

Die Evaporite des Haselgebirges als metamorphe Gesteine: Bildung, Umwandlung, Gefüge, Alter und Konsequenzen für die Struktur der Nördlichen Kalkalpen

FRANZ NEUBAUER (1), MANFRED BERNROIDER (1), CHRISTOPH LEITNER (1), ANJA SCHORN (1), THOMAS ZIEGLER (1) & JOHANN GENSER (1)

Kurzfassung

Das permische bis untertriassische Haselgebirge der Nördlichen Kalkalpen stellt eine tektonische Evaporitmélange dar und lässt sich in zwei Grundtypen unterteilen: Steinsalz- und Sulfat dominiertes Haselgebirge. Beide Typen sind mit Blöcken von, für eine Riftzone typischen, schwach metamorphen Alkalimagmatiten neben anderen Metamorphiten assoziiert. Biotite dieser Gesteine zeigen ein thermales Ereignis an der Perm-Trias-Grenze an. Die Evaporite selbst zeigen ausschließlich tektonische bzw. metamorphe, teilweise direkt datierbare Mikrogefüge. Ar-Ar-Datierungen von sekundärem Langbeinit aus Hall ergeben ein Alter von ca. 250 Ma und zeigen damit ebenfalls ein frühes diagenetisch-hydrothermales Ereignis an. Am bedeutendsten ist ein mittel- bis obertriassisches thermale Ereignis, gut erkennbar an Polyhalit in häufigen Extensionsgängen und Ersatzgefügen, die auf eine thermale Reaktivierung des Haselgebirges vermutlich an Abschiebungen bei der Öffnung des Meliata-Ozeans hinweisen. Als vorläufiges Modell wird eine mittel- bis obertriassische „Raft“-Tektonik postuliert, typisch für

passive Kontinentalränder mit Evaporiten, in dem das Haselgebirge als Gleithorizont der ozeanwärtig wandernden Sedimenthülle diente. Seltene oberjurassische geschieferte Polyhalite zeigen frühe tektonische Bewegungen an, während das Hauptereignis der verschieferten Polyhalite auf die spätunterkretazische Deckenbewegung zurückzuführen ist. Schließlich lässt sich eine eozäne schwachtemperierte Reaktivierung nachweisen sowie, mittels (U-Th)/He-Datierungen an Apatit, eine obermiozäne Hebung der zentralen Nördlichen Kalkalpen. Die Steinsalzmikrogefüge selbst zeigen hohe Verformungsraten und sind das Produkt neogener bis quartärer Bewegung.

Einführung

Innerhalb der Schichtfolgen der Nördlichen Kalkalpen (NKA) spielt das Haselgebirge mit seinen Evaporiten und Tonsteinen eine besondere Rolle. Das oberpermische bis untertriassische Haselgebirge (KLAUS, 1965) bildet in der Regel kissenartige tektonische Körper längs von Deckengrenzen, diente als Gleithorizont bei Deckenbewegungen innerhalb der NKA und wird sehr häufig mit den ju-

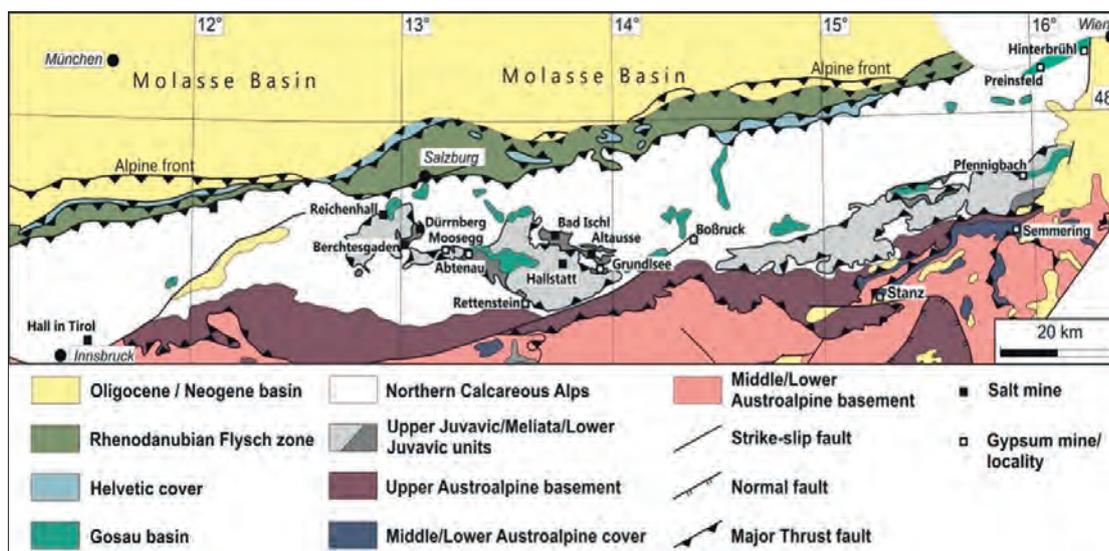


Abb. 1. Verbreitung des Haselgebirges in den zentralen und östlichen Nördlichen Kalkalpen (NKA). Dargestellt sind Salzbergwerke und Gips-/Anhydritbrüche.

(1) Universität Salzburg, Fachbereich Geographie und Geologie, Abteilung Geologie, Hellbrunnerstraße 34, 5020 Salzburg. franz.neubauer@sbg.ac.at

vavischen Decken (mit Hallstätter Kalken und Werfener Schichten) in Verbindung gebracht (Abb. 1) und wird seit mindestens 3.500 Jahren zur Steinsalzgewinnung genutzt – siehe z.B. MANDL (1982) und TOLLMANN (1985, 1987).

Nach den auf Bergbauarbeiten basierenden, durch SCHAUBERGER (1986) zusammengefassten Arbeiten hat sich insbesondere Spötl in vielen detaillierten Arbeiten mit verschiedenen Arbeiten zur Sedimentologie und Diagenese des Haselgebirges befasst (z.B. SPÖTL, 1989; SPÖTL & PAK, 1996; SPÖTL et al., 1996, 1998). Zusätzlich fanden assoziierte basaltische und wenige andere metamorphe Gesteine großes Interesse (z.B. KIRCHNER, 1979, 1980a, b; VOZÁROVA et al., 1999) wie auch der Mineralreichtum (KIRCHNER, 1987; STRASSER, 1989). Das Haselgebirge wurde auch immer wieder als verantwortlich für jurassische Gleittektonik innerhalb der NKA interpretiert (MANDL, 1982; TOLLMANN, 1987; MISSONI & GAWLICK, 2011a, b). In den letzten fünf Jahren wurden im Rahmen des FWF-Projektes „Polyhalit“ zahlreiche detaillierte Untersuchungen an den Gefügen der verschiedenen Evaporitminerale (Steinsalz, Polyhalit, Langbeinit, Anhydrit und Gips) an kristallinen magmatischen und metamorphen Gesteinen, die in Form von tektonischen Blöcken innerhalb des Haselgebirges erhalten sind, ausgeführt. Diese Untersuchungen wurden durch umfangreiche Ar-Ar-Altersdatierungen an den Evaporitmineralen Polyhalit und Langbeinit sowie an Biotit und Helliglimmer kristalliner Gesteine und wenige (U-Th)/He-Datierungen an Apatit ergänzt, die zusammen

