

## **Muttergesteinspotential und organisch-geochemische Charakteristika der Sachrang-Subformation (Unter-Toarcium, Nördliche Kalkalpen, Unkener Mulde)**

S. NEUMEISTER, H.-J. GAWLICK, R. GRATZER und R. BECHTEL

Schwarzschiefer des Unter-Toarcium sind von verschiedenen Lokationen in Europa, Afrika, Nordamerika und Südamerika bekannt (siehe FRIMMEL, 2003). In Mitteleuropa zählen der bekannte und gut untersuchte Posidonienschiefer Süddeutschlands sowie einige Lokalitäten in den Nördlichen Kalkalpen (EBLI et al., 1991) zu den Vertretern dieser Lithologie bzw. dieses Ereignisses. Dabei ist zu klären, inwieweit die Vorkommen in den Nördlichen Kalkalpen mit denen in Süddeutschland vergleichbar sind, und zwar sowohl organisch-geochemisch als auch in Bezug auf die Ablagerungsbedingungen.

Die verbreitete Bildung und Erhaltung von organisch reichen Sedimenten im Unter-Toarcium in den europäischen Epikontinentalmeeren und am Kontinentalrand der Tethys wird in Zusammenhang mit dem Auftreten eines ozeanischen anoxischen Events gesehen (JENKYNS, 1985, 1988; JENKYNS & CLAYTON, 1986, 1997; JENKYNS et al., 2001). Organisch-geochemische Studien anderer Autoren sprechen im Gegensatz dazu von einer Abhängigkeit der Schwarzschiefergenese von regionalen Steuerungsfaktoren (FRIMMEL, 2003 cum lit.). Im Unter-Toarcium soll eine der bedeutendsten Transgressionen des Jura (HALLAM, 1981, 2001; HAQ et al., 1988) eine großflächige Flutung der europäischen Schelfgebiete bewirkt haben und die Ursache für die weit verbreitete Ablagerung von organisch reichen Sedimenten in zahlreichen, relativ flachen Becken auf den europäischen Schelfgebieten und an den Kontinentalrändern im Tethysbereich gewesen sein (FRIMMEL, 2003). Auffällig ist, dass dieses Schwarzschieferereignis besonders in Süddeutschland und im Alpenraum auch im Zusammenhang mit dem Aufreißen des mittelatlantischen Ozeans und dessen östlicher Fortsetzung, des Alpen Atlantik (= Ligurisch-Penninischer Ozean), steht und gleichzeitig die innerozeanische Subduktion im Neotethysraum einsetzt.

Die alpinen Schiefer im Mittelabschnitt der Nördlichen Kalkalpen lassen nach EBLI et al. (1991) eine deutliche Abhängigkeit von den bathymetrischen Gegebenheiten erkennen, welche sich sowohl in der Mikrofazies als auch im Biogehalt der Sedimente widerspiegeln. So werden in den tieferen Beckenbereichen radiolarienreiche Lithologien (Sachranger Schiefer) abgelagert, wohingegen in submarinen Schwellenbereichen echinodermen- und molluskenreiche Gesteinsausbildungen (Unkener Schiefer) und Resedimentlagen dominieren sollen (EBLI et al., 1991).

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten organisch reichen Sedimente, die ursprünglich als Unkener Schichten mit der Typlokalität im Unkenbach (GPS: N-47°38,219' E-12°36,279') bezeichnet wurden, sind heute Teil der Sachrang-Subformation (GAWLICK et al., 2009; vgl. auch EBLI, 1997). Die Sachrang-Subformation besteht aus bituminösen, schwärzlichgrauen bis dunkelbraunen, feinblättrigen Tonsteinen und Kalkmergeln und ist in unterschiedlichen Mächtigkeiten an mehreren Lokationen in den Kalkalpen aufgeschlossen (siehe EBLI, 1997). Als lithologische Besonderheit sind in der Sachrang-Subformation der Unkener Mulde wenige Millimeter bis mehrere Zentimeter mächtige grüne Tonmergeleinschaltungen zu beobachten (EBLI, 1997).

