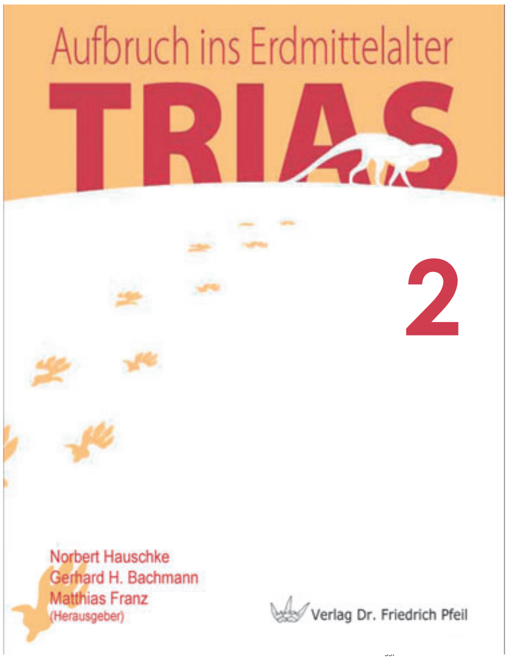

Aufbruch ins Erdmittelalter

TRIAS

2

Norbert Hauschke
Gerhard H. Bachmann
Matthias Franz
(Herausgeber)

Verlag Dr. Friedrich Pfeil

C2

Arthropoden, Fische und Spurenfossilien in der Bernburg-Formation (Unterer Buntsandstein) von Beesenlaublingen (Sachsen-Anhalt)

Norbert Hauschke, Dirk Knaust, Frank Scholze, Jörg Schneider und Sophie Kretschmer

Einleitung

Rotsedimentfolgen galten lange Zeit als fossilleer oder als äußerst arm an Fossilien. Das trifft auch auf die Bernburg-Formation (Unterer Buntsandstein) zu, aus der allerdings Conchostraken schon lange bekannt sind (z. B. Kozur & Seidel 1983a, b). Im südlich von Bernburg (Sachsen-Anhalt) gelegenen Tontagebau Beesenlaublingen konnten erst in den letzten beiden Jahrzehnten auch Vertreter anderer Arthropoden-Gruppen, wie Notostraken (Triopsiden) und Xiphosuren (Limuliden), nachgewiesen werden (Hauschke & Wilde 2000, Voigt et al. 2008, Hauschke 2014; siehe Beitrag B8). Ein Teil der ausgewerteten Ichnofauna (Knaust & Hauschke 2004, 2005; siehe Beitrag B14) lässt sich Notostraken, Conchostraken sowie Insekten und Insektenlarven zwanglos zuordnen. Bemerkenswert sind ferner Fischreste (Scholze et al. 2011, Scholze & Schneider 2016).

Bernburg-Formation in Beesenlaublingen

Im aufgelassenen Tontagebau Beesenlaublingen steht mit ca. 60 m eine Schichtenfolge an, die mit wenigen Metern den höchsten Teil der Calvörde-Formation und darüber etwa die untere Hälfte der Bernburg-Formation erschließt (z. B. Szurlies 1999, Hauschke & Szurlies 2006, Hauschke 2014, Kretschmer et al. 2015). Die Region Bernburg gilt als Typusgebiet für den Unteren Buntsandstein und der Tontagebau Beesenlaublingen als eines der Typusprofile für die Bernburg-Formation (z. B. Szurlies 1999, Radzinski in Bachmann et al. 2008). Charakteristisch ist eine ausgeprägte zyklische Gliederung in Kleinzyklen, die sich auf Periodizitäten der Erdbahn-Parameter (Milanković-Zyklen) zurückführen lassen (z. B. Bachmann & Kozur 2004). Es sind sechs solcher sedimentärer Zyklen aufgeschlossen. Es handelt sich dabei um Sohlbankzyklen (fining-upwards cycles; Szurlies 1999), die in einem Playa-System zur Ablagerung kamen. Während die insgesamt überwiegend rot gefärbte Sedimentfolge von tonig-siltigen Ablagerungen dominiert wird, fallen in den basalen Teilen der einzelnen Kleinzyklen Einschaltungen von Feinsandstein- und Oolith-Bänken (»Rogenstein«, Kalkowsky 1908; siehe Beitrag B1) auf, letztere besonders massiv auftretend im Oolithhorizont ζ (Hauptrogenstein) an der Basis des 1. Zyklus der Bernburg-Formation (Abb. 1a–c, f, h; z. B. Kretschmer et al. 2015). Durch das verbreitete Auftreten von Wellenrippeln sowie Linsen- und Flaserschichtung (Reineck & Wunderlich 1968; Abb. 1d) werden Flachstwasserbedingungen angezeigt, während Trockenrissbildungen (Abb. 1d, f) ein wiederholtes Trockenfallen des Sedimentationsraumes belegen. Nach Austrocknung des Playasees breitete sich eine von Trockenrisspolygonen überzogene, weitgespannte Tonebene, eine Playa, aus. Erneut zuströmendes Wasser nahm zu Beginn eines neuen Playasee-Stadiums die durch Austrocknung erzeugten und massenhaft zur Verfügung stehenden Tonscherben auf, die als intraformationelle Gerölle, eckig oder bereits zugerundet, nach kurzem Transport wieder sedimentiert wurden (Abb. 1h; siehe Beitrag C3). Belastungsphänomene, wie Wickelgefüge, z. T. in Form von »load-casted ripples« (Abb. 1e), deuten auf einen zeitweilig instabilen Schichtverband hin. Zu den bemerkenswertesten Sedimentmarken zählen die Pseudofossilien »Manchuriophycus« und »Aristophycus« (Abb. 1f, g; Osgood 1970, Häntzschel 1949, 1975, Knaust & Hauschke 2004).

Fauna

Nachweise von Faunenelementen bleiben im Tontagebau Beesenlaublingen beschränkt auf Arthropoden, Fische und Spurenfossilien (siehe Beiträge B8, B12, B14).

Conchostraken

Conchostraken sind branchiopode Crustaceen, deren Thorax von einer zweiklappigen Chitinschale umschlossen wird. Die taxonomische Klassifikation der fossilen Conchostraken basiert auf ihrer Morphologie der Schalen (z. B. Scholze & Schneider 2015). Im Profil des Tagebaus Beesenlaublingen repräsentieren die Conchostraken die häufigsten Faunenelemente. Sie sind in feinkörnigen Siliziklastiten sowohl durch Funde einzelner Individuen, als auch auf Schichtflächen durch Massenvorkommen nachgewiesen (Abb. 2a). Während Conchostraken im obersten Teil der Calvörde-Formation im Tagebau Beesenlaublingen aufgrund von paläopedogenen Überprägungen des Sediments stark deformiert sind, zeichnen sich ihre Vorkommen in der darüber liegenden Bernburg-Formation durch gute Erhaltung in laminierten, rötlichen und grünlichen Ton- bis Siltsteinen aus. Die Conchostrakenfauna besteht aus *Cornia germari* (Beyrich, 1857) (Abb. 2b–e), *Estheriella marginostriata* Kozur,

---

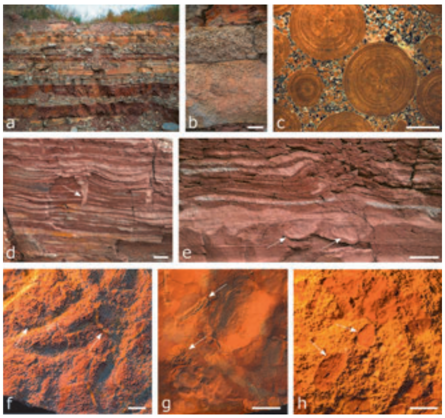


Abb. 1. Sedimentäre Gefüge im Tontagebau Beesenlaublingen (Unterer Buntsandstein). **a,** Profil des Hauptrogensteins (Oolithhorizont ζ), der die Basis der Bernburg-Formation bildet. Charakteristisch ist der Wechsel von siltig-tonigen Profilabschnitten und Rogensteinbänken. Profilhöhe: ca. 4 m. **b,** Rogensteinbank, bei der die Durchmesser der Kalkooide vom Liegenden zum Hangenden zunehmen (coarsening-upwards). Maßstab: 2 cm. **c,** Oolithischer Kalkstein im Dünnschliff, der gut den konzentrischen Aufbau der Ooide zeigt. Maßstab: 1 mm. **d,** Siltiger Tonstein-Horizont, partienweise mit ausgeprägter Linsenschichtung. Trockenrisse wurden mit Feinsand verfüllt (Pfeil). Maßstab: 2 cm. **e,** Siltiger Tonstein-Horizont, gerippelte Feinsandsteinlage besonders im mittleren Teil durch Belastungsstrukturen (load casted ripples; Pfeile) deformiert. Maßstab: 2 cm. **f,** Bankfläche einer Rogensteinbank, die von siltig-tonigen Gesteinen unter- und überlagert wurde. Erkennbar sind Trockenrissfüllungen, die bogig gewellt sind (Sedimentstruktur »Manchuriophycus«; Pfeile). Maßstab: 2 cm. **g,** Gerippelte Oberfläche einer Sandsteinbank. An mehreren Stellen hat sich die Sedimentstruktur »Aristophycus« gebildet (Pfeile). Maßstab: 2 cm. **h,** Rogensteinbank, in die eckige und angerundete intraformationelle Gerölle eingelagert sind (Pfeile). Maßstab: 2 cm. – c, f–h: Geologisch-Paläontologische Sammlungen der Martin-Luther-Universität in Halle (Saale).

1980 (Abb. 2h), *Estheriella costata* Weiss, 1875 (Abb. 2i–j) und *Estheriella nodosocostata* (Giebel, 1857) (Abb. 2k–m). Dabei sind insbesondere Funde von *Cornia* und *Estheriella* häufig. Seltener kommen auch Vertreter der Gattung *Magniestheria* (Kozur, 1982) (Abb. 2f–g; siehe Beitrag A3) im Profil des Tagebaus Beesenlaublingen vor.

Radiale Rippen auf den Schalen von *Estheriella* sind ein prominentes morphologisches Merkmal, welches erste taxonomische Bestimmungen bereits im Gelände mit einer Lupe ermöglichen. Von ähnlicher taxonomischer Bedeutung ist der markante Stachel auf der Außenseite der larvalen Schale von *Cornia germari*, welcher sowohl senkrecht abstehen oder durch Deformation seitlich verdrückt sein kann. Mitunter finden sich auch Schalen mit abgebrochenen Stacheln, deren markante kreisförmige Basis oftmals mit Sediment gefüllt ist. Weitere Beispiele zur hohen morphologischen Variabilität der Stacheln und Schalen von *Cornia germari* wurden im Detail von Kozur (1983) dokumentiert. Zudem konnten mittels mikropaläontologischer Aufbereitungen Stachelfragmente und Schalenbruchstücke von Conchostraken in oolithischen Kalk- und Dolomitsteinen aus dem Profil des Tontagebaus Beesenlaublingen nachgewiesen werden (Scholze 2014).

Systematische Beschreibungen der Conchostraken des Unteren Buntsandstein gehen im Wesentlichen auf Kozur & Seidel (1983a) und Scholze et al. (2014, 2016) zurück. Darüber hinaus ermöglichen Vorkommen von *Estheriella* und *Cornia germari*

C7

Flora und Fauna im Voltziensandstein (Oberer Buntsandstein) des Elsass (Nordost-Frankreich)

Jean-Claude Gall, Lea Grauvogel-Stamm und Francine Papier†

Einleitung

Während in Norddeutschland, wo sich das Zentrum des Germanischen Beckens befand, die klastischen Ablagerungen des Buntsandsteins eine Mächtigkeit von über 1000 m erreichen können, sind sie im nördlichen Teil der Vogesen kaum 500 m mächtig. Hier befinden sich reichhaltige und vielfältige Fossilvorkommen im obersten Teil des Buntsandsteins, dem sog. »Voltziensandstein« (Grès à Voltzia). Diese Fossillagerstätten eignen sich ganz besonders für eine paläoökologische Analyse des Oberen Buntsandsteins in randlichen Gebieten des Germanischen Beckens.

Historischer Rückblick

Schon sehr früh wurden beim Abbau der Sandsteine Fossilien zu Tage gefördert. So trug in der ersten Hälfte des 19. Jh. Philippe-Louis Voltz, Bergbauingenieur und Leiter des mineralogischen Distrikts von Straßburg, eine Sammlung von Fossilien zusammen, darunter insbesondere Pflanzenreste aus den Steinbrüchen im Voltziensandstein. Besonders gut erhalten waren die Funde aus der Königsgrube bei Sulzbad (Soultz-les-Bains), etwa 30 km von Straßburg entfernt. Der französische Paläobotaniker Adolphe Brongniart setzte ihm ein bleibendes Denkmal, indem er eine der in diesen Schichten häufig vorkommende Konifere mit dem Gattungsnamen *Voltzia* belegte. Die Arbeit von Voltz fand ihre Fortsetzung durch seinen Schüler Wilhelm-Philippe Schimper, der zusammen mit A. Mougeot eine Monographie über die Flora des Voltziensandsteins veröffentlichte (Schimper & Mougeot 1844).

Beginnend im Jahre 1935 nahm Louis Grauvogel, ein Industrieller aus Saverne (Frankreich), die systematische Suche nach Fossilien in den zahlreichen, damals im Betrieb befindlichen Steinbrüchen im Voltziensandstein auf. Mit der Zeit trug er viele tausend Stücke mit Resten von Tieren und Pflanzen sowie Sedimentstrukturen zusammen (Grauvogel 1947a, b, c). Im Jahre 1961 bezog er dann Jean-Claude Gall in seine Aktivitäten ein, später auch seine Tochter Léa Grauvogel-Stamm. Zum Zeitpunkt seines Todes im Jahre 1987 konnte schließlich eine außerordentlich reichhaltige Sammlung den Wissenschaftlern ungewöhnliche Dokumente aus den Ökosystemen der Frühzeit des Mesozoikums bieten. Die »Collection Louis Grauvogel« befindet sich heute in Ringendorf/Elsass und ist nicht öffentlich zugänglich. Forschungen an dem Material sind aber immer noch im Gange.

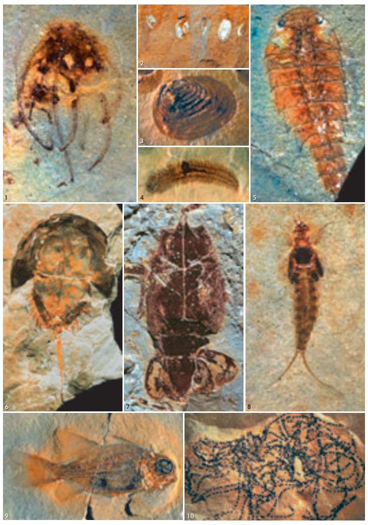
Geographischer und geologischer Rahmen

Die Gesteine des Buntsandsteins in den nördlichen Vogesen wurden weitgehend im Bereich einer Flussebene abgelagert (Abb. 1), wobei der Fluss selbst von einem System verflochtener Rinnen über einen mäandrierenden Abschnitt in das deltaische Milieu einer Küstenebene überging (Durand 2013). Dabei weisen die Paläo-Strömungsanzeiger mit einer bemerkenswerten Konstanz nach Osten und Nordosten, d. h. vom Gebiet des heutigen Pariser Beckens (»Gallischer Kontinent«) in Richtung Germanisches Becken. Das Flusssystem wurde schließlich von dem sich westwärts ausdehnenden Muschelkalk-Meer erfasst und überflutet. Deshalb beinhaltet der Voltziensandstein, der unteranisisches Alter hat (Durand 2013), den Übergang zwischen den detritischen Bildungen der Unteren Trias und den karbonatischen Ablagerungen der Mittleren Trias. Bei einer Mächtigkeit von ca. 20 m lassen sich deutlich zwei Einheiten voneinander unterscheiden, die dem Übergangsbereich zwischen dem festen Land und den küstennahen Meeresbereichen entsprechen (Gall 1971, 1983, 1985). So wird der »Werkstein« (Grès à Meules) von der »Lettenregion« (Grès argileux) überlagert. Während der Werkstein der letzten Phase der fluviatilen Sedimentation des Buntsandsteins entspricht, zeigen der Fossilinhalt und die sedimentologischen Merkmale der »Lettenregion« den Beginn der stark diachronen Überflutung durch das Muschelkalk-Meer an (Durand 2013).

Fossilien des Voltziensandsteins

In den Aufschlüssen setzt sich der etwa 12 m mächtige Werkstein aus einer Abfolge von Sandsteinbänken zusammen, die von siltigen bis tonigen Linsen und karbonatischen Einschaltungen unterbrochen wird (Abb. 2). Die tierischen und pflanzlichen Reste des Voltziensandsteins gehören zu den ältesten Fossilvergesellschaftungen des Mesozoikum (frühes Anisium). Die Funde stammen aus pflanzenführenden Sandsteinen der ehemaligen Flussrinnen, aber auch aus siltig-tonigen Einschaltungen der Überflutungsebenen und aus spärlichen Karbonateinschaltungen.

Tafel 1. Aquatische Fauna. 1. Erwachsene Qualle: *Progonionemus vogesiacus* Grauvogel & Gall. Vilsberg (Moselle). Größe des Tieres mit Tentakeln: 14 mm. **2.** Brachiopoden: *Lingula tenuissima* Bronn in Lebendstellung in einer Sandsteinbank. Hangviller (Moselle). Größe der Schale: 10 mm. **3.** Krebs (»Estherie«, Conchostrake): *Euestheria alberti alberti* (Voltz). Arzviller (Moselle). Länge der Schale: 3,3 mm. **4.** Wurm: *Homaphrodite speciosa* Gall & Grauvogel. Arzviller (Moselle). Länge: 7 mm. **5.** Krebs: *Euthycarcinus kessleri* Handlirch. Adamswiller (Bas-Rhin). Länge: 16 mm. **6.** Schwertschwanz: *Limulitella bronni* Schimper. Adamswiller (Bas-Rhin). Länge: 60 mm. **7.** Krebs (Dekapode): *Clytiopsis argentoratensis* Bill. Arzviller (Moselle). Größe: 40 mm. **8.** Eintagsfliegen-Nymphe *Triassomanthus parvulus* Sinitschenkova, Marchal-Papier, Grauvogel-Stamm & Gall. Bust (Bas-Rhin). Länge: 15 mm. **9.** Fisch: *Dipteronotus aculeatus* Jörg. Adamswiller (Bas-Rhin). Länge: 35 mm. **10.** Insekteneigelege: *Monilipartus tenuis* Gall & Grauvogel. Arzviller (Moselle). Durchmesser eines einzelnen Eies: 0,25 mm.



Die Crustaceen (Krebse; siehe Beitrag B8) sind mit verschiedenen Gruppen vertreten: Branchiopoden (Blattfußkrebse: *Triops* (siehe Beitrag C16), »Estherien« (Taf. 1, Fig. 3) Ostrakoden (Muschelkrebse), Mysidaceen (Glaskrebse, Ranzenkrebse), Isopoden (Asseln) und Dekapoden (Zehnfüßerkrebse). Die letzteren umfassen Formen mit schwimmender (*Antrimpos*) und schreitender (*Clytiopsis*; Taf. 1, Fig. 7) Fortbewegung. Bei anderen Crustaceen, wie *Euthycarcinus* (Taf. 1, Fig. 5) und *Halicyne*, sind die Verwandtschaftsbeziehungen noch unbekannt (Gall & Grauvogel 1964, 1967b, 1971).

Die im Wasser lebenden Larven von Insekten stammen von Eintagsfliegen (Ephemeroptera; Taf. 1, Fig. 8) und Schlammfliegen (Megaloptera). Zu den bemerkenswertesten Funden aus dem Voltziensandstein gehören Insekteneier (Taf. 1, Fig. 10) (Grauvogel 1947d, Gall & Grauvogel 1966). Sie haben einen Durchmesser von etwa 0,25 mm und waren von einer chitinö-

---

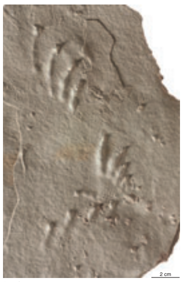


Abb. 2. *Rhynchosauroides peabodyi*, die häufigste Fährte. Vorderfuß- und Hinterfußabdruck zeigen Hauterhaltung. Sammlung Oosterink.

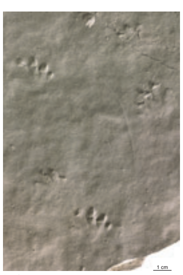


Abb. 3. *Procolophonichnium haarmuelensis*, Vorderfuß- und Hinterfußabdruck mit Schwanzschleifspur. Sammlung Oosterink.

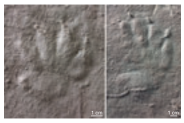


Abb. 4. *Brachychirotherium paraparvum*, Vorderfuß- und Hinterfußabdruck mit Hauterhaltung. Sammlung Oosterink.

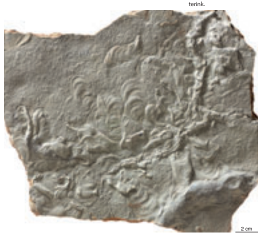


Abb. 5. Mehrere nebeneinander und teilweise übereinander liegende, kleine U-förmige Gänge von *Rhizocorallium* mit der typischen Spreite in der Mitte. Das Spurenfossil *Rhizocorallium* kann jedoch bis zu 40 cm lang werden. Sammlung Oosterink.

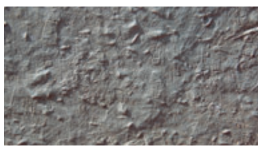


Abb. 6. Weidespuren von *Radulichnus* treten in bestimmten Schichten massenhaft auf und sind sehr wahrscheinlich durch algenfressende Mollusken entstanden. Sammlung Oosterink.

