

Geröllführende sedimentäre Gänge der Eisenach-Formation (Oberrotliegend): modifizierte artesische Injektionen am Fuß alluvialer Fächer?

Christoph Heubeck*

Heubeck, C. (2009): Geröllführende sedimentäre Gänge der Eisenach-Formation (Oberrotliegend): modifizierte artesische Injektionen am Fuß alluvialer Fächer? [Gravel-filled dikes of the Eisenach Formation (Oberrotliegend, Early Permian): modified artesian injections at the base of alluvial fans?] – Z. dt. Ges. Geowiss., 160: 41–56, Stuttgart.

Kurzfassung: Konglomeratisch verfüllte sedimentäre Gänge sind – im Gegensatz zu schlamm- und sandverfüllten Gängen – selten. Ungewöhnlich grobkörnige konglomeratische Gangfüllungen aus dem Oberrotliegend der Eisenach-Formation nahe der Wartburg zeigen eine komplexe Genese. Ganggeometrie, -füllung und -orientierung weisen auf ihre Entstehung als Ergebnis des Durchbruchs eines artesisch gespannten Aquifers am Fuß eines alluvialen Fächers durch überlagernde semi-konsolidierte, feinkörnige Playa-Ablagerungen hin. Die entstehenden niedrigen Eruptionsbauten und flachen Auskolkungstrichter wurden durch zeitnah folgende geröllführende, hochenergetische Schichtfluten verfüllt und deformiert. Eine spätere Reaktivierung der geröllverfüllten Gänge als Fluidkanäle kann die Eindringtiefe der Geröllverfüllung unterstützt haben. Die seismische Voranlage einiger Strukturen als offene, oberflächliche Spalten, assoziiert mit aktiver Extensionstektonik am Rande des Werrabeckens, kann nicht ausgeschlossen werden.

Abstract: Gravel-filled sedimentary dikes are, in contrast to mud- or sand-filled dikes, rare. Unusually coarse-grained, mostly conglomeratic dike fills from the Early Permian (Oberrotliegend) Eisenach Formation near the Wartburg (Thuringia) show an apparent complex origin. Dike geometry, fill and orientation indicate that they originated because artesian water from an aquifer at the foot of an alluvial fan broke through overlying, semi-consolidated, fine-grained playa deposits. Low eruptive cones and shallow erosive pits at the fan surface were then soon either deformed and eroded or filled by gravel-bearing, medium-energy sheet floods. Subsurface reactivation of some dikes as fluid escape conduits may have assisted the gravel fill to seep deeper. It cannot be excluded, however, that some dikes may also have existed as open, near-surface cracks associated with seismic activity related to active extensional tectonics near the faulted margin of the Werra Basin.

Schlüsselwörter: Sedimentäre Gänge, Injektionen, Paläohydrologie, Playa-Ablagerungen, alluvialer Fächer, Werrabecken, Wartburg, Thüringen

Keywords: sedimentary dikes, injections, paleohydrology, fluid escape, playa deposits, Werra Basin, Wartburg, Thuringia

1. Einleitung, regionale Geologie

Diskordante, durch Injektion von verflüssigtem Sediment entstandene Gänge sind Resultat spezifischer Druckverhältnisse und zeichnen Stressmuster in leicht bis moderat verfestigten, schwach permeablen oder impermeablen Sedimenten nach. Als solche liefern sie wertvolle Informationen zur Tektonik, Paläohydrologie oder Paläoseismizität von Ablagerungsräumen (Obermeier & Pond 1998, Cosgrove 2001, Hurst & Cartwright 2007, Mörz et al. 2007). Ich beschreibe im Folgenden Injektionsgänge aus dem Verzahnungsbereich zwischen proximaler (konglomeratdominierter) und distaler (tondominierter) Fazies der Eisenach-Formation aus dem Oberrotliegend des Thüringer Waldes (Abb. 1).

Die Eisenach-Formation ist eine vulkanitfreie Rotsediment-Abfolge aus miteinander verzahnten, 20–90 m mächtigen siltigen Tonschiefern und 50–180 m mächtigen Konglomeraten, die eine Gesamtmächtigkeit von 200–600 m erreicht (Naumann 1913, Knoth 1970, Lütznier 1981, Martens 2003; Abb. 1). Sie ist zeitlich dem Oberrotliegend zuzuordnen und repräsentiert tektonisch die nordöstliche Randfazies des Werrabeckens, eines der zahlreichen durch Extension entstandenen postvariszischen, intramontanen Becken Mitteleuropas. Der Ablagerungsraum des Werrabeckens wurde während des Oberrotliegend durch die Erosionsgebiete der Ruhlaer Schwelle im Osten bzw. der Buchenau-Schwelle im Nordosten begrenzt, von welchen aus auf alluvialen Fächern unter ariden Klimabedingungen grobklasti-

*Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Christoph Heubeck, Institut für Geologische Wissenschaften, Freie Universität Berlin, Malteserstr. 74–100, D-12249 Berlin, Germany (cheubeck@zedat.fu-berlin.de).

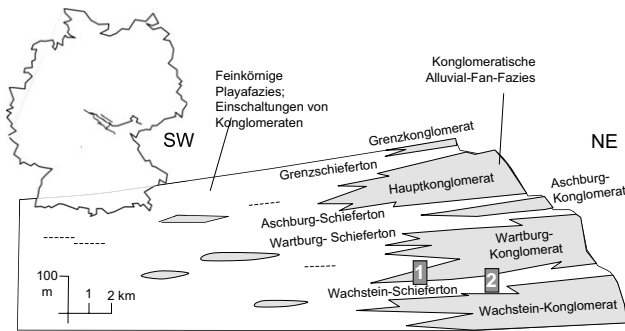


Abb. 1: Schematisches Querprofil durch den Thüringer Wald nahe Eisenach mit Darstellung der Faziesverzahnung innerhalb der Eisenach-Formation; umgezeichnet aus Lützner 1994. 1 = Straßenanschnitt Wilhelmsthal; 2 = Parkplatzschleife an der Wartburg. Kärtchen oben links zeigt Lage des Thüringer Waldes in Deutschland.

Fig. 1: Schematic cross-section through the Thüringer Wald near Eisenach (redrawn from Lützner 1994) showing major facies changes within the Eisenach Formation and names its members. 1 = Wilhelmsthal roadcut; 2 = Wartburg Castle parking loop. Inset map shows location of Thüringer Wald in Germany.

sches Material Richtung Westen und Südwesten ins Werrabeckeninnere transportiert wurde (Lützner 1978, 1981, 1994). Lützner (1981) schätzte die Ausdehnung dieser wahrscheinlich schwach geneigten Fächer auf 6 bis 12 km in Schüttungsrichtung. Die fazielle Verzahnung zwischen den schlecht sortierten, grobklastischen Ablagerungen von Schuttströmen und Schichtfluten einerseits und den gut sortierten, feinkörnigen Suspensions- und Schlammstromablagerungen der Playa-Fazies im Beckeninneren andererseits ist entlang des Hauptkamms des Thüringer Waldes südlich von Eisenach kartierbar. Während die verwitterungsresistente konglomeratische Fazies in zahlreichen natürlichen Böschungen und Steilhängen ausgezeichnet aufgeschlossen ist und auch verbreitet als Baustein (einschließlich großer Teile der Wartburg) verwendet wurde, ist die tonige Fazies nur in wenigen Aufschlüssen zugänglich (Naumann 1913, Lützner 1981, Schneider & Gebhardt 1993, Martens 2003).

Sandverfüllte sedimentäre Gänge im thüringischen Rotliegend sind nicht selten. Die Gänge der Eisenach-Formation fanden bereits mehrfach Erwähnung (Knoth 1957, Lützner 1981, Schneider & Gebhardt 1993). Ein sehr gut aufgeschlossenes Vorkommen von sandverfüllten Gängen in dünn geschichteten konglomeratischen Schichtflutablagerungen bei Wilhelmsthal wurde von Lützner (1994) detailliert beschrieben und als injektive, seismisch ausgelöste Strukturen interpretiert. Sedimentäre Gänge in der Eisenach-Formation treten auch in mehreren weiteren Aufschlüssen auf, z. B. im aufgelassenen Steinbruch in der Georgenschlucht am südwestlichen Stadtrand Eisenachs, im oberen Teil des aufgelassenen Steinbruchs auf der Kammhöhe am Vachaer Stein und am westlichen Ende des geologisch bekannten Aufschlusses Bahnhof Förtha; das Vorkommen am letzteren Aufschluss wurde bereits von Lützner (1981) erwähnt. Ausgezeichnet

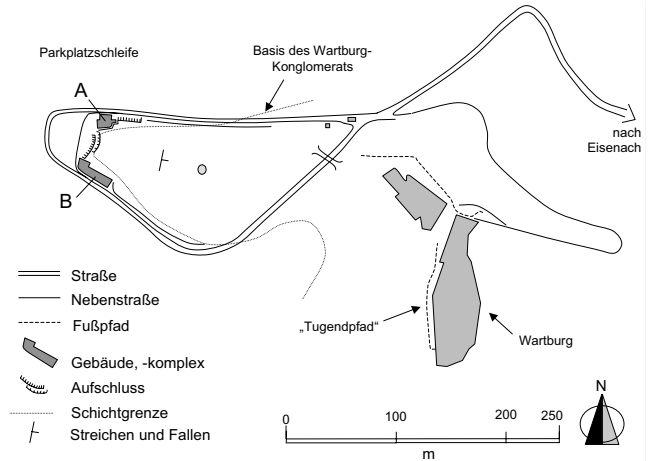


Abb. 2: Schematische Übersichtskarte der Parkplatzschleife mit der benachbarten Wartburg. Die Wirtschaftsgebäude A und B sind ebenfalls in Abbildung 3 und 4 identifiziert.

Abb. 2: Schematic overview map of parking loop and adjacent Wartburg Castle. Buildings A and B are also identified in fig. 3 and the photographs of figure 4.

studierbare sandverfüllte Gänge in Konglomeraten des Wartburg-Konglomerats wurden 1916 in einer Stützmauer der Wartburg am Tugendpfad (Abb. 2) verbaut.

Es ist deshalb wahrscheinlich, dass sedimentäre Gänge in der Eisenach-Formation, assoziiert mit der Verzahnung permeabler Konglomeratbänke und impermeabler toniger Lagen, verbreitet sind. Nahezu all diesen erwähnten Vorkommen ist gemein, dass die sedimentären Gänge sandverfüllt sind und in der Regel dünn- bis mittelgeschichtete Konglomeratbänke durchziehen.

Ein weiteres, bisher kaum dokumentiertes ausgedehntes Vorkommen von sedimentären Gängen befindet sich auch an der Parkplatzschleife nahe der Wartburg (Schneider & Gebhardt 1993, König 2007, König & Heubeck 2007). Es zeichnet sich im Vergleich zu den bereits erwähnten Vorkommen durch eine hohe räumliche Dichte der dort anstehenden Gänge, einer ungewöhnlichen konglomeratischen Verfüllung und der nahezu dreidimensionalen Aufschlussesituation aus. Zudem ist das Vorkommen dort permanent frisch aufgeschlossen und ausgezeichnet zugänglich. Der Aufschluss bildet die westliche Hälfte eines bewaldeten Hügelsporns wenige hundert Meter westlich der Wartburg, um welchen 1929/1930 ein schleifenförmiger Parkplatz auf ca. 385 m über NN angelegt wurde (Abb. 2). Der Bau des Parkplatzes schuf einen den Hügel umlaufenden Aufschluss von ca. 1 bis 5 m Höhe. Am westlichen Hügelabfall wurde zwischen zwei Wirtschaftsgebäuden (A und B in Abb. 2, 3 und 4) aus einem ehemaligen Steinbruch der mit ca. 12 m höchste, durch eine Terrasse unterteilte Aufschluss der Parkplatzschleife geschaffen (Abb. 4c). Dieses geologische Naturdenkmal wird häufig von geologischen Exkursionen besucht (Lützner et al. 1988, Schneider & Gebhardt 1993, Geyer et al. 1999, Martens 2003).

2. Lithologie, sedimentäre Strukturen, Alter

Die ca. 12 m hohe Wand (Abb. 3, 4c) erschließt in ihren unteren zwei Dritteln eine Wechsellagerung des obersten Wachstein-Schiefertons (auch bekannt als „Unterer Schiefertons“, Martens 2003) mit mehreren Konglomeratbänken, überlagert von der basalen Bank des Wartburg-Konglomerats. Dieses bildet das zweitälteste von fünf regional kartierbaren konglomeratischen Einheiten der Eisenach-Formation (Abb. 1).

