

Das tektonische Inventar des Odenwaldes im Zusammenhang mit dem Spannungsfeld in der Erdkruste

G4

ANNEMARIE MILITZER

Vorwort

Der Oberrheingraben (ORG) ist als Teil des Känozoischen Riftsystems im Vergleich zum restlichen Teil des Bundeslandes Hessen besonders von Erdbeben betroffen. Zudem ist er aufgrund seiner geologischen Abfolge für die Erdöl- und Geothermie-Industrie ein vielversprechender Strukturraum. Daher war und ist es von maßgeblichem Interesse, die bis vor kurzem noch schlecht dokumentierte natürliche Seismizität des nördlichen Oberrheingrabens zu charakterisieren. In diesem Zusammenhang wurde 2010 das BMWi-Projekt SiMoN (Seismisches Monitoring im Zusammenhang mit der geothermischen Nutzung des Nördlichen Oberrheingrabens), mit dem Aufbau eines seismischen Netzwerkes im Nördlichen Oberrheingraben und angrenzenden Strukturräumen initiiert (RÜMPKER et al. 2016). Zwischen November 2010 und April 2015 wurden 480 Beben im Nördlichen Oberrheingraben registriert (HOMUTH 2015), wovon allein 356 zwischen 2014 und 2015 im unmittelbar angrenzenden nördlichen Odenwald zu lokalisieren waren (Abb. 1; HOMUTH & RÜMPKER 2016). Die Beben im nördlichen Odenwald gruppieren sich in jeweils einem Cluster bei Ober-Ramstadt und einem bei Reinheim, die sich durch Bebenhäufigkeit und Herdtiefe weiter unterscheiden (HOMUTH 2015, HOMUTH & RÜMPKER 2016). Am 17. Mai 2014 ereignete sich in dieser Serie mit einer Lokalmagnitude von $M_L = 4,2$ bei Ober-Ramstadt ein für Hessen mit dieser Stärke seltenes Beben, das auch im weiteren Umkreis deutlich zu spüren war und Sachschäden an Gebäuden hervorrief (HOMUTH 2015). Diese verstärkte seismische Aktivität ist mit der Schwarm-

bebenserie vergleichbar, die sich 1869–1871 bei Groß-Gerau und Darmstadt ereignete (LANDSBERG 1931, HOMUTH & RÜMPKER 2016). Um die aktuelle Serie besser zu verstehen und potenziell das rezente

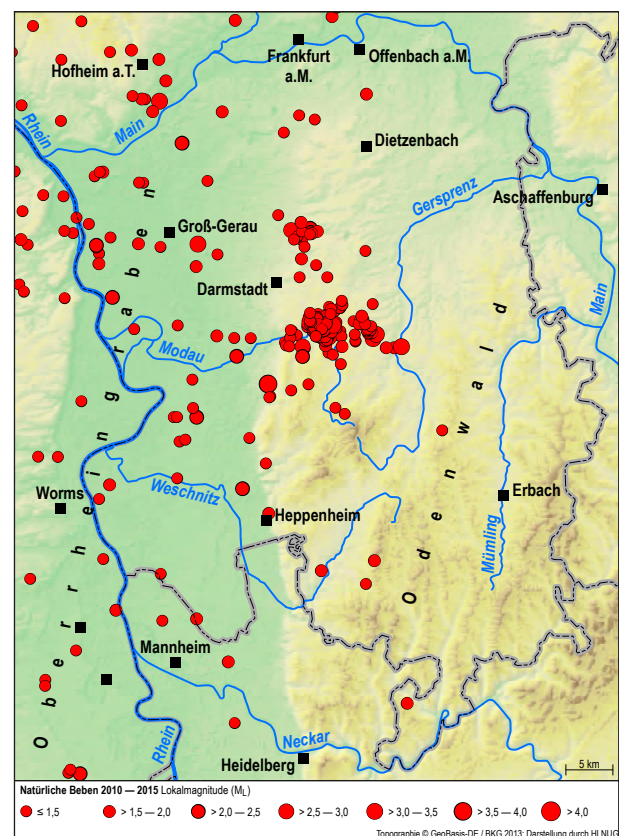


Abb. 1 Erfasste seismische Ereignisse mit Lokalmagnitude im Nördlichen Oberrheingraben und angrenzenden Strukturräumen zwischen 2010 und 2015

Spannungsfeld mit den geologischen Gegebenheiten im Gelände zu korrelieren, wurden im Rahmen der „Georisikoerfassung Bergbau“ Projektmittel vom HMUKLV (Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucher-

schutz) für die „Untersuchung der Strukturen des geologischen Untergrundes und des rezenten Spannungsfeldes im Zusammenhang mit den Erdbeben im Odenwald“ zur Verfügung gestellt.

