

Gutachten
zur Erschütterungsentwicklung während des
Grubenwasseranstiegs auf -380 mNHN im
Wasserhebungsbereich Haus Aden

Auftraggeber:

RAG Aktiengesellschaft
Unternehmensbereich Standort-/Geodienste
44649 Herne

Erstellt von:

Prof. Dr. - Ing. Michael Alber
von der IHK zu Dortmund öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für Ingenieurgeologie und Felsmechanik

Alber GeoMechanik
Brögerstr. 32
44357 Dortmund



44 Seiten

39 Abbildungen

10 Tabellen

Datum: 21. September 2023

Inhalt

1.	Veranlassung	2
2.	Aufbau des Gutachtens	3
3.	Verwendete Unterlagen	3
4.	Felsmechanische Grundlagen	4
4.1	Eigenschaften von Trennflächen in-situ	7
5.	Betrachtungsraum	8
6.	Bisheriger Grubenwasseranstieg im Wasserhebungsbereich Haus Aden bis 2023	9
6.1	Erschütterungen während des Grubenwasseranstiegs im Zeitraum 10.06.2019 bis 31.05.2023	11
7.	Ingenieurgeologisches Modell auf den tiefsten Sohlen des Abbaubetriebes Heinrich Robert	15
7.1	Gebirgsmechanisches Modell auf den tiefsten Sohlen des Abbaubetriebes Heinrich Robert	18
7.2	Beurteilung der abbaubedingten Erschütterungen auf den tiefsten Sohlen des Abbaubetriebes Heinrich Robert zwischen 2003 - 2006	18
8.	Versagensmechanismen bei Grubenwasseranstieg	21
9.	Abschätzung der Magnituden und Schwinggeschwindigkeiten aus Auslösungsmechanismen durch weiteren Grubenwasseranstieg in der Teilprovinz Heinrich Robert	23
10.	Analyse der Magnituden und Schwinggeschwindigkeiten aus Auslösungsmechanismen durch Grubenwasseranstieg bzw. Abbau in den Bereichen Haus Aden und Grillo sowie im Bereich Monopol	32
11.	Abschätzung der Magnituden und Schwinggeschwindigkeiten aus Auslösungsmechanismen durch weiteren Grubenwasseranstieg in den Teilprovinzen Monopol und Haus Aden/Grillo	36
12.	Abschätzung des Potentials der Aktivierung von großen Störungen im Wasserhebungsbereich Aden	37
13.	Zusammenfassung	42

1. Veranlassung

Der Unterzeichnende wurde im Juni 2023 von der RAG AG beauftragt, ein Gutachten zu den möglichen Erschütterungen während des Grubenwasseranstiegs auf -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Haus Aden zu erstellen. Zu behandelnde Fragestellungen waren:

- Ist das Auftreten von Erschütterungen an den Grubenwasseranstieg gekoppelt?
- Welche Schwinggeschwindigkeiten durch Erschütterung können beim Grubenwasseranstieg auf -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Haus Aden auftreten?
- Ist nach Beendigung des Grubenwasseranstiegs auf -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Haus Aden das Auftreten weiterer Erschütterungen ausgeschlossen?

2. Aufbau des Gutachtens

Das Gutachten beschreibt in Abschnitt 4 die felsmechanischen Grundlagen. Hier wird v.a. auf die Wirkung von Wasserdruck auf Gestein/Gebirge und auf Trennflächen eingegangen. Abschnitt 5 beschreibt den Betrachtungsraum und in Abschnitt 6 wird der bisherige Grubenwasseranstieg im Wasserhebungsbereich Haus Aden und die dabei aufgetretenen Erschütterungen behandelt. In Abschnitt 7 werden die Erschütterungen beim Strebbau im Bergwerk Ost diskutiert und ein geologisch-geotechnisches Modell vorgestellt. Hier werden Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten definiert und die in-situ Gebirgsspannungen beschrieben. In Abschnitt 7.2 werden die Erschütterungen während des Abbaus analysiert und es wird festgestellt, dass geogene Schwächezonen im Gebirge (Trennflächen oder Störungen) überbeansprucht wurden.

In Abschnitt 8 werden die Versagensmechanismen im Gebirge bei Grubenwasseranstieg dargelegt und in Abschnitt 9 die Erschütterungen aus dem Grubenwasseranstieg im Bereich Heinrich Robert analysiert. Es wird festgestellt, dass auch in dieser Situation geogene Schwächezonen im Gebirge (Trennflächen oder Störungen) überbeansprucht werden und zu den Erderschütterungen führen. Ein Vergleich der Größen der Bruchflächen ohne und mit Grubenwasser erlaubt die Abschätzung eines mutmaßlich aktivierten Anteils einer bestehenden Schwächezone. Hieraus werden entsprechende Magnituden und Schwinggeschwindigkeiten beim weiteren Grubenwasseranstieg auf -380 mNHN prognostiziert. Derselbe Ansatz wird in den Abschnitten 10 und 11 für weitere Bereiche (Haus Aden, Grillo und Monopol) angewendet. In Abschnitt 12 werden mögliche Erschütterungen an großen Störungen durch Grubenwasseranstieg behandelt. Abschnitt 13 fasst das Gutachten zusammen und beantwortet abschließend die in Abschnitt 1 gestellten Fragen.

3. Verwendete Unterlagen

- Alber, M.; Fritschen, R.; Bischoff, M. and Th. Meier. (2009). Rock mechanical investigations of seismic events in a deep longwall coal mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. (46), pp.408-420.
- Alber, M. (2013). Strength of faults – A concern for mining engineers? *Proc. EUROCK2013: Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment – Kwasniewski & Łydzba (eds)© 2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00080-3*, pp. 545-540.
- Alber, M. and J. Schwarz (2015). Experiments on low-friction discontinuities from carboniferous strata in the Ruhr-Mining district. *Proc. EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, Schubert & Kluckner (eds). ÖGG, Salzburg, Austria*. pp. 529-534.
- Clostermann, M.; Alber, M.; Placzek, D. und A. Sroka (2020). Gutachterliche Stellungnahme zu den Themen „Einwirkungsrelevanz des Altbergbaus, Bemessung von Einwirkungs- und Gefährdungsbereichen und Einfluss von Grubenwasserstandsänderungen“. 288 p. <https://www.bra.nrw.de/energie-bergbau/bergbaufolgen/altbergbau-risikomanagement>.

- DMT GmbH & Co. KG (2023). Daten der Erschütterungen während des Abbaus im heutigen Wasserhebungsbereich Haus Aden.
- Erdbebendienst NRW (2019). https://www.gd.nrw.de/gg_le_erdbebenmeldung.php?id=307.
- FloodRisk (2003). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FloodRisk des KIT.
- Gay, N.C and W.D. Ortlepp (1979). Anatomy of a mining-induced fault zone. Geological Society of America Bulletin, Part 1, pp. 47-58.
- IHS Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH (2013). Anlage 181_04_002_Tektonik_Karbon_BW_Ost zum Gutachten zu den Bodenbewegungen im Rahmen der stufenweisen Flutung der zentralen Wasserhaltung Ost -Ausweisung von Risikobereichen und Monitoringkonzept – Anstiegsphase bis -605 mNHN.
- Knoll, P. (2016). Induzierte seismische Ereignisse beim Anstieg des Grubenwassers in stillgelegten Bergwerken – Geomechanische Charakteristika. Leibnitz Online, Nr. 24. ISSN 12683-3285.
- National Research Council (2013). Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. US National Academy of Sciences. <https://www.nap.edu/catalog/13355/induced-seismicity-potential-in-energy-technologies>.
- Ortlepp, W.D. (1992). The design of support for the containment of rockburst damage in tunnels; an engineering approach- Proc Int Symp Rock Support. Kaiser, P. K. & McCreath, D. R. (eds). pp. 593-609.
- RAG AG (2023). Risskarten, Grubenwasserstände und weitere Information zum Wasserhebungsbereich Haus Aden.
- Rische, M.; Fischer K.D. & W. Friedrich (2023). FloodRisk – Induced seismicity by mine flooding – Observation, characterization and relation to mine water rise in the eastern Ruhr area (Germany). Z. Dt. Ges. Geowiss. (J. Appl. Reg. Geol.), 173(4), p. 551–564, Ruhr-Universität Bochum, seismisches Observatorium (2023). Daten der Erschütterungen während des Grubenwasseranstiegs im Wasserhebungsbereich Haus Aden.
- Rummel F. (2002). Crustal stress derived from fluid injection tests in boreholes. In: Sharma VM, Saxena KR, editors. In-Situ characterisation of rocks. Lisse: Balkema; pp. 205–44.
- Wells, D.L and K.J. Coppersmith (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002.
- Westfälischer Anzeiger (2019). <https://www.wa.de/hamm/pelkum-ort370530/leichtes-erdbeben-schreckt-viele-buerger-westen-stadt-hamm-ursache-moeglicherweise-bergbau-13217410.html>).

4. Felsmechanische Grundlagen

Wenn (verbundene) Poren im Gestein mit Wasser gefüllt sind und ein biaxiales Spannungsfeld P_1 und P_3 angesetzt wird, dann sind die effektiven Spannungen im Gestein geringer, da ein Teilbetrag des externen Spannungsfeldes vom inkompressiblen Wasser übernommen wird. Dieses Porenwasser erzeugt dann einen Porenwasserdruck p .

Die effektiven Hauptnormalspannungen σ_1 und σ_3 sind dann

$$\sigma_1 = P_1 - p \quad (1)$$

$$\sigma_3 = P_3 - p \quad (2)$$

Durch die Verminderung der Hauptnormalspannungen kann die Festigkeit des Gebirges / Gesteins überschritten werden und Versagen findet statt. Diese Situation ist in Abbildung 1 beschrieben.

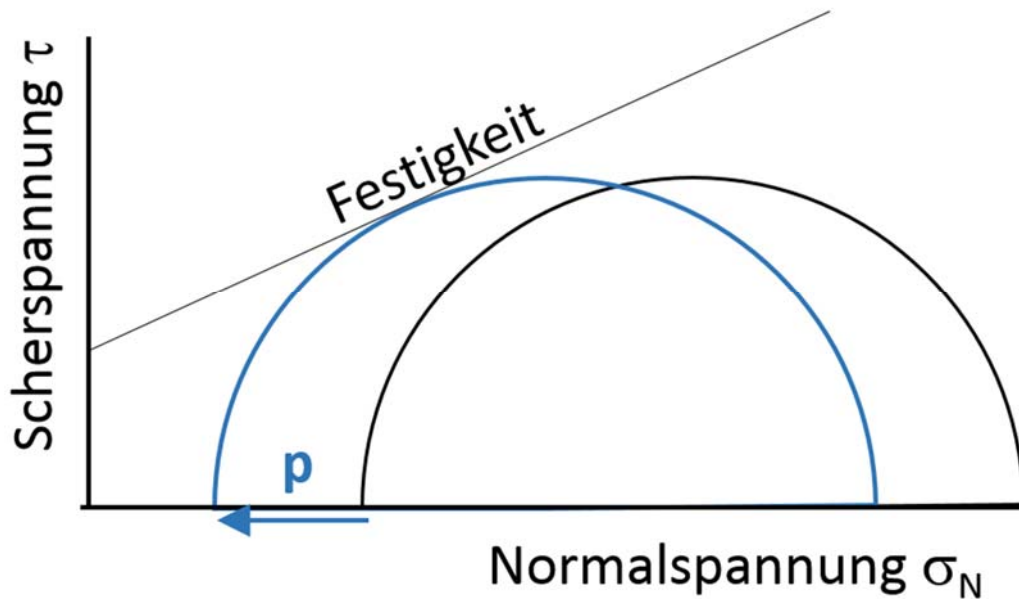


Abb. 1 Auswirkung von Porenwasserdruck. Die effektiven Spannungen werden um den Porenwasserdruck p vermindert. Bei genügend hohem Porenwasserdruck kann es zum Gesteins- / Gebirgsversagen kommen (der Spannungskreis berührt die Linie der Festigkeit).

Der Einfluss von Wasserdruck auf Trennflächen wirkt sich hingegen selektiv auf die Normalspannung aus. Die felsmechanischen Grundlagen werden nachfolgend am Beispiel der fluidbedingten Veränderung von Normal- und Scherspannungen auf einer Fläche mit dem Winkel θ zu σ_1 erläutert. Die Bezeichnungen sind in Abbildung 2 erklärt. Zur Erläuterung werden die Mohr'schen Formeln benutzt:

$$\sigma_N = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \quad (4)$$

daraus wird

$$\sigma_N = \frac{(P_1 - p) + (P_3 - p)}{2} + \frac{(P_1 - p) - (P_3 - p)}{2} \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\tau = \frac{(P_1 - p) - (P_3 - p)}{2} \sin 2\theta \quad (6)$$

d.h.

$$\sigma_{N \text{ eff}} = \sigma_N - p \quad (7)$$

$$\tau_{\text{eff}} = \tau \quad (8)$$

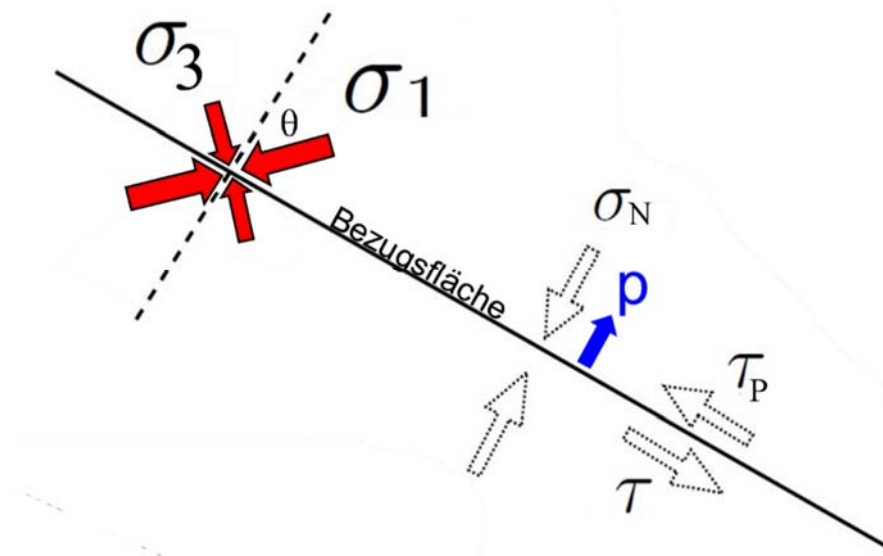


Abb. 2 Spannungen auf einer Bezugsfläche. Die in-situ Gebirgsspannungen σ_1 und σ_3 führen zu einer Normalspannung σ_N und einer Scherspannung τ auf der Bezugsfläche. Unter Berücksichtigung des Reibungswinkels ϕ weist die Fläche eine Spitzenscherfestigkeit τ_P auf. Wasserdruck p auf der Fläche reduziert die Normalspannung σ_N und führt zu einer geringeren Scherfestigkeit τ_P .

Die Normalspannung σ_N auf einer Bezugsebene wird also durch den Porenwasserdruck p zur effektiven Normalspannung $\sigma_{N \text{ eff}}$ reduziert. Die Scherspannung τ auf einer Bezugsfläche bleibt unbeeinflusst vom Porenwasserdruck p , so dass $\tau_{\text{eff}} = \tau$ ist.

Die Scherfestigkeit einer Trennfläche (Kluft, Störung, Bankungsfuge...) wird in den Geowissenschaften durch das Mohr-Coulomb Kriterium beschrieben:

$$\tau_P = c + \sigma_{N \text{ eff}} \cdot \tan \phi \quad (9)$$

Hierbei sind τ_P die Spitzenscherfestigkeit, c die Kohäsion, $\sigma_{N \text{ eff}}$ die effektive Normalspannung und ϕ der Reibungswinkel.

Eine völlig durchtrennte, singuläre Fläche ohne Materialbrücken weist keine Kohäsion c auf. Für die Scherfestigkeit gilt:

$$\tau_P = \sigma_{N \text{ eff}} \cdot \tan \varphi. \quad (10)$$

Gleichungen (9) und (10) für die Festigkeit zeigen, dass sich auch die Scherfestigkeit vermindert, wenn die Normalspannung σ_N durch Wasserdruck herabgesetzt wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei Vorhandensein von Wasserdruck die Scherspannung unverändert bleibt, die Scherfestigkeit aber herabgesetzt wird. Nimmt der Wasserdruck genügend zu, so wird die Scherfestigkeit immer geringer, bis sie kleiner als die unveränderte Scherspannung ist. Die Trennfläche versagt und ein seismisches Ereignis kann ausgelöst werden.

Die Mechanik des Versagens einer Trennfläche ist in Abb. 3 dargestellt. Wird die Spitzenfestigkeit τ_P einer Trennfläche überschritten, kommt es zu Spannungsabbau durch die Verschiebung auf der Trennfläche. Dabei kann es zu einem messbaren, seismischen Ereignis kommen. Dieser Versagensprozess kann mehrmals vorkommen, bis die Trennfläche nur noch eine Restfestigkeit τ_R aufweist. Hierbei wird der Spannungsabfall und damit die an der Tagesoberfläche messbare maximale Schwinggeschwindigkeit abnehmen, je häufiger der Versagensprozess stattfindet.