Die bituminösen Sedimente in der zentralen Unkener Mulde gehen aus hemipelagischen, meist resedimentierten Rotkalken der Adnet-Gruppe, die über grauen kieseligen Kalken der Scheibelberg-Formation folgen, hervor und werden wiederum von Gesteinen der Rotfazies (= Adnet-Gruppe) überlagert (EBLI, 1997). Die Gesteine der Sachrang-Subformation der Unkener Mulde sind laut EBLI (1997) auf das obere Unter-Toarcium (*bifrons*-Zone) beschränkt. Die Schwarzschiefersedimentation setzt demnach wahrscheinlich in der *fibulatum*-Subzone ein, wie durch den Fund von *Mercaticeras* sp. in den liegenden Rotkalken anzunehmen ist (EBLI, 1997). Das Ende der Schwarzschiefersedimentation konnte von EBLI (1989) durch den Fund von *Collina* cf. *gemma* (BONARELLI) in der basalen Rotkalklage über dem Profil mit der *braunianus*-Subzone festgelegt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Proben der Sachrang-Subformation der Unkenener Mulde vor allem bezüglich ihres Kohlenwasserstoffpotentials und ihrer organisch-geochemischen Charakteristika sowie ihrer diagenetischen Reife im Detail untersucht. Diese Aspekte wurden bei den bisherigen Veröffentlichungen noch nicht ausreichend und detailliert genug behandelt. Einschränkend muss allerdings erwähnt werden, dass es sich bei den hier beschriebenen Ergebnissen um erste, vorläufige Resultate im Rahmen eines laufenden Projektes handelt.

Das untersuchte Schwarzschieferprofil im Unkenbach weist eine Mächtigkeit von ca. 360 cm auf. Insgesamt wurden 23 bituminöse Proben über den Profilquerschnitt genommen, von denen jede einer Mächtigkeit zwischen 1 und 2 cm im Schwarzschieferprofil entspricht. Diese Proben wurden mittels Leco-Analysen (Leco 300 CSTM Analysator) auf ihren Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) und Schwefel (S) sowie mittels Rock Eval-Analysen (Rock-Eval 2 plus™ Analysator in Kombination mit Rockplus Software) auf ihr Potential zur Bildung von Kohlenwasserstoffen untersucht. Zwei Doppelproben aus den hangenden Bereichen des Profils wurden außerdem mittels Auflichtmikroskopie (Auflichtmikroskop DMRX, Firma Leica; Eichung per Yttrium-Aluminium-Granat-Standard) auf ihre petrographische Zusammensetzung und ihre Vitrinitreflexionswerte analysiert. Dieselben Doppelproben wurden im Geochemielabor durch folgende Arbeitsschritte bezüglich ihrer organisch-geochemischen Charakteristika analysiert: Extraktion des Probenpulvers (Ase 200-Accelerated Solvent Extractor, Gerät der Firma Dionex), Einengung des Extrakts durch Evaporation des Lösungsmittels (Zymark TurboVap 500 Konzentrador), Fraktionierung der organischen Komponenten in gesättigte und aromatische Kohlenwasserstoffe (Medium-Pressure-Liquid-Chromatography, MPLC, Gerät der Firma Köhnen-Willsch), Auftrennung der gesättigten und aromatischen Kohlenwasserstofffraktionen (Gaschromatograph gekoppelt mit einem Finnigan MAT GCQ Ionen-Massenspektrometer), Identifizierung der Komponenten mittels Vergleich der erhaltenen Massenspektren mit veröffentlichten Daten, Bestimmung der relativen Prozente und absoluten Konzentrationen der verschiedenen Komponentengruppen der Kohlenwasserstofffraktionen mittels Vergleich der Peakflächen der Gaschromatogramme mit Standards (n-tetracosane, 1,1'-binaphthyl). Für sieben ausgewählte Schwarzschieferproben und für drei der oben beschriebenen grünen Tonmergelhorizonte wurden außerdem röntgendiffraktometrische Analysen durchgeführt.

