

Duplexstrukturen im ehemaligen Kupferschieferbergwerk Röhrigschacht in Wettelrode (Sangerhäuser Revier)

Stephan Schnapperelle, Sophia Methner, Dorothee Mertmann

Januar 2024



Komplizierte Lagerungsverhältnisse von Weißliegend, Kupferschiefer und Karbonat im Röhrigschacht von Wettelrode.



HALLESCHES JAHRBUCH FÜR GEOWISSENSCHAFTEN

Herausgeber

**Institut für Geowissenschaften und Geographie
der Martin - Luther Universität Halle-Wittenberg**

P. BAYER, C. CONRAD, J. EVERTS
C. FÜRST, A.-K. LINDAU, B. MICHEL
C. STEPHAN-SCHERB, M. STIPP

Schriftleitung

S. STÖBER

BEIHEFT 53

Halle (Saale) 2024

Institut für Geowissenschaften und Geographie der Martin - Luther
Universität Halle-Wittenberg



Anschrift von Herausgebern und Schriftleitung:

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Institut für Geowissenschaften und Geographie
Von Seckendorff - Platz 3/4
D-06120 Halle (Saale)
email:hjg@geo.uni-halle.de

Schriftleitung:

S. Stöber

P-ISSN: 2193-1313, E-ISSN: 2196-3622

DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/113101.2>

Selbstverlag des Instituts für Geowissenschaften und Geographie
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2024
Alle Rechte vorbehalten

Duplexstrukturen im ehemaligen Kupferschieferbergwerk Röhrigschacht in Wettelrode (Sangerhäuser Revier)

Stephan Schnapperelle, Sophia Methner, Dorothee Mertmann

Institut für Geowissenschaften und Geographie

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Schlüsselwörter: Perm, Kupferschiefer, Rampengeometrien, Duplexstrukturen

Keywords: Permian, Kupferschiefer, ramp geometries, duplex structures

Zusammenfassung

Im ehemaligen Kupferschieferbergwerk Röhrigschacht in Wettelrode sind Schichten des Oberrotliegend und des Zechsteins in gestörter Lagerung untertage erschlossen. Dies ist durch eine Vervielfachung von Schichten sowie Änderungen der stratigraphischen Position einzelner lithologischer Einheiten nachzuweisen. Tektonische Messungen sowie eine begleitende Aufnahme sedimentologischer und lithologischer Besonderheiten weisen auf die Existenz von komplizierten Duplexstrukturen hin. Es sind frontale, laterale und schräge Rampengeometrieelemente zu interpretieren. Die Rückenvererzungen des Kupferschiefers treten bevorzugt an diesen Stellen auf. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen einen Zusammenhang mit der oberkretazischen Inversionstektonik vermuten.

Abstract

In the former Röhrigschacht copper shale mine in Wettelrode, a sequence of the Upper Rotliegend and Zechstein is developed. The sequence is disturbed by fault zones. Tectonic measurements of the sedimentological inventory indicate the existence of complicated duplex structures. Frontal, lateral and oblique ramp geometry elements can be interpreted. The ridge mineralisation of the Kupferschiefer occurs preferentially at these locations. The results of the investigations suggest a relationship with the Upper Cretaceous inversion tectonics.

Einleitung

Ausgehend vom Röhrigschacht in Wettelrode wurde bis zu einer Teufe von ca. 293 m Kupferschiefer abgebaut. Da der Bergbau in einigen Grubenteilen bereits am Ende des 19. Jahrhunderts eingestellt wurde, ist die bisherige Kenntnis der Untertagesituation, vor allem der permischen Lithologien, im Wesentlichen von bergmännischer Begrifflichkeit geprägt. Auch spätere Forschungsaktivitäten konzentrierten sich auf Lokalisierung, Zusammensetzung der Erzphasen, Altersstellung und Genese der

Vererzungen. Die Interpretation der Lagerungsverhältnisse im Schacht und ihre Verknüpfung mit kartierten Übertagebefunden blieben dabei stets vage. Mit dieser Arbeit werden die komplexen Lagerungsverhältnisse erstmals genau dargestellt, mit Messwerten belegt und in einem Modell zusammengefasst.



Abb. 1: Das älteste noch in Deutschland betriebene Stahlfördergerüst des Röhrgeschachts in Wettelrode bei Sangerhausen.

Der heute museal genutzte Röhrgeschacht mit seinem Stahlfördergerüst (Abb. 1) befindet sich in Wettelrode einem Ortsteil der Kreisstadt Sangerhausen in Sachsen-Anhalt. Der Ortskern von Wettelrode, etwa 295 m hoch gelegen, wird im Westen, Norden und Osten von Höhenzügen zwischen 300 m bis 350 m umgeben. Mehrere Halden stammen aus den Zeiten des aktiven Kupferschieferbergbaus im Sangerhäuser Revier (Jankowski & Remus 1963, Stedingk 2002). Ein Pingenzug alter Kupferschieferabbaue, die teils seit dem 13. Jahrhundert belegt sind, erstreckt sich entlang des nördlich Wettelrode gelegenen Waldrandes (Knitschke 1995). Ein Bergbaulehrpfad mit Erklärungen zur montangeologischen und -archäologischen Situation beginnt westlich des Schachtes (König & Lorenz 2009).

Der Kupferschiefer stellt die größte Kupferlagerstätte Europas dar (Borg 2017). Daraus resultiert auch eine lange Tradition des Kupferschieferabbaus im Raum Sangerhausen, der, archäologischen Befunden zufolge, bis in die frühe bis mittlere Bronzezeit zurückgeht und sich über das Mittelalter bis zum Ende des 20. Jahrhunderts fortsetzte (Langelüttich et al. 1999; Leipold 2007; Stedingk 2008; Borg et al. 2012). Heute zeugen zahlreiche Denkmäler, montanhistorische Wanderwege und Museen von den bergbaulichen Tätigkeiten der letzten Jahrhunderte (Rappsilber et al. 2007). Ein derartiges Ensemble ist der Röhrigschacht in Wettelrode (Abb. 1). Er wurde in den Jahren 1871-1873 abgeteuft und im Jahre 1876 bis zu seiner Endteufe von 293,7 m erweitert (Ehling et al. 2019). Die nach dem aus Wettelrode stammenden Berggeschworenen Johann Gottlieb Röhrig benannte Schachanlage (Seilkopf 2001), war die erste ihrer Art im Sangerhäuser Revier, die einen kreisrunden Querschnitt besaß (Völker et al. 2019).

Abb. 2 zeigt einen Grubenriss des Röhrigschachtes aus dem Jahre 1885 (Liebenam 1885). Der Abbau des Kupferschieferflözes erfolgte ausgehend vom Segen-Gottes-Stollen (163 m Teufe; blau in Abb. 2), der Interimssohlenstrecke (196 m Teufe; grün in Abb. 2) sowie der 1. Tiefbausohle (293 m Teufe; gelb in Abb. 2), die über einen Querschlag von 579 m Länge mit dem Füllort am Schacht (282,7 m Teufe) verbunden war (Ehling et al. 2019). Nachdem der Abbau des Kupferschiefers in einigen Teilen des Bergwerks bereits im Jahre 1885 beendet wurde, folgte in anderen Grubenteilen eine Wiederaufnahme des Betriebes während der 1920er Jahre. Infolge der Weltwirtschaftskrise und des Zweiten Weltkrieges kamen die bergbaulichen Tätigkeiten mehrmals zum Erliegen. Erst im Jahre 1951 gewann der Röhrigschacht dank eines neu vorgetriebenen Durchschlags zum Thomas-Münzer-Schacht (Sangerhausen) erneut an Bedeutung. Ab diesem Zeitpunkt diente die Schachanlage der Bewetterung, der temporären Förderung von Erz und als Fluchtmöglichkeit für die Grubenanlage um den Thomas-Münzer-Schacht (Mirsch 1995). Grubenbaue südlich der 1. Tiefbausohle sind heute nicht mehr erreichbar, da sie aufgrund starker Wasserzuflüsse aufgegeben werden mussten. Umso wertvoller ist daher die ausgezeichnete Zugänglichkeit der Bergwerksteile der ersten Betriebsperiode vor 1885.

Das Fördergerüst des Röhrigschachtes wurde um das Jahr 1888 am Freiesleben-Schacht III bei Großörner errichtet und im Jahr 1922 auf den Röhrigschacht umgesetzt. Es zählt in Europa zu den ältesten Schachtfördergerüsten aus Stahl, die bis in die Gegenwart betrieben werden (Ehling et al. 2019; Erlebniszentrum Bergbau Röhrigschacht 2020-2023). In einem Förderkorb, der durch die 1922 erbaute Fördermaschine bis zu einer Geschwindigkeit von 3,25 m/s angetrieben wird, erfolgt die Einfahrt bis zum Füllort des Segen-Gottes-Stollen oder aber zum Füllort am Querschlag zur 1. Tiefbausohle. Von dort aus werden über diverse Strecken sowie über die als Flächen bezeichneten Verbindungen zwischen dem Segen-Gottes-Stollen und der 1. Sohle verschiedene Bergwerksbereiche erschlossen. Besonders hervorzuheben sind das sogenannte Grüne Gewölbe, das durch seine farbenfrohen Versinterungen hervorsticht (Abb. 3), die Elisabethschächter-Schlotte sowie die 1854

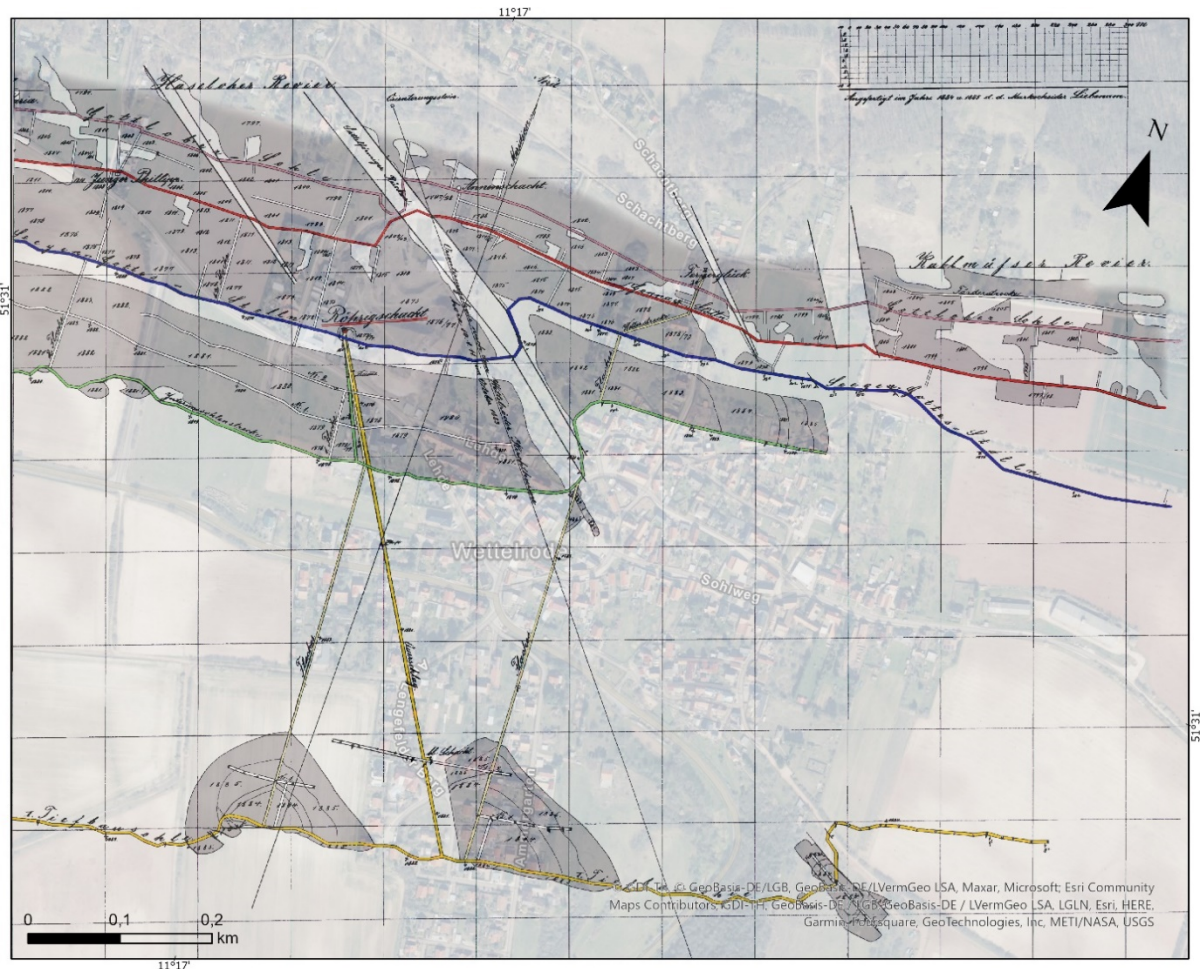


Abb. 2: Grubenriss des Röhrgeschachts und dessen Umgebung; verändert nach Liebenam (1885), zur Verfügung gestellt durch Thomas Wäsche (Bergwerk Wettelrode); zur Orientierung ist im Hintergrund eine Satellitenkarte eingeblendet; Kartengrundlage: GDI-Th, GeoBasis-DE/LGB, GeoBasis-DE/LVermGeo LSA, Maxar, Microsoft & Esri Community Maps Contributors, LGLN, Esri, HERE, Garmin, Foursquare, GeoTechnologies, Inc, METI/NASA, USGS (2023)

entdeckte „Schlotte auf dem Segen-Gottes-Stollen“ mit Marienglasbändern (Hartung 2016; Bauer & Brust 2021; Bauer 2021; Rosenstadt Sangerhausen GmbH 2023).

Neben diesen geologischen Attraktionen beherbergt der Altbergbau einen untertägigen Museumsbereich, der die Geschichte des Bergbaus im Röhrgeschacht als auch von weiteren umliegenden, ehemaligen Kupferschiefer-Abbauen beleuchtet. Verschiedene Abbauwerkzeuge und deren Weiterentwicklung mit fortschreitender technologischer Entwicklung werden dabei ebenso vorgestellt wie die Abbauverfahren und die diversen Arten des Ausbaus. Darüber hinaus werden in höchst eindrücklicher Weise die Arbeitsbedingungen der Bergleute gezeigt.



Abb. 3: Grünes Gewölbe im Querschlag von der Tiefbaushole zum Segen-Gottes-Stollen. Die Farbgebung der Stollenwände resultiert von Ausfällungen diverser Kupferhydrogenkarbonate und -salze.

Das Gebiet um Wettelrode und Sangerhausen liegt im südöstlichen Vorland des Harzes innerhalb der NW-SE verlaufenden Sangerhäuser Mulde. Im NE wird sie durch den herausgehobenen Hornburger Sattel von der angrenzenden Mansfelder Mulde separiert. Im SW schließt sich der Kyffhäuser an. In SW-Richtung geht die Sangerhäuser in die Querfurter Mulde über (Radzinski et al. 2008).

Die ältesten in der Umgebung der Sangerhäuser Mulde aufgeschlossenen Gesteine sind im Kyffhäuser sowie innerhalb der Wippraer Zone als Teil der Nördlichen Phyllitzone zu finden. Diese vermittelt innerhalb der europäischen Varisziden zwischen der Mitteldeutsche Kristallinzone und dem Rhenohercynikum (Franke et al. 2017). Im Karbon vollzog sich die Kollision zwischen dem Südkontinent Gondwana und dem nördlich gelegenen Laurussia sowie dazwischen positionierten Terranen. Der neue Superkontinent Pangäa entstand (Franke et al. 2017). Durch eine Bewegungsänderung Laurussias und Gondwanas von einer N/NW – S/SE zu einer E-W gerichteten Konvergenz, driftete Europa während des Pennsylvaniums unter Rotation im Uhrzeigersinn nach Osten, wodurch sich eine Umorientierung

des Spannungsfeldes einstellte (Edel et al. 2018; McCann et al. 2006). Infolge der Rekonfiguration der Spannungsrichtungen wirkte entlang älterer NE-streichender Brüche dextrale Transtension, wodurch sich bis in Rotliegend hinein überwiegend NW-SE bzw. NE-SW verlaufende, konjugierte Scherzonen bildeten (Arthaud & Matte 1977; Kley et al. 2008; Timmermann et al. 2009). Infolge der Transtension bildeten sich entlang von Abschiebungen und Horizontalverschiebungen intramontane Sedimentbecken, wie das SW-NE-streichende Saale-Becken, auf dem variszischen Untergrund (Romer et al. 2001; Bachmann 2008a; Fazlikhani et al. 2022). Dieser SW-NE streichende Sedimentationsraum erstreckte sich über eine Länge von ca. 150 km und eine Breite von ca. 90 km vom Thüringer Becken bis in den Süden des heutigen Brandenburg (Ehling & Gebhardt 2012). An der Wende vom Oberkarbon zum Unterperm befand sich das heutige Sachsen-Anhalt in äquatorialen Breiten. Das Klima war entsprechend tropisch. Die Region um das heutige Wettelrode zählte auch im weiteren Rotliegend zum Saale-Becken. Durch eine Norddrift Mitteleuropas, veränderte sich das Klima hin zu eher ariden Bedingungen (Paul 2012a).