Rezentes Spannungsfeld in Mitteleuropa

Ausgelöst durch die Alpidische Gebirgsbildung, während der die Adriatische Platte im Süden mit der Eurasischen Platte im Norden kollidiert, und durch die Öffnung des Nordatlantiks am Mittelatlantischen Rücken, entwickelte sich in der Erdneuzeit (Känozoikum) in Mitteleuropa das Känozoische Riftsystem (Rift = Grabenbruch). Seit der frühen Tertiärzeit, im Eozän, entsteht als deutlich zu erkennender Teil des Rifts das Bruchsystem des Oberrheingrabens, der im Oligozän seine stärkste Öffnung erlebte (ZIEGLER 1992, SCHUHMACHER 2002). Infolge der gegensätzlichen Relativbewegungen des Nordatlantiks und der Alpen, ergeben sich gegenwärtig in Mitteleuropa eine maximale Kompressionsspannung σ_1 in NW-

SE-Richtung und eine Extensionsspannung σ_3 in NE-SW-Richtung (Abb. 2; AHORNER 1968, HEIDBACH et al. 2016). Ausgleichende Seitenverschiebungen begleiten dieses Hauptspannungsfeld in WNW-ESE und NNE-SSW-Richtungen, von denen die letztere die Orientierung des Oberrheingrabens widerspiegelt (AHORNER 1968). Neuere Untersuchungen im Nördlichen ORG und Odenwald belegen eine maximale Kompressionsspannung mit einem Streichen von 135° (HOMUTH et al. 2014). Aus diesem Hauptspannungsfeld sind die Regionen mit erhöhter Erdbebenaktivität abzuleiten (Abb. 2). Die Erdbebenherde im Odenwald liegen nur wenige Kilometer östlich der Grabenschulter des Oberrheingrabens.

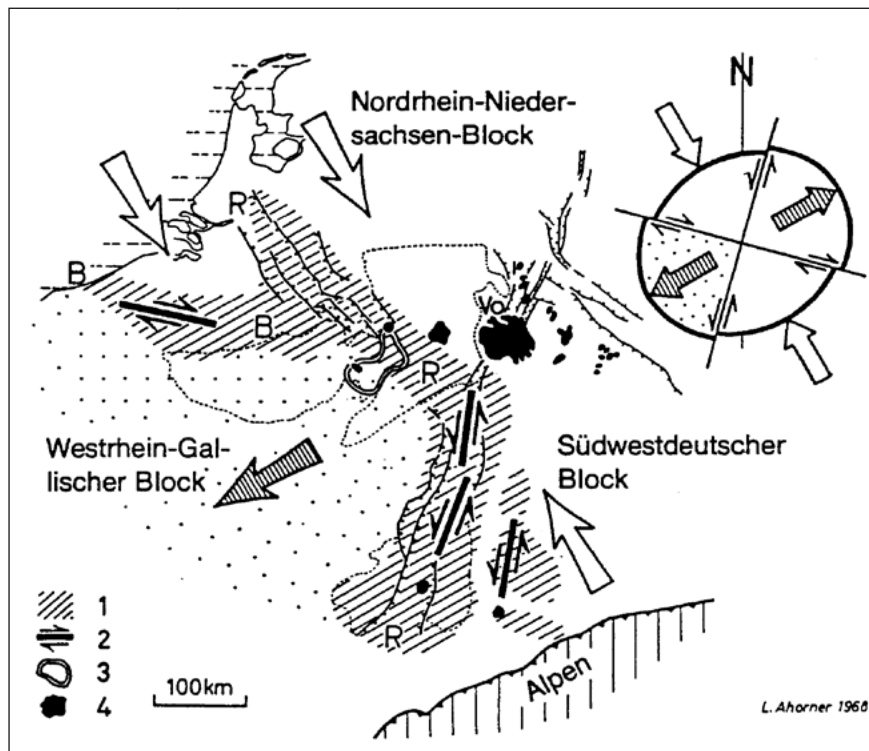


Abb. 2 Das rezente Spannungsfeld in Mitteleuropa (aus AHORNER 1968) mit der maximalen Kompressionsspannung in NW-SE-Richtung. Die Regionen mit erhöhter Erdbebenaktivität sind schraffiert dargestellt.