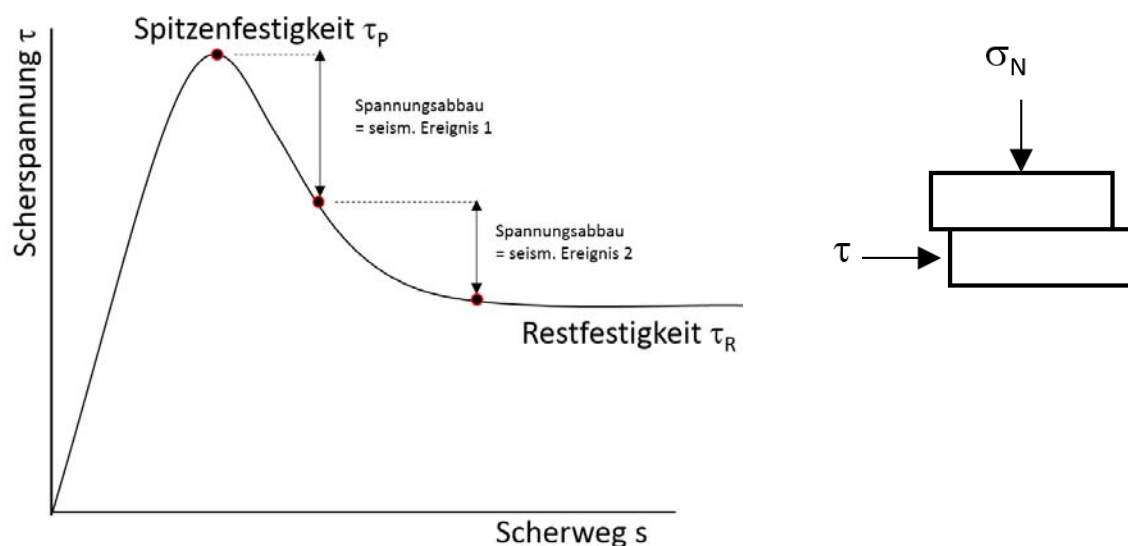


Abb. 3 Scherfestigkeit einer Trennfläche mit Spitzen- und Restscherfestigkeit.

4.1 Eigenschaften von Trennflächen in-situ

Die in Abbildung 2 dargestellte Trennfläche sowie das mechanische Verhalten (Abb. 3) stellen eine Idealisierung der realen Verhältnisse dar. Die Vorstellung, dass nur eine singuläre

Trennfläche im Gebirge eine exakt definierte Schwächezone im Gebirge darstellt, entspricht nicht geowissenschaftlichen Beobachtungen. Es können drei Grundtypen von Schwächebereichen im Gebirge definiert werden:

- Die oben angesprochenen, singulären Trennflächen können im Gebirge vereinzelt auftreten. Die Scherfestigkeit dieser Trennfläche ist durch Gleichung (10) beschrieben. Solche ebenen und relativ glatten Trennflächen weisen nach dem Erreichen der Spitzenscherfestigkeit einen geringen Spannungsabfall (Siehe Abb. 3) auf und werden in der Regel als aseismisch angenommen.
- Trennflächen im Gebirge weisen normalerweise Materialbrücken auf. Somit weisen solche Trennflächen eine Kohäsion auf und Gleichung (9) wird angewendet. Kommt es durch Überbeanspruchung einer kohäsiven Trennfläche zu deren Versagen, dann werden die Materialbrücken abgeschert und es kommt zu einem vollständigen Verlust der Kohäsion. Damit ist der Spannungsabfall (siehe Abb. 3) beim Überschreiten der Scherfestigkeit größer als bei glatten Trennflächen und es können seismische Ereignisse registriert werden.
- Im realen Gebirge sind jedoch selten einzelne, dominante Trennflächen mit und ohne Materialbrücken zu finden. Gay und Ortlepp (1979) dokumentierten Störungszonen um aktive Bergwerke und fanden Strukturen in Form von ausgeprägten Schwächezonen. Diese Schwächezonen bestehen aus einzelnen Trennflächen mit variierenden Raumlagen und unvollständiger Durchtrennung. Diese Schwächezonen weisen somit auch eine Kohäsion auf und Gleichung (9) wird angewendet. Kommt es durch Überbeanspruchung einer Schwächezone zu deren Versagen, dann werden die Materialbrücken abgeschert. Einzelne, echte Trennflächen können sich verbinden und es kommt zu einem vollständigen Verlust der Kohäsion. Damit ist der Spannungsabfall (siehe Abb. 3) beim Überschreiten der Scherfestigkeit groß und es können seismische Ereignisse auftreten.

Die drei Grundtypen sind in folgender Abbildung 4 schematisch dargestellt.

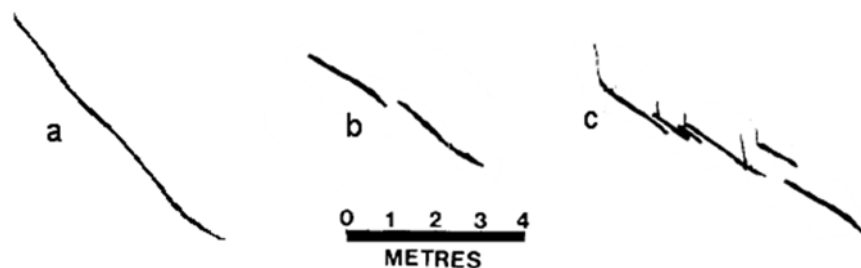


Abb. 4 Drei Grundtypen von Trennflächen im Gebirge (modifiziert nach Gay & Ortlepp, 1997): a) glatte, ebene und persistente Trennfläche mit geringem Erschütterungspotential; b) Trennfläche mit Materialbrücken, die beim Versagen Erschütterungspotential aufweist; c) Schwächezone mit mehreren versetzten Trennflächen und Materialbrücken, die beim Versagen Erschütterungspotential aufweisen.

5. Betrachtungsraum

Das Gutachten behandelt den Bereich des Kohlenabbaus im BW Ost, das durch den beantragten Grubenwasseranstieg bis -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Haus Aden betroffen ist. Der Betrachtungsraum ist in Abbildung 5 dargestellt und umfasst die Abbaubereiche in den ehemaligen Bergwerken Hansa, Tremonia, Kaiserstuhl, Minister Stein, Victoria 3-4, Gneisenau, Scharnhorst, Kurl, Kurl 1, Victoria 1-2, Haus Aden, Haus Aden-Nord, Werne, Monopol Nord, Grillo, Heinrich Robert und Radbod.

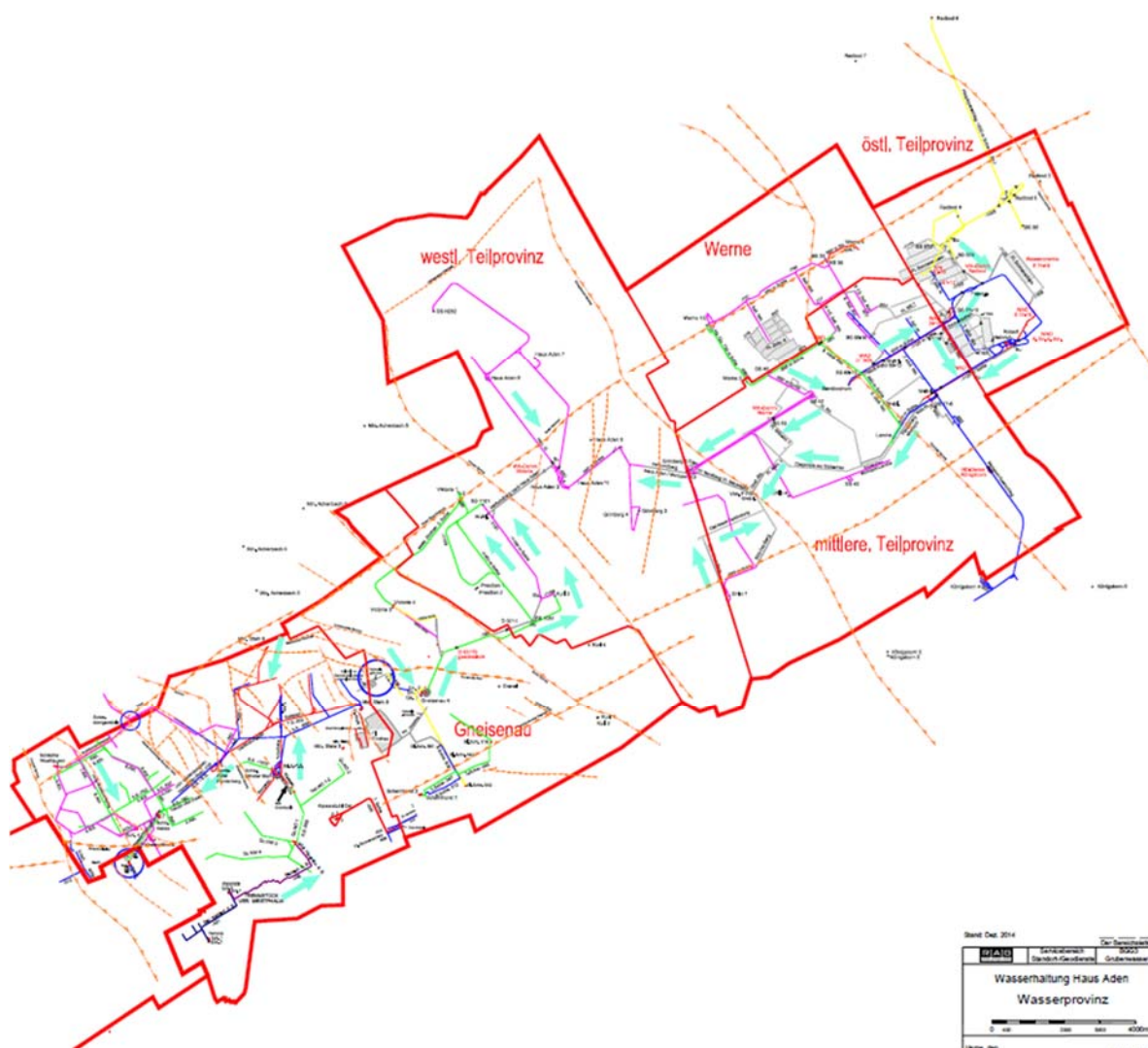


Abb. 5 Betrachtungsraum und (Teil-)Wasserprovinzen (RAG, 2023).

6. Bisheriger Grubenwasseranstieg im Wasserhebungsbereich Haus Aden bis 2023

Im Wasserhebungsbereich Haus Aden erfolgte ein Grubenwasseranstieg seit unterschiedlichen Zeiten der Einstellung der Wasserhebung (Tab. 1). Für jedes der in Abschnitt 5 beschriebenen Bergwerke wird exemplarisch die Entwicklung des Grubenwasserstands in Abbildung 6 gezeigt.

Tab. 1 Einstellung der Wasserhebung in den Bergwerken des Wasserhebungsbereichs Haus Aden.

Radbod	Haus Aden	Heinrich Robert	Monopol	Kurl 1	Kurl 3	Minister Stein 4
2.03.2013	26.09.2019	23.06.2013	27.09.2011	1978	20.01.2021	6.09.1989

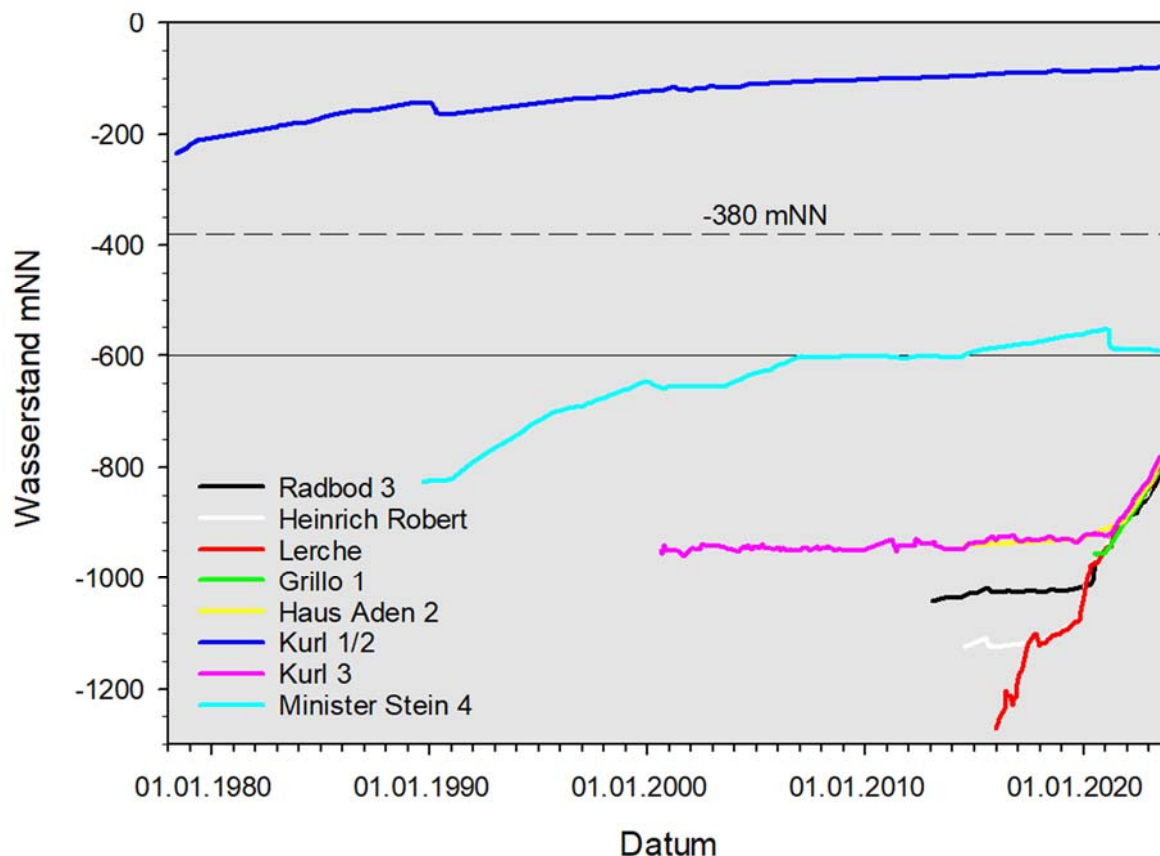


Abb. 6 Grubenwasseranstiege im Wasserhebungsbereich Haus Aden.

Für die folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass der Wasserstand in den verschiedenen Abbaubereichen auf der gleichen Höhe wie in den Lotungsstellen vorliegt. Damit wird angenommen, dass die in Abbildung 6 gezeigten Grubenwasserstände auch gleichzeitig das Druckpotential auf Schwächezonen in einem tieferen Niveau definieren. Durch den hohen Durchbauungsgrad und die zahlreichen Strecken erscheint diese Annahme realistisch. Lokal wird es im realen Gebirge auf Grund der vermutlich geringen Gebirgsporeabilität kurzfristig immer eine Potentialdifferenz geben. Dies bedeutet, dass eine zeitverzögerte Druckbeaufschlagung z.B. auf einer Schwächezone vorliegt und ein eventuelles Versagen dieser Schwächezone nicht direkt aus den Druckhöhen in Abbildung 6 berechnet werden kann. Dieser Aspekt der zeitlichen Verzögerung wird in einem Report des National Research Council (2013) betont.

6.1 Erschütterungen während des Grubenwasseranstiegs im Zeitraum 10.06.2019 bis 31.05.2023

Die Ruhr-Universität Bochum (RUB, 2023) führte im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojektes "FloodRisk" Untersuchungen der mikroseismischen Aktivitäten ab dem 10.06.2019 aus. In diesem Gutachten werden die RUB-Ereignisse bis zum 31.05.2023 betrachtet. Es sind keine Daten aus dem Zeitraum vor dem 10.06.2019 verfügbar. In diesem Zeitraum wurden 2359 Ereignisse mit Magnituden M_L zwischen $-0,9 \leq M_L \leq 2,6$ detektiert. Die Plausibilität der maximalen Magnitude 2,6 wird in Kapitel 9 diskutiert und bewertet. Die Erschütterungen wurden durch seismische Stationen erfasst, die die Lokalisierung von Ereignissen in der Ebene gut auflösen. Die Lage der Ereignisse in der Tiefe ist ungenau, liegt aber überwiegend auf Abbauniveau. In Abbildung 7 sind der zeitliche Verlauf des Grubenwasseranstiegs und die Magnituden gezeigt. Mit dem Anstieg des Grubenwassers traten auch die Erschütterungen auf. Tabelle 2 fasst die Ereignisse zusammen und die Häufigkeitsverteilung ist in Abbildung 8 dargestellt. Alle bis auf 4 Ereignisse können den Bergwerken Heinrich Robert und Monopol zugeordnet werden (Abb. 9).