Die permokarbonische Entwicklung im Saale-Becken wird von magmatischen Ereignissen begleitet (Rappsilber 2003). Die vorwiegend SiO₂-reichen Magmen führten in der Umgebung des Untersuchungsgebietes neben gelegentlich auftretenden Lavaflässen und Pyroklastiten zur Bildung ausgedehnter, oftmals rhyolitischer Subvulkanite, wie sie im Halleschen Vulkanitkomplex oder auch im Thüringer Wald aufgeschlossen sind (Breitkreuz et al. 2018; Lützner et al. 2021). Die geochemische und mineralogische Heterogenität der Magmatite ist dabei bemerkenswert (Ziegler & Dèzes 2006; Timmermann et al. 2009; Lützner et al. 2021). Es ist anzunehmen, dass eine regionale thermische Destabilisierung in Kombination mit dem transtensiven Paläostressfeld als die Hauptkontrollfaktoren anzusehen sind, ehe sich ab dem Unterrotliegend thermische Subsidenz als zusätzlicher Faktor einstellte (Littke et al. 2008). Im Vorfeld der Zechsteintransgression senkte sich das Zentraleuropäische Becken unter den Meeresspiegel ab, so dass ein vollmarines Sedimentationsgeschehen einsetzte (Glennie & Buller 1983; Borg et al. 2012). Abkühlung und Zunahme der Dichte der zuvor aufgeheizten, ausgedünnten Lithosphäre steuerten das kontinuierliche Absinken weiterhin (McKenzie 1978; Ziegler & Dèzes 2006; Sippel 2009; Scheck-Wenderoth 2019). Am Ende des Zechsteins zeigten sich zunehmend kontinentale, klastische Einflüsse, welche die Sedimentation des Buntsandsteins einläuteten (Stollhofen et al. 2008). Triassische Gesteine treten im gesamten Thüringer Becken sowie in der direkten Umgebung von Wettelrode auf. Südlich des Rotliegend- und Zechsteinausbisses, der sich bogenförmig im Süden des Harzes entlangzieht, schließen sich Gesteine des Buntsandsteins an. In Richtung des Zentrums des Thüringer Beckens gehen sie in Gesteine des Muschelkalks und des Keupers über (Bachmann 2008b).

Mit dem einsetzenden Aufbrechen Pangäas, das sich u.a. in den frühesten Anfängen der Öffnung des Atlantiks zeigte, trat ab der Unteren Trias eine E-W gerichtete Extension hinzu (Kley et al. 2008). Durch

das dehrende tektonische Regime wurden ältere, NW-SE- oder NE-SW-streichende Störungen reaktiviert (Rappsilber 2003) und es bildeten sich NNE bis SSW streichende Gräben und Schwellen (Hauschke & Szurlies 2006; Kley et al. 2008; Paul 2020a). Zudem trat in den Evaporiten des Zechsteins Diapirismus auf (Borg et al. 2012). Ab dem Mittleren Jura vollzog sich durch die Separation Gondwanas von Laurasia eine erneute Änderung des Paläostressfeldes (Meschede 2018) hin zu einer NE-SW gerichteten Extension, die bis in die frühe Oberkreide vorherrschte (Kley et al. 2008). Insgesamt können ab dem ausgehenden Perm bis zur späten Unterkreide vier Phasen von Extension und Beckenbildung unterschieden werden: die Altmark-Phase (Oberes Rotliegend II), die Hardegsen-Phase (mittlerer Buntsandstein), die Frühkimmerische (mittlerer Keuper) sowie die Mittel- bis Spätkimmerische Phase (Mittlerer Jura/Frühe Kreide) (Stollhofen et al. 2008).

Nach dieser langen, von Subsidenz und Extension gekennzeichneten Periode veränderte sich das tektonische Regime in der Oberkreide durch die Konvergenz Afrikas und Eurasiens hin zu Verkürzung (Stollhofen et al. 2008). In Mitteleuropa kam es zu Exhumation und zur Bildung von Bruchschollen. Cooper et al. (1989) definierte dafür den Begriff der Inversionstektonik.

Es wird angenommen, dass die Inversion durch eine kurzzeitige Konvergenz zwischen der Iberischen und der Europäischen Platte hervorgerufen wurde und keine direkte genetische Verbindung mit einer Phase der Alpenbildung aufweist (Voigt et al. 2021). Ab dem Santon änderte sich die Relativbewegung Afrikas gegenüber Eurasien hin zu einer nach NE gerichteten Konvergenz. Dabei wurde die kleinere Iberische Platte, die zwischen Afrika und Eurasien lag, in die Konvergenz miteinbezogen (Kley & Voigt 2008). Infolge der Kompression bildeten sich Strukturen aus, die eine Verkürzung in Richtung NE bis N anzeigen (Kley & Voigt 2008). Ältere, vorwiegend NW-SE streichende Abschiebungen wurden dabei verformt, durch jüngere Strukturen versetzt oder auch in Form von Aufschiebungen reaktiviert. In der Umgebung des Untersuchungsgebietes sind mit den Störungen am Nordrand des Kyffhäusers und des Harzes zwei prominente Beispiele oberkretazischer Inversionstektonik zu finden (Franzke et al. 2007; Kley 2013). Die Phase der Kompression hielt in einigen mitteleuropäischen Regionen (u.a. südliche Nordsee, Keltische See, Sole-Pit-Becken) bis ins Paläogen an. Das Intervall maximaler Kompression liegt in den meisten Gebieten zwischen spätem Turon und Campan (Kley & Voigt 2008; Kley 2018).

Aufgrund von Salztekonik und regionaler Hebung ist der genaue Zeitpunkt des Endes der Kompression vielerorts nicht vollständig geklärt (Voigt et al. 2008; 2021). Im Bereich des Harzes und seines nördlichen Vorlands ist aufgrund sedimentologischer und stratigraphischer Gesichtspunkte von einem Ende der Inversion im Obercampan auszugehen. Im Paläogen stellte sich im mitteleuropäischen Raum zum Teil erneut ein dehnungsbetontes Spannungsfeld ein, wodurch sich Strukturen wie der Oberrheingraben, der Egergraben oder die Hessische Senke entwickelten bzw. akzentuiert wurden. Der Extension standen N-S gerichtete kompressive Einflüsse gegenüber, die ab dem Neogen zur

wiederholten Reaktivierung von Störungssystemen wie der Harznordrandstörung führten und bis heute anhalten (Rappsilber 2003; Borg et al. 2012).

In der Region um das Untersuchungsgebiet entstand durch die tektonischen Entwicklungen der Oberkreide und des Tertiärs und der damit verbundenen Reaktivierung älterer, teils permokarbonischer, NW-SE und NE-SW verlaufender Störungen ein Mosaik an Bruchschollen, von denen einige, wie der Hornburger und der Merseburger Sattel, die Hermundurische Scholle oder der Hallesche Vulkanitkomplex, als Pultschollen entlang von Störungen herausgehoben wurden. Die Mächtigkeit der permischen Evaporite im Untergrund beeinflusste den Grad der Deformation in den hangenden Schichten. Wo besonders mächtige salinare Abfolgen anzutreffen sind, wurde die Kompression durch Halokinese ausgeglichen und somit die Auswirkungen der Kompression auf die jüngeren Gesteinspakete im Hangenden reduziert (Jagsch 1977; Rappsilber 2003; Radzinski et al. 2008).

Aufgrund der tektonischen Vorgänge unterlag das südöstliche Harzvorland während des Juras und der Kreide teils intensiver Erosion, sodass in der näheren Umgebung des Untersuchungsgebietes erst ab dem Paläogen wieder kleinräumige Sedimentvorkommen belegt sind (Blumenstengel & Krutzsch 2008). Sie sind beispielsweise um Eisleben-Helfta oder um das Örtchen Gonna zu finden. Wesentlich häufiger treten eozäne sowie oligozäne Sedimente auf. Sie sind unter anderem im Geiseltal, in der Querfurter Mulde, im Süden und Osten des Kyffhäusers sowie im Raum Merseburg aufgeschlossen (Radzinski et al. 2008). Glazigene Sedimentite des Pleistozäns sind im Vergleich zu den kleinen miozänen und pliozänen Sedimentvorkommen deutlich weiterverbreitet (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2023).

Kenntnisstand zum Untersuchungsgebiet

Stratigraphische Abfolge

Die Stratigraphie im Gebiet der Sangerhäuser Mulde ist durch die bergbaulichen Tätigkeiten und die daraus hervorgehenden untertägigen Aufschlüsse seit langem außerordentlich gut dokumentiert (u.a. Jankowski & Remus 1963). Es treten Gesteinsformationen des Paläozoikums und des Mesozoikums auf, die manchenorts durch känozoische Ablagerungen überlagert werden (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2023).

Die ältesten aufgeschlossenen Gesteine entstammen dem Oberkarbon. Es sind Konglomerate und Sandsteine der Mansfeld-Subgruppe (Schneider et al. 2005; Ehling et al. 2019). Im Hangenden schließt sich diskordant das sogenannte Porphyrkonglomerat an, das die Basis der Eisleben-Formation bildet und seinerseits im Hangenden durch die sandig-schluffigen „Sandsteinschiefer“ überlagert wird, denen wiederum die Sandsteine des Weißliegend folgen (Rappsilber 2003; Ehling & Gebhardt 2012; Ehling et

al. 2019). Der etwa 40 Ma währende Zeitraum zwischen der Ablagerung der Mansfeld-Subgruppe und der einsetzenden Sedimentation des Porphyrkonglomerats war innerhalb des sich entwickelnden Saale-Beckens von Exhumation sowie der Erosion des variszischen Orogens geprägt.

Inwiefern das Weißliegend dem Rotliegend oder aber dem Zechstein zuzuordnen ist, wurde in der Vergangenheit viel diskutiert. Dies könnte auch der Grund dafür sein, dass Ehling et al. (2019) die Gesteine des Weißliegend im Normalprofil des Röhrigschachtes als basale Einheit des Zechsteins einstufen. Da diese Einordnung den 2005 durch die Subkommission für Perm-Trias-Stratigraphie der Deutschen Stratigraphischen Kommission getroffenen Beschlüssen (Paul et al. 2020) sowie Ehling & Gebhardt (2012) widerspricht, ist hier das Einsetzen des Zechsteins durch das Auftreten des Kupferschiefers definiert.

Entsprechend regionaler bergmännischer Gebräuchlichkeit wird der Kupferschiefer im Sangerhäuser wie auch im Mansfelder Revier vom Liegenden ins Hangende in die fünf Einheiten - Feine Lette, Grobe Lette, Kammschale, Schieferkopf und Schwarze Berge - gegliedert (Abb. 4, Freiesleben 1815; Jankowski & Remus 1963; Paul 2006). Zwischen Feiner und Grober Lette liegt die sogenannte Hiekennaht. Grobe Lette und Kammschale werden durch die „Untere Kammschalennaht“ getrennt. Die „Obere Kammschalennaht“ bildet die Obergrenze der Kammschale hin zum hangenden Schieferkopf (Jankowski & Remus 1963). Im Hangenden des Kupferschieferflözes folgt eine Reihe von Karbonaten und Evaporiten der Werra-Formation, deren unterster Teil bergmännisch als Dachklotz oder auch Dachberge bezeichnet wird (Jankowski & Remus 1963). Auf diesen ersten Zyklus des Zechsteins folgen im Normalprofil der Sangerhäuser Mulde mit den Sedimenten der Staßfurt-, Leine und Aller-Formationen Vertreter dreier weiterer Salinarzyklen. Jedoch sind sowohl von der Aller-, als auch von der Leine-Formation in vielen Fällen lediglich Auslaugungsreste vorhanden (Jankowski & Remus 1963; Paul 2006).

Mächtigkeit und Auftreten der einzelnen Schichten innerhalb der Sangerhäuser Mulde unterliegen lateralen Schwankungen. Dies zeigt sich unter anderem in den Karbonaten der Werra-Formation, deren Mächtigkeiten einen eher abnehmenden Trend von N nach S aufweisen. Die Gesteine der Staßfurt-Formation sind nicht überall in gleicher Ausbildung vertreten. Die jüngsten Abschnitte der Formation treten im S und SE der Sangerhäuser Mulde in Form des Kaliflözes Staßfurt auf, wohingegen bei Fehlen des Kaliflözes das Sangerhausen-Sulfat abgelagert wurde. Eine ähnliche Konzentration des Auftretens auf den südlichen und südöstlichen Teil der Sangerhäuser Mulde zeigt sich bei den Gesteinen der Aller- und der Leine-Formation, von denen lediglich der Untere Leine-Tonstein sowie das Leine-Sulfat flächenhaft verbreitet sind. Das Hangende der permokarbonischen Gesteinsserien wird durch Sedimente des unteren und mittleren Buntsandsteins gebildet, die manchenorts durch

tertiäre und quartäre Sedimente überdeckt sind, wobei das Auftreten quartärer Ablagerungen auf Täler und Niederungen beschränkt ist (Jankowski & Remus 1963).



Abb. 4: Normalprofil des Kupferschiefers innerhalb der Zechsteinfohle im Röhrigschacht. (1) Weißliegend; (2) Hornbank; (3) Kupferschieferflöz ungegliedert, vergleiche Text; (4) Werra-Karbonat.

Tektonik

Der heutige Wissensstand der tektonischen Verhältnisse in der Umgebung von Wettelrode fußt neben Kampagnen der geologischen Landesaufnahme zu einem großen Teil auf Befunden, die der Jahrhunderte währende Bergbau in der Region erbracht hat. Geipel (1919) beobachtete bereits, dass bergmännisch als Rücken bezeichnete Anreicherungen von Erzen in der Nachbarschaft von Verwerfungsspalten auftreten. Somit war es neben den Aspekten der Grubensicherheit auch in Bezug auf die Erzgewinnung von übergeordnetem bergmännischem Interesse, Störungen zu kartieren und in Risswerken sowie geologischen Karten zu verzeichnen.

In Abb. 5 ist ein bergmännischer Riss aus dem Jahr 1962 dargestellt. Er zeigt die Grubenbaue um den Röhrigschacht in Wettelrode sowie zum Teil auch benachbarte Grubenareale. Es sind vier etwa NW-

an Metallen wie Cu, Ag, Zn oder Pb und sulfidischen Erzen wie Chalkosin, Chalkopyrit oder Galenit (Stedingk 2002; Symons et al. 2011; Walther & Borg 2016; Borg 2017; Spieth 2019; Paul 2020b).

Dabei ist die Vererzung nicht auf die lithostratigraphische Einheit des Kupferschiefers beschränkt, sondern kann zum Teil bis ins Hangende Werra-Karbonat, selten bis in den Werra-Anhydrit sowie bis in eine Tiefe von ca. 65 m unterhalb des Kupferschieferflözes auf die Sandsteine und Konglomerate des Weiß- und Grauliegendes übergreifen (Borg 2017; Paul 2012b). Zudem können Vererzungen entlang von Klüften, Adern und Störungen auftreten, die zumeist von den liegenden Schichten des Weiß- und Grauliegend bis ins hangende Werra-Karbonat verlaufen (Borg et al. 2012; Walther & Borg 2016). Derartige störungsgebundene Vererzungen sind insbesondere für die Reviere Mansfeld und Sangerhausen charakteristisch, wo sie bergmännisch als Rücken bezeichnet werden (Geipel 1919; Borg et al. 2012).

Im Nachgang einer ersten diagenetischen Mineralisierung vor etwa 254 ± 6 Ma (Jowett et al. 1987; Symons et al. 2011; Oszczepalski et al. 2019) fanden zwischen der späten Trias und dem frühen Eozän weitere spät- bis epigenetische Mineralisierungsereignisse (217-190 Ma) statt (Bechtel et al. 1999; Mikulski & Stein 2017). Die Ursache für die Fluidbewegungen kann dabei in der Kompaktion der permischen Beckenfüllung sowie in der Extensionstektonik und der dadurch hervorgerufenen Ausbildung von Wegbarkeiten in Form von Brüchen und Störungen liegen (Oszczepalski et al. 2019). Spieth (2019) leitet die mineralisierenden Lösungen aus ultramafischen Quellgebieten des tieferen Basements ab, die an kontinentalen failed-rift-Störungszonen aufsteigen. Zudem verbindet er das Mineralisationssystem mit Injektionen von Sandmaterial aus dem Liegenden. Weißliegend-Schichten werden auch als äolische Ablagerungen interpretiert (Blundell et al. 2003).

Paläomagnetische Analysen an Gesteinsproben aus dem Röhrigschacht in Wettelrode weisen darauf hin, dass es wohl mindestens zwei epigenetische Mineralisierungsereignisse gab. Zum einen im oberen Jura, vor 149 ± 3 Ma, und zum anderen im frühen Eozän, vor 53 ± 3 Ma (Symons et al. 2011). Es ist anzunehmen, dass auch diese beiden Mineralisierungsereignisse mit den regionalen tektonischen Entwicklungen in Zusammenhang zu bringen sind, die im späten Jura als auch im Eozän von Extension geprägt waren.

Beobachtungen Untertage

Lithologien und Sedimentstrukturen

Im Röhrigschacht sind Einheiten des Karbons, des Perms und der Trias aufgeschlossen. Karbonische Einheiten werden auf dem Querschlag zur 1. Tiefbausohle angeschnitten. In den untersuchten Grubenteilen ist die Stratigraphie durch den Ausbau der Strecken auf Gesteine des Perms und der Trias begrenzt.

Aufgrund der vergleichsweise ungestörten Aufschlussverhältnisse wurde am Ende des Querschlags zur 1. Tiefbausohle das Normalprofil aufgenommen (Abb. 4). In Abb. 6 ist die Verteilung der Aufschlusspunkte dargestellt.

