisenbahntunnel Gesamtabfluß; 1.1 = Einzugsgebietsnummer, Observation network. Sampling point: Kar-2 = spring, Kar-Arde, Kar-Bär and Kar-Gra = sampling of water from Ardeschitzbach, Bärengraben and Gratschenitzenbach; 100 = Jurež, 200 = Rotovnikova žaga, 300 = Sedučnik, 400 = Milnica, 500 = Dovška baba, 600 = Hrusenska planina, 700 = Planina pod Golico, 800 = Jermanov, 900 = Predor 3030 m. Discharge observation point: Our = Outschenabach, Dur = Worowitzabach, Gra = Gratschenitzenbach, Ard = Ardeschitzbach, WQ = Weiße Quelle, Bär = Bärengrabenbach, Rad = Radischbach, Wor = Worowitzabach, KT-ges = runoff of the highway tunnel, Eis. T = runoff of the railway tunnel, 1.1 = number of catchment area.

3. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

3.1. Geologische und tektonische Interpretation

Die geologische Karte des Bereiches zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel (Geologische Karte der Westkarawanken zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel von F. K. BAUER, T. BUDKOVIČ, L. FERJANČIČ & W. POLTNIG, 1993 und Geologische Profile zur Geologischen Karte der Westlichen Karawanken zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel von T. BUDKOVIČ, 1993 – siehe Beilagen am Buchende) ist nach der Karte von F. TELLER aus dem Jahr 1914 die erste, die die geologischen Verhältnisse an beiden Seiten der Staatsgrenze übereinstimmend darstellt.

Alle nach dem Ersten Weltkrieg veröffentlichten Karten stellen nämlich nur die geologischen Verhältnisse bis zur Staatsgrenze dar, die entlang des Karawankenkammes verläuft.

Die geologische Karte der Westkarawanken zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel ist eine Synthese der neuesten veröffentlichten und handschriftlichen geologischen Karten der slowenischen und österreichischen Seite. Die Natur einiger tektonischer Kontakte wurde erst nach Erarbeitung einer gemeinsamen geologischen Karte klar. Das gilt insbesondere für Störungen in dinarischer Querrichtung, deren Charakter im slowenischen Abschnitt des Bereiches viel besser erkennbar ist als im österreichischen. Um die geologischen Verhältnisse so übersichtlich wie möglich darzustellen, wurden zahlreiche vermutete und photogeologisch festgestellte Verwerfungen nicht dargestellt, da sie das geologische Bild undeutlich machen könnten. Die geologische Karte wurde im Maßstab 1 : 25 000 angefertigt.

Bei der geologischen Darstellung der slowenischen Seite wurden folgende geologische Karten verwendet:

- Geologische Grundkarte Jugoslawiens, Blatt Villach und Pontebba, Maßstab 1 : 100 000 (B. JURKOVŠEK et al., 1987);
- Geologische Karte des weiteren Gebietes der Savehöhlen, Maßstab 1 : 25 000 (M. ISKRA, 1965);
- Geologische Karte des Gebietes oberhalb des Karawanken-Autobahntunnels, Maßstab 1 : 15 000 (T. BUDKOVIČ et al., 1992).

Ein kleiner östlicher Abschnitt der kompilierten geologischen Karte reicht auch in den Bereich der „Geologischen Grundkarte Jugoslawiens, Blatt Klagenfurt“ (S. BUSER et al., 1980).

Die Daten für diesen Kartenabschnitt wurden nach M. ISKRA (1965) entnommen, der das Gebiet im Maßstab 1 : 10 000 kartierte.

Beim Ausarbeiten der geologischen Karte für das österreichische Untersuchungsgebiet wurden folgende Quellen verwendet:

- Geologische Karte der Republik Österreich, 1 : 50 000, Blatt 200, Arnoldstein, und 201–210, Villach–Assling (N. ANDERLE, 1977);
- Geologische Karte „Karawanken, Westteil“, 1 : 25 000 (F. K. BAUER, 1985);
- Geologische Karte „Geol. Karte des Gebietes zw. Mittagskogel und Rosenbach“, 1 : 25 000 (A. KERN, 1980);
- Manuskriptkarte von F. K. BAUER aus dem Jahr 1990, handschriftliche Aufzeichnungen von W. POLTNIG aus dem Jahr 1992.

3.1.1. Lithostratigraphische und tektonische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet

Die *lithostratigraphischen Verhältnisse* sind in Fig. 3 dargestellt.

Hochwipfelschichten mit tektonischen Linsen devonischer Kalke (Unterkarbon, Devon): Sie sind im Bereich des Wurzenpasses zu finden, zum größten Teil auf der österreichischen Seite. Die ältesten Gesteine aus dieser lithostratigraphischen Einheit sind verschiedenartige Kalksteine unter- bis mitteldevonischen Alters. Sie kommen als tektonische Linsen bzw. Streifen entlang der Periadriatischen Naht vor. Die Hochwipfelschichten werden hauptsächlich aus dunkelgrauen bis schwarzen, feinkörnigen, klastischen Gesteinen gebildet. Sie haben eine flyschartige Entwicklung und unterkarbonisches Alter. Südöstlich vom Kamnati vrh wurden auf der slowenischen Seite in der Kalkschicht auch oberkarbonische Fossilien gefunden (A. RAMOVŠ, 1976). Das weist darauf hin, daß am südlichen Rand dieses Gebirgskomplexes auch ein Teil der Auernigschichten erhalten blieb. Weil alle Kontakte des Komplexes tektonisch sind, kann seine Mächtigkeit nicht abgeschätzt werden. Tektonische Linsen dieser Einheiten sind außerdem entlang der Periadriatischen Naht und der Gratschenitzen-Störung sowie im Bereich von Rosenbach und östlich davon zu finden.

Auernigschichten (Oberkarbon–Unterperm): Sie kommen in größeren Bereichen nördlich von Jesenice und Dovje vor. Nördlich von Jesenice sind sie ungefähr drei Kilometer breit. Diese Schichten setzen sich zum größten Teil aus grobkörnigen, dunkelgrauen und schwarzen, klastischen Gesteinen zusammen. Zwischen den klastischen Gesteinen sind Linsen massigen oder schichtigen Kalksteins des Oberkarbons und Unterperms zu finden. Im ganzen Bereich sind die Schichten tektonisch zerrüttet, daher kann ihre Mächtigkeit nicht festgestellt werden. In den Auernigschichten sind auch tektonische Linsen jüngerer Gesteine eingeknetet, die der Grödener Formation, dem Bellerophondolomit und den Werfener Schichten entstammen.

Trogkofelkalkstein (Unterperm): Er kann am Kontakt zwischen Auernigschichten und Grödener Formation auftreten und ist massig, hellgrau, grau, rosa oder fleischrot. Wegen der tektonischen Verhältnisse kann auch seine Mächtigkeit nicht angegeben werden. Er ist an der südlichen Seite der Karawanken oberhalb Gozd Martuljek als eine tektonische Linse an der Save-Störung zu finden.

Tarviser Brekzie (Mittelperm): Sie ist dem Trogkofelkalkstein oder den Auernigschichten erosionsdiskordant aufgelagert. Sie setzt sich aus Trümmern fleischroten Kalksteins, aus Quarz und mikrokristallinen Silikatgesteinen zusammen. In der Brekzie sind auch Linsen roten Quarzkonglomerates und roten Tonschiefers zu finden. Die klastischen Gesteine sind stellenweise auch grün und grau gefärbt. Die Brekzie erreicht Mächtigkeiten von 25 m (B. JURKOVŠEK, 1987) bis 150 m (S. BUSER, 1980). Im Kartenbereich tritt sie nur an der südlichen Karawankenseite auf.

Grödener Formation (Mittelperm): Sie tritt überall im Hangenden der Tarviser Brekzie auf. Sie wird von rotem Tonstein, Siltstein, Konglomerat und Sandstein gebildet. Der Übergang ist allmählich. Im Straßentunnelbereich sind die Tarviser Brekzie und Grödener Formation nicht trennbar. Im Bereich der Karte ist die Grödener Formation zwischen 20 und 250 m mächtig (B. JURKOVŠEK, 1987).

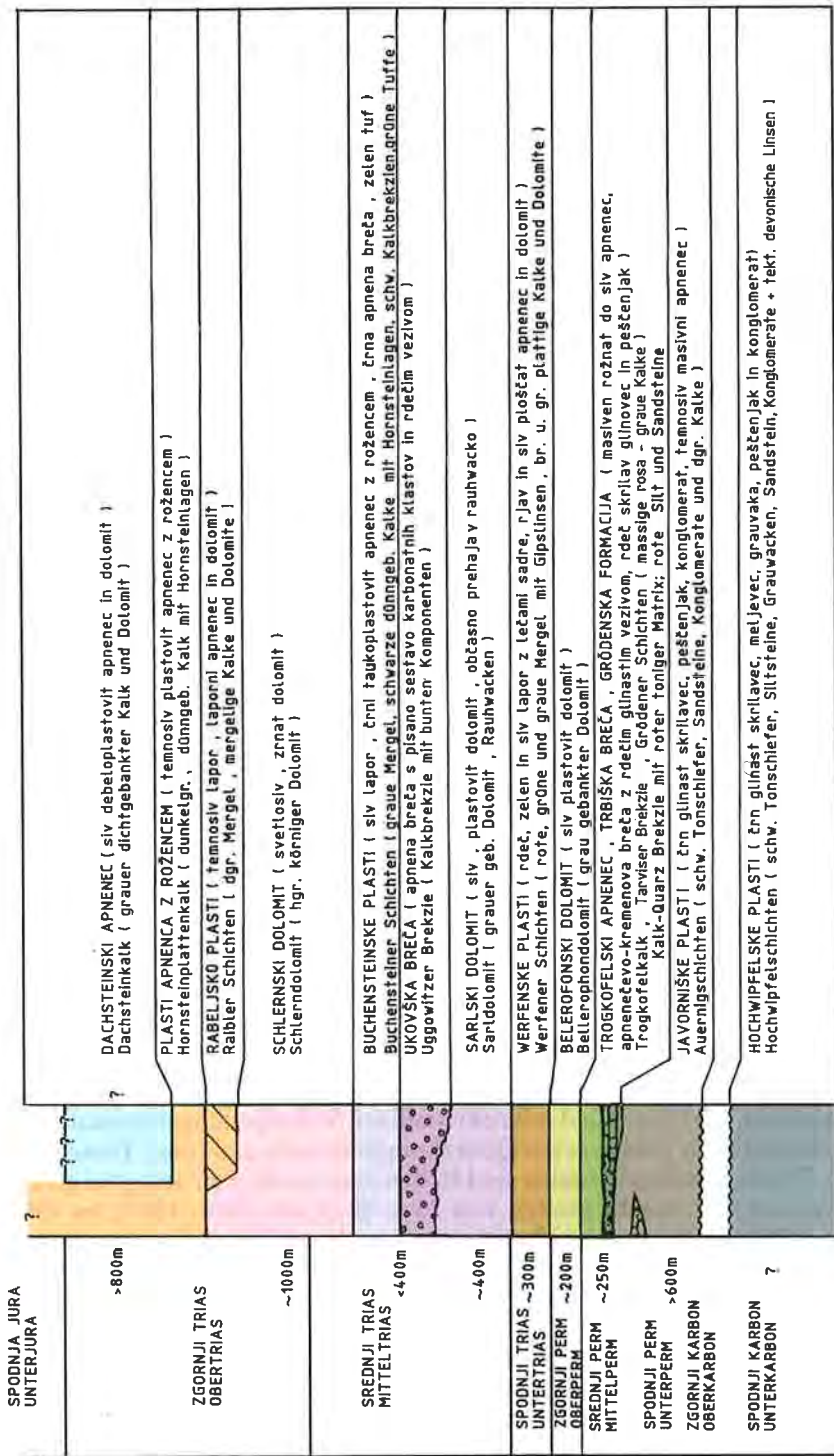


Fig. 3: Lithostratigraphisches Profil.
Lithostratigraphic profile.

Bellerophon-Dolomit (Oberperm): Er überlagert die Grödener Schichten. Auf der slowenischen Seite ist er grau, hellgrau und gebankt, stellenweise auch löchrig und rauhwackig. Oberhalb Dovje enthält er Gips. In Slowenien beträgt seine Mächtigkeit 30–100 m.

Der untere Anteil des Dolomits auf der österreichischen Seite ist zellig und bituminös, während der obere aus dolomitischem Kalkstein mit Algen- und Foraminiferenresten (C. HAUSER, 1982) besteht.

Werfener Schichten (Untere Trias): Sie liegen konkordant auf dem Bellerophon-Dolomit. Auf der slowenischen Seite tritt am Übergang zwischen den beiden Formationen grau und rosa gefärbter Dolomit auf. Werfener Schichten werden aus roten glimmerführenden Siltsteinen und Mergeln sowie aus Tonschiefer, Dolomit, dolomitischem und kalkigem Oolith und Sandstein zusammengesetzt. Beim Bau des Autobahn- und Eisenbahntunnels wurden auch mehrere Meter mächtige Gips- und Anhydritlinsen angetroffen.

Der untere Teil der Werfener Schichten im österreichischen Anteil (C. HAUSER, 1982) ist aus dunklem oolithischem Kalkstein (Seiser Schichten) zusammengesetzt und die hangenden Anteile aus tonig-sandigem, stellenweise buntem Schiefer mit Kalksteinschichten (Campiler Schichten). In Slowenien wird die Mächtigkeit auf 300 m (B. JURKOVŠEK, 1987) und in Österreich auf 350 m (C. HAUSER, 1982) geschätzt.

Sarldolomit (Mittlere Trias, Anis): Er liegt konkordant auf Werfener Schichten. Auf der slowenischen Seite ist er gebankt, dunkelgrau, olivgrün, bräunlich oder rosa, zwischen 400 und 1000 m mächtig (B. JURKOVŠEK, 1987). Im slowenischen Abschnitt des Autobahntunnels ist der Dolomit gebankt, sehr rein und nur einige 10er Meter mächtig. Auf der österreichischen Seite ist er dunkelgrau und sandig. Das Liegende besteht aus Rauhwacken. Im Bereich des österreichischen Abschnitts des Autobahn- und Eisenbahntunnels ist der Dolomit dickbankig und stellenweise zellenartig und sandig. Seine Mächtigkeit ist wahrscheinlich mit der in Slowenien vergleichbar.

Uggowitzer Brekzie (Mittlere Trias): Sie ist auf der slowenischen Karawankenseite anzutreffen. Meist ist sie aus Brekzien-Konglomerat mit Bindemittel aus bräunlichrotem, seltener grauem Mergel, Kalk und Sandstein zusammengesetzt. Die Trümmer sind teilweise gerundet. Das Alter der Komponenten reicht vom Paläozoikum bis zur mittleren Trias. Obertags ist das Brekzien-Profil nie aufgeschlossen. Im Autobahntunnel auf der slowenischen Seite befindet sich ihr komplettes Profil. Sie ist erosionsdiskordant auf dem Sarldolomit abgelagert. Ihre Mächtigkeit beträgt einige 10er Meter. Im Bereich der Mlinca ist die Brekzie deutlich mächtiger.

Buchensteiner Schichten (Mittlere Trias, Ladin): Diese Schichten formen zusammen mit der Uggowitzer Brekzie das Liegende des Schlerndolomits. Aufschlüsse dieser Schichten befinden sich hauptsächlich auf österreichischem Gebiet. Auf der slowenischen Seite werden sie vor allem am westlichen Rand der geologischen Karte gefunden. Buchensteiner Schichten setzten sich aus Kalksteinen mit Hornsteinlagen, Mergeln, Sandsteinen, Konglomeraten, Tuffiten und sauren Ergußgesteinen zusammen. Der untere Anteil dieser Schichten wird in Österreich als „Alpiner Muschelkalk“ bezeichnet (F. K. BAUER, 1985). Die Mächtigkeit ist variabel und wird auf höchstens 550 m geschätzt.