Die bituminösen Sedimentgesteine des untersuchten Profils im Unkenbachtal werden von hemipelagischen, kieseligen Graukalken der Scheibelbergformation unterlagert. In diesem Profil fehlen die unterlagernden Rotkalke, d.h. hier ist unterhalb der Sachrang-Subformation eine Schichtlücke. Das Profil zeigt im Liegenden (ca. 105 cm mächtig) eine Wechsellagerung von mergeligen Schwarzschiefern teils mit Lithoklasten, grünlichen Tonmergelhorizonten und turbiditischen Rutschungslagen. Dabei konnten insgesamt vier Tonmergelhorizonte mit Mächtigkeiten von 3–9 cm und zwei Lagen mit turbiditischen, kalkigen Rutschungssedimenten mit Mächtigkeiten von 3 bzw. 11 cm zwischen den Schwarzsedimenten unterschieden werden. Die mächtigste Tonmergellage bildet dabei den Übergangsbereich zwischen dem liegenden Kalkstein und der ersten Schwarzschieferlage. Im Hangenden dieser Wechsellagerungssequenz folgt mit einer Mächtigkeit von ca. 255 cm durchgehend ein recht homogener plattiger Schwarzschiefer. Der Übergang zum hangenden Rotkalk wird wiederum von einer grünlichen Tonmergellage sowie von grauem, alteriertem teils brekziösem Kalkstein gebildet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Röntgendiffraktogramme von Proben aus unterschiedlichen Profilhöhen durchgeführt. Die Schwarzschiefer der Unkenener Mulde werden anhand der ausgewerteten Röntgendiffraktogramme aus Quarz, Pyrit, Plagioklas, Dolomit und Calcit aufgebaut. Illit und Chlorit konnten als vorhandene Tonminerale identifiziert werden. Die Röntgendiffraktogramme der als Tonmergellagen beschriebenen Horizonte zeigen wiederum Quarz als Hauptmineral. Als weitere Minerale treten ähnlich den analysierten Schwarzsedimenten Calcit, Dolomit, Plagioklas, Illit, Chlorit und nur geringe Anteile von Pyrit auf. Im Unterschie zu den Schwarzschiefern weisen die Tonmergellagen deutlich höhere Calcitgehalte und niedrigere Pyritgehalte auf. Die Konzentration von Tonmineralen ist in den Tonmergellagen laut den Ergebnissen der Röntgendiffraktometrie nicht signifikant höher als in den untersuchten Schwarzschiefern. Diese Ergebnisse unterscheiden sich von jenen der röntgendiffraktometrischen Analyse von EBLI et al. (1991), welche Illit und in zwei Proben zusätzlich geringe

Mengen an Kaolinit als vorhandene Tonminerale beschreiben. Alle im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Röntgendiffraktogramme zeigen im Gegensatz dazu ausschließlich Illit und Chlorit und keinen Kaolinit als Vertreter der Tonminerale. Für eine Schwarzschieferprobe im Hangenden des Profils wurde außerdem eine computerunterstützte quantitative Auswertung mit folgendem Ergebnis durchgeführt (mineralogische Gesamtgesteinszusammensetzung in Gewichtsprozent): Quarz (25 %), Illit (19,5 %), Pyrit (12,8 %), Plagioklas (11,7 %), Dolomit (11,3 %), Chlorit (9,6 %), Calcit (7,8 %).