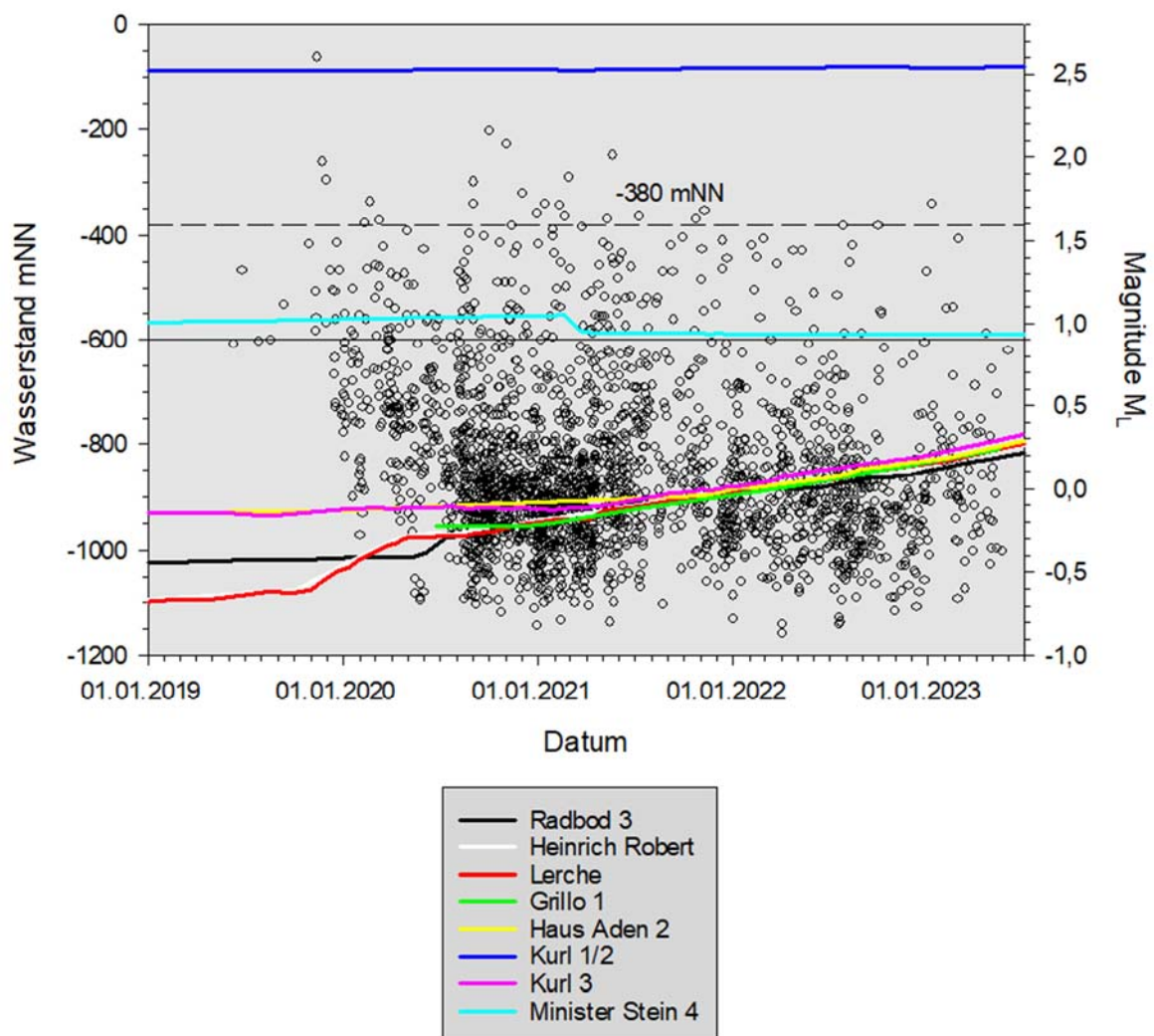


Abb. 7 Grubenwasserstände aus Lotungsstellen (linke Skala) und Magnituden (offene Kreise, rechte Skala). Die Magnituden wurden für den Zeitraum vom 10.06.2019 bis 31.05.2023 ermittelt.

Tab. 2 Magnituden M_L vom 18.06.2019 bis 31.05.2023 (RUB, 2023).

Datensätze	2359
Mittelwert	0,1136
Median	0,00
Minimum	-0,87
Maximum	2,6

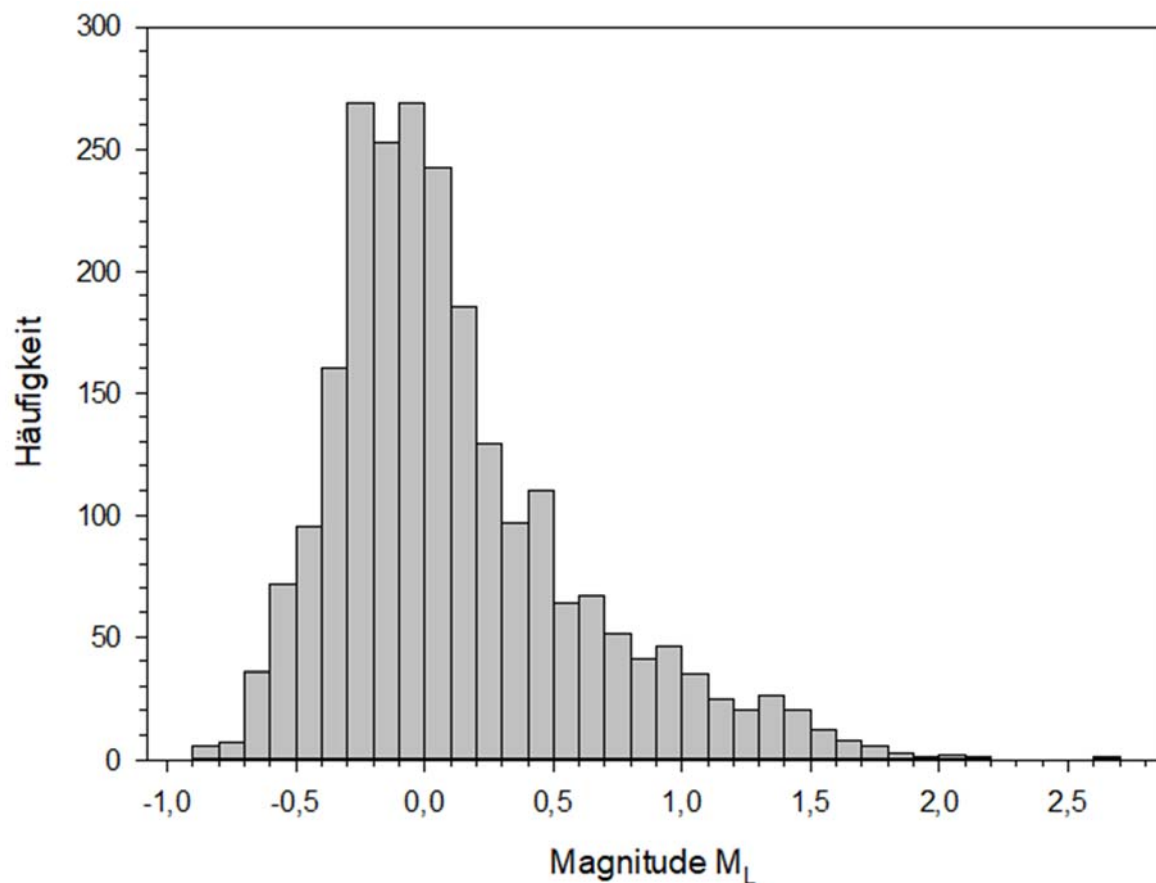


Abb. 8 Häufigkeitsverteilung der Magnituden M_L während des Grubenwasseranstiegs im Zeitraum vom 18.06.2019 bis 31.05.2023 (RUB, 2023).



Abb. 9 Wasserhebungsbereich Haus Aden (blaue Linie), Teilprovinzen (gelbe Linien) und Lage der Ereignisse (blaue Kreise) während des Grubenwasseranstiegs im Zeitraum 10.06.2019 bis 31.05.2023.

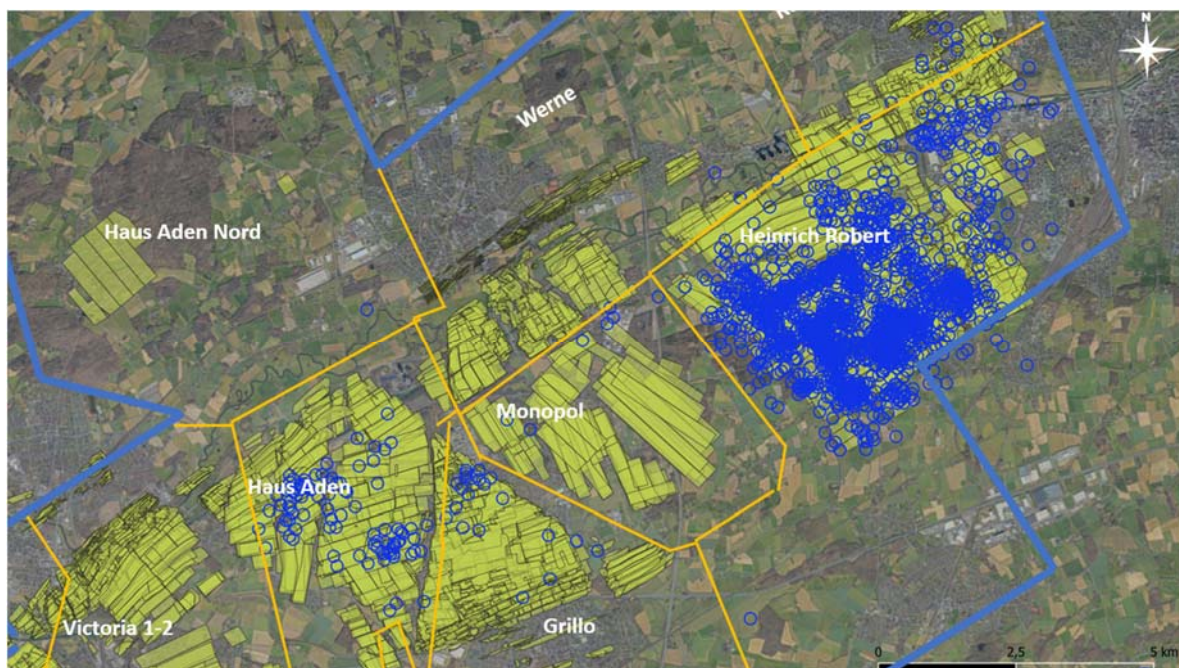


Abb. 10 Vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 9 mit Lage der Ereignisse (blaue Kreise) während des Grubenwasseranstiegs im Zeitraum 10.06.2019 bis 31.05.2023.

Im betrachteten Zeitraum des Grubenwasseranstiegs sind Erschütterungen in den Teilwasserprovinzen Radbod, Heinrich Robert und Haus Aden aufgetreten, untergeordnet auch in Monopol und Grillo (Abb. 9 und 10). Aus diesen Abbildungen wird deutlich, dass viele Erschütterungsereignisse in der Nähe der einzelnen Abbaubereiche auftraten und ein

kausaler Zusammenhang zwischen Abbauen und den Ereignissen während des Grubenwasseranstiegs zu vermuten ist.

Für die Beurteilung möglicher Ereignisse während des geplanten Anstiegs auf -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Haus Aden wird daher folgende Vorgehensweise angewandt:

Im Bereich Heinrich Robert und Monopol wurden schon während des Kohlenabbaus ohne Beeinflussung durch Grubenwasser, Erschütterungen registriert (DMT, 2023). In diesen Bereichen wurden mittels eines seismischen Netzwerks bergbauinduzierte Erschütterungen gemessen. Die registrierten Ereignisse während des Abbaus sind in Abbildung 11 dargestellt. Zu beachten ist hierbei, dass während der Abbaue vor 1994 kein seismisches Netzwerk zur Messung von Schwinggeschwindigkeiten vorhanden war. Es mögen vor 1994 durchaus Erschütterungen aufgetreten sein, die jedoch nicht als verwertbare Informationen zur Verfügung stehen.

Damit ist es möglich, die Erschütterungen durch den Kohlenabbau mit Erschütterungen aus dem Grubenwasseranstieg zu vergleichen und somit Prognosen zu Erschütterungen während des weiteren Grubenwasseranstiegs zu formulieren.

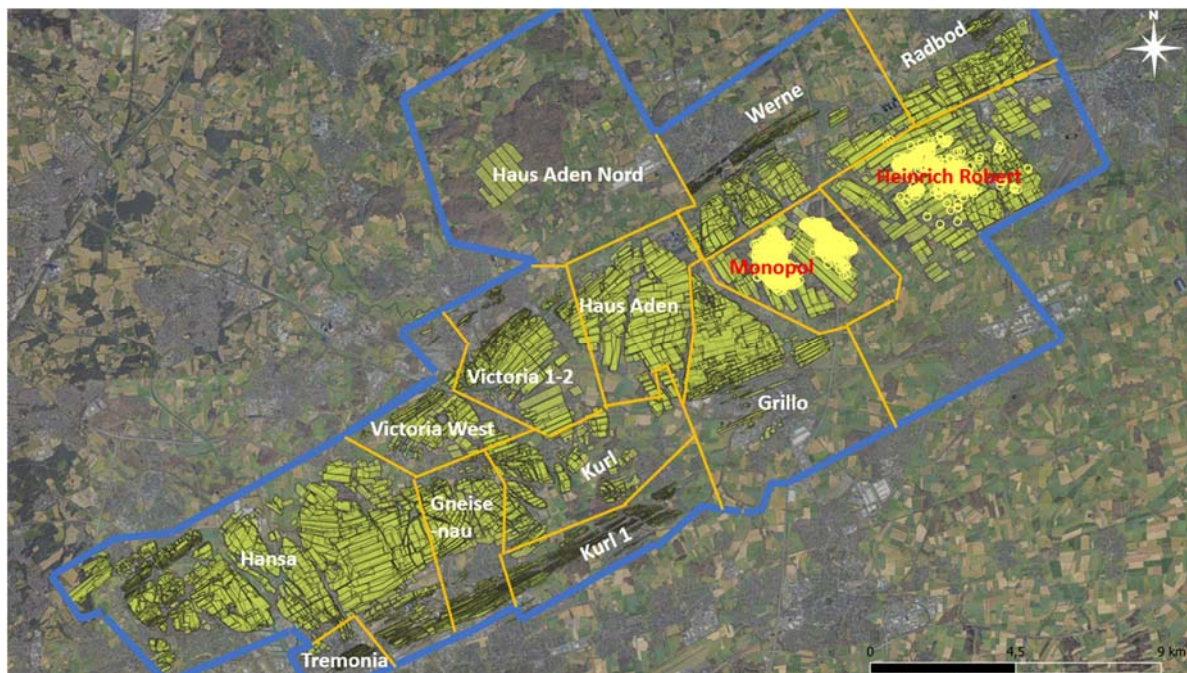


Abb. 11 Lage der Ereignissen (gelbe Kreise) während des Abbaus im Zeitraum vom 02.05.1994 bis 20.11.2011.

Besonders geeignet für den Vergleich von Erschütterungen während des Abbaus mit denen des Grubenwasseranstiegs ist das Bergwerk Heinrich Robert. Es liegen in beiden Phasen zahlreiche Messdaten vor. Zudem wurde dort in den Jahren 2005 bis 2011 ein Forschungsprojekt durch den Unterzeichnenden durchgeführt. Weiterhin liegen neuere Informationen aus dem Forschungsprojekt "FloodRisk" 2019 -2023 vor. Die

Forschungsarbeiten erlauben, aus den gewonnenen Bohrkernen relevante geomechanische Kennwerte zu erhalten und somit ein geologisch-geotechnisches Modell aufzustellen. Weiterhin steht ein Modell der Gebirgsspannungen zur Verfügung. Ereignisse kommen v.a. im Liegenden der Abbaue vor. Die Interaktion zwischen Liegendem und Spannungen, durch Abbau oder Porenwasserdruck, können dort zum Versagen führen und Ereignisse auslösen.

7. Ingenieurgeologisches Modell auf den tiefsten Sohlen des Abbaubereiches Heinrich Robert

Der Durchbaugrad im BW Heinrich Robert liegt zwischen 9 und 12. D.h., bis zu 12 Flöze wurden im Strebbau gewonnen. Der tiefste Strebbau fand in Flöz Sonnenschein in ca. -1100 mNHN statt. Der vertikale Abstand zu den jeweils höheren Flözen (Dickebank, Luise, Helene, Johann und Wilhelm) liegt zwischen 20 und 60 m. Abbildung 12 zeigt die Lithologie und einige gesteinsmechanische Eigenschaften im Hangenden und Liegenden des Flöz Sonnenschein. Das gebirgsmechanische Modell wurde 2009 in einer Publikation (Aber et al., 2009) vorgestellt und in Abbildung 13 wiedergegeben. Dort sind auch weitere felsmechanische Details beschrieben. Das Verfahren zur Abschätzung der Gebirgseigenschaften ist in Clostermann et al. (2020) beschrieben.

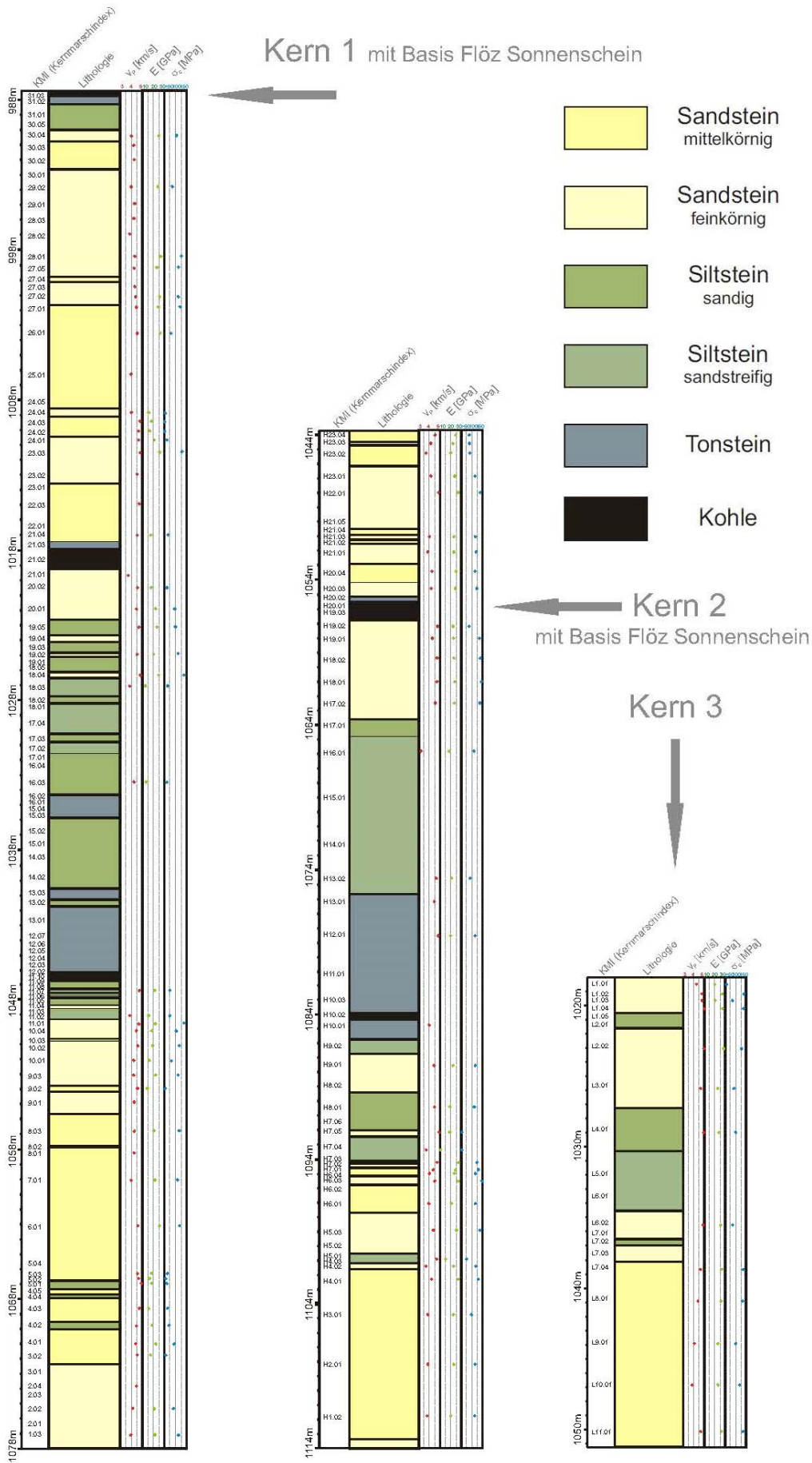


Abb. 12 Lithologie und Gesteinskennwerte im Liegenden und Hangenden von Flöz Sonnenschein.