Wirbellose Tiere

Invertebraten sind im Winterswijker Steinbruch eher selten, was eher untypisch für eine Muschelkalk-Fossillagerstätte ist. In größerer Zahl sind Invertebraten nur weiter oben im Profil zu finden (oberhalb Schicht 25) aber nicht im Fährtenhorizont oder im Bonebed von Schicht 9. Zudem ist die Invertebraten-Fauna sehr artenarm und die einzelnen Individuen (z. B. *Myophoria* und *Lingularia*) bleiben im Durchschnitt deutlich kleiner als in anderen Muschelkalk-Fundstellen. Recht häufig sind die kleinen

---

C12

Benthische Organismen mit Weichteilerhaltung und deren Spuren aus dem Oberen Muschelkalk von Thüringen

Dirk Knaust

Einleitung

Das Studium von außergewöhnlich erhaltenen Organismen hat viel zu unserem Verständnis von der Entwicklung des Lebens und den evolutionären Prozessen beigetragen. Fossillagerstätten mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Erhaltung sind aus vielen Epochen der Erdgeschichte beschrieben worden, jedoch nur wenige sind aus der Trias bekannt (Allison & Briggs 1993). Die phylogenetische Forschung zur Entstehung von Bilateralia (Zweiseitentiere, einschließlich einer Reihe von Stämmen wie den Schnurwürmern und Plattwürmern) ist fortschreitend, wird jedoch von der Tatsache gehemmt, dass Fossilfunde von Tieren in Weichteilerhaltung nur sehr sporadisch gemacht werden.

Die randmarinen Karbonate des Muschelkalks im Germanischen Becken (siehe Beiträge A1, A5) wurden in einem ausgedehnten Epikontinentalmeer abgelagert. Sie enthalten eine reiche Fauna, die seit langem von ihren Hartteilen bekannt ist (z. B. Schmidt 1928), wohingegen Fossilien mit Weichteilerhaltung erst in den letzten Jahrzehnten beschrieben wurden (Knaust 1991, Tucker & Marshall 2004, Klug et al. 2004, 2005). Temporäre Aufschlüsse in Thüringen haben umfangreiches Material einer neuen Konservatlagerstätte (Seilacher 1970) geliefert, die eine reichhaltige benthische Faunengemeinschaft enthält. Obwohl oft nur die Abdrücke der Organismen nach ihrem Weichteilzerfall mineralisiert wurden, dokumentieren ihre Konturen Taxa verschiedener Stämme vom Beginn des Mesozoikums. Darüber hinaus sind viele benthische Tiere zusammen mit ihren Spuren erhalten geblieben (Knaust 2007a), was von großer Bedeutung ist für die ichnologische Interpretation (siehe Beitrag B14). Dieser Umstand ist selten in bisher beschriebenen Fossillagerstätten und ermöglicht ethologische und paläobiologische Interpretationen dieser Spurenfossilien und Ihrer Erzeuger. Eine Kombination aus Mikrobenwachstum auf feinkörnigem Sediment mit weicher bis fester Konsistenz, gefolgt von leichter Obrution (Verschüttung), erlaubt die hervorragende Erhaltung von feinsten Spuren (Spurenfossillagerstätte) zusammen mit ihren Erzeugern. Dieses Kapitel basiert auf den Ergebnissen von Knaust (2010).

Untersuchungsgebiet und Material

Mehrere tausend Stücke von makro- und meiobenthischen Fossilien in Weichteilerhaltung wurden im Oberen Muschelkalk im Bereich der Anisium/Ladinium-Grenze gesammelt. Fast das gesamte Material stammt aus den Aufschlüssen Troistedt (Steinbruch, 1997–2009) und Gelmeroda (Steinbruch, 1997) in der Umgebung von Weimar in Thüringen. Weitere sporadisch aufgesammelte Proben von anderen Teilen des Germanischen Beckens weisen auf eine weite Verbreitung der beschriebenen Fossilien hin. Das untersuchte Intervall besteht aus einer Kalkstein/Mergelstein-Wechselfolge, die aus Meter-mächtigen und nach oben hin gröber werdenden Kleinzyklen (Verflachungszyklen) aufgebaut ist (Knaust & Langbein 1995). Oolithische und bioklastische Kalksteinlagen sind typisch und werden als hochenergetische Ereignislagen interpretiert (proximale Tempestite; vgl. Aigner 1985). Die meisten Teile der Abfolge im zentralen Bereich des Germanischen Beckens wurden unter subtidalen Bedingungen abgelagert, wohingegen die proximale Fazies entlang des Beckenrandes inter- und supratidale Merkmale aufweist.

Die benthischen Fossilien kommen in vielen stratigraphischen Niveaus des Oberen Muschelkalks vor, wobei die meisten Stücke jedoch in der *Ceratites-compressus*-, *C.-evolutus*- und *C.-spinosus*-Zone zwischen der Trochitenkalk-Formation und der *cycloides*-Bank gefunden wurden. Sie sind vorwiegend auf mikritischen Schichtflächen im obersten Abschnitt der Verflachungszyklen erhalten. Sedimentstrukturen wie Runzelmarken, Millimeterrippeln, Entgasungsstrukturen, Rissbildungen und Klüfte belegen ein zeitweiliges Auftauchen und Trockenfallen einer Schlickwattfläche. Brekzienbildung, kleine Frakturen und Calcretes deuten auf nachfolgende supratidale Bedingungen hin (Knaust 2007a; Abb. 1).

Benthische Taxa und deren Spuren

Involutinidae (Foraminiferen)

Foraminiferen der Familie Involutinidae sind oft am Ende ihrer Spuren erhalten geblieben (Abb. 2). Ihre Gehäuse (0,3–0,8 mm groß) bestehen aus Mikrosparit (Kalzit) und haben einen unregelmäßigen, flachen bis elliptischen Umriss. Da Involutinidae ursprünglich aragonitisch waren, sind ihre Gehäuse in Kalzit umkristallisiert (Hohenegger & Piller 1975) und verhindern somit eine exakte systematische Zuordnung. Diese Foraminiferen sind im untersuchten Intervall bis nach Spanien weit verbreitet (Pérez-López et al. 2005), ihre Spurenbildung war jedoch bisher unbekannt.

Spurenfossilien von Foraminiferen kommen auf den Schichtflächen in Form von geraden bis leicht gebogenen Kriechspuren und Gängen mit einer großen Variabilität in Morphologie und Größe vor. Die unverzweigten Spuren sind etwa 0,3–1,0 mm breit und bis zu mehreren Zentimetern lang. Generell ist ihre Erhaltung sehr stark von den primären Substratbedingungen abhängig. Exemplare mit scharfen Konturen offenbaren eine grobe Quergliederung und sind durch schmale Randfurchen

---

Krebsen (Malacostraca; siehe Beitrag B8) erzeugt worden sein, aber die damit verbundenen Aggregate erlauben keine genaue Zuordnung.

Weichtiere (Mollusca)

Neben Muscheln, Schnecken und Cephalopoden (siehe Beiträge B6, B7, C11), die in der untersuchten Abfolge gewöhnlich schlecht erhalten als Steinkerne oder mit umkristallisierter Schale vorkommen, wurden einige Muscheln (Bivalvia) zusammen mit ihren Spuren gefunden. In Abbildung 11D ist eine Schichtfläche mit zwei Muscheln (*?Nucula* sp.) zu sehen, von denen eine einen aktiv verfüllten Grabgang ähnlich *Planolites* hinterlässt.

Taphonomie und Fossilerhaltung

Die beschriebenen Tiere in Weichteilerhaltung und ihre Spuren bezeugen deren letzte Bewegungen bevor sie verendeten (Mortichnia; Seilacher 2007). Der sedimentologische Zusammenhang belegt ein randmarines (peritidales) Ablagerungsgebiet mit Mikrobenmatten und Biofilmen. Runzelmarken, Pusteln, Blasen und Elefantenhaut-ähnliche Erscheinungen auf den Mikritflächen entstanden unter Mikrobenmatten (Knaust 2015). Das verbreitete Vorkommen solcher Biolaminite belegt ausgedehnte Schlickflächen mit regelmäßigem Auftauchen. Eine Interpretation als Gezeitenflächen belegen auch die vielen Spuren, deren Gestalt sich über kurze Entfernungen (und somit über kurze Zeit) auf einer rasch trockenfallenden Schlickwattfläche ändert.

Die Stressfaktoren für das Benthos in der intertidalen Zone bestehen somit aus einer Kombination von lebensfeindlichen Umweltbedingungen mit geringem Sauerstoffgehalt durch das Wachstum der Mikrobenmatten sowie einem häufigen Auftauchen unter ariden Bedingungen. Viele Schnurwürmer und Ringelwürmer schneiden sich scharf in die runzelige Oberfläche ein und deuten auf ihre Aktivität unterhalb der Mikrobenmatten hin. Dysaerobe Sedimentbedingungen, wahrscheinlich verstärkt durch Biofilme, können auch für die subtidalen Bereiche angenommen werden, wo häufig Fadenwürmer vorkommen.

Die paläoökologische Verteilung von Körper- und Spurenfossilien kann anhand der Substratkonsistenz, dem mikrobiellen Überwuchs und dem Verhältnis der Spurenfossilien zueinander rekonstruiert werden. So kommen Fadenwürmer häufig in mergeligen Sedimenten vor, die im subtidalen Bereich unter dysaeroben und reduzierenden Bedingungen abgelagert wurden.

Foraminiferen treten gewöhnlich auf Mikritflächen auf, die in der sub- bis intertidalen Übergangszone entstanden und wo ihre Spuren austrocknende Gezeitentümpel dokumentieren. Plattwürmer sind typischerweise auf ursprünglich weichen und wassergesättigten Schlickflächen erhalten, die nachträglich durch mikrobiellen Überwuchs modifiziert wurden und somit Indiz für einen intertidalen Ablagerungsbereich sind. Schnurwürmer erzeugten die deutlichsten und konturenreichsten Spuren mit tiefen Einschnitten in das mikrobiell veränderte Sediment, wie es für das obere Intertidal typisch ist.

Außer dysaeroben Bodenbedingungen und Auftauchen ermöglichte eine rasche Sedimentbedeckung die bevorzugte Fossilisation der Organismen mit ihren Weichteilen. Das Vorkommen von benthischen Organismen am Ende ihrer Spuren

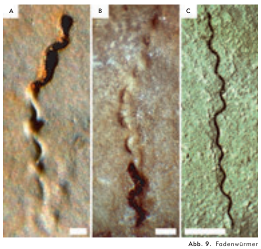


Abb. 9. Fadenwürmer in Sulfidmineralerhaltung und deren Spuren. **A–B.** Schnurwürmer mit ihren schräg bis vertikal ausgerichteten sinusförmigen Kriechspuren auf einer Mikritfläche. **C.** Langes Individuum auf einer Mergelstein-Schichtfläche. Maßstab: 1 mm.

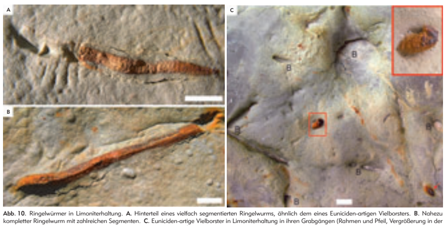
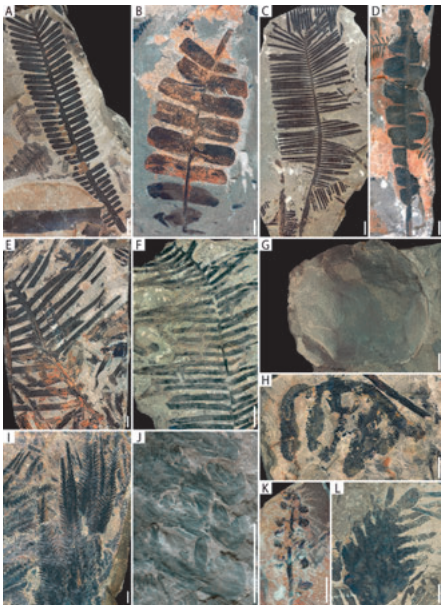
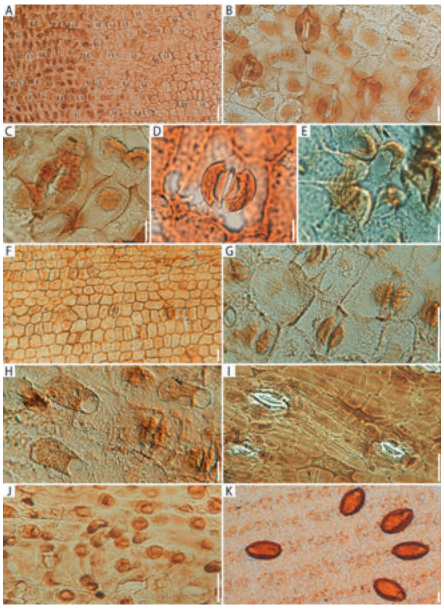


Abb. 10. Ringelwürmer in Limoniterhaltung. **A.** Hinterteil eines vielfach segmentierten Ringelwurms, ähnlich dem eines Euniciden-artigen Vielborsters. **B.** Nahezu kompletter Ringelwurm mit zahlreichen Segmenten. **C.** Euniciden-artige Vielborster in Limoniterhaltung in ihren Grabgängen (Rahmen und Pfeil, Vergrößerung in der oberen rechten Bildecke), die mit einem komplexen *Balanoglossites*-Gangsystem verbunden sind (**B**). Maßstab: 5 mm.





---

a
b
c
d
e
f
g
h
i
j
k
Do
M
M
Da

D1

Naturwerksteine der Germanischen Trias

Lutz Katzschmann and Jochen Lepper

Einleitung

Mehr als ein Drittel aller in Deutschland aktiven Naturwerkstein-Abbaustellen gewinnen Kalk- und Sandsteine der Trias. Sie stellen damit einen nicht unbedeutenden wirtschaftlichen Faktor innerhalb der deutschen Naturwerkstein-Industrie dar. Der vorliegende Beitrag liefert einen Überblick über die im Abbau stehenden Naturwerksteine der Trias. Nachdem an historischen Profan- und Sakralbauten abzulesen ist, dass auch Naturwerksteine der Trias seit mehr als einem Jahrtausend als Baumaterial, Skulptur- und Dekorationsstein genutzt wurden, wird auf deren historische Bedeutung ebenfalls kurz eingegangen. Dies ist umso mehr von Bedeutung, da an den erhaltenen historischen Bauwerken die Verwitterungsbeständigkeit der verwendeten triassischen Gesteine im Sinne eines Langzeittestes vielfach unmittelbar und zerstörungsfrei abzulesen ist.

Verbreitung triassischer Gesteine in Deutschland

Die oberflächennahe Verbreitung von Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper umfasst etwa ein Fünftel der gesamten Landesfläche Deutschlands (Abb. 1). Die Sedimentgesteine der Germanischen Trias prägen als bestimmender geomorphologischer Faktor weite Bereiche unserer Mittelgebirgs- und Schichtstufenlandschaft. Sie verdienen daher, als Charaktergesteine Deutschlands bezeichnet zu werden. Bedingt durch diese weite Verbreitung besaßen und besitzen triassische Gesteine große Bedeutung nicht nur als Rohstoffquelle für die Steine- und Erden-Industrie (siehe Beitrag D2), sondern insbesondere auch für die Naturwerkstein-Gewinnung. Über ein Drittel aller aktiven Abbaustellen nutzen triassische Sedimentgesteine. Der Schwerpunkt der Gewinnung lag und liegt im Süden Deutschlands, insbesondere in Bayern und Baden-Württemberg (Abb. 1). Im Rahmen dieses Beitrages ist eine umfassende und vollständige Behandlung des Themenkomplexes einschließlich der umfangreichen Bibliographie nicht möglich. Die Grundlage für die vorliegende Veröffentlichung bildet neben eigenen regionalen Arbeiten im Wesentlichen die im Literaturverzeichnis aufgeführte Schlüsselliteratur, z. B. Grimm (1990), Ehling (2010), Ehling & Siedel (2011), Ehling & Lepper (2018), Katzschmann, Aselmeyer & Auras (2006), Rey (1975), Werner et al. (2013), Internationale Natursteinkartei (INSK).

Neben der oberflächennahen Verbreitung finden sich Gesteine der Trias auch unter teilweise mächtiger Bedeckung durch jüngere Ablagerungen in größerer Tiefe, wie z. B. in Norddeutschland, aber auch in Süddeutschland im Bereich des Fränkischen und Schwäbischen Juras. In Gebieten, in denen heute keine Sedimentgesteine der Trias vorhanden sind, wie etwa im Bereich des Rheinischen Schiefergebirges oder des Harzes, ist es Aufgabe des Geologen, zu analysieren, ob sie nicht abgelagert wurden oder ob ihr Fehlen auf spätere Abtragung zurückzuführen ist. Diese paläogeographische Analyse führt zu einer Rekonstruktion des ursprünglichen Sedimentationsraumes der Germanischen Trias und erlaubt damit gleichzeitig Rückschlüsse auf die Verbreitung der für die Naturwerkstein-Gewinnung verwendbaren Gesteinshorizonte. Der Sedimentationsraum erstreckte sich in Europa vom Fennoskandischen Hochland bis zur Russischen Plattform im Norden und Nordosten, bis zum London-Brabant-Massiv im Südwesten und dem Vindelizisch-Böhmischen Hochland im Süden und Südosten. Mit dem marinen Ablagerungsraum der Tethys, in dem unter anderem die Alpine Trias abgelagert wurde, stand das Germanische Becken über die Burgundische Pforte, die Schlesisch-Mährische Pforte und die Ostkarpaten-Pforte in Verbindung (siehe Beitrag A1). Paläogeographisch und faziesbestimmend kommt den beiden beckeninternen Strukturen der Rheinischen Masse mit der nördlich vorgelagerten Hunte-Schwelle und der sich weit nach Südwesten fortsetzenden Eichsfeld-Altmark-Schwelle eine besondere Bedeutung zu.

Schichtenfolge der Germanischen Trias

Die Germanische Trias lässt sich grob in drei Einheiten gliedern und jeweils bestimmten Ablagerungsmilieus zuordnen (von oben nach unten bzw. vom Hangenden zum Liegenden):

- Keuper: Mergel-, Ton- und Siltsteine, Sandsteine, Dolomitsteine, Sulfatgesteine und Halite aus überwiegend kontinentalen Ablagerungsmilieus,
- Muschelkalk: Mergel- und Karbonatgesteine, untergeordnet Sulfatgesteine und Halite aus vorwiegend marinen Ablagerungsräumen,
- Buntsandstein: Sandsteine, Siltsteine, Tonsteine, untergeordnet Sulfat- und Karbonatgesteine sowie Halite kontinentaler, teilweise mariner Faziesräume.

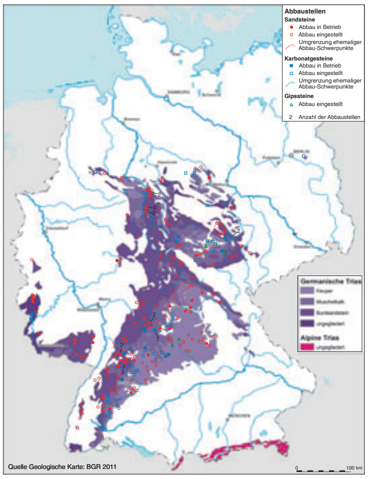
Diese drei Gruppen werden jeweils in einen unteren, mittleren und oberen Abschnitt untergliedert.

Die Naturwerkstein-Vorkommen werden nach diesem stratigraphischen Gliederungsprinzip abgehandelt. Differenzierte Aussagen zur Untergliederung der Germanischen Trias werden an anderer Stelle getroffen und sollen deshalb nicht Gegenstand dieses Beitrages sein (siehe Beitrag A2).

Verwendung von Naturwerksteinen

In historischer Zeit erfolgten Abbau und Verarbeitung von Naturwerksteinen ausschließlich per Hand. Verwendung fanden Massivsteine vor allem zum Bau von öffentlichen und privaten Gebäuden, beispielsweise bei der Errichtung von Burgen, Kirchen und Brücken. Einen zweiten Schwerpunkt bildete die Verarbeitung zu Mühlsteinen, zu Pflaster- und Bordsteinen. Daneben spielte die bildhauerische Verarbeitung zu Skulpturen, Bauplastik und Denkmalen eine bedeutende Rolle. Die Ge-

---



Die Farben entsprechen jetzt zwar denen der Internationalen Stratigrafischen Tabelle, sind nun leider nicht mehr so gut unterscheidbar wie im ersten Triasbuch.

Abb. 1. Naturwerkstein-Gewinnung in der Germanischen Trias (nach Katzschmann & Lepper 1999, aktualisiert. Kartengrundlage: Asch, Lahner, Zitzmann & Vinnemann 2011).

winnung erfolgte zumeist in einer großen Zahl kleiner Brüche nahe dem Endverbraucher. Größere Transportstrecken waren hingegen die Ausnahme.

Mit den seit Anbruch des industriellen Zeitalters zunehmenden technischen Möglichkeiten veränderte sich neben den Gewinnungs- und Verarbeitungsmethoden auch die Produktpalette. Gleichzeitig begünstigte die Entwicklung des Eisenbahn- und Kanalnetzes den Fernhandel. Damit reduzierte sich die Zahl von mehreren hundert historischen Abbaustellen triassischer Gesteine auf einige Dutzend. Im Vergleich mit Massivbauteilen dominiert heute die Produktion von Natursteinplatten. Der größte Teil der in Abbau befindlichen triassischen Kalk- und Sandsteinarten wird zu Natursteinplatten für Fassaden, Verkleidungen und ähnlichem verarbeitet. Biege- und abriebfeste Gesteine werden unter anderem für Fußbodenbeläge und Fensterbänke genutzt. Massivelemente finden ihren Einsatz vor allem im denkmalpflegerischen Bereich, bei entsprechender Eignung aber auch als Mauer- und Wasserbaustein, für Stufen, Pflaster und Bordsteine, zur Garten- und Freiflächengestaltung, als Dachdeckungsmaterial oder als Bildhauerstein.

Technische Richt- und Kennwerte

Eine Auswahl wichtiger technischer Richt- und Kennwerte triassischer Werksteinvarietäten findet sich in den Tabellen 1 und 2. Diese wurden weitgehend noch nach den unten aufgeführten DIN-Normen erhoben, inzwischen gelten jedoch die entsprechenden DIN-EN-Normen (Lepper 2007). Die überwiegende

---

Zahl der in den Tabellen zusammengefassten DIN-Werte für Trockenrohdichte und Gesamtporosität (DIN 52102, neu DIN EN 1936), Wasseraufnahme und Sättigungswert (DIN 52103, neu DIN EN 13755) sowie Druck- (DIN 52105, neu DIN EN 1926) und Biegefestigkeit (DIN 52112, neu DIN EN 13161 und 12372) wurde verschiedenen Quellen entnommen (u. a. INSK, Grimm 1990, Katzschmann et al. 2006).