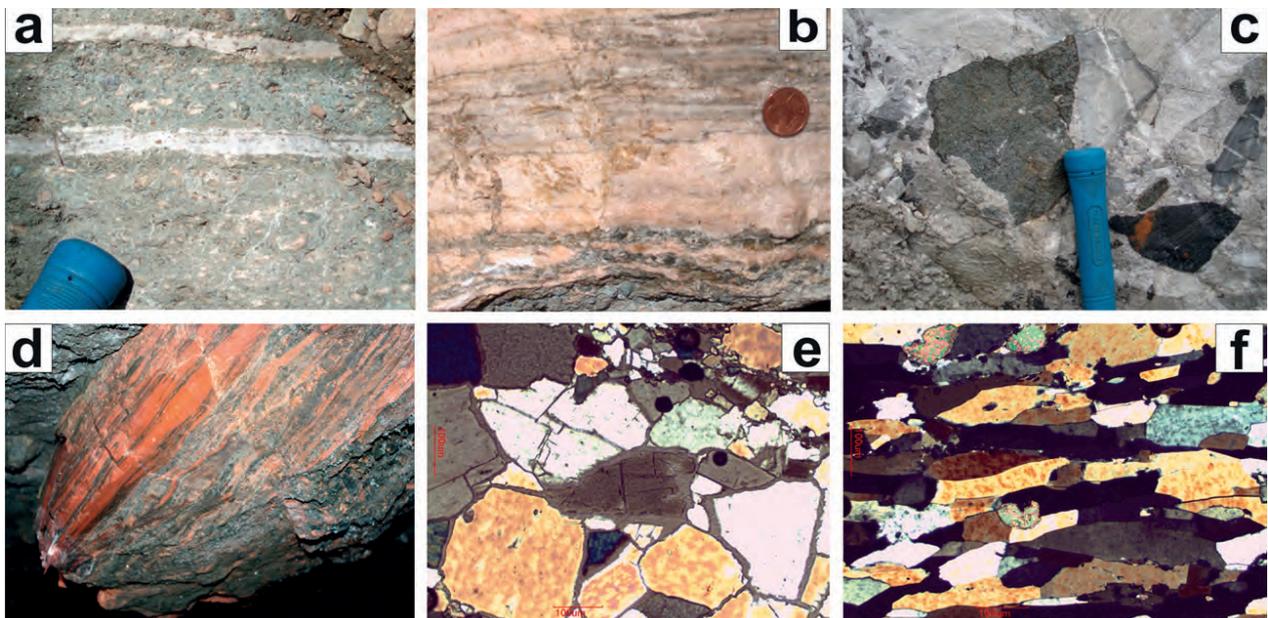
mit wenigen älteren Apatit-Spaltspuralter (HEJL & GRUNDMANN, 1989), Aussagen zur thermischen Geschichte und Hebung der zentralen NKA erlauben. Dazu kommen Arbeiten zur strukturellen Stellung der Haselgebirgskörper im Deckenbau sowie zu Mikrogefügen der verschiedenen Gesteine. Ein größerer Teil der Untersuchungen ist publiziert (LEITNER & NEUBAUER, 2011; LEITNER et al., 2011, 2013, 2014; SCHORN & NEUBAUER, 2011, 2014; SCHORN et al., 2013a, b). Weitere wichtige Teilergebnisse finden sich noch in einer nur teilweise veröffentlichten Dissertation (SCHORN, 2013) und einer Masterarbeit (ZIEGLER, 2014). Zusätzlich harren noch weitere Ergebnisse und Erkenntnisse der endgültigen Darstellung in Publikationen (z.B. Mineralogie der Magmatite, z.B. BERNROIDER et al. (2017), chemische Zusammensetzung der Sulfate, verschiedene Altersdatierungen, Ergebnisse zur Struktur und Geodynamik der Kalkalpen).

Lithologien

Basierend auf der lithologischen Zusammensetzung lässt sich das Haselgebirge im Prinzip in zwei

Abb. 2.

Einige typische Lithologien des Haselgebirges. a, b: Geschieferetes Haselgebirge in Oberflächenaufschlüssen am Südhang des Rettensteins. c: Dioritblock in Gips vom Bruch Moosegg. d: Geschieferter Polyhalitblock von Hallstatt. e: Anhydritmikrogefüge mit sammelkristallisiertem körnigem, äquidimensionalem Anhydrit. An den Kornrändern entwickeln sich Gipskristalle (grau). f: Gelängte Anhydritkristalle mit einem sehr gut ausgebildeten Schieferungsgefüge in einem S-L-Tektonit. Die Abbildungen e und f sind von Proben von Moosegg.



große Gruppen einteilen: von Steinsalz dominiertes Haselgebirge und Sulfat dominiertes Haselgebirge. Beide Typen zeigen die Gefüge einer tektonischen Mélange, in der primäre sedimentäre Merkmale nur selten in größeren Schollen zu finden sind (Abb. 2a–d). Das Steinsalz dominierte Haselgebirge findet sich in den zentralen NKA von Hall in Tirol bis zum Salzkammergut. Es besteht aus einer variablen Mischung von Steinsalz und Tonstein, in die verschiedene, Dezimeter bis Zehnermeter große Blöcke aus Anhydrit/Gips-, Polyhalit- und kristallinen Gesteinen eingeschaltet sind. Dazu kommen mehrere hundert Meter lange Schollen von Kalken (SCHAUBERGER, 1986). Sulfat dominiertes Haselgebirge kommt im südlichen Salzkammergut vor und dominiert die östlichen NKA. Die Unterschiede zum Salz dominierten Haselgebirge bestehen darin, dass Tonsteine im Sulfat dominierten Haselgebirge zurücktreten und andere Sulfate als Gips/Anhydrit sehr selten sind. Dagegen kommen mafische magmatische Einlagerungen in beiden Typen durchaus häufig vor und sind im Haselgebirge von Salzburg ostwärts verbreitet.