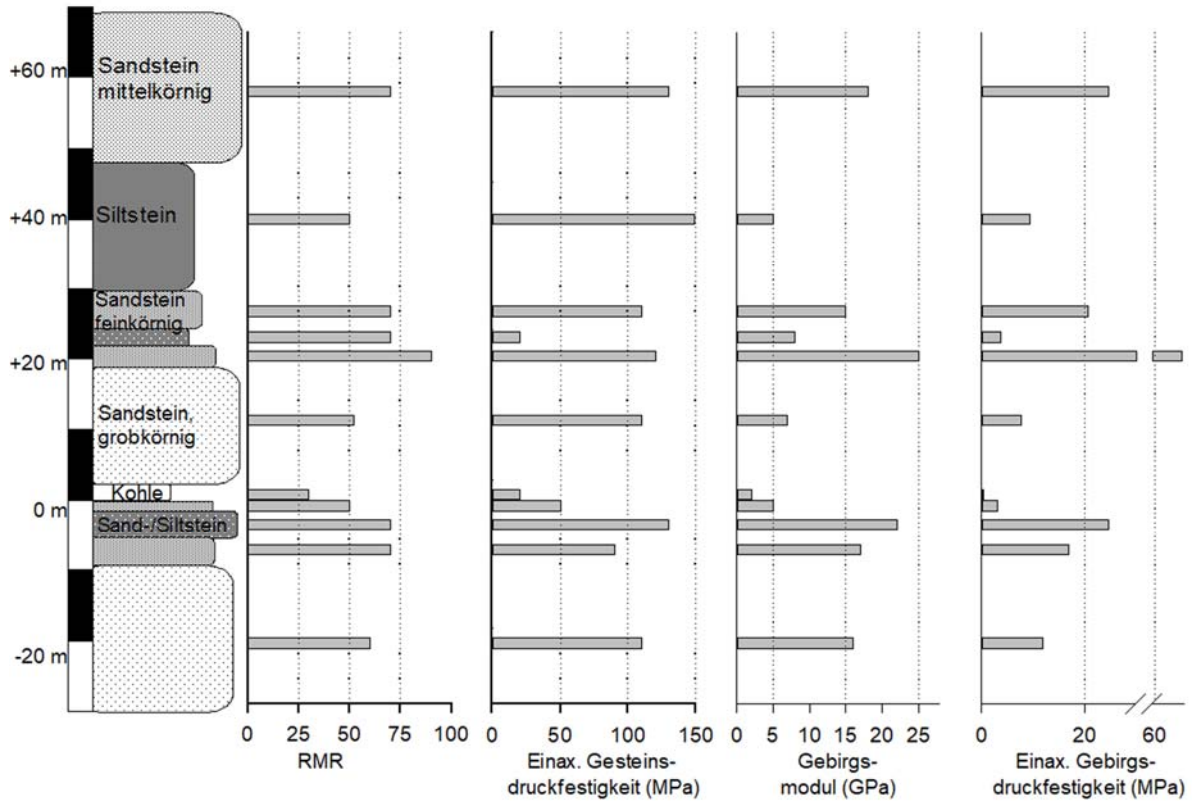


Abb. 13 Gebirgsmechanisches Modell im Liegenden und Hangenden von Flöz Sonnenschein (Alber et al., 2009).

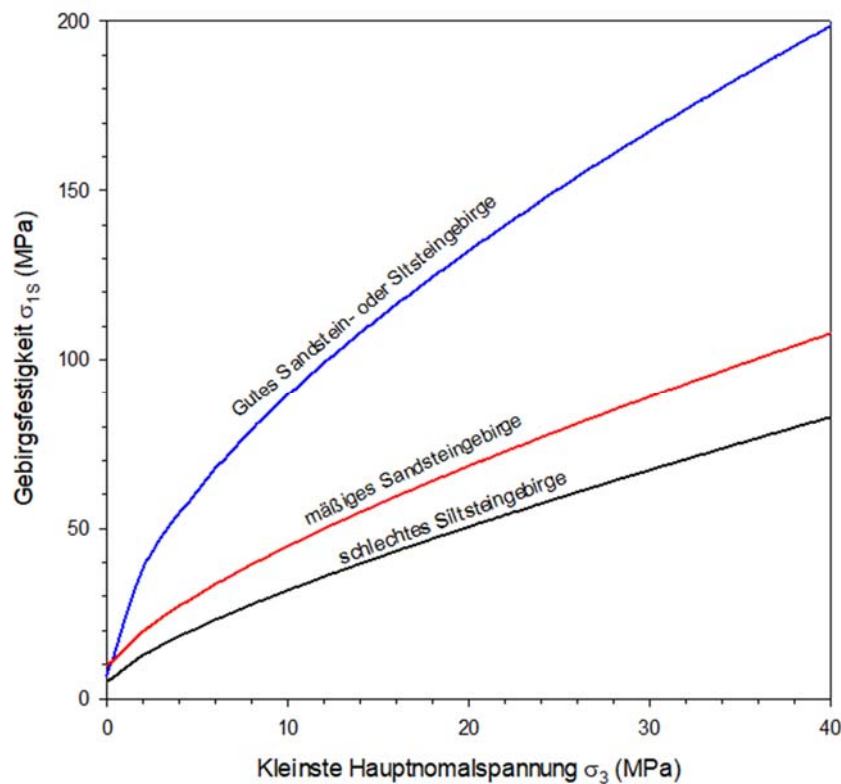


Abb. 14 Festigkeit des Gebirges im Nahfeld des Flöz Sonnenschein.

7.1 Gebirgsmechanisches Modell auf den tiefsten Sohlen des Abbaubereiches Heinrich Robert

Die vertikale Spannung (Teufendruck) ergibt sich aus der Dichte des Gesteins ρ , der Erdbeschleunigung (g) und der betrachteten Teufe (z):

$$\sigma_v \text{ [MPa]} = \rho \cdot g \cdot z \quad (11)$$

Dichte: $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$

Erdbeschleunigung: $g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

Teufe: $z \text{ (m)}$

Aus den Hydro-Frac Daten von Rummel (2002) wurden die größte und kleinste Horizontalspannung abgeschätzt. Die Gebirgsspannungen sind auf Niveau des Flöz Sonnenschein:

$$\sigma_v \text{ [MPa]} = 27 - 29 \text{ MPa}$$

$$\sigma_h \text{ [MPa]} = 15 - 19 \text{ MPa (NE-SW)}$$

$$\sigma_H \text{ [MPa]} = 35 - 42 \text{ MPa (NW-SE)}$$

Die größte Horizontalspannung ist demnach doppelt so groß wie die kleinste. Außerdem erweist sich die vertikale Spannung nicht als größte Spannungskomponente. Dieser Spannungszustand führt nach der Theorie von Anderson zur Bildung von Blattverschiebungen.

Die Richtung der größten Horizontalspannung beträgt ca. 145° . Dies entspricht dem in Mitteleuropa vorherrschenden variszischen Spannungsregime (Rummel, 2002).

7.2 Beurteilung der abbaubedingten Erschütterungen auf den tiefsten Sohlen des Abbaubereiches Heinrich Robert zwischen 2005 - 2011

Seismische Ereignisse stammen aus Versagensprozessen im Gebirge. Dabei sind grundsätzlich zwei unterschiedliche Prozesse zu betrachten:

- (1) Versagen von Gebirge auf Grund der Überschreitung der Gebirgsfestigkeit.
- (2) Versagen einer Schwächezone durch Überschreiten der Scherfestigkeit.

Die Erderschütterungen während des Abbaus der Strebe im Flöz Sonnenschein wurden in mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen von Alber et al. (2009) und Alber (2013) bearbeitet. Zuerst wurde geprüft, ob ein Versagen des Gebirges durch Spannungsumlagerungen um den Streb die Erderschütterungen verursacht haben. Die Gebirgsfestigkeit wird direkt im Hangenden und Liegenden eines Strebs überschritten. Somit ist lokales Gebirgsversagen (Versagensprozess 1) als Auslöser der Erderschütterungen

wahrscheinlich. Jedoch sind die assoziierten Ereignisse von geringer Schwinggeschwindigkeit oder Magnitude.

Außerdem sind im Nahfeld der Strebe kleinere Störungen präsent. Abbildung 15 zeigt den Ausschnitt einer Rißkarte für den Streb S 109. Hier wurde ein Streb im tiefsten abgebauten Flöz Sonnenschein aufgefahren. In Abbildung 15 sind die Störungen als orange gestrichelte Linien eingezeichnet. Es wurde geprüft, ob diese Störungen das Potenzial für Versagen unter den gegebenen Spannungsbedingungen aufweisen. Die Herangehensweise ist in Alber (2013) eingehend beschrieben. Das Ergebnis der felsmechanischen Berechnungen ist in Abbildung 16 gezeigt. Hier wird der notwendige Reibungswinkel ϕ auf den Störungen, um nicht zu versagen, gezeigt.

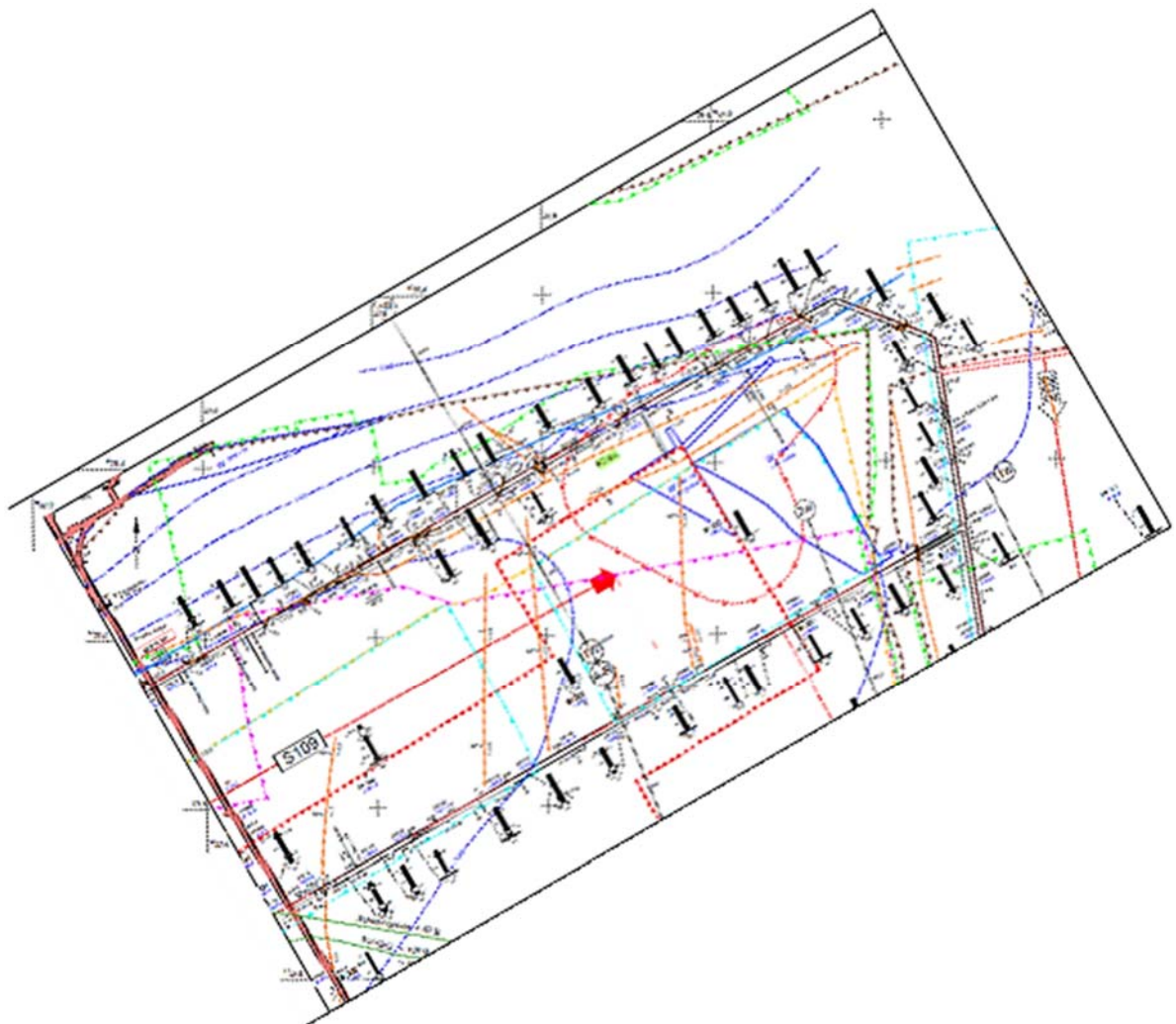


Abb. 15 Ausschnitt aus der Rißkarte für den Streb S 109 im ehemaligen BW Heinrich Robert. Die schwarzen Linien zeigen die Umgrenzung des Strebs S 109. Blaue Linien sind die Höhenlage des Flöz Sonnenschein. Grüne, blaue, rote und lila gestrichelte Linien zeigen die Abbaukanten der höheren Strebe. Die orange gestrichelten Linien zeigen die kleineren Störungen an.

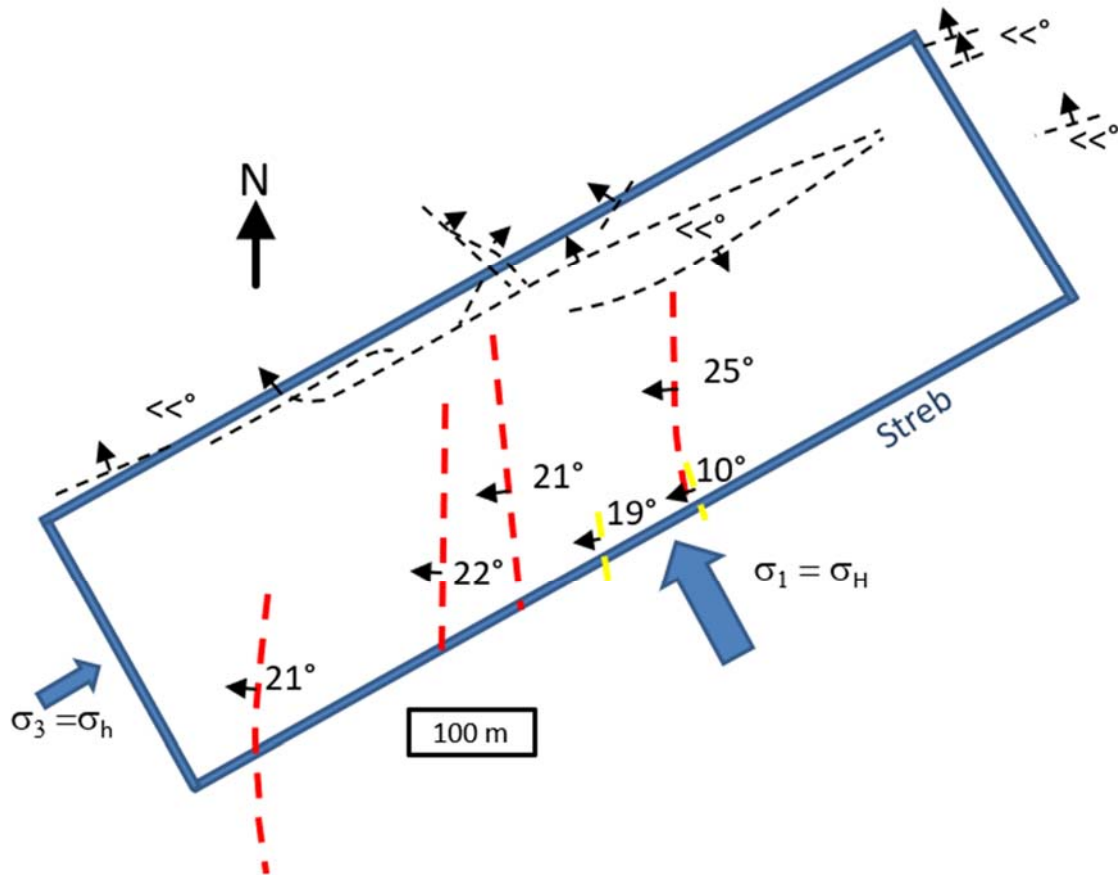


Abb. 16 Notwendiger Reibungswinkel φ auf Störungen, um nicht deren Versagen auszulösen. Die schwarzen gestrichelten Linien zeigen Störungen, die auf Grund ihrer Orientierung nicht versagen können (Symbol: \llcorner°). Die Pfeile zeigen das üblicherweise steile / saigere Einfallen der Störungen an. Die in gelber oder roter Farbe gezeigten Störungen mit dem erforderlichen Reibungswinkel φ weisen ein Potenzial für Versagen auf. Siehe Text für Erläuterungen. Verändert nach Alber (2013).