Bohrungen im südlich angrenzenden Werrabecken belegen, dass konglomeratische Bänke nur in der proximalen Fazies der Eisenach-Formation auftreten und im distalen Bereich auskeilen oder in sandreiche Schichten übergehen (Lützner 1981, Schneider & Gebhardt 1993).

Der Wachstein-Schieferton ist ein lithologisch uneinheitliches, dominant feinkörniges, schluffig-feinsandiges, glimmerführendes, selten geröllführendes und intensiv rotbraun gefärbtes Gestein, welches in der Literatur verkürzt als „Schieferton“ angesprochen wird. Eine Bankung oder Lamination fehlt oder ist undeutlich ausgeprägt, doch sind engständige und subhorizontale Mikrokluft im mm- bis cm-Abstand, die vermutlich Laminations-Schichtfugen nachzeichnen, zahlreich; diese bedingen einen kantig-scherbigen Bruch. Das Gestein ist gelegentlich von nester- und schlauchförmigen Feinsand- bis Feingerölllinsen von mm- bis cm-Durchmesser durchsetzt (Martens 2001). Die Ursache für die fehlende oder nur schwach ausgeprägte Lamination des Tonsteins ist unbekannt. Es ist möglich, dass der Tonstein durch niedrig viskose Schichtfluten („slurry flows“) entstand und eine Lamination deswegen primär fehlte; ebenfalls vertretbar ist eine Überprägung primärer Lamination durch par-

tielle Liquefaktion und Homogenisierung des schwach konsolidierten Sediments durch Mikroentwässerung („micro-venting“) während Überflutungen, durch Erdbeben oder während frühdiagenetischer haloturbater interner Deformation (Lützner 1974, 1981). Pervasive Bioturbation als Agent der Homogenisierung ist dagegen unwahrscheinlich, weil die Tonsteine, wie auch die Eisenach-Formation insgesamt, extrem fossilarm sind. Die Fossilführung beschränkt sich auf Arthropoden- und Tetrapodenfährten sowie Conchostraken in der distalen Fazies (Martens 1979, Martens 2001). Das Vorkommen von wenigen mm großen Hydromedusen (Werneburg 1996) in den Schichten am Wartburgparkplatz ist umstritten (Martens 2001).

Die Klastenführung der Eisenach-Formation im Allgemeinen und der mit den „Schiefertonen“ wechselgelagerten Konglomeratbänke am Wartburg-Parkplatz im Besonderen ist begrenzt polymikt. Die auffallend angularen bis subangularen, schlecht sortierten Klasten bestehen vorwiegend aus Rhyolithoiden, Milchquarz, Glimmerschiefer, Granit und Quarzit (Knoth 1960, 1970, Lützner 1979). In den mit dem „Schieferton“ wechsellagernden Konglomeratbänken an der Parkplatzschleife erreichen die Klasten bis ca. 6 cm Durchmesser; im überlagernden Wartburg-Konglomerat bis zu 20 cm. Die Konglomerate sind matrix- bis klastengestützt. Örtlich schwimmen Klasten vereinzelt in roter, tonig-siltig-sandiger Matrix; andernorts sind die Klasten dicht in eine feinkiesige und grobsandige Matrix eingelagert. Eine interne, cm- bis dm-ständige, regelmäßig ebene Schichtung ist trotz der schlechten Rundung und Sortierung mäßig bis gut ausgeprägt und durch eingeregelt Klastenlängsachsen, Klastenimbrikation, seltene interne flache und breite Erosionsflächen und verbreitete normale Gradierung definiert, welche das Konglomerat in unscharf voneinander getrennte Lagen trennt (Abb. 5a; Konglomerattyp D nach Lützner

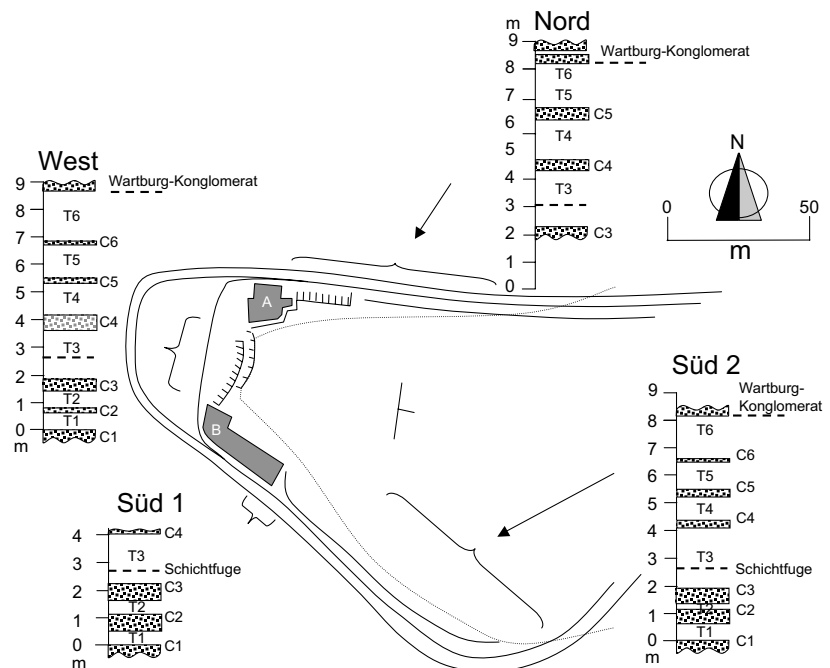


Abb. 3: Lage der stratigraphischen Profile (N, W, S) um die Parkplatzschleife an der Wartburg.

Fig. 3: Stratigraphic measured sections (N, W, S) along the Wartburg parking loop.

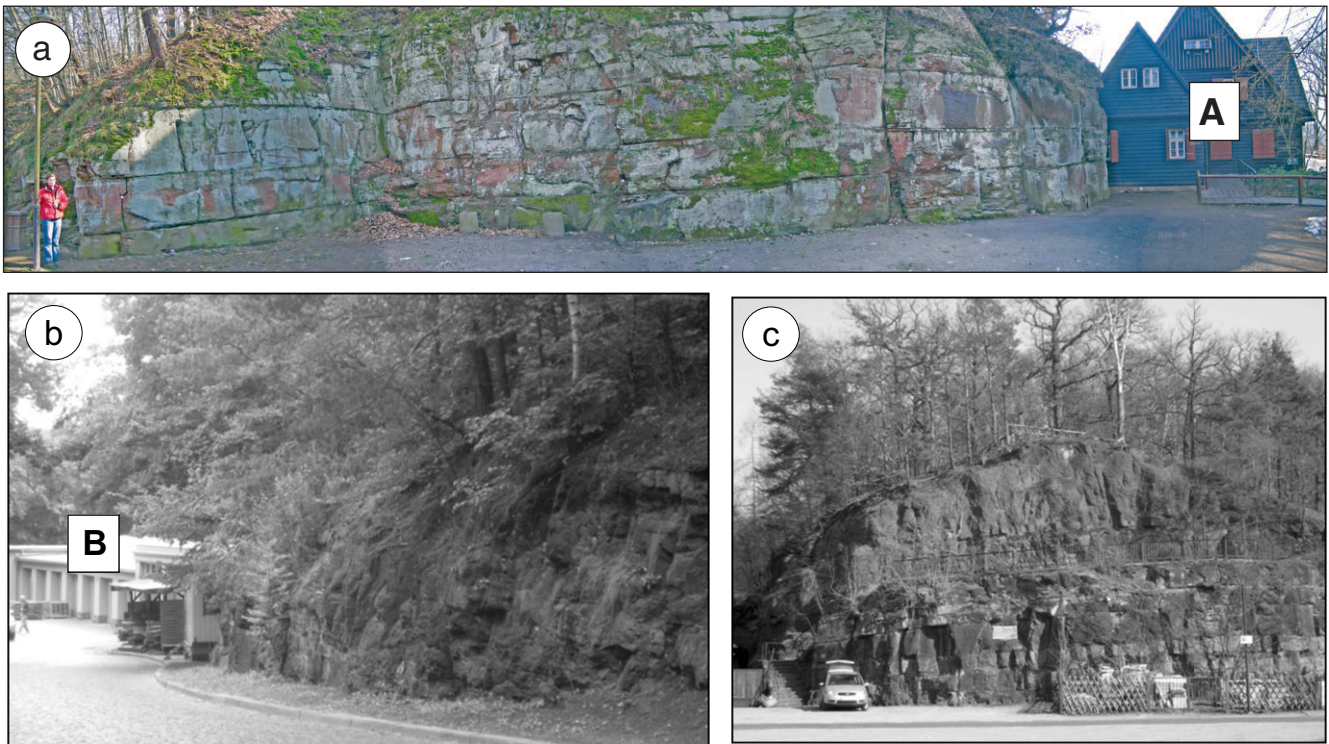


Abb. 4: Aufschlüsse der Parkplatzschleife an der Wartburg: (a) Teil des Aufschlussbereichs Nord mit Wirtschaftsgebäude A (Abb. 2); (b) Teil des Aufschlussbereichs Süd mit Wirtschaftsgebäude B (Abb. 2); (c) Aufschlussbereich West, Blickrichtung nach Osten; die Tafel („Geologisches Naturdenkmal“) rechts neben dem Fahrzeug befindet sich in Tonschieferbank T3.

Fig. 4: Outcrop photographs at the Wartburg parking loop: (a) Partial view of northern outcrop segment with building A (Fig. 2); (b) part of southern outcrop segment with building B (Fig. 2); (c) western outcrop segment, view towards the east. Plaque (“Geological Natural Monument”) to the right of the vehicle is mounted on shale unit T3.

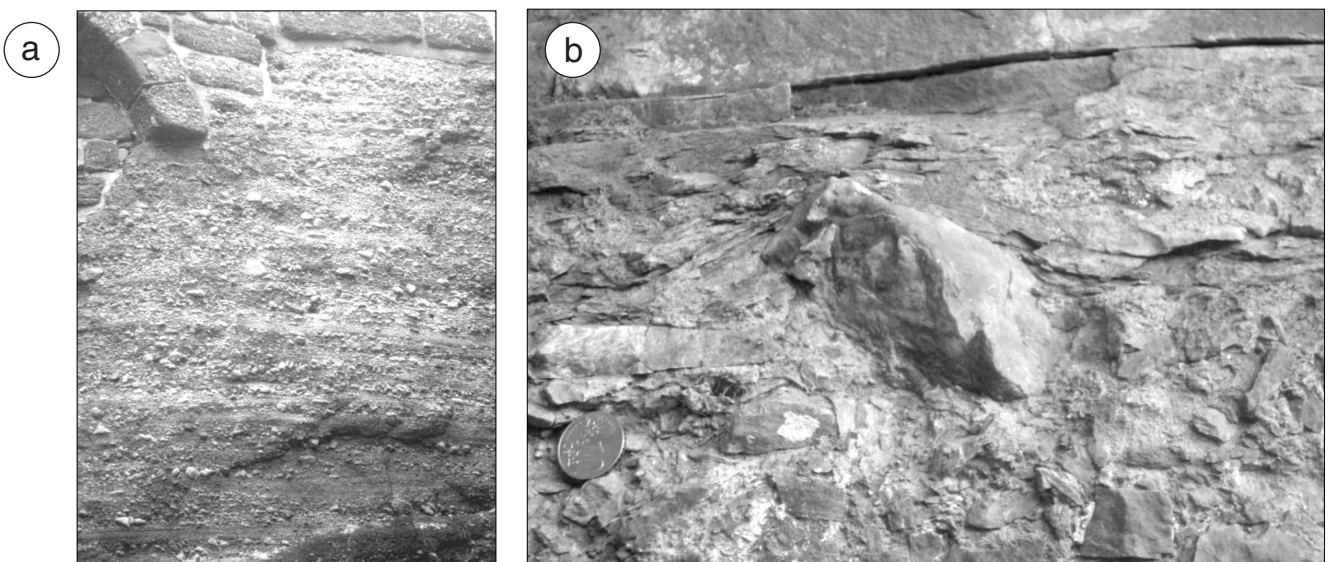


Abb. 5: Typische sedimentäre Strukturen der Konglomeratbänke der Eisenach-Formation. (a) Dünn geschichtete Konglomeratbänke des Wartburgkonglomerats; (b) eisbergartiges Herausragen eines Klasten aus dem Top einer Konglomeratbank (Georgenschlucht bei Eisenach).