Gefüge des Haselgebirges

Steinsalz in salzreichem Haselgebirge ist feinkörnig und zeigt bedingt durch Einlagerungen verschiedene Färbungen. Die Bänderung ist immer eine Schieferung. Die Mikrogefüge zeigen Subkornbildung, häufig Drucklösung an Korngrenzen und zeigen sehr hohe Verformungsraten (10^{-10} bis 10^{-9} s⁻¹; LEITNER et al., 2011) der altbekannten duktilen Verformung des Salzes an. SCHORN & NEUBAUER (2014) berechneten aus der Verfor-

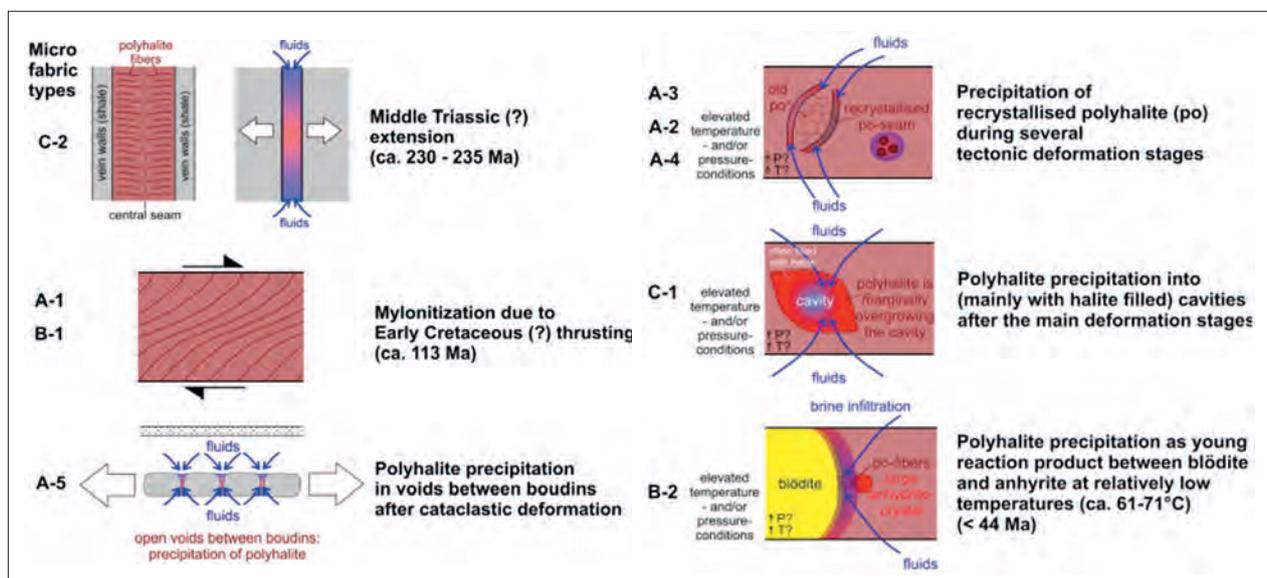
mung von Bohrlöchern eine Verformungsrate von 8×10^{-10} s⁻¹ für die letzten fünfzig Jahre.

An Sulfatmineralen sind die datierbaren Sulfatminerale Polyhalit [$K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$] und Langbeinit [$K_2Mg_2(SO_4)_3$] des Haselgebirges besonders interessant. Alle Salz- und Sulfat dominierten Haselgebirgsvorkommen der zentralen Nördlichen Kalkalpen haben Temperaturen erlebt, die teilweise über den Diagenese- und Metamorphosetemperaturen der unterlagernden Nebengesteine zu liegen scheinen. Illitkristallinität zeigt eine Temperatur von ca. 200° C an (Zusammenfassung in LEITNER et al., 2014). Der Temperaturhöhepunkt der metamorphen Überprägung liegt bei ca. 180° C im Berchtesgadener Bergwerk (Vitrinitreflexion, Flüssigkeitseinschlüsse) und bei ca. 240° C in Altaussee (Flüssigkeitseinschlüsse) (RANTITSCH & RUSSEGER, 2005, und Literatur). Die Temperaturen des Haselgebirges blieben unterhalb von 255° C, bei der Polyhalit zu dehydrieren beginnt (WOLLMANN et al., 2008).

Polyhalit zeigt eine Reihe von Mikrogefügen, die auf mehrere Grundtypen zurückzuführen sind (LEITNER et al., 2013; SCHORN et al., 2013a): (1) Typen, die eine metasomatische Entstehung anzeigen, (2) solche, die auf hydrothermale Beeinflussung zurückgehen, (3) Dehnungsgänge mit grobkörnigen Polyhalit während regionalen Dehnungsereignissen und (4) geschieferte, feinkör-

Abb. 3.

Typische, zeitlich geordnete Mikrogefüge der verschiedenen Polyhalittypen des Haselgebirges des Salzbergwerkes Hallstatt (nach SCHORN et al., 2013a: Fig. 12 verändert, CC BY-NC-ND 3.0).



nige Polyhalitgesteine (Abb. 3). Die Typen (1) bis (3) zeigen ihre Entstehung durch eine intensive Wechselwirkung von Evaporiten und Fluids an, die in verschiedenen Stadien bei verschiedenen Temperaturen stattgefunden hat.

Auch Anhydritgesteine zeigen ausschließlich metamorphe Gefüge. Nach Experimenten wird Gips bei einer Temperatur von ca. 100° C zu Bassanit [CaSO₄(H₂O)0.5] und Bassanit bei ca. 140° C in Anhydrit umgewandelt (BRANTUT et al., 2011). Die oben erwähnten Temperaturen schließen daher aus, dass primärer sedimentärer Gips erhalten ist. Bei den Untersuchungen an Anhydrit sind eine Reihe von Mikrogefügen nachweisbar, die alle metamorphen Ursprungs sind. Neben körnigen, äquidimensionalen Anhydriten mit schlichter Sammelkristallisation (Abb. 2e) sind S-L-Anhydrittekonite mit gelängten und geregelten Anhydritkristallen sehr häufig (Abb. 2f).

Kristalline Blöcke

Während frühere Untersuchungen von hauptsächlich basaltischen vulkanischen Gesteinen ausgegangen sind (ZIRKL, 1957; KIRCHNER, 1979, 1980a), zeigen neue Untersuchungen eine große Bandbreite von plutonischen, vulkanischen und verschiedenen Typen von metamorphen Gestei-

nen. Es kann auf jeden Fall eine Suite plutonischer Gesteine erkannt werden, die im Gipsbruch Moosegg folgende Gesteinstypen umfasst (SCHORN et al., 2013b): (1) Biotitdiorite, (2) Metadolerite, (3) Metasyenite, (4) metadoleritische Blauschiefer und (5) Ultramafitite. In anderen Zonen, z.B. in verschiedenen Salzbergwerken (Hallstatt, Bad Ischl) und in Gipsbrüchen (Grundlsee), in der Umgebung von Abtenau, aber auch in Oberflächenaufschlüssen kommen basaltische vulkanische Gesteine vor (ZIRKL, 1957; KIRCHNER, 1979, 1980a; ZIEGLER, 2014). Zusammengenommen, basierend auf Geochemie (Abb. 4), zeigen sowohl die vulkanischen wie plutonischen Gesteine eine mild alkalische mafische bis intermediäre Gesteinsassoziation an, während sich auch tholeitische mafische Gesteine (Grundlsee) nachweisen lassen. Altersdatierungen an gut erhaltenem Biotit der plutonischen Gesteine ergaben durchwegs Alter um ca. 250 Ma (Abb. 5) und zeigen damit ein signifikantes thermales Ereignis an der Perm-Trias-Grenze an (SCHORN et al., 2013b).