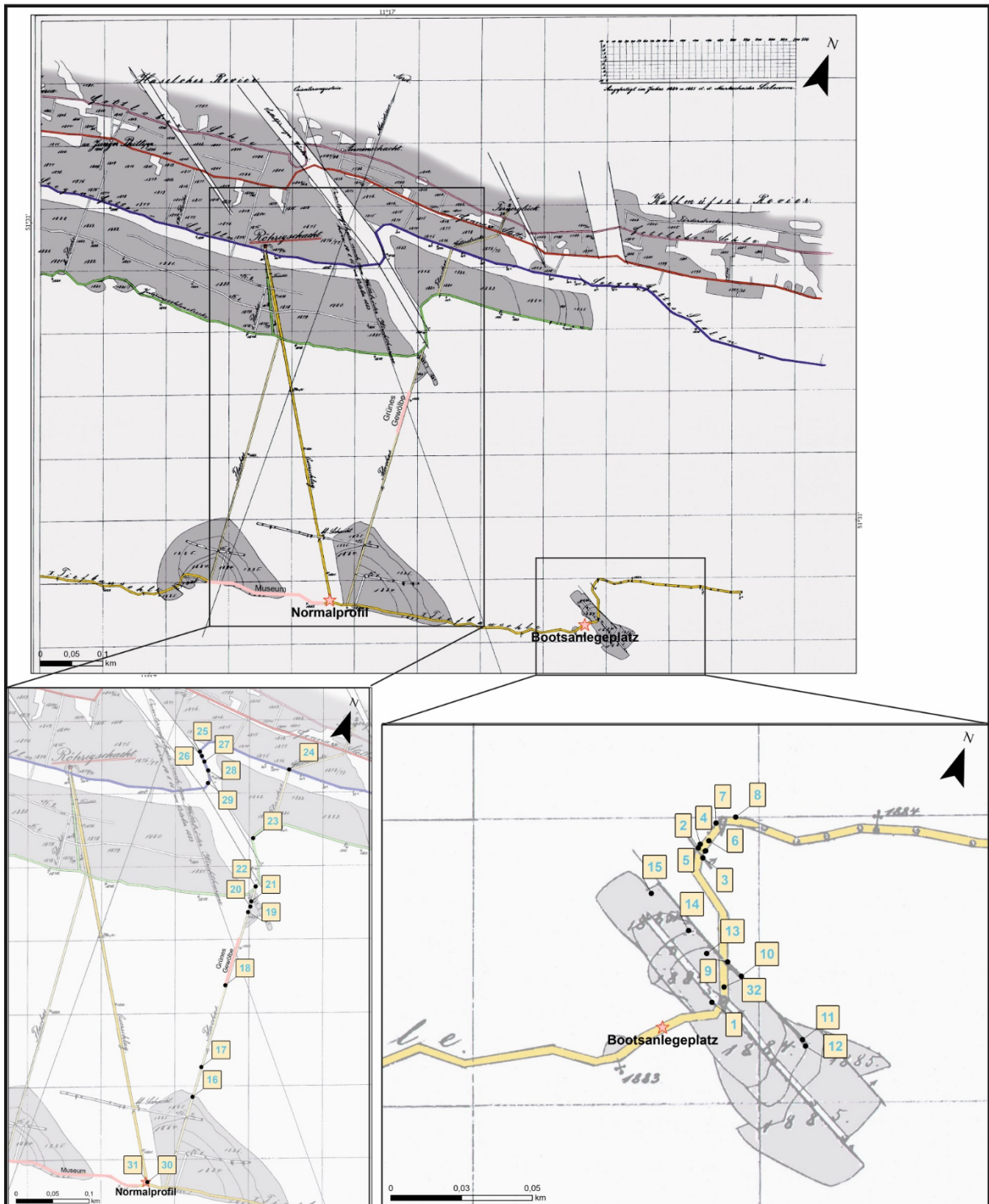


Abb. 6: Grubenriss Röhrigschacht (Liebenam 1885) mit Detailausschnitten und Aufschlusspunkten im Segen Gottes Stollen, im östlichen Wetterflachen (Grünes Gewölbe) sowie in der Tiefbausohle.

Im Liegenden setzt die Schichtfolge mit einem rötlichen, polymikten, mittelmäßig bis schlecht sortierten Konglomerat ein, dessen zumeist gut gerundete, teils angerundete Komponenten einen Durchmesser von 1 cm nicht übersteigen (Tafel 1a). In einigen Grubenteilen auf der 1. Tiefbausoehle sind hingegen vorwiegend mittelkiesige Komponenten zu beobachten. Kristalline Bestandteile, Milchquarz und Rhyolith liegen als Lithoklasten in einer unsortierten, sandigen Grundmasse aus Quarz und etwas Feldspat vor. Verzahnt sind feinkörnigere, gräuliche Ton-, Silt- und Feinsandlagen eingeschaltet, die erosiv auf die unterlagernden Schichten übergreifen können. Eine trogförmige Schrägschichtung ist in den Sandsteinlagen angedeutet. Insgesamt weist der Profilabschnitt eine Vergrößerung der Kornfraktion zum Top auf. Diese Einheit entspricht dem Porphyrkonglomerat.

In den folgenden 80 cm schließen sich rötliche, braune bis graubraune, unsortierte bis in Lagen sortierte Fein- bis Grobsandsteine an (Tafel 1b, c), die ebenso eine Kornvergrößerung nach oben aufweisen. Rinnen sind vorhanden und intraformationelle Gerölle eingestreut. Im Hangenden folgt eine 6-8 cm messende Einheit hell- bis graubrauner Ton- und Schluffsteine mit gröberen Einschaltungen, in denen zudem graue, asymmetrisch geformte Tonfasern und Injektionsstrukturen auftreten. Zudem ist planare Schrägschichtung vorhanden. Hinweise auf die Bildung in einem stillen, flachen Gewässer (Ehling et al. 2019) sind, abgesehen von der geringen Korngröße, durch die Injektionsstrukturen gegeben, die einen schwankenden Salzgehalt anzeigen können (Miall 2022).

Überlagernd befindet sich eine 80 cm mächtige Folge grauer, auch hellbrauner Feinsandsteine mit lagenweise eingeschalteten Grobsandsteinen. Die Einordnung der hauptsächlich feinsandigen Schicht (Abb. 4) in die lithostratigraphische Einheit des Weißliegend basiert auf der beobachteten Korngröße und deren guter Sortierung, die der Literatur entnommenen Beschreibungen entspricht (Paul 2006). Die Hangendgrenze dieser Einheit wird von einer 1 cm dicken Lage brauner bis dunkelbrauner Dolomite und Mergel gebildet, welches vermutlich der sogenannten Hornbank entspricht (Abb. 4). Sie liefert aufgrund der lithologischen Zusammensetzung erste Anzeichen mariner Einflüsse.

Darüber folgen stark C_{org} -haltige, stellenweise fein laminierte Tonsteine und tonige Mergel (Abb. 4). Vor allem die unteren Anteile sind von teils intensiver schwarzer Farbe. Im Hangenden ist ein Übergang ins Graue zu beobachten. Per definitionem ist das Einsetzen des Zechsteins mit der Liegendgrenze des Kupferschiefers (oder seines Äquivalents) verknüpft (Paul 2020b; 2020c). Im Normalprofil, wie auch in vielen anderen Teilen des Bergwerks ist dieser Übergang durch einen Farbwechsel von Grau zu Schwarz deutlich erkennbar. Die bergmännische Gliederung des Kupferschiefers in die Einheiten Feine Lette, Grobe Lette, Kammschale, Schieferkopf und Schwarze Berge beruht auf feinen lithologischen und farblichen Unterschieden, die auf wechselnde Gehalte an Ton und Karbonat zurückzuführen sind. Sie ist nur ansatzweise im Normalprofil durchzuführen.

Im Hangenden wird das Profil durch ein graues, mikritisches, teils gebanktes Karbonat abgeschlossen (Abb. 4). Die Bankdicken betragen einige Zentimeter bis Dezimeter. In den untersuchten untertägigen Aufschlüssen endet das Normalprofil mit dem Werra-Karbonat.

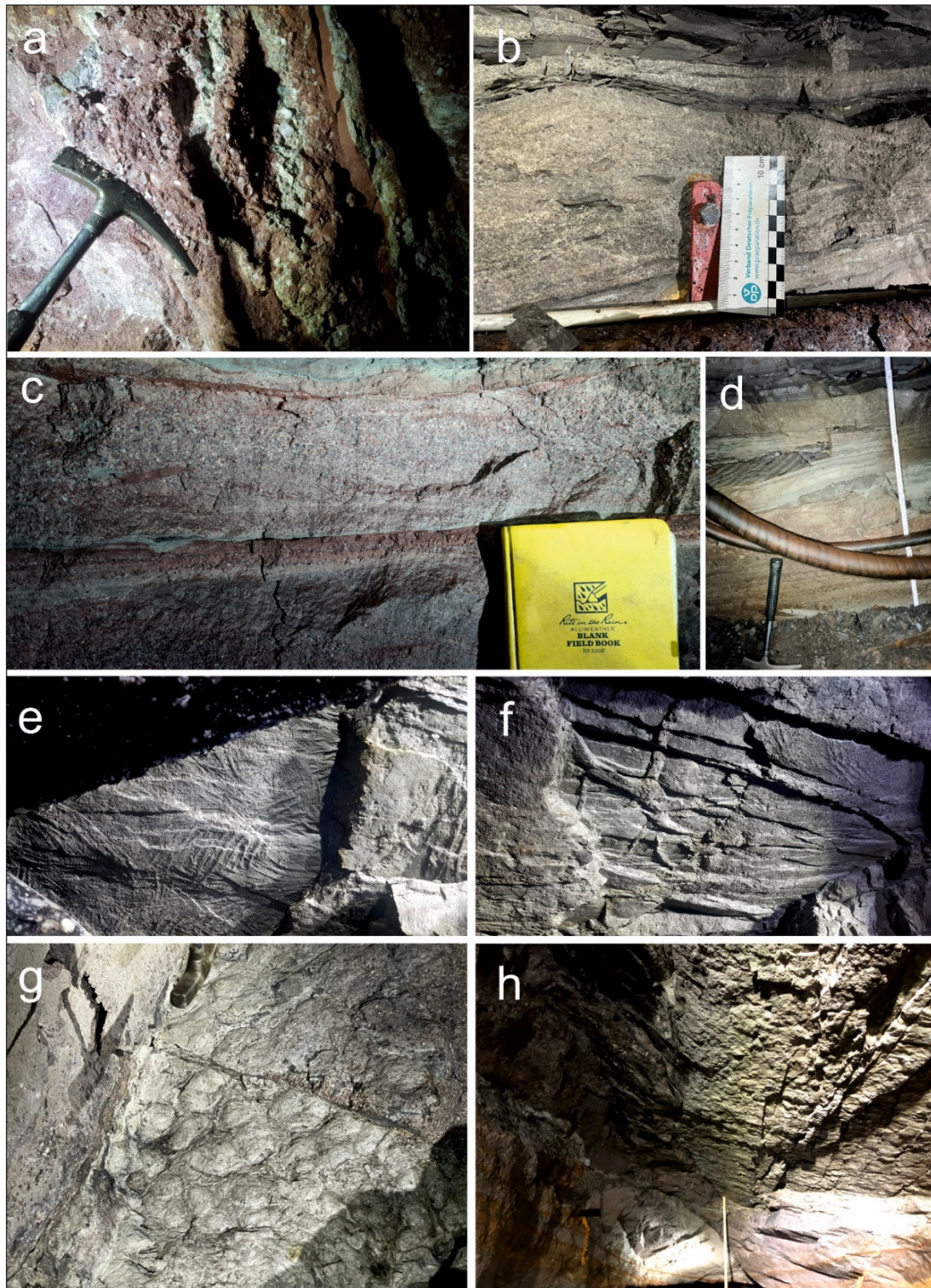
Auf dem Niveau der 1. Tiefbausohle konnten einige Sedimentstrukturen beobachtet werden, die als Negative an den Firsten erhalten sind (Tafel 1d-h). Das Vorkommen der beobachteten Marken ist auf das Liegende des Kupferschiefers beschränkt.

1. Wellenrippeln sind auf den Sandsteinschichten überliefert (Tafel 1d).
2. Rillenfüllungen sind öfter einander parallel angeordnet. Sie kommen gerade als auch gebogen vor. Einige Male ist ein gemeinsamer Ursprung und ein Auffächern zu erkennen (Tafel 1e). Ihre Genese ist nicht abschließend geklärt. Bioturbation wäre eventuell möglich.
3. Trockenrisse sind in Form typischer Netzleisten zu beobachten. Sie treten zum einen in Kombination mit den Rillenstrukturen auf, zum anderen auch isoliert (Tafel 1f). Sie weisen ein episodisches Trockenfallen des fluviatil-alluvial geprägten Ablagerungsraumes nach.
4. Belastungsmarken sind als rundliche, wulstige, dicht an dicht gelagerte oder unregelmäßig auf der Fläche verteilte Reliefausfüllungen erhalten (Tafel 1g).
5. Strömungsmarken sind längliche, asymmetrische Formen, die eine Vorzugsrichtung andeuten (Tafel 1h). Sie sind nicht immer klar umrissen. Sie treten für gewöhnlich an der Unterseite von Sandsteinen auf und zeugen von strömungsbedingter Erosion auf der Oberfläche des unterlagernden Sediments.

Tektonik

Zur Untersuchung der untertägigen tektonischen Situation wurden im östlichen Teil der 1. Tiefbausohle sowie im Bereich des östlichen Wetterflachens, einem Teil der Interimssohle und des Segen-Gottes-Stollens tektonische Messwerte von Schicht- und Störungsflächen, Lineationen sowie zwei Faltenachsen aufgenommen (Abb. 6). In den Abb. 7 bis 11 sind die tektonischen Messwerte in Bezug zu ihrer Lage im Bergwerk dargestellt. Alle Messwerte sind im Anhang aufgelistet.

In den untersuchten Bergwerksbereichen wurden Gesteinseinheiten in ungestörter, wie auch in gestörter Lagerung angetroffen. Im Normalprofil am Ende des Querschlags zur 1. Tiefbausohle fallen die Schichten mit einem Winkel von durchschnittlich 10° in Richtung SSE ein.



Tafel 1: Lithologien und Sedimentstrukturen der Tiefbausohle. (a) Konglomerat mit mittelkiesigen Komponenten; (b) schräggeschichtete grobkörnige Sandsteine mit intraformationellen Geröllen; (c) Schrägschichtung und Rinnenstrukturen in einer coarsening upward Sequenz im Weißliegend; (d) Rippelmarken auf einer Schichtfläche im Weißliegend; (e) einander parallele und teilweise gebogene Rillenfüllungen unbekannter Genese (Bildbreite 1,50 m); (f) unregelmäßig begrenzte Trockenrisse und Rillenfüllungen (Bildbreite ca. 1,50 m); (g) Wulstige Belastungsmarken (load casts); (h) spitz zulaufende, längliche Strömungsmarken oberhalb des Gliedermaßstabs, der hier 60 cm lang ist.



Abb. 7: Messwerte der Schichtflächen im Bereich des Röhrgeschachtes und Umgebung und einer Faltenachse nördlich des Grünen Gewölbes.

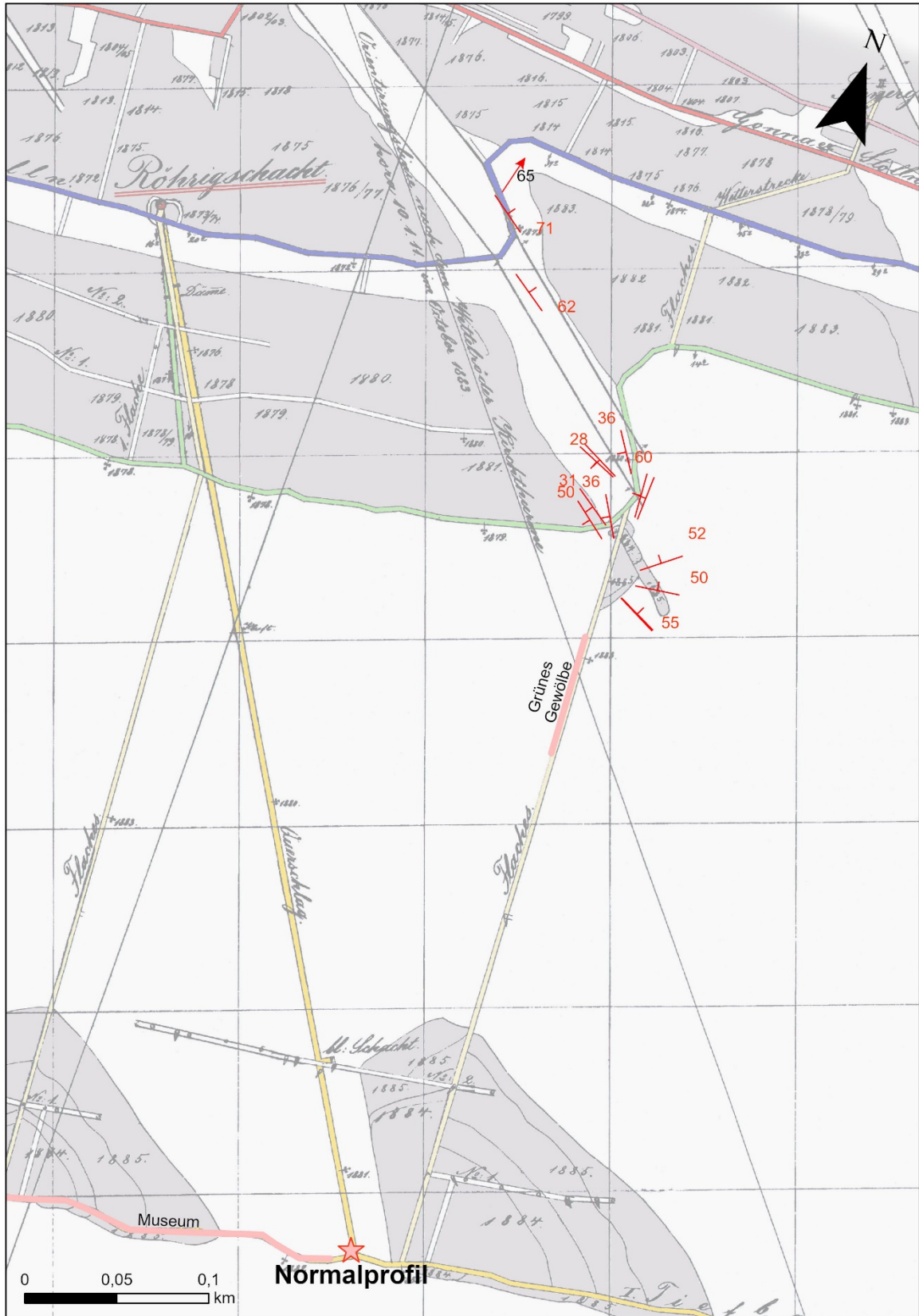


Abb. 8: Messwerte der Störungsflächen im Bereich des Röhrichtschachtes und Umgebung und ein Linear im Segen Gottes Stollen.