Fig. 5: Characteristic sedimentary structures in conglomerates of the Eisenach Formation. (a) Thin-bedded sheet-flood conglomerate of the Wartburgkonglomerat Member (see Fig. 1) showing imbricated clasts; (b) buoyantly floating clast at the top of a conglomerate bed (Georgenschlucht near Eisenach).

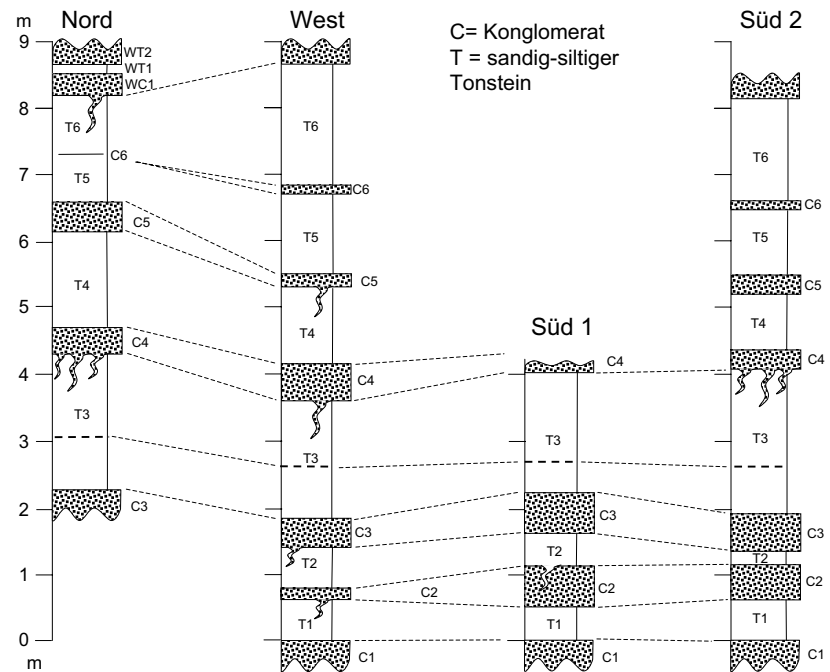


Abb. 6: Aufschlusskorrelation der Bänke des „Unteren Schiefertons“ der Eisenach-Formation an der Parkplatzschleife bei der Wartburg. Die Anzahl der Symbole gibt in etwa die Dichte der Gänge wieder. Alle Gänge, mit der Ausnahme eines sandverfüllten Ganges in Konglomerat C2 des Profils Süd 1, sind geröllgefüllt und in Tonsteinen angelegt.

Fig. 6: Bed-to-bed correlation of the “Wachstein-Schieferton” Member (Fig. 1) of the Eisenach Formation at the parking loop of Wartburg Castle. The number of dike symbols approximately reflects their density at each stratigraphic position. All dikes, except a single sand-filled dike in conglomerate C2 of measured section South 1, are gravel-filled and occur in shale.

1978). Rinnen und Rinnenfüllungen fehlen fast ganz. Einzelne Gerölle ragen eisbergartig aus der Dachfläche einzelner Konglomeratbänke hervor und werden durch den hangenden Tonschiefer ummantelt (Abb. 5b). Die Basis der Konglomeratbänke ist ausnahmslos scharf und planar und in der Regel kaum erosiv. Ein auffallendes Merkmal der Eisenach-Formation im Allgemeinen und der Konglomerat-Schieferton-Wechselfolge am Wartburgparkplatz insbesondere ist das weitgehende Fehlen der Sandfraktion, was Lütznert (1994) auf mögliche Ausblasung zurückführt. Zeitäquivalente äolische Ablagerungen zu den Eisenacher Schichten sind in der Tat aus dem Inneren des Werrabeckens (Lütznert 2007) und dem angrenzenden Mülhausener Becken bekannt. Im Liegenden der Basis des Wartburg-Konglomerats, welches an der Wartburg mindestens 15 m mächtig wird, unterbrechen sechs konglomeratistische Bänke (C1–C6) die Tonschiefer (Abb. 3, 6).

Die Tonstein-Konglomerat-Folge kann in vier Profilen (Nord, West, Süd 1, Süd 2) aufgenommen werden, wobei Nord und Süd 1 unvollständig aufgeschlossen sind (Abb. 6). Bis auf eine Ausnahme (Bank C6) halten die Konglomeratbänke in dem nur wenige 100 m durchmessenden aufgeschlossenen Bereich ohne größere Mächtigkeitsschwankungen aus. Sie zeigen nur gemittelt (C4+C5+C6) einen von Nord nach Süd von 0,77 m auf 0,50 m abnehmenden Trend (Abb. 6).

Die Fossilführung, die winkeldiskordante Lagerung auf einem datierten Granitporphyrgang (277 ± 7 Ma; U-Pb an Zirkonen; Zeh & Brätz 2000) und die inverse magnetische Polarität der Eisenach-Formation unter der Illawarra-Umpolung (265 Ma; Menning 1995, Menning et al. 1988) zeigen ein kungurisches Ablagerungsalter von ca. 277–265 Ma an (Lütznert et al. 2003, 2006, Lütznert 2007).

3. Transportprozesse, Fazies und Ablagerungsräume

Bisherige Bearbeiter der Eisenach-Formation (Naumann 1913, Knoth 1960, 1970, Lütznert 1974, 1978, 1979, 1981, 1994, Martens 2003, Schneider & Gebhardt 1993) stimmen überein, dass die proximale, konglomeratdominierte Fazies der Eisenach-Formation Schüttungen durch Schutzströme auf einem ariden Schwemmfächer repräsentiert. Auf dessen nach Süden hin graduell auslaufenden Schürzen wurden periodisch durch Starkregenereignisse Schichtfluten ausgelöst, die als Schutzströme unterschiedlicher Viskosität Geröll aus einem östlich und nordöstlich von Eisenach gelegenen Abtragungsgebiet, der Ruhlaer bzw. Buchenauer Schwelle, in das Becken transportierten. Die internen Merkmale der Konglomeratbänke weisen auf ein rhythmisches An- und Abswellen der Fließgeschwindigkeit und Kompetenz hin. Die Schüttungen bestanden meist aus einzelnen, zeitlich ineinander übergehenden Pulsen von niedrig bis mäßig viskosen „debris flows“, die in einem einzigen Ablagerungsereignis mehrere geringmächtige Schüttungen ohne klar definierte sedimentäre Unterbrechung absetzten. Durch die geringe Fließtiefe wurden insbesondere oblate und plattige Klasten nicht im Strom (turbulent?) taumelnd, sondern in der viskosen Grenzschicht vorwiegend (laminar?) gleitend transportiert. Die Dachziegellagerung in den Konglomeratbänken zeigt an, dass für viele Klasten ein Relief von wenigen mm an der Basis der Schüttung bereits zum unüberwindbaren Hindernis wurde und zum Aufgleiten der Klasten führte. Das eisbergartige Herausragen von Klasten am Top der Konglomeratbänke weist auf einen geringen Dichteunterschied zwischen Klasten und toniger Matrix oder alternativ auf hohe Viskosität gegen Bewegungsende hin und ist ein klarer Hin-

weis auf einen dichte- und viskositätsunterstützten Massentransportmechanismus.

Neben dem Aufschluss am Wartburgparkplatz ist die distale, tondominierte Fazies der Eisenach-Formation über mehrere hundert Meter entlang der Ortsverbindungsstraße Wilhelmsthal-Förtha und neben der Eisenbahnlinie im Geogental südwestlich Eisenach gut aufgeschlossen. Dabei handelt es sich um rote brüchige Tonsteine, Siltsteine und Feinsandsteine. Zahlreiche cm-große, meist kantengerundete Hohlräume sind vermutlich auf herausgelöste frühdiagenetische Anhydrit- oder Gipskristalle zurückzuführen. Die Tonsteine der distalen Fazies wurden vermutlich in einer großräumigen, ebenen, episodisch von stehenden Gewässern bedeckten Playa abgelagert (Lützner 1981, Schneider & Gebhardt 1993).

Der Aufschluss am Wartburgparkplatz repräsentiert einen typischen Ausschnitt aus der Übergangszone zwischen proximaler und distaler Fazies. In dieser erreichten nur noch gelegentlich einzelne Ausläufer besonders intensiver oder niedrig viskoser Schichtfluten, die vermutlich von Starkregenereignissen im Erosionsgebiet ausgelöst worden waren, die randlichen, oberflächlich ausgetrockneten oder von Flachwasser bedeckten Randbereiche der Playa. Die auffallende fehlende Erosivität der Konglomerate kann auf den hohen Schmierungsgrad an der Gleitfläche zwischen den niedrig viskosen, wässrigen Schuttströmen und den tonigen Playa-Randsedimenten zurückzuführen sein.

4. Sedimentäre Gänge am Wartburgparkplatz

Am Wartburgparkplatz sind 42 sedimentäre Gänge in drei Gruppen dokumentiert (Nord = 21, West = 10, Süd = 11), wobei Gänge mit weniger als 5 cm vertikaler Tiefe nicht berücksichtigt und wenige dm nebeneinander liegende Gänge

als ein einziges Vorkommen erfasst wurden (Abb. 6). Als Trägergestein der Gänge dienen die siltig-sandigen Tonsteinbänke des Wachstein-Schiefertons. Die meisten dokumentierten Gänge konzentrieren sich, möglicherweise bedingt durch die Aufschlussverhältnisse, auf die Einheit T3. Die Bänke T1, T2, T4 und T6 weisen ebenfalls Gänge auf. In Konglomeraten wurde nur ein einziger Gang beobachtet (C2 des Profils Süd1; Abb. 6); alle anderen Gänge befinden sich in den Schiefertonen.

Allen Gängen gemeinsam sind zwei Eigenschaften: eine fein- bis grobkiesige Füllung aus Klastenlithologien der konglomeratischen Fazies in sandiger, tonreicher roter Matrix und eine komplexe, generell sich aber nach oben erweiternde Gangbreite zur Basis der Konglomeratbank im Hangenden hin (Abb. 7, 8, 9, 10, 12). Zum Liegenden hin läuft die Gangfüllung in der Regel spitz zu; eine Verbindung zum Top der liegenden Konglomeratbank konnte nur in einem Fall (Profil West: T2, Gang 3) dokumentiert werden. Eine tektonische Deformation der Gänge, die am Gesteinsverband z. B. durch Scherung und Faltung oder durch Verformung einzelner Klasten ablesbar wäre, wurde weder am Aufschluss noch in der Umgebung beobachtet. Lützner (1988) schätzt die subvertikal wirkende Kompaktion auf etwa 27%. Eine Stauchung der Gänge und damit einhergehende Deformation ist durch pygmatische Faltung der Gänge zu erkennen (Abb. 8).

Nahezu alle Gänge sind subvertikal orientiert, obwohl stark geneigte und subhorizontale Abschnitte gelegentlich auftreten. Gänge verzweigen sich häufig, vorwiegend nach unten, aber auch das Gegenteil kann, insbesondere nahe dem Eintritt in die hangende Konglomeratbank, beobachtet werden. Die Mehrheit der Gänge hat einen Hauptast, der sich nach oben weit (trichter- und taschenförmig) oder kaum (schlotförmig) erweitert (Abb. 7, 8, 9, 10, 12). Wenige Gänge bilden breite netzartige Strukturen, deren obere Auswei-

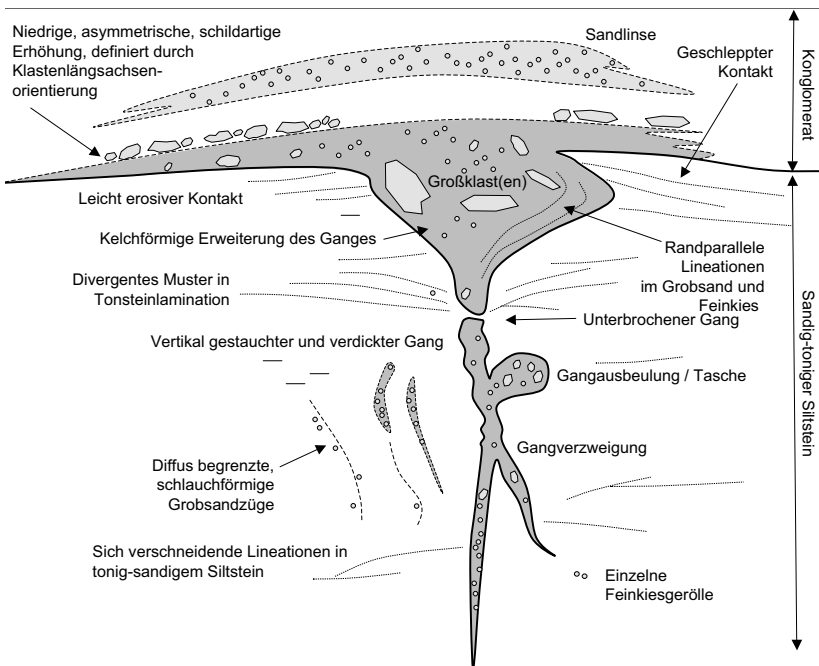


Abb. 7: Schematische Zeichnung eines idealisierten Injektionsganges.