Metamorphe Blöcke

Zu den plutonischen und vulkanischen Blöcken treten seltenere Metamorphite, worunter sehr rare, feinkörnige, wegen der Feinkörnigkeit der Serizit führenden Matrix bisher nicht datierbare porphyroblastische Blauschiefer (Glaukophan als Porphyroblasten) besonders herausragen (siehe BERNROIDER et al., 2017). Im Gipsbruch Moosegg haben häufige metadoleritische Blauschiefer gut

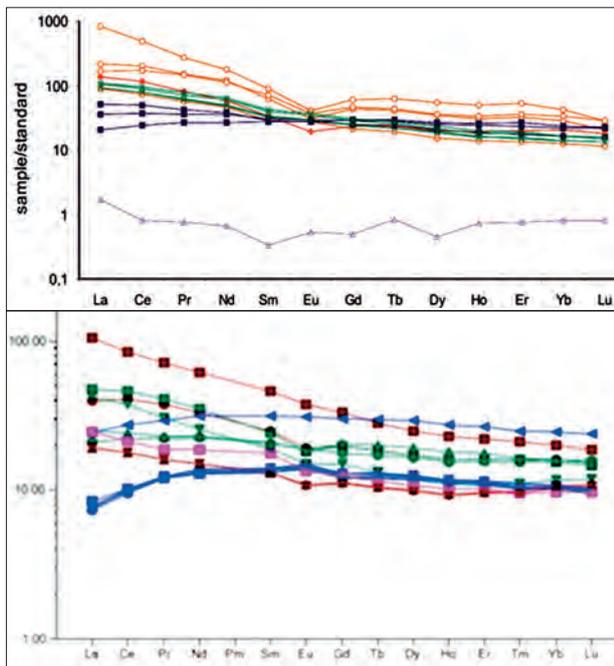


Abb. 4. Seltene Erdementmuster von mafischen und selteneren intermediären Magmatiten des Haselgebirges. Oben: Plutonische Gesteine von Moosegg (SCHORN et al., 2013b: Fig. 7c verändert, CC BY-NC-ND 3.0). Unten: Metabasaltische Gesteine vom Gipsbruch Grundlsee (ZIEGLER, 2014).

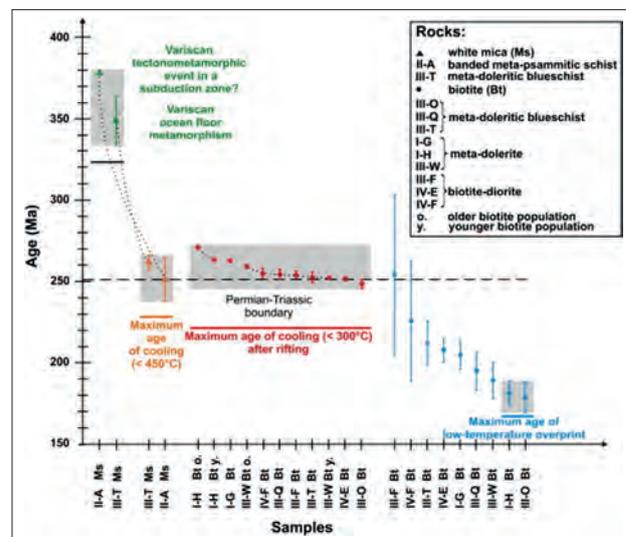


Abb. 5. Übersicht über Ar-Ar-Alter magmatischer und metamorpher Gesteine des Haselgebirges vom Gipsbruch Moosegg (SCHORN et al., 2013b: Fig. 10, CC BY-NC-ND 3.0).

erhaltene magmatische Gefüge, wobei magmatische Minerale metamorphe Anwachssäume aufweisen, die variszisch gebildet wurden (Abb. 5).

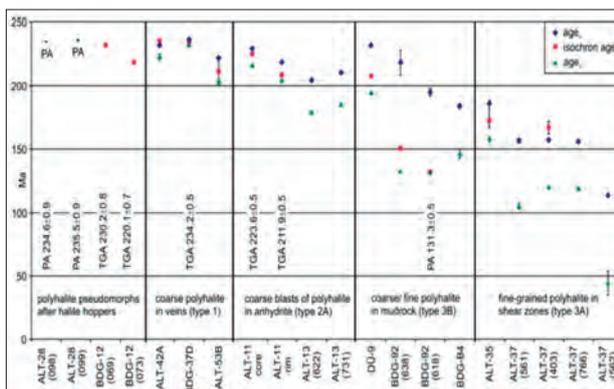
Zusätzlich konnten gebänderte metasedimentäre Schiefer und Gneise identifiziert werden, wobei Hellglimmer schlecht definierte variszische Alter ergeben haben (Abb. 5). Proben von sehr feinkörnigen Blauschiefern von einem aufgelassenen Steinbruch in Weitenau bei Moosegg dürften ein mesozoisches Alter haben.

Datierung von Polyhalit und Langbeinit

Die Minerale Langbeinit und Polyhalit von verschiedenen Lokalitäten wurden mit Hilfe der Ar-Ar-Methode datiert (Abb. 6). Ein einzelnes Plateaualter von Langbeinit aus der Salzlagerstätte Hall in Tirol ergab ca. 250 Ma und ist das einzige Alter, das nahe am angenommenen primären Alter des Haselgebirges liegt. An Polyhalit wurden vier verschiedene Altersgruppen erkannt (LEITNER et al., 2013, 2014), umfangreiche Daten insbesondere von Hallstatt sind noch nicht publiziert. (1) Grobkörniger Polyhalit in Dehnungsgängen, große Pseudomorphosen von Polyhalit nach Steinsalz und Polyhalitgängen um rigide Porphyroklasten (z.B. um Anhydrit) ergaben Ar-Ar-Alter von ca. 235 bis 210 Ma (LEITNER et al., 2014). (2) Einige wenige Proben von relativ grobkörnigen Polyhalitmyloniten ergaben meist nicht sehr präzise definierte Alter um ca. 150 Ma. (3) Feinkörnige, stark geschieferte Polyhalitgesteine ergaben Alter um 110 Ma, wobei die Stufenmuster der Ar-Ar-Experimente (4) eine jüngere Überprägung um ca. 43 Ma angeben. Alle diese Polyhalitalter haben eine geologische Bedeutung, wobei die Alter um 235 bis 210 Ma das wesentliche Ereignis, nämlich

Abb. 6.