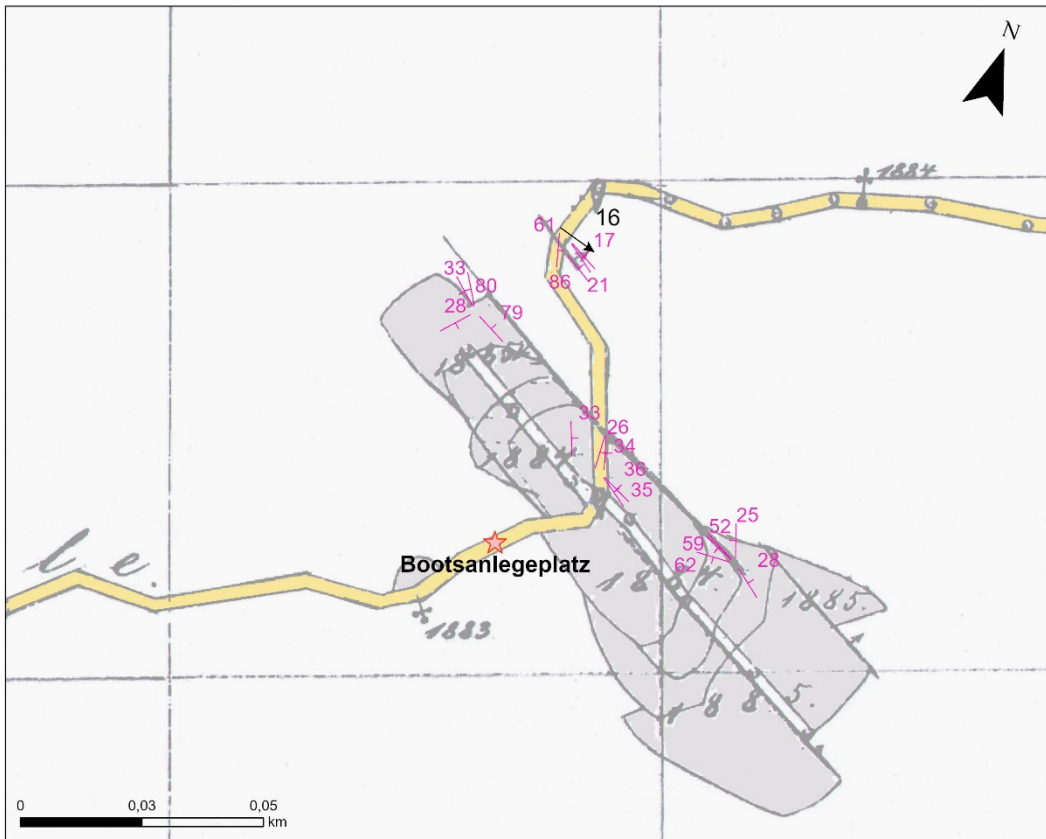


Abb. 9: Messwerte von Schichtflächen und einer Faltnachse (schwarz) im Bereich der Tiefbausohle.

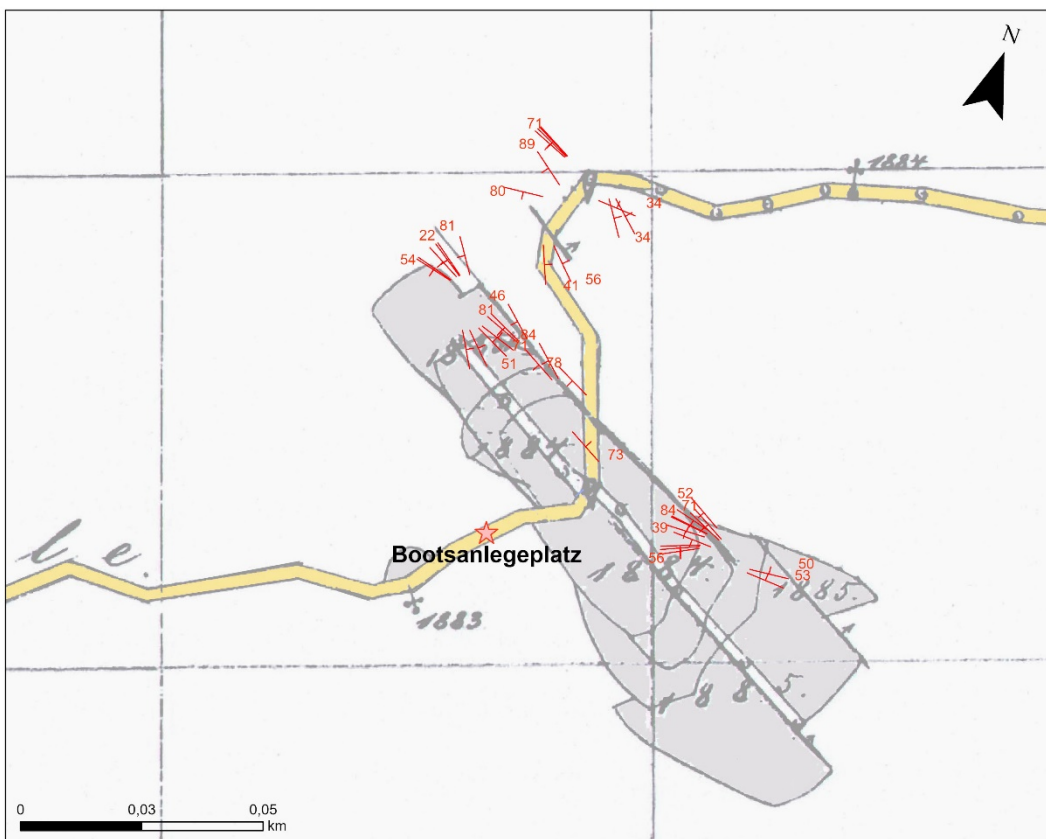


Abb. 10: Messwerte von Störungsflächen im Bereich der Tiefbausohle.

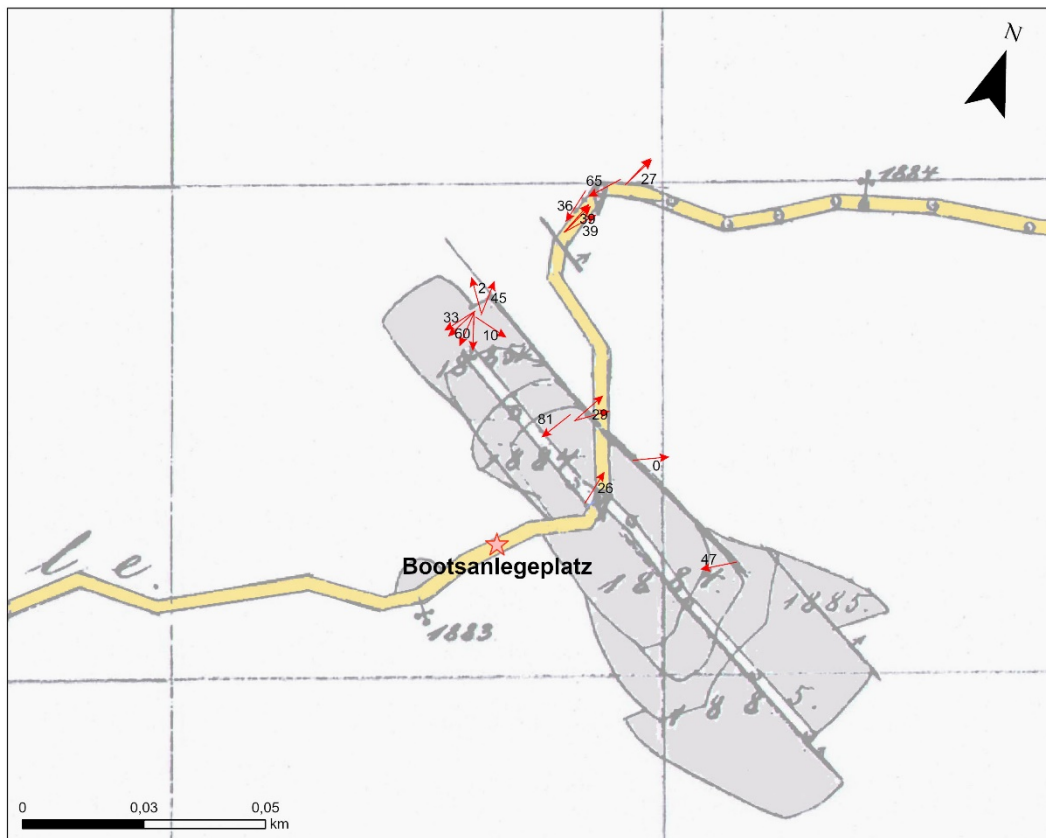


Abb. 11: Messwerte von Bewegungslinearen im Bereich der Tiefbausoehle mit Hauptrichtungen in NE und SW.

Lineare wurden ausschließlich auf Schichtoberflächen des intensiv gestörten Kupferschieferflözes aufgenommen. Sie zeigen variable Einfallswerte mit Richtungsmaxima gen NE und SW (Abb. 11).

Die stereographische Projektion aller aufgenommenen Schichtflächen im Störungszonenbereich (Abb. 12) zeigt eine Teilgürtelverteilung. Die erhöhte Punktdichte im 3. Quadranten weist auf ein bevorzugtes Einfallen der eingemessenen Flächen in nordöstliche Richtung hin. Die Einfallswinkel liegen dabei zwischen 30° und 60° . Neben diesem Maximum existiert eine zweite Konzentration an Polpunkten von Flächen mit Winkeln von 7° - 40° in Richtung S bis SE.

Störungsflächen können sowohl flach als auch steil einfallen, so dass eine bimodale Verteilung sichtbar wird (Abb. 13). Der Großteil der Flächen fällt mit einem Winkel zwischen 50° - 80° in Richtung S bis SSW ein. Allerdings gibt es auch flacher einfallende Systeme. Ein zweites Cluster zeigt eine Flächenorientierung mit Winkeln von meist 50° , in seltenen Fällen bis 75° gen NE. In Teilen verlaufen die Störungen parallel zur Schichtung. Sie können sogar saiger bis überkippt ausgebildet sein.

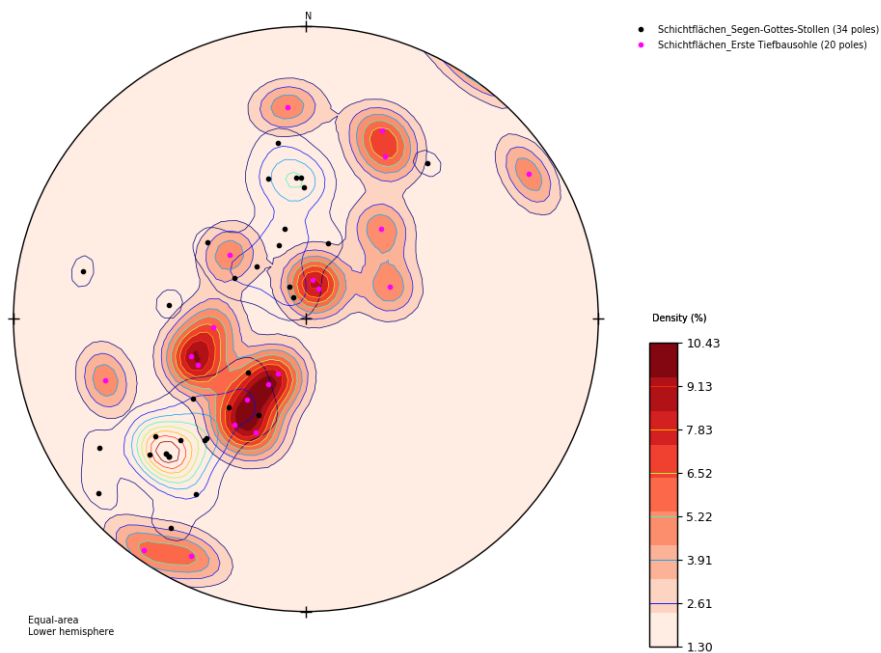


Abb. 12: Stereonetz (Grohmann et al. 2017: openstereo) der Schichtflächen im Bereich des Segen-Gottes-Stollens (schwarze Punkte, n=34) und der Tiefbausoehle (pinke Punkte, n=20).

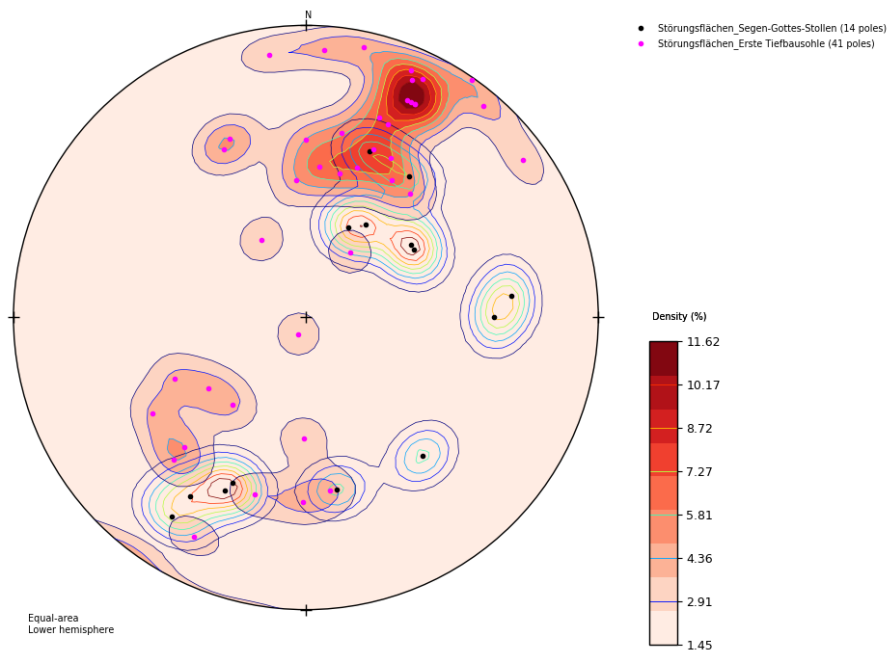


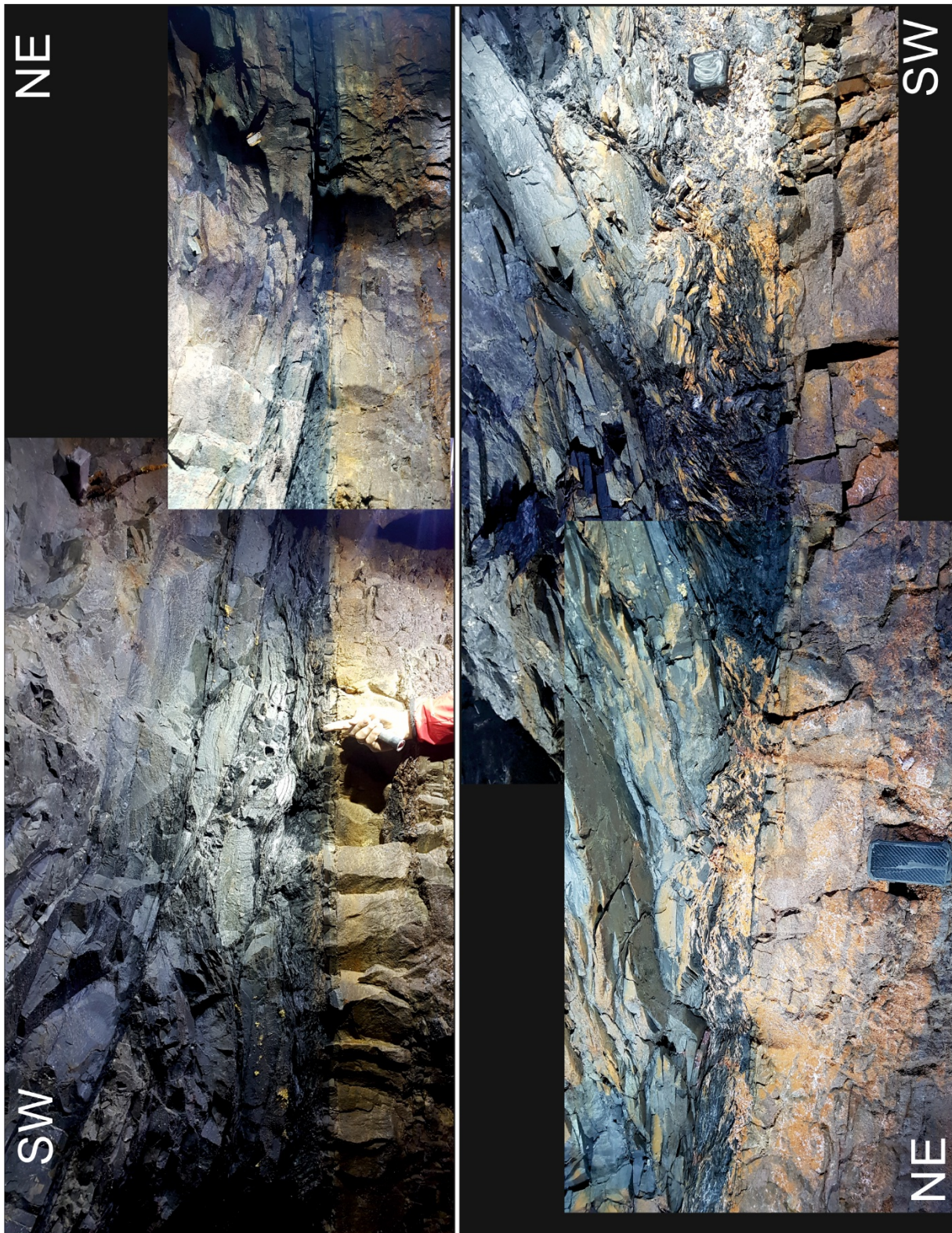
Abb. 13: Stereonetz (Grohmann et al. 2017: openstereo) mit der Darstellung der Störungsflächen im Bereich des Segen-Gottes-Stollens (schwarze Punkte, n=14) und der Tiefbausoehle (pinke Punkte, n=41).