Geländearbeit

Um die besagte Erdbebenserie besser zu verstehen, war es ein zentrales Ziel des Projektes, die Klufsysteme (Trennflächen verschiedener räumlicher Orientierung) im Odenwald zu untersuchen und zu charakterisieren. Dabei wurden die Gesteinseinheiten des kristallinen Grundgebirges und die des Deckgebirges getrennt voneinander betrachtet. Das Grundgebirge ist Teil des sogenannten Variskischen Gebirges, das gegen Ende des Erdaltertums (Paläozoikum) entstanden ist. Im kristallinen Odenwald sind zwei Großeinheiten unterscheidbar, der im Westen gelegene Bergsträßer Odenwald und der im Osten anschließende und deutlich kleinere Böllsteiner Odenwald. Auf dem tiefgründig abgetragenen Grundgebirge wurden in der Buntsandsteinzeit des Erdmittelalters (Mesozoikum) die sedimentären Abfolgen des Deckgebirges abgelagert, die im Laufe der Erdgeschichte zu Sand- und Tonsteinen verfestigt wurden.

Bei den untersuchten Trennflächen wurde grundsätzlich zwischen Klüften und Störungen unterschieden. Klüfte sind Trennflächen auf denen keine Relativbewegung zu erkennen ist. Sie entstehen durch eine Reihe verschiedener Mechanismen, wie z. B. durch Abkühlung eines magmatischen Körpers oder als Reaktion auf tektonische Beanspruchung oder erosive Prozesse (Entlastung). Steigt die tektonische Beanspruchung im Gesteinskörper durch einwirkende Zug-, Scher- und Kompressionsspannungen, sodass eine Relativbewegung induziert wird, spricht man von einer Störung bzw. Scherzone. Im Querschnitt können diese sehr diskret ausgebildet sein oder eine Breite von bis zu einigen Metern erreichen. Je nach Temperaturbedingungen im Gesteinskörper zum Zeitpunkt der Störungsbildung, ist die Störung duktil bis spröde ausgebildet. Zum Teil ist in Störungen die Bewegungsrichtung der Gesteinsblöcke anhand von sekundären, gerichteten



Abb. 3 A: Störungsletten und zerbrochenes Gesteinsmaterial in einer jungen Störung (dunkelgrauer Bereich), mit Hammer als Maßstab, B: Wasseraustritt an einer ans Grundwassersystem angeschlossenen Kluft

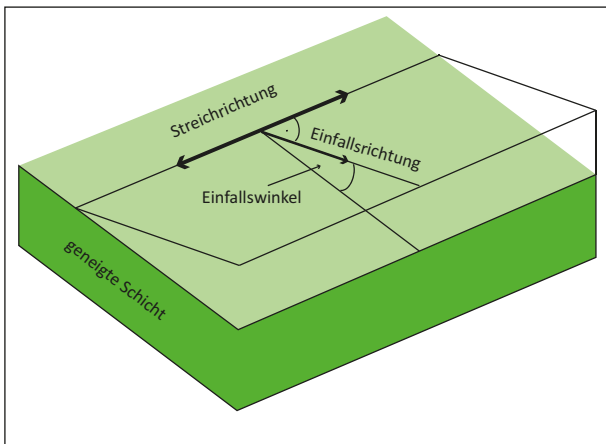


Abb. 4 Blockbild der räumlichen Beziehung zwischen Einfallrichtung, Einfallswinkel und Streichen einer Fläche

Mineralneubildungen, sogenannten Harnischen, rekonstruierbar. Alte Klüfte können ebenfalls durch sekundäre Mineralneubildungen, die hauptsächlich aus zirkulierenden wässrigen Lösungen (Fluiden) ausgeschieden werden, „verheilen“, d. h. wieder ver-

kittet werden. Junge, aktive oder offene Störungen sind häufig durch Störungsletten (toniges Gesteinsmehl) und lockere Gesteinsfragmente gekennzeichnet (Abb. 3A). Dadurch stellen sie eine Wegsamkeit im Gesteinskörper dar und sind potenziell an das Grundwassersystem angeschlossen, erkennbar an Wasseraustritten oder Pflanzenbewuchs (Abb. 3B). Alle zusätzlichen Eigenschaften einer Kluft oder Störung (sekundäre Minerale, Harnische, Wasserführung etc.) werden zusammen mit der Messung der räumlichen Orientierung erfasst, um die Trennflächen weiter zu charakterisieren. Die Kluftmessung an sich erfolgt mit dem Geologenkompass, der sowohl die Einfallrichtung (Abweichung von Nord in °) als auch den Einfallswinkel (Abweichung von der Horizontalen in °) anzeigt. Die Streichrichtung verläuft senkrecht zur Einfallrichtung (Abb. 4) und wird im Nachhinein berechnet. Insgesamt wurden mehr als 25 aktive und stillgelegte Steinbrüche sowie kleinere Aufschlüsse besucht und mehrere tausend Kluftmessungen durchgeführt.