Übersicht über Polyhalit-Ar-Ar-Alter des Haselgebirges (aus LEITNER et al., 2014: Tab. 3). PA – plateau age, TGA – total gas age.



weitestgehend mittel- bis obertriassische Kristallisation von Polyhalit, widerspiegeln. Diese Kristallisation geht wahrscheinlich auf Hydrothermaltätigkeit längs von Abschiebungen, die wohl auch das Haselgebirge durchschnitten haben, zurück. Sehr untergeordnet sind die drei Überprägungsereignisse um 160–150, 110 und 43 Ma.

Bildung des Haselgebirges in einer Riftzone

Wir interpretieren die Bildung der vulkanischen und plutonischen, mild alkalischen mafischen Gesteinsassoziation zusammen mit den Evaporiten des Haselgebirges als fortgeschrittenes Stadium einer Riftzone. Dabei stellen am Südrand der NKA aufgeschlossene, unterlagernde, sehr mächtige oberkarbonische(?) bis permische terrestrische klastische Sedimente die Synriftphase dar, der die lagunären Evaporite und Magmatite des Haselgebirges folgen (Modell in Abbildung 7).

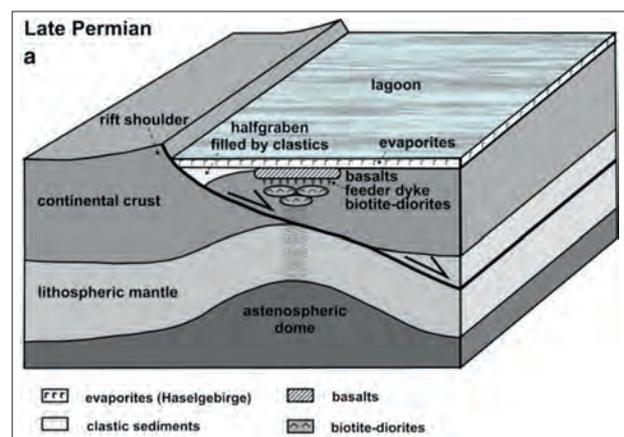


Abb. 7.

Modell einer Riftzone mit Bildung der magmatischen Gesteine zusammen mit den Evaporiten des Haselgebirges (aus SCHORN et al., 2013b: Fig. 11a, CC BY-NC-ND 3.0).

Mittel- bis obertriassische „Raft“-Tektonik

Wir postulieren als vorläufiges Modell eine mittel- bis obertriassische „Raft“-Tektonik, typisch für passive Kontinentalränder mit Evaporiten (z.B. HUDEC & JACKSON, 2006, 2007; WARREN, 2016), in dem das Haselgebirge als Gleithorizont der ozeanwärtig wandernden Sedimenthülle diente (Abb. 8). Die Bewegung wird durch die Mächtigkeitsunterschiede der überlagernden karbonatischen Schichtfolgen ausgelöst, insbesondere durch die große Überlagerung durch die Dachsteinkarbonatplattform, wodurch das evaporitische Haselgebirge seewärts in Richtung geringmächtiger überlagernder Schichtfolgen gedrückt wurde. Das erklärt den

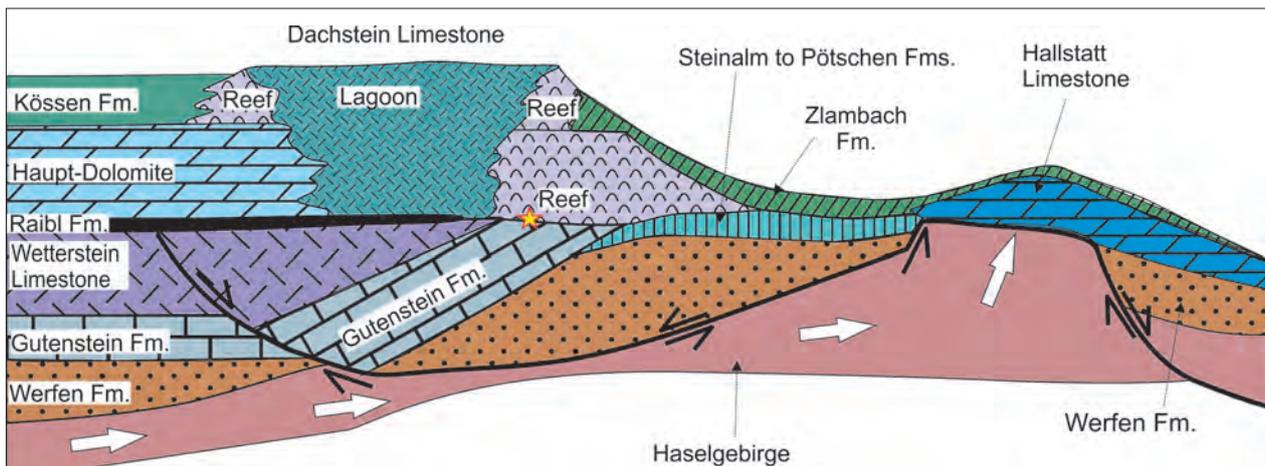


Abb. 8. Vorläufiges paläogeografisches Modell der „Raft“-Tektonik zur Erklärung des Zusammenhanges des Haselgebirges mit geringmächtigen Hallstätter Kalken (paläogeographisches Profil stark vereinfacht nach MANDL, 1982, 2000, das hier im Sinne der „Raft“-Tektonik tektonisch neu interpretiert wird). Der rotgelbe Stern gibt eine Situation am Südrand des Tennengebirges wieder, wo Dachstein-Riffkalk mit diskordantem Kontakt direkt auf Gutensteiner Kalk lagert.

nicht notwendiger Weise primären Zusammenhang zwischen Haselgebirge, Werfener Schichten und den geringmächtigen Hallstätter Kalken (siehe auch MANDL, 1982, 2000). Das Haselgebirge diente als Gleitbahn für das triassische „Rafting“ und ist damit weitestgehend allochthon und erklärt auch die von MANDL (1982, 2000) postulierte Paläogeografie der Mittel- bzw. Obertrias der zentralen NKA. Zuletzt wurden auch Kippblöcke am Südrand des Tennengebirges identifiziert (eigene Beobachtungen; siehe auch Abbildung 8), die wahrscheinlich ein Ausdruck des „Raftings“ bzw. der Bildung des passiven Kontinentalrandes zum Meliata-Ozeans sind.