Schlerndolomit (Mitteltrias, Obere Trias): Er umfaßt von allen lithostratigraphischen Einheiten auf der Karte die größte Fläche. Sein größter Teil liegt auf der slowenischen Seite. Der gesamte Dolomit ist klüftig, deshalb ist er auch die

bedeutendste wasserführende Gesteinsschicht im Untersuchungsgebiet. Der Großteil der Schichtfolge ist aus weißem bis hellgrauem körnigem Dolomit, kalkigem Dolomit und Kalkstein zusammengesetzt. Das Gebirge ist zum größten Teil massig. Schichtung ist nur selten sichtbar und kommt in Form dunkler gefärbter Bänder vor. Die Mächtigkeit des Schlerndolomits wird in diesem Bereich auf 1000 m geschätzt.

Raibler Schichten und Hornsteinplattenkalke (Obere Trias – Karn–Unterer Jura): Diese Schichten kommen beiderseits der Grenze vor. Der Hauptanteil liegt im Belcagebiet in Slowenien. Auf dem Schlerndolomit liegen konkordant die mergelig entwickelten Raibler Schichten. Mancherorts enthalten sie viele megalodontide Muscheln. Der obere Teil der Raibler Schichten wird aus schichtigem Dolomit gebildet. Das Hangende bilden Hornsteinplattenkalke, welche die oberen drei Viertel der Schichtfolge ausmachen. Im Liegenden der Hornsteinplattenkalke überwiegt schichtiger Hornsteindolomit, der nach oben in den Hornsteinkalk übergeht. Im mittleren Bereich sind mächtige Dolomit- und Kalkbrekzienschichten zu finden. Die Schichtfolge ist dunkelgrau bis grau gefärbt. Zwischenzeitig durchgeführte neuere Untersuchungen belegen das jurassische Alter der Hornsteinplattenkalke im Bereich des Kahlkogels (L. KRYSZTIN et al., 1994, J. SCHLAF, 1995).

Dachsteinkalk (Obere Trias – Nor–Räth): Im Kartenbereich bildet er die Gipfelregion des Mittagkogels. Die Schichtfolge wird von hellgrauen, schichtigen Kalksteinen und Dolomiten gebildet. Östlich des Mittagkogelgipfels herrschen Dolomitskalk und Dolomit vor. Die Dachsteinkalke und Hornsteinplattenkalke wurden z. T. zeitgleich in unterschiedlichen Faziesräumen abgelagert. Daher wird angenommen, daß in diesem Bereich der Rand eines tektonischen Grabens verlief, wo im seicht-liegenden Teil Dachsteinkalk, im tiefliegenden jedoch Hornsteinplattenkalk abgelagert wurden.

Moränen (Quartär): Sie liegen auf den nördlichen und südlichen Karawankenhängen. Sie wurden entlang des Drau- und Savetals von den beiden größten Talgletschern abgelagert. Auf der Nord- und Südseite des Kammes wurden auch kleinere Moränen von lokalen Gletschern abgelagert.

Hangschutt (Quartär): Er wurde unter den Bergwänden aus Schlerndolomit und Dachsteinkalk abgelagert. Größere Hangschuttbildungen liegen auf dem nördlichen Karawankengang unter dem Hauptkamm. An manchen Stellen tritt älterer Schutt als Hangschuttbrekzie mit braunem, tonigem Bindemittel auf.

Die vorliegende geologische Karte des Gebietes zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel wurde als Grundlage für die Untersuchung der hydrogeologischen Verhältnisse erarbeitet. Aus diesem Grund wurde die Karte im nordwestlichen und südöstlichen Gebirgsabschnitt nicht bis zur Saveverwerfung bzw. Periadriatischen Naht erstellt, sondern nur bis zur undurchlässigen Barriere aus paläozoischen, klastischen Gesteinen.

Die Benennung von *tektonischen Einheiten* im Untersuchungsgebiet wurde der „Geologischen Karte der Republik Österreich“ (N. ANDERLE, 1977) entnommen. Der Westkarawankenabschnitt, im N durch die Periadriatische Naht und im S durch die Saveverwerfung begrenzt, wurde in drei tektonische Einheiten gegliedert:

- Jüngerer Paläozoikum der Südkarawanken,
- Koschuta-Einheit,
- Älteres Paläozoikum der Westkarawanken.

Die Einheit „**Jüngerer Paläozoikum der Südkarawanken**“ oder nach F. KAHLER (1954) „Asslinger Karbonaufbruch“ setzt sich aus äußerst zerrütteten, fein- und grobkörnig klastischen und karbonatischen Gesteinen der Auernigsschichten zusammen. Am meisten deformiert wurde der völlig durchgeknetete schwarze Tonschiefer. Grobkörnige Klastite, die im Tonschiefer als tektonische Linsen auftreten, sind stark zerrüttet. Kalkstein und Dolomitkalk, die ebenfalls tektonische Linsen im Tonschiefer bilden, sind stark rekristallisiert. In den paläozoischen Gesteinen dieser Einheit wurden auch jüngere Gesteine aus dem Oberperm, der unteren Trias und sogar aus dem Tertiär eingeknetet. Der Hauptkomplex dieser Gesteine liegt nördlich von Jesenice. Die Einheit liegt zwischen den Savehöhlen und Dovje in Richtung E-W. Bei den Savehöhlen biegt sie gegen SE ab. Diesem Komplex entstammen die tektonischen Linsen der Auernigsschichten und des Trogkofelkalksteins, die an der Save-Störung im Bereich von Gozd Martuljek und Kranjska Gora zu finden sind.

Der Kontakt zwischen dieser und der Koschuta-Einheit ist eine steile bis subvertikale Fläche, die in Richtung E-W streicht und manchmal steil gegen S einfällt. Diese Fläche ist entlang subvertikaler Störungen in dinarischer Richtung, dinarischer Querrichtung und in Richtung N-S verschoben.

Die „**Koschuta-Einheit**“ nimmt den größten Abschnitt der Karte ein und setzt sich vorwiegend aus Gesteinsschichten triassischen Alters zusammen. Sie liegt zwischen dem „Älteren Paläozoikum der Westkarawanken“ und dem „Jüngeren Paläozoikum der Südkarawanken“. Die Grundstruktur der Koschuta-Einheit ist die Kahlkogel-Synklinale, deren Achse gegen E einfällt. Deshalb wird der westliche Bereich der Koschuta-Einheit zwischen Martuljek und Kranjska Gora aus Schichten der unteren und mittleren Trias gebildet, die am Rand dieser Struktur ausstreichen. Der zentrale Bereich der Kahlkogel-Synklinale besteht aus Dachsteinkalkschichten des Mittagkogels. In Richtung E ist die Kahlkogel-Synklinale durch die Koschuta-Störung abgetrennt. Nordöstlich der Kahlkogel-Synklinale ist das Gebiet wegen der Nähe zur Periadriatischen Naht schon stark tektonisch zerlegt. Die tektonischen Linsen sind lang, schmal und reichen tief unter die Oberfläche. Auch die nördliche Grenze der Koschuta-Einheit verläuft in Richtung E-W und ist vermutlich sehr steil.

Die Einheit „**Älteres Paläozoikum der Westkarawanken**“ wird aus devonischem Kalkstein und unterkarbonischen, meist klastischen Hochwipfelschichten zusammengesetzt. Nur ein geringer Anteil dieser Schichten am Südrand dieser Einheit gehört zu oberkarbonischen Auernigsschichten. Die devonischen Kalksteine treten als tektonische Streifen an der Periadriatischen Naht in Erscheinung. Auch diese tektonische Einheit ist E-W-gerichtet und an manchen Stellen entlang linkssinniger Störungen in querdinarischer Richtung verschoben.

Störungen

Im untersuchten Gebiet treten mehrere Störungssysteme auf. Die Hauptssysteme sind Störungen in alpiner (E-W), dinarischer (NW-SE), querdinarischer (NE-SW) Richtung und die N-S-Störungen.

Zu den alpinen Störungen gehören die zwei markantesten Störungen in diesem Gebiet, d. h. die Periadriatische Naht im N und die Save-Störung im S, die weitgehend parallel verlaufen. Im Bereich des Ostrandes der Karte richten sich die beiden Störungen in die dinarische Richtung. Es besteht die Möglichkeit, daß es sich um eine einheitliche Störung handelt, die sich gegen die Oberfläche verzweigt. Im Gratschenitzengraben verläuft die Gratschenitzen-Störung, die an der österrei-

chischen Seite auch die beiden Tunnel durchquert. Im Bereich der Tunnel fällt die Störung steil gegen S ein.

Manche Störungen können alten, durch Zerbrechen der Karbonatplattform in der oberen Trias synsedimentär entstandenen Verwerfungen zugeordnet werden. An ihnen sank ein Teil der karbonatischen Plattform des Schlerndolomits ein, sodaß im so entstandenen tektonischen Graben dann Raibler Schichten und Hornsteinplattenkalk abgelagert wurden.

Dinarische Störungen sind im Untersuchungsgebiet selten. Die charakteristischste ist die Mlinca-Störung. Bei Jesenice zweigt sie von der Save-Störung ab und reicht bis ins Gebiet der Belca, wo sie endet; sie ist subvertikal. Entlang dieser Störung kam es zu einer rechtssinnigen Blattverschiebung. Die zweite nicht ganz typische dinarische Störung ist die Koschuta-Störung. Östlich vom Hochstuhl verläuft sie in Richtung E-W, dann biegt sie unter dem Hochstuhl in die dinarische Richtung ab, nördlich des Kahlkogels und Frauenkogels ist sie in alpiner Richtung orientiert, nördlich des Mittagkogels biegt sie wieder in die dinarische Richtung ab und endet an der Periadriatischen Naht. Die Angaben aus den beiden Tunneln deuten darauf hin, daß diese Störung steil gegen S und SW einfällt.

Störungen in querdinarischer Richtung verlaufen im Bereich zwischen der Koschuta- und Save-Störung. Die typischsten sind die Hrušica- und Ardeschitza-Störung und die Störungen entlang dem Belca Tal und dem Bach Žakelj bei Podkoren. Sie sind steil, fast subvertikal und linkssinnig orientiert.

Die N-S-Störungen sind kleiner und treten vor allem im Bereich südlich des Kahlkogels auf.

3.2. Abflußmessungen

Niederwasserabfluß von Einzugs- und Teileinzugsgebieten

Nach längeren niederschlagsfreien Perioden wurden die Niederwasserabflüsse von einzelnen Einzugsgebieten und Teileinzugsgebieten gemessen. Diese Niederwasserabflüsse sollten den nach Versickerung der Niederschläge gespeicherten Teil des Abflusses repräsentieren und Hinweise auf die unterschiedlichen Speichereigenschaften einzelner Gesteinsbereiche liefern, bzw. Hinweise auf einzugsgebietsübergreifende Entwässerung geben. Nachfolgende Tabellen der gemessenen Abflüsse und errechneten Abflußspenden basieren auf den im März und August 1992 nach einer langandauernden niederschlagsfreien Periode gemessenen Niederwasserabfluß.

Aus den durchgeführten Messungen können klar die Gegensätze im Niederwasserabflußverhalten der Einzugsgebiete erkannt werden. Die größte Abflußspende weist erwartungsgemäß die Weiße Quelle auf. Ihr orographisches Einzugsgebiet ist sehr klein, ihr tatsächliches reicht jedoch bis in die Gipfelregionen des Mittagkogels. Die kleinsten Abflußspenden treten in den Einzugsgebieten des Ardeschitza-baches, des Gratschenitzenbaches, des Radischbaches und des Worounitzabaches auf. Die orographischen Einzugsgebiete des Worounitzabaches und Gratschenitzenbaches reichen bis in die Gipfelregionen des Mittagkogels. Dieser wird jedoch durch die Weiße Quelle in Richtung Ardeschitza-bach entwässert, sodaß hier bereits Abflußdefizite auftreten müssen.

Die Abhängigkeit der Abflußspende von der mittleren Seehöhe der Einzugsgebiete kann im Bereich Bärengraben und Radischgraben erkannt werden. In diesen Teileinzugsgebieten entspricht das orographische Einzugsgebiet weitgehend dem

Tab. 1: Berechnung der Abflußspenden bei Niederwasser im März 1992 (Westliche Karawanken-Nordseite). Lage der Einzugsgebiete siehe Fig. 2.
 Calculation of specific discharge at low water conditions in March 1992 (Western Karawanks – northern part). The location of the catchment areas is shown in fig. 2.

Einzugsgebiet	EZG [Nr.]	H _{mitt} [m ü.A.]	A proj. [km ²]	Abfluß [l/s]	Abfluß kor. [l/s]	Abflußspende [(l/s)/km ²]
Großer Dürrebach	1.7	1068,30	7,250	163	163	22,48
Radischbach-oben	1.6.1	1244,07	2,914	n.g.	n.g.	
Radischbach-unten	1.6.0	810,54	3,445	n.g.	n.g.	
Summe	1.6	1009,21	6,359	35	35	5,50
Bärengraben	1.5.1.1	1464,56	3,199	59	59	18,44
Bärengraben-unten	1.5.1.0	1097,98	4,912	96	37	7,53
Summe	1.5.1	1242,55	8,110	96	96	11,84
Weißer Quelle	1.4.1.1	1488,49	0,388	8	8	20,62
Ardeschitzbach-oben	1.4.1	1369,33	4,142	29	21	5,07
Ardeschitzbach-unten	1.4.0	983,58	2,233	0	-29	-12,99
Summe	1.4	1248,77	6,762	0	-21	-3,11
Gratschenitzenbach	1.3	1323,89	8,145	98	98	12,03
Worounitzabach	1.2	1305,31	4,216	17	17	4,03
Outschenabach	1.1	1303,71	3,588	73	73	20,35
Summe	1	1201,02	45,243	447	447	9,88

Tab. 2: Berechnung der Abflußspenden bei Niederwasser im August 1992 (Westliche Karawanken-Nordseite). Lage der Einzugsgebiete siehe Fig. 2.
 Calculation of specific discharge at low water conditions in August 1992 (Western Karawanks – northern part). The location of the catchment areas is shown in fig. 2.