Die TOC-Ergebnisse für die organisch reichen Schwarzschieferproben schwanken zwischen Werten von 1,21 % und 8,50 % TOC. Die signifikant höchsten Werte zeigen die Proben aus den hangendsten ca. 60 cm des Profils mit Werten zwischen 4,74 % und 8,50 % TOC. Diese Ergebnisse sind deutlich höher als jene von EBLI et al. (1991), die Durchschnittsproben über ca. 20 bis 30 cm Profilstrecke für die Messungen verwendeten und Maximalwerte von 5,2 % TOC für die Sachrang-Subformation der Unkenener Mulde angeben. Die Schwarzschiefer im Wechsellagerungsbereich im Liegenden zeigen mit einem Höchstwert von 4,43 % TOC deutlich geringere Werte. Die TOC-Gehalte der Tonmergelhorizonte in diesem Profilverbereich bewegen sich zwischen 0,13 % und 0,53 % TOC. Die gemessenen Schwefelwerte schwanken zwischen Werten von 1,30 % und 11,79 % S ohne Präferenz über das gesamte Profil. Auch hier zeigen sich markante Unterschiede zu den Ergebnissen von EBLI et al. (1991), die für Schwefelwerte ihrer Proben eine Schwankungsbreite von 4,37 % bis 6,43 % S angeben. Der gute Erhaltungsgrad der organischen Substanz im Sediment sowie die hohen gemessenen Schwefelwerte lassen anaerobe und anoxische Bedingungen bei der Sedimentation der untersuchten Sedimentgesteine vermuten, wofür auch die geringe Bioturbidität der Abfolge und der geringe Organismengehalt (z. B. Schalenreste) der Abfolge sprechen. Durch das errechnete Verhältnis von organischem Kohlenstoff zu Schwefel (TOC/S) sind Aussagen über Faziesbereiche möglich (BERNER & RAISWELL, 1983). So ist ein TOC/S-Verhältniswert von  $<2,8$  ein Indikator für anoxische Bedingungen; ein TOC/S-Verhältniswert  $>2,8$  spricht für Frischwasserbedingungen. Mit Ausnahme einer Probe ergeben sich für alle Gesteine Werte  $<2,8$ , was laut obiger Definition die Annahme anoxischer Bedingungen zur Zeit der Ablagerung bestätigt. Außerdem kann anhand dieses Parameters eine Abnahme der anoxischen Bedingungen vom Liegenden zum Hangenden beobachtet werden.

Die aus den Ergebnissen der Rock Eval-Pyrolysen berechneten Wasserstoffindexwerte (HI) streuen zwischen 329,8 mgHC/gTOC und 622,7 mgHC/gTOC und zeigen somit das deutliche Kohlenwasserstoff-Generierungspotential der analysierten Schwarzschieferproben. Siebzehn der 23 analysierten Proben weisen dabei HI-Werte  $>500$  mgHC/gTOC auf. Die  $T_{max}$ -Werte (Pyrolysetemperatur, bei der die maximale Menge an Kohlenwasserstoffen freigesetzt wird) der untersuchten Proben variieren zwischen 428 °C und 441 °C und sind somit ein Indikator für eine geringe Maturität der Schwarzschiefer, was auch durch die CAI-Werte der unterlagernden Trias bestätigt wird (GAWLICK et al., 1994). Zusätzlich bestätigen auch die gemessenen Vitritreflexionswerte ( $R_m$ ) mit Werten von  $R_m = 0,51$  % bzw.  $R_m = 0,46$  % den unreifen Charakter der Proben. Mittels eines Diagramms der HI- gegen die  $T_{max}$ -Werte konnten die untersuchten Proben als Kerogentypen I/II klassifiziert werden.

Durch die Auswertung der Massenchromatogramme konnten in den untersuchten Proben aliphatische (n-Alkane, Isoprenoide Pristan und Phytan, Sterane, Methyl-Sterane, Diasterane, Hopane) und aromatische (Naphtalene, Methyl-Naphtalene, Alkyl-Naphtalene, Phenantrene, Methyl-Phenantrene, Dibenzothiophene, aromatische Steroide, Aryl-Isoprenoide) Kohlenwasserstoffe sowie NSO-Verbindungen und Asphaltene identifiziert werden.

Die Vorherrschaft von kurz-kettigen n-Alkanen (n-C<sub>15-19</sub>) in den untersuchten Proben ist laut CRANWELL (1977) ein deutlicher Indikator für überwiegend marinen Eintrag (z. B. Algen, Mikroorganismen) in das Sediment. Diese Annahme wird durch die vorherrschende Verteilung der C<sub>27</sub>-, C<sub>28</sub>- und C<sub>29</sub>-Sterane untermauert. Laut HUANG & MEINSCHEN (1979) sind C<sub>27</sub>-Sterane Indikator für marinen Ursprung des organischen Materials, C<sub>29</sub>-Sterane sprechen für terrigenen Eintrag. Die Proben aus dem Unkenbachtal stammen demnach aus einem offen marinen Sedimentationsbereich mit vor allem Plankton als Quelle des organischen Materials. Das Verhältnis der Sterane zu den Hopanen (Sterane/Hopane) kann verwendet werden, um Aussagen über die Herkunft des organischen Materials zu treffen (PETERS & MOLDOWAN, 1993). Auch dieser Verhältniswert spricht für ein marines Ablagerungsmilieu der untersuchten Proben. Die Berechnung des Verhältnisses der aromatischen