Diese Daten sollen einen Überblick ermöglichen, erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie stellen eine nicht in jedem Fall repräsentative Auswahl von Kenndaten dar. Für Proben nicht mehr in Abbau befindlicher Gesteine liegen die Werte aufgrund der Verwitterungsbeanspruchung in der Regel unter den für frische Gesteine zu erwartenden. Neben den aufgeführten Kennwertkategorien spielen für die Einschätzung der Beständigkeit der Frost-Tau-Wechsel-Versuch (DIN 52104, neu DIN EN 12371), der Kristallisationsversuch (DIN 52111, neu DIN EN 12370) und die Beobachtung im verbauten Zustand (DIN 52106), für Bodenbeläge zusätzlich die Abriebfestigkeit (DIN 52108, neu DIN EN 14157) und für zu verankernde Fassadenplatten die Ankerausbruchfestigkeit (Prüfnorm »Ausbruchlast am Ankerdornloch«, LGA Würzburg, neu DIN EN 13364) eine entscheidende Rolle. Werden spezifische Kennwerte für Berechnungen bzw. Eignungsbewertungen benötigt, so ist auf die jeweils gültigen Prüfzeugnisse der Naturstein-Unternehmen zurückzugreifen.

Verwitterungsverhalten

Das Verwitterungsverhalten der Gesteine ist sehr stark von petrographischen Charakteristika abhängig und soll deshalb allgemein und in Übersichtsform für die drei Gruppen Sandsteine, Karbonatgesteine und Gipssteine beschrieben werden. Im Allgemeinen besitzen die triassischen Naturwerksteine eine gute Beständigkeit. Die nachfolgend beschriebenen Verwitterungserscheinungen treten als Ergebnis der natürlichen Belastung in der Regel erst nach längeren Zeiträumen (> 50–100 a) auf.

Die triassischen Sandsteine zeigen auf der Wetterseite (im Regelfall West) und im Giebelbereich zumeist eine Dunkel- bis Schwarzfärbung (»Patina«) durch Einlagerung oder Einspülen von Schmutzpartikeln (z. B. Staub und Ruß) in den Porenraum, mikrobiologische Besiedlung und die Ausbildung dünner kolloidaler Filme auf den äußersten Kornlagen (etwa 100 µm dicke Schichten mit deutlichen Gehalten an Silizium, Aluminium und Phosphor, organischen Substanzen etc.). Auf den wetterabgewandten Seiten finden sich in der Regel nur Verschmutzungen (Staub) bzw. graue Gesteinsoberflächen (Filmbildungen); dabei bleibt häufig die Originaloberfläche erhalten. In Bereichen starker indirekter Befeuchtung (z. B. Spritzwasserbereiche, Gesimsunterseiten) treten dagegen häufig Gipskrusten und teilweise stärkere Schäden auf, z. B. Absanden, Abblättern und/oder Schalenbildung. Die Intensität der Verwitterung wird neben dem Groß- und Mikroklima (stärkere Schäden vor allem im Sockelbereich) vor allem durch das Bindemittel des betreffenden Gesteins beeinflusst.

Tab. 1. Kennwerte ausgewählter Naturwerksteine der Germanischen Trias: Sandsteine.

Handelsname oder örtliche Bezeichnung	Abbaugebiet(e)	Stratigraphie	Trockenrohdichte (g/cm³)	Gesamtporosität (Vol.%)	Wasseraufnahme (atmos. Gew.-%)
Miltenberger (Dorfprozelt.) Sandstein	Maintal bei Miltenberg, Unterfranken	su	2,25–2,34	11,8	3,2–4,7
Neckartäler Hartsandstein	Eberbach-Rockenau und E.-Gaimühle	su	2,23–2,33	11,8–15,2	2,5–4,5
Odenwälder Buntsandstein	bei Beerfelden; Hebstahl; Grasellenbach	su	2,28	14,9	4,7
Niederweimarer Sandstein	Marburg/Lahn (Hessen)	su	2,24–2,36	15,5	4,1–4,4
Wolfshäuser Sandstein	Wolfshausen südlich Marburg	su	2,23–2,24	16,6	4,5–5,0
Leistädter Sandstein	nördl. Bad Dürkheim, Pfälzer Wald	su	2,08–2,20		4,4–5,8
Fambacher Sandstein	Fambach nahe Schmalkalden (Südthüringen)	su	2,17	20,0	6,5
Buntsandstein Raum Bad Salzungen	Umgebung von Bad Salzungen (Südthüringen)	su	2,18–2,34	17,5–19,2	4,1–7,2
Kraftsdorfer Sandstein	Kraftsdorf westlich Gera	su	1,98–2,32	14,6–26,4	2,7–8,6
Pölziger Sandstein	Pölzig nördlich Ronneburg (Ostthüringen)	su	2,56	7,6	5,8
dolomitischer Sandstein von Wangen	bei Nebra an der Unstrut	su	2,35	10,3	
Neustadt-Haardter Sandstein	Südliche Weinstraße (Rheinland-Pfalz)	su	2,00–2,65	12,4	3,6–4,4
Wangen-Volpriehausensandstein	bei Nebra an der Unstrut	sm	2,03	24,2	6,1–6,6
Lahrer Sandstein	Lahr-Kuhbach (Baden)	sm	2,16–2,23	18,3	4,9–5,2
Dermbacher (Unteralbaer) Sandstein	NE Dermbach (Südwesthüringen)	sm	2,16		4,7
Schweinsthaler Sandstein	bei Landstuhl (Rheinland-Pfalz)	sm	2,05–2,14	19,7–20,1	5,6–6,1
Britter Sandstein	bei Merzig (Saarland)	sm	2,28	14,2	2,6
Wehrdaer Sandstein	Marburg-Wehrda	sm	1,92–22,3		2,7–8,6
Eiterfelder Sandstein	nördl. Hünfeld/Krs. Fulda (Hessen)	sm	2,29	13,6	3,2
Friedewalder Sandstein	Krs. Hersfeld-Rotenburg (Hessen)	sm	2,22–2,23	16,1	3,6–4,0
Züschener Sandstein	bei Fritzlar, Krs. Schwalm-Eder (Hessen)	sm	2,11	20,1	5,7
Wrexener Sandstein	Diemeltal/Sauerland (Westfalen)	sm	2,09	20,9	6,3
Roter Wesersandstein	Solling und angrenzende Nachbargebiete (Niedersachsen-Hessen-Nordrhein-Westfalen)	sm	2,18–2,46	10,2–19,1	1,2–5,4
Grauer Wesersandst.	Raum Karlshafen (Niedersachsen-Hessen-Nordrhein-Westfalen)	sm	2,34–2,53	4,3–11,0	2,0–2,9
Hinternaher Sandstein	Hinternah NE Schleusingen (Südthüringen)	sm	2,14	17,4	4,5
Nebraer Buntsandstein	großes Bruchgebiet um Nebra (Unstrut)	sm	1,93	28,7	7,7
Nebraer Sandstein, Bruch Birkigt	ca. 4 km südlich Nebra	sm	2,01		7,6
roter, grauer Berkaer Sandstein	Bad Berka südlich Weimar	sm	2,00	25,4	3,7–6,6
Sandstein Themar	Themar ESE Meiningen (Südthüringen)	sm	2,14–2,23	21,3	7,0
Sandstein Uder	Uder W Heiligenstadt (Eichsfeld)	sm	2,08	24,1	6,9
Sandsteine Raum Birkenfelde	Birkenfelde W Heiligenstadt (Eichsfeld)	sm	2,03	24,6	6,9
Ebenheider Sandstein	Freudenberg-Ebenheid (Baden)	so	2,10–2,12	20,1–21,1	5,4–5,7
Wüstenzeller Sandstein (Roter Mainsandstein)	südl. Marktheidenfeld (Unterfranken)	so	2,38	11,0	3,1–7,2
Eichenbühler Sandstein	Eichenbühl (Unterfranken)	so	2,25		4,6
Remlinger Sandstein	Bei Marktheidenfeld (Unterfranken)	so	2,38		2,7
Röttbacher Sandstein	Bei Marktheidenfeld (Unterfranken)	so	2,27–2,40	11,0	3,0–4,5
Seedorfer Sandstein	bei Schramberg	so	2,11–2,18	19,0	5,6–6,1
Lossburger Sandstein	Lossburg und Freudenstadt-Dietersweiler/Württemberg	so	2,27–2,37	13,8	3,7–4,4
Plattensandstein Wilferdingen	zwischen Karlsruhe und Pforzheim	so	2,21–2,47		4,3–6,9
Kordeler Sandstein	Kordel bei Trier (Rheinland-Pfalz)	so	2,04–2,16	19,5–20,4	5,5–5,7
Kylltaler (Kyllburger) Sandstein	Kyllburg/Eifel bei Bitburg (Rheinland-Pfalz)	so	2,09–2,30	13,3	3,5

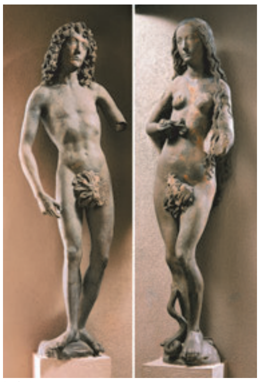


Abb. 9. »Adam und Eva« von Tilman Riemenschneider, Keuper-Sandstein, Würzburg. – Foto: Zwicker-Berberich.

steinspektrum. Aufgrund der meist feinkörnigen Ausbildung und der guten Bearbeitbarkeit wurden vor allem die Sandsteine des Unteren Keupers und des Schilfsandsteins (zusammen auch als Nordischer Keuper bezeichnet) als Bau- und Bildhauerstein geschätzt. Eindrucksvolle Bauwerke, wie die gotische Klosteranlage Maulbronn, zeugen von der hohen handwerklichen Kunst der Steinmetze. Das häufig dominierende tonige Bindemittel bedingt allerdings auch eine stärkere Verwitterungsanfälligkeit dieser Gesteine. Die harten Rhätsandsteine des Oberen Keupers zählen hingegen im Allgemeinen zu den qualitativ besonders hochwertigen Werksteinen Deutschlands. Als Besonderheit wurden auch die Gipssteine des Keupers als Naturwerkstein genutzt.

Unterer Keuper

Im Unteren Keuper (Erfurt-Formation; siehe Beitrag A2) treten neben Ton- und Schluffsteinen sowie Karbonatgesteinen vor allem in Bereichen vorherrschender Rinnenfazies (zumeist als Flussrinnensande gedeutet) bis etwa zehn Meter mächtige, feinkörnige Arkosen (feldspatreiche, unreife Sandsteine) und Sandsteine mit deutlicher Glimmerführung auf. Das z. T. tonig-ferritische Bindemittel und die mäßig gute Kornbindung bedingen bei stärkerer Feuchtebelastung und/oder häufigem Frost-Tau-Wechsel ein eher kritisches Verwitterungsverhalten. Die Sandsteine zeigen graue, braune, grünliche und selten rötliche Farben. Die Hauptabbaugebiete lagen in Franken (z. B. westlich Schweinfurt) und in Württembergisch-Franken, während sie in den weiten Ausstrichflächen des Unterkeupers in Thüringen eher lokale Bedeutung besaßen.

Die Gewinnung erfolgt heute bei Schleerieth und Gnodstadt in Unterfranken (grüne Varietät) sowie bei Neuenstein in Württemberg. Nach 1990 lebte der Abbau in Bedheim (Südthüringen) kurzzeitig wieder auf. Zu den bedeutenderen Verwendungsbeispielen zählen unter anderem die Würzburger Residenz (teilweise auch Schilfsandstein; s. u.) und Schloss Neuenstein.

Auch wenn die Dolomite des Unteren Keupers (unter anderem der Grenzdolomit) nur lokale Bedeutung hatten, prägen sie durch die typischen braunen Farbtöne das Bild einzelner Regionen (z. B. Kirchen und die Stadtmauer von Sömmerda, Stadtkirche von Buttelstedt). Die meist nur plattigen bis dünnbankigen, dichten bis porösen, häufig auch schillhaltigen dolomitischen Kalksteine und Dolomite wurden in der Regel in kleinen Brüchen gewonnen. Sie besitzen zumeist gute technische Eigenschaften und eine gute Beständigkeit. Ein Abbau findet nicht mehr statt.

Mittlerer Keuper

In Ermangelung anderer geeigneter Gesteine, wurde in den Ausstrichbereichen des »Gipskeupers« (Mittleren Keuper; siehe Beitrag A2), z. B. in Franken oder in Thüringen, in der Vergangenheit in erstaunlich großem Umfang Gipsstein als Baustein verwendet. Dies trifft insbesondere für die Umgebung von Bad Windsheim und das zentrale Thüringer Becken zu. Bei dem hier genutzten Material handelt es sich vielfach um plattige, geschichtete Gipse in Wechsellagerung mit Ton- und Schluffsteinen sowie dolomitischen Lagen, aber auch um massive, kristalline Gipse. Verwendet wurden diese zumeist als Mauersteine und Fußbodenplatten (z. B. Bad Windsheim in Franken und Weißensee in Thüringen), bei alabasterartigen Sorten auch als Dekorationsmaterial (z. B. Epitaphe und Plastiken im Erfurter Dom, Hochaltar in Castell). Vor allem in Bauwerksbereichen mit geringerer Feuchtebelastung zeigen diese Gipsgesteine über Jahrhunderte eine gute Verwitterungsbeständigkeit.

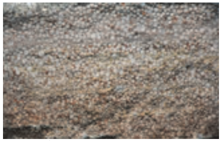
Schilfsandstein. Vergleichbar dem Unteren Keuper treten auch im Schilfsandstein (Stuttgart-Formation) mächtigere Sandsteine in der Rinnenfazies auf. Kennzeichnend ist die geringe Maturität dieser zumeist feinkörnigen Sandsteine, bei denen es sich überwiegend um Arkosen handelt. Die Sandsteine zeichnen sich nicht selten durch eine hohe Glimmerführung, ein wechselnd tonig-ferritisches (eisenschüssiges), zum Teil auch karbonatisches oder kieseliges Bindemittel sowie bräunliche, grünliche, rötliche und seltener gelbbraune Farben aus. In Bayern und Baden-Württemberg besaßen sie trotz oftmals nur mäßiger Verwitterungsbeständigkeit große Bedeutung als Werksteinmaterial für alle Hochbauzwecke. Auch in Thüringen und Südniedersachsen fand der Schilfsandstein als Baustein Verwendung (Stadlbauer et al. 2008). Die historischen Abbauzentren lagen bei Haßfurt und Ansbach (hier als einzige Ausnahme in Franken als Mittel- bis Grobsandstein ausgebildet), nordwestlich Stuttgart um Heilbronn und Maulbronn (Baden-Württemberg), in der Umgebung von Herford (Nordrhein-Westfalen) und Melle (Niedersachsen), bei Hindfeld (Südthüringen) und im Raum Erfurt (Thüringer Becken). Zu den Verwendungsbeispielen zählen das Schloss Seehof bei Bamberg, die Würzburger Residenz (vor allem Unterkeupersandstein), das Kloster Maulbronn, der Hauptbahnhof von Heilbronn, die Neue Staatsgalerie Stuttgart, das Rathaus von Osnabrück und das Schloss Hämelschenburg (unter gleichzeitiger Verwendung von Rhätsandstein; siehe Abb. 8) als bedeutendstes Bauwerk der Weserrenaissance. Exemplarisch für herausragende Bildhauerarbeiten seien hier von Tilman Riemenschneider der Altar von Maidbronn sowie Adam und Eva von der Marienkirche in Würzburg genannt (Abb. 9). In beiden Fällen ist jedoch die verlässliche Einstufung des verwendeten fränkischen Sandstein-Materials noch offen.

Heute wird Schilfsandstein als Werkstein noch in Baden-Württemberg und Bayern gebrochen, so z. B. bei Maulbronn, Heilbronn, Sinsheim, Pfaffenhofen und Sand am Main (Grüner Mainsandstein).

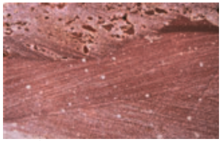
Sandsteinkeuper. Umfangreicher Abbau erfolgt(e) auch in den geeigneten Horizonten des Sandsteinkeupers in Bayern und

---

Tafel 1. Ausgewählte Mustergesteine der Germanischen Trias, Oberflächen feingeschliffen, Kalksteine poliert, Rogenstein spaltrau. Bildunterkanten: jeweils ca. 15 cm.

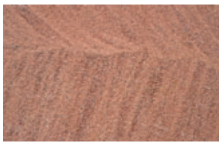


Rogenstein (su), Sachsen-Anhalt

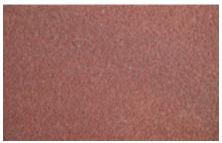


Dermbacher Sandstein (sm)

Wesersandstein rot (sm)

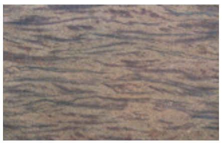


Nebraer Sandstein (sm)

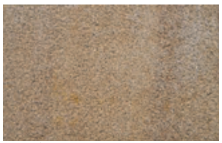


Plattensandstein (so)

Gnodtstadter Sandstein (ku)



Maulbronner Sandstein (km)



Worzeldorfer Sandstein (km)

D2

Steine- und Erden-Rohstoffe der Germanischen Trias

Klaus Poschlod

Einleitung

Die Gewinnung von Steine- und Erden-Rohstoffen hat in Deutschland eine lange Tradition.

Schon die Römer bauten vor fast 2000 Jahren in Süddeutschland und entlang des Rheins erhebliche Mengen an Kalk- und Sandsteinen sowie an Basalten ab. Hinsichtlich der Steine- und Erden-Rohstoffe verfügt Deutschland über große Vorkommen, die jedoch aufgrund der geologischen Verhältnisse standortgebunden und nicht gleichmäßig über das Land verteilt sind. Zu diesen Fest- und Lockergesteinslagerstätten gehören u. a. Kiese und Sande, gebrochene Natursteine, Naturwerksteine (siehe Beitrag D1), Karbonatgesteine, Tone, Sulfatgesteine (siehe Beitrag D3) und andere Salze (siehe Beitrag D4) .

Die Steine- und Erden-Rohstoffe der Germanischen Trias werden im Folgenden zu Gruppen zusammengefasst:

- Kiese und Sande
- Lehme und Tone
- Kaoline
- Gebrochene Natursteine
- Karbonatgesteine für die Zement- und Kalkindustrie
- Quarzrohstoffe
- Feldspatgesteine

Da Naturwerksteine, Sulfatgesteine und Salze, wie Halit, in eigenen Beiträgen (s. o.) ausführlich behandelt werden, kann hier darauf verwiesen werden.

Innerhalb der Rohstoffgruppen werden die Vorkommen regional von Nord nach Süd beschrieben.

Des Weiteren stehen in den allochthonen Einheiten der Alpinen Trias Vorkommen von Karbonatgesteinen und Ölschiefer im Abbau, die hier der Vollständigkeit halber ebenfalls kurz abgehandelt werden sollen.

Steine- und Erden-Rohstoffe der Germanischen Trias

Kiese und Sande

Die ca. 5–30 m mächtigen entfestigten Flussschotter im westlichen Erzgebirgsbecken Sachsens, die im Liegenden der tertiären und pleistozänen Schüttungen auftreten, werden dem Buntsandstein zugeordnet. Sie weisen Kiesgehalte zwischen 40–70 M.-% (Massenprozent) auf und werden vorwiegend im Verkehrswegebau und als Betonzuschlag eingesetzt (Sächsisches Oberbergamt 2008).

Die Thüringer Mürbsandsteinvorkommen befinden sich im Ausstrich des Unteren und Mittleren Buntsandsteins in der Umrandung des Thüringer Beckens und des Thüringer Grabfeldes; gebrochene Sandsteine werden ganz vereinzelt auch im Bereich des Unteren und Mittleren Keupers gewonnen. Die Mürbsande bilden den Hauptrohstoff für die Versorgung Thüringens mit Putz- und Mauersand, Betonsand sowie Bettungssand; sie können aber bei entsprechender Qualität auch als Feldspatrohstoffe in der Porzellanindustrie (Neuhaus-Schirnitz), zur Herstellung von Kalksandsteinen (Tannroda, Schwarza) und als Quarzsand für die Glasindustrie (Lausnitz nahe Pößneck) verwendet werden. Mitunter sind die gebrochenen Sandsteine aufgrund erhöhter Gehalte an abschlämmbaren Bestandteilen nicht ohne Nassaufbereitung zur Herstellung hochwertiger Sande verwendbar.

Am Süd- und Südostrand des Thüringer Beckens (Raum Saalfeld-Pößneck-Triptis) werden in einigen Abbauen die Sandsteine der Calvörde-Formation (Unterer Buntsandstein) gewonnen, während die Sandsteine der Bernburg-Formation in Südthüringen (südlich Sonneberg) zur Sandgewinnung genutzt werden.

Den Basissandstein der Volpriehausen-Formation (Mittlerer Buntsandstein) gewinnt man derzeit in einigen Gruben Südthüringens (im Raum Sonneberg und Hildburghausen), bei Tannroda südlich Weimar sowie in Nordwestthüringen (Bischofferode, Neuendorf). Der Detfurth-Sandstein wird partiell in Bereichen der Detfurth-Wechsellagerung bei Hachelbich/Sondershausen, bei Schwarza südlich Weimar, am Südrand des Thüringer Beckens (Traßdorf, Neuroda) sowie in Südthüringen (Waldau, Eisfeld) abgebaut. Von den ehemals zahlreichen Sandgewinnungsstellen im Solling-Sandstein Nordwestthüringens befinden sich zurzeit nur noch die Gruben in Heiligenstadt, Brehme und Kella in Abbau.

Im Vergleich zu den Sandlagerstätten des Buntsandsteins ist die Sandgewinnung aus den Schichtenfolgen des Keupers mengenmäßig fast unbedeutend (Nestler et al. 2007, Pöllmann et al. 1999). Die Sande des Unteren Keupers werden in Niederspier südlich Sondershausen (Thüringer Becken), die des Mittleren Keupers im Raum Heldburg (Südthüringen) sowie die des Oberen Keupers bei Gotha (Nebenprodukt der Werksteingewinnung) abgebaut.

In der Nähe von Volkmarsen (Lütersheim) und Wolfhagen, also im Bereich der Hessischen Senke, werden Mürbsandsteine zu Sanden für Bauzwecke aufbereitet. Diese Mürbsande entstehen durch tiefgreifende Entfestigung (Verwitterung) von überwiegend bindemittelarmen quarzreichen Sandsteinen des Buntsandsteins. Die Mächtigkeiten der quarzreichen Mürbsande schwanken zwischen 8–80 m bei Abraummächtigkeiten von 2–20 m. Der Grundwasserschutz reduziert allerdings die genehmigte Abbaumächtigkeit im Raum Volkmarsen auf rund 20 m (Hlug 2006).