Einzugsgebiet	EZG [Nr.]	H _{mitt} [m ü.A.]	A proj. [km ²]	Abfluß [l/s]	Abfluß kor. [l/s]	Abflußspende [(l/s)/km ²]
Großer Dürrebach	1.7	1068,30	7,250	156	156	21,52
Radischbach-oben	1.6.1	1244,07	2,914	22	22	7,55
Radischbach-unten	1.6.0	810,54	3,445	25	3	0,87
Summe	1.6	1009,21	6,359	25	25	3,93
Bärengraben-oben	1.5.1.1	1464,56	3,199	60	60	18,76
Bärengraben-unten	1.5.1.0	1097,98	4,912	96	36	7,33
Summe	1.5.1	1242,55	8,110	96	96	11,84
Weißer Quelle	1.4.1.1	1488,49	0,388	18	18	46,39
Ardeschitzbach-oben	1.4.1	1369,33	4,142	25	7	1,69
Ardeschitzbach-unten	1.4.0	983,58	2,233	10	-15	-6,72
Summe	1.4	1248,77	6,762	10	-8	-1,18
Gratschenitzenbach	1.3	1323,89	8,145	73	73	8,96
Worounitzabach	1.2	1305,31	4,216	21	21	4,98
Outschenabach	1.1	1303,71	3,588	80	80	22,30
Summe	1	1201,02	45,243	461	461	10,19

tatsächlichen, was sich in einer linearen Abnahme der Abflußspende der Teileinzugsgebiete mit sinkender Seehöhe von ca. 3 l/s/km² je 100 m Seehöhe dokumentiert. Abflußüberschüsse bzw. -defizite einiger Einzugsgebiete gegenüber dieser Abflußspenden-Höhenbeziehung können wie folgt interpretiert werden:

- **Einzugsgebiet Weiße Quelle:** Die Weiße Quelle weist ihren geringsten Abfluß in den Wintermonaten kurz vor Einsetzen der Schneeschmelze auf. Die Messung vom März 1992 zeigt, daß sie nahe der Abflußspenden-Höhenbeziehung der Eicheinzugsgebiete liegt. Zur Niederwasserzeit (August 1992) hat der Schüttungsrückgang im Gegensatz zu den anderen Einzugsgebieten noch nicht den Tiefstand erreicht, sodaß sie daher im August einen großen Abflußspendenüberschuß aufweist.
- **Einzugsgebiete Worounitzabach und Gratschenitzenbach:** Diese beiden Gebiete liegen am Nordabhang des Mittagkogels und weisen zu beiden Niederwassermeßterminen Abflußspendendefizite auf. Dies dürfte darin begründet sein, daß die hochgelegenen Einzugsgebietsanteile (Mittagskogelgipfelbereich) infolge Verkarstung in Richtung Weiße Quelle (Ardeschitzgraben) entwässern.
- **Einzugsgebiet Ardeschitzabach:** Dieses Einzugsgebiet weist die niedrigsten Abflußspenden des gesamten Untersuchungsgebietes auf, wobei im Unterlauf sogar negative Abflußspenden auftreten. Ursachen dafür können einerseits Wasserverluste durch Versickerung in den Autobahntunnel und andererseits Ableitungen im Unterlauf in den Bärengraben sein. Ein Gesamtabfluß von etwa 77 l/s aus dem Einzugsgebiet Ardeschitzabach (ohne Anteil Weiße Quelle) wäre zu Niederwasserzeiten entsprechend der Abflußspenden-Höhenbeziehung zu erwarten. Die tatsächlich gemessenen Abflüsse betragen jedoch nur 10 bzw. 0 l/s bei der Einmündung in den Gratschenitzenbach. Im Oberlauf wies der Ardeschitzabach zu diesen Meßterminen 7 bzw. 21 l/s (reduziert um Schüttung der Weißen Quelle) auf, was gegenüber dem zu erwartenden Wert von 66 l/s einem Defizit von 45–60 l/s entspricht.
 Hierbei ist festzuhalten, daß die Abflußmeßstelle Ardeschitzabach-oben im Bereich von Wildbachschutt gelegen ist und daher ein Teil des Wassers unbeobachtet im Untergrund die Meßstelle passieren kann. Wie die Abflußmessungen im Oberlauf des Ardeschitzabaches zeigen, kann die im Unterlauf erfolgende Ableitung von Ardeschitzabachwasser in den Bärengraben jedoch nicht allein die Ursache für diese Abflußdefizite sein. Es muß angenommen werden, daß Teile der auf das Einzugsgebiet des Ardeschitzabaches fallenden Niederschläge über Störungen und Kluftsysteme in die Tiefe versickern und über die Vorflut Autobahntunnel ausgeleitet werden. Eine derart drainagierende Wirkung des Autobahntunnels auf das Einzugsgebiet Ardeschitzabach kann jedoch aus geologischen Gründen im Bereich des Nordstollen nur bis etwa 2000 m (ober Tage etwa bis auf Höhe der Weißen Quelle) erfolgen. Später zutretende Stollenwässer (große Wasserzutritte aus dem Schlerndolomit im Nordstollen, z. B. KT 2830, KT 2930) entstammen anderen Einzugsgebieten, welche vorwiegend in Slowenien gelegen sind.
- **Einzugsgebiet Outschenabach und Großer Dürrebach:** Beide Einzugsgebiete weisen zu beiden Niederwassermeßterminen erhöhte Abflußspenden gegenüber den Einzugsgebieten im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes auf. Dafür dürften geologische Unterschiede im Gebietsaufbau die Ursache sein. Beide Gebiete werden vorwiegend von schlecht wasserduchlässigen Gesteinen (paläozoische Schiefer, Werfener Schichten, z. T. Anisdolomiten) aufgebaut. Hier dürften feinkörniger Hang- und Verwitterungsschutt einen Bodenaufbau erlauben, der gute Speichereigenschaften aufweist und gegenüber den vorwiegend dolomitischen und kalkigen Einzugsgebieten im zentralen Untersuchungsgebiet das Niederschlagswasser länger und besser zu speichern imstande ist.

Tunnelwasserführung

Durch den Bau des Karawanken-Autobahntunnels wurden große Wassermengen im Berg erschlossen und aus dem Tunnel ausgeleitet. Die großen Unterschiede in der an der Nordseite austretenden Wasserführung des Autobahntunnels zum benachbarten Eisenbahntunnel erklären sich aus den unterschiedlichen angetroffenen geologischen Verhältnissen der beiden Tunnelstrecken.

Nach den zwischen 1977 und 1980 von E. REMY und W. KOGLER-STOCKER durchgeführten Abflußmessungen am Eisenbahntunnel, die Werte zwischen 50 und 65 l/s erbrachten, konnten im Rahmen vorliegender Untersuchungen an beiden Tunnels die in Tab. 3 angegebenen Schüttungen gemessen werden.

Eine Zuordnung von Teilwassermengen im Autobahntunnel zu einzelnen Streckenabschnitten ist heute mit Ausnahme der beiden gefaßten Austritte KT 2830 und KT 2930 nicht mehr möglich. Diese beiden Quellen schütten zusammen konstant etwa 75 l/s.

Tab. 3: Schüttungsmessungen in den Tunnels (l/s).
Discharge measurements in tunnel (l/s).

Datum	Eisenbahnt. Gesamtabfluß	Autobahnt. Gesamtabfluß	Autobahnt. Teilabfluß KT 2830	Autobahnt. Teilabfluß KT 2930
1.10.91	41	286	36,0	39,0
14.10.91			37,9	36,8
9.11.91			34,7	37,3
6.12.91			34,7	37,3
10.01.92			37,9	36,8
8.02.92	31	338	37,9	36,8
18.03.92			37,5	37,5
11.04.92				
8.05.92	26	261	36,8	37,9
19.08.92				

Ein Vergleich der Wasserführung von Eisenbahntunnel und Autobahntunnel zeigt, daß die ersten 2000 m beider Tunnels hinsichtlich des geologischen Aufbaues und der wasserführenden Streckenabschnitte vergleichbar sind. In den Portalbereichen stehen vorerst Schlerndolomite an, welche aufgrund ihrer geringen Überlagerung und ihrer Auflockerung Wasser führen. Im Bereich der Störung, welche parallel zum Gratschenitzengraben die Tunnels quert, kommt es zu vermehrtem Wasserandrang. Die folgenden Werfener Schichten sind weitgehend trocken, im Hangenden derselben und im Bereich der Koschuta-Störung kommt es wieder zu stärkeren Wasserzutritten. Mit dem Eintritt in die Hornsteinplattenkalke bleibt das Gebirge im Eisenbahntunnel lediglich tropfnaß, im Autobahntunnel kommt es jedoch im Bereich, wo die Schlerndolomithorste von unten in die Plattenkalke aufragen, zu starken Wasserzutritten. Im benachbarten Eisenbahntunnel wurden diese Schlerndolomite im Liegenden der Plattenkalke nicht mehr aufgeschlossen, da das gesamte Gebirge südlich der Koschuta-Störung einen Synklinbalbau mit einer gegen E abtauchenden Achse aufweist und der Schlerndolomit im Bereich des Eisenbahntunnels bereits unter der Trasse liegt. Da das überlagernde Gebirge (Plattenkalke) in beiden Tunnels lediglich tropfnaß ist, sind die hier austretenden großen Wassermengen nicht aus dem den Autobahntunnel überlagernden Einzugsgebiet zu beziehen. Das Herkunfts-

gebiet dieser Wässer ist vielmehr im Bereich des Schlerndolomites zu suchen, der gegen W ansteigt und großteils in Slowenien über Gelände ausstreicht.

Die Schüttungsschwankungen im Gesamtabfluß des Autobahntunnels sind witterungsabhängig und werden durch jenen Wasseranteil verursacht, der vom überlagernden Gebirge durch den Tunnel drainiert wird. Derjenige Wasseranteil, der nach Station 2500 m aus den Schlerndolomiten innerhalb der Plattenkalke Zutritt, entstammt einem tief angeschnittenen Karstsystem und weist keine witterungsbedingten Schüttungsschwankungen auf. Da nur zwei größere Quellen dieses Abschnittes mit 75 l/s gefaßt wurden, muß der Gesamtanteil dieser zwischen Stationierung 2500 m und 3500 m austretenden Karstwässer an der Gesamtschüttung mit mindestens 100 l/s angenommen werden.

3.3. Hydrogeochemische Typisierung der Wässer

Die untersuchten Wasserproben weisen das Kationverhältnis $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ und das Anionverhältnis $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ auf. Die einzige Ausnahme ist die Probe Kar 88 mit dem Anionverhältnis $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. Diese Verhältnisse lassen darauf schließen, daß alle Wasserproben zur selben hydrogeologischen Provinz gehören.

Die Wasserfazies wurde aufgrund des Piper-Diagrammes festgelegt (W. BACK, 1961). Die Probe Kar 88 gehört der Fazies $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-$ an. Die restlichen Proben liegen am Übergang zwischen Fazies $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ und $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$.

Hinsichtlich der Dreieckdiagramme (in: M. BRENČIČ, 1992) können die Wässer in folgende Gruppen eingeteilt werden: auf der slowenischen Seite kann zwischen Wässern aus Dolomit- und aus Kalkschichten unterschieden werden. Das kationische Diagramm zeigt, daß sich der Chemismus der Jurežquelle von den anderen Wässern aus Dolomiten etwas unterscheidet. Aus dem kationischen Diagramm für die österreichische Seite ist ersichtlich, daß zwischen den Wässern aus Dolomiten und Kalken Wässer aus Dolomit- und Anhydritschichten liegen (Kar 78, Kar 84). Die Wasserproben aus dem Tunnel haben ihren eigenen Charakter. Im anionischen Diagramm weicht die Probe Kar 88 von den anderen ab. Wässer aus Karbonatschichten teilen sich in zwei Gruppen auf: Wässer aus Dolomit- und Anhydritschichten gehören in die erste Gruppe, Wässer aus Dolomit- und Kalkschichten stellen eine einheitliche Gruppe dar, in der aber Übergänge aus beiden Gesteinstypen zu beobachten sind.

Als Hauptkriterium zur Wassertypenbestimmung wurden die Diagramme von F. D'AMORE et al. (1983) und die Parameter von H. SCHÖLLER (1962) benutzt. Zu Wässern aus Dolomiten können die Proben 100, 200, 300, 400, 500, 700, 800, KT 2830, KT 2930, Kar 84, Kar 78, Kar 73, Kar 108, Kar 130, Kar 178, Kar 133, aus Kalken die Proben 600, Kar 95, Kar 102, Kar 126, Kar 266 und aus Anhydritschichten die Probe Kar 88 eingeordnet werden.

Die Einordnung der beprobten Wässer wurde mit verschiedenen Techniken der Cluster-Analyse durchgeführt. Mit dieser Methode und aufgrund der empirischen Verhältnisse wurde eine hydrogeochemische Interpretation des Untersuchungsgebietes erarbeitet. Die Schlußfolgerungen werden unten angegeben.

Aus der Langzeituntersuchung der Quellen ist ersichtlich, daß die chemische Zusammensetzung von Quellwässern nur geringe Änderungen aufweist. Die Analyse der Zeitreihen zeigt, daß innerhalb des einzelnen Wassertypus verschiedene zeitbedingte Wechselbeziehungen der Komponenten bestehen.

Die hydrogeochemische Zusammensetzung der beprobten Wässer hängt vor allem von der Lithologie der Quellhorizonte ab. Die stratigraphische Lage der wasserführenden Schichten ist von sekundärer Bedeutung. Für die hydrogeochemische Zusammensetzung ist in erster Linie der unmittelbare Quellhorizont maßgebend, da das chemische Gleichgewicht der Quellen wegen der Hydrodynamik sehr schnell eingestellt wird.

Es wird vermutet, daß die Anwesenheit von Dolomit im Quellaustrittsbereich häufig die auf dem Weg gewonnenen Wassereigenschaften verwischen läßt. (Beispiel: Aufgrund des Einzugsgebietes der Quelle Kar 130 wäre ein auf Kalksteine hinweisender Chemismus zu erwarten, es wird aber ein ausgeprägter Dolomiteinfluß des Austrittsbereiches festgestellt.)

Ähnliche Wässer haben oft eine Herkunft aus Gesteinen verschiedenen Alters und nicht aus demselben einheitlichen Aquifer. Meistens handelt es sich um Wässer aus lokalen Aquiferen.

Die Wässer im Untersuchungsgebiet können in folgende Gruppen gegliedert werden:

1. Wässer aus **Dolomitschichten**,
2. Wässer aus **Kalkschichten**,
3. Wässer aus **Anhydritschichten**,
4. Wässer aus **Schieferschichten**, das sind wahrscheinlich Formationswässer, die nur im Tunnelbereich vorkommen.

Wässer aus **Dolomitschichten** können in folgende Untergruppen eingeteilt werden:

- 1.1. Reine Wässer aus Dolomiten, und von diesen:
 - 1.1.1. Wässer mit erhöhtem Temperaturwert aus dem nördlichen Tunnelabschnitt, diese Wässer liegen wahrscheinlich an der selben Mischungskurve wie die Wässer aus Dolomiten (Gruppe 1.1.2.).
 - 1.1.2. Wässer aus dem Schlern- und Karn-Dolomit, dazu gehören die Proben 300, 400, 500, 700, die Proben aus Station 3033 m und ihrer Umgebung (slowenische Seite), Kar 73, Kar 133, Kar 178 und die Proben von den Stationierungen 2830 m und 2930 m (österreichische Seite).
- 1.2. Stratigraphisch heterogene Wässer, die aus dem Anis-Dolomit, aus stark dolomitisierten Kalksteinen und aus dem Dolomit des Ladins stammen. Bei diesen Wässern kann der Einfluß der heterogenen lithologischen Struktur des Herkunftsgebietes bemerkt werden (die Proben 100, 200, 800 und Kar 108).
- 1.3. Wässer aus Dolomiten, mit einem merkbaren Einfluß von Wässern aus Anhydritschichten, dazu werden vor allem die Proben Kar 78 und Kar 84 gezählt. Diese Wässer durchfließen Lockergesteinsverfüllungen des Bärengrabens, haben aber ihr Einzugsgebiet in den Werfener Schichten und Anis-Dolomiten, wo häufig Gips und Anhydrit anzutreffen sind.

Wässer aus **Kalkschichten** können in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- 2.1. Reine Wässer aus Kalken: Wässer mit Herkunft aus Raibler Schichten und Hornsteinplattenkalken (die Proben 600, Kar 95 und Kar 102).
- 2.2. Gemischte Wässer aus Kalken – das sind die Proben: Kar 130, die Austrittsstelle liegt im Schlerndolomit, das Einzugsgebiet liegt aber in Bereichen des Dachsteinkalkes;

Kar 126, entspringt aus der Moräne, hat aber das Einzugsgebiet in karnischen Plattenkalken;

Kar 266 vertritt eine eigene Gruppe, da ihr Wasser aus dem Dachsteinkalkgebiet unter dem Mittagskogel stammt.

Keine der entnommenen Wasserproben wies ein reines anhydritisches Einzugsgebiet auf. Nur einige, während des Straßentunnelbaus aufgeschlossene Wässer, könnten zu solchen Wässern eingeordnet werden. Die Probe Kar 88 kommt ihnen am nächsten, jedoch kann ein geringer Einfluß von Dolomiten beobachtet werden.

3.4. Isotopenuntersuchungen

Das Ziel der isotopenhydrologischen Untersuchungen war die Erlangung von Kenntnissen über die Durchmischung und Speicherung von Quellwässern, Verweilzeiten im Untergrund sowie mittlere Höhen der Einzugsgebiete. Die Analysen stammen von der Bundesforschungs- und -prüfanstalt Arsenal.