Fig. 7: Schematic drawing of an idealized injection dike.

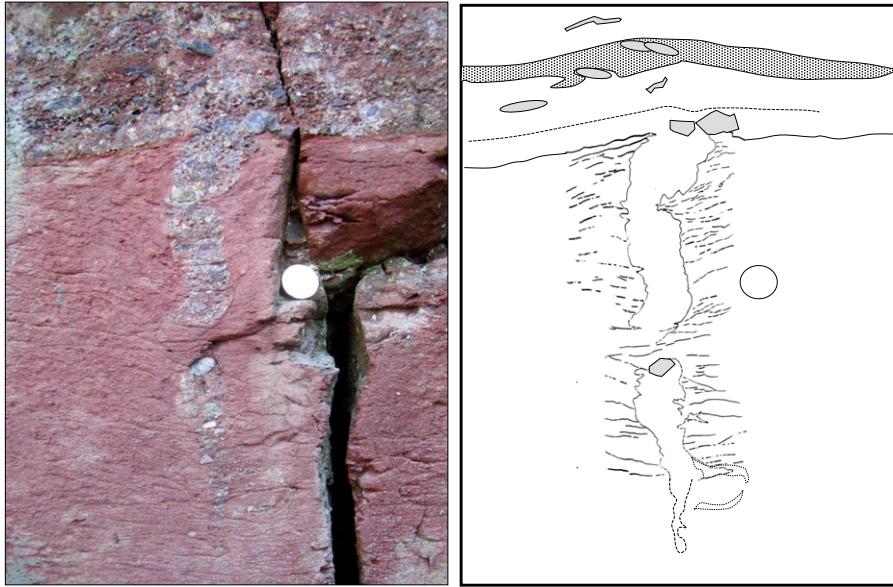


Abb. 8: Aufschlussfoto und Zeichnung eines typischen Injektionsgangs (NT3-1). Die deformierte Lamination in den Tonsteinen und die verdickte, verengte und unterbrochene Gangfüllung ist vermutlich auf Kompaktion zurückzuführen. Man beachte die mit der Teufe abnehmende Klastengröße, die nach rechts ausgebeulte, mit Feinkies verfüllte Tasche im unteren Teil und längliche, isolierte Feinkies- und Grobsandlinsen in der Bildmitte links. Ein schildförmiger Eruptionskegel, definiert durch Schichtung, Klastengröße oder Klastenlängsachsenorientierung, ist nur schwach zu erkennen. Münze hat 22 mm Durchmesser.

Fig. 8: Outcrop photograph and line drawing of a typical injection dike (NT3-1). The deformed lamination in the shales and the thickened, constricted and interrupted dike fill is likely a result of compaction. Note the decreasing clast size with depth, the grit-filled pocket towards the right (near base of dike), and elongated, isolated lenses of grit and coarse sand in the shale. A shield-shaped possible eruptive cone, defined by bedding, clast size and clast long axis orientation, is only weakly developed. Coin is 22 mm in diameter.

tungen sich großflächig vereinigen (Abb. 9). Die Gangwandung ist (z. T. durch differenzielle Kompaktion) meist mehr oder weniger eng gewunden. Sie ist in der Regel durch den hohen Korngrößenkontrast zwischen dem Tonschiefer-Trägergestein und der konglomeratischen Füllung klar erkennbar; jedoch zeigen sich verbreitet auch innerhalb des Trägergesteins diffus begrenzte, mehrere cm lange, oft schnur- oder schlauchförmige „Schnüre“ von Feinkies und Grobsand ohne Vorzugsrichtung im tonig-siltigen Trägergestein (Abb. 10). Die Lamination des umgebenden Trägergesteins wird durch diese abgeschwächt oder verbogen. An wenigen Lokalisationen kommen im Trägergestein nur wenige cm große, tropfen-, kissen- oder pilzförmige, mit Grobsand und Feinkies verfüllte Strukturen vor, die nach oben konvex geformt und mit einem zentralen subvertikalen und schlauchförmigen Fortsatz an ihrer Unterseite versehen sind (Abb. 11). Diese Geometrie legt deren diapirhaften Aufstieg in einem nicht bruchhaft, sondern plastisch deformierenden Medium nahe und impliziert Sedimentinjektion in ein weitgehend unverfestigtes, stark Wasser führendes Trägersediment.

Die Korngröße der Gangverfüllung korreliert qualitativ mit der Gangmächtigkeit und der Gangtiefe: Breitere Gänge sind mit größerem Material verfüllt, deren Korngröße mit zunehmender Teufe abnimmt. Subvertikale Gänge erscheinen im zweidimensionalen Profil häufig unterbrochen (Abb. 8) oder verbogen (Abb. 10). Dies lässt sich durch Ansnittseffekte eines irregulär schraubenförmigen Ganges mit der

planaren, zweidimensionalen vertikalen Anschnittsfläche oder (wahrscheinlicher) durch Deformation und Abtrennung der Gangsegmente während der initialen Kompaktion erklären.

Der Kontakt zwischen Gang und der Basis des überlagernden Konglomerats ist in der Regel graduell. Es lässt sich weder eine deutliche Änderung in der dominanten Klastengröße, ihrer Sortierung, noch in der Lithologie feststellen. Subhorizontale Klastenreihung, lokale abrupte Korngrößenänderungen und Dachziegellagerung im oberen Teil der Gangfüllungen treten jedoch gelegentlich auf und erlauben in mehreren Fällen, schildartige konvexe Aufwölbungen über dem Gang zu interpretieren (Abb. 8, 12). Gelegentlich konnte beobachtet werden, dass der subhorizontale Kontakt zwischen Schieferton und überlagerndem Konglomerat zum Gang hin ansteigt, Lamination erodiert wird und die Kante des Schiefertons einseitig flammenförmig geschleppt ist (Abb. 12). Auffallend ist das gelegentliche Auftreten einer mehrere cm mächtigen, relativ gut sortierten, nach beiden Seiten auskeilenden Sandlage wenige cm über der Endung mehrerer Gänge (Abb. 8, 12). Mehrere Gänge (T1-3, T2-3, T3-16) sind dreidimensional aufgeschlossen und lassen eine tabulare Geometrie erkennen (Abb. 13). In Aufsicht zeigen die Gänge eine von typischen Trockenrissen deutlich abweichende Geometrie: Sie bestehen aus en-echelon angeordneten geraden Segmenten, die über Querverbindungen verknüpft sind. Verzweigungen, gekurvte Segmente und pseu-

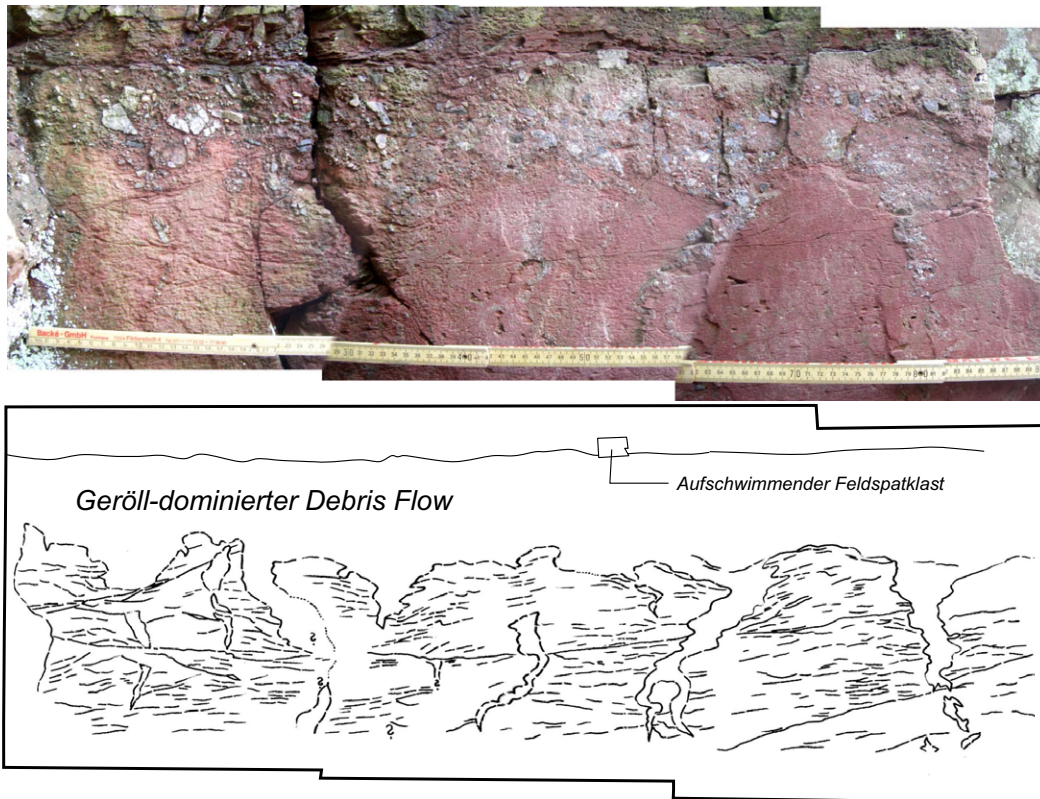


Abb. 9: Ansicht einer vertikalen Kluft mit Anschnitten von drei Injektionsgängen (NT3-13), die sich nach oben kelchförmig erweitern und in ein Konglomerat (C4) übergehen, welches wiederum von einem Tonstein (T4) überlagert ist. Man beachte den auf dem Konglomerat aufschwimmenden Feldspatklasten.

Fig. 9: View perpendicular to orientation of a vertical joint showing three injection dikes (NT3-13) which widen upward and merge into a conglomerate bed (C4), which in turn is overlain by shale. Note the angular feldspar clast "floating" at the top of the conglomerate bed.

dopolygonale Muster, wie sie für Trockenrisse typisch sind, fehlen. Die Orientierung der Gangerstreckung weist eine deutliche NE-SW Vorzugsorientierung auf (Abb. 14).

5. Diskussion

5.1 Mechanismen der Bildung sedimentärer Gänge

Diskordante sedimentäre Gänge entstehen entweder durch die Verfüllung präexistierender, oberflächenverbundener Spalten und Klüfte durch oberflächentransportiertes Sediment („passive Entstehung“) oder durch die Injektion verflüssigten Sediments in lineare Schwächezonen semikonsolidierten Sediments („aktive Entstehung“). Offene, oberflächennahe Risse können durch gravitative Massenbewegungen (z. B. Rutschungen), Trockenrisse, Grundwasserspiegelsenkungen (Holzer & Clark 1993), Permafrost, Erdbeben oder Wurzelröhren entstehen; in von hier deutlich abweichenden geologischen Situationen kommen auch Verkarstungsprozesse in Betracht. Sedimentäre Injektionsgänge („hydrofractures“) bilden sich dagegen, wenn der Porendruck den kleinsten kompressiven Stress des umgebenden impermeab-

len Trägersediments plus dessen Zugfestigkeit übersteigt. Tritt dieser Fall in permeablen Lockergesteinen mit vernachlässigbarer Kohäsion ein, trennen sich die Körner voneinander. Das Sediment verliert seine Scherfestigkeit und wird verflüssigt („Liquefaktion“). In impermeablen, kohäsiven Lockergesteinen öffnet sich dagegen senkrecht zum kleinsten kompressiven Stress ein Riss, in welchen Porenflüssigkeit oder ein durch Porenüberdruck verflüssigtes Sediment-Wasser-Gemisch eindringen kann, verursacht durch den Überdruck an der Basis des Risses und beeinflusst durch Schwerkraft, viskosen Widerstand und turbulente Scherkraft.