Früher wurden in Baden-Württemberg in vielen kleinen Gruben für den örtlichen Bedarf die taschenförmig verwitterten, mürben (quarzsandhaltigen) Partien des Kiesel- und Stubensandsteins (Keuper) gewonnen. In größeren Gruben sind diese Schichten stellenweise bis zu 10 m mächtig, beispielsweise im Raum Stuttgart-Crailsheim-Dinkelsbühl. Das leicht aufzubereitende Material kann als Zuschlag für Putze, Beton oder Mineralgemische verwendet werden. In der Region sind mehrere, auch nach heutigen Gesichtspunkten wirtschaftlich interessante Mürbsandsteinvorkommen im Rahmen einer Prospektion des Geologischen Landesamts auskartiert worden (Werner et al. 2006).

In Bayern werden Sande des Buntsandsteins in Oberfranken in mehreren Gruben um Neustadt bei Coburg, im Raum Mitwitz-Kronach, bei Weißenbrunn, südlich von Trebgast bei Sandreuth, nördlich von Weidenberg bei Untersteinach, im Raum um Freihung und bei Hirschau-Schnaittenbach abgebaut. Verwendung finden die Sande in verschiedenen Bereichen der Bauindustrie und als Keramik- und Glasrohstoff (Weinig et al. 1984). Im Rahmen einer Erkundung des Bayerischen Landesamts für Umwelt (Geologischer Dienst) wurden unter anderem diese Sande hinsichtlich Ihrer Gehalte auf Seltene Erden untersucht (Linhardt

---

zur Produktion von Hinter- und Vormauerziegel, seltener von Dachziegel genutzten Tonmergel- und Ton-Siltsteine des Oberen Buntsandsteins (Rückstandsbildungen des Salinarröts sowie Teilen des Pelitröts) werden zur Zeit nur bei Eisenberg, versetzt mit Walperhainer Ton (s. o.), zur Herstellung großformatiger Hochlochziegel für wärmedämmendes Mauerwerk und auch als Dichtungsmaterial eingesetzt. Der Ziegelton der Lagerstätte Themar (unterer Teil des Pelitröts) findet derzeit ausschließlich als Abdichtung im Deponiebau Verwendung.

Die im zentralen Teil des Thüringer Beckens ausstreichende tonig-siltig-sandige Schichtenfolge des Unteren Keupers bildete die Basis zahlreicher Ziegeleien, so bei Hohenebra, Niedertopfstedt und Sömmerda. Derzeit ruht die Gewinnung. Der obere tonige Teil des Schilfsandsteins (Mittlerer Keuper, Stuttgart-Formation) tritt in einigen voneinander isolierten Restvorkommen auf, z. B. in der Mühlhäuser-Langensalzaer Mulde bei Bollstedt und Großengottern sowie in der Erfurter Mulde nördlich von Erfurt. Die im oberen Bereich anstehenden Feinsedimente des Schilfsandsteins werden für die Herstellung anspruchsvollerer grobkeramischer Erzeugnisse verwendet, wie beispielsweise Dachziegel und Verblendsteine. Dieser Rohstoff ist für Thüringen der qualitativ günstigste zur Verfügung stehende Ziegelton, dessen Gewinnung in vier Tagebauen bei Höngeda, Altengottern, Bollstedt und Erfurt-Gispersleben erfolgt.

Der einstmals jahrzehntelang von zahllosen Ziegeleien im Thüringer Becken genutzte Ziegelton des Unteren Keupers (Erfurt-Formation; Rotmergelzone und Lichte Mergel; siehe Beitrag A2) kommt nach den heutigen Vorgaben aufgrund seiner problematischen Rohstoffeigenschaften zur Herstellung qualitativ hochwertiger grobkeramischer Erzeugnisse weniger in Frage. Eine Gewinnung erfolgt deshalb gegenwärtig nicht. Das gleiche gilt für die Schichtenfolge des Oberen Gipskeupers (Weser-Formation), die bei Apolda als Rohstoff zur Produktion von Hinter-, teilweise auch von Vormauersteinen diente. Aus historischem Interesse erwähnenswert sind noch die Verwendung von Tonsteinen des Mittleren und Oberen Keupers als Töpferton bei Römhild und Heldburg/Ummerstadt in Südthüringen sowie eines Tones aus dem Oberen Keuper (Rhät, Exter-Formation) bei Gotha zur Dachziegelherstellung (Kleeberg & Börner 2012).

Tone und Tonsteine des Mittleren Muschelkalks stehen im Saarland vor allem im Raum Saarbrücke–Saargemünd–Blieskastel an, ebenso im Bereich zwischen Mosel und Saar nordöstlich von Perl sowie westlich von Merzig und südwestlich von Saarlouis. Die Tone und Mergel sind vielfach feingeschichtet und bröckelig zerfallend. Sie sind meist sehr wasseraufnahme- und quellfähig, wobei der Karbonatgehalt Werte von bis zu 10 % erreicht. Der aus den mittlerweile auflässigen Gruben gewonnene Rohstoff wurde früher zu Ziegeln verarbeitet.

Die Rohstoffbasis für viele Ziegelwerke bilden auch in Baden-Württemberg Ton- und Mergelsteine der Trias. Neben den Röttonen im Norden Baden-Württembergs (Neckar-Odenwald-Kreis) finden vor allem die Keupersedimente im Kraichgau und im Neckarbecken Verwendung. Die anstehenden Keuper-Tone alleine sind meist zu »fett«, sie enthalten also für keramotechnische Zwecke einen zu hohen Ton- und zu geringen Kalk- und Quarzanteil. Ein Abbau erfolgt daher in der Regel nur dort, wo sie von Lösslehm überlagert werden oder wo Lösslehm von nahegelegenen Vorkommen zugemischt werden kann.

Tonabbaustellen der Trias existieren bzw. existierten in Bayern im Buntsandstein (Röttonsteine) und im Unteren Keuper in Unterfranken (Abb. 2). Seinen Namen hat der Keuper von den lehmigen Böden in seinem Verbreitungsgebiet. So werden mit »Kipper« oder »Keuper« in Franken weiche, bröckelig zerfallende Schichten bezeichnet. Der Untere Keuper (Erfurt-Formation) ist sehr wechselhaft aufgebaut. Nur dort, wo Kalksteine und feinkörnige Sandsteine gegenüber Ton- und Mergelsteinen zurücktreten, bilden sich auch Lagerstätten für grobkeramische Rohstoffe (Hintermauersteine) aus. In Ausnahmefällen können

Tab. 1. Ausgewählte stoffliche und technische Daten von triassischen Tonrohstoffen (nach Angaben der Staatlichen Geologischen Dienste der Länder 1984–2012)

	Feuerletten Oettinger Forst (Fremdingen, Bayern) [unveröff. Werte LfU-Labore/ Ahrendt, Schönenberger 2011, 2012, Weinig et al. 1984]	Ton- und Schluffsteine des Buntsandsteins (Eichsfeld, Niedersachsen) [Börner et al. 2012]	Tonsteine des Buntsandsteins im Raum Eisenberg–Walpernhain (Thüringen) [Börner et al. 2012]
Korngrößenzusammensetzung (M.-%)			
> 63 µm			~5
2 µm–63 µm			~36
< 2 µm			~59
Chemische Zusammensetzung (M.-%)			
SiO_2	55,2–70,4	57,6–68,8	
Al_2O_3	13,5–19,4	13,3–16,2	~21
Fe_2O_3	4,97–8,16	3,46–5,24	
TiO_2	0,82–0,90	0,50–0,76	
CaO	0,49–2,17	1,60–3,54	
MgO	1,45–2,39	2,27–4,45	
K_2O	2,27–3,03	3,07–4,27	
Na_2O	0,08–0,71	1,35–1,99	
Corg			
Glühverlust	4,81–8,34	3,83–8,20	
Mineralbestand (M.-%)			
Kaolinit	7–16		10–28
Illit	16–24 (incl. Muskovit)		10–28 (incl. Muskovit)
Montmorillonit			
Glimmer/Muskovit	siehe Illit		siehe Illit
Chlorit	6–8		
Quarz	19–49		32–37
Feldspat (Alkalifeldspat und Plagioklas)	12–14		1–2
Kalzit	0–3		
Dolomit	0–1		
Goethit	3–7		
Physikalisch-technische Kennwerte			
Rohdichte (g/cm³)	1080 °C: 2,19; 1120 °C: 2,26		
Trockenbiegefestigkeit (MPa)	3,0–3,7		
Trockenschwindung (M.-%)	9,2–10,2	3,0–5,5	
Brennschwindung (1100 °C) (M.-%)	1080 °C: 4,45–4,5; 1120 °C: 4,89–5,18	3,5–7,0	
Brennfarbe	rotbraun	rotbraun-violettrotbraun	rot
Wasseraufnahmevermögen (M.-%) bei 1100 °C	1080 °C: 4,24; 1120 °C: 2,77	1,7–10,9	

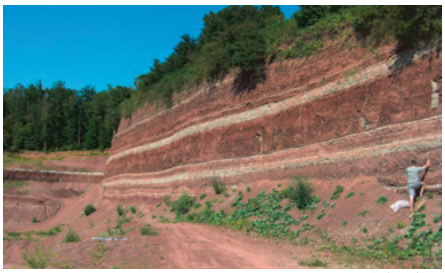


Abb. 2. Rötton-Grube bei Wiesenfeld, nahe Gemünden am Main.

Tonsteine auch zur Dachziegelherstellung verwendet werden. Tone und Mergel der Estherien- bzw. Myophorienschichten (Unterer Gipskeuper, Grabfeld-Formation; siehe Beitrag A2) wurden früher sehr häufig gewonnen. Heutzutage kommen nur noch die karbonat- und gipsärmeren Partien als Zuschlagstoff bei der Herstellung von Ziegeln zur Verwendung. Regen Absatz finden die Tone der Lehrbergschichten (Oberster Gipskeuper, Steigerwald-Formation) in Mittel- und Oberfranken. Sie sind aufgrund der mineralogischen und keramotechnischen Eigenschaften sowohl für die Ziegel- und Dachziegelherstellung, als auch für die Produktion von Klinkern geeignet. Die meist rötlichen Feuerletten wurden früher als Zuschlag für Ziegelmassen abgebaut, während dieses Material heutzutage vor allem zur Deponieabdichtung verwendet wird. In Zukunft soll der Feuerletten wieder als Zuschlagsstoff für die Ziegelproduktion verwendet werden. Die große mineralogische Variationsbreite des Feuerlettens (z. B. kalzitreich bis kalzitfrei) sowohl in der horizontalen als auch vertikalen Verbreitung erfordert bei diesem keramischen Rohstoff eine sehr genaue und umfangreiche Prospektion (vgl. Tab. 1). Zwischen den Sandsteinen des Burgsandsteins (Löwenstein-Formation) erscheinen immer wieder mächtige sog. Letten, die bei Bamberg als Grundstoff für Ziegel in Abbau stehen. Als Letten werden unreine Tone mit lehmigem Charakter bezeichnet. Gegenüber den illitischen und glimmerführenden Tonen und Schluffen des Unteren und Mittleren Keupers sind die im Wechsel mit Quarzsanden auftretenden Tone der höchsten Trias (Rhät-Lias-Übergangsschichten) von kaolinitischen Tonmineralen geprägt. Sie werden deshalb in Steinzeugmassen für Wandplatten, Ofenkacheln, Geschirr, Spaltplatten, Verblendsteinen und Schleifscheiben eingesetzt. Die Verwendung als Schamotteton und die Verbesserung von Ziegelmassen sind weitere Verwendungsbereiche. Der Schwerpunkt der Gewinnung liegt im Raum Coburg (Weinig et al. 1984).

Kaoline

Die bekanntesten deutschen Kaolinlagerstätten in Sachsen-Anhalt, Sachsen, Rheinland-Pfalz und Nordbayern entstanden seit der Trias durch die Verwitterung von Festgesteinen. In der Trias selbst sind nur die Kaoline in Sachsen-Anhalt und Bayern entstanden. Zu Vergleichszwecken sind in Tabelle 2 auch stoffliche Daten der nicht-triassischen sächsischen Kaoline dargestellt.

Kaoline bzw. Kaolintone sind in Sachsen-Anhalt auf Porphyren (häufig Rhyolithe) sowie auf Sandsteinen des Buntsandsteins verbreitet, die vergleichsweise kleine Lagerstätten bilden, aber über eine hervorragende Rohstoff-Qualität verfügen. Eingesetzt werden die aufbereiteten weiß brennenden Kaoline in der keramischen Industrie. Derzeit wird der Kaolin in drei Tagebauen im Großraum Halle (Saale) (z. B. Spergau, vgl. Tab. 2) gewonnen.

In Bayern treten Kaolinvorkommen auf kristallinen Gesteinen und auf Sedimentgesteinen auf. In Oberfranken (Wunsiedel, Marktredwitz) und der Oberpfalz (Raum Waldsassen, Tirschenreuth–Wiesau) sind vor allem »Granitkaoline« und »Gneiskaoline« zu finden, wobei hingegen die Nutzbarkeit der Letzteren gering ist. In sedimentären Gesteinen kommt Kaolin im Raum Bayreuth und um Hirschau–Schnaittenbach vor. Verschiedene Vorkommen bei Coburg, Kronach, Weiherhammer und Mantel führen die Industriebezeichnung »Pegmatitsand«; dabei handelt es sich vorwiegend um kaolinisierten Mittleren Buntsandstein. Im Revier Hirschau–Schnaittenbach befindet sich der Schwerpunkt der Kaolingewinnung in Bayern (Abb. 3). Die großen Lagerstätten sind kaolinisierte Arkosen des Buntsandsteins (Haus 2002, Henseleit & Huber 2002). Diese werden auch als Feldspat-Kaoline oder Kaolin-Feldspat-Sande bezeichnet. In räumlich geringem Abstand werden hier mehrere Großtagebaue betrieben. Häufig erfolgt neben der Gewinnung des Nutzminerals Kaolinit auch die Abbau von Feldspäten und Quarz; bis 1986 wurde hier auch Monazit (ein radioaktives Seltenerdenmineral) separiert (Abb. 4).

Gebrochene Natursteine

In Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen stehen abbauwürdige, bis zu 15 m mächtige Vorkommen der Trochitenkalk-Formation (Oberer Muschelkalk) im Lipper Bergland, im Teutoburger Wald und westlich der Weser (bei Vahlbruch und Bad Pyrmont) an, ebenso südöstlich von Osnabrück, nordöstlich von Borgholzhausen und südöstlich des Hildesheimer Waldes (südöstlich von Bad Salzdetfurth). Diese Kalksteine werden als

D3 Gips- und Anhydritsteine der Germanischen Trias

Matthias Reimann und Volker Stein†

Einleitung

Gips findet seit Jahrtausenden als Bindemittel und Baustoff Verwendung. Naturgips- und Naturanhydritvorkommen gibt es im Germanischen Becken (bzw. Mitteleuropäischen Becken) neben den bedeutenden Lagerstätten im Zechstein (Perm) nur noch in der Trias. Während die Gipse aus dem Oberen Buntsandstein (Röt 1; siehe Beitrag A2) kaum eine Bedeutung erlangen, gibt es neben einigen interessanten Gebieten im Ausstrichbereich des Mittleren Muschelkalk (mm) vor allem Lagerstätten im Mittleren Keuper (km). Die Schwerpunkte der Gewinnung von Sulfatgesteinen aus Keuper und Muschelkalk befinden sich in Nordbayern (Franken) und in Baden-Württemberg, wobei Gips des Mittleren Muschelkalks sowie Anhydrit des Mittleren Keupers grundsätzlich nur in Gruben Untertage (Örter-Festen-/Pfeiler-Kammer-Bau) gewonnen werden können. Gipsgesteine aus dem Mittleren Keuper werden heutzutage durchweg im Steinbruch-Betrieb abgebaut (Reimann 2000). Die Jahresproduktion von Gips und Anhydrit aus der Trias Deutschlands beträgt derzeit etwa 2 Mio. t und deckt damit fast 50 % der Gesamtförderung von Sulfatgesteinen.

Bedarf und Nutzung von Sulfatgesteinen

Sulfatgesteine, wie der kristallwasserhaltige Gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) und der Anhydrit ($CaSO_4$), werden schon seit vielen Jahrhunderten handwerksmäßig oder in neuerer Zeit auch industriell abgebaut. Während früher die Herstellung einfacher gebrannter Produkte (in vielen Fällen Mehrphasengipse) im Vordergrund stand, hat sich heute die Nutzung hochgradig spezialisiert. Deshalb sind auch die qualitativen Anforderungen an die abgebauten Sulfatgesteine deutlich gestiegen. Heute gelten im Allgemeinen die in Tabelle 1 aufgeführten Qualitätsanforderungen.

Aus dieser Übersicht ist deutlich erkennbar, dass heute für die Herstellung von Baugipsen oder Gipsprodukten im Allgemeinen mindestens 80 % des genutzten Gesteins Gips sein muss. Weiterhin wird klar, dass insbesondere an die Freiheit von löslichen Salzen inzwischen sehr hohe Anforderungen gestellt werden. Zur Erreichung dieser Qualitätsanforderungen werden heute in den Steinbrüchen teilweise erhebliche Anstrengungen unternommen. Da in vielen Fällen die Gipssteine durch Karbonate oder Tone verunreinigt sind, hat es sich bewährt, selektiv abzubauen oder das gebrochene Fördergut bei 15 mm bzw. im Winter auch bei 30 mm abzusieben, und die Kornfraktion unter 30 mm bzw. unter 15 mm zu verwerfen. Mitunter muss das Fördergut wegen eines zu hohen Gehaltes an löslichen Salzen auch gewaschen werden.

Dieses abgesiebte bzw. gelegentlich auch noch zusätzlich gewaschene Fördergut wird nun den Verarbeitungseinrichtungen zugeführt. Zunächst wird das Gut kalziniert, d. h. entwässert. An sich ist für die Entwässerung von Gips zu Halbhydrat ($CaSO_4 \cdot 0{,}5\,H_2O$) kein sehr hoher Energieaufwand erforderlich. Schwieriger wird es jedoch, wenn neben Stuckgips auch noch andere Phasen des Systems ($CaSO_4 \cdot 2H_2O/CaSO_4$) hergestellt werden müssen. Dies ist im Allgemeinen bei der Herstellung von Mehrphasengipsen für den Putzgips erforderlich.

Es gibt inzwischen eine große Vielfalt an Kalziniergeräten (Kocher, Drehofen, Rostband, Mühle), deren Beschreibung jedoch nicht Aufgabe dieses Beitrags sein kann. Maßgeblich ist, dass sie entweder Stuckgipse oder Mehrphasengipse erzeugen. In besonders konstruierten Brennaggregaten wird in warmen Sommern inzwischen zum Brennen der Gipse fast nur noch die stöchiometrisch, also die wirklich erforderliche Wärmemenge benötigt.

Tab. 1. Wichtigste Anforderungen an Gips- und Anhydritstein.

Verwendungszweck, Anforderungen	Abbindeverzögerer für die Zementindustrie	Gipssteine für die Herstellung von Gipskartonplatten	Gipssteine für die Herstellung von Gipsputzen	Gipssteine für die Herstellung von Gipsvollwandplatten	Gipssteine für die Herstellung von Spezialgipsen
Gipsgehalt im Rohstein	mind. 70–80 M.-%	> 80 M.-%	75–85 M.-%	> 85 M.-%	mögl. > 97 M.-%
Anhydritgehalt im Rohstein	vielf. > 90 M.-%	unerwünscht	unerwünscht	unerwünscht	unerwünscht
Tonminerale (Illit u. a.)	–	max. 10 M.-%	max. 10 M.-%	max. 5 M.-%	möglichst frei von Ton
Quelltone (Corrensit/Smektit)	–	< 1 % (0,8 %/0,6 %)	< 1,2 %	< 1 %	unerwünscht
Karbonat	–	Je nach Brennaggregat in geringen Mengen tolerierbar/max. 10 M.-%	max. 10 M.-%	max. 5 M.-%	möglichst frei von Karbonaten
Chloridgehalte	unerwünscht (< 500 ppm)	< 100 ppm	< 200 ppm	< 200 ppm	< 100 ppm
Na_2O-Gehalte	unerwünscht	< 0,04 M.-%	max. 0,06 M.-%	max. 0,06 M.-%	unerwünscht
Gehalte an ausblühenden, leicht löslichen Salen (Epsomit u. a.)	unerwünscht	unerwünscht	möglichst keine	möglichst keine	keine
Sonstige Störkomponenten	–	möglichst frei von Quarz, da sonst erhöhte Abrasion an Fertigungsstraße	möglichst frei von Quarz	möglichst frei von Quarz	möglichst keinerlei Fremdbeimengungen
Sonstige Anforderungen	Gips-Anhydrit-Gemische definierter und gleichbleibender Zusammensetzung tendenziell bevorzugt/ oder gleichbleibender SO_3-Gehalt	Gleichmäßigkeit der Rohsteine	Gleichmäßigkeit der Rohsteine, Korngrößenverteilung definierter Zusammensetzung sollte herstellbar sein	Gleichmäßigkeit der Rohsteine	Gleichmäßigkeit der Rohsteine. Hoher Weißgrad, hohe Eigenfestigkeit der Rohsteine für Herstellung von Alpha-Halbhydrat (Hartformgipse) erwünscht

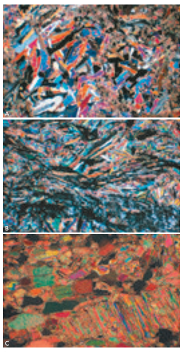


Abb. 5. Unterschiedliche Kristallinitäten von Trias-Anhydriten. **A.** Mittlerer Keuper, feinkristallin und kurzsäulig. Grube Hüttenheim (Franken). **B.** Mittlerer Muschelkalk, feinkristallin und langsäulig. Grube Ihn (Saarland). **C.** Röt 1, grobkristallin und kurzsäulig. Grube Holenberg (Niedersachsen). – ×-Nicols, Vergrößerung etwa 40-fach.

ca. 120 m Überlagerung im Gelände anzutreffen. Wegen der sehr guten Löslichkeit der Gipssteine gibt es Ausbisse an der Erdoberfläche nur außerordentlich selten. Sie beschränken sich im Allgemeinen auf extreme Steilhänge, z. B. im Bereich des Wesertales bzw. seiner Nebentäler. An solchen Stellen wurden früher gelegentlich auch die Gipssteine im Tagebau gewonnen.