3.4.1. Untersuchungen des Sauerstoff-18- und Deuterium-Gehaltes

Natürliches Wasser enthält neben dem Wasserstoff der Masse 1 (^1H) und dem Sauerstoff der Masse 16 (^{16}O) auch in kleinen Mengen die stabilen Isotope des Wasserstoffs ^2H (Deuterium) und des Sauerstoffs ^{17}O , ^{18}O sowie das radioaktive Isotop des Wasserstoffs ^3H (Tritium). Die physikalischen Eigenschaften der isotopisch abweichenden Wässer unterscheiden sich von denjenigen des normalen Wassers. Als Folge der unterschiedlichen Massen der im Wassermolekül beteiligten H- und O-Isotope kommt es während des irdischen Wasserkreislaufes zu einer Isotopenfraktionierung. Die dabei auftretenden Schwankungen im Gehalt der schweren Isotope ^2H und ^{18}O sind fast ausschließlich auf Isotopentrennprozesse zurückzuführen, die bei der Verdampfung bzw. Kondensation auftreten.

Als Maß der unterschiedlichen Isotopenfraktionierung der Isotope ^2H und ^{18}O kann der Deuteriumexzess angesehen werden. In alpinen Bereichen beträgt der Deuteriumexzess meist um 10 ($^2\text{H} = 8,2$ $^{18}\text{O} + 10,8$).

Der Deuteriumexzess der Quellwässer der Westlichen Karawanken zeigt erwartungsgemäß einen deutlichen mediterranen Einfluß und liegt im Gegensatz zu anderen alpinen Wässern bei 13,5 (Fig. 4).

Durchmischung und Speicherung von Quellwässern

Eine gute oder schlechte Durchmischung, welche auch eine entsprechend gute oder schlechte Speicherung der Wässer im Untergrund voraussetzt, kann aus der jahreszeitlichen Schwankung der chemischen Parameter, besser aber noch aus dem jahreszeitlichen Gang der Isotopengehalte – vor allem des ^{18}O – abgeleitet werden. Da das Isotop ^{18}O Teil des Wassermoleküls ist und mit dem Niederschlag in das Grundwasser gelangt, spiegelt sich bei schlecht gespeicherten Quellwässern der aufgrund unterschiedlicher Kondensationstemperaturen jahreszeitlich stark schwankende ^{18}O -Gehalt der Niederschläge in gedämpfter Form in den Quellwässern wider. Mit zunehmender Durchmischung im Aquifer verkleinert sich die jahreszeitliche Schwankungsbreite der ^{18}O -Gehalte an den beprobten Quellaustritten.

Die jahreszeitliche Schwankungsbreite der ^{18}O -Gehalte der dauerbeobachteten Quell- und Oberflächenwässer ist aus Tab. 4 ersichtlich.

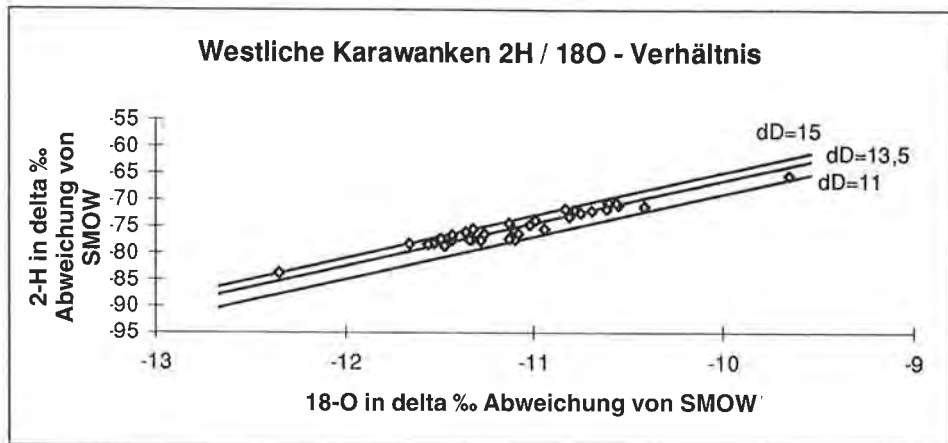


Fig. 4: $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ -Verhältnis von Quellwässern in den Westlichen Karawanken (Nordseite).
 $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ -relationship of the springs in the Western Karawanks (northern part).

Tab. 4: ^{18}O in $\delta\text{‰}$ Abweichung von SMOW, Schwankungsbreite und Mittelwerte.
 Deviation of ^{18}O in $\delta\text{‰}$ from SMOW, amplitude and mean values.

Meßstellen	Probenahme Seehöhe (m ü.A.)	Schwankungs- breite	Mw. $^{18}\text{-O}$ ($\delta\text{‰}$)	Anzahl Meßwerte
KT 2830	700	0,4	-11,42	24
KT 2930	700	0,3	-11,30	24
Kar 2	720	1,2	-9,83	12
Kar 73	720	0,4	-10,48	13
Kar 88	840	0,7	-10,64	13
Kar 95	1300	0,9	-10,81	11
Kar 78	760	0,3	-10,74	13
Kar 84	760	0,5	-10,46	12
Kar 102	1480	2,9	-10,78	12
Kar 108	840	0,3	-10,38	14
Kar 126	1400	2,8	-11,03	11
Kar 130 (Weiße Quelle)	1160	0,9	-11,24	16
Kar 133	860	0,5	-10,99	11
Kar 178	920	0,2	-11,11	14
Kar 266 (Seufzerquelle)	1300	0,3	-10,85	13
Kar-Ardeschitzabach		1,7	-10,92	13
Kar-Bärengabenbach		1,2	-10,56	12
Kar-Gratschenitzenbach		1,9	-10,81	12
Jurež (100)	1080	0,2	-11,10	5
Hlebanjeva žaga (200)	940	0,3	-10,77	5
Sedučnik (300)	1120	0,2	-10,28	4
Jermanov (800)	1340	0,5	-10,68	3
Predor 3030 m (900)		0,3	-10,90	4
Dovška Baba (500)	1380	0,1	-10,72	3
Hrušenska Planina (600)	1520	0,3	-10,68	3
Planina pod Golico (700)	1240	0,3	-10,38	3

Die Quellen des Untersuchungsgebietes lassen sich hinsichtlich ihres jahreszeitlichen Schwankungsverhaltens der ^{18}O -Werte deutlich unterscheiden, wobei Schwankungen im Jahresgang zwischen knapp $3 \delta \text{‰}$ und $0,2 \delta \text{‰}$ zu beobachten sind (Fig. 5). Die stärksten jahreszeitlichen Schwankungen weisen die hochgelegenen Quellen im Gebiet der Roschitzalm und des Mlincasattels (Kar 95, Kar 102 und Kar 126) auf, welche ihre Einzugsgebiete in den Plattenkalken haben (Fig. 5 und 6).

Im Vergleich zu den hochgelegenen Quellen Kar 95 und Kar 102 weisen die anderen Quellen im Bärengraben (Fig. 6) deutlich geringere Schwankungen auf, was auf die andersgeartete lithologische Zusammensetzung in deren Einzugsgebieten zurückzuführen ist (ausgedehnte Schuttsedimente im zentralen Teil des Bärengrabens).

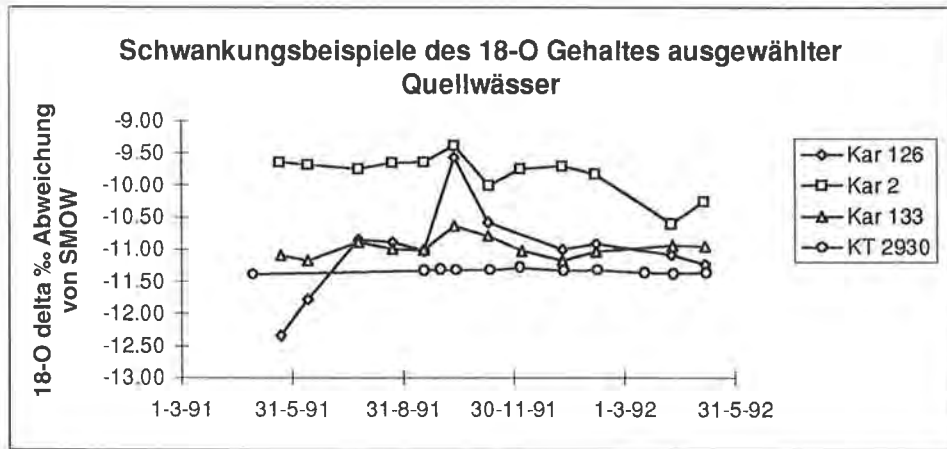


Fig. 5: Schwankungsbreite der ^{18}O -Gehalte von verschiedenen Quellwässern.
Seasonal variation of ^{18}O content from different springs.

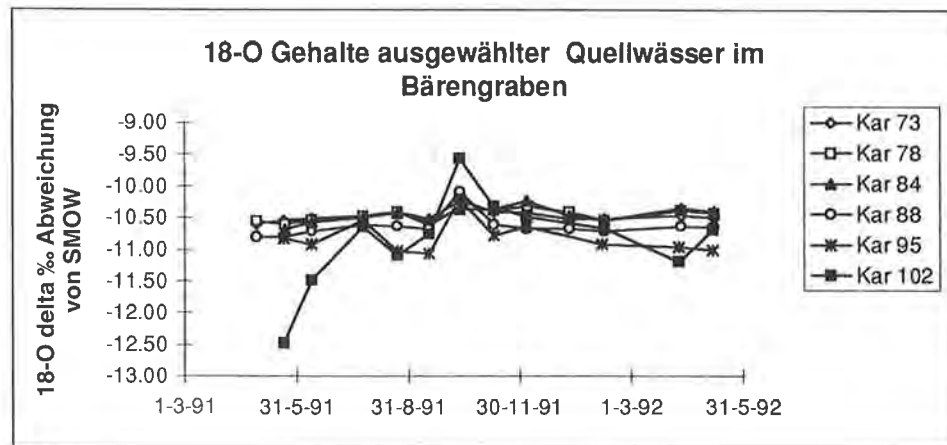


Fig. 6: ^{18}O -Gehalte der Quellen im Bärengraben.
Annual distribution of ^{18}O content of the springs in Bärengraben.

Einen Einblick in die Hauptereignisse im Beobachtungszeitraum bezüglich des ^{18}O zeigen die Jahresgänge der beprobten Oberflächenwässer im Bärengaben, Ardeschitzgraben und Gratschenitzengaben. Alle drei Bäche zeigen einen sehr ähnlichen Jahresgang, welcher mit isotopisch leichten Wässern zur Zeit der Schneeschmelze im Mai 1991 beginnt und zwei markante Maxima im Juli und Oktober 1991 aufweist (siehe Fig. 7).

Die beiden Maxima des ^{18}O -Gehaltes im Juli und Oktober 1991 sind in gedämpfter Form auch in den meisten anderen Quellen vorhanden und deuten auf den kurzfristig wirksamen Einfluß isotopisch schwerer Sommerniederschläge hin.

Gut gespeicherte Quellwässer mit geringen jahreszeitlichen Schwankungen der ^{18}O -Gehalte sind die Quellen Kar 108, Kar 133 und Kar 266 (Fig. 8). Diese Quellen treten in Bereichen dolomitischer Gesteine aus, die offensichtlich die besten

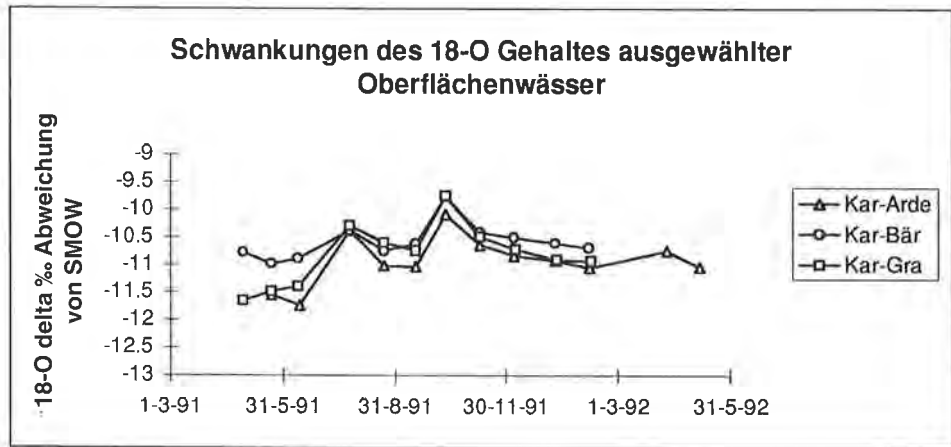


Fig. 7: Jahresgang der ^{18}O -Gehalte in Oberflächenwässern.
Seasonal variations of ^{18}O content in surface runoffs.

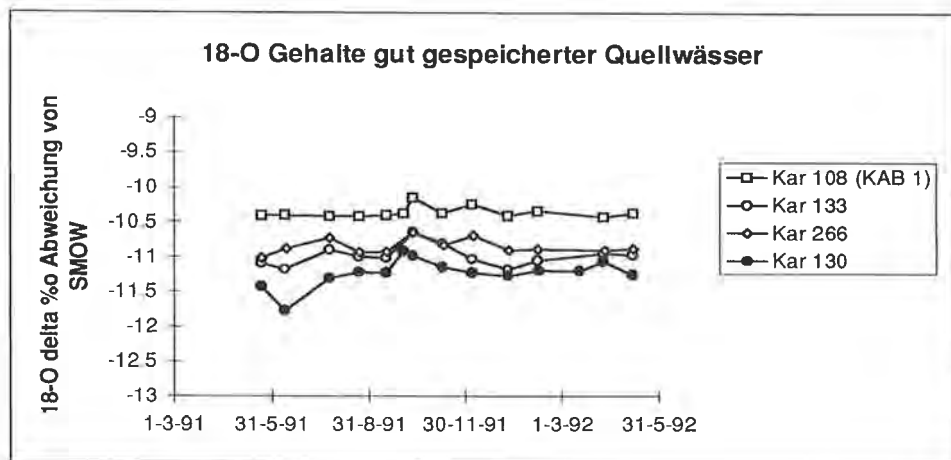


Fig. 8: ^{18}O -Jahresgänge gut gespeicherter Quellwässer.
Seasonal variations of ^{18}O content of springs with good storage capacity.

Speichereigenschaften im Untersuchungsgebiet aufweisen. Dies gilt sowohl für die anisichen Dolomite als auch vor allem für den Schlerndolomit, der mit der Quelle Kar 178 (Schönbrunnen, siehe Fig. 9) im Gratschenitzengraben ein isotopisch nicht schwankendes Wasser aufweist. Die Weiße Quelle (Kar 130), welche eine typische Karstquelle mit großen Schüttungsschwankungen (8–100 l/s) ist, zeigt einen für Karstquellen typischen Jahresgang mit den tiefsten ^{18}O -Gehalten zur Zeit der Schneeschmelze und wenig Einfluß durch Sommerniederschläge.

Die am besten gespeicherten Wässer sind neben der Quelle Kar 178 (Schönbrunnen) die ebenfalls im Bereich des Schlerndolomites erschlossenen Wasserzutritte im Karawankentunnel KT 2830 und KT 2930 (Fig. 9).

Von den beiden Tunnelquellen existieren Meßwerte über einen Zeitraum von viereinhalb Jahren (Dezember 1988 bis Juli 1993; siehe Fig. 10). Es treten dabei einige Besonderheiten im zeitlichen Verlauf der Isotopengehalte auf, die im folgenden kurz erläutert werden:

Zum Zeitpunkt der Erschließung der Quellen während der Tunnelbauarbeiten wiesen beide Austritte eine idente Zusammensetzung hinsichtlich ihrer Isotopengehalte auf (sowohl ^{18}O als auch ^3H). Ab Februar 1990 weicht die ^{18}O -Ganglinie des Austrittes KT 2830 von dem bei Station 2930 m jedoch geringfügig ab. Der ^{18}O -Gehalt der ersteren vermindert sich gegenüber dem Austritt KT 2930 um etwa $0,2 \delta \text{‰}$ und verläuft dann weitgehend parallel. Die Erklärung liegt im Entleeren des Karstsystems in den Tunnel, da durch die Tieferlegung des Karstwasserspiegels die Bergwasserneubildung aus zwei unterschiedlich gelegenen Einzugsgebieten sichtbar wird.