Struktur der zentralen NKA unter Einfluss des Haselgebirges

Salz und Sulfat dominiertes Haselgebirge zeigen ein grundsätzlich verschiedenes Strukturenssemble. Steinsalz dominiertes Haselgebirge bildet unregelmäßig kissen- und diapirartige Körper, in denen das Salz wegen der geringen Festigkeit sehr stark angereichert ist (Abb. 9, Section 1, für Bad Ischl). Andere Beispiele sind Hall, Berchtesgaden, Dürrnberg, Altaussee und Hallstatt. Sulfat dominiertes Haselgebirge kommt häufig als Abscherhorizont an der Basis von tektonischen Decken vor und bildet subkoncordante Lagen längs der Deckenbahnen. Charakteristische Profile sind solche von Abte- nau, Moosegg oder vom Ostrand der NKA (Abb. 9,

Section 2), wobei es sich meist um altpaläozoische Decken mit der Platznahme an der Grenze von der Unter- zur Oberkreide handelt. Die Platznahme der Decken dürfte zeitgleich mit der altpaläozoischen Metamorphose abgelaufen sein, obwohl durchaus ältere Gefüge in Blöcken innerhalb der tektonischen Mélange erhalten geblieben sind.

Eine dritte Situation ist die am Rettenstein südwestlich des Dachsteinmassivs (Abb. 1), wobei Haselgebirge der grünschieferfazial metamorphen Grauwackenzone und auflagernden permisch bis anisichen, ebenfalls metamorphen Deckengebirgsgesteinen aufliegt und von unmetamorphen Juragesteinen (Allgäu-Formation – Liasfleckenmergel, Adneter Kalk und Plassen-Kalk) (MEISTER & BÖHM, 1993; AUER et al., 2009) (Abb. 10) überlagert wird. Hier liegt also das unmetamorphe Rettenstein-Allochthon auf einer metamorphen Schichtfolge (mit unterkretazischem Metamorphosealter: FRANK & SCHLAGER, 2006) und lässt sich daher nur durch eine subhorizontale duktile Abschiebung („Rettenstein detachment“) mit dem Haselgebirge als Scherhorizont erklären.

Zusammenfassung der geologischen Entwicklung

Das evaporitische permisch bis untertriassische Haselgebirge der NKA stellt eine tektonische Evaporitmélange dar und die zwei Grundtypen, Steinsalz- und Sulfat dominiertes Haselgebirge, zeigen eine regionale Tendenz, nämlich dominant Salz in den zentralen NKA und dominant Sulfate im Ostteil der NKA. Die damit assoziierten mafischen und intermediären vulkanischen und plutonischen Gesteine sind wohl syngenetisch gebildet oder wurden beim Deckentransport ebenso wie seltene metamorphe Gesteine (z.B. variszisch metamorphe Metadolerite) mitgenommen. Dieser

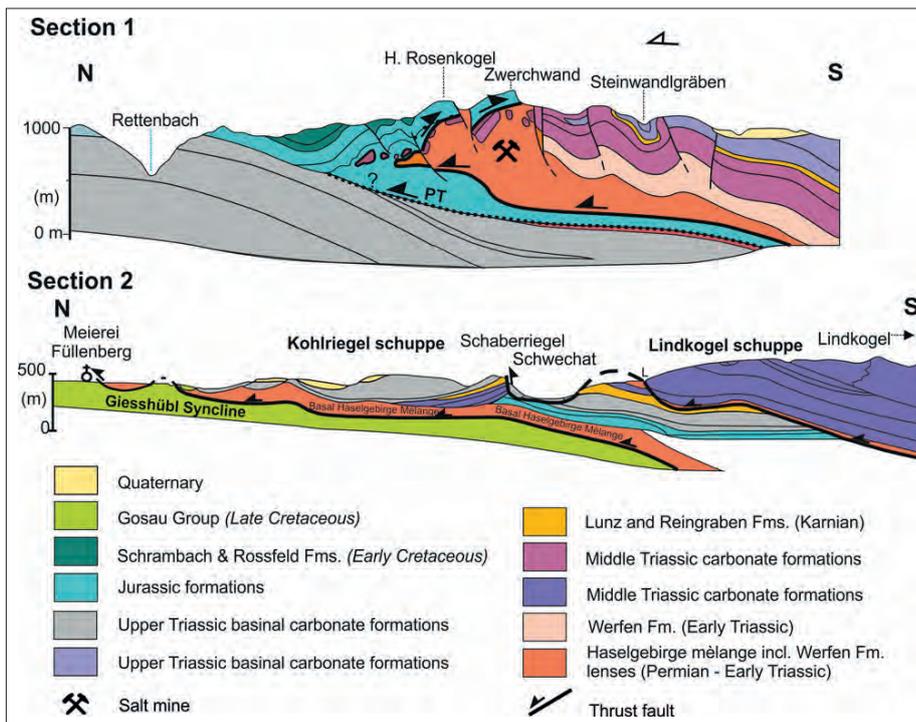


Abb. 9. Zwei charakteristische geologische Profile des Haselgebirges. Section 1: Salz dominiertes Haselgebirge bei Bad Ischl (nach MANDL et al., 2012) als potenzielle kompressive Dreiecksstruktur neu interpretiert. PT – potenzielle Überschiebung. Das Profil von MANDL et al. (2012: Taf. 2, Profil C) wurde reinterpretiert und lässt sich auch als konvergente Dreiecksstruktur an der Spitze eines Deckenkörpers aus Gesteinen der Hallstatt-Fazies erklären, wobei die Bewegung gegen Nord gerichtet ist. Section 2: Sulfat dominiertes Haselgebirge als Scherhorizont an Deckenbahnen (ohne Bildung von kissenartigen Verdickungen) am Alpenstrand (nach WESSELY, 2006).

Typ an oberpermischen, mild alkalischen magmatischen Gesteinen ist in den Ostalpen sehr selten, kann eventuell mit Alkaligabbros in Eisenkappel (MILLER et al., 2011) oder mit mafischen permischen Magmatiten im Gailtalkristallin verglichen werden (eigene unveröffentlichte Daten). Die Evaporite selbst zeigen ausschließlich tektonische bzw. metamorphe, teilweise direkt datierbare Mikrogefüge, die wohl im Zuge multipler Ereignisse gebildet wurden. Da Langbeinit aus Hall mit dem Alter von ca. 250 Ma nur sekundär sein kann, ist bereits ein

sehr frühes Wärmeereignis wahrscheinlich. Dieses Ereignis wird letztlich auch durch die häufigen Biotitabkühlalter angezeigt (Abb. 5).