Auswertung

Die Messwerte werden mithilfe von Kluftrosen und dem Schmidt'schem Netz statistisch ausgewertet. Eine Kluftrose stellt die Häufigkeit der Streichrichtungen, die in eine definierte Winkelspanne (z. B. 10°) fallen, im Vollkreis dar. Das Schmidt'sche Netz

hingegen kombiniert in der übersichtlichen Polpunktendarstellung (der Polpunkt steht senkrecht auf der zugehörigen Fläche) die Einfallrichtung mit dem Einfallswinkel, sodass ebenfalls im 360°-Kreis die Häufigkeit dieser Parameter sichtbar wird.



Abb. 5 Kluftsysteme verschiedener Steinbrüche, A: Engständiges und ebenmäßiges Kluftsystem mit Wasseraustritt, B: Chaotisch erscheinendes Kluftsystem (Bildbreite 4 m)

Ergebnisse

Die Kluftsysteme in jedem Steinbruch bzw. in jedem Aufschluss sind einzigartig und können kleinräumig mitunter stark variieren. Einige Steinbrüche zeigen ein engständiges und ebenmäßiges Kluftsystem, andere eher eine weitständige oder chaotisch erscheinende Verteilung (Abb. 5). In manchen Aufschlüssen fallen besonders häufig mylonitische Scherzonen,

durch tektonische Bewegung zerriebene und strukturelose Gesteinspartien, oder Klüfte mit Harnischbelegen auf, andere sind hauptsächlich durch Abkühlungs- oder Extensionsklüfte ohne Relativbewegung geprägt. Diese im Gelände sichtbaren Unterschiede werden auch bei der Auswertung und Interpretation deutlich.

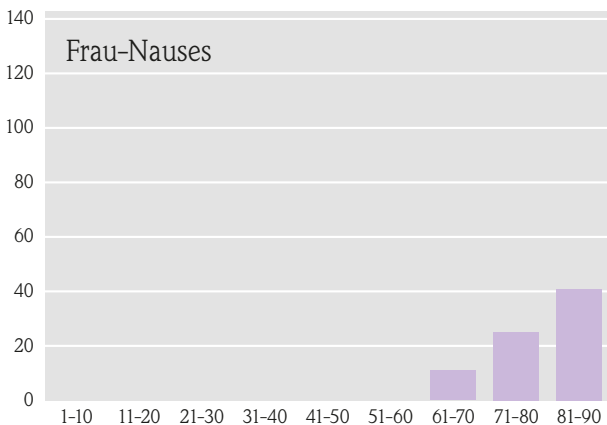
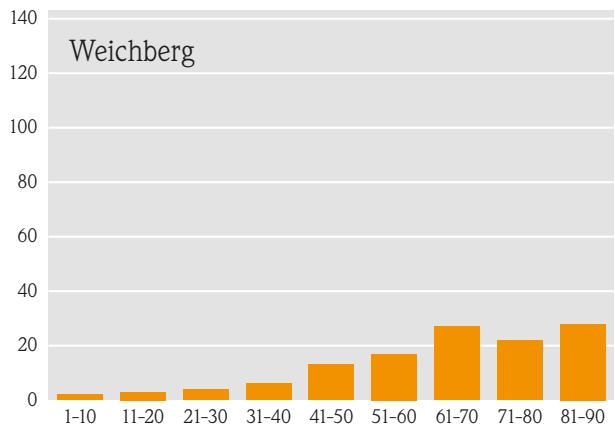
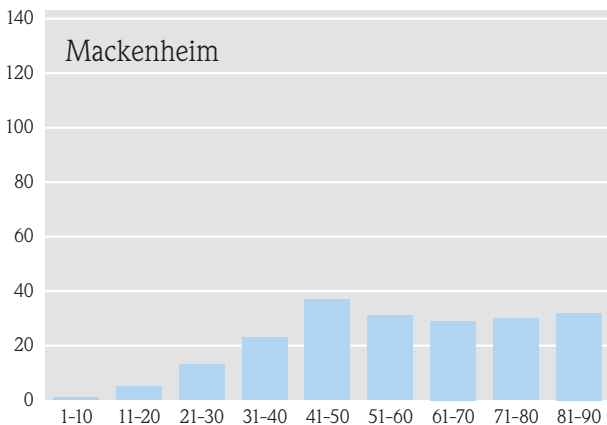
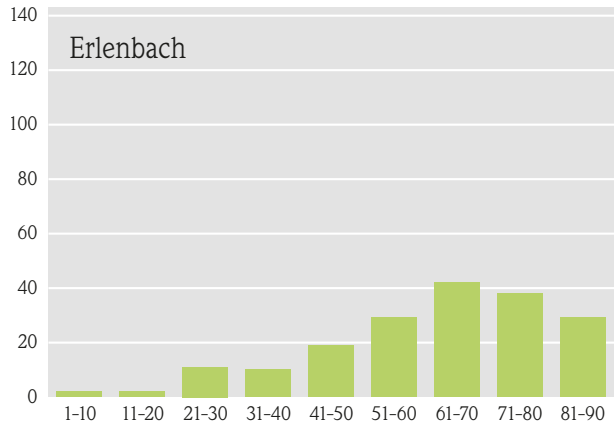
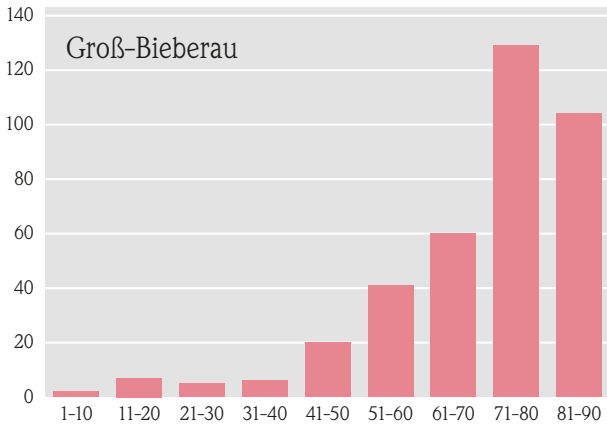