Im Folgenden werden die variablen Lagerungsbeziehungen der Einheiten des Normalprofils in vertikaler und horizontaler Erstreckung dargestellt.

Die Tafeln 2 und 3 zeigen Aufschlusspunkt 4 (Abb. 6). Im Nordosten der Tiefbausohle sind die Schichten zunächst in ungestörter Lagerung aufgeschlossen. Verbunden mit einer Mächtigkeitzunahme des Kupferschieferflözes fallen die Schichten sukzessive steiler ein. Die Struktur weist an diesem Aufschluss einen Gleithorizont an der Basis des Kupferschiefers auf. Innerhalb der sich nun entwickelnden Rampengeometrie werden Schichtglieder zu linsenförmigen Körpern gestreckt und ihrerseits überfahren. Betroffen sind sowohl der Kupferschiefer als auch das Werra-Karbonat, wohingegen das Weißliegend an dieser Stelle ungestört gelagert ist.

Etwas weiter südlich, im ehemaligen Rückenabbau des Kupferschieferflözes (Aufschluss 11) tritt das Kupferschieferflöz tektonisch nur Millimeter dick in fünffacher Wiederholung zwischen Weißliegend auf (Abb. 14). Der Transport fand in südwestliche Richtung statt. Die Messung eines Linears auf einer Störungsfläche zeigt mit 237/47 eine NE-SW gerichtete Bewegung. Eine ähnliche Situation findet sich bei Aufschluss 19 (Abb. 6), der sich im Kreuzungsbereich zwischen der Interimssohle und dem östlichen Wetterflachen befindet.

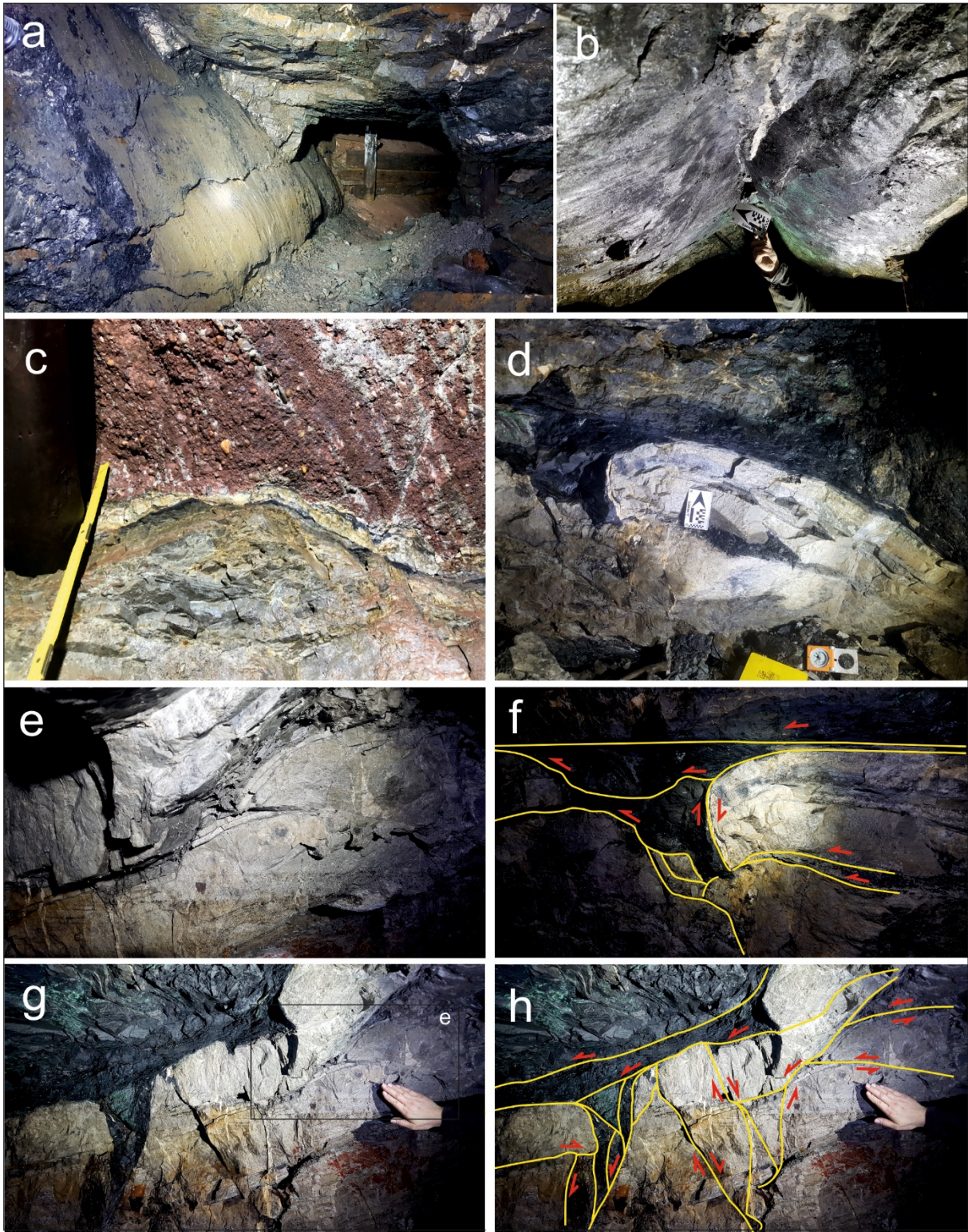
In dem als Aufschluss 13-15 zusammengefassten Grubenteil im nördlichen Bereich des Rückenabbaus auf der 1. Tiefbausohle treten mehrere Strukturen zu Tage (Tafel 4). Es ist eine steil nach SE einfallende Störungsfläche, die von Harnischen bedeckt ist, zu erkennen (Tafel 3a). Die gemessenen Lineare weisen auf eine Bewegung in E-W-Richtung hin. Im weiteren Verlauf ist oberhalb und neben dem Verbau die Schichtlagerung normal. Benachbart, im Bereich der Firste lassen sich zwei weitere, gegeneinander einfallende, gebogene Störungsflächen erkennen, von denen die eine in südwestliche, die andere in nordöstliche Richtung einfällt (Tafel 4b). Neben den Linearen in E-W-Richtung, konnten auf diesen beiden Störungsflächen Harnische gemessen werden, die eine N-S gerichtete Bewegung anzeigen. In einem Blindschacht oberhalb des Verbaus wird die Zechsteinfoolge tektonisch von Rotliegend erneut überlagert (Tafel 4c). Die Weißliegend-Kupferschiefer Suite kann auch eingefaltet als Schleppefalte vorliegen (Tafel 4d). Tektonische flame structures sind in unterschiedlichen Größenordnungen als keilförmige Einschübe ins Liegende zu beobachten (Tafel 4f, g). Diese wiederum können als keilförmige Blindstörung (wedge-shaped blind fold) genetisch interpretiert werden. Sie dokumentieren die gescheiterte Neuanlage von Störungsbahnen. Die flame structures im Untersuchungsgebiet sind zumeist mit Kupferschiefer gefüllt. Lokal können karbonatische Fragmente enthalten sein, die auf Kataklyse hinweisen. Im Detail zeigt sich eine tektonisch bedingte Wechsellagerung von Kupferschiefer und Werrakarbonat. Kompressive und extensive Strukturen können eng benachbart vorliegen und dokumentieren somit eine Rampengeometrie. Im kompressiven Anteil lässt sich diese als Duplex bestimmen.



Tafel 2: Anfang der tektonischen Struktur, vom Normalprofil ausgehend, an Aufschluss 4 in der Tiefbausohle. Schon am Anfang sind die Überschiebungen und Verdickungen des Kupferschieferflözes zu erkennen. Es werden zudem erste Rampen ausgebildet und damit ist das Auftreten von Duplexstrukturen verbunden. Diese sind an einer sich wiederholenden Anlage von Zweigüberschiebungen mit der Ausbildung von Schichtwiederholungen erkennbar.



Tafel 3: In dieser Umzeichnung der Tafel 2 sind Störungen (gelbe Linien) mit Relativbewegungen (rote Pfeile) sowie in Teilen Schichtflächen (schwarze Linien) zur Verdeutlichung der tektonischen Bewegungen dargestellt.



Tafel 4: Tektonische Gegebenheiten I

(a) Steil nach SW einfallendes Kupferschieferflöz. Rechts unten im Bild ist die Normallage des Flözes (abgebaut) zu sehen (Aufschluss 13, Abb. 6); (b) Zwei Störungsflächen, im Winkel von 90° zueinander positioniert (vergl. Text, Aufschluss 13, Abb. 6); (c) Rotliegend-Konglomerat im Hangend-Block über Zechsteinkarbonat. Die zwischengelagerte Störungszone wird von Kupferschiefer begleitet (Aufschluss 13, Abb. 6); (d) Überkippte Falte aus Dolomit. Im Scheitelbereich ist der Kupferschiefer deutlich verdickt. Im Hangenden ist die Grenzfläche zwischen Dolomit und Kupferschiefer wiederum eine

Störungsbahn. Die Umzeichnung mit Störungsbahnen (gelb) und Relativbewegungen (rote Pfeile) zu dieser Abb. findet sich in (f). Bitte beachten: der Bildwinkel und die Belichtung in der Umzeichnung sind verändert (Aufschluss 14, Abb. 6); (e) Detailaufnahme von Überschiebungs- und Abschiebungsstrukturen auf engstem Raum. Dies sind typische Phänomene einer Rampengeometrie (Aufschluss 15, Abb. 6); (g) Übersichtsaufnahme des Aufschlusses 15. Hier zeigen sich die komplexen tektonischen Strukturen innerhalb der Rampengeometrie. In der linken Bildhälfte ist eine sogenannte keilförmige Blindstörung (wedge-shaped blind fold) zu erkennen, welche durch den ebenso keilförmigen Ausbiss des Kupferschiefers deutlich wird. Alternativ ist dies auch als tektonisch entstandene flame structure zu interpretieren; (h) Umzeichnung von (g) mit Störungsbahnen und Relativbewegungen zur Verdeutlichung der strukturellen Komplexität auf engem Raum.

Besonders charakteristisch sind Duplexstrukturen an der Wiederholung von Schichtfolgen zu erkennen. Das Kupferschieferflöz, als singulärer Leithorizont prominent erkennbar, reagiert im Untersuchungsgebiet häufig mit tektonisch induzierter Ausdünnung und/oder Verdopplung an gebogenen Störungsflächen. Es resultieren linsenförmige Anschnitte. Die Wiederholungen des Kupferschieferflözes sind daher Anzeiger der komplexen strukturellen Prägung (Abb. 14, 15, Tafel 5).

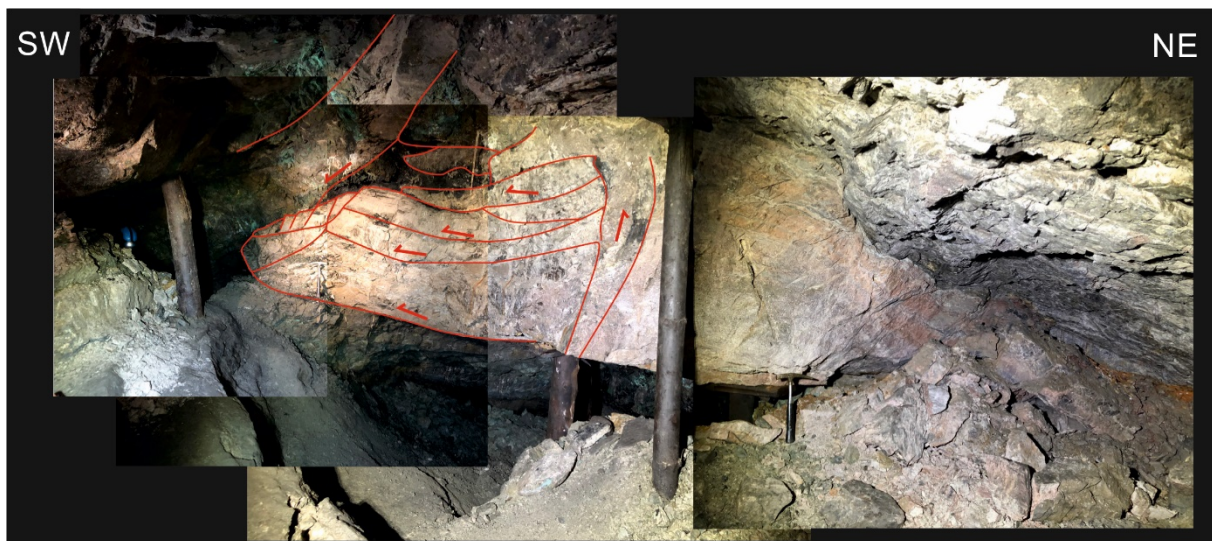
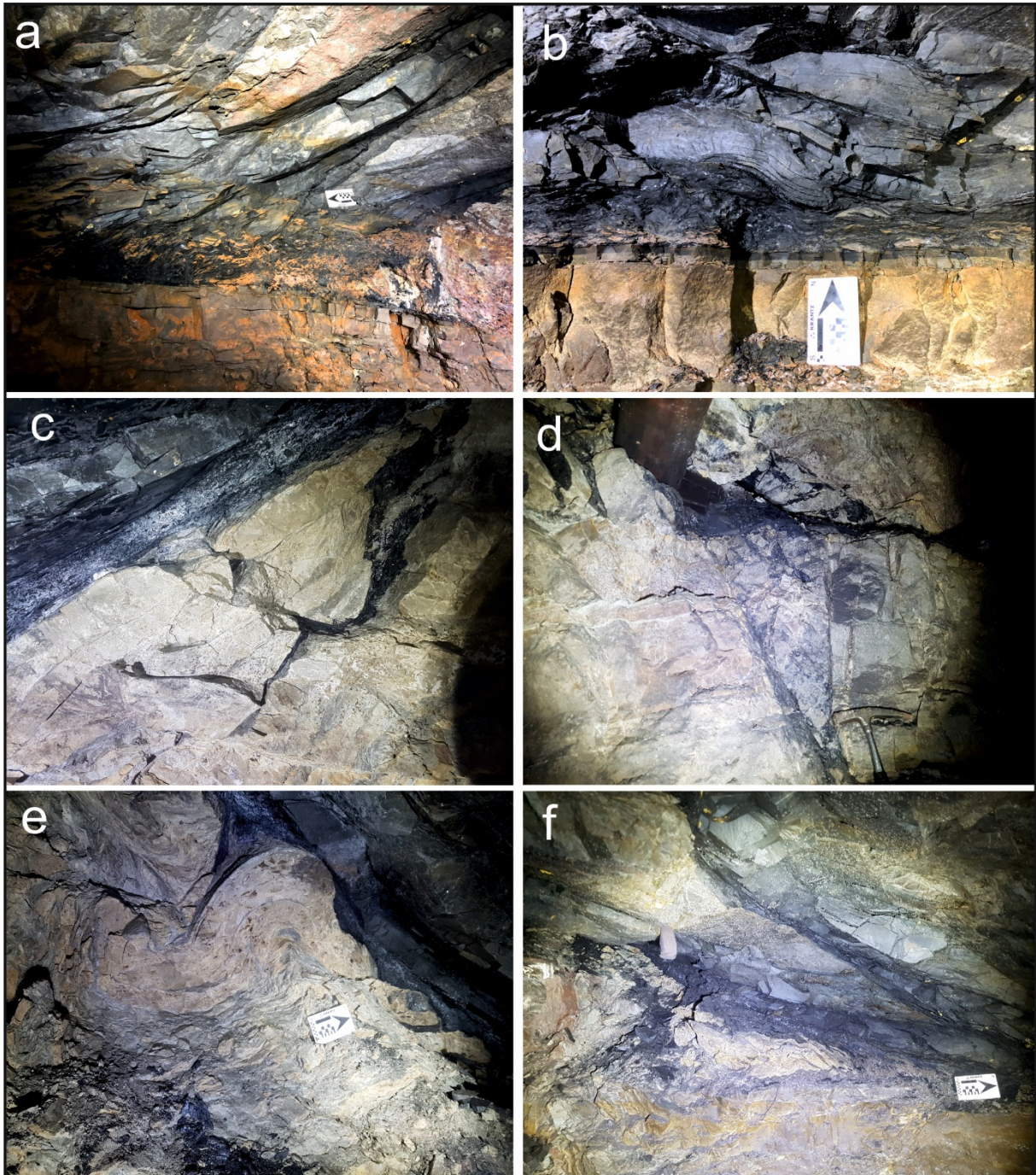


Abb. 14: Aufschlussituation am Punkt 11 (Abb. 6). Im unteren sowie oberen Bildausschnitt zeigen sich deutlich verdickte Kupferschieferflöze (bis 60 cm). Im Bereich dazwischen (rote Linien) werden die Flöze auf Mächtigkeiten von wenigen bis einen Millimeter reduziert.