Die Lagerstätten von Gipsstein unter den Plateaus des Oberen Muschelkalks und des Unteren Keupers erstrecken sich in Nord-, insbesondere aber in Süddeutschland, auf sehr große Flächenanteile. Die hier sicherlich vorhandenen sehr großen Vorräte können jedoch nur untertage gewonnen werden. Bei im Allgemeinen schlechter Qualität der Lagerstätten, insbesondere unzureichendem primärem Reinheitsgrad, findet der Rohgips häufig nur als Zementzuschlagstoff Verwendung. Lediglich in bevorzugten Lagerstätten und bei streng selektiver Gewinnung ist die Herstellung auch höherwertiger Baugipse, teilweise jedoch auch nur im Verschnitt mit Gipssteinen aus dem Zechstein bzw. mit synthetischen Gipsen (vor allem REA-Gipsen) möglich. Störend ist in den Gipssteinen des Mittleren Muschelkalks vor allem die Verunreinigung mit tonig-karbonatischen Zwischenmitteln. Daneben finden sich auch noch häufig tiefreichende und i. d. R. mit Residualgesteinen gefüllte Dolinen. Gelegentlich treten außerdem auch quellfähige Tonminerale (Corrensit, Smektit) auf, die selbst bei nur sehr geringen Anteilen von etwa einem Prozent den Gips unbrauchbar für die Herstellung von Gipsprodukten werden lassen.

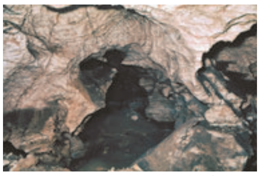


Abb. 6. Subterrane Auslaugung von Gips im Mittleren Keuper. Gipshöhle Seinsheim bei Würzburg (Franken).

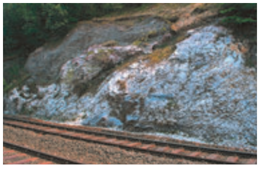
Während es früher relativ viele Gruben gab, in denen Gipssteine des Mittleren Muschelkalkes unter Tage abgebaut wurden, ist deren Zahl mittlerweile sehr zurückgegangen (Tab. 2). Anrich (1957) nennt allein noch sieben Gruben aus Baden-Württemberg. In den Dinkelbergen bei Schopfheim/Südbaden wurde der Abbau schon vor Jahrzehnten eingestellt. Weiter in Richtung Burgundische Pforte liegen Vorkommen im Schweizer Jura (Zeglingen); die Grube La Côte bei Lure im Burgund schloss 1980. 2002 wurde die neue Grube am Breitenstein (Lkr. Holzminden) in Niedersachsen eröffnet. Ein weiteres Projekt am Feldberg wurde 2016 aufgefahren.

Nur noch eine Grube fördert in Nordhessen, während die Grube Döhlau bei Bayreuth in Franken unlängst aufgegeben wurde. In Baden-Württemberg gibt es noch die Grube Obrigheim bei Mosbach und in Rheinland-Pfalz arbeitet der Bergbau in Ralingen bei Trier. In Lothringen fördert derzeit noch ein Grubenbetrieb im wesentlichen Anhydritstein (Faulquemont). Neue Exploration findet bei Würzburg, Rottweil und Merzig statt.

Sulfatgesteine des Mittleren Keupers

Die Sulfatgesteine des Mittleren Keupers sind die wirtschaftlich bedeutendsten der Trias. Es gibt sie allerdings nur in Süddeutschland. Der sog. »Grundgips« des Mittleren Keupers bildet zusammen mit dem Grenzdolomit des Unteren Keupers einen Salinarkörper. Der Sulfatkörper, der im Regelfall nur von wenigen, zumeist dünnen Karbonatbänken durchzogen ist, besitzt Reinheitsgrade von 84–98 % Gipsgehalt und ist damit stellenweise sogar für die Produktion von Spezialgipsen geeignet. Neben den störenden Karbonaten treten Tonminerale oder lösliche Salze als Nebengemengteile stark in den Hintergrund.

Abb. 7. Röt-Sulfat und Tonstein des Röt 1 (oben links) im Kontakt mit halotektonisch eingeschupptem Anhydrit des Zechstein (unten rechts). Bahneinschnitt bei Stadtoldendorf (Niedersachsen).



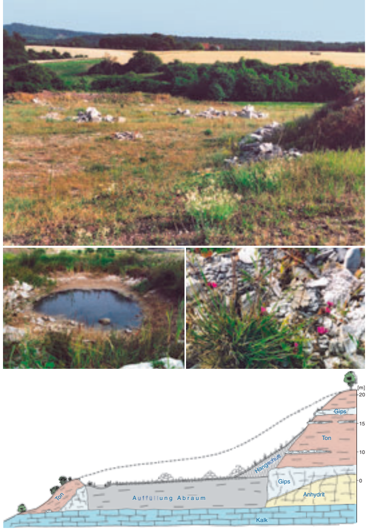


Abb. 15. Heute wird eine Abbaustätte zumeist nur teilweise verfüllt und die Oberfläche für unterschiedliche Biotypen vorbereitet (s. Skizze), z. B. Ton-Gips-Böschung (Trockenstandort), Handschuttfächer (Ruderalflora), Gipsscherben, -mehlflächen (Magerrasen), Steinhaufen (Reptilien), Wechselfeuchtflächen (Amphibien), Streuobst und Hecken (Vögel). Beispiel Hellmitzheim in Unterfranken, vier Jahre nach Abschluss der Erdarbeiten (aus Raab et al. 2002).

Umständen nicht für lange Zeiten gesichert werden. Den zu befürchtenden Bergschäden und anderen damit verbundenen Gefahren für die Allgemeinheit begegnet man im Allgemeinen durch ein generelles Absenken der Oberfläche des Grubengebäudes, z. B. durch »Zubruchschießen« (Sprengen) der Pfeiler oder aber auch durch Verfüllen der Hohlräume mit geeignetem Material. Es gibt auch den Fall, dass lediglich die Oberfläche über der Grube als mögliches Bergschadensgebiet großflächig abgesperrt wird. Die jeweils zur Anwendung kommenden Verfahren werden über Betriebspläne nach dem Bundesberggesetz geregelt.

Steinbrüche hingegen werden entweder nach Einstellen des Abbaus oder bei großen Abbauflächen auch nach Erreichen einzelner Abbauabschnitte schrittweise rekultiviert oder auch

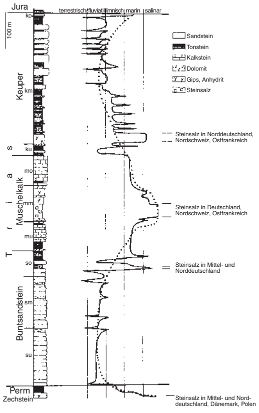
D4 Steinsalz der Germanischen Trias

Theo Simon

Einleitung

Friedrich August von Alberti (1834) schuf in seinem Buch »Beitrag zu einer Monographie des Bunten Sandsteins, Muschelkalks und Keupers und die Verbindung dieser Gebilde zu einer Formation« den heute noch gültigen Begriff »Trias« (siehe Beitrag »Die »Trias« – Ein geschichtlicher Abriss«). Das Steinsalz des Mittleren Muschelkalks hat einen besonders engen Bezug zu diesem Begriff: von Alberti wies dem Steinsalz eine zentrale Stellung in seiner neuen »Formation« zu und erkannte damit den großzyklischen Aufbau der Trias-Schichten (Abb. 1; Carlé 1978). Von Alberti wusste allerdings auch von Steinsalzvorkommen im Buntsandstein Norddeutschlands und schloss auf sie durch genutzte Solequellen. Keupersalz-Vorkommen waren ihm besonders von Lothringen bekannt (Alberti 1834). Das Steinsalz war das Gestein, mit dem von Alberti sich als Salinist und Bergmann am meisten beschäftigte: Von 1815 bis zu seiner Pensionierung im Jahre 1870 war er auf den königlich-württembergischen Salinen Sulz, Bad Friedrichshall, Schwenningen und Rottweil beschäftigt (Carlé 1978, 1982, Simon 1995). Somit stand das Muschelkalksalz Südwestdeutschlands am Anfang der wissenschaftlichen geologischen Erforschung der Steinsalzlager der Germanischen Trias. Es wird deshalb etwas ausführlicher beschrieben, insbesondere was seine Nutzung in Vergangenheit und Gegenwart anbelangt (Simon 1995).

Abb. 1. Geologisches Profil und Ablagerungsverhältnisse in der Germanischen Trias von Südwestdeutschland. Trotz des etwas schwankenden Verlaufs der Kurve wird der salinare Großzyklus (gepunktet) deutlich, wie ihn schon von Alberti erkannt hatte. Aus Simon (1995).



Jura
terrestrisch
fluviatil
limnisch
marin
salinar
100 m
ko
Keuper
km
ku
mo
Muschelkalk
mm
mu
so
Buntsandstein
sm
su
T r i a s
Perm
Zechstein
Sandstein
Tonstein
Kalkstein
Dolomit
Gips, Anhydrit
Steinsalz
Steinsalz in Norddeutschland, Nordschweiz, Ostfrankreich
Steinsalz in Deutschland, Nordschweiz, Ostfrankreich
Steinsalz in Mittel- und Norddeutschland
Steinsalz in Mittel- und Norddeutschland, Dänemark, Polen

Steinsalz im Buntsandstein

Steinsalz kommt im Buntsandstein nur in der Röt-Formation vor (siehe Beitrag A2). Diese beginnt im Zentralbereich des Mitteleuropäischen Beckens (Mittelpolen bis Ostengland) mit einer nur wenige Metern mächtigen Schichtenfolge aus Karbonaten und silthaltigen Sulfaten. Darüber setzt das Steinsalz ein. Im Bereich der Nordsee (Bachmann et al. 2010: Anglo-Dutch Basin) erreicht das Steinsalz Mächtigkeiten bis zu 140 m, aber auch im Norddeutschen Becken werden annähernd gleiche Werte erreicht. Die höchsten Werte sind jeweils an etwa N–S verlaufende tektonische Senkungsstrukturen gebunden. Auf Schwellen kann Steinsalz fehlen. Die Verbreitung des Steinsalzes umfasst den ganzen Zentralbereich des Mitteleuropäischen Beckens von Mittelpolen bis Ostengland und von Nordhessen bis Dänemark (siehe Beitrag A5). Die Verbreitung zeichnet die WNW–ESE streichende Achse des Sedimentationsbeckens nach.

Das graurötliche Steinsalz ist durch Ton und teilweise Silt verunreinigt und durch mehrere, nur bis zu wenigen Metern mächtige, karbonatische und sulfatische Gesteinsfolgen unterbrochen (Radzinski in Bachmann et al. 2008). Diese Gesteinsfolgen zeigen an, dass die salinare Sedimentation zyklisch gesteuert wurde. Wasserstandsschwankungen in der Tethys führten zu unterschiedlichen Zuflussraten von Meerwasser über die Schlesisch-Mährische und die Ostkarpatenpforte aus dem Weltmeer in das Mitteleuropäische Becken (Rusitzka 1967). Eine zeitweise Abschnürung des Beckens von der Tethys ist wahrscheinlich. Der Weg der Ingression lässt sich auch über die Fazies in der unteren Röt-Formation nachzeichnen: In Pfortennähe wurden karbonatische Sedimente, nach Westen zunehmend sulfatisch-halitische Sedimente abgelagert. Zu den randlichen Beckenbereichen hin wird eine tonig-siltige Sabkha-Sedimentation von einer fluviatilen Randfazies abgelöst (Paul 2006, siehe Beitrag A4).

Etwa gleiche Verhältnisse muss man auch für die max. 20 m mächtigen steinsalzführenden Schichten in der Mitte der Formation annehmen, die allerdings nur in den Senkungsbereichen der dort bis über 300 m mächtigen Röt-Formation auftreten.

Weitere steinsalzführende Schichten kommen im oberen Teil der Formation vor, nach heutiger Kenntnis allerdings nur in den randlichen Beckenbereichen des süddeutschen Teilbeckens. Dieser Teil des Beckens liegt am weitesten von den Pforten zur Tethys entfernt und wurde somit nur kurzzeitig durch weit nach Westen reichende Meeresvorstöße erreicht. Dort konzentrierte sich das Meerwasser schließlich so stark, dass Steinsalz ausfallen konnte. Die Entstehung ist dem randlichen Bereich von Richter-Bernburgs (1972) Flachschelf-Salinar ähnlich. Das Steinsalz liegt als sehr dünne Krusten in Poren und zwischen Tonmineralen vor. Der NaCl-Gehalt liegt nur bei 5 g/kg Gestein (Fels et al. 2003).

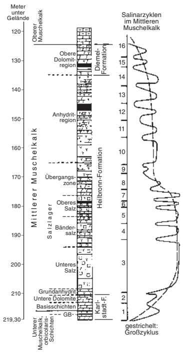
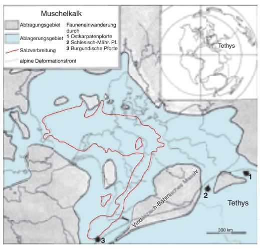


Abb. 2. Salinare Zyklen im Mittleren Muschelkalk, dargestellt am geologischen Profil der neuen Solebohrung von Bad Rappenau, die 1986 abgeteuft wurde. Aus Simon (1988).



◁ **Abb. 3.** Paläogeographie zur Zeit des Muschelkalks. Der Zufluss frischen Ozeanwassers aus der Tethys erfolgte hauptsächlich durch die Burgundische Pforte. Aus Hagdorn & Simon (1988), nach Wurster (1968), Briden et al. (1974) und Ziegler (1982).

wohl Meeresspiegelschwankungen die Hauptursache für die Zyklizität des Salinars im Mittleren Muschelkalk, wenn auch tektonische Bewegungen im Pfortenbereich nicht ausgeschlossen werden können. So ist im polnischen Teil des Beckens sicher eine Senkung im Pfortenbereich die Ursache dafür, dass dort kein Steinsalz ausgeschieden wurde (Abb. 3) und sich dort die vollmarine Entwicklung zunächst fortsetzte. Im Muschelkalk des Germanischen Beckens ist es nicht zur Ausscheidung von Kali- oder Magnesiumsalzen gekommen, da die Abschnürung des Beckens von der Tethys nicht weit genug fortgeschritten war.

Das Muschelkalksalz weist einige Erscheinungen auf (Jonischkeit 2003, 2010), deren Entstehung bis heute nicht endgültig geklärt ist. Das sind zum einen die »Senkrechtstreifung« einzelner Steinsalzschichten und zum anderen die »Pilze« und »Näpfe« an der Basis des Steinsalzes. Unter der Senkrechtstreifung versteht man im Anschnitt dunkle, etwas ton- und anhydrithaltigere Streifen, die im Abstand von etwa 1–2 dm senkrecht zur Lagerung stehen, aber auch bis zu 45° geneigt sein können. Zwischen den max. 1 dm breiten »Streifen« ist reines Salz ausgebildet. Räumlich betrachtet lässt sich die Senkrechtstreifung als säulenartige Klarsalzanordnung beschreiben, wobei das Klarsalz, welches ohne Verunreinigungen und deshalb durchsichtig ist, von Ton- und Anhydritverunreinigungen umgeben ist. Schachl (1954) führt die Streifung auf diagenetische Vorgänge zurück (»Hydrometamorphose«).

An der Basis des Steinsalzes befinden sich lokal bis zu mehrere Zehnermeter breite und lange Rücken (Pilze) aus Gestein der liegenden Anhydritschichten, die bis zu mehrere Meter in das hangende Steinsalz hineinragen. Von oben greifen, oft in Nachbarschaft von Pilzen, meist etwas langgestreckte Mulden (Näpfe) mit bis einigen Dekametern Breite in das gestreifte Salz ein. Schachl (1954) erklärt die Entstehung der Pilze im Zusammenhang mit Lösungsvorgängen und dem Absinken von Verunreinigungen bei der »Hydrometamorphose«. Die Entstehung der Näpfe wird bisher mit Erosion und anschließender Füllung der Lösungsnäpfe mit Bändersalz (Liniensalz) erklärt (Schachl 1954, Wild 1968, 1980). Möglicherweise sind die geschilderten Erscheinungen auch auf tektonische Vorgänge nach der Sedimentation zurückzuführen (Brunner 1986). Balzer (2003) bringt diese Phänomene mit der Gips-Anhydrit-Umwandlung in den liegenden Schichten und einer Umkristallisation des Steinsalzes in Verbindung. Diese Besonderheiten wurden bisher nur in den Bergwerken Südwestdeutschlands beobachtet. In Bohrkernen aus Nord- und Mitteldeutschland deutet sich zwar eine Senkrechtstreifung an, Pilz- und Napfstrukturen konnten noch nicht gefunden werden.

Das Steinsalz ist unter den in Mitteleuropa herrschenden Klimaverhältnissen nicht beständig. Die Auslaugung des Steinsalzlagers war für die Salzgewinnung bis ins 19. Jahrhundert hinein besonders wichtig. Das auslaugende Grundwasser nahm Natriumchlorid auf und verfrachtete dieses zu Grundwasseraustrittstellen wie z. B. Quellen, Brunnen und Grundwasserplänken. Letztere sind natürliche Vorkommen von Grundwasser in kleinen Geländesenken und -mulden, wie z. B. in Talauen (Abb. 4). Dabei erfolgte eine starke Mächtigkeitsreduktion des Mittleren Muschelkalks (Abb. 5): Zunächst durch Auslaugung des Steinsalzes auf 75 %, dann durch die Sulfatgesteinsauslaugung auf schließlich 45 % der ursprünglichen Mächtigkeit (Simon 1988, 1997).

Technische Gewinnung

Eine nahezu kontinuierliche Gewinnung des Muschelkalksalzes über mehr als zwei Jahrtausende fand nur in Südwestdeutschland (Baden-Württemberg) statt, weshalb dieses Gebiet bei der Beschreibung der technischen Gewinnung hier etwas eingehender berücksichtigt wird (Simon 1995, 2003b, 2015).

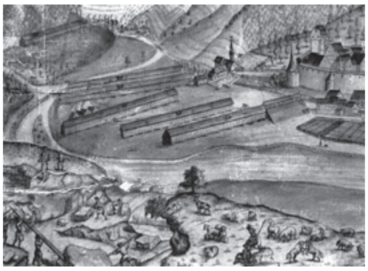


Abb. 8. Gradierhäuser (Gradierwerke) in Schwäbisch Hall. Rechts neben dem vorderen Gradierwerk steht das Solereservoir mit bis zum Boden reichenden Dach. Das erste Gradierwerk auf dem Rippberg (links oben) ist gerade im Bau. Ausschnitt aus einem Tableau von J. C. Körner aus dem Jahre 1755. Stadtarchiv Schwäbisch Hall, BS 221.

Im Jahre 1823 wurde südlich Schwäbisch Hall ein weiterer Bergwerksversuch unternommen, der 1824 zur Eröffnung des ersten deutschen Steinsalzbergwerks führte. Mit dem Bergwerk »Wilhelmsglück« blühte die Haller Saline auf: Eisenbahnbau, Seilbahnbau, Bau einer 10 km langen Soleleitung zu den Siedeeinrichtungen in der Stadt waren die Folge. Ein interessantes Detail ist die Anlage des Schrägschachts von 1843. Dieser hatte eine Neigung, bei der die Sonne am 27. September, dem Geburtstag des Königs Wilhelm I., um 10.30 Uhr unmittelbar auf das Steinsalzlager in etwa 110 m Tiefe schien. Der Besuch des Königs war für diesen Tag angesagt, aber er kam nicht! Im Bergwerk Wilhelmsglück wurden jährlich durchschnittlich 11 000 t Steinsalz abgebaut. 150 Männer waren unmittelbar beim Bergwerk beschäftigt.

Im Zeitraum 1842–1850 scheiterte bei Rottweil, ebenfalls wegen zu starker Wassereinbrüche, ein Versuch, bei 56 m unter Gelände einen Schacht auf das Steinsalz niederzubringen. 1854–1858 gelang jedoch der Bau des Bergwerks Stetten bei Haigerloch. 1854–1859 wurde das Bergwerk Jagstfeld unter der Leitung von Friedrich August von Alberti angelegt. 1885 kam das Bergwerk in Heilbronn hinzu. Im Jahre 1896 stürzte das Bergwerk von Jagstfeld ein, wofür schon 1899 das von Kochendorf entstand. 1900 wurde das Bergwerk Wilhelmsglück stillgelegt.

Der preußische Staat errichtete nach langen Voruntersuchungen 1863 ein Bergwerk auf Steinsalz im Mittleren Muschelkalk in Ilversgehofen bei Erfurt. Zwei Schächte erreichten das Steinsalz in einer Teufe von 370 m. Zunächst wurde das Salz im damals üblichen Kammer-Pfeiler-Abbau gewonnen, später auch durch das Spritzverfahren, mit dem untertage das Steinsalz mit Wasser gelöst wurde. Die nach oben verbrachte Sole wurde in der Saline gesotten. 1869 lag die Produktion an Salz bei 2000 t/a. Gegenüber den anderen Bergwerken und Salinen war das eine kleine Produktion, denn diese erzielten teilweise mehr als die zehnfache Menge. 1916 wurden Bergwerk und Saline geschlossen (Schubert 1982, 1984, Emmons & Walter 1988, Bodenstein et al. 2005).

Um 1900 waren in Deutschland im Mittleren Muschelkalk vier Bergwerke und 13 Salinen in Betrieb. Berücksichtigt man noch die Salinen in der nahegelegenen Schweiz (Schweizerhalle,

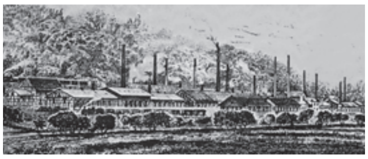


Abb. 9. Saline Ludwigshalle um 1900. Zeichnung aus dem Archiv der Solvay Fluor Derivate GmbH, Bad Wimpfen.