Abbildung 16 zeigt, dass die Reibungswinkel φ auf den Störungen zwischen 10° und 25° liegen müssen, um nicht zu versagen und damit Erschütterungen auszulösen. Alber und Schwarz (2015) haben gezeigt, dass Trennflächen in Sandsteinen in der Regel $\varphi > 32^\circ$ ausweisen. Ausnahmen sind hier Trennflächen mit Kohlenbestegen. Für Trennflächen in Ton- oder Siltsteinen wurden ebenfalls Reibungswinkel $\varphi > 32^\circ$ ausgewiesen. Jedoch sind bei Trennflächen in diesen feinkörnigen Gesteinen Spiegelharnische möglich. Diese weisen einen Reibungswinkel $\varphi \approx 15$ auf.

Ein Versagen von ungünstig orientierten Störungen mit entsprechenden Erschütterungen oder Magnituden ist somit möglich. Die beobachteten Magnituden während des Abbaus liegen in Größenordnungen, die mit folgender Abbildung 17 eingeordnet werden können. Ortlepp hat 1992 in dieser Abbildung die jahrzehntelangen Erfahrungen mit Erschütterungen aus dem Kohlen- und Erzbergbau in Südafrika zusammengefasst. Demnach führt das

Versagen von Gebirge (Dehnungsversagen, Knicken und Pfeilerversagen) zu Magnituden im Bereich zwischen $-0,2 < M_L < 2,5$. Magnituden von $M_L > 1,7$ sind üblicherweise mit dem Scherversagen von größeren Trennflächen oder Störungen assoziiert.

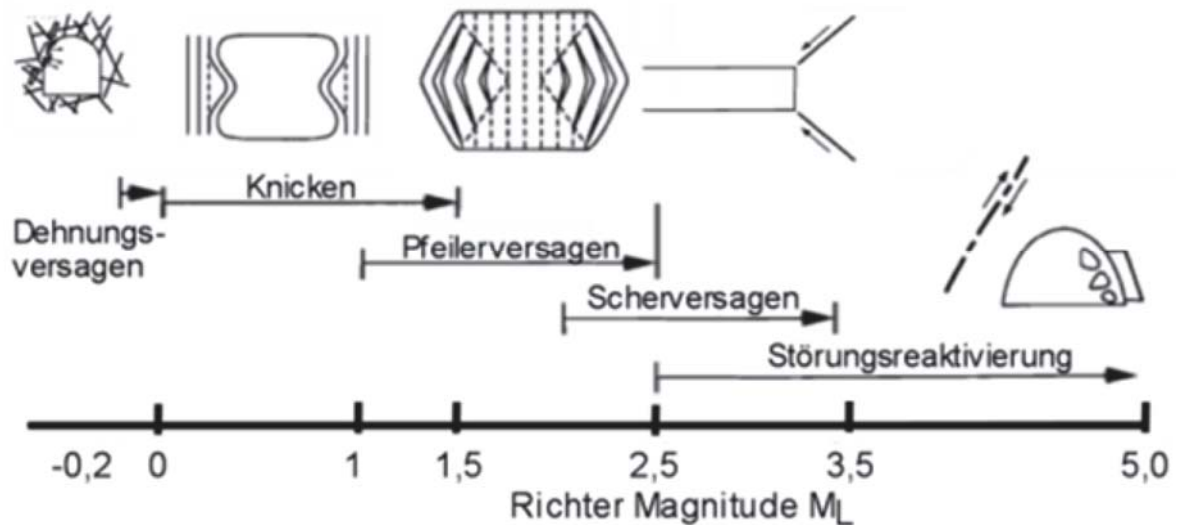


Abb. 17 Beziehung zwischen Versagensmechanismus und Magnitude. Vereinfacht nach Ortlepp (1992).

Die Untersuchungen zu den Ereignissen während des Abbaus führten zu folgenden Aussagen:

- Gebirgsversagen (d.h. die Bildung neuer Bruchflächen) ist lokal um einen Streb möglich.
- Dieses Gebirgsversagen führt zu Ereignissen mit geringen Magnituden.
- Mit hoher Wahrscheinlichkeit existieren kritisch gespannte Schwächezonen.
- Die Scherfestigkeit dieser Schwächezonen ist z. T. gering.
- Die Normalspannung auf diesen Schwächezonen wurde durch den herannahenden Streb vermindert.
- Die Scherfestigkeit wurde dadurch so weit reduziert, dass Schwächezonen versagten und Erderschütterung ausgelöst wurden.

8. Versagensmechanismen bei Grubenwasseranstieg

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, stammen seismische Ereignisse aus zwei möglichen Versagensprozessen im Gebirge:

- (1) Versagen von Gebirge auf Grund der Überschreitung der Gebirgsfestigkeit.
- (2) Versagen einer Schwächezone durch Überschreiten der Scherfestigkeit.

Nachfolgend werden diese beiden Versagensmechanismen bei Grubenwasseranstieg im Wasserhebungsbereich Haus Aden erläutert und bewertet. Ein Versagen des Gebirges durch den Einfluss von Wasser würde entsprechend hohe Wasserdrücke nach Abbildung 1 voraussetzen. Eine Abschätzung der Festigkeit des unverritzten Gebirges wurde in Abbildung 14 gezeigt. Für eine Teufe von -1100 mNHN sind die Gebirgsspannungen $\sigma_H = \sigma_1 = 42$ MPa, $\sigma_V = \sigma_2 = 29$ MPa und $\sigma_h = \sigma_3 = 19$ MPa. Es muss ein Wasserdruck von ca. 17,5 MPa herrschen (Abb. 18), um das Gebirge zum Versagen zu bringen. Dieser Wasserdruck entspricht einer Wassersäule von 1750 m Höhe. Die maximale Wassersäule in der Teufe -1100 mNHN, bei einem weiteren Anstieg des Grubenwassers auf -380 mNHN, würde bei 720 m liegen. Eine Wassersäule von 1750 m ist bei einer Geländehöhe von ca. 70 mNHN ausgeschlossen. Damit ist ein Gebirgsversagen durch Erhöhung des Porenwasserdrucks nicht möglich. Nur einzelne lokale Bänke mit ausgeprägt schlechten Eigenschaften könnten theoretisch überbeansprucht werden (rote Festigkeitslinie in Abbildung 18).

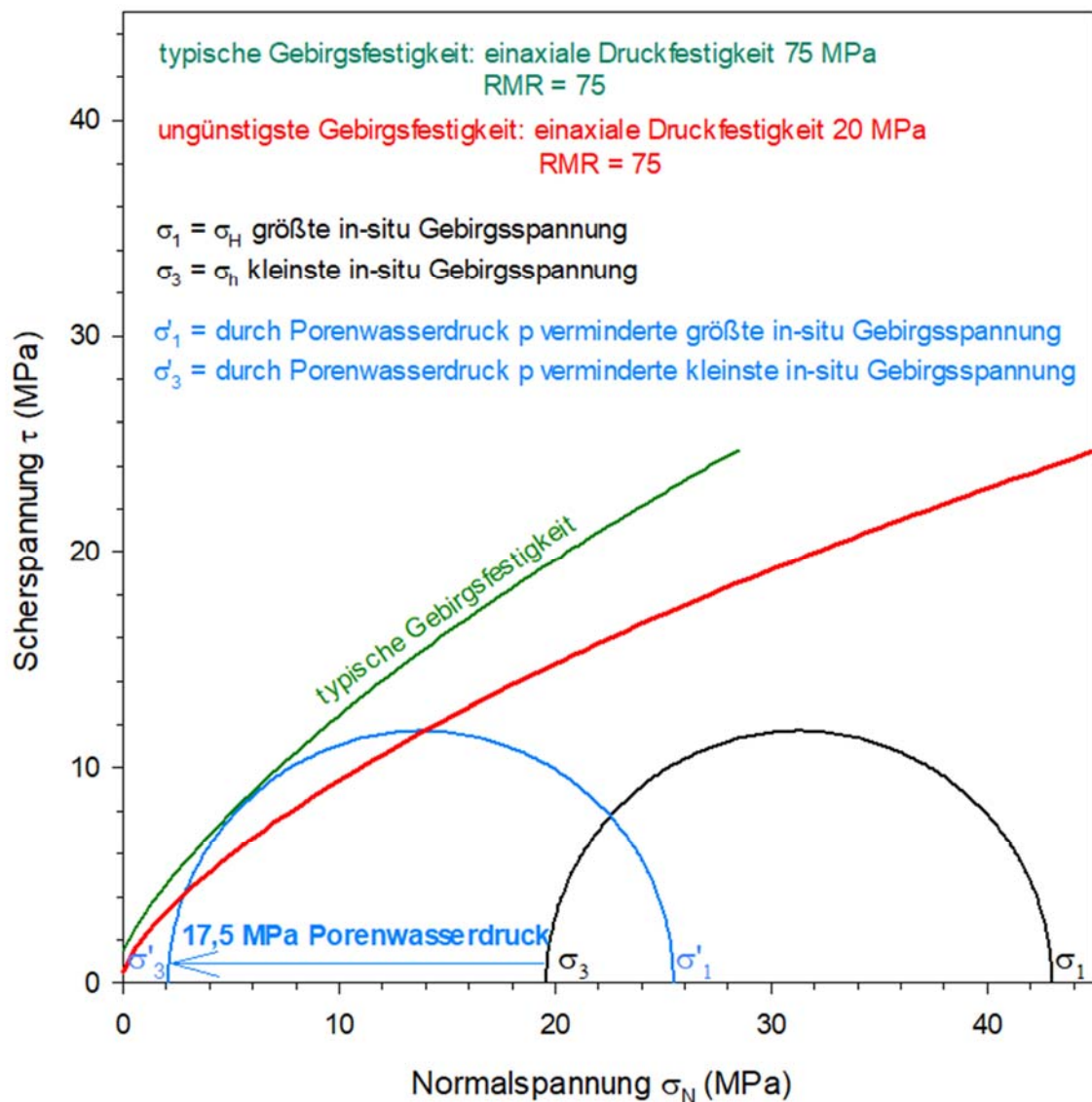


Abb. 18 Festigkeit und Beanspruchung des Gebirges im Nahfeld von Flöz Sonnenschein. Der in-situ Spannungszustand (schwarzer Halbkreis) muss um einen Porendruck $p = 17,5$ MPa vermindert werden, um ein Versagen des Gebirges zu verursachen.

Der Versagensmechanismus (1) „Überschreitung der Gebirgsfestigkeit durch Wasserdruck“ kann nicht die Erschütterungen aus dem Grubenwasseranstieg erklären. Die im vorigen Abschnitt begründete Annahme, dass ausschließlich Schwächezonen die Ursache von Erderschütterungen sind, bildet den Ausgangspunkt der folgenden Betrachtungen.

Wie in Abschnitt 4 gezeigt wurde, führt ein Wasserdruck auf einer Trennfläche oder Schwächezone zu einer gleich großen Verminderung der Normalspannung auf dieser Fläche oder Zone, während die Scherspannung konstant bleibt. Bei genügend hohem Wasserdruck und somit genügend großer Verminderung der Normalspannung wird die Scherfestigkeit schließlich geringer als die Scherspannung, sodass die Trennfläche / Schwächezone versagt und eine Erderschütterung möglich ist.

Ein Beispiel mag die Situation verdeutlichen: Eine senkrechte Trennfläche wird von unten bis auf 100 m Höhe geflutet. Der Wasserdruck in 100 m Höhe ist 0 bar und in 0 m Höhe 10 bar. Der durchschnittliche Wasserdruck auf der Trennfläche oder Schwächezone ist $(0 + 10)/2 = 5$ bar. Die Normalspannung σ_N auf der Trennfläche wird um den Wasserdruck $p = 5$ bar (0,5 MPa) auf die effektive Normalspannung σ_{Neff} reduziert. Die Scherfestigkeit τ_p der Trennfläche beträgt nun $\tau_p = c + (\sigma_N - p) \cdot \tan \varphi$, sie wurde also um den Betrag $p \cdot \tan \varphi$ reduziert.

9. Abschätzung der Magnituden und Schwinggeschwindigkeiten aus Auslösungsmechanismen durch weiteren Grubenwasseranstieg in der Teilprovinz Heinrich Robert

Bei den abbaubedingten Erschütterungen im ehemaligen Bergwerk Heinrich Robert bis zum 20.11.2011 wurden die Schwinggeschwindigkeiten und daraus Magnituden bestimmt. Nach der Methode von Wells und Coppersmith (1994) können die dazugehörigen Bruchflächen mit der Formel

$$M_L = 4,07 + 0,98 \cdot \log(A) \quad (12)$$

abgeschätzt werden, wobei M_L die Magnitude und A die Bruchfläche in km^2 sind. Diese Beziehung ist grafisch in Abbildung 19 dargestellt.

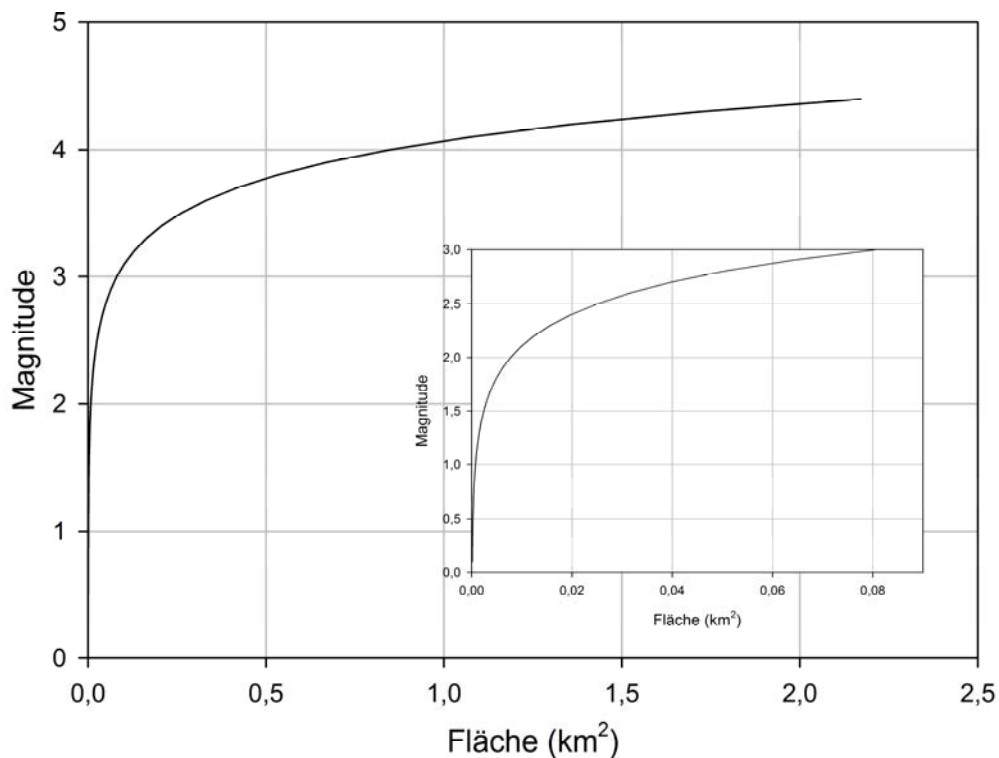


Abb. 19 Beziehung zwischen Magnitude und Größe der Bruchfläche nach Wells und Coppersmith (1994).

Für die 905 Erschütterungen zwischen 20.05.1994 und 20.11.2011 aus dem Abbau im ehemaligen Bergwerk Heinrich Robert sind Magnituden (Abb. 20) und die mit Formel (12) daraus berechneten Bruchflächen in Abbildung 21 zusammengefasst.

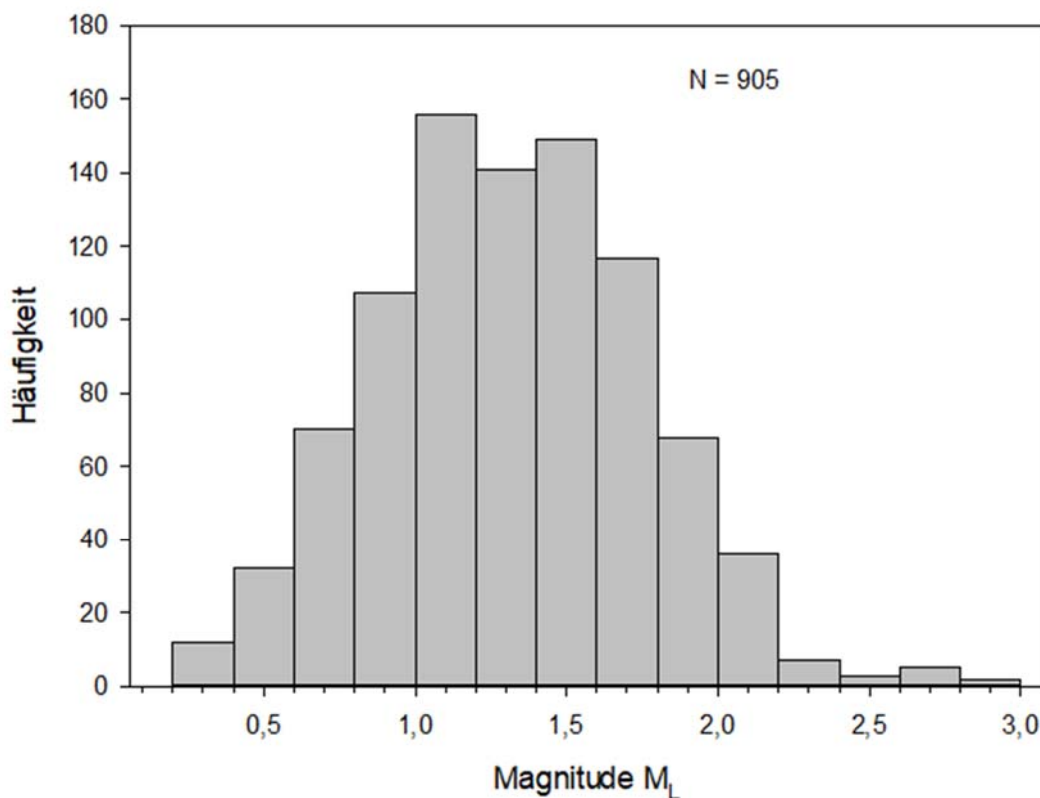


Abb. 20 Häufigkeitsverteilung der Magnituden in den Jahren 1994 - 2011.