Im Streichen der Duplexstrukturen ergeben sich linsenförmige Körper, die von Störungsbahnen umgrenzt sind (Abb. 16). Diese Körper lassen den Schluss zu, dass zusätzlich zur einfachen frontalen Rampengeometrie weitere laterale und oblique Rampengeometrien vorhanden sind. Den Abschluss der Gesamtstruktur des Rückens bilden Blindüberschiebungen (Abb. 17, 18, Tafel 4a). Im weiteren Verlauf schließt sich erneut die ungestörte Normalfolge an.



Tafel 5: Tektonische Gegebenheiten II

(a) Situation am Aufschluss 5. Hier wird die auf kurzer Distanz erreichte Versteilung der Störungsbahnen deutlich (Einfallen nach NE); (b) Detailaufnahme aus Tafel 2 mit der einsetzenden Überschiebung und Entstehung einer Rampe mit Ausbildungen von kleinskaligen Duplexstrukturen. Deutlich sichtbar das hier aufgeschlossene unbeanspruchte Liegende; (c-e) Verschiedene Formen und Ausbildungen von tektonischen flame structures. In (e) ist zusätzlich ein stark verfalteter Bereich zu sehen. Dieser steht auch symptomatisch für die vorhandene übergeordnete Großstruktur („Rücken“, fault-propagation-fold); (f) Beginnende „Verzweigung“ des Kupferschieferflözes (Einfallen nach NE). Dies stellt den Beginn einer Duplexstruktur dar.

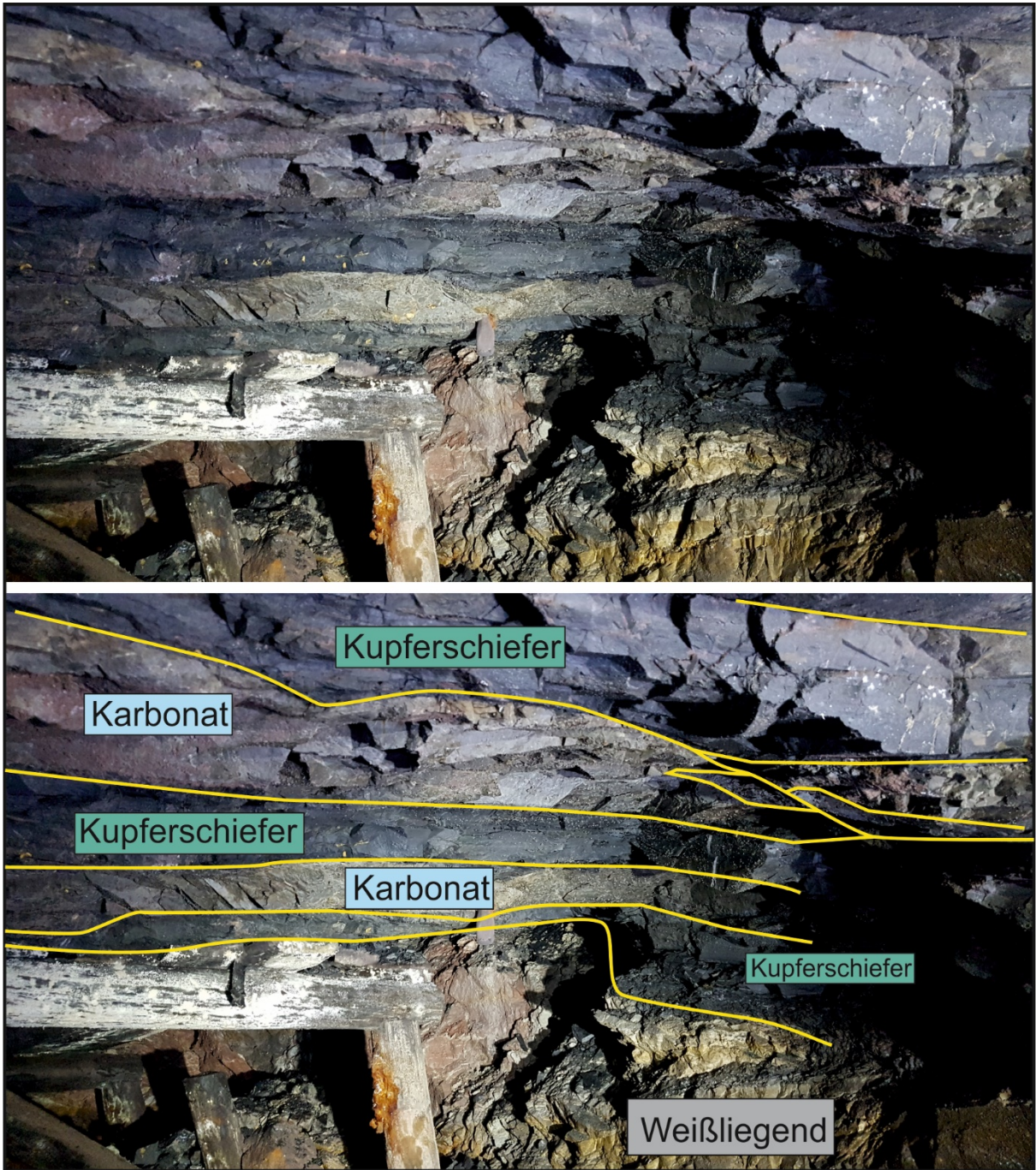


Abb. 15: Das im Normalprofil singuläre Kupferschieferflöz ist durch kompressive tektonische Beanspruchung über kurze Distanz (hier ca. 4 m) verdreifacht (Aufschluss 5, oben Aufschlussbild, unten mit Umzeichnung).

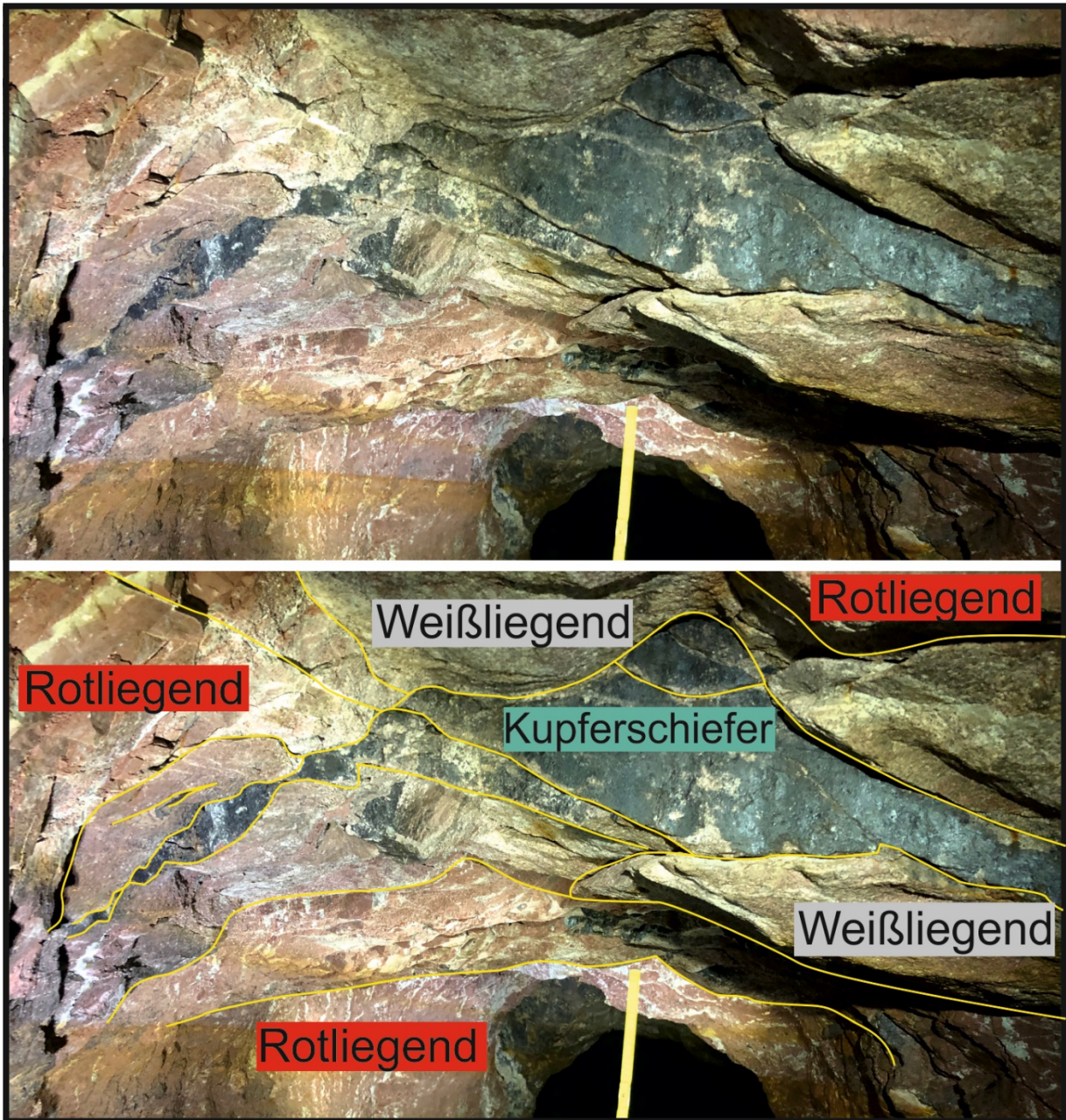


Abb. 16: Im weiteren Verlauf (Aufschluss 9) sind im geologischen Streichen der Strukturen linsenförmige und gestapelte Gesteinskörper zu beobachten (Blickrichtung NE). Dies deutet auf das Vorhandensein von lateralen und schrägen (oblique) Rampengeometrien hin (oben Aufschlussbild, unten mit Umzeichnung).



Abb. 17: Blindüberschiebung am Ende der Rampen- und Duplexstruktur (Aufschluss 1). Die ehemaligen Flöze sind abgebaut und durch den Verbau mit Abraum gut nachzuvollziehen. Im weiteren Verlauf des Stollens in Richtung Westen (Kanu, rechts unten) ist das Normalprofil zu beobachten.

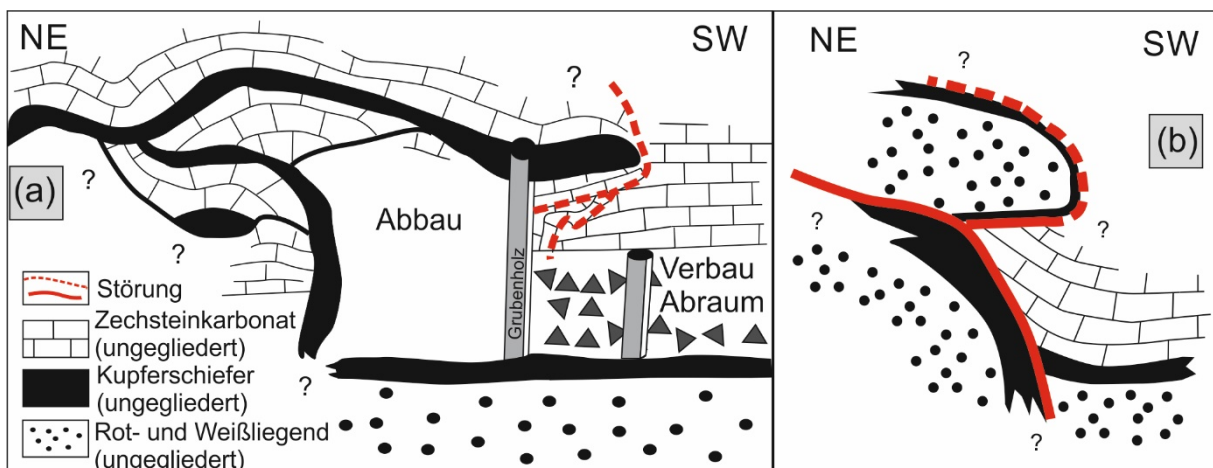


Abb. 18: Schematische und unmaßstäbliche Darstellung des Abschlusses der tektonischen Struktur (Verlauf des Flözes in Teilen rekonstruiert). Dieser Abschluss wird jeweils durch eine Blindüberschiebung markiert. Im weiterem Verlauf ist die ungestörte Schichtfolge zu sehen. (a) entspricht der Situation von Abb. 17, (b) die der von Tafel 4a.

Diskussion

Die erfassten lithologischen Einheiten spiegeln die regionalgeologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes am Harzrand wider. Oberkarbonische Einheiten sind nur im vorderen Teil des Querschlags zur 1. Tiefbausohle aufgeschlossen. An der Basis des untersuchten Bereichs findet sich das sogenannte Porphyrkonglomerat. Als Sedimentationsraum werden alluviale Fächer mit einem System verzweigter Flüsse angenommen (Gebhardt & Rappsilber 2014; Ehling et al. 2019). Da die Schichten mit einem Winkel von 5°- 8° in südöstliche Richtung einfallen (Radzinski et al. 2008), gelangt man von der ersten Tiefbausohle in etwa gleichbleibender Teufe nach Norden in ältere Schichten.

Im Hangenden folgen feiner klastische Sedimentite mit besserer Sortierung. Gebhardt & Rappsilber (2014) charakterisieren sie als Ablagerungen auf feuchten Sandebenen. Die Bildung von Wellenrippeln spricht für niedrige Fließgeschwindigkeiten. Die Sequenz endet mit einer tonig-siltigen Einheit einer Stillwassersedimentation des Sub- oder Tidalbereiches oder eines fluviatilen Umfeldes (Flemming 1978).

Die Genese des hangenden Weißliegenden wurde durch Paul (2012b) als fluviatil, marin oder äolisch angesehen. Die im Bergwerk anstehenden, schräggeschichteten Weißliegend-Sandsteine weisen auf ein fluviatiles oder randmarines Ablagerungsmilieu hin. Die Hornbank liefert aufgrund der lithologischen Zusammensetzung erste Anzeichen mariner Einflüsse (Paul 2012b; 2020c). Der folgende Kupferschiefer lässt sich gut erkennen. Das Werra-Karbonat beschreibt Paul (2020d) u.a. als besonders fossilreichen Packstone. Im Bergwerk konnten keine fossilreichen Schichten innerhalb des Werra-Karbonats detektiert werden.

Die stratigraphische Abfolge ist besonders im Hinblick auf den Kupferschiefer sicher zu bestimmen, so dass die Messwerte zu Schicht- und Störungsflächen klar zugeordnet werden können. Die Verteilung der Polpunkte zu Schichtflächen zeigen im Bereich der Störungszone eine Gürtelverteilung. Damit kann eine Faltung im Zuge der Duplexbildung mit heterogenen Rampengeometrien nachgewiesen werden. In Abb. 19 sind die Beobachtungen im Bergwerk zusammenfassend, schematisch in einem Modell dargestellt.

Der Verlauf der Störungsflächen selbst ist auf kleinstem Raum äußerst variabel. Im Bereich der beginnenden Störungszone streichen alle Störungsbahnen NW-SE und fallen nach NE ein. Im weiteren Verlauf der Störungszone, senkrecht zum Streichen, ergeben sich sowohl steilstehende bis hin zu überkippten Störungsflächen als auch flachliegende Überschiebungen. Diese treffen aufeinander. Auch dieses Phänomen ist mit der Rampengeometrie zu vereinbaren. Das übergeordnete System ist mit einer fault-propagation-fold verknüpft. Parallel zum Streichen der Störungszone sind querschlägige, auch gebogene Störungsbahnen angelegt. Diese ergeben sich aus zusätzlich angelegten lateralen und schrägen (oblique) Rampen. Damit ergibt sich ein komplexes dreidimensionales Bild (Abb. 19).