Lediglich im Dezember 1991 und Jänner 1992 nähert sich die Ganglinie kurzfristig wieder an die der Quelle KT 2930 an, um dann in weiterer Folge wiederum um $0,2 \delta \text{‰}$ leichter parallel zu KT 2930 fortzuführen. Daß es sich bei diesem kleinen Peak um keinen Oberflächenwassereinfluß handelt, kann auch aus dem Tritiumganglinienverlauf erkannt werden, der ebenfalls in diesem Zeitraum eine Annäherung der beiden Ganglinien aufweist (siehe unten). Es scheint hier kurzfristig wiederum ein hydraulischer Kurzschluß der beiden Austritte eingetreten zu sein, der in beiden

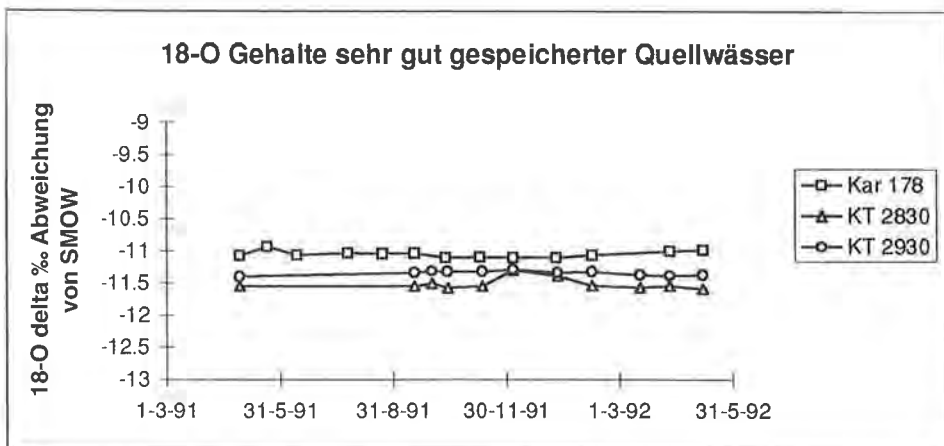


Fig. 9: ^{18}O -Ganglinien sehr gut gespeicherter Quellen im Schlerndolomit.
Seasonal variations of ^{18}O content of springs with very good storage capacity.

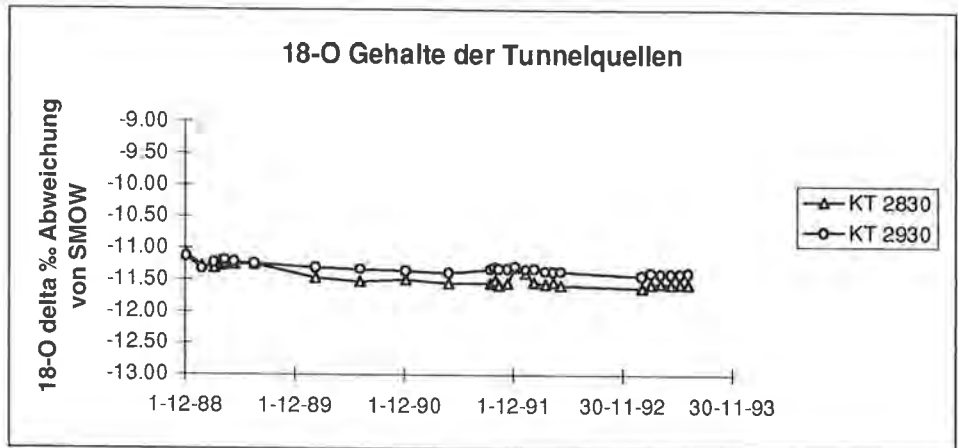


Fig. 10. ^{18}O -Ganglinien der Tunnelquellen aus dem Schlerndolomit im österreichischen Abschnitt. Annual variation of ^{18}O content in the springs from schlern dolomite in the austrian part of the highway tunnel.

Austritten wieder das idente Wasser (wie vor der Auftrennung im Februar 1990) zum Ausfluß brachte.

Von den Quellen auf der Südseite der Karawanken liegen für das Erkennen des jahreszeitlichen Schwankungsverhaltens sowie für eine vergleichbare Mittelwertbildung des ^{18}O -Gehaltes zu wenig Meßwerte vor, doch gibt es auch hier Hinweise auf Quelleinzugsgebiete in verschiedenen Höhenlagen.

Es ist auffallend, daß die beiden Tunnelquellen mit ihren im Verhältnis zu allen anderen Quellen leichten ^{18}O -Gehalten die kältesten Infiltrationstemperaturen anzeigen.

Dies bedeutet, daß die mittlere Höhe ihrer Einzugsgebiete höher als die aller anderen Quellen liegt oder, daß die Wässer zu Zeiten niedrigerer Jahresmittelwerte der Temperaturen infiltrierten, als es heute der Fall ist. Zieht man den Vergleich zur Weißen Quelle (Kar 130) heran, die von den Oberflächenquellen die niedersten ^{18}O -Werte aufweist und aus geologischen und hydrochemischen Überlegungen den Bereich des Mittagkogels entwässert, so können die Tunnelquellen kein höhergelegenes Einzugsgebiet entwässern, da das Einzugsgebiet der Weißen Quelle bereits das höchstgelegene ist. Eine Erklärung für die geringen ^{18}O -Gehalte der Tunnelquellen ist daher in der geringeren Infiltrationstemperatur zu sehen, die jedoch nicht auf eine größere Höhenlage der Infiltrationsbereiche schließen läßt, sondern auf kältere klimatische Verhältnisse, als derzeit bestehen, hinweist („Paläoklima“).

3.4.2. Untersuchungen des Tritiumgehaltes

Das radioaktive Isotop ^3H (Tritium), dessen Halbwertszeit 12,43 Jahre beträgt, gelangt mit den Niederschlägen in das Grundwasser und eignet sich daher gut für die Altersbestimmung junger Quellwässer (bis etwa 80–100 Jahre). Vor den atmosphärischen Atombombenversuchen betrug der Tritiumgehalt des Niederschlages Anfang der fünfziger Jahre 5–8 TU (1 TU entspricht einem Verhältnis $^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$). Bis zum Jahr 1963 stieg der Tritiumgehalt infolge der Atomtests stark

an (> 2000 TU), um dann allmählich wieder abzufallen. Daraus resultiert die Möglichkeit, Grundwasser aufgrund des Anstieges oder Abfalles seines Tritiumgehaltes altersmäßig einzustufen.

Im Untersuchungsgebiet wurden nur die beiden Tunnelzutritte KT 2830 und KT 2930 regelmäßig hinsichtlich ihres Tritiumgehaltes untersucht. Von den anderen Quellen und Oberflächenwässern wurden zwar Tritiumproben entnommen (Fig. 11), doch wurden nur wenige stichprobenartige Analysen durchgeführt.

Von den Karawankentunnelquellen KT 2830 und KT 2930 liegen Tritiummesswerte über einen Zeitraum von viereinhalb Jahren vor. Zu Beginn der Tritiummessungen nach der Erschließung der Quellen waren beide Quellen tritiumfrei, was bedeutet, daß die Wässer zum damaligen Zeitpunkt keine Anteile des Niederschlages der letzten 50 Jahre beinhalten. Von größtem Interesse ist aber das nachfolgende Auftreten von Tritium in beiden Quellen. Erste Tritiumspuren treten bei KT 2830 im Februar 1990 auf. In weiterer Folge steigt der Tritiumgehalt bis zum Beobachtungsstand Sommer 1993 mit leichten Schwankungen kontinuierlich an und erreichte im Sommer 1993 Gehalte von etwa 6 TU. Mit einer Verzögerung von eineinhalb Jahren treten erste Tritiumspuren bei KT 2930 Anfang Oktober 1991 auf. Auch hier erfolgt ein nachfolgender leichter Anstieg mit Tritiumgehalten von etwa 2 TU im Sommer 1993 (Fig. 12).

Wie schon bei den ^{18}O -Messungen aufgefallen, nähern sich die beiden weitgehend parallel verlaufenden Ganglinien im Dezember 1991 an, wofür der kurzfristige Tritiumabfall bei KT 2830 verantwortlich ist. Daß es sich hierbei um keinen kurzfristig wirksamen Oberflächenwassereinfluß handelt, kann aus dem Abfall der Tritiumkonzentration bei KT 2830 ersehen werden. Eine allenfalls beigemischte junge Wasserkomponente müßte zu einer Erhöhung der Tritiumkonzentration führen, was aber nicht der Fall ist.

Es ist daher anzunehmen, daß es aus nicht geklärter Ursache wieder zu einem kurzfristig wirksamen hydraulischen Kurzschluß der beiden Quellaustritte KT 2830 und KT 2930 gekommen ist und beide Austritte wieder das idente Wasser, wie vor der Auftrennung Anfang 1990, schütteten.

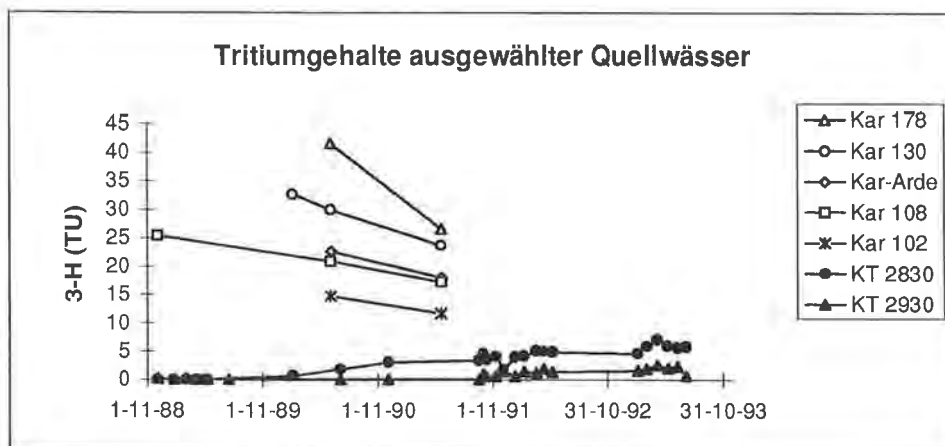


Fig. 11: Tritiumgehalte ausgewählter Meßstellen.
Tritium content of selected sampling points.

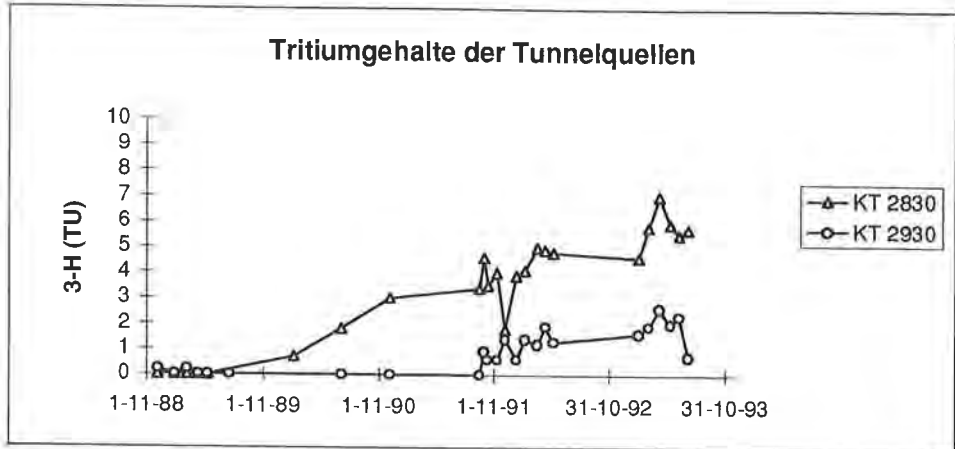


Fig. 12: Tritiumganglinien der Tunnelquellen.
Annual variation of Tritium in the springs from the austrian part of the highway tunnel.

Die Betrachtung des Wasseralters der beiden Tunnelzutritte zeigt mit dem Ausfließen eine kontinuierliche Verringerung der mittleren Verweildauer. Offensichtlich zeigt aber das zeitlich verschiedene und leicht ansteigende Auftreten von Tritium in beiden Quellen, daß hier ein vormals stagnierender Karstaquifer angezapft wurde. Es wird daher von höchstem Interesse sein, den weiteren Verlauf des Tritiumanstieges in den beiden Quellen zu beobachten.

3.4.3. Untersuchungen der Kohlenstoffisotope ^{13}C und ^{14}C

Die isotopische Zusammensetzung der im Wasser gelösten Karbonate wird von deren Herkunft und durch Wasser-Gesteins-Reaktionen gesteuert. Die aus der Aufnahme von CO_2 gelösten Karbonate im Grundwasser entstammen der Atmosphäre zum größten Teil aber dem Bodengas aus der Passage durch die Bodenzone, dessen CO_2 -Gehalt durch Pflanzenaktivität und -zerfall bedingt und wesentlich höher als in der Atmosphäre ist. Das CO_2 der Bodenzone unterscheidet sich hinsichtlich seiner isotopischen Zusammensetzung deutlich vom CO_2 der Atmosphäre. Dieser Unterschied zeigt sich vor allem im ^{13}C -Gehalt, der im Boden- CO_2 stark angereichert ist und aufgrund seiner Herkunft von Pflanzenatmung und -zerfall dem des pflanzlichen CO_2 entspricht. Die ^{13}C -Gehalte des CO_2 der Bodenzone liegen bei -25‰ Abweichung vom PDB Standard, während die der Atmosphäre bei -7‰ Abweichung vom PDB Standard zu liegen kommen (P. DEINES, 1980, F. J. PEARSON, 1991). Beim Durchsickern der Bodenzone steigt der CO_2 -Gehalt im Sickerwasser bei gleichzeitiger Abnahme des ^{13}C -Gehaltes an. Nach erfolgter Wasser-Gesteins-Reaktion steigt der ^{13}C -Gehalt wegen des hohen ^{13}C -Gehaltes des Gesteins wiederum an. Wässer, welche in Gebieten geringmächtiger Bodenbedeckung infiltrieren, werden sich daher gegenüber Wässern, die durch Zonen höherer Wurzelaktivität sickern, durch höhere ^{13}C -Gehalte ausweisen. Es ist in diesem Fall der ^{13}C -Gehalt von der Vegetation und damit indirekt von der Höhenlage der Infiltrationsgebiete abhängig. Diese Beziehung wird durch den Vergleich der ^{18}O - mit den ^{13}C -Werten in Fig. 13 dokumentiert. Wässer mit geringen ^{18}O -Werten (hochgelegene Einzugsgebiete, wenig Vegetation) weisen die höchsten ^{13}C -Gehalte auf. Die Fig. 14 zeigt mehrere Beispiele

von ^{13}C -Ganglinien. Die Quelle Kar 2 ist der tiefstgelegene dauerbeobachtete Austritt im Untersuchungsgebiet und liegt im Bereich des Tertiärs. Die bei dieser Quelle auftretenden geringen ^{13}C -Gehalte entsprechen der Vorstellung einer erfolgten Wasser-Gesteins-Reaktion nach Durchsickern einer Bodenzone mit starker Wurzelaktivität und starker Abreicherung von ^{13}C . Dasselbe gilt auch für die Quelle Kar 108, während die starken jahreszeitlichen Schwankungen bei Quelle Kar 126 auf die Höhenlage dieser Quelle und schlechte Speicherung im Untergrund zurückzuführen sind. Die schwersten ^{13}C -Gehalte bei dieser Quelle treten in den Wintermonaten auf, wenn keine Wurzelaktivität gegeben ist bzw. der Boden versiegelt und das Quellwasser kaum mit CO_2 der Bodenzone gesättigt ist. In den Sommermonaten wirkt sich die pflanzliche Aktivität im Einzugsgebiet bei diesen kurz gespeicherten Wässern wiederum in einer Abreicherung des ^{13}C aus.