Die bedeutenden mittel- bis obertriassischen Gang-, Hohlraumfüllungen und Ersatzgefüge von Polyhalit weisen auf umfangreiche hydrothermale Reaktivierung des Haselgebirges hin, die wir mit vermuteten Abschiebungen am passiven Kontinentalrand bei der Öffnung des Meliata-Ozeans in Beziehung setzen. Seltene oberjurassische geschieferte Polyhalite zeigen frühe tektonische

Abb. 10. Duktile subhorizontale Abschiebung („Rettenstein detachment“), wobei das unmetamorphe Rettenstein-Allochthon mit dem Haselgebirge über metamorphen permischen bis mitteltriassischen Schichtfolgen der Werfener Schuppenzone liegt.



Bewegungen an, während das Hauptereignis der verschieferten Polyhalite auf die spätunterkretazische Deckenbewegung zurückzuführen ist. Insgesamt sind weitere strukturelle Arbeiten an den Sulfatschollen notwendig, um Oberjura- von Unterkreidetektonik zu trennen.

Wahrscheinlich ist wohl auch eine geodynamische Neuinterpretation nötig (z.B. MISSONI & GAWLICK, 2011a, b), da mittel- und obertriassische Prozesse („Raft“-Tektonik) wie auch strukturelle Eigenheiten wie Bewegungssinn nach Süden bis Südosten während der Öffnung des Meliata-Ozeans bzw. gegen Norden/Nordwesten und spätere, gegen das Vorland gerichtete Überschiebungen bisher kaum in Betracht gezogen wurden. Schließlich lässt sich eine eozäne schwachtemperierte Reaktivierung an Polyhalit nachweisen, die auch paläomagnetisch erfassbar ist (PUEYO et al., 2007). (U-Th)/He-Alter an Apatit der Magmatite weisen auf eine obermiozäne Hebung der zentralen NKA hin und führten letztlich zur Abtragung der Augenstein-Landschaft. Die dominierenden Steilsalzgefüge könnten wegen der nachgewiesenen hohen Verformungsraten 8×10^{-10} [s⁻¹] schließlich ganz junge, neogene und quartäre tektonische und eventuell auch gravitative Prozesse spiegeln.

Danksagung

Das Projekt „Polyhalit“ wurde großzügig durch den Wissenschaftsfond FWF unterstützt (Projekt-Nr. P22.728), wofür herzlich gedankt sei. Wir danken Herrn Gerhard W. Mandl für einige Anregungen und Korrekturen. Wir bedanken uns bei der Salinen Austria AG und Südsalz GmbH für die Erlaubnis der Untertageuntersuchungen und der Moldan GesmbH und Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH für die Erlaubnis, Untersuchungen in den Gipsbrüchen durchführen zu dürfen.

Literatur

AUER, M., GAWLICK, H.-J., SUZUKI, H. & SCHLAGINTWEIT, F. (2009): Spatial and temporal development of siliceous basin and shallow-water carbonate sedimentation in Oxfordian Northern Calcareous Alps. – *Facies*, **55**, 63–87, Berlin.

BERNROIDER, M., NEUBAUER, F., SCHORN A. & ZIEGLER, T. (2017): Mineralogy and petrology of magmatic and metamorphic rocks in the Permian–Lower Triassic Haselgebirge of the Eastern Alps: geodynamic implications. – Tagungsband zur Arbeitstagung der GBA 2017, 243–244, Wien.

BRANTUT, N., HAN, R., SHIMAMOTO, T., FINDLING, N. & SCHUBNEL, A. (2011): Fast slip with inhibited temperature rise due to mineral dehydration: Evidence from experiments on gypsum. – *Geology*, **39**, 59–62, Boulder.

FRANK, W. & SCHLAGER, W. (2006): Jurassic strike slip versus subduction in the Eastern Alps. – *International Journal of Earth Sciences*, **95**, 431–450, Berlin.

HEJL, E. & GRUNDMANN, G. (1989): Apatit-Spaltspurendaten zur thermischen Geschichte der Nördlichen Kalkalpen, der Flysch- und Molassezone. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **132**, 191–212, Wien.

HUDEC, M.R. & JACKSON, M.P.A. (2006): Advance of allochthonous salt sheets in passive margins and orogens. – *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **90**, 1535–1564, Tulsa.

HUDEC, M.R. & JACKSON, M.P.A. (2007): Terra Infirma: Understanding Salt Tectonics. – *Earth Science Reviews*, **82**, 1–28, Amsterdam.

KIRCHNER, E. (1979): Pumpellyitführende Kissenlavabreccien in der Gips-Anhydrit-Lagerstätte von Wienern am Grundsee, Steiermark. – *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **26**, 149–162, Wien.

KIRCHNER, E. (1980a): Vulkanite aus dem Permoskyth der Nördlichen Kalkalpen und ihre Metamorphose. – *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, **71/72**, 385–396, Wien.

KIRCHNER, E. (1980b): Natriumamphibole und Natriumpyroxene als Mineralneubildungen in Sedimenten und basischen Vulkaniten aus dem Permoskyth der Nördlichen Kalkalpen. – *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, **1980**, 249–279, Wien.

KIRCHNER, E. (1987): Die Mineral- und Gesteinsvorkommen in den Gipslagerstätten der Lammermasse, innerhalb der Hallstattzone, Salzburg. – *Jahrbuch Haus der Natur*, **10**, 156–167, Salzburg.

KLAUS, W. (1965): Zur Einstufung alpiner Salztone mittels Sporen. – *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, Sonderheft G*, 288–292, Wien.

LEITNER, C. & NEUBAUER, F. (2011): Tectonic significance of structures within the salt deposits Altaussee and Berchtesgaden-Bad Dürrenberg, Northern Calcareous Alps. – *Austrian Journal of Earth Sciences*, **104/2**, 2–21, Wien.

LEITNER, C., NEUBAUER, F., URAI, J.L. & SCHÖNHERR, J. (2011): Structure and Evolution of a Rocksalt-Mudrock-Tectonite: the Haselgebirge in the Northern Calcareous Alps. – *Journal of Structural Geology*, **33**, 970–984, Amsterdam. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2011.02.008>.

LEITNER, C., NEUBAUER, F., MARSCHALLINGER, R., GENSER, J. & BERNROIDER, M. (2013): Origin of deformed halite hopper crystals, pseudomorphic anhydrite cubes and polyhalite in Alpine evaporites (Austria, Germany). – *International Journal of Earth Sciences*, **102**, 813–829, Berlin.

LEITNER, C., NEUBAUER, F., GENSER, J., BOROJEVIĆ-ŠOŠTARIĆ, S. & RANTITSCH, G. (2014): ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of crystallisation and recrystallisation of rock-forming polyhalite in Alpine rock-salt deposit. – In: JOURDAN, F., MARK, D.F. & VERATI, C. (Eds.): *Advances in ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating from Archaeology to Planetary Sciences*. – *Geological Society Special Publications*, **378**, 207–224, London. DOI: <https://dx.doi.org/10.1144/SP378.5>.