Ist der kleinste kompressive Stress horizontal orientiert (was in der Regel der Fall ist), bilden sich vertikale Gänge; ist er dagegen vertikal, wird die Trägerschicht angehoben, sodass sich horizontale Gänge bilden. Lässt der Porendruck nach, schließt sich das umgebende Trägermaterial um den Riss (und seine eventuelle Füllung). Dieses Prinzip des „hydraulic fracturing“ in Locker- und Festgesteinen hat zahlreiche ingenieur- und geowissenschaftliche Anwendungen.

Kriterien zur Unterscheidung „aktiver“ von „passiven“ sedimentären Gängen werden in der Literatur aufgezählt und beruhen meist auf geometrischen und lithologischen Eigen-



Abb. 10: Aufschlussfotografie und Zeichnung des obersten Teiles eines Injektionsganges (WT2-3) mit der Basis des überlagernden Konglomerats (C3). Mehrere Taschen und subhorizontale Ausbuchtungen des subvertikalen Ganges sind mit Feinkies verfüllt. Die angrenzende tonig-siltige Matrix hat ihre Lamination weitgehend verloren und ist von zahlreichen Sandschnüren mit diffuser Begrenzung durchzogen.

Fig. 10: Outcrop photograph and line drawing of uppermost part of an injection dike (WT2-3) and base of overlying conglomerate bed (C3). Several pockets and subhorizontal bulges of the subvertical dike are filled with grit. The adjacent clayey-silty matrix has largely lost its lamination and is permeated by numerous sand strings with diffuse borders.

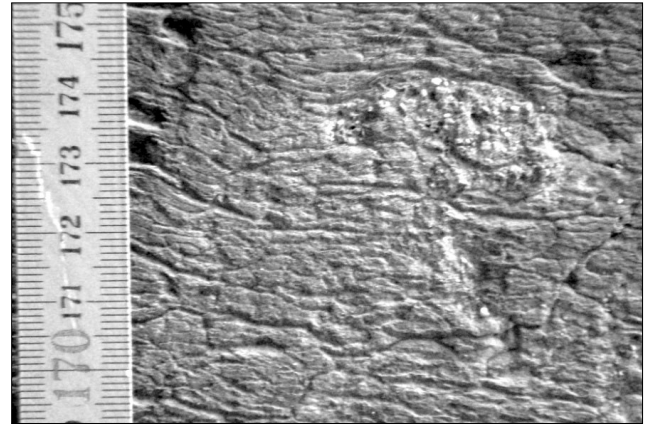


Abb. 11: Detail der Tonschicht T3 (Gang WT13-3). Kissenförmige Grobsand-/Feinkiestasche über subvertikalem Gang, möglicherweise eine Injektionsstruktur, die ein plastisches Verhalten des Trägersediments nahe legt.

Fig. 11: Detail of shale bed T3 (dike WT13-3). Mushroom-shaped coarse-sand and grit pocket above subvertical dike (possibly an injection structure) suggests a plastic behaviour of the host sediment.



Abb. 12: Aufschlussfoto und Zeichnung eines Injektionsganges (NT3-5) mit Auskolkungstasche. Das Foto ist schräg zum Streichen des Ganges aufgenommen und stellt die Tasche daher etwas verzerrt dar. Die Orientierung der Großklasten in der Zeichnung ist schematisch dargestellt. Man beachte die Dachziegellagerung der Klasten in der Tasche, die konvex gewölbte Sandlinse über der Tasche und den nach links geschleppten tonig-kiesigen Trichterrand. Die gestrichelt dargestellte Lage besteht aus längsachsenorientiertem Feinkies und kann auf Umspülung und Überdeckung eines Eruptionsbaus zurückgehen.

Fig. 12: Outcrop photograph and line drawing of an injection dike (NT3-5) with erosive gravel-filled pocket. Photograph is taken obliquely to trend of dike and therefore shows the pocket somewhat distorted. The orientation of large clasts in the line drawing is shown schematically. Note the clast imbrication, the convex sand lens above the gravel-filled pocket and the shaly-silty margin of the pocket, dragged towards the left. The bed shown in a dashed outline consists of grit and may be a result of a sheet flood which surrounded and covered a possible eruptive cone.

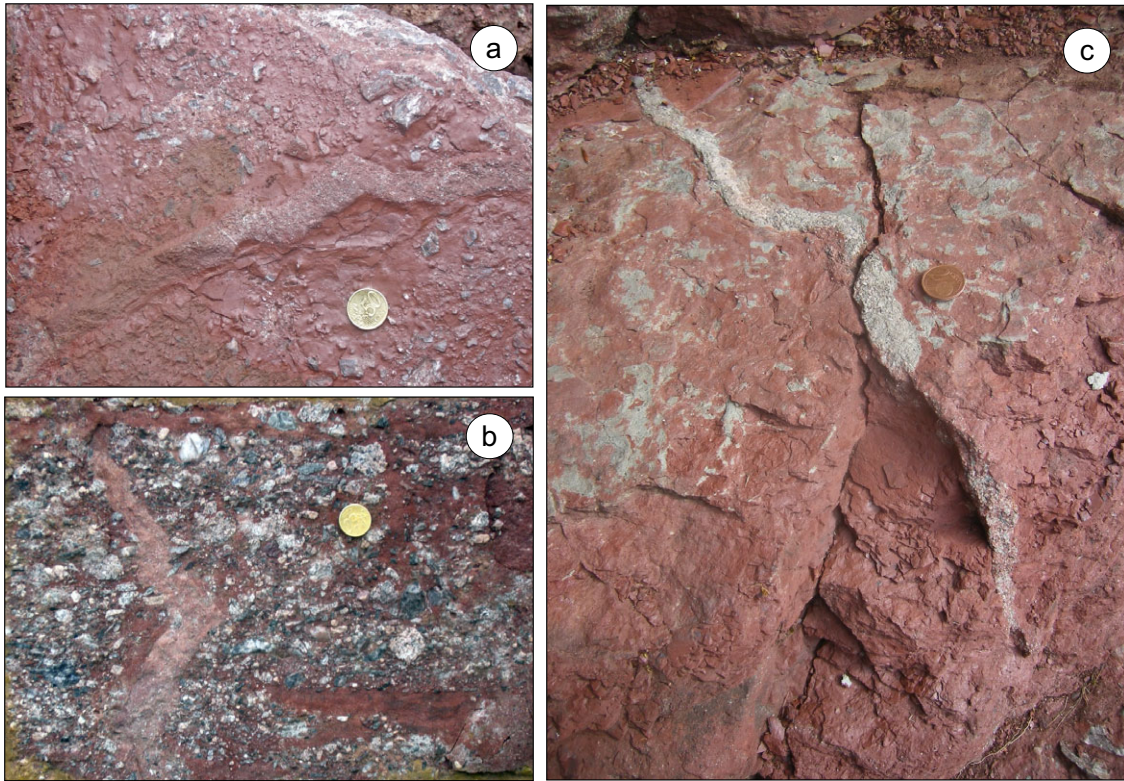


Abb. 13: Aufsichten (a: loser Werksteinblock in Vorratshalde unterhalb des Busparkplatzes; b: Baustein in der Westmauer der Wartburg) bzw. dreidimensionaler Anschnitt (c; WT2-3) von Injektionsgängen. Die Gänge sind angular, zeigen Ausschnitte einer en-echelon Geometrie und weisen keine Verzweigungen auf.

Fig. 13: Bedding-plane views (a: loose block at construction site near bus parking; b: block in the Wartburg Castle west wall) and oblique view (c; dike WT2-3) of injection dikes. In plan view, dikes are angular, show parts of an en-echelon geometry and, unlike desiccation cracks, do not branch.

schaften; dennoch ist nicht in allen Fällen eine eindeutige Zuordnung möglich (z. B. Wnuk & Maberry 1990).

Die hier beschriebenen Gänge an der Parkplatzzschleife der Wartburg zeigen Elemente beider Entstehungsmodi. Für ihre Entstehung durch Injektion von unten („aktive Entstehung“) spricht die Verzweigung von Gängen nach oben, die Ausbildung von Taschen, diapirähnliche Strukturen und (sub-)horizontale Gänge sowie die schildartigen niedrigen Erhebungen, die durch Schichtung im Konglomerat und in Sandlinsen über den Gangenden nachgezeichnet wird. Gegen die Interpretation als Injektionsgänge spricht (1) die Seltenheit von nach oben endenden Gängen eines injektiven Anfangsstadiums, (2) das Fehlen von Verbindungen zu konglomeratischen „Feeder“-Bänken im Liegenden, (3) die Armut an Eruptivstrukturen an der Paläo-oberfläche, (4) die außergewöhnliche Grobkörnigkeit der Gangfüllung, die die Frage nach der Transportierbarkeit („Kompetenz“) von angularen Klasten in engen vertikalen Gängen aufwirft, und (5) die Armut an eindeutigen Fließstrukturen innerhalb der Gänge. Diese Argumente werden ergänzt durch Argumente, die für die Entstehung der Gänge durch Verfüllung präexistierender Öffnungen („passive Entstehung“) sprechen: Die große Ähnlichkeit in Klasten-größe und -zusammensetzung zwischen dem oberen Drittel

der Gangfüllung und dem darüber liegenden Konglomerat und die Tatsache, dass die geröllverfüllten Gänge immer in einer hangenden Konglomeratbank, nie an einer Schichtfläche im Tonschiefer enden und deswegen einen kogene-tischen Zusammenhang vermuten lassen.

Die folgenden Absätze versuchen, sich mit den Argumenten gegen eine injektive Entstehung im Einzelnen auseinanderzusetzen.

(1) **Seltenheit von nach oben endenden Gängen eines injektiven Anfangsstadiums:** „Incipient dikes“ sind unvollständig gebildete Gänge, deren obere Enden noch (spitz oder taschenförmig) in den niedrig- oder nichtpermeablen Tonsteinen enden. Sie werden an den beschriebenen Aufschlüssen nahezu nicht beobachtet. Es ist möglich, dass ihr Fehlen hydraulisch begründet ist, weil die vertikale Propagation einer Gangspitze zur Oberfläche hin immer einfacher wird. Dies liegt daran, dass die Differenz zwischen lithostatischem Druck an der Injektionsspitze und dem nahezu konstanten Porendruck, der an der Gangspitze wirkt, mit abnehmender Teufe wächst und somit dessen Propagation begünstigt. Der horizontale kompressive Stress, der einer Erweiterung der Gangspitze entgegensteht, verringert sich mit abnehmender Teufe (Abb. 15). Einmal wachsend, bricht der Gang deshalb wahrscheinlich bis zur Oberfläche durch.

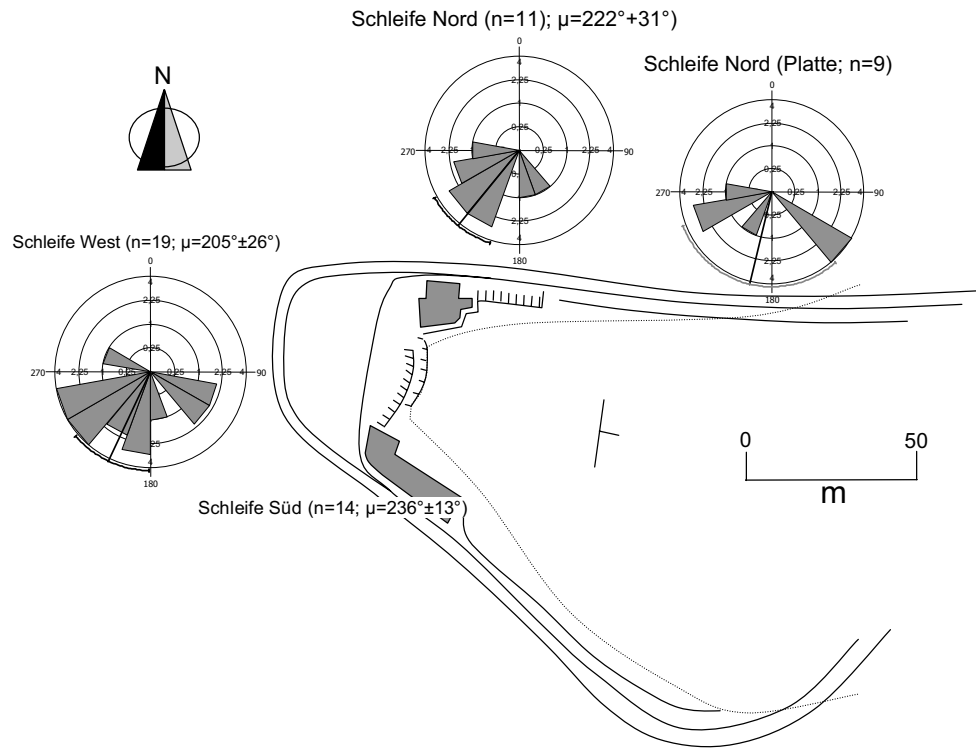


Abb. 14: Orientierung der Ganglängserstreckung, dargestellt als Vektor und nur für die südlichen Azimute der Richtungsrosen. Zwecks eines korrekteren visuellen Eindrucks ist die Projektion der zirkulären Daten nach Keilfläche, nicht nach Radius gewichtet.