D5 Kohlenwasserstofflagerstätten der Germanischen Trias

Berit Legler

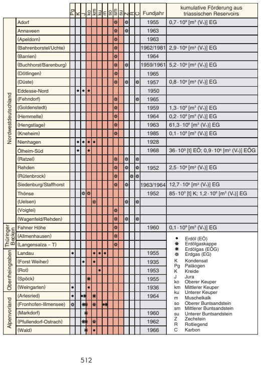
Einleitung

Erste Kohlenwasserstofflagerstätten in triassischen Sedimenten wurden in Deutschland bereits in den 1920er und 1930er Jahren gefunden. Dabei handelte es sich um Erdöllagerstätten in Norddeutschland und im Oberrheingraben. Die Hauptphase des Auffindens von Erdöl- und Erdgasfeldern erstreckte sich jedoch über die 1950er und 1960er Jahre (Abb. 1). Eine Vielzahl von Lagerstätten ist mittlerweile erschöpft und die Förderung eingestellt. Allerdings dienen einige ausgeförderte Lagerstätten heute als Gasspeicher (siehe Beitrag D6). So werden die ehemaligen Erdgasfelder mit Buntsandstein-Reservoiren Dötlingen und Uelsen in Niedersachsen sowie Allmenhausen in Thüringen als Porenspeicher genutzt. Auch der Trigonodus-Dolomit des Muschelkalks im ehemaligen Erdölfeld Fronhofen-Illmensee im Alpenvorland erfährt eine Nachnutzung als Gasspeicher (Sedlacek 2007).

Die ersten Erdgasfelder im Buntsandstein der britischen und niederländischen Nordsee wurden Ende der 1960er Jahre entdeckt (Glennie 2001). Im niederländischen Sektor der südlichen Nordsee wurden auch in den letzten Jahren noch bedeutende Neufunde getätigt (Karnin et al. 2008). Neuere Entwicklungen, wie z. B. der Erdölfund im Buntsandstein von Speyer/Römerberg im Oberrheingraben, bleiben auf Grund des Zeitpunkts der Fertigstellung dieses Beitrags unberücksichtigt.

Die wichtigsten Trias-Reservoire bilden der Buntsandstein und seine Äquivalente sowie Sandsteine des Keupers. Muschelkalk-Lagerstätten sind seltener. Im Folgenden werden Speichergesteinseigenschaften und wichtige Prozesse erläutert, die zur Lagerstättenbildung geführt haben. Darüber hinaus werden einige Lagerstätten exemplarisch vorgestellt.

Abb. 1. Übersicht der deutschen Kohlenwasserstofflagerstätten mit zumindest anteiliger Förderung aus triassischen Speichern (aufgegebene Lagerstätten in Klammern). Nach Boigk (1981) und LBEG (2007).



		Pg	K	J	ko	km	ku	m	so	sm	su	Z	R	C	Fundjahr	kumulative Förderung aus triassischen Reservoirs
Nordwestdeutschland	Adorf									☼		☼			1955	$0{,}7 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	Annaveen									☼		☼			1963	
	(Apeldorn)									☼					1963	
	(Bahrenborstel/Uchte)									☼					1962/1981	$2{,}9 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	(Barrien)									☼					1964	
	(Buchhorst/Barenburg)									☼		☼			1959/1961	$5{,}2 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	(Dötlingen)									☼					1965	
	(Düste)									☼		☼		☼	1957	$0{,}8 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	Eddesse-Nord		•	•	•										1950	
	(Fehndorf)									☼				☼	1965	
	(Goldenstedt)									☼					1959	$1{,}3 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	(Hemmelte)									☼					1964	$0{,}2 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	(Hengstlage)									☼					1963	$61{,}3 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	(Kneheim)									☼					1985	$0{,}1 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	Nienhagen		•	•	•	•									1928	
	Ölheim-Süd		•		•										1968	$36 \cdot 10^3$ [t] EÖ; $0{,}9 \cdot 10^6$ [m³ (V_n)] EÖG
	(Ratzel)									☼		☼		☼		
	Rehden									☼		☼		☼	1952	$2{,}5 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	(Rütenbrock)									☼			☼	☼		
	Siedenburg/Staffhorst									☼		☼			1963/1964	$12{,}7 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	Thönse				☼	☼									1952	$85 \cdot 10^3$ [t] K; $1{,}2 \cdot 10^6$ [m³ (V_n)] EG
	(Uelsen)						☼					☼		☼		
	(Voigtei)									☼						
	(Wagenfeld/Rehden)									☼		☼		☼		
Thüringer Becken	Fahner Höhe									☼					1960	$0{,}1 \cdot 10^9$ [m³ (V_n)] EG
	(Allmenhausen)									☼						
	(Langensalza – T)									☼						
Oberrheingraben	Landau	•				•	•	•							1955	
	(Forst Weiher)			•		•									1935	
	(Rot)						•								1953	
	(Spöck)				✸										1955	
	(Weingarten)	•			•										1936	
Alpenvorland	(Arlesried)	•		•	✸	✸									1964	
	(Fronhofen-Illmensee)	☼		✸	✸	☼		•✸								
	(Markdorf)				✸										1960	
	(Pfullendorf-Ostrach)			✸	✸	☼									1962	
	(Wald)				✸	•									1966	

- • Erdöl (EÖ)
- ✸ Erdölgaskappe
- ✹ Erdölgas (EÖG)
- ☼ Erdgas (EG)

K Kondensat
Pg Paläogen
K Kreide
J Jura
ko Oberer Keuper
km Mittlerer Keuper
ku Unterer Keuper
m Muschelkalk
so Oberer Buntsandstein
sm Mittlerer Buntsandstein
su Unterer Buntsandstein
Z Zechstein
R Rotliegend
C Karbon

Norddeutsches Becken

In Norddeutschland treten Kohlenwasserstofflagerstätten (Abb. 2) in Sandsteinen des Mittleren Buntsandsteins und des Oberen Keupers auf. Dabei sind die Sedimentgesteine des Buntsandsteins generell Erdgas- und die des Keupers im Wesentlichen Erdölreservoire. Als Muttergesteine der Buntsandstein-Gaslagerstätten dienen die Ablagerungen des flözführenden Oberkarbons (Boigk et al. 1971). Das Erdöl der Keuper-Lagerstätten wurde aus dem Posidonienschiefer (Unterer Jura) generiert (Gerling et al. 1989). Der Buntsandstein stellt für die Erdgasförderung in Deutschland nach der Produktion aus Rotliegend- und Zechstein-Reservoiren das drittwichtigste stratigraphische Intervall dar. Im Gegensatz dazu nimmt die Produktion von Erdöl aus triassischen Speichern nur einen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamtproduktion ein. Die meisten Erdöllagerstätten mit Keuper-Reservoiren produzieren darüber hinaus auch aus anderen Speicherhorizonten.

Buntsandstein

Sedimentgesteine des Buntsandsteins sind in Norddeutschland überwiegend durch Ton-, Silt- und Sandsteine charakterisiert, die in einem fluviatil-lakustrinen bis brackisch-marinen Milieu abgelagert wurden (z. B. Geluk 2005, Röhling 2013, Heunisch & Röhling 2016). Der Untere Buntsandstein wird aus Tonsteinen mit eingeschalteten Oolithlagen aufgebaut, die in einem Playasee entstanden sind (siehe Beitrag A4). Die Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins (Abb. 3) wurden fluviatil bzw. äolisch abgelagert. Die Volpriehausen-, Detfurth- und Hardegsen-Sandsteine repräsentieren Ablagerungen eines Flusssystems, das das variszische Hinterland nach Norden entwässerte. In den Sandsteinen können Ooide vorkommen (Abb. 4; siehe auch Beitrag C2). Partiell wurden die primär fluviatil gebildeten Sande äolisch umgelagert. Der Solling-Sandstein Nordwestdeutschlands wurde in einem Ost-West-streichenden Dünengürtel abgelagert. Die Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins wechsellagern mit Ton-/Siltsteinen eines Playasees. Der Obere Buntsandstein ist durch Feinklastika und Evaporite gekennzeichnet, die unter zunehmend mariner Beeinflussung abgelagert wurden.

D6 Untergrundspeicherung in der Germanischen Trias

Hagen Feldrappe und Karsten Obst

Einführung

Als Alternative zur Lagerung großer Volumina gasförmiger und flüssiger Stoffe der Energiewirtschaft und der chemischen Industrie in oberirdischen Behältern und Tanks wurden bereits vor ca. 100 Jahren die ersten Untergrundspeicher entwickelt. Diese können bei der Erdgasspeicherung bis zu mehreren Mrd. m^3 und bei der Flüssigkeitsspeicherung bis zu 120 Mio. m^3 des Speichermediums fassen (Griesbach & Heinze 1996). Sie zeichnen sich wegen des geringen Materialverbrauchs und der Variabilität hinsichtlich Kapazität, Leistungsfähigkeit und Speichermedien durch eine hohe Wirtschaftlichkeit aus. Zudem haben sie einen vergleichsweise geringen obertägigen Flächenbedarf.

Die Untergrundspeicherung erfolgt größtenteils in fein verteilten, ursprünglich gas- oder wassergefüllten Hohlräumen im Gestein (Poren, Klüfte) oder in künstlichen, durch Bergbau geschaffenen Hohlräumen (Kavernen, Bergwerke). Dementsprechend wird grundsätzlich zwischen den beiden Speichertypen Porenspeicher und Hohlraumspeicher unterschieden. Zu den Porenspeichern gehören abgeförderte Erdgas- oder Erdöllagerstätten sowie Aquiferstrukturen. Hohlraumspeicher sind ausgesolte Steinsalzkavernen, ausgebeutete Bergwerke oder auch Felskavernen (Abb. 1)

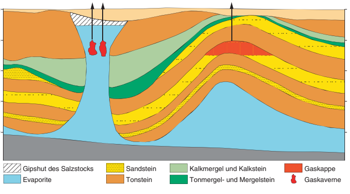
Unterschieden wird auch zwischen einer zeitlich befristeten Einlagerung (Zwischenspeicherung) und der dauerhaften Einlagerung (Deponierung), an die jeweils unterschiedliche geologische Voraussetzungen und technische Anforderungen gestellt werden (Obst et al. 2015). Zeitlich befristet ist die Speicherung von Rohstoffen wie Erdgas, Erdöl, Luft, Kraftstoffen, Propan/Butan, Wasserstoff, Helium und anderen chemischen und petrochemischen Erzeugnissen, die für die Energiegewinnung oder vielfältige Produktionsprozesse genutzt werden. Diese Medien werden zyklisch (saisonal) oder je nach Bedarf und Preis ein- und ausgespeichert. Zu den dauerhaft eingelagerten flüssigen und gasförmigen Substanzen gehören beispielsweise die bei der Solung von Salzkavernen entstehenden Laugen, die beim Bergbau, bei der chemischen Industrie und bei der Förderung von Kohlenwasserstoffen anfallenden Prozesswässer sowie auch das Treibhausgas CO_2 (Obst 2008).

Die Geschichte der Untergrundspeicherung reicht bis in das Jahr 1915 zurück, als in einem abgeförderten Gasfeld in Welland County (Ontario, Kanada) der erste Untergrundspeicher errichtet wurde (Jagsch 2007). Diesem folgte 1916 die Inbetriebnahme eines Speichers in einem Gasfeld im Staat New York (USA). Im Jahre 1931 entstand der erste Speicher in einem Wasser führenden Sandsteinhorizont (Aquifer). In Europa wurden in den 1950er Jahren ebenfalls Speicher errichtet. In Deutschland nahmen 1950 der erste Porenspeicher in Engelbostel und 1962 der erste Salzkavernenspeicher mit der Butan-Kaverne Heide 101 den Betrieb auf. Auf dem Gebiet der ehemaligen DDR wurde 1964 erstmals der Porenspeicher Ketzin bei Potsdam mit Stadtgas befüllt. Der Erdgasspeicher Buchholz bei Potsdam wurde 1979 fertiggestellt.

Mittlerweile hat die Untergrundspeicherung weltweit große Bedeutung erlangt. Sie ist heute zum unverzichtbaren Bestandteil nationaler und internationaler Gastransportsysteme, der strategischen Bevorratung und der Lagerhaltung der chemischen Industrie geworden. Während die in Kavernenspeichern gelagerten Medien kurzfristig und nahezu vollständig rückholbar sind, ist für den Betrieb von Porenspeichern zwischen dem nicht rückholbaren Anteil, dem so genannten Kissengas (hält einen erforderlichen Basisdruck im Reservoir aufrecht) und dem eigentlichen Arbeitsgas zu unterscheiden, das ein- und ausgespeichert werden kann, allerdings mit vergleichsweise geringen Entnahmeraten.

Laut Jahresbericht des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen standen 2016 für die Erdgasspeicherung in Deutschland 18 Poren- und 32 Kavernenspeicher mit einem Arbeitsgasvolumen (V_n) von 24,2 Mrd. m^3 zur Verfügung (LBEG 2017). Das entspricht mehr als 20 % des jährlichen

Abb. 1. Schematische Darstellung von Speichertypen. Die Porenspeicher werden zumeist in Antiklinalstrukturen bzw. tektonischen Fallenstrukturen errichtet. Für die Kavernenspeicher werden große Hohlräume in die Salzstöcke bzw. Salzkissen gesolt.



D7

Hydrogeologische Aspekte der Germanischen Trias

WOLFGANG GOSSEL und RONNY LÄHNE

Einleitung

Die hydrogeologischen Verhältnisse zur Zeit der Trias lassen sich nur über sedimentologische und paläontologische Anzeiger (Proxies) rekonstruieren, da weder chemische noch Isotopen-Analysen hier vertiefende Kenntnisse liefern können. Zunächst zeigen viele Sedimente des Buntsandsteins aufgrund ihrer häufigen Rotfärbung ein warmes und wechselfeuchtes bzw. semiarides Klima an (FÜCHTBAUER 1988; siehe Beitrag A10). In den Sedimentfolgen des Buntsandsteins sind nur in wenigen Fällen Reste von Humusbildungen nachweisbar, so dass insgesamt von einer eher geringmächtigen Bodenbildung ausgegangen werden muss. Die verbreitete Rotfärbung weist auf ein oxidierendes Milieu hin im Bereich der Sedimentoberfläche, bei dem frühdiagenetisch Fe^{2+}-haltige Minerale, wie z. B. Biotit, Pyroxene und Hornblenden, in das Fe^{3+}-haltige Mineral Hämatit umgewandelt wird. Eine mitunter partielle Grünfärbung zuvor rotgefärbter Tonsteine und Sandsteine gibt Hinweis auf sekundäre Entfärbungsprozesse. Dies weist auf Grundwässer hin, die das dreiwertige Eisen entweder aus dem sedimentären Verband herausgelöst oder aufgrund reduzierender Bedingungen in zweiwertiges Eisen überführt haben.

Während Sedimentstrukturen häufig fluviatile Prozesse belegen, dürfte das Grundwasser in den wechselfeuchten bzw. semiariden Gebieten des Buntsandsteins in mittleren Tiefen gelegen haben. Hohe Grundwasserflurabstände führten zu einer geringen Vegetation in weiten Teilen des Beckens. Vielfach dürften die Voraussetzungen für eine fossile Überlieferung von Pflanzenresten, sieht man einmal ab von Wurzelspuren, eher ungünstig gewesen sein. Auf der anderen Seite reichten Grundwasservorkommen zumindest lokal und/oder temporär nahe an die Sedimentoberfläche heran, so dass sich Böden bilden konnten, die durch spezifische Bildungen, wie z. B. Karneolhorizonte, überliefert worden sind. Auch in Bereichen mit temporären Oberflächengewässern, wie Playaseen (siehe Beiträge C2, C3) oder fluviatilen Sedimentationsräumen (siehe Beiträge C4–C7), können sich Pflanzengesellschaften angesiedelt haben, von denen jedoch nennenswerte Belege für Humusbildungen nicht überliefert wurden. Auch Bereiche mit einer lang anhaltenden und guten Grundwasserversorgung oder gar Hinweise auf Sumpf- und Moorgebiete lassen sich kaum nachweisen. Auch die bei flurnahen Grundwasserständen in ariden bis semiariden Gebieten oft nachgewiesenen Versalzungen an oder nahe der Erdoberfläche, wie z. B. durch Steinsalzkristallmarken belegt, treten deutlich zurück, so dass das Grundwasser nicht selten Flurabstände von > 5–10 m (abhängig vom kapillaren Aufstieg in den Sedimenten) gehabt haben dürfte. Vermutlich hat auch die Beckenstruktur, verbunden mit Horizonten von z. T. gut durchlässigen Sanden, dazu beigetragen, dass das Grundwasser nicht nur ober- sondern auch unterirdisch schnell abfloss und nicht zur Versorgung ausgedehnter Vegetationsbereiche beitragen konnte. Die Bildung von Sulfaten und Steinsalz im Röt zeigt schließlich den beginnenden marinen Einfluss an, der sich deutlich von den zumeist terrestrischen Ablagerungen des Unteren und Mittleren Buntsandsteins unterscheidet.

Über das Grundwasser im marinen Muschelkalk erübrigen sich die entsprechenden Darlegungen. Pflanzenmaterial, das in Sedimentgesteinen des Muschelkalks nachgewiesen wurde, ist in die zentralen Beckenteile zumeist eingeschwemmt worden. Vereinzelt gibt es auch in den Randbereichen Hinweise auf größere Pflanzenbestände (siehe Beitrag B3).

Der Keuper muss differenzierter analysiert werden, denn hier zeigen die Sedimente anhand der weiten Verbreitung von Paläoböden ein zumindest zeitweilig eher humides Klima. Die Kohlebildungen in der Erfurt-und teilweise auch in der Stuttgart-Formation weisen generell auf das oberflächennahe Auftreten von zumeist ausgesüßtem Grundwasser hin. Dem gegenüber zeigen die Evaporitbildungen der Grabfeld- und der Weser-Formation aridere Zeitintervalle an, wobei besonders im südlichen Teil des Germanischen Beckens marine Ingressionen aus dem Tethysbereich angezeigt sind (siehe Beitrag A6).

Hydrogeologische Nutzung triassischer Gesteine

Triassische Gesteine sind für die Wasserversorgung in Deutschland von besonders großer Bedeutung:

- als Grundwasserleiter,
- als schützende Deckschicht oder Trennhorizont verschiedener Grundwasserleiter im Falle gering leitender Schichten,
- als Ursache von Mineralquellen im Falle von Salinarhorizonten.

In den folgenden Kapiteln werden die Charakteristika bei der Nutzung von Gesteinen der Trias herausgestellt und im Kapitel zur regionalen Hydrogeologie exemplarisch vertieft.

Buntsandstein

Der Buntsandstein ist ein typisches Beispiel für einen gemischt Poren- und Kluftwasser führenden Grundwasserleiter. Seine feinkörnigen Ausprägungen insbesondere im Unteren Buntsandstein werden in der Wasserversorgung praktisch nicht genutzt. Als Quellhorizont ist die Grenze Unterer/Mittlerer Buntsandstein in den Aufschlussgebieten jedoch von großer Bedeutung. Der Obere Buntsandstein prägt durch das Salinar der Röt-Formation die Hydrochemie und, in größeren Auslaugungsbereichen z. B. durch Subrosion und anschließende Verfüllung der entstandenen Senken oder durch Erhöhung der Trennfugenanzahl, die Hydrodynamik der darüber liegenden Schichten.

Die Hydrodynamik des Poren- und Kluftgrundwasserleiters ist in seiner Nutzbarkeit auf die Kluftsysteme beschränkt, da selbst für gut leitenden Schichten die Durchlässigkeit (k_f-Wert) selten über 10^{-5} m/s liegt. Insofern sind die Annahmen eines Zweiporositätsmediums (Dual-Porosity-Layers) für diese Grundwasserleiter zutreffend. Die relativ hohe Porosität führt dazu, dass die Entwässerung der Schichten sehr langsam aber stetig abläuft. Daher führen Quellen, besonders im Mittleren Buntsandstein, meist ganzjährig Wasser. Die Wasserversorgung kann aufgrund der beständigen Schüttung diesen Grundwasserleiter sehr gut nutzen. Hydrochemisch ist der Buntsandstein aufgrund seiner lithologischen Eigenschaften charakterisierbar:

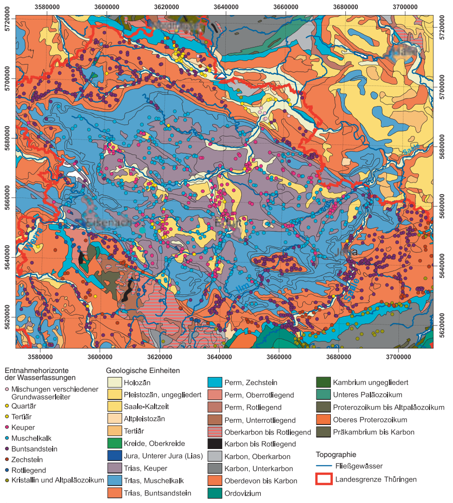


Abb. 1. Karte der Entnahmehorizonte von Wasserversorgungsbrunnen in Thüringen nach TLU & TLG (1996) auf der Grundlage der Geologischen Karte 1 : 1 000 000 (TOLOCZYKI et al. 2006).

Beispiel Mittelfranken

In Mittelfranken werden die Grundwässer verschiedener Keuperreservoire, insbesondere die des Benker Sandsteins und des Burgsandsteins, wasserwirtschaftlich genutzt (HANAUER & SÖLL 1996). Sie sind neben den Flachbrunnen im Quartär die wichtigsten Aquifere für die Trinkwasserversorgung. Im Buntsandstein und Muschelkalk werden Thermal- und Mineralwässer angetroffen, die hier nicht weiter betrachtet werden sollen. In den Grundwässern des Keupers treten in einigen Regionen erhöhte Gehalte an Arsen auf, deren Ursache lange Zeit ungeklärt war (Abb. 2). Verschiedene Quellen wurden diskutiert: Einträge aus der intensiven Landwirtschaft (Weinbau), Altlasten, geogene Belastungen aus den Keupersandsteinen oder den darüber liegenden Schichten, hoch mineralisierte Tiefenwässer mit salinarer Beeinflussung aus den tieferen Schichten sowie Tiefenwässer, die durch Kontakt mit hydrothermalen Ausfällungen an Störungszonen und Klüften beeinflusst wurden. Die Parallele zu den erhöhten Konzentrationen von Arsen in Thüringen ist zunächst nahe liegend, jedoch sind dort hauptsächlich wesentlich ältere Gesteine betroffen. Hinweise auf eine ähnliche Genese geben die Teufen der belasteten Grundwasserleiter, denn in Thüringen wie in Franken sind tiefe Grundwasserleiter betroffen.