- MANDL, G.W. (1982): Jurassische Gleittektonik im Bereich der Hallstätter Zone zwischen Bad Ischl und Bad Aussee (Salzkammergut Österreich). – Mitteilungen der Gesellschaft der Geologie- und Bergbaustudenten in Österreich, **28**, 55–76, Wien.
- MANDL, G.W. (2000): The Alpine Sector of the Tethyan shelf – Example of Triassic to Jurassic sedimentation and deformation from the Northern Calcareous Alps. – Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft, **92**, 61–77, Wien.
- MANDL, G.W., HUSEN VAN, D. & LOBITZER, H. (Eds.) (2012): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000, Erläuterungen zu Blatt 96 Bad Ischl. – 215 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.
- MEISTER, C. & BÖHM, F. (1993): Austroalpine Liassic Ammonites from the Adnet Formation (Northern Calcareous Alps). – Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, **136**, 163–211, Wien.
- MILLER, C., THÖNI, M., GOESSLER, W. & TESSADRI, R. (2011): Origin and age of the Eisenkappel gabbro to granite suite (Carinthia, SE Austrian Alps). – Lithos, **125**, 434–448, Amsterdam.
- MISSONI, S. & GAWLICK, H.-J. (2011a): Evidence for Jurassic subduction from the Northern Calcareous Alps (Berchtesgaden; Austroalpine, Germany). – International Journal of Earth Sciences, **100**, 1605–1631, Berlin.
- MISSONI, S. & GAWLICK, H.-J. (2011b): Jurassic mountain building and Mesozoic-Cenozoic geodynamic evolution of the Northern Calcareous Alps as proven in the Berchtesgaden Alps (Germany). – Facies, **57**, 137–186, Berlin.
- PUEYO, E.L., MAURITSCH, H.J., GAWLICK, H.-J., SCHOLGER, R. & FRISCH, W. (2007): New evidence for block 666 and thrust sheet rotations in the central northern Calcareous Alps deduced from two pervasive remagnetization events. – Tectonics, **26**, TC5011, Washington, D.C.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1029/2006TC001965>.
- RANTITSCH, G. & RUSSEGGER, B. (2005): Organic maturation within the Central Northern Calcareous Alps (Eastern Alps). – Austrian Journal of Earth Sciences, **98**, 68–76, Wien.
- SCHAUBERGER, O. (1986): Bau und Bildung der Salzlagerstätten des ostalpinen Salinars. – Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt, **7**, 217–254, Wien.
- SCHORN, A. (2013): Polyhalite – A Key for Unravelling Sedimentary and Tectonic Processes of Evaporites: The Haselgebirge Formation of the Eastern Alps. – Unpublished PhD thesis, VII + 279 S., Faculty of Natural Sciences, University of Salzburg, Salzburg.
- SCHORN, A. & NEUBAUER, F. (2011): Emplacement of an evaporitic melange nappe in central Northern Calcareous Alps: evidence from the Moosegg klippe (Austria). – Austrian Journal of Earth Sciences, **104/2**, 22–46, Wien.
- SCHORN, A. & NEUBAUER, F. (2014): The structure of the Hallstatt evaporite body (Northern Calcareous Alps, Austria): a compressive diapir superposed by strike-slip shear? – Journal of Structural Geology, **60**, 70–84, Amsterdam.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2013.12.008>.
- SCHORN, A., NEUBAUER, F. & BERNROIDER, M. (2013a): Polyhalite microfabrics in an Alpine evaporite melange: Hallstatt, Eastern Alps. – Journal of Structural Geology, **46**, 57–75, Amsterdam. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2012.10.006>.
- SCHORN, A., NEUBAUER, F., GENSER, J. & BERNROIDER, M. (2013b): The Haselgebirge evaporitic melange in central Northern Calcareous Alps (Austria): part of the Permian to Lower Triassic rift of the Meliata ocean? – Tectonophysics, **583**, 28–48, Amsterdam.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.10.016>.
- SPÖTL, C. (1989): The Alpine Haselgebirge Formation, Northern Calcareous Alps (Austria). Permo-Scythian evaporites in an alpine thrust system. – Sedimentary Geology, **65**, 113–125, Amsterdam.
- SPÖTL, C. & PAK, E. (1996): A strontium and sulfur isotopic study of Permo-Triassic evaporites in the Northern Calcareous Alps, Austria. – Chemical Geology, **131**, 219–234, Amsterdam.
- SPÖTL, C., KRÁLIK, M. & KUNK, M.J. (1996): Authigenic Feldspar as an Indicator of Paleo-Rock/Water Intercalations in Permian Carbonates of the Northern Calcareous Alps, Austria. – Journal of Sedimentary Research, **66**, 139–146, Tulsa.
- SPÖTL, C., KUNK, M.J., RAMSEYER, K. & LONGSTAFFE, F.J. (1998): Authigenic potassium feldspar: a tracer for the timing of palaeofluid flow in carbonate rocks, northern Calcareous Alps, Austria. – In: PARNELL, J. (Ed.): Dating and Duration of Fluid Flow and Fluid-Rock Interaction. – Geological Society Special Publications, **144**, 107–128, London.
- STRASSER, A. (1989): Die Minerale Salzburgs. – 348 S., Salzburg.
- TOLLMANN, A. (1985): Geologie von Österreich. Band 2. Außer-zentralalpiner Anteil. – XV + 710 S., Wien (Deuticke).
- TOLLMANN, A. (1987): Late Jurassic/Neocomian Gravitational Tectonics in the Northern Calcareous Alps in Austria. – In: FLÜGEL, H.W. & FAUPL, P. (Eds.): Geodynamics of the Eastern Alps, 112–125, Wien (Deuticke).
- VOZÁROVA, A., VOZÁR, J. & MAYR, M. (1999): High-pressure metamorphism of basalts in the evaporitic sequence of the Haselgebirge: An evidence from Bad Ischl (Austria). – Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, **56**, 325–330, Wien.
- WARREN, J.K. (2016): Evaporites. A Geological Compendium. – Second edition, 1657 S., Berlin–Heidelberg–New York (Springer).
- WESSELY, G. (2006): Geologie der österreichischen Bundesländer – Niederösterreich. – 416 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.
- WOLLMANN, G., FREYER, D. & VOIGT, W. (2008): Polyhalite and its analogous triple salts. – Monatshefte für Chemie, **139**, 739–745, Wien.
- ZIEGLER, T. (2014): The Haselgebirge south of Grundlsee: Geological structure, metabasaltic rocks and geodynamic setting. – Masterarbeit der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Salzburg, 179 S., Salzburg.
- ZIRKL, E.J. (1957): Der Melaphyr von Hallstatt. – Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, **100**, 137–177, Wien.