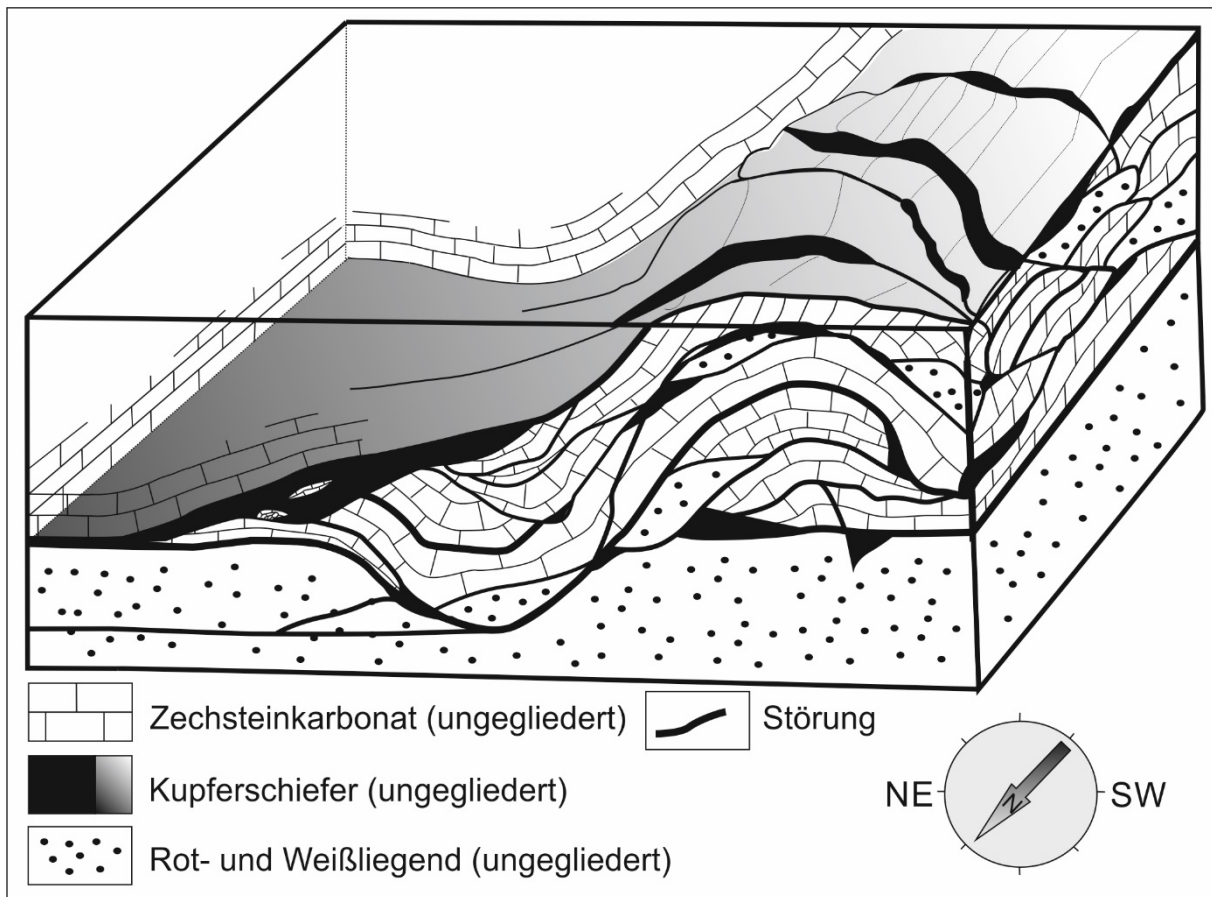


Abb. 19: Blockbild mit schematischer Darstellung der tektonischen Struktur im Bereich des „Rückenabbaus“ in der 1. Tiefbausohle des Röhrigschachtes. Die gleichen Strukturen finden sich, nicht ganz so gut aufgeschlossen, im östlichen Wetterflachen (teils vermauert) und im Segen-Gottes-Stollen. Im Profilschnitt senkrecht zum Streichen ist die einfache frontale Rampenstruktur zu sehen, die ihrem Charakter nach als fault-propagation-fold interpretiert wird (vgl. Tafeln 3-5). Die Strukturen im Profilschnitt parallel zum Streichen lassen den Schluss zu, dass zusätzlich laterale und schräge Rampen vorhanden sein müssen (vgl. Abb. 16).

An einigen Stellen im Bergwerk lagern das Rotliegende sowie auch das Weißliegende, tektonisch bedingt, im Hangenden des Kupferschiefers. So zeigt sich, dass Teile der Sohlüberschiebung in das stratigraphisch Liegende des Rotliegenden eingreifen müssen, um die geometrischen Beziehungen zu wahren. Das Rotliegende selbst ist wahrscheinlich auch in eine Dachüberschiebung integriert.

Die Lithologien der hangenden Einheiten mit ihren Evaporiten, können aufgrund ihrer rheologischen Eigenschaften die Auswirkungen der Kompression im Hangenden ausgeglichen haben. An der Oberfläche sind entsprechende Störungszonen im Zusammenhang mit den beschriebenen Duplexstrukturen nicht dokumentiert.

Fazit

Im ehemaligen Kupferschieferbergwerk Röhrigschacht in Wettelrode sind Gesteinseinheiten des Rotliegendes und des Zechsteins aufgeschlossen. Der Kupferschiefer wurde auf verschiedenen Sohlen und Streben abgebaut. Während im Normalprofil die klassische Gliederung in das Permokarbon nachvollziehbar ist, sind an anderen Stellen im Bergwerk die Gesteinsabfolgen kompliziert gestört und damit einhergehend die Mächtigkeiten reduziert oder erhöht. Die Störungen, die übertägig nicht angetroffen werden konnten, sind meistens als Überschiebungen anzusprechen. Sie zeichnen sich durch Schichtvervielfachung, der Lagerung älterer im Hangenden jüngerer Gesteine sowie das Auftreten sowohl flach als auch steil einfallender Störungsflächen aus. Zudem existieren in der Gesamtstruktur intern auch Abschiebungen, die als Relativbewegungen innerhalb der Duplexstruktur mit einer heterogenen Rampengeometrie zu interpretieren sind. Diese Heterogenität wird durch eine Überlagerung von einfachen, frontalen sowie lateralen und schrägen Rampengeometrien verursacht. Die Überschiebungen sind vor allem in den südlichen Teilen des Bergwerks auf der 1. Tiefbausohle sehr gut aufgeschlossen. Sie sind auch in den nördlichen Bergwerksteilen um den Segen-Gottes-Stollen nachzuweisen, wobei die Aufschlussituation qualitativ schlechter ist. Es zeigen sich entsprechend Duplexstrukturen, die allseitig von Störungen begrenzt sind. Damit ergeben sich linsenförmige Anschnitte der Schichtfolge in beiden Hauptprofilschnitten senkrecht (NE-SW) und parallel (NW-SE) zum Streichen der Schichten (Abb. 19). Extensionsstrukturen, die im Einklang mit der Ausbildung von Duplexstrukturen und Rampengeometrien stehen, sind zumeist am Ende (SW) der Störungszone zu beobachten.

Im regionalgeologischen Kontext ist die wesentliche tektonische Einengungsrichtung nach Norden orientiert. Im Gegensatz dazu ist die Schubrichtung im Bergwerk diametral ausgerichtet. Die Bewegungsrichtung der untertägigen Überschiebungen ist nach SW gerichtet.

Die beobachtete Strukturierung im Untergrund setzt zur Zeit ihrer Entstehung eine gewisse Überlagerungsmächtigkeit voraus. Da es sich auch um Faltenstrukturen handelt, muss die regionalgeologische Situation bereits von dem eher extensionalen Beanspruchungsplan in Jura und Unterkreide hin zum kompressiven in der Oberkreide gewechselt sein. Damit ergibt sich im weiteren Sinne ein genetischer Bezug zur inversionsbedingten Heraushebung des Harzes und des Hornburger Sattels. Allerdings ist dann eine Interpretation im Rahmen eines Rücküberschiebungssystems notwendig. Die absolute Zeitlichkeit der Bewegungen im Zusammenspiel der Vererzungsphasen mit der Bildung der Rückenstrukturen ist zu diskutieren. Die älteren Phasen würden bedeuten, dass der bereits triassisch und jurassisch mineralisierte Kupferschiefer in die Duplexierung einbezogen ist. Tertiäre Vererzungsphasen, die Symons et al. (2011) vorstellen, würden dann im Nachgang der Rückenbildung aktiv sein.

Dank

Ein herzlicher Dank ist an die Mitarbeiter*innen des Erlebniszentrums Bergbau Röhrigschacht gerichtet. Ohne ihre weitreichende Unterstützung und großzügige Hilfe wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ein besonderer Dank geht an Herrn Thomas Wäsche, der uns jederzeit ein Ansprechpartner war und Literatur sowie alte Grubenrisse zur Verfügung stellte. Das Landesamt für Vermessung und Geoinformation übersandte die topographische Karte von Wettelrode. Dank auch an Rüdiger Kilian für die Gespräche und Diskussionen über fachliche Fragen.

Literatur

- Arthaud, F. & Matte, P. (1977): Late Paleozoic strike-slip faulting in southern Europe and northern Africa: Result of a right-lateral shear zone between the Appalachians and the Urals. *Geological Society of America Bulletin*, 88 (9), 1305–1320.
- Bachmann, G.H. (2008a): Perm: Allgemeines. In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (Eds.): *Geologie von Sachsen-Anhalt*. 140–143, Stuttgart (Schweizerbart).
- Bachmann, G.H. (2008b): Trias: Allgemeines. In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (Eds.): *Geologie von Sachsen-Anhalt*. 178–180, Stuttgart (Schweizerbart).
- Bauer, S. & Brust, M.K. (2021): Elisabethschächter und Segen-Gottes-Schlotte zur Geologie und Speläogenese zweier typischer Anhydrithöhlen im Südharz, Sachsen-Anhalt. In: Knolle, F. (Ed.): *Die Mansfelder Schloten. Karst und Höhle 2018-2021*, 359-384, Verband der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V., München.
- Bauer, S. (2021): Das Geotopinventar der Elisabethschächter und der Segen-Gottes-Schlotte unter besonderer Berücksichtigung der Diagenesegefüge in Werra- und Sangerhäuser Anhydrit. In: Knolle, F. (Ed.): *Die Mansfelder Schloten. Karst und Höhle 2018-2021*, 359-384, Verband der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V., München.
- Bechtel, A., Elliott, W.C., Wampler, J.M. & Oszczepalski, S. (1999): Clay mineralogy, crystallinity, and K-Ar ages of illites within the Polish Zechstein Basin; implications for the age of Kupferschiefer mineralization. *Economic Geology*, 94 (2), 261–272.
- Blumenstengel, H. & Krutzsch, W. (2008): Tertiär. In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R., Schwab, M. (Eds.): *Geologie von Sachsen-Anhalt*, 267–273, Stuttgart (Schweizerbart).
- Blundell, D. J. Karnkowski, P. H. Alderton, D. H. M. Oszczepalski, S. & Kucha, H. (2003): Copper mineralization of the Polish Kupferschiefer: A proposed basement fault-fracture system of fluid flow. *Economic Geology*, 98 (7), 1487–1495. doi: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.7.1487>
- Borg, G. (2017): It's all about timing - the origin of the European Kupferschiefer ores. *World of mining - Surface & Underground*, 69 (1), 24–30.

- Borg, G., Piestrzynski, A., Bachmann, G.H., Puttmann, W., Walther, S. & Fiedler, M. (2012): An overview of the European Kupferschiefer deposits. In: Hedenquist, J.W., Harris, M. & Camus, F. (Eds.): *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World. A Tribute to Richard H. Sillitoe*. 455–486, Littleton, Colorado (Society of Economic Geologists).
- Breitkreuz, C., Ehling, B.-C. & Pastrok, N. (2018): The Subvolcanic Units of the Late Paleozoic Halle Volcanic Complex, Germany: Geometry, Internal Textures and Emplacement Mode. In: Breitkreuz, C. & Rocchi, S. (Eds.): *Physical Geology of Shallow Magmatic Systems. Dykes, Sills and Laccoliths*. 295–307, Cham (Springer International Publishing).
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023): Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, 1:250.000. [WMS].
<https://services.bgr.de/wms/geologie/guek250/?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=wms&VERSION=1.3.0> [07.01.23]. 77
- Cooper, M.A., Williams, G.D., Graciansky, P.C. de, Murphy, R.W., Needham, T., Paor, D. de, Stoneley, R., Todd, S.P., Turner, J.P. & Ziegler, P.A. (1989): Inversion tectonics — a discussion. Geological Society, London, Special Publications, 44 (1), 335–347.
- Dahlgrün, F., Fischer, G & Schröder, E. (1934): Geologische Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern: Wippra, 1:25.000, 2. Aufl., Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin.
- Edel, J.B., Schulmann, K., Lexa, O. & Lardeaux, J.M. (2018): Late Palaeozoic palaeomagnetic and tectonic constraints for amalgamation of Pangea supercontinent in the European Variscan belt. *Earth-Science Reviews*, 177, 589–612.
- Ehling, B.-C. & Gebhardt, U. (2012): Rotliegend im Saale-Becken. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Ed.): *Stratigraphie von Deutschland X. Rotliegend. Teil I: Innervariscische Becken*. 504–516, Stuttgart (Schweizerbart Science Publishers).
- Ehling, B.-C., Schneider, J.W., Brosig, A., Scholze, F., Müller, T. & Wäsche, T. (2019): Kupferschiefer, „Weißliegend“, Eisleben-Formation und Mansfeld-Subgruppe in den Untertageaufschlüssen im ErlebnisZentrum Bergbau Röhrigschacht Wettelrode. *Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, Beiheft 12*, 153–174. 78
- Erlebniszentrum Bergbau Röhrigschacht (2020-2023): Vorträge im Rahmen der Bergwerksbesuche.
- Esri Inc. (2022): ArcGIS Pro 3.0.3.
- FAO, NOAA, USGS (2022): Community-Karte [29.03.22].
- Fazlikhani, H., Bauer, W. & Stollhofen, H. (2022): Variscan structures and their control on latest to post-Variscan basin architecture: insights from the westernmost Bohemian Massif and southeastern Germany. *Solid earth*, 13 (2), 393–416.
- Flemming, B.W. (1978): Flaser. In: Fairbridge, R.W. & Bourgeois, J. (Eds.): *The Encyclopedia of Sedimentology*, 457–460, Stroudsburg, Pennsylvania (Dowden Hutchinson & Ross, Inc.).

- Franke, W., Cocks, L.R.M. & Torsvik, T.H. (2017): The Palaeozoic Variscan oceans revisited. *Gondwana Research*, 48, 257–284.
- Franzke, H.J., Zeh, A. & Meier, S. (2007): Die metamorph-magmatische und strukturelle Entwicklung des Kyffhäuser Kristallins/Mitteldeutsche Kristallinzone – Vergleiche mit der Wippra-Zone und dem Eckergneis/Harz. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 35 (1/2), 27–61.
- Freiesleben, J.C. (1815): Geognostischer Beytrag zur Kenntniß des Kupferschiefergebirges, auch einiger benachbarter Gebirgsformationen, mit besonderer Hinsicht auf Thüringen: 459 S., Freyberg (Cranz und Gerlach).
- GDI-TH, GeoBasis De/LVermGeo LSA, Esri, HERE, Garmin, FAO, METI/NASA, USGS (2022): Community-Karte [29.03.22].
- GDI-Th, GeoBasis-DE/LGB, GeoBasis-DE/LVermGeo LSA, Earthstar Geographics& LGLN, Esri, Garmin, Foursquare, Geotechnologies, Inc, METI/NASA, USGS (2023): World Imagery [07.01.23].
- GDI-Th, GeoBasis-DE/LGB, GeoBasis-DE/LVermGeo LSA, Maxar, Microsoft& Esri Community Maps Contributors, LGLN, Esri, HERE, Garmin, Foursquare, GeoTechnologies, Inc, METI/NASA, USGS (2023): World Imagery [08.01.23]. 79
- Gebhardt, U. & Rappsilber, I. (2014): Rotliegend. In: Schuberth, K. & Radzinski, K.-H. (Eds.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Sachsen-Anhalt 1:25000 (GK25), Blatt 4635 Querfurt, 44–58, Halle (Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt).
- Geipel, M.P. (1919): Über die Rücken im Mansfeldschen Revier und ihren Einfluß auf die Erzführung des Kupferschiefers. *Jahrbuch des Halleschen Verbandes für die Erforschung der Mitteldeutschen Bodenschätze und Ihrer Verwertung*, 1, 21–40.
- GeoBasis-DE / LVermGeo LSA (2019): Digitale Topographische Karte: 4433-SO, Wettelrode, 1:10.000.
- Glennie, K.W. & Buller, A.T. (1983): The Permian Weissliegend of NW Europe: The partial deformation of aeolian dune sands caused by the Zechstein transgression. *Sedimentary Geology*, 35 (1), 43–81.
- Grohmann, C.H., Campanha, G.A.C. & Endlein Correia, A. (2009-2011, 2017): Openstereo. Version 2.0b. Online: <https://github.com/spamlab-ieee/os/releases/tag/v2.0b12>.
- Hartung, E. (2016): Der Weg vom Bergbaumuseum zum Erlebniszentrum Bergbau. In: Grubenarchäologische Gesellschaft e.V. (Ed.): 19. Internationaler Bergbau- & Montanhistorik-Workshop Mansfeld-Südharz 2016. 127–130, Clausthal-Zellerfeld (Papierflieger Verlag GmbH).
- Hauschke, N. & Szurlies, M. (2006): Kontinentale Perm-Trias-Grenze und Buntsandstein nördlich von Halle (Saale) – Fazies, Bio-, Log-, Zyklen- und Magnetostratigraphie (Exkursion M am 22. April 2006). *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, 88, 427–452.
- Hinze, C., Jordan, H., Knoth, W., Kriebel, U. & Martiklos, G. (2006): Geologische Karte Harz, 1:100.000, 2. Aufl., Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt in Zusammenarbeit mit dem Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Halle (Saale).