Geothermische Reservoire der Germanischen Trias

D8

MARKUS WOLFGRAMM und MATTHIAS FRANZ

Einleitung

Die im flachen bis tieferen Untergrund zur Verfügung stehende Erdwärme kann durch folgende Nutzungsformen gewonnen werden: (1) stoffliche Nutzung von Thermalwässern, (2) direkte Nutzung der Erdwärme und (3) Speicherung von Wärme und Kälte im Untergrund (Abb. 1). In Deutschland wird zwischen der Nutzung flacher und tiefer geothermischer Ressourcen unterschieden, die Abgrenzung wird üblicherweise bei 400 m Tiefe vorgenommen.

Die stoffliche Nutzung von Thermalwässern betrifft deren Verwendung in Bädern und Thermen. Gesicherte Nachweise der frühen Nutzung natürlicher Thermalwasseraustritte in Deutschland gehen bis in die Römerzeit zurück, z. B. in Aachen. Neben der Nutzung natürlicher Thermalwasseraustritte kommt heute der Erschließung von Thermalwässern durch Tiefbohrungen eine große Bedeutung zu.

Mit der Inbetriebnahme des Heizkraftwerkes Waren an der Müritz (Mecklenburg-Vorpommern) begann 1984 in Deutschland die direkte Nutzung der Erdwärme. Seitdem wird am Standort Waren die niederthermale Energie, die in einem porösen Sandsteinreservoir der Exter-Formation (Contorta-Sandstein) gespeichert ist, für die Versorgung eines Fernwärmenetzes genutzt. Die danach in Deutschland in Betrieb genommenen Großanlagen, nutzen zum überwiegenden Teil tiefe geothermische Ressourcen hydrothermaler Lagerstätten. Demgegenüber befinden sich die verschiedenen Nutzungsformen petrothermaler Lagerstätten noch in der Erforschungs- und Erprobungsphase.

Für die Speicherung von Wärme und Kälte im Untergrund sind Grundwasserleiter flacher bis mittlerer Tiefen von 400 m bis max. 2000 m von Bedeutung. Oberflächennahe Grundwasserleiter werden für den Betrieb von Erdbecken oder -behältern als saisonale Wärmespeicher genutzt. Geeignete Reservoire des tieferen Untergrundes können ebenfalls als saisonale Wärmespeicher genutzt werden, wie beispielsweise ein poröses Sandsteinreservoir der Exter-Formation (Postera-Sandstein) am Standort Neubrandenburg.

Die porösen und klüftig-porösen Sandsteine und verkarstete, klüftige Karbonate, die in der Trias ausgebildet sind, können gebietsweise als Tiefengrundwasserleiter fungieren und werden dann als sog. geothermische Reservoire bezeichnet (Abb. 2). Größere stratigraphische Abschnitte, in denen mehrere potenzielle Reservoire ausgebildet sind, wie z. B. der Mittlere Buntsandstein, gelten als Hauptreservoire. Ab Temperaturen von 65 °C ist die direkte Nutzung der Erdwärme für den Betrieb eines Wärmekraftwerkes möglich; niedrigere Temperaturen müssen durch den Einsatz einer Wärmepumpe kompensiert werden. Ab Temperaturen von 120 °C ist Stromerzeugung möglich.

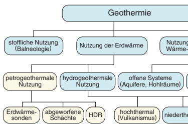

Geothermie
stoffliche Nutzung (Balneologie)
Nutzung der Erdwärme
Nutzung des Untergrundes für Wärme- und Kältespeicherung
petrogeothermale Nutzung
hydrogeothermale Nutzung
offene Systeme (Aquifere, Hohlräume)
geschlossene Systeme (Erdwärmesonden)
Erdwärme-sonden
abgeworfene Schächte
HDR
hochthermal (Vulkanismus)
niederthermal
oberflächennahe Geothermie

Abb. 1. Nutzungsformen der Geothermie. Grau hinterlegt: relevant für die Nutzung von triassischen Gesteinen des tieferen Untergrundes.

Regionaler Überblick

Die in Deutschland vorhandenen geothermischen Anlagen werden durch das geothermische Informations-System (GeotIS) dokumentiert (www.geotis.de). Bereits etwa 70 Anlagen nutzen geothermische Reservoire der Trias (Abb. 3). Die Anlagen zur Strom- oder Fernwärmegewinnung, also die Nutzung tiefer geothermischer Energie, beschränken sich dabei auf das Norddeutsche Becken, das Molassebecken und den Oberrheingraben als sog. geothermische Hauptregionen. In diesen drei Hauptregionen liegen mächtige Sedimentabfolgen vor, die ausreichend tief versenkt wurden. Zudem sind die geothermischen Gradienten höher als beispielsweise in den Kristallingebieten Mitteldeutschlands. Damit ist eine wirtschaftliche Gewinnung tiefer geothermischer Energie bislang nur in diesen Hauptregionen möglich.

Oberflächennahe Geothermie und Wärmespeicherung sowie balneologische Nutzungen sind dagegen nicht auf die geothermischen Hauptregionen beschränkt. So sind balneologische Nutzungen ohne oder mit kombinierter Gebäudebeheizung insbesondere in Bayern und Baden-Württemberg angesiedelt. Neben der Nutzung von natürlichen Quellen sind die relevanten Reservoire hier in geringerer Tiefenlage anzutreffen als in den drei Hauptregionen.

Von den etwa 70 Anlagen, die triassische Reservoire erschlossen haben, sind momentan 65 in Betrieb. Erdwärme wird in 40 Anlagen für balneologische Anwendungen und in weiteren 23 Anlagen zusätzlich für die Gebäudeheizung genutzt. Drei Anlagen nutzen triassische Reservoire zur Wärmegewinnung, drei Anlagen zur Gewinnung von Strom und Wärme und eine Anlage dient der Wärmespeicherung.

An 30 Standorten werden Reservoire des Buntsandsteins genutzt, an 23 Standorten Reservoire des Muschelkalks und an 17 weiteren Standorten Reservoire des Keupers. Durch die Bohrungen Horstberg Z1 bei Uelzen in Niedersachsen und Groß Buchholz 1 in Hannover wurde unter anderem der Buntsandstein erschlossen (Verbundvorhaben GeneSys). Eine Nutzung der Erdwärme findet dort bislang nicht statt.

Die Temperaturen der in Nutzung stehenden triassischen Reservoire variieren zwischen 20,6–159,0 °C bei Förderraten zwischen 0,1–100,0 l/s. Insgesamt werden derzeit 33,2 MW elektrische Energie erzeugt, die jährliche Wärmeproduktion beträgt 187,7 GWh (vgl. AGEMAR et al. 2014a,b).

Balneologische Bohrungen werden neben den genannten Anwendungen häufig auch zusätzlich zur Beheizung der Bäder und zugehöriger Gebäude verwendet. Als Mindestanforderungen können dabei Temperaturen von 20 °C und Förderraten von 2–10 m^3 pro Tag (nur für Balneologie) sowie 10–15 m^3/h (für Balneologie und Heizung) angenommen werden. Ein typisches Beispiel aus dem Norddeutschen Becken ist das Thermalbad Binz/Rügen, das bis zu 35 °C warme, jodhaltige Thermalsole aus einem Reservoir des Mittleren Buntsandsteins fördert (Tab. 1).

Direkte Nutzung der Erdwärme

Tiefengeothermische Ressourcen

Die tiefengeothermischen Ressourcen Deutschlands sind gebunden an: (1) petrothermale Lagerstätten, (2) Störungen und (3) hydrothermale Lagerstätten. JUNG et al. (2002) ermittelten einen Gesamtumfang von 1700 EJ (Exajoule) tiefengeothermischer Ressourcen für die Erzeugung von Strom und Wärme ohne Wärmepumpen. Von diesen Ressourcen nehmen die petrothermalen Lagerstätten mit 94 % den bei weitem größten Anteil ein. Die Anteile von Störungen und hydrothermalen Lagerstätten sind mit 4 % bzw. 2 % vergleichsweise gering. Unabhängig vom Vertrauensgrad solcher Schätzungen verdeutlichen die Zahlen das enorme Potenzial petrothermaler Lagerstätten für die Gewinnung geothermischer Energie.

Im Norddeutschen Becken sind hydrothermale Lagerstätten zumeist an mesozoische Reservoire und petrothermale Lagerstätten in der Regel an paläozoische Reservoire gebunden (Abb. 4). Bislang werden in Deutschland lediglich die hydrothermalen Lagerstätten in größeren Umfängen genutzt während für petrothermale Lagerstätten noch kein nachhaltig erfolgreiches Erschließungskonzept gefunden werden konnte. Dementsprechend wird die Erschließung hochpermeabler hydrothermaler Lagerstätten auch als konventionelle Erschließung bezeichnet. Die Erschließung niedrigpermeabler petrothermaler Lagerstätten erfordert besondere Maßnahmen und Methoden, um die Gebirgsdurchlässigkeit zu erhöhen. Diese werden die unter dem Begriff »Enhanced Geothermal Systems« zusammengefasst.

Erschließung hydrothermaler Lagerstätten

Bei der Nutzung hydrothermaler Lagerstätten hat sich die Erschließung zweier unterschiedlicher Reservoirtypen (»play types«) bewährt: (1) hochpermeables Einzelreservoir und (2) klüftiges Multihorizontreservoir. Beide Konzepte sehen eine Erschließung

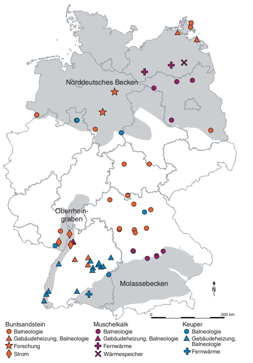


Abb. 3. Geothermisch-balneologische Nutzungen triassischer Reservoire in Deutschland. Nach AGEMAR et al. (2014a, b).

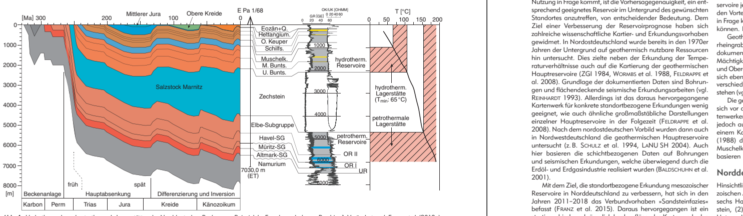


Abb. 4. Hydrothermale und petrothermale Lagerstätten des Norddeutschen Beckens am Beispiel der Forschungsbohrung Parchim 1. Verändert nach FRANZ et al. (2018a).

Temperatur

Die Temperaturen im Erdinneren betragen bis zu 7000 °C, im Übergang vom Erdmantel zur Erdkruste in einer Tiefe von 5–70 km sind es immerhin noch etwa 525 °C. Als Quelle dieser terrestrischen Wärme gilt vor allem Energie, die beim Zerfall radioaktiver Nuklide freigesetzt wird und durch die sich ein kontinuierlicher Wärmestrom speist, der durch Strömung (Konvektion), Leitung und Strahlung übertragen wird. In der Erdkruste variiert der terrestrische Wärmestrom erheblich. Im Bereich alter Faltengebirge (»Schilde« mit Metamorphiten und Plutoniten) ist er anormal niedrig, im Bereich von aktiver (Platten)Tektonik und jungem Vulkanismus ist er hingegen sehr hoch. Auf der Erdoberfläche gibt die Wärmestromdichte als flächenbezogenes Maß den Wärmestrom pro Fläche an. Die mittlere Wärmestromdichte q der Erde beträgt 67 · 10^{-3} Wm^{-2}.

Auf Deutschland bezogen ist der Wärmestrom in den variszisch gebildeten Einheiten Mitteldeutschlands niedriger als z. B. im Norddeutschen Becken, dessen mächtige Sedimentfüllung einen höheren Wärmestrom gewährleistet. Im tektonisch jüngeren Molassebecken und im Oberrheingraben ist er am höchsten, was sich beispielhaft in der Temperaturverteilung in 2000 m Tiefe widerspiegelt, die für die drei Hauptregionen zwischen 50–140 °C liegt (Abb. 7).

Ein Maß für den Temperaturanstieg mit zunehmender Tiefe ist der geothermische Gradient. Dieser wird durch die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der Gesteine geprägt, insbesondere in Sedimentbecken. Beispielsweise sind Salzgesteine besonders gute Wärmeleiter, so dass die Temperatur im Bereich von Salzstöcken stark erhöht ist. Der geothermische Gradient eines Standortes ist auch von der Jahresmitteltemperatur vor Ort abhängig. Für das Norddeutsche Becken beträgt der mittlere geothermische Gradient 33–35 K/km (Kelvin pro Kilometer), für das Molassebecken etwa 45 K/km (WROBEL et al. 2002) und für den Oberrheingraben 60 K/km (SCHELLSCHMIDT & CLAUSER 1996).

Erkundung triassischer Reservoire

In den drei geothermischen Hauptregionen Deutschlands unterliegen die in Frage kommenden triassischen Reservoire erheblichen Schwankungen hinsichtlich ihrer lateralen Erstreckung und Qualität. Daraus resultieren bislang große Erkundungsrisiken, mit denen jedes Vorhaben grundsätzlich konfrontiert ist und an denen nicht wenige Vorhaben gescheitert sind.

Da für triassische Reservoire überwiegend die hydrothermale Nutzung in Frage kommt, ist die Vorhersagegenauigkeit, ein entsprechend geeignetes Reservoir im Untergrund des gewünschten Standortes anzutreffen, von entscheidender Bedeutung. Dem Ziel einer Verbesserung der Reservoirprognose haben sich zahlreiche wissenschaftliche Kartier- und Erkundungsvorhaben gewidmet. In Nordostdeutschland wurde bereits in den 1970er Jahren der Untergrund auf geothermisch nutzbare Ressourcen hin untersucht. Dies zielte neben der Erkundung der Temperaturverhältnisse auch auf die Kartierung der geothermischen Hauptreservoire (ZGI 1984, WORMBS et al. 1988, FELDRAPPE et al. 2008). Grundlage der dokumentierten Daten sind Bohrungen und flächendeckende seismische Erkundungsarbeiten (vgl. REINHARDT 1993). Allerdings ist das daraus hervorgegangene Kartenwerk für konkrete standortbezogene Erkundungen wenig geeignet, wie auch ähnliche großmaßstäbliche Darstellungen einzelner Hauptreservoire in der Folgezeit (FELDRAPPE et al. 2008). Nach dem nordostdeutschen Vorbild wurden dann auch in Nordwestdeutschland die geothermischen Hauptreservoire untersucht (z. B. SCHULZ et al. 1994, LANU SH 2004). Auch hier basieren die schichtbezogenen Daten auf Bohrungen und seismischen Erkundungen, welche überwiegend durch die Erdöl- und Erdgasindustrie realisiert wurden (BALDSCHUHN et al. 2001).

Mit dem Ziel, die standortbezogene Erkundung mesozoischer Reservoire in Norddeutschland zu verbessern, hat sich in den Jahren 2011–2018 das Verbundvorhaben »Sandsteinfazies« befasst (FRANZ et al. 2015). Daraus hervorgegangen ist ein stratigraphisch und räumlich hochauflösendes Kartenwerk, das die sedimentäre Fazies, Mächtigkeit und Qualität konkreter Reservoire jeweils getrennt abbildet (FRANZ et al. 2018a). Dies hat den Vorteil, dass aus den jeweiligen Hauptreservoiren einzelne in Frage kommende Reservoire herausgelöst betrachtet werden können. Ein Beispiel wird im folgenden Kapitel erläutert.

Geothermische Karten für triassische Reservoire des Oberrheingrabens wurden erstmals in HÄNEL & STAROSTE (1988) dokumentiert. Verschiedene Karten dokumentieren Tiefenlage, Mächtigkeit, Temperatur und Fluidsalinität des Buntsandsteins und Oberen Muschelkalks. Neuere Forschungsprojekte befassten sich ebenfalls mit den geothermischen Reservoiren, wobei hier verschiedene Projekte wie GeORG oder GeotIS in Konkurrenz stehen (vgl. GEORG-PROJEKTTEAM 2013, AGEMAR et al. 2014a,b).

Die geothermische Erkundung im Molassebecken fokussiert sich vor allem auf den Oberjura. In den entsprechenden Kartenwerken (HÄNEL & STAROSTE 1988, FRITZER et al. 2013) sind jedoch auch andere mesozoische Reservoire dokumentiert. In einem Kartensatz der Westmolasse stellen HÄNEL & STAROSTE (1988) den Trigonodus-Dolomit (Rottweil-Formation, Oberer Muschelkalk) als ein Hauptreservoir dar. Auch diese Karten basieren im Wesentlichen auf seismischen Erkundungsdaten.

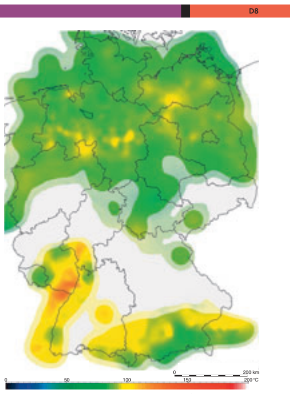


Abb. 7. Temperaturverteilung in 2 km Tiefe. Diese Karte basiert auf den korrigierten Temperaturmessungen aus Tiefbohrungen. Die grauen Flächen repräsentieren Bereiche ohne Tiefbohraufschlüsse. Verändert nach AGEMAR et al. (2012).

Norddeutsches Becken

Hinsichtlich ihrer geothermischen Eignung werden in der mesozoischen Abfolge des Norddeutschen Beckens bislang folgende sechs Hauptreservoire ausgegliedert: (1) Mittlerer Buntsandstein, (2) Unterer bis Mittlerer Keuper, (3) Oberer Keuper, (4) Unterer Jura, (5) Mittlerer Jura, und (6) Unterkreide (Abb. 8).

Ingenieurgeologische Aspekte der Germanischen Trias

D9

CHRISTOF LEMPP und EDWIN FECKER

Einführung

In den Sedimentablagerungen der Germanischen Trias im Germanischen Becken dokumentiert sich ein mehrfacher Wechsel in den Umwelt- und Ablagerungsbedingungen. Die anschließende Entwicklungsgeschichte mit Heraushebung, Erosion und Verwitterung der Sedimentfolge hat in Wechselwirkung mit der Gesteinsbildung zu einem vielgestaltigen Charakterbild der triassischen Sedimentablagerungen geführt. Ein Überblick über Charakteristika mit angewandt-geologischen Bezügen soll hier gegeben werden. Dabei kann sicherlich kein vollständiges Bild gezeichnet werden, vielmehr soll der Blick auf einige wesentliche hydrogeologische, lagerstättenkundliche und ingenieurgeologische Probleme oder Phänomene bei der Nutzung triassischer Sedimentgesteine gerichtet werden.

Geologische Vorprägung

Die meisten Probleme und Phänomene bei der Wechselwirkung triassischer Gesteine mit technischen Prozessen und Nutzungen lassen sich nicht ohne Hinweis auf die Geschichte und Struktur der Schichtenfolge erläutern.

Der schichtweise abgelagerte Verband von klastischen und chemischen Sedimenten mit wechselnder petrographisch-mineralogischer Zusammensetzung hat zwar keine metamorphe Überprägung erfahren, jedoch hat eine erhebliche diagenetische Veränderung, besonders eine weitgehende Porenraumentwässerung und Verdichtung die gesamte Schichtfolge erfasst. Die verschiedenen Schichtglieder zeigen zugleich ein recht unterschiedliches Maß der Verfestigung und des Entfestigungswiderstandes. In der gesamten Trias-Abfolge bleiben die Schichtgrenzen und -fugen als Ausdruck von Materialwechseln deutlich ausgeprägt und bilden wesentliche Strukturelemente des Gesteinsverbandes.

In der postsedimentären Entwicklungsgeschichte erfolgte die zunehmende Sedimentverfestigung. Diese hat sich mit der weiteren Überlagerung durch mehrere hundert bis tausend Meter mächtige jüngere Sedimente des Juras, der Kreide und des Tertiärs in den unterlagernden Trias-Schichten besonders verstärkt.

Das gesamte, mehr oder weniger flach lagernde Schichtpaket terrestrischer und mariner Sedimentgesteine wurde dann im Zuge des Krustenaufstiegs, der Erosion und schließlich der Landschaftsentwicklung durch weitgespannte, flachwellige Aufwölbungen und Einmuldungen sowie durch bruchtektonische Ereignisse weitergehend strukturell geprägt. Insgesamt sind diese Prozesse bruchhafter Verformung und tektonischer Verstellung nur mäßig ausgeprägt. Die Schichtfolgen sind meist nur um wenige Grad aus ihrer horizontalen Ablagerungsstellung verkippt oder schwach gewölbt worden.

Die Wirkungen von erosionsbedingter Entlastung einerseits und von klimagesteuerter Verwitterungswirkung andererseits lassen sich in unterschiedlicher Deutlichkeit an den verschiedenen Horizonten in der triassischen Schichtenfolge nachweisen. Das aktuelle Bild der Sedimente mit den schichtweise wechselnden mechanischen und hydraulischen Eigenschaften ist vor allem in relativer Oberflächennähe von den Wechseln der Spannungs- und Klimageschichte bestimmt.

Die triassischen Schichteinheiten, die Gruppen Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper, werden im Folgenden unter anwendungsbezogenen Gesichtspunkten betrachtet. In dem Zusammenhang sollen deren Nutzungen als Wasserspeicher und Lagerstätten des Steine- und Erden-Typs sowie deren dominierende baugeologische Eigenschaften dargestellt werden. Eine Übersicht gibt die Tabelle 1.

Tab. 1. Die Nutzung der Triasschichtenfolge als Grundwasserspeicher, Steine- und Erden-Lagerstätte und Baugrund. Ausschnittsweise aus FECKER & REIK (1996, mit thematischen Erweiterungen).