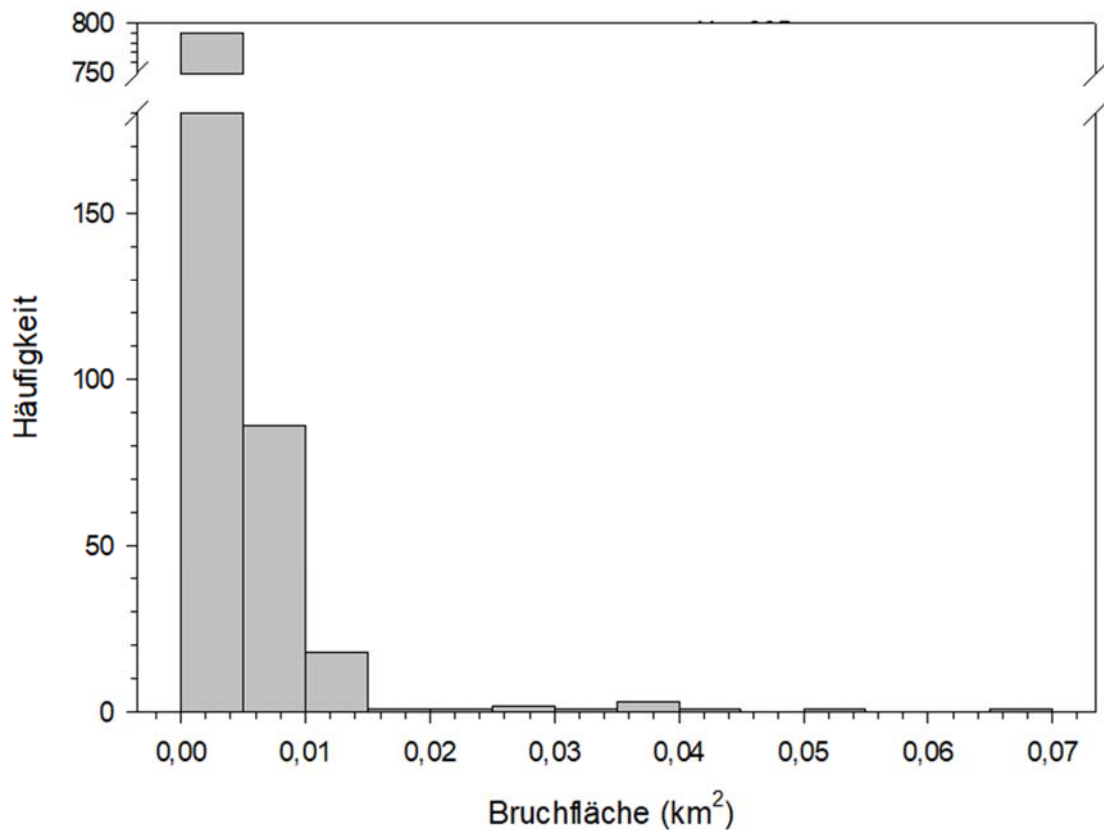


Abb. 201 Mit Formel (12) abgeleitete Häufigkeiten der Größe der Bruchflächen der Ereignisse aus 1994 - 2011.

Solche potenzielle Bruchflächen – oder anders ausgedrückt – Schwächezonen stellen mögliche Versagensflächen beim Grubenwasseranstieg dar. Wie in Abschnitt 4.1. dargelegt weisen schon beim Abbau versagte und somit schon abgescherte Schwächezonen geringere Scherfestigkeit auf. Ein Versagen während des Grubenwasseranstiegs würde wahrscheinlich zu keinen oder sehr geringen Erschütterungen führen. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass es sich bei den Ereignissen aus den Jahren 2019 - 2023 um das Versagen von weiteren Schwächezonen im Umfeld des Abbaus aus den tieferen Sohlen des Bergwerks Heinrich Robert handelt.

In diesem Bereich wurden insgesamt 2220 Erderschütterungen im Zeitraum vom 12.09.2019 – 31.05.2023 durch seismologische Messungen (RUB, 2023) erfasst. Tabelle 3 stellt die maximalen Schwinggeschwindigkeiten während des Abbaus und während des Grubenwasseranstiegs zusammen. Die Ereignisse während des Grubenwasseranstiegs wurden durch das seismologisch Observatorium der Ruhr-Universität Bochum erhoben. Bei dem Datensatz, der das größte Ereignis am 13.11.21019 mit einer Magnitude $M_L = 2,6$ bzw. Schwinggeschwindigkeiten von $v_{s,max} = 23,57$ mm/s beschreibt, sind Zweifel angebracht:

- Dieses Ereignis vom Erdbebendienst NRW (2019) mit Magnitude $M_L = 2,2$ beschrieben.
- Für dieses Ereignis wird in einer Pressemitteilung (Westfälischer Anzeiger, 2019) die Schwinggeschwindigkeit von 3,5 mm/s angegeben.

- o Bei einer Schwinggeschwindigkeit von ≥ 10 mm/s wären nach DIN 4150 T3 Schäden an empfindlichen Gebäuden möglich. Davon ist jedoch nichts bekannt und es wurden keine Schadensmeldungen erstattet.

Aus vorstehenden Gründen wird für das Ereignis eine Magnitude $M_L = 2,3$ angenommen und nach Formel (13) eine Schwinggeschwindigkeit $v_{s,max} = 11,53$ mm/s berechnet.

Tab. 3 Max. Schwinggeschwindigkeiten $v_{s,max}$ (mm/s) während des Abbaus und während des Grubenwasseranstiegs im Bereich Bergwerk Heinrich Robert.

	Abbau 2.05.1994 – 20.11.2011	Grubenwasseranstieg 12.09.2019 – 31.05.2023
Datensätze	905	2200
Zeitdauer	6411 d	1357 d
Mittelwert	1,9962	0,1714
Median	1,090	0,0467
Minimum	0,080	0,006
Maximum	52,090	11,53

Diese Schwinggeschwindigkeiten können nach DMT (2023) mit folgender Formel (13) in Magnituden umgerechnet werden:¹

$$M_L = 0,4193 \cdot \ln(v_{s,max}) + 1,2749 \quad (13)$$

Daraus ergeben sich für die Ereignisse im Zeitraum 12.09.2019 – 31.05.2023 Magnituden von $-0,87 < M_L < 2,3$ und nach Formel (12) ergeben sich daraus Bruchflächen $9 \text{ m}^2 < A < 0,01562 \text{ km}^2$.

Die Häufigkeit der Magnituden M_L aus dem Zeitraum 1994 - 2011 sowie der Magnituden aus dem Zeitraum des Grubenwasseranstiegs 2019 - 2023 sind in Abbildung 22 dargestellt.

Die Häufigkeit der mit Formel (12) berechneten Bruchflächen für den Zeitraum des aktiven Strebbaus im Bereich Heinrich Robert 1994 - 2011 sowie der Bruchflächen aus dem Zeitraum des Grubenwasseranstiegs 2019 - 2023 sind in Abbildung 23 dargestellt.

Deutlich zu erkennen ist, dass sowohl Magnituden als auch Bruchflächen während des Zeitraums des Grubenwasseranstiegs (2019 - 2023) geringer sind als im Zeitraum während des Abbaus (1994 - 2011).

¹ Diese Formel zur Umrechnung von maximalen Schwinggeschwindigkeiten in Magnituden basiert auf der Korrelation von Ereignissen im Bereich des Bergwerkes Ost. Werden Magnituden direkt aus den entsprechenden Seismogrammen ermittelt, kann es zu leichten Abweichungen von bis zu ca. 10 % kommen, da die Magnitude kein direkter Messwert ist, sondern immer aus direkten Messwerten rückgerechnet wird. In diesem Gutachten wird aus Gründen der Datenkonsistenz nur die Beziehung (13) zur Umrechnung von maximalen Schwinggeschwindigkeiten in Magnituden verwendet. Die Formel gilt natürlich nur für seismische Ereignisse, die im Bereich des Bergwerkes Ost auftreten.

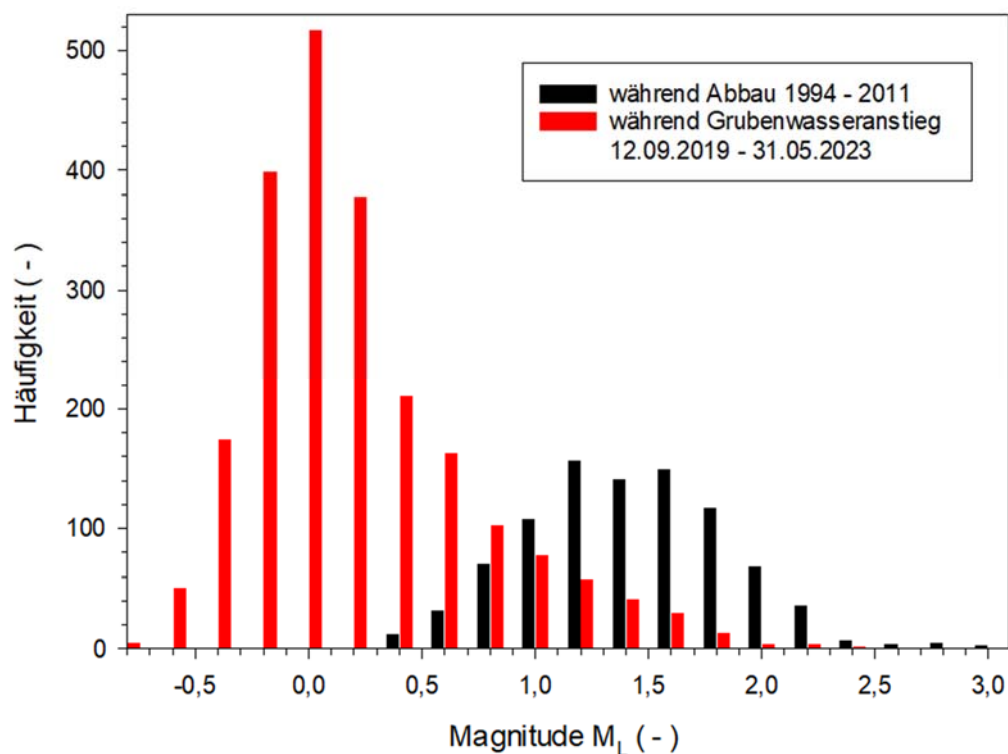


Abb. 22 Häufigkeit von Magnituden im Bereich Heinrich Robert während des Abbaus (schwarze Balken) und während des Grubenwasseranstiegs (rote Balken).

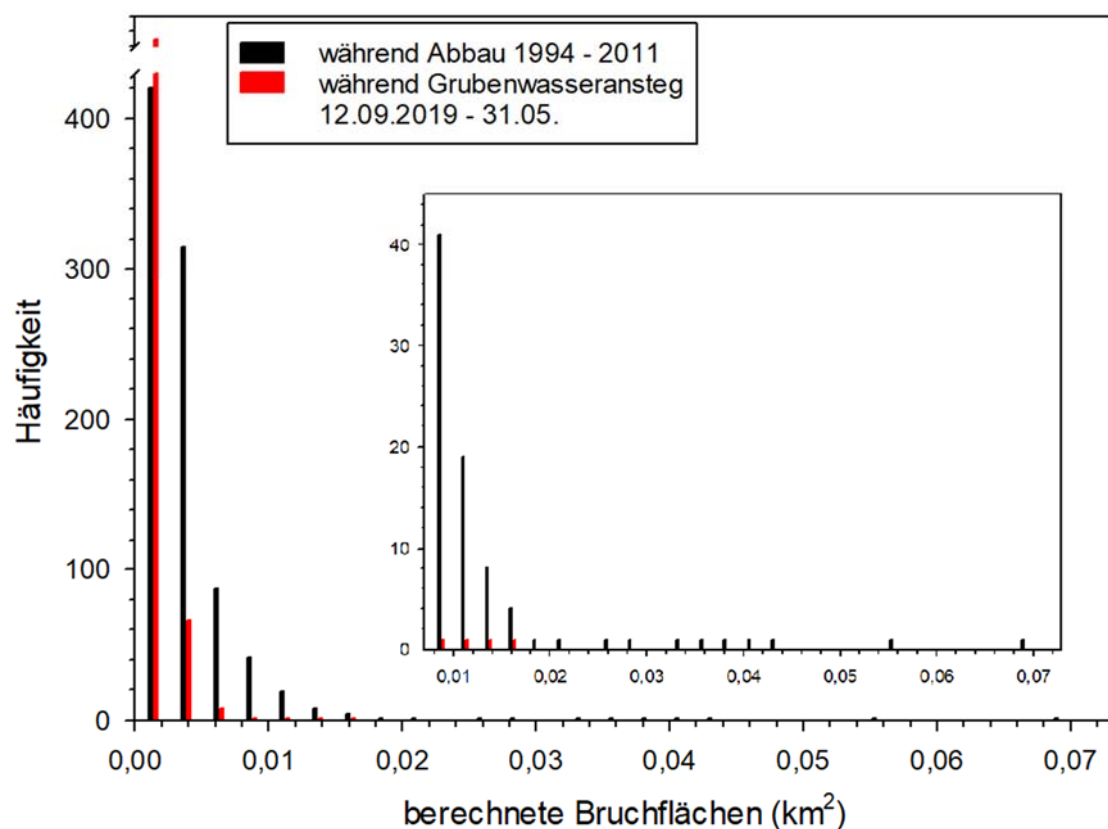


Abb. 223 Häufigkeit von (berechneten) Bruchflächen im Bereich Heinrich Robert während des Abbaus (schwarze Balken) und während des Grubenwasseranstiegs bis zum 31.05.2023 (rote Balken). Das Insert zeigt für die bessere Sichtbarkeit die Flächen mit geringerer Häufigkeit.

Die Ereignisse, die in den Jahren 2019 - 2023 während des Grubenwasseranstiegs auftraten, sind vermutlich durch Reaktivierung von Schwächezonen unterhalb des Flöz' Sonnenschein verursacht worden, da nur hier ein entsprechender Porendruck zur Verminderung der Scherfestigkeit zur Verfügung stand. Der Grubenwasserstand an der Lotungsstelle Heinrich war beim größten Ereignis ($v_{s,max} = 11,52$ mm/s am 13.11.2019) bei ca. -1057 mNHN. Flöz Sonnenschein liegt in Teufen von ca. -1100 mNHN. Eine Überstauung in der Größenordnung von 50 m kann somit bei dem größten Ereignis am 13.11.2023 angenommen werden. Damit wird die Annahme unterstützt, dass die Ereignisse im von Wasserdruck beeinflussten Bereich unterhalb des Flözes stattfanden.

Hiermit lässt sich eine Abschätzung von Bruchflächen und Magnituden für den weiteren Grubenwasseranstieg vornehmen, indem die bisher während des Grubenwasseranstiegs aufgetretenen Erschütterungen ausschließlich mit denen korreliert werden, die während des aktiven Abbaus im Liegenden auftraten. Die hierdurch ermittelte statistische Beziehung wird anschließend verwendet, um die durch Grubenwasseranstieg im Hangenden erwartete Seismizität zu berechnen.

Während des Abbaus wurde die größte Erderschütterung unterhalb des Flözes Sonnenschein am 23.10.1989 mit einer Magnitude $M_L = 2,93$ und einer Schwinggeschwindigkeit von 52,09 mm/s dokumentiert. Dies entspricht nach Formel (12) einer Versagensfläche von 0,69 km².

Während des Grubenwasseranstiegs wurde die größte Erderschütterung am 13.11.2019 mit einer Schwinggeschwindigkeit von 11,52 mm/s dokumentiert, dies entspricht nach Formel (13) einer Magnitude $M_L = 2,3$ und nach Formel (12) einer Versagensfläche von 0,015 km². Diese Daten und der daraus abgeleitete aktivierte Bruchflächenanteil sind in Tabelle 64 aufgeführt.

Tab. 4 Größtes Ereignis unterhalb Flöz Sonnenschein während des Strebbaus und des Grubenwasseranstiegs im Bereich Heinrich Robert sowie daraus abgeschätzter, aktivierter Flächenanteil einer versagten, seismogenen Schwächezone.