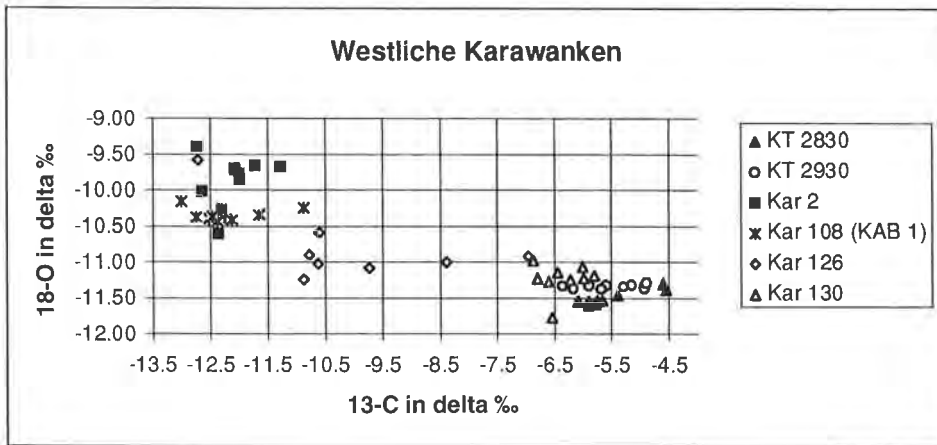


Fig. 13: Zunahme der ^{13}C -Gehalte bei abnehmendem ^{18}O .
Increase of ^{13}C content with decreasing ^{18}O content.

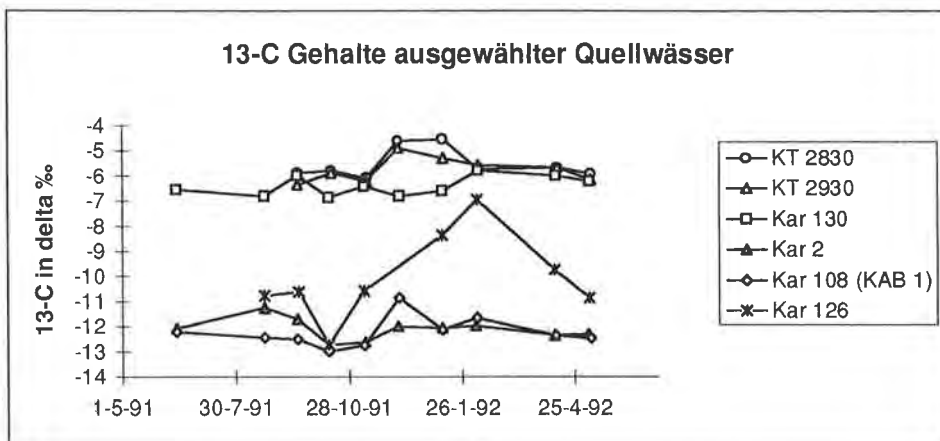


Fig. 14: Jahresgang des ^{13}C -Gehaltes an ausgewählten Quellwässern.
Seasonal variations of ^{13}C content of selected springs.

Im Gegensatz zu den besprochenen Quellen gibt es eine Quellgruppe (KT 2830, KT 2930 und Kar 130), die durchwegs durch schwere ^{13}C -Gehalte auffallen. Schwere ^{13}C -Gehalte können einerseits durch fehlenden oder sehr geringen Input von Bodengas- CO_2 , andererseits auch durch Lösung von Karbonatgesteinen, welche ^{13}C -Werte um 0 aufweisen, bedingt sein.

Bei der Quelle Kar 130 zeigt die Berechnung des CO_2 -Partialdruckes, daß dieser weitgehend im Gleichgewicht mit der Atmosphäre steht, wie es sonst für Oberflächenwasser typisch ist (Fig. 15; Vergleich mit Kar-Arde = Ardeschitzabach). Man kann daher im Karstsystem des Mittagskogels, welcher durch die Quelle Kar 130 entwässert wird, das Vorliegen großlumiger Karstwasserwege, welche teilweise mit atmosphärischer Luft gefüllt sind, annehmen. Ein derart offenes System (pipe-flow) führt zu einem Gleichgewichtszustand des im Wasser gelösten Karbonats mit dem atmosphärischen CO_2 , sodaß sich der ^{13}C -Gehalt im Wasser weitgehend dem im CO_2 der Atmosphäre angleicht.

Wässer mit höheren CO_2 -Partialdrücken repräsentieren die beiden Tunnelquellen sowie die Quelle Kar 108 (Fig. 15).

Das Wasser Kar 108 zeigt aufgrund seines ^{13}C -Gehaltes einen erreichten Gleichgewichtszustand zwischen aufgenommenem CO_2 der Bodenzone (höherer CO_2 -Partialdruck) und Reaktion mit dem durchflossenen Gestein an. Die beim Aufnehmen des CO_2 der Bodenzone erfolgende Abreicherung des ^{13}C -Gehaltes wird bei der Gesteinslösung wieder in Richtung schwere Werte verschoben. Der Input von ca. $-24 \delta \text{‰ } ^{13}\text{C}$ (Bodengas) ergibt nach Reaktion mit dem Gestein, welches Werte um $0 \delta \text{‰ } ^{13}\text{C}$ aufweist, Outputwerte von etwa $-12 \delta \text{‰ } ^{13}\text{C}$. Solche theoretisch zu erwartenden Werte wurden an dieser Quelle auch tatsächlich im gesamten Beobachtungszeitraum gemessen.

Die beiden Tunnelquellen KT 2830 und KT 2930 weisen hingegen die höchsten ^{13}C -Gehalte aller untersuchten Wässer im Untersuchungsgebiet auf. Daß dies nicht auf dem Kontakt mit atmosphärischem CO_2 beruht (wie etwa bei Kar 130), zeigen die hohen CO_2 -Partialdrücke dieser beiden Austritte.

Die schweren ^{13}C -Werte sind hier auf die Anreicherung aus dem Gestein zurückzuführen, wobei neben der Karbonatlösung auch eine Wiederausfällung

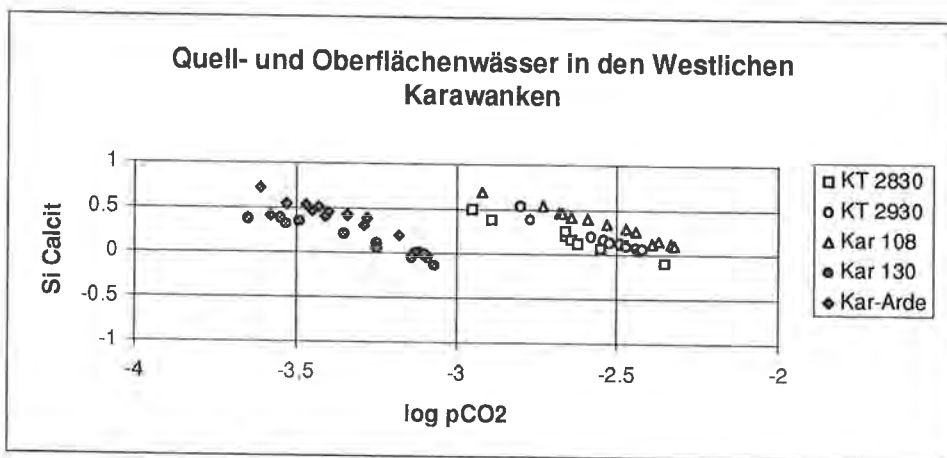


Fig. 15: CO_2 -Partialdruck ausgewählter Wässer im Vergleich zur Kalzitsättigung.
Calcite saturation index versus CO_2 partial pressure from selected springs and surface runoff.

und neuerliche Karbonatlösung für diese schweren Werte verantwortlich sein dürfte.

An den beiden Tunnelquellen wurden aufgrund des fehlenden Tritiumgehaltes auch Untersuchungen des ^{14}C -Gehaltes durchgeführt. Fünf durchgeführte Untersuchungen ergaben Gehalte zwischen 9 und 16 % modern, was eine starke Abreicherung gegenüber den rezenten ^{14}C -Gehalten von Wässern bedeutet. Würde man diese geringen Gehalte allein auf den radioaktiven Zerfall des ^{14}C zurückführen, kämen sehr hohe Wasseralter (10 000–20 000 Jahre) heraus. Wie jedoch bei der ^{13}C -Untersuchung gezeigt, entstammt ein großer Teil des im Wasser gelösten Karbonates dem gelösten Gesteinskarbonat, welches aufgrund seines hohen Alters frei von ^{14}C ist. Es kommt daher naturgemäß zu einer Abreicherung von ^{14}C , was letztendlich das hohe Wasseralter vortäuscht. Da das Ausmaß des Austausches der Karbonatisotope ^{14}C , ^{13}C und ^{12}C zwischen Wasser und Gestein nicht bekannt ist, kann man aus den gemessenen ^{14}C -Gehalten des Wassers keine zuverlässigen Altersbestimmungen durchführen.

4. Hydrogeologische Interpretation

Als Grundlage für die hydrogeologische Interpretation der Entwässerungsverhältnisse wurde eine geologische Karte des Gebietes zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel kompiliert (Geologische Karte der Westkarawanken zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel von F. K. BAUER, T. BUDKOVIČ, L. FERJANČIČ & W. POLTNIG, 1993 und Geologische Profile zur Geologischen Karte der Westlichen Karawanken zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel von T. BUDKOVIČ, 1993 – siehe Beilagen am Buchende), die einen Einblick in den geologischen Bau des Gebietes gibt. Als für die Entwässerung des Gebirges bedeutende geologische Elemente können drei tektonische Einheiten angesehen werden. Es sind dies das „Jüngere Paläozoikum der Südkarawanken“ sowie das „Ältere Paläozoikum der Westkarawanken“, welche die „Koschuta-Einheit“ im S und N begrenzen und wasserstauende Wirkung aufweisen. Die zwischen diesen beiden paläozoischen Einheiten gelegene Koschuta-Einheit wird zum Großteil aus karbonatischen Gesteinen der Trias aufgebaut und bildet daher gute Voraussetzungen für die Versickerung und Speicherung von Wasser. Die Grundstruktur der Koschuta-Einheit ist die Kahlkogel-Synklinale, deren Achse gegen E einfällt. Die liegenden Einheiten der Kahlkogel-Synklinale bilden wasserstauende Schichten der Untertrias, welche im W der Synklinale nördlich von Kranjska Gora über Gelände austreichen. Den Großteil der Gesteine der Kahlkogel-Synklinale nehmen die vor allem südlich bis westlich des Mittagkogels verbreiteten Schlerndolomite ein, welche im Bereich des Mittagkogels von Raibler Schichten, Hornsteinplattenkalken und Dachsteinkalk überlagert werden. Knapp nördlich des Mittagkogels wird diese Synkinalstruktur von rechtssinnigen Blattverschiebungen, welche von der Periadriatischen Naht abzweigend gegen ESE verlaufen, abgeschnitten.

Entsprechend dem tektonischen Bau des Gebietes und seiner lithologischen Zusammensetzung sind mehrere lithologisch und tektonisch kontrollierte hydrogeologische Einheiten differenzierbar (siehe „Hydrogeologische Karte der Westkarawanken zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel“ von M. BRENCIČ, L. FERJANČIČ & W. POLTNIG, 1994; Beilage am Buchende).

Gesteinsabhängige hydrogeologische Einheiten

1. **Wasserstauende Schichten mit vorwiegend Oberflächenabfluß:** Es sind dies Gesteine der Hochwipfelschichten, Auernigschichten, Grödener Formation, Bellerophonolomit, Werfener Schichten und Uggowitzer Brekzie mit kleineren lokalen Aquiferen.
2. **Wasserstauende Schichten mit vorwiegend Oberflächenabfluß und stellenweise lokalen Kluftaquiferen in Kalksteinen:** Raibler Schichten und Hornsteinplattenkalke.
3. **Kluftaquifer:** Kleinklüftiger Sarl- und verkarsteter Schlerndolomit.
4. **Verkarsteter Kluftaquifer:** Wechselfolge von Dachsteinkalk und -dolomit.

Tektonisch getrennte hydrogeologische Einheiten

Die oben genannten hydrogeologischen Einheiten werden durch steilstehende Störungssysteme hydraulisch getrennt, sodaß im wesentlichen drei unabhängig zu betrachtende Gebiete vorliegen:

1. **Gebiet nördlich der Koschuta-Störung:** In diesem Gebiet ist der Aquifer des kleinklüftigen Sarldolomits und verkarsteten Schlerndolomits (Türkenkopf, Gratschenitzen, Dürrkogel, Quadiaalm) von den südlichen Gesteinseinheiten tektonisch getrennt und weist seine unterirdische Entwässerung zu lokalen Vorflutern und zum nördlichen Karawankenvorland auf.
2. **Schlerndolomitareal südlich des Mittagkogels und Dachsteinkalk des Mittagkogels:** Dieser Bereich liegt im Zentrum der Kahlkogel-Synklinale und weist zwei durch Raibler Schichten getrennte Aquifere auf. Das liegende Stockwerk beherbergt die im Karawankenstraßentunnel in den Schlerndolomiten angetroffenen Wasseraustritte, das hangende Stockwerk den Karstaquifer des Mittagkogels, welcher in der größten über Tage austretenden Quelle auf österreichischem Gebiet (Weiße Quelle = Kar 130) seine natürliche Vorflut aufweist. Die unterirdische Entwässerung dieses Gebietes weist entsprechend der abtauchenden Synklinalachse gegen E.
3. **Kahlkogel-Synklinale Westteil:** Eine westlich des Mittagkogels gegen WSW streichende Störung trennt den Nordflügel der Synklinale vom Südflügel. Diese Störung dürfte die beiden Schlerndolomitvorkommen des Nord- und Südflügels hydraulisch voneinander trennen, da die Untersuchungen der Jurežquelle gezeigt haben, daß deren Einzugsgebiet in diesem Raum zu vermuten ist. Der Nordschenkel der Kahlkogel-Synklinale wird durch die Jurežquelle (Meßpunkt 100) entwässert, sodaß hier gegen den allgemeinen Trend eine unterirdische Entwässerung gegen SW vorliegen dürfte.

4.1. Hydrogeologische Karte

Die hydrogeologische Karte wurde aufgrund der kompilierten, im Rahmen des Projektes erarbeiteten geologischen Karte angefertigt. Die Karte stellt eine Verallgemeinerung der geologischen Verhältnisse und Interpretation der hydrogeologischen Gebietseigenschaften dar.

Das Untersuchungsgebiet wurde in folgende Einheiten gegliedert:

1. Die erste Einheit wird von undurchlässigen, stellenweise geklüfteten Hochwipfel- und Auernigschichten, Trogkofelkalken, Grödener Formation, Bellerophonolomit, Werfener Schichten und Uggowitzer Brekzie gebildet. In dieser Einheit

ist der Oberflächenabfluß ausgesprochen vorherrschend, es sind aber auch kleinere lokale Aquifere anwesend, von denen das Wasser aus Vernässungen oder Quellen mit einer Schüttung von < 1 l/s austritt. Die hydrochemische Zusammensetzung der Wässer ist sehr vielfältig und umfaßt sowohl niedrig als auch hoch mineralisierte, mit Gipsen in Kontakt stehende Wässer.

2. Die zweite, ebenso schlecht durchlässige Einheit sind die Raibler Schichten und die Hornsteinplattenkalke. Der Oberflächenabfluß überwiegt, stellenweise treten lokale Kluftaquifere in Kalken auf. Die Hydrochemie dieser Wässer ist sehr monoton mit geringen jährlichen Konzentrationsschwankungen und deutet auf Abflüsse aus Kalken hin. Nur stellenweise wird ein Einfluß des Oberflächenmoränenmaterials bemerkbar.
3. Die dritte Einheit könnte als Dolomiteinheit benannt werden. Dazu gehören die Bereiche mit vorherrschendem Sarl- und Schlerndolomit, der den überwiegenden Teil des Untersuchungsgebietes aufbaut. Die unterirdische Fließrichtung des Wassers wird von größeren regionalen Strukturen bestimmt. Diese Strukturen verursachen die Entstehung von Feinklüften, die die Quellenhydrodynamik in dieser Einheit beeinflussen. Punktuelle Quellaustritte kommen nur an Kontakten mit weniger durchlässigen Gesteinsschichten vor. Die Quellschüttungen weisen meist geringe Schwankungen auf.