Fig. 14: Rose diagrams of dike orientation, shown only as southern-hemisphere azimuths. In order to improve the visual impression, circular data are weighed according to wedge area, not wedge radius.

(2) **Fehlende Verbindungen der Gänge zu Konglomeratbänken im Liegenden:** Fluss durch Injektionsgänge ist zeitlich begrenzt. Ihre Öffnung, wie auch ihre Schließung, ist dem Kräftegleichgewicht im Sediment unterworfen. Reicht im Endstadium einer Sediment-Wasser-Eruption der Porendruck nicht mehr aus, den Förderkanal gegen die Horizontalspannung offen zu halten, beginnt der Förderkanal, sich zu schließen. Dies geschieht wegen der höheren kompressiven Horizontalspannung in größerer Teufe reißverschlussartig von unten nach oben und erklärt die nach unten spitz zulaufenden Enden der Gänge. Cosgrove (2001) und Duranti & Hurst (2004) beschreiben zahlreiche durch ähnliches Verhalten „geheilte“ Gänge aus dem Bristol Channel Basin Englands und dem Tertiär der Nordsee.

(3) **Nur wenige Eruptivstrukturen an der Paläooberfläche über den Gangendungen:** Das weitgehende Fehlen von Eruptivbauten kann auf mehrfache Weise erklärt werden. Einerseits ist es nicht klar, ob alle Gänge die Paläolandoberfläche erreichten. Es ist vielmehr möglich, dass sie Ausdruck von druckausgleichenden Verbindungen („subsurface plumbing system“) zwischen mehreren permeablen Konglomeratlagen im Untergrund darstellen. Strömungen in den Gängen transportierten dann vorwiegend diejenigen Korngrößen, die im klastengestützten Geröllgerüst bewegt werden konnten, nämlich Grobsand und feinere Korngrößen. Solche, wohl fast ausnahmslos nach oben gerichteten Durch-

spülungen, können für die breiten, schildförmigen Sandablagerungen wenige cm über den Gangendungen, aber innerhalb der Konglomerate, verantwortlich sein.

Sollten die Gänge die Oberfläche erreicht haben, besaßen die entstehenden unverfestigten und wassergesättigten Strukturen im Allgemeinen nur ein niedriges Erhaltungspotenzial. Geförderte Sande konnten ausgeblasen und auf der Playaoberfläche verteilt werden. Schlamm und untergeordnet Geröll wurden leicht in einen der nachfolgenden „debris flows“ inkorporiert oder ausgespült. Wo Sedimenteruptionen nahe der Oberfläche infolge von hydraulischen Sprüngen oder laminarturbulentem Umschlag Auskolkungen hervorriefen, konnten die Ränder von Eruptionsbauten bei nachlassendem Förderdruck auch calderaähnlich in den Trichter zurücksacken.

(4) **Klastengröße zu grob für vertikale, aufwärtsgerichtete Förderung:** Die Gangfüllung liegt meist im Feinkiesbereich, doch kommen – ausnahmslos im oberen Teil der Gänge – Mittel- und wenige Grobkiesgerölle vor. Grobkörnigkeit ist kein prinzipieller Hinderungsgrund für eine aufwärtsgerichtete Förderung in einer Flüssigkeit. Übersteigt die Scherkraft an einem im Strom befindlichen Geröll die an ihm wirkenden nach unten gerichteten Kräfte (z. gr. T. das Gewicht), wird sich dieses Geröll nach oben bewegen. Die Scherkraft wird durch die Viskosität der Matrix erhöht, das effektive Gewicht durch eine erhöhte Flüssigkeitsdichte verringert; beides erleichtert einen aufwärtsgerichteten Trans-

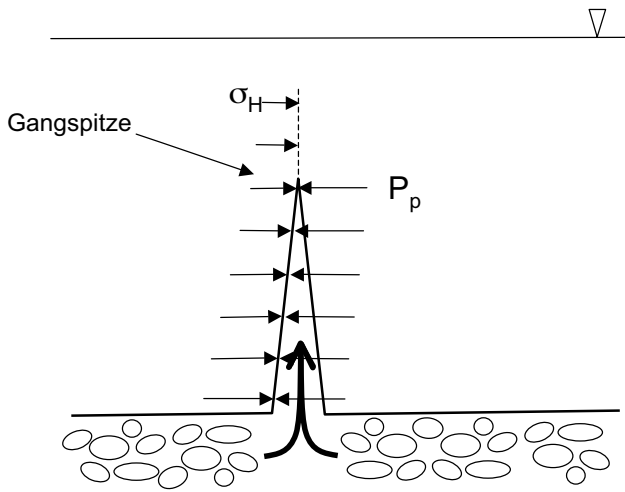


Abb. 15: Mechanismus des vertikalen Risswachstums. Der horizontale kompressive Stress, der einer Öffnung des Ganges entlang der gestrichelten Linie entgegenwirkt, verringert sich mit abnehmender Teufe. Der vom Inneren des Ganges an der Gangspitze wirkende Porenüberdruck bleibt dagegen weitgehend konstant. Hat der Porenüberdruck erst einmal einen vertikalen Spalt geschaffen, ist es wahrscheinlich, dass der Gang bis zur Oberfläche durchbricht.

Fig. 15: Mechanism of vertical crack growth. The horizontal compressive stress σ_H , opposing dike opening along the dashed line, diminishes with decreasing depth. Pore pressure P_p within the opening dike, in contrast, remains more or less constant. As a consequence, vertical dike propagation is facilitated with decreasing depth, making dike propagation to the surface more likely.

port. Bei allmählich nachlassendem Porenüberdruck im verflüssigten Sediment verringert sich jedoch die Scherkraft auf die in der Suspension transportierten Klasten, sodass deren nach oben gerichtete Transportgeschwindigkeit sich verringert und sich im Endstadium der Förderung umkehrt. Dieser Effekt greift auf immer geringere Korngrößen über, sodass gegen Ende der Eruptionsphase nur noch Feinsand, Ton- und Siltpartikel in einer niedrig viskosen Matrix aufwärts transportiert werden, während gröbere Klasten gleichzeitig entweder zurücksacken oder im Fördergang stecken bleiben. Ein Zurücksacken von evtl. gefördertem Grobgeröll von der Erdoberfläche in den Gang wird jedoch durch das Verkeilen der Gerölle, die zunehmende Verfüllung der Hohlräume mit Klasten stetig abnehmender Korngröße, die allmähliche Schließung des Ganges und die zunehmende Viskosität der Gangfüllung bei abnehmender Förderrate erschwert. Die Förderrate nimmt, wie auch die Permeabilität der Gangfüllung, wiederum exponentiell bei zunehmendem Umschließungsdruck um den sich schließenden Gang ab.

Es ist unwahrscheinlich, dass die Überdrucke im Porenwasser der Konglomeratbänke so hoch waren, dass sie extrem hohe Fließgeschwindigkeiten in den vertikalen Gängen erreichten, ohne das umgebende weiche Tonsediment der Gangwände signifikant zu erodieren. Auch ist die Annahme nicht plausibel, dass alle Grobgerölle trotz abnehmender Durchflussgeschwindigkeit restlos aus dem Trägerhorizont

entfernt werden konnten. Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Abwägungen und aufgrund der großen Ähnlichkeit der Gerölle in den Gangtrichtern mit denen in den unmittelbar überlagernden Konglomeratbänken halte ich es deswegen insgesamt für wahrscheinlicher, dass die Grobgerölle oberflächlich durch Schuttströme herantransportiert wurden, präexistierende Trichter füllten und nachfolgend vereinzelt durch Setzung, Kompaktion oder neuerliche Sedimentdurchspülung der Gänge im Untergrund in tiefere Gangabschnitte sackten.

(5) **Armut an eindeutigen Fließstrukturen:** Klastenreihungen, Dachziegellagerung und „convolute bedding“ sind nur schwach ausgeprägt. Diese Strukturen können primär abwesend gewesen sein, nämlich bei turbulentem Transport in einer niedrig viskosen Flüssigkeit mit hohem Druckgradienten, oder frühdiagenetisch durch Nachsacken, sekundäre Entwässerung und Kompaktion zerstört worden sein. Schwache „downward“-konvexe Strukturen, die entweder laminares Fließen entlang geneigter Bahnen oder plastische Deformationsvorgänge von ursprünglich horizontaler Schichtung darstellen, sind jedoch in mehreren breiten Gängen und Trichtern erkennbar.

5.2 Modell

Abbildung 16 (a–e) schlägt, unter Berücksichtigung der aufgeführten Argumente pro und contra einer injektiven Entstehung, ein Entstehungsmodell der Gänge in 5 Phasen vor.

Phase 1 (Abb. 16a): Artesischer Druck, ausgehend von einem konglomeratischen Aquifer unter Überdruck, verursacht das Aufbrechen einer plastisch-elastischen Tonschicht senkrecht zur Richtung des geringsten kompressiven Stresses. Flüssigkeit, Sand und Feinkies werden von unten in den vertikal propagierenden Riss injiziert. Diese dynamisch instabile Anfangsphase lässt sich durch Beobachtungen im Aufschluss jedoch nicht belegen.

Phase 2 (Abb. 16b): Der Riss ist durch das pelitische Sediment bis zur Oberfläche propagiert. Schlamm, Sand und Feinkies werden an die Oberfläche gespült und bilden eine flache, schildartige Erhebung; turbulente Auskolkung schafft einen oberflächlichen Trichter. Andauernde Sand-Wasser-Durchspülung des Ganges destabilisiert das angrenzende Trägersediment; erste Taschen bilden sich im Fördergang.

Phase 3 (Abb. 16c): Das Trägersediment wird durch die zunehmende Durchspülung im Randbereich zum Injektionsgang nahezu verflüssigt. Parasitäre Taschen lösen sich vom Hauptfördergang; kleine Diapire und Schläuche entstehen, die vorwiegend mit Sand- und Feinkiesschnüren verfüllt werden. Nachlassender Förderdruck lässt gefördert Sediment zum Teil in die sich erweiternde Auskolkung zurücksacken; bei Erliegen der Förderung schließt sich der Fördergang von unten nach oben.