	Datum	$v_{s,max}$ (mm/s)	M_L	Bruchfläche A (km ²)
Größtes Ereignis unterhalb Flöz Sonnenschein während Abbau	23.10.1989	52,09	2,93	0,06905
Größtes Ereignis während Grubenwasseranstieg	13.11.2019	11,52	2,3	0,01562
Mutmaßlich maximaler aktivierter Anteil einer bestehenden Schwächezone				22,63 % ($\approx 1/5$)

Dies bedeutet, dass bei größeren Schwächezonen durch den Grubenwasseranstieg ca. 1/5 der Fläche einer existierenden Schwächezone reaktiviert wurde und versagte.

D.h., hier wird als Datenbasis die Gesamtheit der Ereignisse verwendet, die während des aktiven Abbaus im Hangenden des Flözes Sonnenschein auftrat, insbesondere auch unter Einbeziehung des größten damals aufgetretenen seismischen Ereignisses mit einer maximalen Schwinggeschwindigkeit von rund 52 mm/s und einer Magnitude von 2,9. Des Weiteren wird für mittlere Ereignisse die beim weiteren Grubenwasseranstieg erwarteten Bruchflächen ermittelt. Unter diesen Annahmen sind die Erschütterungen beim Grubenwasseranstieg in entsprechenden Niveaus über dem Flöz Sonnenschein in Abbildung 24 dargestellt.

Zur Berechnung der in Abbildung 24 gezeigten Datenpunkte wurden zunächst aus den 905 Ereignissen aus 1994 - 2011 Bruchflächengrößen nach Formel (12) berechnet. Diese wurden mit dem empirisch ermittelten Skalierungsfaktor von 1/5 multipliziert und danach wieder in Magnituden rückgerechnet. Als Ergebnis erhält man die Prognose der zukünftig zu erwartenden, seismischen Ereignisse. Abbildung 24 zeigt die prognostizierte Häufigkeitsverteilungen.

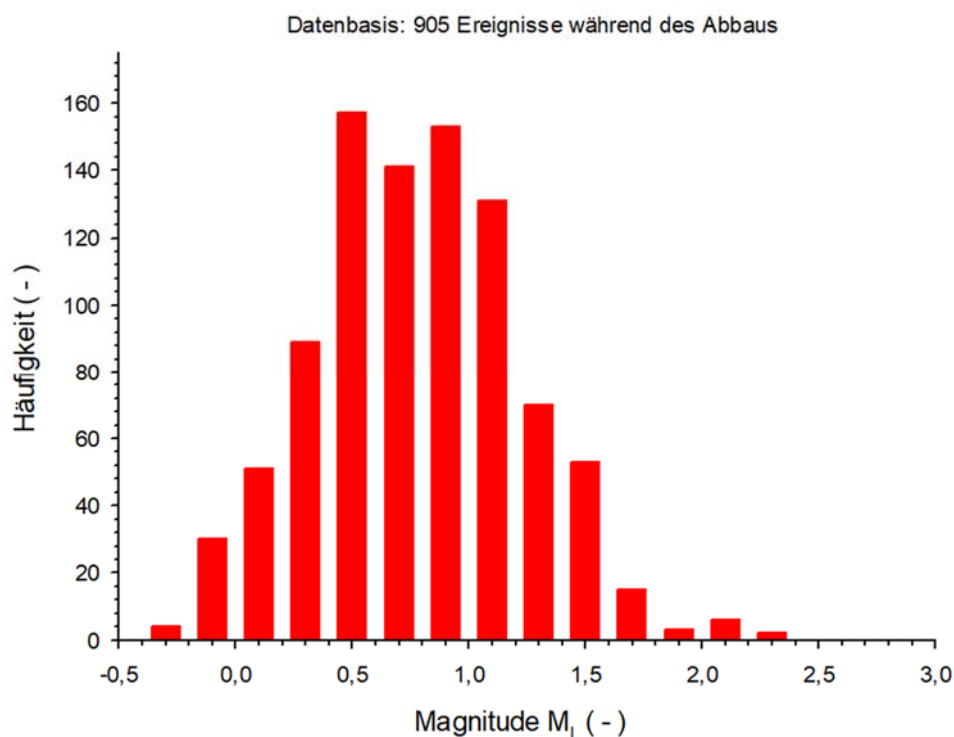


Abb. 24 Häufigkeitsverteilungen der prognostizierten Magnituden während des weiteren Grubenwasseranstiegs auf Basis der Annahme von 1/5 aktivierten Bruchflächen).

Abbildung 25 beschreibt die Verteilung der geschätzten maximalen Schwinggeschwindigkeiten $v_{s,max}$. Dieser sogenannte Boxplot visualisiert anschaulich den Bereich, in dem Daten liegen. Mit dem grauen Kasten werden 50 % aller geschätzten Schwinggeschwindigkeiten beschrieben, im Bereich der Antennen (10% und 90 % Fraktile) liegen 80 % aller geschätzten Magnituden. Die beiden äußeren Punkte beschreiben die 5%- bzw. die 95% Fraktile. Aus Abbildung 25 kann entnommen werden, dass 95% aller Schwinggeschwindigkeiten kleiner als 3,1 mm/s durch Grubenwasseranstieg erwartet werden.

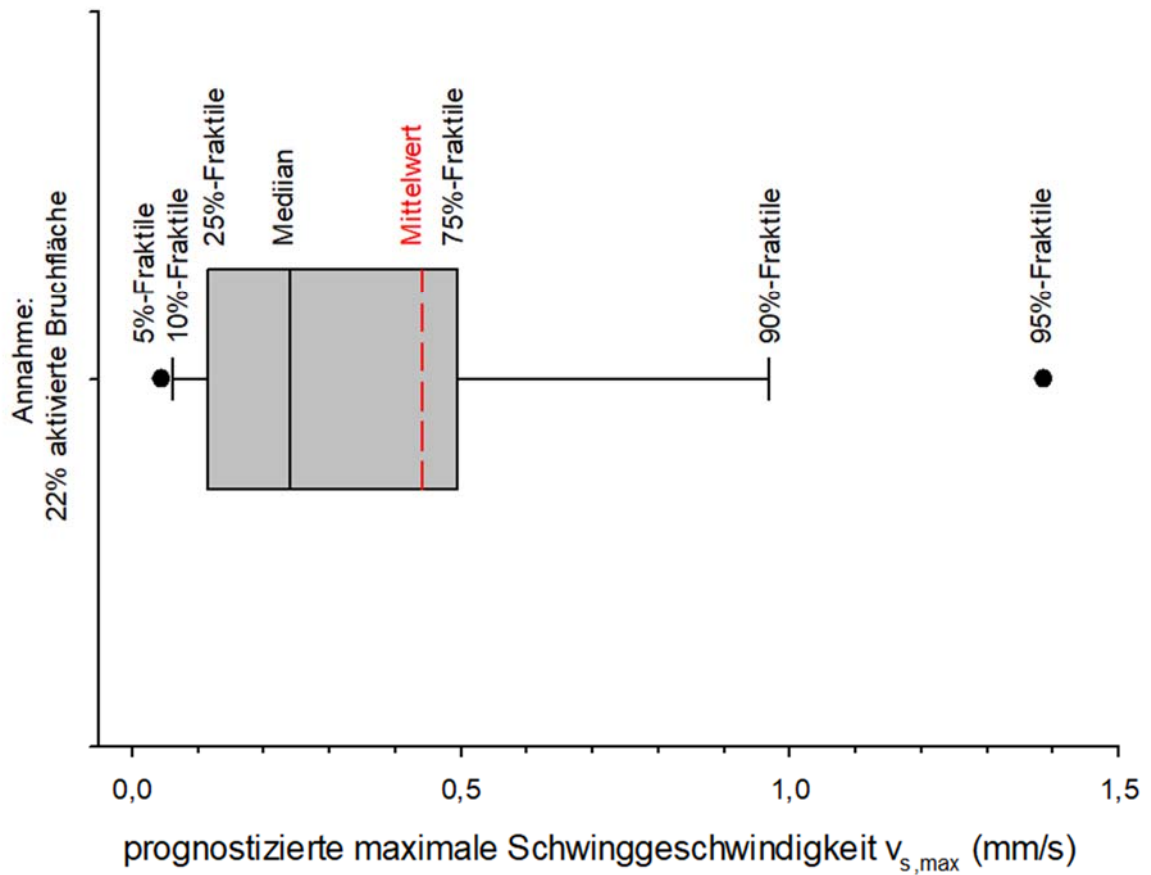


Abb. 25 Boxplot der geschätzten maximalen Schwinggeschwindigkeiten durch Grubenwasseranstieg bei 1/2 bzw. 1/10 Aktivierung der bestehenden Schwächezonen.

Da hohe Schwinggeschwindigkeiten von Interesse sind wurden aus den 905 über die jeweils aktivierte Bruchflächen berechneten Maßzahlen die kumulative Verteilungsfunktion berechnet und in Abbildung 26 dargestellt. Damit ist es möglich, Eintrittswahrscheinlichkeiten für die zu erwartenden Schwinggeschwindigkeiten abzuschätzen.

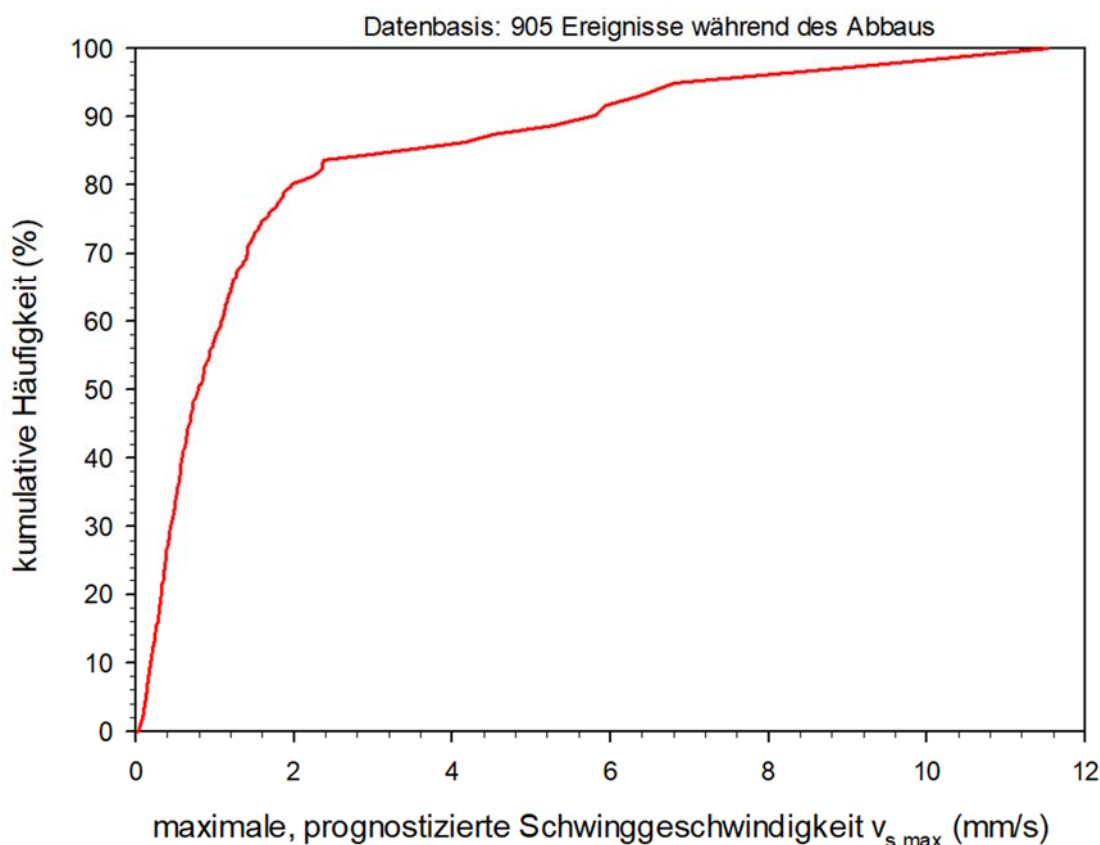


Abb. 26 Kumulative Verteilungsfunktion von maximalen Schwinggeschwindigkeiten beim Grubenwasseranstieg in Bereich Heinrich Robert bei einer Aktivierung von 1/5 (22,63%) der berechneten Bruchflächen.

Aus Abbildung 26 ist zu entnehmen, dass je nach Annahme der aktivierten Bruchflächen folgende in Tabelle 5 zusammengefassten, maximalen Schwinggeschwindigkeiten beim weiteren Grubenwasseranstieg im Bereich Heinrich Robert zu erwarten sind.

Tab. 5 Wahrscheinlichkeiten von erwarteten Schwinggeschwindigkeiten $v_{s,max}$ beim weiteren Grubenwasseranstieg im Bereich Heinrich Robert.

	Annahme: 1/5 aktivierte Bruchfläche
20% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 0,23 mm/s
40% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 0,50 mm/s
60% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 1,00 mm/s
80% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 1,85 mm/s
99,9% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 11,5 mm/s

Für die Annahme einer Aktivierung von Bruchflächen um den Faktor 1/5 ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis mit maximaler Schwinggeschwindigkeit $v_{s,max} > 11,5$ mm/s eintritt, 0,1 %.

Nur im Bereich Heinrich Robert können Ereignisse aus dem Abbau mit denen aus dem bisherigen Grubenwasseranstieg verglichen werden. Wie in Abbildung 9 bis 11 gezeigt, sind

im Bereich Monopol zahlreiche Ereignisse während des Abbaus detektiert worden, während in der Phase des Grubenwasseranstiegs nur 6 Ereignisse registriert wurden. Eine robuste, statistische Auswertung ist somit nur im Ansatz möglich. Aus den Bereichen Haus Aden und Grillo sind ausschließlich Ereignisse aus dem Grubenwasseranstieg der Jahre 2019 bis 2023 verfügbar.

Im folgenden Abschnitt werden diese Ereignisse analysiert und geprüft, ob die für den Heinrich Robert beschriebene Vorgehensweisen und Erkenntnisse übertragbar sind.

10. Analyse der Magnituden und Schwinggeschwindigkeiten aus Auslösungsmechanismen durch Grubenwasseranstieg bzw. Abbau in den Bereichen Haus Aden und Grillo sowie im Bereich Monopol

Für die Bereiche Grillo und Haus Aden liegen keine Erschütterungsdaten aus der Zeit des Abbaus (1986 bis 2000) vor. Die Lotungspunkte Grillo und Haus Aden 2 zeigen für den Betriebszeitraum des seismischen Netzwerks (Dezember 2019 bis 31.05.2023) einen Anstieg des Grubenwasserspiegels um 145 m bzw. 97 m. Während des Grubenwasseranstiegs wurden bis zum 31.5.2023 insgesamt 128 Ereignisse detektiert. Dabei wurden mit den Formeln (12) und (13) Magnituden M_L und die Bruchflächen A berechnet. Diese Ereignisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst und in den Abbildungen 27 bis 29 als Boxplots dargestellt. Für Erläuterungen der Boxplots siehe Abbildung 5. In diesen Abbildungen werden jedoch alle statistischen Ausreißer als schwarze Punkte gezeigt.

Tab. 6 Maximale Schwinggeschwindigkeiten $v_{s,max}$ (mm/s) während des Grubenwasseranstiegs in den Bereichen Grillo und Haus Aden.

	Grubenwasseranstieg Dezember 2019 - 31.05.2023
Datensätze	128
Zeitdauer	~ 1270 d
Mittelwert	0,1815
Median	0,0622
Minimum	$7,1 \cdot 10^{-3}$
Maximum	2,8908

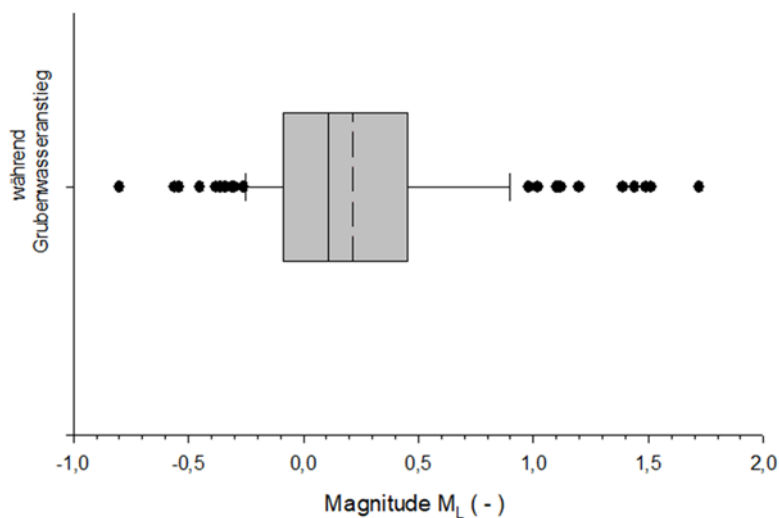


Abb. 27 Boxplot der Magnituden während des Grubenwasseranstiegs in den Bereichen Grillo und Haus Aden.

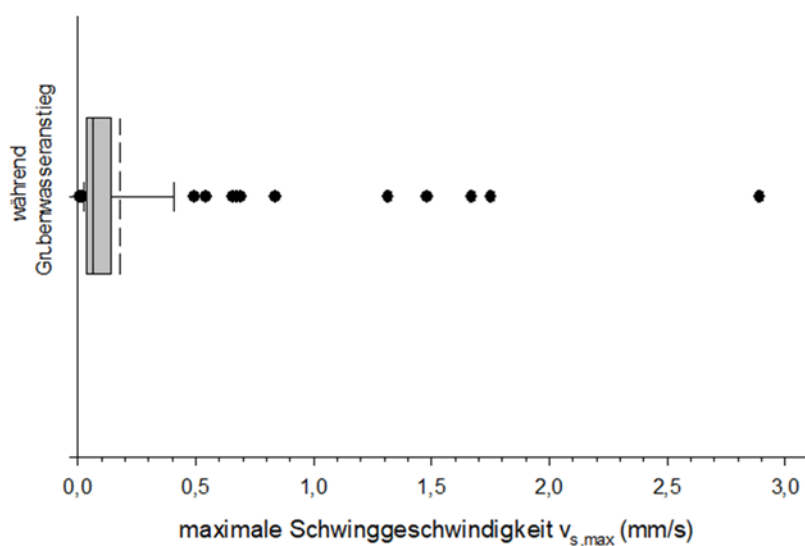


Abb. 28 Boxplot der maximalen Schwinggeschwindigkeit $v_{s,max}$ während des Grubenwasseranstiegs in den Bereichen Grillo und Haus Aden.