Häufig haben diese Quellen ihre Austrittsstellen in Gerinnen, wo sich ihre Austrittshöhe entsprechend der Grundwasserstandsschwankung ändert. Mehr als konzentrierte punktuelle Austritte ist für diese Einheit die Schüttungszunahme entlang von Oberflächengerinnen charakteristisch. Am Quellaustritt liegt die Schüttung unter 1 l/s, nimmt aber stromabwärts schnell zu. Die chemische Zusammensetzung ist einheitlich und weist auf einen ausgesprochen dolomitischen Wassertypus hin. Im westlichen Teil der Einheit, im Bereich des Tunnels zwischen 1200 und 1300 m, tritt Grundwasser in zahlreichen, aber gering ergebnigen Quellen aus.

In der Dolomiteinheit können zwei Hauptabflußrichtungen angenommen werden. Die erste Richtung ist lokal und hängt von den Schwankungen im Grundwasserstand und im hydraulischen Gradient des Grundwassers in Bezug auf die Lage der Vorfluter ab. Die andere Abflußrichtung ist durch breitere regionale Strukturen bedingt. Der Dolomit bildet eine gegen NE einfallende Synklinale Struktur, was auch die Abflußrichtung des Wassers in tiefergelegenen Teilen des Aquifers bestimmt. Das wurde mit Isotopenanalysen der Tunnelwässer und ihrer Bilanz-Analyse wahrscheinlich gemacht. Im Dolomitbereich von Zeleznica fließen die Wässer gegen SE ab.

Die Situation im Bereich des Jurežev-Grabens ist etwas komplizierter. Das beweisen die Isotopenanalysen und eine etwas unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Wässer. Ein Anteil der Wässer fließt gegen E ab und aus dem nördlichen Abschnitt der Synklinale vermutlich gegen S. Im Dolomit-Aquifer nördlich der Koschuta-Störung existieren wahrscheinlich wegen mehrerer Barrieren verschiedene Abflußrichtungen, die auf der regionalen Karte nicht dargestellt werden konnten.

4. Die vierte Einheit stellt der verkarstete Bereich des Mittagkogels dar, welcher aus Dachsteinkalk und -dolomit aufgebaut und von Raibler Schichten unterlagert wird. Die Karstbasis für diese Gesteinseinheit stellt vermutlich der große Quellaustritt (Kar 130) im Ardeschitzgraben dar, womit die unterirdische Entwässerung gegen ENE gegeben ist.

4.2. Quellen im nördlichen Abschnitt des Straßentunnels

Die bei Station 3830 m und 3930 m gefaßten Quellaustritte im österreichischen Abschnitt des Straßentunnels weichen aufgrund ihres hohen Wasseralters und der isotopischen Zusammensetzung völlig von allen anderen beobachteten Quellen ab. Hydrochemisch entsprechen sie weitgehend Wässern aus dem Schlerndolomit, aus dem sie auch austreten, doch weist die mit 19° C hohe Wassertemperatur auf eine tiefreichende Zirkulation dieser Wässer hin. Aus geologischen Gründen kann die Infiltration dieser Wässer nicht aus den überlagernden Gesteinsschichten über der Tunnelachse erfolgen, da die überlagernden Hornsteinplattenkalke als weitgehend dicht anzusehen sind und eine lokale seichte Entwässerung aufweisen.

Die Untersuchungen der Sauerstoff-18-Isotope zeigten, daß mit dieser Methode für diese Quellen keine mittlere Höhe des Einzugsgebietes festzulegen ist. Die Wässer sind im Vergleich zu allen anderen beprobten Wässern bezüglich des Sauerstoff-18-Gehaltes viel zu leicht, was auf kältere mittlere Infiltrationsbedingungen hinweist, als während der durchgeführten Untersuchungen herrschten. Ebenso lassen sich aus den durchgeführten Tritiumuntersuchungen keine weitreichenden Schlüsse auf das mittlere Wasseralter ziehen, da der Verlauf der Tritiumganglinie zeigt, daß hier ein vormals stagnierender und tritiumfreier Karstwasserkörper durch die Schaffung der Tunnelvorflut in Bewegung gekommen ist. Es wäre daher die weitere Beobachtung des nunmehr leicht ansteigenden Tritiumgehaltes für die Erforschung der Karstwasserdynamik dieser Quellaustritte von großer Bedeutung.

Zweifellos ist es aber bereits heute möglich, auf verschiedene Komponenten der Karstentwässerung zu schließen. Während durch die Schaffung der neuen Vorflut die Wasserbewegung in den großlumigen Karstschläuchen forciert wurde und den ³H-Einbruch bei den Zutritten im Tunnel bewirkte, ist dieser Mengeneffekt bei den stabilen Isotopen infolge des nur geringen Konzentrationsunterschiedes von „alten“ und „jungen“ Wässern nicht gegeben. Auch der dem ¹⁸O und ²H zukommende Zeiteffekt ist nur ein mittelbarer, da zwischen der Bildung glazialer Eismassen und deren Infiltration als Schmelzwasser eine große Zeitspanne besteht. Aus geologischen Gründen kann das Einzugsgebiet der Tunnelwässer vor allem im Bereich der über Tage austreichenden Schlerndolomitschichten im Südschenkel der Kahlkogel-Synklinale vermutet werden. Diese Schlerndolomitschichten dürften aufgrund des tektonischen Baus mit den im Tunnel angetroffenen Schlerndolomithorsten verbunden sein und erlauben daher eine Verbindung der in den Schlerndolomiten südlich und südwestlich des Mittagskogels (siehe geologische Karte) versickernden Niederschläge über tiefreichende Wasserwege zu den Tunnelquellen.

Zusammenfassung

Der im Jahre 1986 begonnene und Ende 1991 fertiggestellte Bau des Karawanken-Autobahntunnels, der Österreich mit Slowenien verbindet, traf große Wasservorkommen an, die z. T. einem tiefliegenden Karstwasserkörper angehören. Die während der Baumaßnahmen durchgeführten ersten Untersuchungen dieser Wässer zeigen, daß verschiedene Wassersysteme angezapft wurden. In einer vom Land Kärnten und von der Republik Slowenien beauftragten Studie sollten diese Karstwasservorkommen in Gemeinschaftsarbeit slowenischer und österreichischer Wissen-

schafter in einem Dreijahresprogramm untersucht werden. Die hydrogeologischen Untersuchungen in den Westlichen Karawanken hatten zum Ziel, die Entwässerungsverhältnisse im slowenisch-kärntnerischen Grenzgebiet im möglichen Einflußbereich des Karawanken-Autobahntunnels zu untersuchen.

Als Grundlage für die hydrogeologische Interpretation der Entwässerungsverhältnisse wurde eine geologische Karte des Gebietes zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel kompiliert, die einen Einblick in den geologischen Bau des Gebietes gibt. Als für die Entwässerung des Gebirges bedeutende geologische Elemente können drei tektonische Einheiten angesehen werden. Es sind dies das „Jüngere Paläozoikum der Südkarawanken“ sowie das „Ältere Paläozoikum der Westkarawanken“, welche die „Koschuta-Einheit“ im S und N begrenzen und wasserstauende Wirkung aufweisen. Die zwischen diesen beiden paläozoischen Einheiten gelegene Koschuta-Einheit wird zum Großteil aus karbonatischen Gesteinen der Trias aufgebaut und bildet daher gute Voraussetzungen für die Versickerung und Speicherung von Wasser. Die Grundstruktur der Koschuta-Einheit ist die Kahlkogel-Synklinale, deren Achse gegen E einfällt.

Die hydrochemischen und isopenhydrologischen Untersuchungen zeigen, daß – neben lokalen Entwässerungssystemen – zwei große Karstsysteme vorhanden sind. Das höhere System entwässert den Mittagskogel zum Ardeschitzagraben, ein tiefzirkulierendes System entwässert die Schlerndolomite südlich und südwestlich des Mittagskogels zu den Quellen im Karawankentunnel. Die hier austretenden Wässer sind gut gespeichert, weisen ein für Karstaquifere hohes mittleres Wasseralter auf, das heute noch über 50 Jahre liegt.

Literatur

- ANDERLE, N. (1977): Geologische Karte der Republik Österreich 1 : 50 000, 201–210 Villach-Assling. – Geologische Bundesanstalt, Wien.
- BACK, W. (1961): Techniques for mapping of hydrochemical facies. – U.S. Geol. Surv., Professional paper 424–D, 380–382, Washington.
- BAUER, F. K. (1985): Geologische Gebietskarte der Republik Österreich-Karawanken, Westteil Blatt 1, 2, 3, 1 : 25 000. – Geologische Bundesanstalt, Wien.
- BAUER, F. K., T. BUDKOVIČ, L. FERJANČIČ & W. POLTNIG (1993): Geologische Karte der Westkarawanken zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel. – In: BRENČIČ, M., T. BUDKOVIČ, L. FERJANČIČ & W. POLTNIG (1994): Hydrogeologie der Westlichen Karawanken. – Unveröff. Bericht, 70 S., Graz, Ljubljana.
- BENISCHKE, R. & T. HARUM (1984): Computergesteuerte Abflußmessungen in offenen Gerinnen nach der Tracerverdünnungsmethode (Integrationsverfahren). – Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 36, 127–137, Graz.
- BRENČIČ, M. (1992): Hidrogeokemija izvirov v Karavankah med Jesenicami in Gozd Martuljkom. – Diplomsko delo, FNT Odsek za geologijo, 72 str., Ljubljana.
- BRENČIČ, M., T. BUDKOVIČ, L. FERJANČIČ & W. POLTNIG (1994): Hydrogeologie der Westlichen Karawanken. – Unveröff. Bericht, 70 S., Graz, Ljubljana.
- BUDKOVIČ, T. s sodelavci (1992): „Geološka zgradba karavanskega predora“ (obdobje 1987–1990) in „Geološka karta karavanskega predora“. – 32 str., Arhiv Inštituta za geologijo, Ljubljana.
- BUDKOVIČ, T. (1993): Geologische Profile zur Geologischen Karte der Westlichen Karawanken zwischen Wurzenpaß und Kahlkogel. – In: BRENČIČ, M., T. BUDKOVIČ, L. FERJANČIČ & W. POLTNIG (1994): Hydrogeologie der Westlichen Karawanken. – Unveröff. Bericht, 70 S., Graz, Ljubljana.
- BUSER, S. (1980): Tolmač lista Celovec (Klagenfurt). Osnovna geološka karta SFRJ, 1 : 100 000. – 62 str., Zvezni geološki zavod, Beograd.

- BUSER, S. s sodelavci (1980): Osnovna geološka karta – list Celovec (Klagenfurt), 1 : 100 000. – Zvezni geološki zavod, Beograd.
- D' AMORE, F., G. CANDIFFIO & C. PANICHI (1983): Some observation on the chemical classification of ground waters. – *Geothermics*, 12, 141–148, London.
- DEINES, P. (1980): The isotopic composition of reduced organic carbon. – In: FRITZ, P. & J. Ch. FONTES (Ed.): *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. – Vol. 1, 329–406, Amsterdam (Elsevier).
- DROBNE, F. & D. NOVAK (1973): Regionalne hidrogeološke raziskave porečja Zgornje Save in Soče. – I. faza 1972/73, Letno poročilo, GZL, Ljubljana.
- DROBNE, F. & D. NOVAK (1974): Regionalne hidrogeološke raziskave porečja Zgornje Save in Soče. – II. faza 1973/74, Letno poročilo, GZL, Ljubljana.
- DROBNE, F. & D. NOVAK (1976): Regionalne hidrogeološke raziskave porečja Zgornje Save in Soče. – IV. faza 1975/76, Letno poročilo, GZL, Ljubljana.
- DROBNE, F. s sodelavci (1972): Geološko poročilo o idejni študiji variant predora skozi Karavanke med Ratečami in Jezerskim. – 35 str., Arhiv Inštituta za geologijo Ljubljana.
- DROBNE, F. (1975): Idejna študija za predor Karavanke – projekt. – Arhiv GZL, Ljubljana.
- DROBNE, F. s sodelavci (1979): Predor Karavanke. Geološko-geotehnično poročilo za razpisni – projekt. – Geološki zavod Ljubljana, 61 str., Arhiv Inštituta za geologijo, Ljubljana.
- HAUSER, C. (1982): Erläuterungen zu Blatt 201–210 Villach–Assling. – 44 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.
- ISKRA, M. (1965): Geološka zgradba Savskih jam. – *Geologija*, 8, 279–298, Ljubljana.
- JESINGER, D. & P. J. MÜLLER (1990): Endbericht zur Baugeologischen Dokumentation A11–Karawankenautobahn Karawankentunnel Nord (1987–1989). – *Intergeo Paternion*, 30 S., Paternion (shranjeno v arhivu Republiške uprave za ceste).
- JURKOVŠEK, B. (1987): Tolmač listov Beljak in Ponteba. Osnovna geološka karta SFRJ, 1 : 100 000. – 58 str., Zvezni geološki zavod, Beograd.
- JURKOVŠEK, B. s sodelavci (1987): Osnovna geološka karta – list Beljak in Ponteba, 1 : 100 000. – Zvezni geološki zavod, Beograd.
- JUVANČIČ, V. (1990): Cestni predor Karavanke jug – Poročilo o hidrogeoloških razmerah. – Tipkano poročilo v arhivu IGGG, 28 str. in priloge, Ljubljana.
- KAHLER, F. (1954): Mußte der Bau des Karawanken Tunnels so schwierig sein? – *Geologie und Bauwesen*, 20, Heft 4, 198–211, Wien.
- KERN, A. (1980): Bericht zur Kartierung des Mittagskogel-Gebietes. – *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr.*, 26, 1–8, Wien.
- KOGLER-STOCKER, W. (1980): A11 Karawankenautobahn. Abflüsse am Nordportal des ÖBB Tunnels in Rosenbach. – Unveröff. Bericht, Klagenfurt.
- KRYSTIN, L., R. LEIN, J. SCHLAF & F. K. BAUER (1994): Über ein neues obertriadisch-jurassisches Intraplattformbecken in den Südkarawanken. – *Jubiläumsschrift 20 Jahre Geologische Zusammenarbeit Österreich-Ungarn, Teil 2*, 409–416, Wien, Bacs.
- KUŠČER, D. & T. BUDKOVIČ (1989): Prognoza geoloških razmer v karavanskem cestnem predoru. – *Rudar. metal. zbornik*, 36, 237–248, Ljubljana.
- MIKOŠ, B. (Ed., 1991): Predor Karavanke, Geologija in geotehnika/Karawankentunnel – Geologie und Geotechnik. – 134 str., Cestni inženiring Ljubljana, Ljubljana.
- PEARSON, F. J., Jr. (1991): Overview of Groundwater Carbonate Evolution. – In: PEARSON, F. J., Jr., W. BALDERER, H. H. LOOSLI, B. E. LEHMANN, A. MATTER, Tj. PETERS, H. SCHMASSMANN & A. GAUTSCHI (Ed.): *Applied Isotope Hydrogeology – A Case Study in Northern Switzerland*. – 175–203, Amsterdam (Elsevier).
- PREMSTALLER, M. (1991): Hydrogeologische Untersuchungen in den Westlichen Karawanken. – Unveröff. Dipl.-Arb., 89 S., Graz.
- PUČNIK, J. (1980): Velika knjiga o vremenu. – 1–368, Cankarjeva založba, Ljubljana.
- RAMOVŠ, A. s sodelavci (1964): Geološki razvoj Zahodnih Karavank. – 1. faza, 34 str., Arhiv Inštituta za geologijo univerze v Ljubljani.
- RAMOVŠ, A. (1976): Die Stratigraphische Stellung der Schichten in der Umgebung von Korensko sedlo (Wurzen-Pass) Westkarawanken. – *Verh. Geol. B.A.*, 2, Wien.
- REMY, E. (1977–1979): A11 Karawankenautobahn. Abflüsse am Nordportal des ÖBB Tunnels in Rosenbach. – Unveröff. Bericht, Klagenfurt.