Phase 4 (Abb. 16d): Eine geröllführende Schichtflut umspült Erhebung und füllt Trichter. Große Geröllklasten rutschen dabei zum Grund des Trichters. Weitere Überlagerung durch tonführendes Geröll deformiert die Sandablagerungen

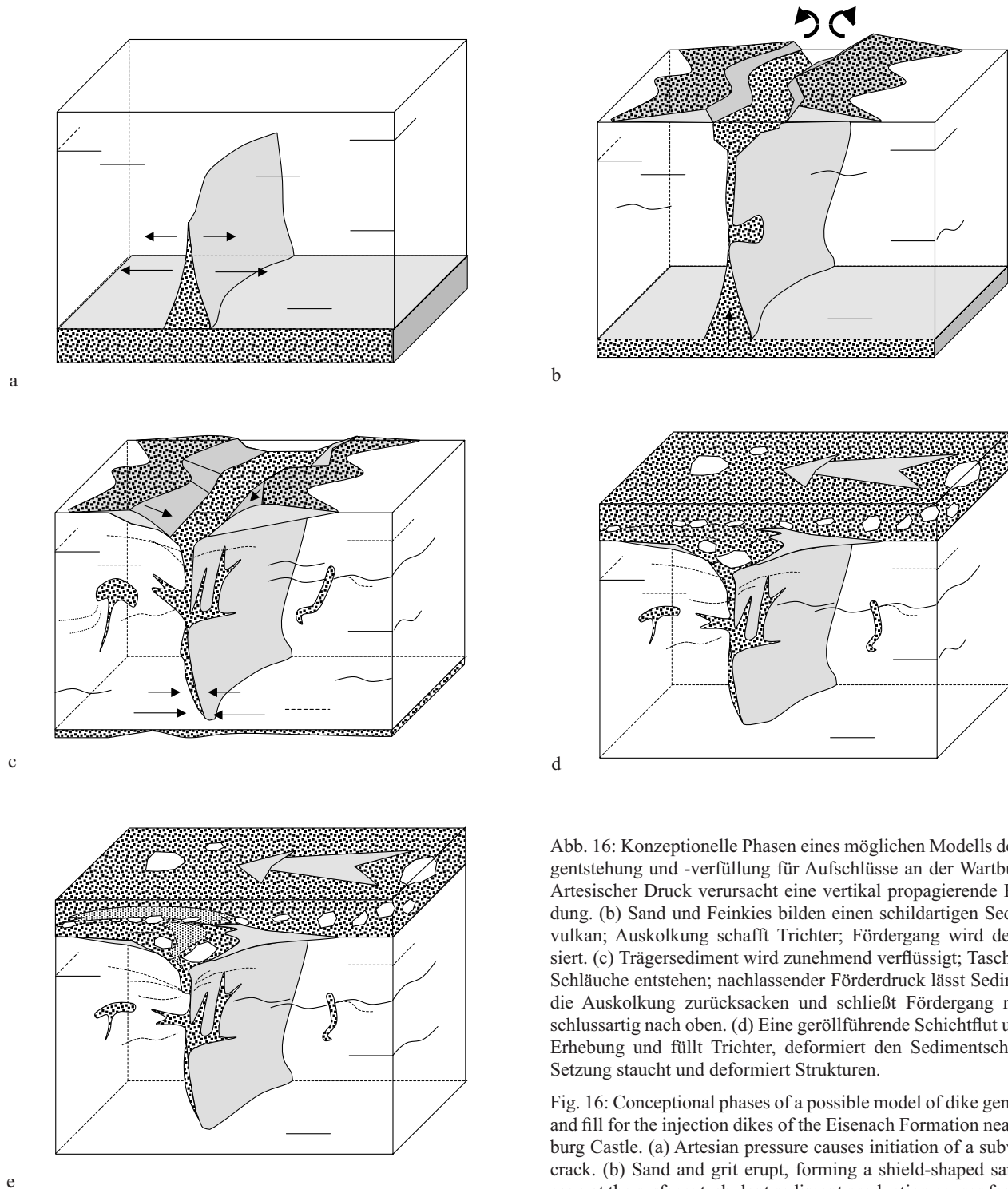


Abb. 16: Konzeptionelle Phasen eines möglichen Modells der Gangentstehung und -verfüllung für Aufschlüsse an der Wartburg. (a) Artesischer Druck verursacht eine vertikal propagierende Rissbildung. (b) Sand und Feinkies bilden einen schildartigen Sedimentvulkan; Auskolkung schafft Trichter; Fördergang wird destabilisiert. (c) Trägersediment wird zunehmend verflüssigt; Taschen und Schläuche entstehen; nachlassender Förderdruck lässt Sediment in die Auskolkung zurücksacken und schließt Fördergang reißverschlussartig nach oben. (d) Eine geröllführende Schichtflut umspült Erhebung und füllt Trichter, deformiert den Sedimentschild. (e) Setzung staucht und deformiert Strukturen.

Fig. 16: Conceptual phases of a possible model of dike generation and fill for the injection dikes of the Eisenach Formation near Wartburg Castle. (a) Artesian pressure causes initiation of a subvertical crack. (b) Sand and grit erupt, forming a shield-shaped sand volcano at the surface; turbulent sediment production causes formation of a pit. Vent destabilizes. (c) Host sediment increasingly liquefies; bulges and tubes form; decreasing pore pressure causes sediment to sag back into pit and closes injection dike, zipper-like, from base to top. (d) A gravelly sheet flood surrounds surface structures, fills pit and deforms or erodes sand volcano. (e) Compaction shortens and deforms structures; renewed production may inject sand into conglomerate.

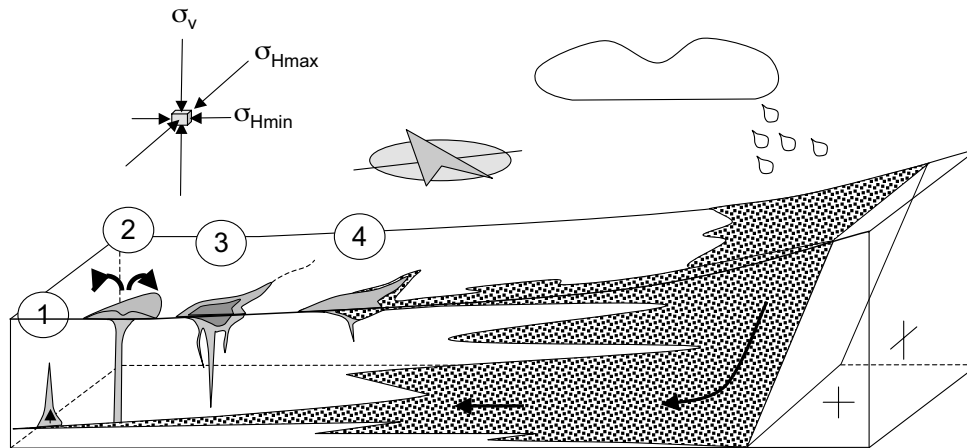


Abb. 17: Schematisches Konzept der Entstehung der verfüllten Injektionsgänge der Eisenach-Formation. Der konglomeratische Aquifer wird beckenrandwärts gefüllt und verursacht im extensionalen Werra Becken randstörungsparelle artesische Injektionsgänge (1–3), deren Trichter von Schuttströmen verfüllt und modifiziert werden (4). Die Anordnung der Skizzen 1–4 in der Abbildung impliziert nur eine zeitliche Entwicklung, keine räumliche Anordnung. Die beckenwärtige Ausdehnung der vermutlich relativ flachen alluvialen Fächer beträgt etwa 6–12 km (Lützner 1981).

Fig. 17: Schematic concept showing the origin and regional setting of the gravel-filled injection dikes of the Eisenach Formation. The conglomeratic aquifer is filled from the elevated basin margin and triggers basin-margin-fault-parallel artesian injection dikes (1–3) in the extensional Werra Basin. Cones are filled and modified by sheet floods (4). The arrangement of the sketches implies only a temporal evolution, not a spatial sequence. Alluvial fans were likely rather flat and extended approx. 6–12 km into the basin (Lützner 1981).

der randlichen Erhebung und der oberen Tonlage durch horizontale Scherung und Schleppung.

Phase 5 (Abb. 16e): Setzung der frisch abgelagerten Geröllschicht belastet den wassergesättigten Schlamm der Trägerschicht, staucht und deformiert alle Strukturen, treibt Wasser durch die Kanäle nach oben und spült Sand zwischen die Geröllklasten über dem verfüllten Trichter.

Phase 6: Weil durch die Gangfüllungen vertikale Verbindungen zwischen den artesisch gespannten, voneinander isolierten Konglomeratbänken unterschiedlichen Porendrucks angelegt wurden, ist es plausibel anzunehmen, dass diese während weiterer Versenkung im Untergrund gelegentlich reaktiviert wurden. Dafür sprechen vor allem die schildförmigen, ca. 3–4 cm mächtigen und ca. 15–20 cm langen Sandlagen, die wenige cm über zahlreichen Gangendungen und deren Trichtern zu beobachten sind (Abb. 8, 12). Ihre Lage und Geometrie weist auf einen Austritt von Flüssigkeits- und Feinsediment aus den Gängen hin.

5.3 Alternative Modelle der Spaltenanlage

Es ist möglich, dass präexistierende tiefe Spalten in der Playa-Fazies der Eisenach-Formation, z. B. als Trockenrisse angelegt, nachfolgend selektiv in der südwestwärts gerichteten Sedimenthaupttransportrichtung auf dem unteren alluvialen Fächer ausgekolkt und später im Untergrund als Teil eines hydraulischen Netzwerkes modifiziert wurden. Tiefreichende, sedimentverfüllte Spalten sind auch aus anderen, zeitlich etwa äquivalenten Rotliegendablagerungen bekannt (Falk et al. 1979, Lützner 1979, H. Lützner pers. comm.

2008). Jedoch sind diese mit geschichtetem Sediment gefüllt und besitzen eine andere Geometrie. Zudem hätte episodische Austrocknung Trockenrisse mit einem charakteristischen Netzleistenmuster erzeugt, die ausgezeichnete Fallen für windgetriebenen Sand gebildet hätten. Obwohl Netzleisten mit Trockenrissgeometrie auf Schichtflächen der Eisenach-Formation vereinzelt vorkommen, sind sie nicht weit verbreitet. Die hier besprochene Gangmustergeometrie auf Schichtflächen, wo aufgeschlossen, zeigt dagegen durch ihre en-echelon-Geometrie Rissbildung durch lokal einheitlich orientierte Kräfte an (Abb. 13, 14).

Eine seismische Anlage oder Erweiterung von Gängen durch die destabilisierende Wirkung seismischer Wellen und den Aufbau von Porenwasserüberdruck, vermutet von Lützner (1994) für die Vorkommen am Straßenaufschluss Wilhelmsthal, erscheint plausibler. Die Bildung von oberflächlichen, offenen Rissystemen, verursacht durch bruchhafte Deformation der Sedimente während eines seismischen Schocks, ist in der Literatur von rezenten Erdbeben gut dokumentiert. Rissysteme sind normalerweise geomorphologischer Oberflächenausdruck einer aktiven Verwerfung (und dann mit Versatz assoziiert) oder sind sekundär gebildet, wobei sie Verwerfungen begleiten (z. B. Gonzalez & Carrizo 2003). Obwohl vertikaler oder horizontaler Versatz an keinem Gang der Eisenach-Formation zu beobachten ist und auch synsedimentäre Verwerfungen in der Eisenach-Formation bisher nicht dokumentiert wurden, ist eine solche Entstehung nicht auszuschließen.

Die an der Parkplatzschleife aufgenommenen, großenteils planaren, in einer Vorzugsrichtung ausgerichteten und vorwiegend vertikalen Gänge reflektieren möglicherweise ein lokales Spannungsfeld und implizieren damit einen hö-

heren Konsolidierungsgrad des Trägersediments. Es ist demnach plausibel, dass diese in der Tiefe entstanden (Duranti & Hurst 2004). Gegen diese Annahme sprechen jedoch die plastisch-viskosen Deformationsstrukturen im pelitischen Sediment und der hohe Grad der post-injektiven Kompaktion.

Die Öffnung der Spalten oder Gänge und damit die Orientierung der linearen Injektionen erfolgte parallel zum örtlichen σ_{Hmin} . Eine tektonische Bedeutung dieser Vorzugsorientierung ist unwahrscheinlich, weil sie in schwach konsolidiertem, wenig kompaktiertem Sediment entstand, welches regional wirkenden Stress nicht weiterleiten konnte. Allenfalls zeichnet die Gangorientierung möglicherweise tiefer liegende Strukturen des Saar-Nahe-Beckens und der NW-Begrenzung der Ruhlaer Schwelle nach (Lützner 1981, 1994).

Die schnur- oder pilzförmigen sedimentären Strukturen in den Tonschiefern (Abb. 10, 11) sind auf verbreitetes, aber kleinmaßstäblich ablaufendes „microventing“ zurückzuführen, wodurch kohäsive, unkonsolidierte Sedimente diffus entwässern. Dieser Prozess ist in wenig permeablen und unverteilteten Sedimenten unter wechselnden hydrostatischen Bedingungen, z. B. in tidalen Ablagerungsräumen, Gletscherendseen oder Playas verbreitet. Dabei tritt unter Bildung von kleinen Schlammvulkanen Flüssigkeit an der Erdoberfläche aus (z. B. Dionne 1973). Experimentelle Untersuchungen (Papanicolaou & Billing 2006, Mörz et al. 2007) belegen eine frühe Teilverflüssigung und die Selbstverflüssigung unter Eigengewicht.