Abb. 6 Häufigkeitsverteilung der gemessenen Einfallswinkel

Bei der Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Einfallswinkel fällt auf, dass sich die verschiedenen Regionen im Odenwald maßgeblich voneinander unterscheiden, hier an einigen Beispielen dargestellt (Abb. 6). Groß-Bieberau, als Repräsentant des nördlichen Bergsträßer Odenwaldes, zeigt eindeutig eine Tendenz zu steil stehenden Klüften mit einem Maximum bei 71–80°. Erlenbach, im „mittleren“ Bergsträßer Odenwald gelegen, weist ein ähnliches Verteilungsmuster wie Groß-Bieberau auf, ist allerdings zu niedrigeren Einfallswinkeln verschoben, deren Maximum bei 61–70° liegt. Der Steinbruch Mackenheim im südlichen Bergsträßer

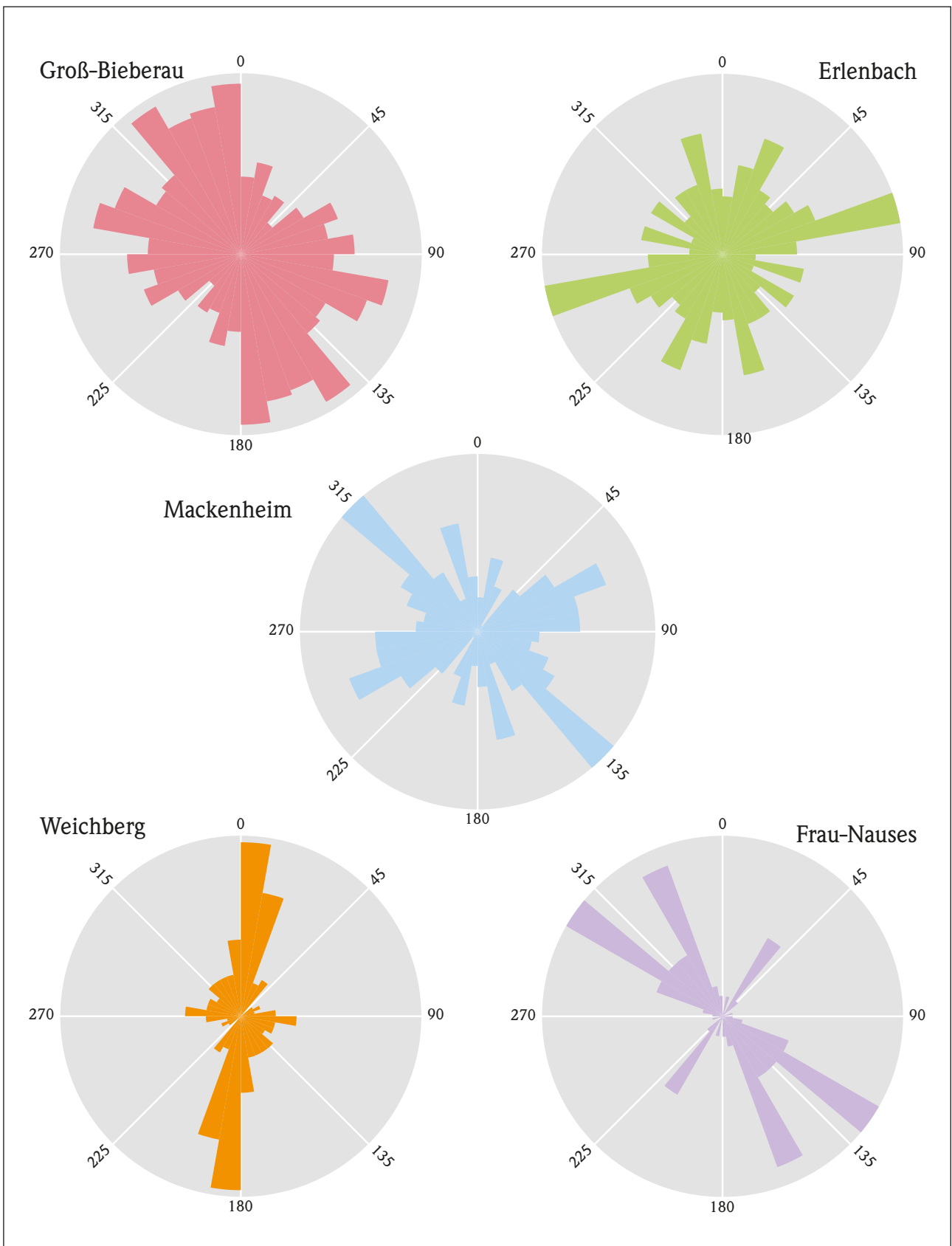


Abb. 7 Klutfrosen der gemessenen Streichrichtungen

Odenwald ist durch unterschiedliche Einfallswinkel annähernd gleichermaßen geprägt, von denen besonders die flachen Winkel $41\text{--}50^\circ$ dominieren. Der Böllsteiner Odenwald ist durch den Steinbruch Weichberg repräsentiert, dessen Häufigkeitsverteilung stark an die aus Erlenbach