Kohlenwasserstoffe Dibenzothiophen zu Phenantren (DBT/Phen) kann Informationen über die Redoxbedingungen im Ablagerungsmilieu liefern. Durch Darstellung der beiden Verhältniswerte in einem Diagramm können somit Hinweise auf den Ablagerungsraum gewonnen werden (HUGHES et al., 1995). Die untersuchten Schwarzschieferproben entstammen demzufolge marinen Milieus und eher tonreichen Ablagerungsräumen. Das organische Material wurde in Sedimentgesteinen präserviert, in denen eine Reduktion des Sulfats erfolgte und der Schwefelwasserstoff in Pyrit umgewandelt wurde.

Die kohlenpetrographische Untersuchung von zwei Schwarzschieferproben resultiert in einer Zusammensetzung des organischen Materials aus hauptsächlich Lamalginit und nur sehr untergeordnet Telalginit. Zusätzlich sind Fischreste und sehr vereinzelt Sporen zu beobachten.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Gesteine der Sachrang-Subformation der Unkener Mulde auf Grund der gemessenen TOC-Gehalte und der berechneten HI-Werte unter den richtigen Bedingungen deutliches Potential zur Generierung von Kohlenwasserstoffen besitzen. Die Proben haben eine geringe Reife von 0,4 % bis 0,5 %  $R_m$  und somit noch nicht die Bereiche des Ölfensters erreicht. Das Hauptmineral der Proben ist Quarz, zusätzlich konnten Pyrit, Plagioklas, Dolomit, Calcit und Tonminerale (Illit, Chlorit) identifiziert werden. Die Ablagerungsbedingungen der Sedimente waren anaerob und anoxisch bis suboxisch. Das organische Material ist mariner Herkunft.

Diese Ergebnisse, in Zusammenhang mit der paläogeographischen Situation – die Jura-Sedimente der Unkener Mulde wurden in einem von der Ober-Trias ererbten Beckenbereich (Eiberg-Becken) abgelagert – sprechen ebenfalls dafür, dass ein Meeresspiegelanstieg allein nicht ausreichend ist das Schwarzschieferereignis im Alpenraum und speziell im Mittelabschnitt der Nördlichen Kalkalpen hinreichend zu erklären. Darüber hinaus ist im Zeitraum Ober-Pliensbachium bis Unter-Toarcium ein tektonisches Ereignis bekannt, das heute im Zusammenhang mit dem Beginn der Subduktion im Neotethys-Raum gesehen wird (GAWLICK et al., 2009; MISSONI & GAWLICK, 2011), gleichzeitig mit der Bildung der ersten ozeanischen Kruste im Pennin (RATSCHBACHER et al., 2004). Im Zuge dieses Ereignisses kam es auch zu Massenumlagerungen und Brekzienbildungen, wie diese auch im untersuchten Profil auftreten, und zur Ablagerung von Muttergesteinen in zentralen Beckenbereichen mit geringer Sedimentation.

## Literatur

- BERNER, R.A. & RAISWELL, R. (1983): Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over Phanerozoic time: A new theory. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 862–885.
- CRANWELL, P.A. (1977): Organic geochemistry of CamLoch (Shuterland) sediments. – *Chemical Geology*, 20, 205–221.
- EBLI, O. (1997): Sedimentation und Biofazies an passiven Kontinentalrändern: Lias und Dogger des Mittelabschnittes der Nördlichen Kalkalpen und des frühen Atlantik (DSDP site 547B, offshore Marokko). – *Münchner Geowiss. Abh., (A)*, 32, 1–255, 61 Figs., 39 Pls., 6 Pls. with geol. sections, München.
- EBLI, O. (1989): Foraminiferen und Coccolithen aus den Lias-Epsilon-Schiefern der Unkener Mulde (Tirolikum, Nördliche Kalkalpen). – *Mitt. Bayer. Staatsslg. Paläont. hist. Geol.*, 29, 61–83.
- EBLI, O. mit Beiträgen von DRAXLER, I., KLEIN, P., KODINA, L., LOBITZER, H. & SCHWAIGHOFER, B. (1991): Fazies, Paläontologie und organische Geochemie der Sachranger Schiefer (Untertoarcium) im Mittelabschnitt der Nördlichen Kalkalpen zwischen Isar und Saalach. – *Jb. Geol. B.-A.*, 134, 5–14, 1 Abb., 8 Tab., Wien.
- FRIMMEL, A. (2003): Hochauflösende Untersuchungen von Biomarkern an epikontinentalen Schwarzschiefern des Unteren Toarciums (Posidonienschiefer, Lias  $\epsilon$ ) von SW-Deutschland. – Dissertation, Universität Tübingen, Tübingen.
- GAWLICK, H.-J., KRYSZYN, L. & LEIN, R. (1994): Conodont colour alteration indices: Paleotemperatures and metamorphism in the Northern Calcareous Alps – a general view. – *Geol. Rdsch.*, 83, 660–664, Berlin – Heidelberg.