6. Schlussfolgerungen

Lineare Entwässerungsstrukturen in der Eisenach-Formation sind weit verbreitet. Die Abwägung von sedimentologischen, hydraulischen und tektonischen Argumenten in Bezug auf die Aufschlüsse am Wartburgparkplatz und (durch Analogieschluss) auf die weiteren Aufschlüsse entlang des Streichens der Eisenach-Formation befürworten insgesamt ihre Entstehung als eine hydrostatische Konsequenz des prägnanten Fazieswechsels von permeablen Konglomeraten zu nahezu impermeablen Ton- und Siltsteinen (Abb. 17). Wahrscheinlich wurden die konglomeratischen Aquifere periodisch durch Starkregenereignisse im Oberlauf der alluvialen Fächer befüllt. Der Aufbau von hydrostatischem Druck in den beckenwärts auskeilenden Bänken war schließlich ausreichend, um die ca. 1–2 m mächtigen, plastisch-viskosen Silte und Tone zu durchbrechen und artesischen Quellen zu schaffen. Oberflächliche Auskolkungstrichter wurden von nachfolgenden geröllführenden Schichtfluten zeitnah verfüllt. Für periodisch starke Niederschläge in einem insgesamt ariden Gebiet sprechen u. a. die Schichtflut-dominierten Konglomerate. Die Grobgeröllführung der Gänge ist möglicherweise ein weitgehend sekundäres Phänomen, das auf interne Umlagerung, Ausspülung von Feinsediment und periodische Reaktivierung der Gänge als druckausgleichende „Ventile“ im Untergrund zurückzuführen ist.

Das verbreitete Auftreten von diffusen Entwässerungsstrukturen in den Ton- und Siltsteinen der Playafazies und

von sandführenden Injektionsgängen, die die Konglomeratbänke der alluvialen Fazies der Eisenach-Formation an anderen Orten durchschlagen, zeigen, dass der Verzahnungsbereich zwischen beiden Fazies ein sedimentologisch und hydrologisch dynamischer Raum war, der durch eine Vielzahl von Mechanismen entwässert und kompaktierte. Eine seismische Auslösung der Sedimentinjektionen, möglicherweise auch unter Benutzung präexistierender, sedimentär oder tektonisch angelegter oberflächlicher Risstrends, ist ebenfalls nicht auszuschließen.

Bei guten Aufschlussverhältnissen kann die Kartierung von Injektionsgängen Aufschlüsse über Spannungszustände, Beckenrandbegrenzungen und frühdiagenetische Prozesse geben. Wegen der oberflächlichen Ähnlichkeit der Injektionsgänge zu Trockenrissen ist zu vermuten, dass einige bisher in der Literatur als Trockenrisse angesprochene Strukturen, insbesondere wo sie mit markanten Faziesübergängen und Permeabilitätskontrasten assoziiert sind, missinterpretiert wurden und eine komplexere Entstehung verbergen.

7. Danksagung

Die chilenischen Austauschstudenten Magdalena Paez, Pablo Gutierrez und Sergio Arancibia machten mich erstmalig auf die Gänge an der Parkplatzschleife aufmerksam. Die ursprüngliche Datenaufnahme erfolgte im Rahmen einer BSc-Arbeit durch E. König (2007). Diskussionen mit A. Winkler, E. Scheuber, D. Mertmann, K.-J. Reutter und V. Jacobshagen verbesserten meine Gedanken. Das Manuskript gewann durch konstruktive Hinweise von D. Mertmann, Harald Lützner (Jena) und Andreas Hoppe (Darmstadt).

8. Schriftenverzeichnis

- Cosgrove, J. (2001): Hydraulic fracturing during the formation and deformation of a basin: a factor in the dewatering of low-permeability sediments. – *American Assoc. Petroleum Geol., Bull.*, 85: 737–748, Tulsa (AAPG).
- Dionne, J.-C. (1973): Monroes; a type of so-called mud volcanoes in tidal flats. – *J. Sediment. Res.*, 43: 848–856, Tulsa (OK) (Soc. Sediment. Geol.).
- Duranti, D. & Hurst, A. (2004): Fluidization and injection in the deep-water sandstones of the Eocene Alba Formation (UK North Sea). – *Sedimentology*, 51: 503–529, Oxford (Blackwell).
- Falk, F., Ellenberg, J., Grumbt, E. & Lützner, H. (1979): Zur Sedimentation des Rotliegenden im Nordteil der Saale-Senke – Hallesche bis Hornburger Schichten. – *Hallesches Jb. Geowiss.*, 4: 3–22, Halle (Univ. Halle-Wittenberg).
- Geyer, R., Jahne, H. & Storch, S. (1999): Geologische Sehenswürdigkeiten des Wartburgkreises und der kreisfreien Stadt Eisenach. – *Naturschutz im Wartburgkreis*, 8: 188 S., Eisenach (Thüringer L.-Anst. Geol.).
- Gonzalez, G. & Carrizo, D. (2003): Segmentation, kinematics and relative chronology of the late deformation of Salar del Carmen Fault, Atacama Fault System (23 degrees 40' S), northern Chile. – *Rev. Geol. Chile*, 30: 223–244, Santiago de Chile (Inst. Investigaciones Geol.).

- Holzer, T.L. & Clark, M.M. (1993): Sand boils without earthquakes. – *Geology*, 21: 873–876, Boulder (CO) (Geol. Soc. America).
- Hurst, A. & Cartwright, J.A. (Hrsg.) (2007): Sand injectites: implications for hydrocarbon exploration and production. – *American Assoc. Petroleum Geol., Mem.*, 87, Tulsa (AAPG).
- Knoth, W. (1957): Sedimentpetrographische Untersuchungen im Basal-, Wachstein- und Wartburg-Konglomerat des Eisenacher Oberrotliegenden. – *Hallesches Jb. mitteldt. Erdgesch.*, 5: 85–86, Leipzig (Teubner).
- Knoth, W. (1960): Über sedimentpetrographische Untersuchungen von Konglomerathorizonten des Eisenacher und Tambacher Oberrotliegendgebietes. – *Ber. geol. Ges. DDR*, 5: 62–63, Berlin (Akademie-Verl.).
- Knoth, W. (1970): Zur Lithologie und Paläogeographie des höheren Rotliegenden im Thüringer Wald. – *Ber. dt. Ges. geol. Wiss.*, A 15: 47–65, Berlin (Akademie-Verl.).
- König, E. (2007): Sedimentäre Gänge am Wartburgparkplatz, im Oberrotliegenden der Eisenach-Formation, Thüringer Wald. – BSc-Arbeit: 42 S., Inst. Geol. Wiss., FU Berlin (unveröff.), Berlin.
- König, E. & Heubeck, C. (2007): Sedimentäre Gänge der Eisenach-Formation (Oberrotliegendes), Wartburgschleife, Thüringer Wald: *Geo.Alp* (Veröff. Inst. Geol. Paläont. Univ. Innsbruck), 4: 55.
- Lütznert, H. (1974): Sedimentation des Rotliegenden im Thüringer Wald. – *Habilitationsschrift* (Diss. B): 533 S., Univ. Greifswald.
- Lütznert, H. (1978): Konglomerattypen des Rotliegenden von Thüringen und deren Vergleich mit rezenten Schwemmfächersedimenten. – *Z. geol. Wiss.*, 6 (19): 1187–1210, Berlin (Akademie-Verl.).
- Lütznert, H. (1979): Transportanalyse der unterpermischen Sedimente im Thüringer Wald. – *Veröff. Zentralinst. Phys. Erde*, 43: 123 S., Potsdam (Zentralinst. Phys. Erde).
- Lütznert, H. (1981): Sedimentation der variszischen Molasse im Thüringer Wald. – *Schriftenr. geol. Wiss.*, 17: 1–217, Berlin (Akademie-Verl.).
- Lütznert, H. (1988): Sedimentology and basin development of intramontane Rotliegend basins in Central Europe. – *Z. geol. Wiss.*, 16 (9): 845–863, Berlin (Akademie-Verl.).
- Lütznert, H. (1994): Clastic dykes in the distal segment of a Rotliegend alluvial fan (Eisenach Formation, Permian, Thüringer Wald). – *Zbl. Geol. Paläont.*, Teil 1, 1992 (11/12): 1305–1316, Stuttgart (Schweizerbart).
- Lütznert, H. (2007): Eisenach-Formation. – In: *Litholex* (Online-Datenbank). Hannover, BGR. Last updated 30.1.2007; record No. 16. Available from: http://www.bgr.bund.de/Themen/GG_Paleontol/Litholex/
- Lütznert, H., Benek, R. & Bankwitz, P.E. (1988): *Exkursionsführer: Klassische geologische Gebiete in Mitteleuropa: Fundament und Deckgebirge*. – *Akad. Wiss. DDR*: 154–162 und 177–179, Potsdam.
- Lütznert, H., Mädler, J., Romer, R.L. & Schneider, J.W. (2003): Improved stratigraphic and radiometric age data for the continental Permocarboniferous reference-section Thüringer Wald, Germany. – *XVth Int. Congr. on Carboniferous and Permian Stratigraphy 2003, Utrecht, Abstracts*: 338–341.
- Lütznert, H., Littmann, S., Mädler, J., Romer, R.L. & Schneider, J.W. (2006): Stratigraphic and radiometric age data for the continental Permocarboniferous reference-section Thüringer Wald, Germany. – In: *Wong, T.E. (Hrsg.): Proceed. 15th Int. Congr. on Carboniferous and Permian Stratigraphy, Utrecht, 10–16 August 2003* (Royal Netherlands Acad. Arts Sciences).
- Martens, T. (1979): Arthropodenfährten aus dem Rotliegenden der Eisenacher Mulde (Thüringer Wald). – *Z. Geol. Wiss.*, 7 (12): 1457–1462, Berlin (Akademie-Verl.).
- Martens, T. (2001): Paläontologie, Biostratigraphie und Paläogeographie der Tambach-Formation (Oberrotliegend, Unterperm) im Thüringer Wald – ein Überblick. – *Beitr. Geol. Thüringen*, N.F. 8: 181–212, Jena (Thüringischer Geol. Ver.).
- Martens, T. (2003): *Sammlung geologischer Führer*, 95: Thüringer Wald: 252 S., Berlin/Stuttgart (Borntraeger).
- Menning, M., Katzung, G. & Lütznert, H. (1988): Magnetostratigraphic investigation of the Rotliegendes (300–252 MA) of Central Europe. – *Z. geol. Wiss.*, 16: 1045–1063, Berlin (Akademie-Verl.).
- Menning, M. (1995): A numerical time scale for the Permian and Triassic periods. An integrated time analysis. – In: *Scholle, P., Peryt, T.M. & Ulmer-Scholle, D.S. (Hrsg.): Permian of the Northern Continents*, 1: 77–97, Berlin (Springer).
- Mörz, T., Karlik, E.A., Kreiter, S. & Kopf, A. (2007): An experimental setup for fluid venting in unconsolidated sediments: new insights to fluid mechanics and structures. – *Sedimentary Geol.*, 196: 251–267, Amsterdam (Elsevier).
- Naumann, E. (1913): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten*, Lieferg. 113, Blatt Eisenach. – *Preuß. Geol. L.-Anst.*, Berlin.
- Obermeier, S.F. & Pond, E.C. (1998): Issues in using liquefaction features for paleoseismic analysis. – *U.S. Geol. Survey open file rep.* 98-28.
- Papanicolaou, A.N. & Billing, B.M. (2006): Characterizing fluidization in cohesive sediment layers. – In: *Proc. 7th Int. Conf. on Hydroscience and Engineering (ICHE 2006)*, Philadelphia (PA).
- Schneider, J. & Gebhardt, U. (1993): Litho- und Biofaziesmuster in intra- und extramontanen Senken des Rotliegend (Perm, Nord- und Ostdeutschland). – In: *Müller, E.P. & Porth, H. (Hrsg.): Perm im Ostteil der Norddeutschen Senke*. – *Geol. Jb.*, A 131: 57–98, Stuttgart (Schweizerbart).
- Werneburg, R. (1996): *Erster Fossilnachweis vom Wartburg-Aufschluss bei Eisenach (Rotliegend)*. – *Beitr. Geol. Thüringen*, N.F. 3: 115–119, Jena (Thüringischer Geol. Ver.).
- Wnuk, C. & Maberry, J.O. (1990): Enigmatic eight-meter trace fossils in the Lower Pennsylvanian Lee Sandstone, Central Appalachian Basin, Tennessee. – *J. Paleont.*, 64: 440–450, Ithaca (NY) (Paleont. Soc.).
- Zeh, A. & Brätz, H. (2000): Radiometrische und morphologische Untersuchungen an Zirkonen aus Granitporphyren, Rhyolithen und Granitgeröllen des nordwestlichen Thüringer Waldes. – *Z. dt. geol. Ges.*, 151: 187–206, Stuttgart (Schweizerbart).

Manuskript eingegangen: 02.04.2008

Annahme zur Veröffentlichung: 11.10.2008