erinnert, jedoch zwei fast gleichwertige Maxima bei $61\text{--}70^\circ$ und $81\text{--}90^\circ$ zeigt. Der stillgelegte Steinbruch bei Frau-Nauses liegt im Buntsandstein Odenwald und fällt besonders durch die fehlenden flachstehenden Klüfte auf. Dort liegt das Maximum bei Einfallswinkeln zwischen $81\text{--}90^\circ$.

Werden die Streichrichtungen (Orientierung der Klüfte im Raum) dieser Steinbrüche verglichen, so werden ebenfalls markante Unterschiede deutlich (Abb. 7). Groß-Bieberau (Diorit) ist von herzynischen (NW–SE) bis eggischen (NNW–SSE) Streichrichtungen geprägt, während Erlenbach (Biotitgranit) ein deutliches Maximum der variskischen (NE–SW) Streichrichtung zeigt. Im Steinbruch Mackenheim (Biotit-Plagioklas-Gneis) gibt es zwei fast gleichwertige Maxima der herzynischen und variskischen Richtung. Die Gneise des Böllsteiner Odenwaldes (Weichberg) sind durch Klüfte mit rheinischem Streichen (NNE–SSW) charakterisiert, während die Sandsteine im Buntsandstein Odenwald (Frau-Nauses) ebenfalls von herzynisch bis eggisch streichenden Klüften dominiert sind.