Gruppe	Subgruppe	Hauptsächliche Gesteine	Grundwasserverhältnisse	Steine- u. Erden-Lagerstätte	Baugrundeigenschaften
Keuper	Oberer Keuper	Tonstein, Sandstein	lokales GW	Bausandstein	guter Baugrund
	Gipskeuper	Tonstein, Gips, Anhydrit, Sandstein, Steinmergel, Dolomitstein	überwiegend GW-Hemmer, z. T. GW-Leiter	Tone als Ziegeleigrundstoff, z. T. Gips	z. T. auslaugungsgefährdet, sonst mäßiger Baugrund, rutschgefährdet, quellfähig
	Unterer Keuper	Sandstein, Tonstein, Dolomitstein	GW-Leiter, lokale Nutzung		guter bis mäßiger Baugrund
Muschelkalk	Oberer Muschelkalk	Kalk- u. Mergelstein, Dolomitstein	GW-Leiter, regionale Nutzung	Kalk- und Dolomitstein	z. T. verkarstet, sonst guter Baugrund
	Mittlerer Muschelkalk	Dolomitstein, Tonstein, Salz, Gips	GW-Hemmer	Salz	auslaugungsgefährdet, Verstürzungen im Hangenden, i. a. schlechter Baugrund
	Untere Muschelkalk	Kalkstein, Dolomitstein, Mergelstein	GW-Leiter, regionale Nutzung	Kalk- und Dolomitstein	rel. Guter Baugrund, jedoch in Hangbereichen häufig durch Rutschungen auf Rötton in Schollen zerlegt
Buntsandstein	Oberer Buntsandstein	Tonstein, Gips	GW-Hemmer		rutschgefährdet, auslaugungsgefährdet
	Mittlerer Buntsandstein (Hauptbuntsandstein)	Sandsteine, Tonsteine	GW-Leiter (überregionale Nutzung)	Bausandsteine	guter Baugrund
	Unterer Buntsandstein (Bröckelschiefer)	Sandsteine, Tonsteine	z. T. GW-Hemmer, GW-Leiter		z. T. rutschgefährdet, z. T. guter Baugrund
Paläozoikum					

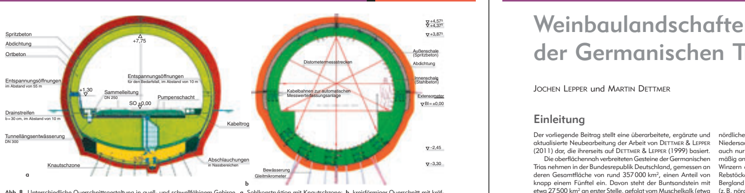

Spritzbeton
Abdichtung
Ortbeton
Entspannungsöffnungen im Abstand von 55 m
Drainstreifen b = 30 cm, im Abstand von 10 m
Tunnellängsentwässerung DN 300
Knautschzone
+7,75
Entspannungsöffnungen für den Bedarfsfall, im Abstand von 10 m
+1,30
Sammelleitung DN 250
SO ±0,00
Pumpenschacht
Kabeltrog
Abschlauchungen in Nassbereichen
a
Distometermessstrecken
Kabelbahnen zur automatischen Messwerterfassungsanlage
Bewässerung
Gleitmikrometer
Außenschale (Spritzbeton)
Abdichtung
Innenschale (Stahlbeton)
Extensometer
BI = ±0,00
+4,57
+4,37
+3,87
−2,45
−3,30
b

Abb. 8. Unterschiedliche Querschnittsgestaltung in quell- und schwellfähigem Gebirge. **a,** Sohlkonstruktion mit Knautschzone; **b,** kreisförmiger Querschnitt mit kräftiger Schale. Aus KIRSCHKE et al. (1991).

Die Schichtfolge des Gipskeupers besteht im unausgelaugten und unverwitterten Zustand aus festen, praktisch trockenen und einfach auszubrechenden Tonsteinen und Anhydriten, die in verschiedenen Konzentrationen und unterschiedlichen Verteilungsmustern in den Tonsteinen eingelagert sind. Durch den Einfluss des von oben zusickernden Wassers wurde im Auslaugungsbereich Anhydrit zunächst über eine Lösungsphase in Gips umgewandelt und dieser schließlich vollständig ausgelaugt. Die Grenze zwischen Auslaugungszone und gipsführendem Gebirge bezeichnen wir als Gipsspiegel (Y). Diesem folgt annähernd parallel der tiefer liegende Anhydritspiegel (A). Die Höhenlage beider Grenzen im Gebirge und ihr Abstand zueinander werden sehr stark von der Höhe und der Morphologie des überlagernden Gebirges bestimmt. Der Abstand zwischen Gips- und Anhydritspiegel schwankt zwischen drei und zehn Metern. Über dem Tunnel sind im Gipskeuper und im Schilfsandstein zwei voneinander getrennte Grundwasserstockwerke zu beobachten. Die obersten Schichten des Gipskeupers in toniger Fazies bilden dabei die mehr oder weniger gut funktionierende hydraulische Abdichtung zwischen beiden Aquiferen.

Die Probestrecke, welche auf der westlichen Seite parallel zum Haupttunnel aufgefahren wurde, besitzt einen Achsabstand zum Haupttunnel von 67 m. Sie ist also genügend weit vom eigentlichen Bauwerk entfernt, um keine gegenseitige Beeinflussung hervorzurufen. Außerdem wurde die Probestrecke durch einen Schrägstollen angefahren, so dass die Sohle der Probestrecke zehn Meter über Schienenoberkante des Haupttunnels zu liegen kommt, weil in diesem Horizont die »quell- und schwellfreudigsten« Schichtpakete des angefahrenen Gipskeupers anstehen. Somit konnte die für den Tunnel ungünstigste Situation für die Voruntersuchungen herangezogen werden. Die in der Sohle der Probestrecke anstehenden Gesteine fallen etwa mit 1 % nach Südosten ein und werden vom Haupttunnel etwa bei der halben Länge in dessen Sohle durchfahren. Die Abmessungen der Probestrecke wurden gegenüber denen des Haupttunnels im Maßstab 1 : 2 verkleinert hergestellt. Sie besteht aus 15 verschiedenen Tunnelblöcken mit unterschiedlicher Ausbildung der Sohlkonstruktion und besitzt eine Gesamtlänge von 120 m.

Allen Tunnelblöcken ist gemeinsam, dass der Quell- und Schwellvorgang unter der Sohle nicht tiefer als einen Tunneldurchmesser reicht, wobei der Vorgang von seinem Maximalwert an der Sohlenunterkante mit der Tiefe exponentiell abklingt.

Ganz unterschiedlich dagegen entwickeln sich die Spannungen in den verschiedenen Tunnelblöcken. In dem kräftigsten Tunnelblock nach dem Widerstandsprinzip mit 85 cm Sohldicke sind alle Kontaktspannungen in der Sohle auf 3 MN/m^2 (Meganewton pro Quadratmeter) und darüber angestiegen (Abb. 10). In der Firste sind die Kontaktspannungen sehr niedrig geblieben, allerdings mit einer Ausnahme, wo der Kontaktdruck schon weit über 6 MN/m^2 liegt. Die zugehörigen Betonspannungen dieses Blockes sind vergleichsweise niedrig; sie erreichen in der Sohle im Mittel 8 MN/m^2. Extensometer (Messgerät zur Bestimmung der Längeverschiebung) in den Ulmen (seitliche Berandung des Tunnels) dieses Blockes zeigen geringe Divergenzen, die sich aus Verformungen des ausbruchsnahen Gebirges ergeben.

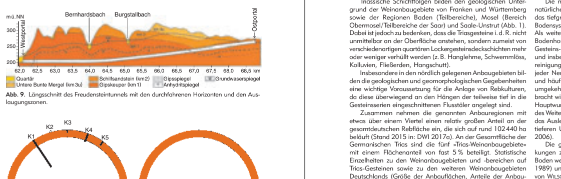


Abb. 9. Längsschnitt des Freudensteintunnels mit den durchfahrenen Horizonten und den Auslaugungszonen.

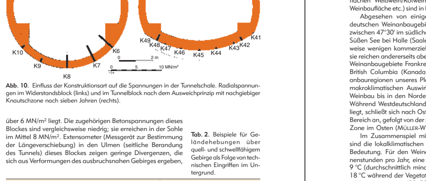


Abb. 10. Einfluss der Konstruktionsart auf die Spannungen in der Tunnelschale. Radialspannungen im Widerstandsblock (links) und im Tunnelblock nach dem Ausweichprinzip mit nachgiebiger Knautschzone nach sieben Jahren (rechts).

Tab. 2. Beispiele für Geländehebungen über quell- und schwellfähigem Gebirge als Folge von technischen Eingriffen im Untergrund.

Lokalität	max. Hebung	Zeitraum	Überdeckung	Quelle
Tunnel Heslach II	46 mm	1990–2002	60–80 m	WITTKE (2006)
Tunnel Wagenburg	46 mm	1978–1990	max. 50 m	PAUL & WICHTER (1995)
Staufen	350 mm	2008–2012	60–90 m	LGRB (2012)
Chienberg-Tunnel	30 mm	2002–2003	70–80 m	STEINER et al. (2011)

Weinbaulandschaften der Germanischen Trias

D10

JOCHEN LEPPER und MARTIN DETTMER

Einleitung

Der vorliegende Beitrag stellt eine überarbeitete, ergänzte und aktualisierte Neubearbeitung der Arbeit von DETTMER & LEPPER (2011) dar, die ihrerseits auf DETTMER & LEPPER (1999) basiert.

Die oberflächennah verbreiteten Gesteine der Germanischen Trias nehmen in der Bundesrepublik Deutschland, gemessen an deren Gesamtfläche von rund 357 000 km^2, einen Anteil von knapp einem Fünftel ein. Davon steht der Buntsandstein mit etwa 27 500 km^2 an erster Stelle, gefolgt vom Muschelkalk (etwa 25 500 km^2) und den Schichten des Keupers (etwa 15 000 km^2).

Triassische Schichtfolgen bilden den geologischen Untergrund der Weinanbaugebiete von Franken und Württemberg sowie der Regionen Baden (Teilbereiche), Mosel (Bereich Obermosel/Teilbereiche der Saar) und Saale-Unstrut (Abb. 1). Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die Triasgesteine i. d. R. nicht unmittelbar an der Oberfläche anstehen, sondern zumeist von verschiedenartigen quartären Lockergesteinsdeckschichten mehr oder weniger verhüllt werden (z. B. Hanglehme, Schwemmlöss, Kolluvien, Fließerden, Hangschutt).

Insbesondere in den nördlich gelegenen Anbaugebieten bilden die geologischen und geomorphologischen Gegebenheiten eine wichtige Voraussetzung für die Anlage von Rebkulturen, da diese überwiegend an den Hängen der teilweise tief in die Gesteinsserien eingeschnittenen Flusstäler angelegt sind.

Zusammen nehmen die genannten Anbauregionen mit etwas über einem Viertel einen relativ großen Anteil an der gesamtdeutschen Rebfläche ein, die sich auf rund 102 440 ha beläuft (Stand 2015 in: DWI 2017a). An der Gesamtfläche der Germanischen Trias sind die fünf »Trias-Weinanbaugebiete« mit einem Flächenanteil von fast 5 % beteiligt. Statistische Einzelheiten zu den Weinanbaugebieten und -bereichen auf Trias-Gesteinen sowie zu den weiteren Weinanbaugebieten Deutschlands (Größe der Anbauflächen, Anteile der Anbauflächen Weißwein/Rotwein, Anteil an der gesamtdeutschen Weinbaufläche etc.) sind in DETTMER & LEPPER (2011) aufgeführt.

Abgesehen von einigen Kleinstexklaven liegen die 13 deutschen Weinanbaugebiete auf der geographischen Breite zwischen 47°30' im südlichen Markgräfler Land und 51°30' am Süßen See bei Halle (Saale) und damit südlich der vergleichsweise wenigen kommerziellen Weinanbauflächen in England; sie reichen andererseits aber weiter nach Norden als die großen Weinanbaugebiete Frankreichs. Zusammen mit denjenigen in British Columbia (Kanada) sind dies die nördlichsten Weinanbauregionen unseres Planeten. In Deutschland sind es die makroklimatischen Auswirkungen des Golfstroms, die einen Weinbau bis in den Norden überhaupt erst möglich machen. Während Westdeutschland noch in der maritimen Klimazone liegt, schließt sich nach Osten zunächst noch ein submaritimer Bereich an, gefolgt von der subkontinentalen und kontinentalen Zone im Osten (MÜLLER-WESTERMEIER et al. 2001).

Im Zusammenspiel mit weiteren standörtlichen Faktoren sind die lokalklimatischen Gegebenheiten von grundlegender Bedeutung. Für den Weinanbau sind mindestens 1300 Sonnenstunden pro Jahr, eine Jahresdurchschnittstemperatur von 9 °C (durchschnittlich mind. 15 °C während der Rebblüte und 18 °C während der Vegetationszeit) und eine jährliche Niederschlagsmenge von 400–500 mm erforderlich (DWI 2017a).

Nachdem insbesondere im Klimaoptimum des Mittelalters zeitweise Weinbau im Norden Deutschlands lokal bis mindestens an die Nordgrenze der Mittelgebirge betrieben wurde, führen die aktuellen klimatischen Veränderungen dazu, dass in den nördlichen Bundesländern (Schleswig-Holstein, Mecklenburg, Niedersachsen und sogar im Stadtgebiet von Berlin) – wenn auch nur in eng begrenztem Umfang – Wein wieder erwerbsmäßig angebaut wird. Allein in Niedersachsen wurde jüngst 10 Winzern das Recht eingeräumt, auf insgesamt 7,6 ha Fläche Rebstöcke anzubauen (DWI 2017b). Diese Flächen liegen im Bergland sowohl auf diversen mesozoischen Sedimentgesteinen (z. B. nördlich Göttingen auf Muschelkalk und Keuper) als auch auf verschiedenartigen Quartär-Schichten des Flachlandes.

Die meisten weinbaulich genutzten Böden sind in ihrem natürlichen Horizontaufbau stark gestört, hauptsächlich durch das tiefgründige Pflügen (Rigolen), weshalb in der deutschen Bodensystematik die Bezeichnung »Rigosole« verwendet wird. Als weitere Ursachen für Veränderungen der ursprünglichen Bodenhorizonte sind das Aufbringen und Einmischen von Gesteins-, Boden- und Fremdmaterial, künstliches Terrassieren und insbesondere Bodenbewegungen im Rahmen von Flurbereinigungen zu nennen. Das Rigolen erfolgt normalerweise vor jeder Neuanpflanzung, wobei Material aus dem Unterboden und häufig auch aus dem Untergrund an die Oberfläche und umgekehrt humoser Oberboden in tiefere Bodenschichten gebracht wird. Hierdurch werden eine Verbesserung des tieferen Hauptwurzelbereiches und eine intensive Bodenlockerung erzielt; des Weiteren werden das Entfernen größerer Wurzelrückstände, das Auslesen von Steinen und die Nährstoffanreicherung des tieferen Unterbodens durch Düngung ermöglicht (WITTMANN 2006).

Die geoökologischen Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen geologischem Substrat, Klima, Relief und Boden werden seit SITTLER & MAROCKE (1981), POMEROL (1984, 1989) und nachfolgend im weiteren internationalen Rahmen von WILSON (1998, 2001), BIRNBAUM & KERRY (2000), HAYNES (1999, 2000), MEINERT (2000, 2002), BARGMANN (2003), CITA et al. (2004) u. a. sowie schließlich auch in Deutschland unter dem Begriff »Terroir« zusammengefasst. Das der französischen Sprache entlehnte Substantiv »terroir« lässt sich allerdings mit seiner umfassenden Bedeutung weder wörtlich noch kurzgefasst übersetzen. Es geht ursprünglich auf das lateinische »terra« – Erde, Erdreich, Boden, Land, Landschaft – zurück; »la terre« im Französischen bedeutet ebenfalls: Boden, Erdboden, Erde, Erdreich, Land, Gebiet; aber auch »Grundbesitz« und schließlich »Welt«. Der aus diesen sprachlichen Wurzeln abgeleitete (inzwischen aber nicht nur weinbaulich gebrauchte) Begriff »Terroir« beinhaltet önologisch im engeren Sinne das ortstypische Zusammenspiel der natürlichen Geoökofaktoren und deren gesamtes Wirkungsgefüge (Abb. 2; siehe auch BAUER 2008).

Erst in den letzten eineinhalb Jahrzehnten erfährt der Begriff »Terroir« auch in Deutschland eine verstärkte geowissenschaftliche Beachtung, indem u. a. reproduzierbare Korrelationen zwischen der rebsortenspezifischen Sensorik des Weins und den natürlichen standörtlichen Gegebenheiten hergestellt werden (LEPPER & DETTMER 2002, 2006, LÖHNERTZ et al. 2004, LÖHNERTZ o. J., FISCHER & BAUER 2006, KOLESCH 2007, BAUER 2008, HOPPMANN 2010, BÖHM & SPIES 2014 u. a.). Die regionale Verbindung zwischen »Stein und Wein« wird zudem auch zunehmend geotouristisch vermittelt (LWB 2015, JANIK o. J., MOSEL-SAAR-RUWER WEIN o. J.). Im Weinmarketing hingegen ist der Begriff »Terroir« inzwischen vielfach zu einer formelhaften Worthülse degeneriert, die in kaum einer Verkaufswerbung fehlen darf.

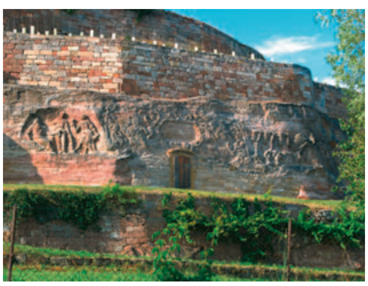


Abb. 7. »Steinernes Festbuch« bei Großjena (Ausschnitt). Zum Thema »Wein und Weinbau in der Bibel« wurden hier im Jahr 1722 insgesamt 12 barocke Steinreliefs auf einer Länge von ca. 200 m aus einer anstehenden Felsstufe der Solling-Formation gearbeitet. Oberhalb des dargestellten Ausschnittes sind neu bepflanzte Rebflächen anhand der Schutzhüllen für die Jungreben zu erkennen. – Foto: M. DETTMER.

anspruchsvollen Rebsorte Riesling, durch die das Moselgebiet berühmt wurde, dominiert auch heute noch mit über 60 % der gesamten Anbauflächen. Riesling-Auslesen zeichnen sich durch eine lange Lagerfähigkeit aus, wobei der Wein ein konzentriertes Fruchtaroma entfaltet. Der Anbau von Müller-Thurgau als zweitwichtigste Rebsorte beträgt demgegenüber nur 12 % der Rebflächen. Die wichtigste Sorte auf den Muschelkalkflächen der Obermosel bildet hingegen der Elbling, eine alte Rebsorte, die möglicherweise schon vor 2000 Jahren hier angebaut wurde und die zu meist trockenen, frischen Trinkweinen gekeltert wird. Aktuell beläuft sich die Anbaufläche dieser Rebsorte auf knapp 6 % (DWI 2017a).

Saale-Unstrut

Mit ca. 765 ha (DWI 2017a, Stand 2015) stellt das Weinanbaugebiet an den Muschelkalk- und Buntsandsteinhängen von Saale und Unstrut das kleinste Gebiet auf Trias-Gesteinen und zugleich das am nördlichsten gelegene der Bundesrepublik Deutschland dar.

Die Rebkulturen erstrecken sich entlang der mittleren Saale (Bad Sulza-Bad Kösen-Naumburg-Weißenfels) und entlang des Unterlaufes der Unstrut (Nebra-Freyburg-Großjena); hinzu kommen noch Rebflächen bei Höhnstedt am Süßen See westlich von Halle sowie an der Weißen Elster bei Zeitz. Außer in Sachsen-Anhalt sind Rebflächen auch zu kleineren Teilen in den Nachbarländern Thüringen (ca. 115 ha) sowie Brandenburg (ca. 10 ha) vorhanden. Der weitaus größte Teil des Weinanbaugebiets befindet sich im Naturpark Saale-Unstrut-Triasland.

Auf rund drei Viertel der Rebflächen werden weiße Rebsorten kultiviert. Die erste Beurkundung von Weinbau geht auf eine Schenkung des Kaisers Otto III. an das Kloster Memleben im Jahr 998 zurück. Als »Weinhauptstadt« des Gebietes gilt Freyburg an der Unstrut. Die kulturhistorische und naturkundliche Verbindung zwischen »Stein und Wein« (siehe auch SIEGESMUND et al. 2014) manifestiert sich einmal mehr in den barocken Felsreliefs des sog. »Steinernen Festbuches« bei Großjena. Hier sind auf einer Länge von ca. 200 m 12 Darstellungen zum Thema »Wein und Weinbau in der Bibel« aus dem Jahre 1722 inmitten der Weinlage Sonneck erhalten geblieben, die in Sandsteinen der Solling-Formation (Mittlerer Buntsandstein) an einem natürlichen Felsanschnitt am Ufer der Unstrut herausgearbeitet wurden (Abb. 7).

Geologie und Relief

Zur Zeit der Trias lag dieses Teilgebiet der deutschen Weinlandschaften im südlichen Teil des Germanischen Beckens (BACHMANN et al. 2008). Im Gegensatz zu den südlicheren Weinanbaugebieten ist der Buntsandstein hier insgesamt weniger Sandstein-betont entwickelt. Vielmehr sind große Abschnitte des höheren Unteren und des Mittleren Buntsandsteins durch das Auftreten von Feinsandstein-/Tonstein-Wechsellagerungen gekennzeichnet, gegenüber denen sich allerdings die Volpriehausen-, Hardegsen- und Solling-Formation mit kompakteren Sandsteinpartien abheben (Abb. 7). Im Gegensatz zu den Weinanbaugebieten am Main und südlich davon fehlen im Oberen Buntsandstein mächtigere Sandsteinlagen völlig. Das Gesteinsspektrum des Muschelkalks entspricht im Großen und Ganzen hingegen der Ausbildung in Franken. Bis auf eine kleine Exklave auf Gesteinen des Unteren Keupers am Weimarer Poetenweg sind Ablagerungen des Keupers im Anbaugebiet Saale-Unstrut sonst nicht verbreitet.

Gegen Ende des Juras und in der Kreide zerlegte eine ausgeprägte Bruchschollentektonik die Großregion zwischen Weser und Elbe in zahlreiche Hebungs- und Senkungsstrukturen. Das Weinanbaugebiet an Saale und Unstrut liegt im Bereich der NW–SE streichenden Querfurter Muschelkalkmulde, die bei Freyburg in die NE–SW streichende Naumburger Mulde übergeht. Die heutige, kleinräumige Schichtstufenlandschaft entstand als Ergebnis der Deformation der Triasschichten in Verbindung mit der jungtertiären bis quartären Talnetzentwicklung. Hier sind vor allem Gesteine des Buntsandsteins und Muschelkalks verbreitet, in die sich Saale und Unstrut teilweise über 100 m tief eingeschnitten und Sohlentäler gebildet haben (OELKE 1997). Als markantestes Formenelement tritt die häufig durch spornartige Vorsprünge und Einschnitte gegliederte Wellenkalksteilstufe des Unteren Muschelkalks in Erscheinung, beispielsweise bei Bad Kösen. Aufgrund von Verkarstung ist der Muschelkalk arm an Grundwasservorkommen.