- GAWLICK, H.-J., MISSONI, S., SCHLAGINTWEIT, F., SUZUKI, H., FRISCH, W., KRYSZYN, L., BLAU, J. & LEIN, R. (2009): Jurassic Tectonostratigraphy of the Austroalpine domain. – *Journal of Alpine Geology*, 50, 1–152, Wien.
- HALLAM, A. (1981): A revised sea-level curve for the early Jurassic. – *Journal of the Geological Society*, 138, 735–743, London.
- HALLAM, A. (2001): A review of the broad pattern of Jurassic sea-level changes and their possible causes in the light of current knowledge. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 167, 23–37, Amsterdam.
- HAQ, B.U., HARDENBOL, J. & VAIL, P.R. (1988): Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. – In: WILGUS, C.K., HASTINGS, B.S., POSAMENTIER, H., WAGONER, J.V., ROSS, C.A. & KENDALL, C.G.S.C. (Hrsg.): *Sea-Level Changes – An Integrated Approach*. – *SEPM Special Publications*, 42, 71–108, Tulsa.
- HUANG, W.-Y. & MEINSCHNEIN, W.G. (1979): Sterols as ecological indicators. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43, 739–745.
- HUGHES, W.B., HOLBA, A.G. & DZOU, L.I.P. (1995): The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 3581–3598.
- JENKYNS, H.C. (1985): The Early Toarcian and Cenomanian–Turonian anoxic events in Europe: comparisons and contrasts. – *Geol. Rdsch.*, 74, 505–518, Stuttgart.
- JENKYNS, H.C. (1988): The early Toarcian (Jurassic) event: stratigraphy, sedimentary, and geochemical evidence. – *American Journal of Science*, 288, 101–151, New Haven.
- JENKYNS, H.C. & CLAYTON, Ch.J. (1986): Black shales and carbon isotopes in pelagic sediments from the Tethyan Lower Jurassic. – *Sedimentology*, 33, 87–106, 14 Figs., Oxford etc.
- JENKYNS, H.C. & CLAYTON, Ch.J. (1997): Lower Jurassic epicontinental carbonates and mudstones from England and Wales: chemostratigraphic signals and the early Toarcian anoxic event. – *Sedimentology*, 44, 687–706, Oxford.
- JENKYNS, H.C., GRÖCKE, D.R. & HESSELBO, S.P. (2001): Nitrogen isotope evidence for water mass denitrification during the early Toarcian (Jurassic) oceanic anoxic event. – *Paleoceanography*, 16, 1–11, Washington DC.
- MISSONI, S. & GAWLICK, H.-J. (2011): Jurassic mountain building and Mesozoic–Cenozoic geodynamic evolution of the Northern Calcareous Alps as proven in the Berchtesgaden Alps (Germany). – *Facies*, 57, 137–186, (Springer). DOI 10.1007/s10347-010-0225-1.
- PETERS, K.E. & MOLDOWAN, J.M. (1993): *The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments*. – 363 S., Prentice Hall, New Jersey.
- RATSCHBACHER, L., DINGELDEY, C., MILLER, C., HACKER, B.R. & MCWILLIAMS, M.O. (2004): Formation, subduction, and exhumation of Penninic oceanic crust in the Eastern Alps: time constraints from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology. – *Tectonophysics*, 394, 155–170.