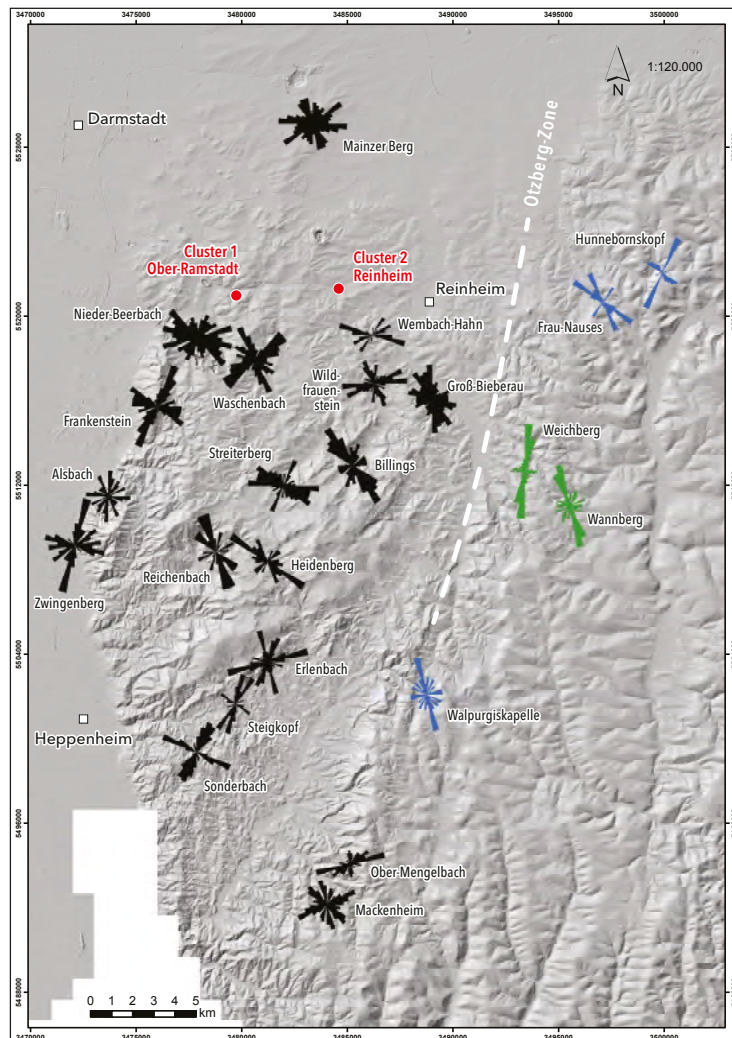


Abb. 8 Geographische Darstellung der Klüftrosen (Einfallswinkel der Klüfte $>60^\circ$) im Projektgebiet, schwarz: Bergsträßer Odenwald, grün: Böllsteiner Odenwald, blau: Buntsandstein Odenwald

Abb. 8 gibt einen geographischen Überblick aller Klüftrosen des Odenwaldes (Einfallswinkel $> 60^\circ$) mit dem digitalen Geländemodell im Hintergrund. Hierbei lassen sich besonders die lokalen Variationen und Unterschiede erkennen. Aufschlüsse wie Zwingenberg und Frankenstein, die in direkter Nähe zum Oberrheingraben liegen, zeichnen deutlich die Störungsmuster des Grabenbruchs und die räumliche Orientierung des Grabens selbst, entsprechend dem rheinischen Streichen, nach (NNE–SSW und lokal NNW–SSE). Nur wenig weiter östlich weisen die aufgeschlossenen Gesteinskörper bereits ein deutlich anderes Klüftmuster auf und die rheinische Richtung verschwindet fast vollständig. So wird im restlichen Bergsträßer Odenwald die NW–SE Richtung (steil herzynisch) immer dominanter, obwohl lokal

auch die variskische Richtung (NE–SW) hinzukommen kann. Letztere ist im zentralen und südlichen Bergsträßer Odenwald vermehrt zu erkennen. Im Böllsteiner Odenwald sowie in den Aufschlüssen in relativer Nähe zur Otzberg Zone (Groß-Bieberau, Walpurgiskapelle) herrschen hingegen Klüftsysteme mit eggischer (NNW–SSE) und rheinischer Richtung vor, wovon letztere mit der Orientierung der Otzberg-Störung übereinstimmt. Die Aufschlüsse im nördlichen Buntsandstein-Odenwald (Deckgebirge) sind hauptsächlich durch NNE–SSW und WNW–ESE orientierte Klüfte charakterisiert, vergleichbar mit Klüften, die mit dem heutigen Spannungsfeld und einer NW–SE-gerichteten Kompression (σ_1) assoziiert werden (vgl. Stress Map Germany, REITER et al. 2016).