- SCHLAF, J. (1995): Ein obertriadisches Intraplattformbecken aus den Südkarawanken (Kärnten, Österreich). – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud., 39/40, 1–14, Wien.
- SCHOELLER, H. (1962): Les Eaux Souterraines. – 642 pp., Paris (Masson et Cie).
- SEELMEIER, H. (1942): Der Geologische Bau zwischen dem Gr. Mittagkogel und dem Gr. Suchagraben in den Karawanken. – Mitteilungen des Alpenländischen Geologischen Vereines (Mitteilungen der geologischen Gesellschaft in Wien), 33, 1–10, Wien.
- TELLER, F. (1914): Geologie des Karawankentunnels. – Denkschriften der K. Akademie der Wissenschaften, Mathem.-naturwiss. Klasse, 250 S., Wien.
- VESELIČ, M. (1979): Letno poročilo o izvedbi I faze raziskovalne naloge študije vodnih virov, njihove zaščite in perspektive oskrbe z vodo na porečju Save Bohinjke in Save Dolinke. – I. faza, Tipkano poročilo v arhivu IGGG, 215 str., Ljubljana.

Povzetek

Na področju Karavank leže številni pomembni viri pitne vode. Zaradi zapletenih hidrogeoloških razmer segajo njihova napajalna zaledja na obe strani slovensko avstrijske državne meje. Prve skupne hidrogeološke raziskave teh virov so se na obeh straneh državne meje pričele z izgradnjo cestnega predora skozi Karavanke in se nadaljevale tudi po njegovi dograditvi. V ta okvir spada tudi študija Hidrogeologija zahodnih Karavank.

V študiji obravnavano ozemlje sega v Sloveniji od Gozd Martuljka na zahodu, do Jesenic, na vzhodu. Južno mejo predstavlja dolina reke Save, proti severu pa sega proti državni meji in se nadaljuje na avstrijsko ozemlje. Tukaj je obravnavano ozemlje nekoliko manjše. Sega od Kepe, na zahodu do Golice na vzhodu. Severno mejo obravnavanega ozemlja predstavlja črta med Področje in vrhom Gračnice.

Prve podrobnejše geološke raziskave tega področja segajo v čas gradnje železniškega predora skozi Karavanke (F. TELLER, 1914). Te rezultate so nekateri kasnejši avtorji skušali reinterpretirati (H. SEELMEIER, 1942 in F. KAHLER, 1954). Intenzivnejše regionalne raziskave na obravnavanem ozemlju je začel A. RAMOVŠ s sodelavci (1964), ki so kasneje služile kot osnova za izdelavo Osnovne geološke karte Jugoslavije. Za obravnavano območje sta to lista Celovec in Beljak-Ponteba (B. JURKOVŠEK, 1987, S. BUSER, 1980). V Avstriji je bilo prav tako izdelanih nekaj temeljnih geoloških kart (N. ANDERLE, 1977, F. K. BAUER, 1985, C. HAUSER, 1982).

Detaljniji pregled hidroloških in hidrogeoloških razmer na obravnavanem ozemlju podaja M. VESELIČ (1979) v regionalni študiji virov pitne vode za porečje Save Bohinjke in Dolinke. V delu podaja kataster izvirov, hidrogeološko karto ter splošne hidrogeološke značilnosti ozemlja.

V povezavi z gradnjo cestnega predora skozi Karavanke so bile izdelane številne študije. Prognoza hidrogeoloških razmer je vključena v Idejno študijo za predor Karavank (F. DROBNE et al., 1972, 1975, 1979). Med samo izgradnjo je potekala hidrogeološka spremljava (V. JUVANČIČ, 1990, D. JESINGER & P. J. MÜLLER, 1990). Povzetek opravljenih del je publiciran v knjigi Predor Karavank – geologija in geotehnika (B. MIROŠ, 1991), kjer so podani tudi posamezni hidrogeološki detalji. Deloma sta pozornost hidrogeološkim razmeram na področju predora namenila tudi D. KUŠČER & T. BUDKOVIČ (1989).

Hidrogeološka interpretacija ozemlja je bila izdelana s pomočjo geološke karte, ki predstavlja nekatere nove rezultate in deloma združuje stare podatke.

Na obravnavanem področju lahko razpoznamo tri tektonske enote: „Mlajši paleozoik Južnih Karavank“ in „Starejši paleozoik Zahodnih Karavank“ ter „enoto Košute“. Med obema neprepustnima paleozoijskima enotama leži enota Košute, ki jo sestavljajo karbonatne triasne kamnine. Te predstavljajo najpomembnejše vodonošnike obravnavanega področja. Osnovno strukturo enote Košute predstavlja Goliška sinklinala, katere os tone proti vzhodu. Talninske enote Goliške sinklinalne sestavljajo neprepustne plasti spodnjega triasa, ki v zahodnem delu sinklinalne izdajajo severno od Kranjske gore. Največjo površino v Goliški sinklinali zavzema schlernski dolomit, ki je razširjen predvsem južno do zahodno od Kepe. Na območju Kepe ga prekrivajo rabeljske plasti, plasti apnenca z rožencem in dachsteinski apnenec. Severno od Kepe je sinklinalna struktura odrezana z desno orientiranimi premiki, ki potekajo od Periadriatskega šiva v smeri vzhod-jugovzhod.

Na obravnavanem področju lahko najdemo naslednje tipe vodonosnikov in neprepustnih kamnin, katerih pojavljanje je v veliki meri odvisno od litologije:

- a) Razpoklinski vodonosnik: drobno razpokani sarlski in schlernski dolomit.
- b) Vodonosnik kraško razpoklinskega tipa: izmenjajoče se plasti dachsteinskega apnenca in dolomita.
- c) Neprepustne plasti s pretežno površinskim odtokom: gradijo jih kamnine hochvipfelskih in javorniških palsti, grödenske formacije, belerofonskega dolomita, werfenskih plasti in ukovške breče z manjšimi lokalnimi vodonosniki.
- d) Neprepustne plasti s pretežno površinskim odtokom in posameznimi lokalnimi razpoklinskimi vodonosniki v apnencih: rabeljske plasti in karnijske plasti z apnenci z roženci.

Na podlagi medsebojne lege vodonosnikov lahko ločimo naslednje regionalne hidrogeološke enote: območje severno od Košutinega preloma, območje schlernskega dolomita južno od Kepe in dachsteinski apnenec na območju Kepe ter zahodni del Goliške sinklinale:

V okviru študije je potekal tudi program mesečnega vzorčenja za kemijske in izotopske analize izvirov. Na podlagi teh analiz lahko določimo naslednje tipe vod:

- a) Dolomitne vode z naslednjimi podskupinami:
 - Vode s povišano temperaturo iz severnega krila cestnega predora (KT 2830, KT 2930).
 - Vode iz schlernskega in karnskega dolomita, kamor sodijo vzorci iz vzorčnih mest 300, 400, 500, 700, iz območja stacionaže 3030 v južnem krilu predora, Kar 73, 133 in Kar 178.
 - Stratigrafsko heterogene vode iz sarlskega dolomita, močno dolomitiziranih apnencev ter dolomita iz ladinija. Vzorčne točke 100, 200, 800 in Kar 108.
 - Dolomitne vode pod vplivom plasti sadre (povišana vsebnost sulfata) na točkah Kar 78 in Kar 84.
- b) Apnenčeve vode z naslednjimi podskupinami:
 - Apnenčeve vode, ki izvirajo iz rabeljskih plasti in ploščatih apnencev z rožencem na vzorčnih mestih 600, Kar 95 in Kar 102.
 - Čiste apnenčeve vode, ki izvirajo iz dachsteinskega apnenca v območju Kepe (Kar 266).
 - Mešane apnenčeve vode, ki sicer izvirajo iz apnencev, iztekajo pa na področju schlernskega dolomita (Kar 130) ali moren (Kar 126).
- c) Anhidritne vode. V to skupino bi lahko šteli le nekatere vode, ki so se pojavljale med gradnjo cestnega predora. Najmočnejši vpliv plasti bogatih s sadro smo zaznali v vzorcu s točke Kar 88, v katerem pa je bilo opaziti tudi vpliv dolomitnih kamnin.
- d) Vode iz skrilavcev se pojavljajo le v južnem krilu cestnega predora. Pri tem gre verjetno le za formacijske vode.

Na podlagi izotopskih analiz smo prišli do naslednjih ugotovitev: razmerje $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ kaže na mediteranski vpliv padavin na obravnavanem področju in odstopa od alpskih vod. Nihanje vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v odvisnosti od letnega časa se giblje v razponu 0,2 ‰, kar jasno kaže na različne akumulacijske lastnosti hidrogeoloških enot in s tem tudi na različne povprečne zadrževalne čase vod. Zaradi pomanjkanja podatkov s slovenskega dela obravnavanega področja ni mogoče določiti srednjih vrednosti, ki bi bile primerljive s podatki s severne strani gorovja.

Vode z močnim nihanjem $\delta^{18}\text{O}$ v odvisnosti od letnega časa in s tem tudi najmlajše vode smo zasledili v visoko ležečih izvirih v ploščatih apnencih z rožencem in v rabeljskih plasteh na vzorčnih mestih Kar 95, Kar 102 in Kar 126 v območju Rožce in sedla Mlince. Iz izračuna povprečnega zadrževalnega časa na osnovi amplitude nihanja ^{18}O dobimo povprečno starost voda od 0,4 (Kar 126) do 1,4 leta (Kar 95).

Izvir Belega potoka (Weiße Quelle – Kar 130), ki je značilni kraški izvir z močnim nihanjem izdatnosti (8 l/s do 100 l/s), ima za kraške izvire tipično letno krivuljo z najnižjimi vrednostmi $\delta^{18}\text{O}$ v času odjuge in skromnim vplivom poletnih padavin.

Večina dobro akumuliranih voda izvira iz dolomitnega zaledja (schlernski dolomit, sarlski dolomit). To so izviri Kar 108, Kar 133, Kar 178 in izvir Kar 266 na severozahodni strani Kepe. Najmanjše nihanje ^{18}O opazimo v izviru na južni strani Gračenic (Kar 178) ter v obeh izvirih v severnem delu cestnega predora KT 2830. Pri teh izvirih povprečnih zadrževalnih časov ne moremo več določiti z metodo merjenja kisika ^{18}O , vsekakor pa so to najstarejše vode na avstrijski strani obravnavanega področja.

Iz primerjave med izmerjenimi vsebnostmi $\delta^{18}\text{O}$ v izviri in nadmorskimi višinami iztokov smo ugotovili odvisnost vsebnosti $\delta^{18}\text{O}$ od srednje višine napajalnih zaledij posameznih izvirov. Pri tem je najbolj zanimivo, da imata oba predorska izvira v primerjavi z vsemi ostalimi izviri najnižje vrednosti $\delta^{18}\text{O}$. To pomeni, da je povprečna višina njunih zaledij višja od vseh ostalih izvirov ali pa, da so se vode infiltrirale v času nižjih povprečnih letnih temperatur kot vladajo danes.

Vsebnost tricija v izvirih KT 2830 in KT 2930 v predoru Karavanke smo merili v obdobju štirih let in pol. V začetku meritev, takoj po odkritju izvirov, tricija v obeh izviri ni bilo, kar pomeni, da te vode v tem času niso vsebovale padavinskih voda zadnjih 50 let. Zelo zanimiv pa je kasnejši pojav tricija v obeh izviri. Prve sledove tricija smo v izviriu KT 2830 odkrili februarja 1990. Potem je vsebnost tricija do poletja 1993 z rahlim nihanjem kontinuirano naraščala in trenutno znaša pribl. 6 TU. S časovnim zamikom leta in pol so se prvi sledovi tricija v začetku oktobra 1991 pojavili tudi v izviriu KT 2930. Tudi tukaj je vrednost tricija potem rahlo naraščala in trenutno znaša okoli 2 TU.

Starosti obeh predorskih izvirov na osnovi meritev tricija ni mogoče določiti, saj je voda iz teh izvirov prestara za datiranje s pomočjo omenjenega izotopa, očitno pa časovno različna.

Zaradi zelo nizkih vsebnosti tricija smo na obeh predorskih izviri izvedli tudi raziskave vsebnosti ^{14}C . V petih tovrstnih meritvah smo dobili vrednosti med 9 in 16 %, kar je v primerjavi z recentnimi vrednostmi ^{14}C zelo nizko.

Če bi si te nizke vrednosti razlagali samo z radioaktivnim razpadom ^{14}C , bi dobili zelo visoke starosti teh voda (10 000 do 20 000 let). Kot pa so pokazale že analize ^{13}C , prihaja večji del v vodi raztopljenega karbonata iz raztopljenega kamninskega karbonata, ki zaradi svoje visoke starosti ne vsebuje ^{14}C .

Po daljših sušnih obdobjih smo ob nizkih vodah merili odtok z posameznih območij napajanja. Odtoki ob nizkih vodah naj bi predstavljali del odtoka, ki se je po padavinah akumuliral v vodonosniku in kazali na različne akumulacijske lastnosti posameznih zaledij oziroma na odtekanje izven zaledja.

Meritve pretokov jasno kažejo na različne značilnosti odtoka z območij napajanja ob nizkih vodah. Glede na strukturo lahko pričakujemo, da bo v nekaterih potokih na južni strani Karavank prisoten deficit na severu pa presežek vode. Najnižje vrednosti pretokov smo izmerili v potokih Rdečica, Gračenica, Radiš, Borovnica na avstrijski strani in Sedučnikovem potoku, Mlinci, Dobršniku na slovenski strani. Nekoliko višje pretoke imajo potoki Hladnik, Belca in Jesenica, ki pa še vedno kažejo na določene izgube. V skladu s pričakovanji ima največji pretok izvir Beli Potok (Kar 130). Izvir ima zelo majhno orografsko zaledje, vendar njegovo dejansko območje napajanja sega do območij okrog vrha Kepe. Pri potoku Rdečica predpostavljamo, da del njegovih vod zateka v severno krilo predora. Vode v predoru imajo napajalno zaledje na pretežno v Sloveniji ležečem schlerenskem dolomitu.

Summary

In 1986 a highway tunnel project was started to connect Austria and Slovenia, which has been completed in 1991. During the construction of this tunnel, called "Karawanken Highway tunnel", a large amount of water was found. Hydrogeological investigations carried out during the construction work revealed that there exist different drainage systems in that area. A three years study programme was devised by the Federal Government of Carinthia (Austria) together with the Republic of Slovenia aiming to determine the hydrogeological situation in the influence area of the Karawanken Highway tunnel at the Slovenian-Austrian border.

A geological map of the area between Wurzenpaß and Kahlkogel (investigation area) was compiled. It indicates the drainage and hydrogeological situation of the study area. Three tectonic units can be differentiated: the Upper Paleozoic of the South Karawanks, the Lower Paleozoic of the West Karawanks and the Koschuta Unit.

The Koschuta Unit, in between above mentioned units, is composed of triassic carbonate rocks, forming a syncline with the axis dipping to the east. These carbonate rocks serve as a good water reservoir.

The results from hydrochemical and isotopic investigations obtained, apart from the local drainage patterns, the existence of two large karst systems in this area. The upper system drains the Dachsteinkalk of Mittagskogel to one large spring called "Weiße Quelle, Kar 130" to Ardeschitzgraben. The deep circulating system drains the Schlerndolomite, south and southwest of Mittagskogel, to the springs in the Karawanken Highway tunnel (KT 2830, KT 2930). Those spring waters show long mean residence time exceeding today some 50 years.