- Jagsch, R. (1977): Die Querfurter Senke – ihr Strukturfonds, ihre Erdgasführung und ihre Eignung für die Anlage von Untergrundspeichern. Dissertation: S., Freiberg (TU Bergakademie).
- Jankowski, G. & Remus, W. (1963): Die Kupferschieferlagerstätte in der Sangerhäuser Mulde. 47 S., Berlin (Gesellschaft zur Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse, Zentrale Sekt. Geowissenschaften).
- Jowett, E.C., Pearce, G.W. & Ryzewski, A. (1987): A Mid-Triassic paleomagnetic age of the Kupferschiefer mineralization in Poland, based on a revised apparent polar wander path for Europe and Russia. *Journal of Geophysical Research*, 92 (B1), 581–598.
- Kley, J. (2013): Saxonische Tektonik im 21. Jahrhundert. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 164 (2), 295–311.
- Kley, J. (2018): Timing and spatial patterns of Cretaceous and Cenozoic inversion in the Southern Permian Basin. *Geological Society, London, Special Publications*, 469 (1), 19–31.
- Kley, J., Franzke, H.-J., Jähne, F., Krawczyk, C.M., Lohr, T., Reicherter, K., Scheck-Wenderoth, M., Sippel, J., Tanner, D., Van Gent, H. & the SPP Structural Geology Group (2008): Strain and Stress. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Eds.): *Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European basin system*, 97-124, Berlin, Heidelberg (Springer).
- Kley, J. & Voigt, T. (2008): Late Cretaceous intraplate thrusting in central Europe: Effect of Africa-Iberia-Europe convergence, not Alpine collision. *Geology*, 36 (11), 839–842.
- Knitzschke, G. (1995): Metall- und Produktionsbilanz für die Kupferschieferlagerstätte im südöstlichen Harzvorland. In: Jankowski, G. (Ed.): *Zur Geschichte des Mansfelder Kupferschieferbergbaus*, 270–284, Clausthal-Zellerfeld (GDMB).
- König, S. & Lorenz, R. (2009): Erläuterungen zu Exkursionsobjekten des Mansfelder Montanwesens. In: Breitkreuz, C. & Drebenstedt, C. (Eds.): *Sustainable mining and environment. A German-Latin American perspective*, 91–101, Freiberg (TU Bergakademie).
- Langelüdtich, H.-J., Mirsch, R., Knitzschke, G., Roloff, P., Spilker, M. & Wordelmann, H. (1999): Bergbau auf Kupferschiefer. In: Verein Mansfelder Berg- und Hüttenleute e.V. & Deutsches Bergbau-Museum (Eds.): *Mansfeld. Die Geschichte des Berg- und Hüttenwesens*. 41–204, Lutherstadt Eisleben, Bochum (Verein Mansfelder Berg- und Hüttenleute).
- Leipold, J. (2007): *Chronik Kupferschieferbergbau Bottendorf*: 258 S., Bad Langensalza (Rockstuhl).
- Liebenam, A. (1885): *Grubenriss Wettelrode und Umgebung*.
- Littke, R., Scheck-Wenderoth, M., Brix, M.R. & Nelskamp, S. (2008): Subsidence, inversion and evolution of the thermal field. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Eds.): *Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European basin system*. 125–153, Berlin, Heidelberg (Springer).

- Lützner, H., Tichomirowa, M., Käßner, A. & Gaupp, R. (2021): Latest Carboniferous to early Permian volcano-stratigraphic evolution in Central Europe: U–Pb CA–ID–TIMS ages of volcanic rocks in the Thuringian Forest Basin (Germany). *International Journal of Earth Sciences*, 110 (1), 377–398.
- McCann, T., Pascal, C., Timmerman, M.J., Krzywiec, P., López-Gómez, J., Wetzel, L., Krawczyk, C.M., Rieke, H. & Lamarche, J. (2006): Post-Variscan (end Carboniferous-Early Permian) basin evolution in Western and Central Europe. *Geological Society, London, Memoirs*, 32 (1), 355–388.
- McKenzie, D. (1978): Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40 (1), 25–32.
- Meschede, M. (2018): *Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz*. 252 S., Berlin, Heidelberg (Springer Spektrum).
- Mikulski, S.Z. & Stein, H.J. (2017): Re-Os isotopic age of the Cu-Ag sulphide ore and its mineralogical and geochemical characteristic from the Lubin-Polkowice mining area (SW Poland). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 468, 79–96.
- Mirsch, R. (1995): Technische Denkmale und historische Zeugen des Berg- und Hüttenwesens im Mansfelder Land und im Raum Sangerhausen. In: Jankowski, G. (Ed.): *Zur Geschichte des Mansfelder Kupferschieferbergbaus*, 312–320, Clausthal-Zellerfeld (GDMB).
- Oszczepalski, S., Speczik, S., Zieliński, K. & Chmielewski, A. (2019): The Kupferschiefer Deposits and Prospects in SW Poland: Past, Present and Future. *Minerals*, 9 (10), 592.
- Paul, J. (2006): Der Kupferschiefer: Lithologie, Stratigraphie, Fazies und Metallogenese eines Schwarzschiefers. *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 157: 57–76, Stuttgart.
- Paul, J. (2012a): Das Klima des Rotliegend. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Ed.): *Stratigraphie von Deutschland X. Rotliegend. Teil I: Innervariscische Becken*. 731–742, Stuttgart (Schweizerbart Science Publishers).
- Paul, J. (2012b): Weißliegend, Grauliegend und das Zechstein-Konglomerat: die Rotliegend/Zechstein-Grenze. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Ed.): *Stratigraphie von Deutschland X. Rotliegend. Teil I: Innervariscische Becken*. 707–714, Stuttgart (Schweizerbart Science Publishers).
- Paul, J. (2020b): Die Grenzen des Zechsteins. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Ed.): *Stratigraphie von Deutschland XII. Zechstein*. 153–158, Stuttgart (Schweizerbart Science Publishers).
- Paul, J. (2020c): Kupferschiefer. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Ed.): *Stratigraphie von Deutschland XII. Zechstein*. 181–185, Stuttgart (Schweizerbart Science Publishers).
- Paul, J. (2020a): Paläogeographie und Fazies des Zechsteins. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Ed.): *Stratigraphie von Deutschland XII. Zechstein*. 41–52, Stuttgart (Schweizerbart Science Publishers).

- Paul, J. (2020d): Werra-Karbonat. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Ed.): Stratigraphie von Deutschland XII. Zechstein, 187–204, Stuttgart (Schweizerbart Science Publishers). 83
- Paul, J., Heggemann, H. & Hug-Diegel, N. (2020): Einführung in die Stratigraphie des Zechsteins. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Ed.): Stratigraphie von Deutschland XII. Zechstein. 19–27, Stuttgart (Schweizerbart Science Publishers).
- Radinski, K.-H., Ehling, B.-C., Kunert, R. & Beutler, G. (2008): Südöstliches Harzvorland. In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (Eds.): Geologie von Sachsen-Anhalt. 458–472, Stuttgart (Schweizerbart).
- Rappsilber, I. (2003): Struktur und Entwicklung des nördlichen Saale-Beckens (Sachsen-Anhalt): Geophysik und Geologie. Dissertation. 118 S., Halle (Saale) (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg).
- Rappsilber, I., Stedingk, K., Heibert, I. & Neuenfeld, T. (2007): Geotourismus in den Kupferschieferrevieren: Geologisch-montanhistorische Karte Mansfeld-Sangerhausen, 1:50.000, 3. Aufl., Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Romer, R.L., Förster, H.-J. & Breitzkreuz, C. (2001): Intracontinental extensional magmatism with a subduction fingerprint: the late Carboniferous Halle Volcanic Complex (Germany). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141 (2), 201–221.
- Rosenstadt Sangerhausen GmbH (2023): Führungen & Expeditionen - ErlebnisZentrum Bergbau Röhrigschacht Wettelrode. Online: <https://www.roehrigschacht.de/de/fuehrungen-expeditionen> [14.01.23].
- Scheck-Wenderoth, M. (2019): Sedimentary Basins. In: Gupta, H.K. (Ed.): *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. 1353–1365, Cham (Springer).
- Schneider, J.W., Rössler, R., Gaitzsch, B., Gebhardt, U., Kampe, A. & Breitzkreuz, C. mit einem Beitrag von (2005): Saale-Senke. In: Wrede, V. & Amler, M.R.W. (Eds.): *Das Oberkarbon (Pennsylvanium) in Deutschland*. 419–440, Stuttgart (Schweizerbart). 84
- Seilkopf, A. (2001): Bergbaumuseum Wettelrode: Broschüre zum Röhrigschacht. *Mitteldeutsche Zeitung*, 6/8/2001. Online: <https://www.mz.de/varia/bergbaumuseum-wettelrode-broschure-zum-roehrigschacht-3059649> [13.01.23].
- Sippel, J. (2009): The paleostress history of the Central European basin system: Scientific Technical Report STR09/06: 192 S., Potsdam (GFZ Helmholtz-Zentrum).
- Spieth, V. (2019). Zechstein Kupferschiefer at Spremberg and related sites: hot hydrothermal origin of the polymetallic Cu-Ag-Au deposit.
- Stedingk, K. mit einem Beitrag von Rentzsch, J.; Knitzschke, G.; Schenke, G.; Heinrich, K.; Scheffler, H. (2002): Potenziale der Erze und Spate in Sachsen-Anhalt. In: Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (Ed.): *Mitteilungen zur Geologie von Sachsen-Anhalt, Beiheft 5*.

- ROHSTOFFBERICHT 2002. Verbreitung, Gewinnung und Sicherung mineralischer Rohstoffe in Sachsen-Anhalt, 75–132, Halle (Saale).
- Stedingk, K. (2008): Kupferschiefer. In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (Eds.): Geologie von Sachsen-Anhalt. 524–535, Stuttgart (Schweizerbart).
- Stollhofen, H., Bachmann, G.H., Barnasch, J., Bayer, U., Beutler, G., Franz, M., Kästner, M., Legler, B., Mutterlose, J. & Radies, D. (2008): Upper Rotliegend to Early Cretaceous basin development. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Eds.): Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European basin system. 181–210, Berlin, Heidelberg (Springer).
- Symons, D.T.A., Kawasaki, K., Walther, S. & Borg, G. (2011): Paleomagnetism of the Cu–Zn–Pb-bearing Kupferschiefer black shale (Upper Permian) at Sangerhausen, Germany. *Mineralium deposita*, 46, 137–152. 85.
- Timmerman, M.J., Heeremans, M., Kirstein, L.A., Larsen, B.T., Spencer-Dunworth, E.-A. & Sundvoll, B. (2009): Linking changes in tectonic style with magmatism in northern Europe during the late Carboniferous to latest Permian. *Tectonophysics*, 473 (3), 375–390.
- Voigt, T., Kley, J. & Voigt, S. (2021): Dawn and dusk of Late Cretaceous basin inversion in central Europe. *Solid earth*, 12 (6), 1443–1471.
- Voigt, T., Reicherter, K., Eynatten, H. von, Littke, R., Voigt, S. & Kley, J. (2008): Sedimentation during basin inversion. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Eds.): Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European basin system. 211–232, Berlin, Heidelberg (Springer).
- Völker, C., Völker, R. & Schuberth, K. (2019): Karstlandschaft und historischer Kupferschieferbergbau am Südhazrand zwischen Wettelrode und Rottleberode. *Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, Beiheft 12*, 91–111.
- Walther, S. & Borg, G. (2016): Der Kupferschiefer in Deutschland und Polen: Metallanreicherungen an der Zechstein Basis und deren bergbauhistorische und ökonomische Bedeutung. 19. Internationaler Bergbau- & Montanhistorik-Workshop Mansfeld-Südharz 2016.
- Ziegler, P.A. & Dèzes, P. (2006): Crustal evolution of Western and Central Europe. *Geological Society, London, Memoirs*, 32 (1), 43–56.

Anhang

Aufschlüsse und Messwerte

Aufschlussnummer	Art der Raumdaten	Einfallsrichtung/trend	Einfallswinkel/plunge	Zuordnung	Beziehung
7	Störungsfläche	200	62	1. Tiefbausohle	
7	Störungsfläche	206	71	1. Tiefbausohle	
7	Störungsfläche	1	34	1. Tiefbausohle	
8	Lineation	25	27	1. Tiefbausohle	
8	Lineation	22	27	1. Tiefbausohle	
8	Lineation	220	65	1. Tiefbausohle	
8	Störungsfläche	54	34	1. Tiefbausohle	
8	Störungsfläche	40	32	1. Tiefbausohle	
9	Schichtfläche	85	26	1. Tiefbausohle	
9	Schichtfläche	72	34	1. Tiefbausohle	
9	Störungsfläche	204	78	1. Tiefbausohle	
10	Lineation	63	-	1. Tiefbausohle	
11	Lineation	237	47	1. Tiefbausohle	
11	Schichtfläche	202	59	1. Tiefbausohle	
11	Schichtfläche	206	52	1. Tiefbausohle	
11	Schichtfläche	249	25	1. Tiefbausohle	
11	Schichtfläche	175	62	1. Tiefbausohle	
11	Schichtfläche	36	28	1. Tiefbausohle	
11	Störungsfläche	192	84	1. Tiefbausohle	
11	Störungsfläche	157	56	1. Tiefbausohle	
11	Störungsfläche	176	39	1. Tiefbausohle	
11	Störungsfläche	208	52	1. Tiefbausohle	

11	Störungsfläche	184	81	1. Tiefbausohle	
11	Störungsfläche	352	50	1. Tiefbausohle	
11	Störungsfläche	150	25	1. Tiefbausohle	
11	Störungsfläche	1	53	1. Tiefbausohle	
11	Störungsfläche	154	54	1. Tiefbausohle	
11	Störungsfläche	185	43	1. Tiefbausohle	
12	Störungsfläche	207	71	1. Tiefbausohle	
12	Störungsfläche	180	51	1. Tiefbausohle	
12	Störungsfläche	202	52	1. Tiefbausohle	
13	Lination	27	29	1. Tiefbausohle	Fläche (67/33)
13	Lination	210	81	1. Tiefbausohle	Fläche (220/84)
13	Lination	53	56	1. Tiefbausohle	
13	Schichtfläche	67	33	1. Tiefbausohle	
13	Störungsfläche	207	71	1. Tiefbausohle	
13	Störungsfläche	220	84	1. Tiefbausohle	
13	Störungsfläche	27	73	1. Tiefbausohle	
14	Störungsfläche	203	81	1. Tiefbausohle	
14	Störungsfläche	199	45	1. Tiefbausohle	
14	Störungsfläche	220	46	1. Tiefbausohle	
15	Lination	102	10	1. Tiefbausohle	Fläche (191/54)
15	Lination	205	33	1. Tiefbausohle	Fläche (220/33)
15	Lination	0	45	1. Tiefbausohle	Fläche (16/53)
15	Lination	216	26	1. Tiefbausohle	Fläche (214/22)
15	Lination	160	60	1. Tiefbausohle	
15	Lination	182	38	1. Tiefbausohle	
15	Lination	323	2	1. Tiefbausohle	
15	Schichtfläche	237	80	1. Tiefbausohle	
15	Schichtfläche	220	33	1. Tiefbausohle	

15	Schichtfläche	26	79	1. Tiefbausohle
15	Schichtfläche	130	28	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	191	54	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	16	53	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	214	22	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	212	46	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	234	81	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	206	80	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	193	42	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	24	5	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	43	51	1. Tiefbausohle
15	Störungsfläche	58	52	1. Tiefbausohle
16	Schichtfläche	160	22	Östliches Wetterflachen
16	Schichtfläche	153	10	Östliches Wetterflachen
17		-	-	Östliches Wetterflachen
18		-	-	Östliches Wetterflachen
19	Schichtfläche	151	7	Östliches Wetterflachen
19	Schichtfläche	167	26	Östliches Wetterflachen
19	Störungsfläche	238	36	Östliches Wetterflachen
19	Störungsfläche	216	50	Östliches Wetterflachen
19	Störungsfläche	25	55	Östliches Wetterflachen
19	Störungsfläche	24	52	Östliches Wetterflachen

19	Störungsfläche	320	52	Östliches Wetterflachen
19	Störungsfläche	350	50	Östliches Wetterflachen
20	Störungsfläche	213	31	Östliches Wetterflachen
21	Faltenachse	225	18	Östliches Wetterflachen
21	Schichtfläche	218	57	Östliches Wetterflachen
21	Störungsfläche	264	60	Östliches Wetterflachen
21	Störungsfläche	270	54	Östliches Wetterflachen
22	Schichtfläche	120	23	Östliches Wetterflachen
22	Schichtfläche	196	22	Östliches Wetterflachen
22	Schichtfläche	137	20	Östliches Wetterflachen
22	Störungsfläche	205	28	Östliches Wetterflachen
22	Störungsfläche	235	36	Östliches Wetterflachen
22	Störungsfläche	201	51	Östliches Wetterflachen/Interimssohle
23	Schichtfläche	40	45	Interimssohle
23	Schichtfläche	40	44	Flachen zwischen Interimssohle und Segen- Gottes-Stollen
23	Schichtfläche	55	39	Flachen zwischen Interimssohle und Segen- Gottes-Stollen

24	Schichtfläche	178	40	Flachen zwischen Interimssohle und Segen-Gottes-Stollen
24	Schichtfläche	179	37	Flachen zwischen Interimssohle und Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	47	22	Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	128	35	Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	45	56	Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	176	40	Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	45	56	Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	46	50	Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	165	41	Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	45	56	Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	46	56	Segen-Gottes-Stollen
25	Schichtfläche	49	60	Segen-Gottes-Stollen
25	Störungsfläche	34	71	Segen-Gottes-Stollen
26	Schichtfläche	26	30	Segen-Gottes-Stollen
26	Schichtfläche	32	60	Segen-Gottes-Stollen
26	Schichtfläche	33	74	Segen-Gottes-Stollen
27	Lineation	12	65	Segen-Gottes-Stollen
27	Schichtfläche	41	33	Segen-Gottes-Stollen

28	Schichtfläche	171	51	Segen-Gottes-Stollen
28	Schichtfläche	52	55	Segen-Gottes-Stollen
28	Schichtfläche	102	67	Segen-Gottes-Stollen
28	Schichtfläche	50	82	Segen-Gottes-Stollen
29	Schichtfläche	46	56	Segen-Gottes-Stollen
29	Schichtfläche	58	72	Segen-Gottes-Stollen
29	Schichtfläche	96	39	Segen-Gottes-Stollen
29	Störungsfläche	33	62	Segen-Gottes-Stollen
30	Schichtfläche	202	9	Querschlag/1. Tiefbausohle
30	Schichtfläche	190	11	Querschlag/1. Tiefbausohle
31		-	-	Querschlag/1. Tiefbausohle
32	Schichtfläche	34	36	1. Tiefbausohle
32	Schichtfläche	24	35	1. Tiefbausohle