Interpretation in Bezug auf die Erbebenserie 2014-15

Im Bereich der Erbebencluster von 2014–15 im nördlichen Bergsträßer Odenwald ist keine eindeutige, großräumig gleichbleibende Vorzugsrichtung der Klüftrosen zu erkennen. Auffällig ist hingegen, dass in direkter Umgebung der Erbebencluster ein Wechsel der Vorzugsrichtungen von rheinisch-geprägt in Rheingrabennähe, zu flach bis steil herzynisch streichenden Klüften im nördlichen Bergsträßer Odenwald zu verzeichnen ist (Abb. 8). Dabei fallen die Klüftrosen des Frankenstein Plutons, im Gegensatz zu den vorherrschenden Vorzugsrichtungen im Neutsch- und Neunkirchen-Komplex, durch ihre heterogene Verteilung auf. Dies könnte auf ein kleinräumig variierendes Spannungsfeld hindeuten, möglicherweise in Abhängigkeit von der lokalen Geologie. Besonders der Frankenstein Pluton weist mit seinen gabbroiden Gesteinen eine außerordentlich hohe Druckfestigkeit auf, was in

Experimenten mit verschiedenen Gesteinstypen gezeigt werden konnte. Infolgedessen reagiert dieser schwer deformierbare Pluton unter Umständen anders auf das vorherrschende Spannungsfeld als die in direkter Nachbarschaft anstehenden Granitoide des südlich und östlich gelegenen Neutsch- sowie des Darmstadt-Komplexes im Norden. Diese durch die unterschiedlichen Gesteinseigenschaften verursachte lokale Rotation des Spannungsfeldes kann mit ein Grund für das Auftreten der Erdbeben in dieser Region sein. Vergleicht man die Lage der Erdbebenherde und die tektonischen/geomorphologischen Lineamente in einem größeren Maßstab bis zum Rheinischen Schiefergebirge, kann die Orientierung der Lineamente im Odenwald als Fortsetzung des tertiären Idsteiner Grabens, Limburger Beckens und der Niederrheinischen Bucht (welche ebenfalls zur seismisch aktiven Zone gehört) interpretiert werden.

Dank

Martina Schaffner und Michaela Hoffmann sei an dieser Stelle für die Unterstützung bei der Erstellung und Überarbeitung der Abbildungen gedankt.

Literatur

- AHORNER, L. (1968): Erdbeben und jüngste Tektonik im Braunkohlenrevier der Niederrheinischen Bucht. – Z. dt. geol. Ges., **118**: 150–160; Hannover.
- HEIDBACH, O., RAJABI, M., REITER, K., ZIEGLER, M.; & WSM Team (2016): The World Stress Map database release 2016. – DOI 10.5880/WSM.Rel2016.001.
- HOMUTH, B. (2015): Hochauflösende Erfassung der Seismizität im nördlichen Oberrheingraben: Schwarmbeben, Spannungsregime und seismische Gefährdung. – Diss. Goethe-Univ. Frankfurt a.M.: XX, 191 S.; Frankfurt a.M.
- HOMUTH, B. & RÜMPKER, G. (2016): The 2014–2015 earthquake series in the northern Upper Rhine Graben, Central Europe. – J. Seismol., **21** (1): 83–98; Dordrecht. – DOI: 10.1007/s10950-016-9584-6.
- HOMUTH, B., RÜMPKER, G., DECKERT, H. & KRACHT, M. (2014): Seismicity of the northern Upper Rhine Graben – Constraints on the present-day stress field from focal mechanisms. – Tectonophys., **632**: 8–20; Amsterdam.
- LANDSBERG, H. (1931): Der Erdbebenschwarm von Groß-Gerau 1869–1871. – Gerl. Beitr. Geophys., **34**: 367–392; Leipzig.
- REITER, K., HEIDBACH, O., MÜLLER, B., REINECKER, J. & RÖCKEL, T. (2016): Stress Map Germany 2016. – GFZ Data Services. [<http://doi.org/10.5880/WSM.Germany2016>].
- RÜMPKER, G., HOMUTH, B., DECKERT, H., ABE, S., JOSWIG, M. & BLASCHECK, P. (2016): Verbundprojekt SiMoN: Seismisches Monitoring im Zusammenhang mit der geothermischen Nutzung des nördlichen Oberrheingrabens – Teilprojekt 1: Installation und Betrieb eines Langzeitmonitorings, nanoseismische Messungen, Spannungsfeldanalysen – Abschlussbericht SiMoN-Teilprojekt 1. – DOI: 10.2314/GBV:870295918.
- SCHUMACHER, M.E. (2002): Upper Rhine Graben: Role of preexisting structures during rift evolution. – Tectonics, **21** (1): 6–1–6–17; Washington, D.C. – DOI: 10.1029/2001TC900022, 2002.
- ZIEGLER, P.A. (1992): European Cenozoic rift system. – Tectonophys., **208**: 91–111 Amsterdam.