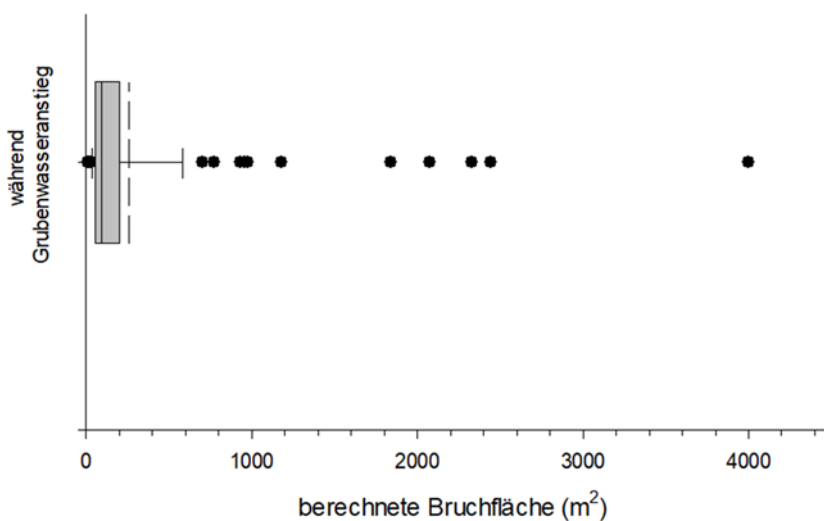


Abb. 29 Boxplot der berechneten Bruchflächen während des Grubenwasseranstiegs in den Bereichen Grillo und Haus Aden.

Für den Bereich Monopol liegen für die Zeiten des Abbaus 2263 Datensätze vor. Für den Zeitraum des Anstiegs des Grubenwasserspiegels liegen nur 6 Datensätze vor. Der Lotungspunkt Lerche zeigt für den Betriebszeitraum des seismischen Netzwerks (Dezember 2019 bis 31.05.2023) einen Anstieg des Grubenwasserspiegels um ca. 295 m. Aus den maximalen Schwinggeschwindigkeiten wurden mit den Formeln (12) und (13) Magnituden M_L und die Bruchflächen A berechnet. Diese Ereignisse sind in Tabelle 7 zusammengefasst und in den Abbildungen 30 bis 32 als Boxplots dargestellt. Für Erläuterungen der Boxplots siehe Abbildung 245. In diesen Abbildungen werden jedoch alle statistischen Ausreißer als schwarze Punkte gezeigt.

Tab. 7 Maximale Schwinggeschwindigkeiten $v_{s,max}$ (mm/s) während des Abbaus und des Grubenwasseranstiegs im Bereich Monopol.

	Abbau 27.02.2003 - 1.01.2011	Grubenwasseranstieg Dezember 2019 - 31.05.2023
Datensätze	2263	6
Zeitdauer	2865 d	~ 1270 d
Mittelwert	0,8434	0,3834
Median	0,61	0,2259
Minimum	0,13	0,1398
Maximum	11,77	1,1136

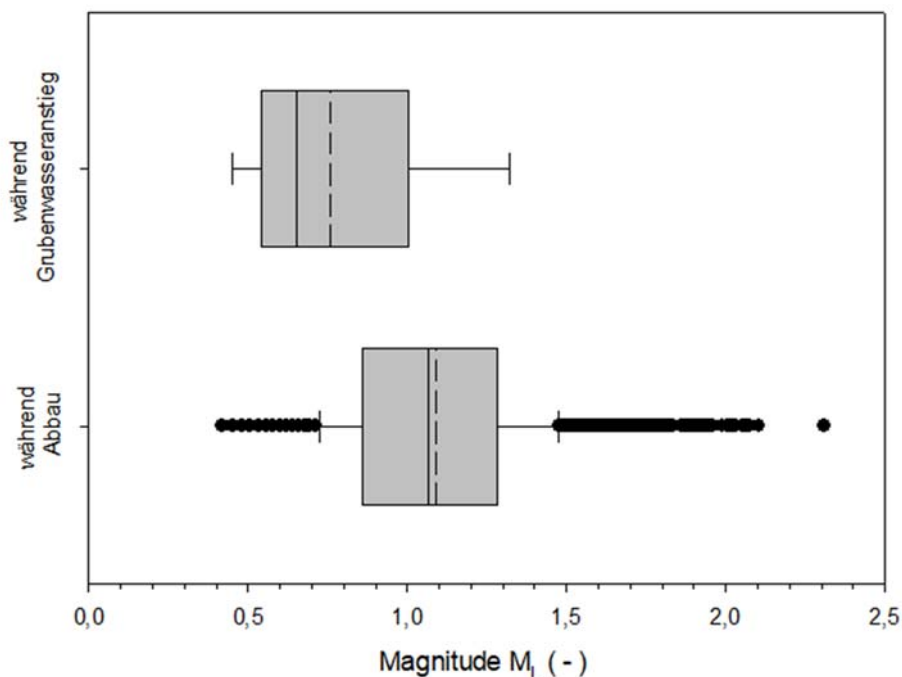


Abb. 30 Boxplot der Magnituden während des Abbaus und während des Grubenwasseranstiegs im Bereich Monopol.

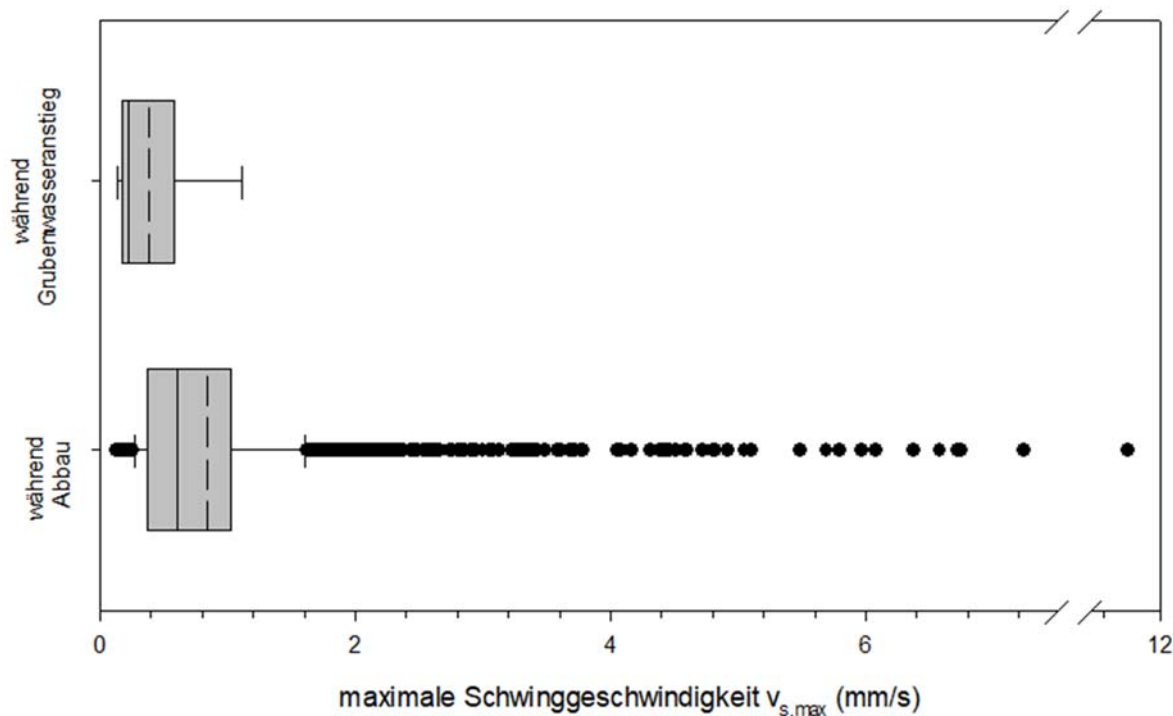


Abb. 31 Boxplot der maximalen Schwinggeschwindigkeit $v_{s,max}$ während des Abbaus und während des Grubenwasseranstiegs im Bereich Monopol.

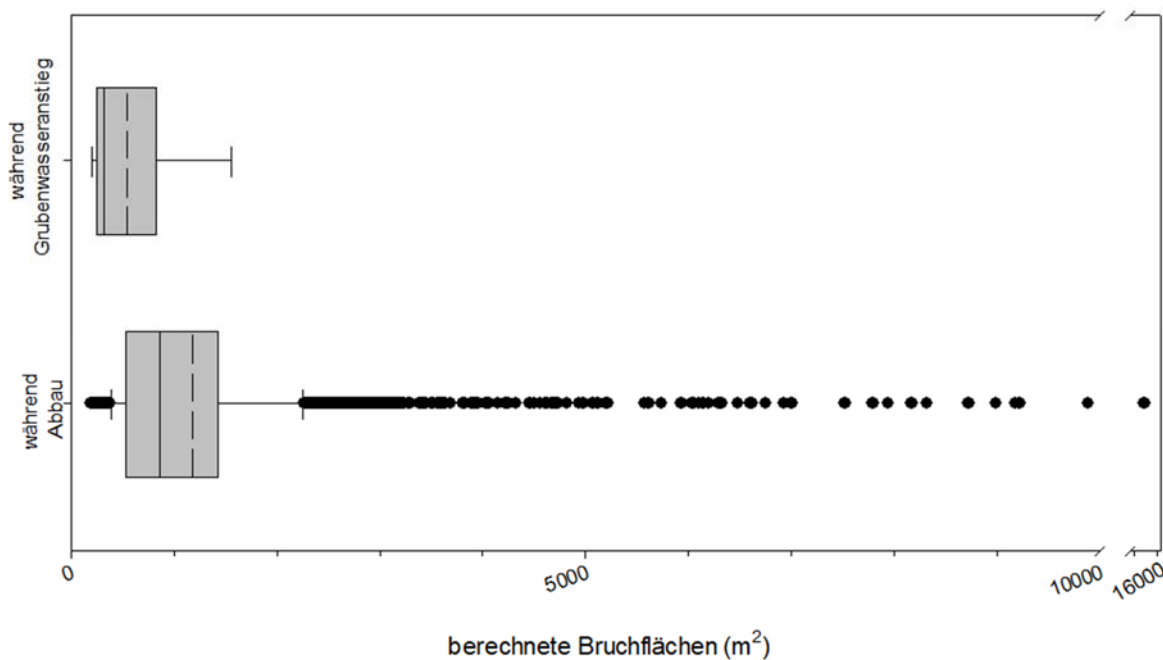


Abb. 32 Boxplot der berechneten Bruchflächen während des Abbaus und während des Grubenwasseranstiegs im Bereich Monopol.

Die Anzahl der Ereignisse während des Grubenwasseranstiegs ist gering. Dies zeigt, dass trotz einer Erhöhung des Wasserspiegels um 250 m an der Lotungsstelle Lerche kaum Erschütterungen auftraten. Für den Bereich Monopol kann - mit gewissen Einschränkungen bei der Datengrundlage - ein Vergleich zwischen berechneten Bruchflächen während des Abbaus und während des Grubenwasseranstiegs verfolgt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tab. 8 Größtes Ereignis im Bereich Monopol während des Strebbaus und des Grubenwasseranstiegs sowie daraus abgeschätzter aktivierter Flächenanteil einer bestehenden Schwächezone.

	Datum	$v_{s,max}$ (mm/s)	M_L	Bruchfläche A (km ²)
Größtes Ereignis während Abbau	29.04.2010	11,70	2,31	0,016
Größtes Ereignis während Grubenwasseranstieg	26.06.2019	1,11	1,32	0,001563
Mutmaßlich maximaler aktivierter Anteil einer bestehenden Schwächezone				9,8 % ($\approx 1/10$)

11. Abschätzung der Magnituden und Schwinggeschwindigkeiten aus Auslösungsmechanismen durch weiteren Grubenwasseranstieg in den Teilprovinzen Monopol und Haus Aden/Grillo

Gleich dem Vorgehen zur Prognose von Erschütterungen durch Grubenwasseranstieg im Bereich Heinrich Robert wurde aus den 2263 Ereignissen während des Abbaus im Bereich Monopol über die jeweils aktivierte Bruchfläche berechneten Maßzahlen die kumulative Verteilungsfunktion berechnet und in Abbildung 33 dargestellt. Damit ist es möglich, Eintrittswahrscheinlichkeiten für die zu erwartenden Schwinggeschwindigkeiten abzuschätzen (Tabelle 9).

Tab. 9 Wahrscheinlichkeiten von erwarteten Schwinggeschwindigkeiten $v_{s,max}$ beim weiteren Grubenwasseranstieg im Bereich Monopol.

	Annahme: 1/10 aktivierte Bruchfläche
20% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 0,055 mm/s
40% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 0,086 mm/s
60% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 0,126 mm/s
80% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 0,204 mm/s
99,9% aller Schwinggeschwindigkeiten	< 1,1 mm/s

Für die Annahme einer Aktivierung von Bruchflächen um den Faktor 1/10 ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis mit maximaler Schwinggeschwindigkeit $v_{s,max} > 1,1$ mm/s eintritt, 0,1 %.

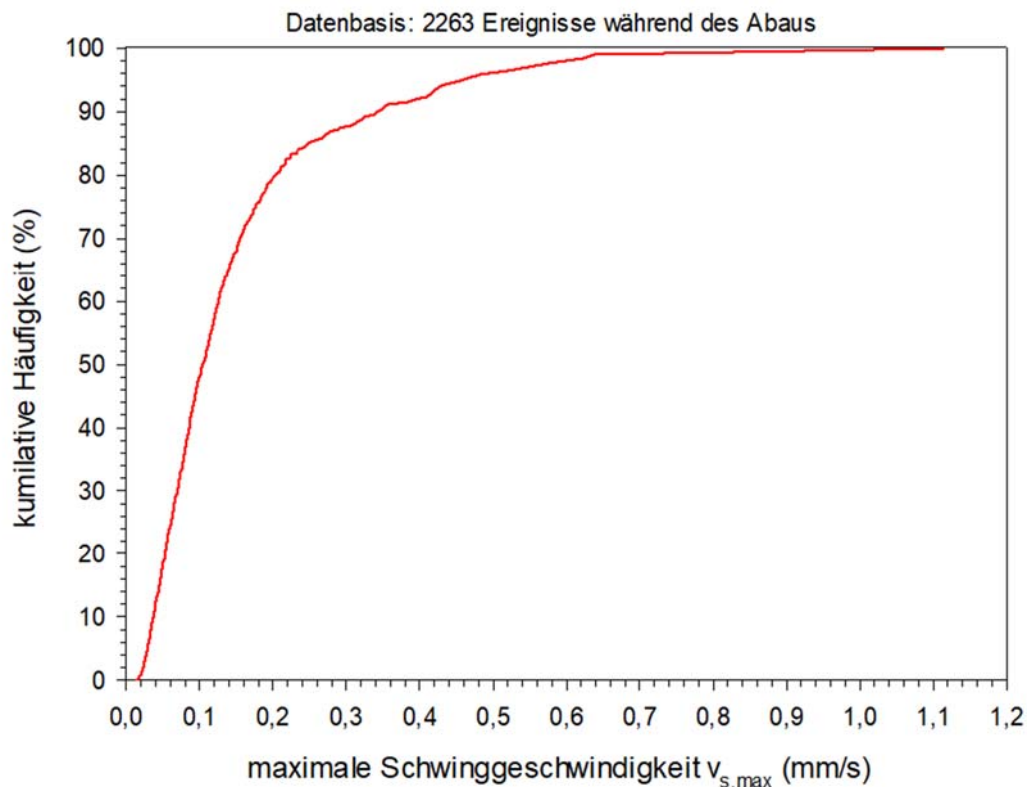


Abb. 33 Kumulative Verteilungsfunktion von maximalen Schwinggeschwindigkeiten beim Grubenwasseranstieg in Bereich Monopol bei einer Aktivierung von 1/10 der bestehenden Bruchflächen.

Für den Bereich Grillo / Haus Aden kann, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, keine Prognose aus Datensätzen aus dem Abbau abgeleitet werden. Die größte detektierte Schwinggeschwindigkeit während des bisherigen Grubenwasseranstiegs war mit $v_{s,max} = 2,9$ mm/s angegeben. Es gibt keine Hinweise dafür, dass dieser Wert bei weiterem Grubenwasseranstieg in den Bereichen Grillo / Haus Aden signifikant übertroffen werden wird.

12. Abschätzung des Potentials der Aktivierung von großen Störungen im Wasserhebungsbereich Aden

In den vorgehenden Kapiteln wurden Erschütterungen im Nahfeld der Abbaue untersucht und für einige Bereiche Erwartungswerte für maximale Schwinggeschwindigkeiten durch den Auslösemechanismus durch Grubenwasseranstieg entwickelt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Größe einer (reaktivierten) Bruchfläche die maximalen Schwinggeschwindigkeiten bestimmen. Neben den abbaunahen Bruchflächen sind zahlreiche große Störungen im Wasserhebungsbereich Aden anzutreffen. Die einzelnen Bergwerke sind meist durch diese Störungen begrenzt. Abbildung 34 zeigt diese großen Störungen wie z.B. Fliericher Sprung oder der Königsborner Sprung. Die einzelnen Abbaugelände halten meist einen deutlichen Abstand zu diesen Störungen.

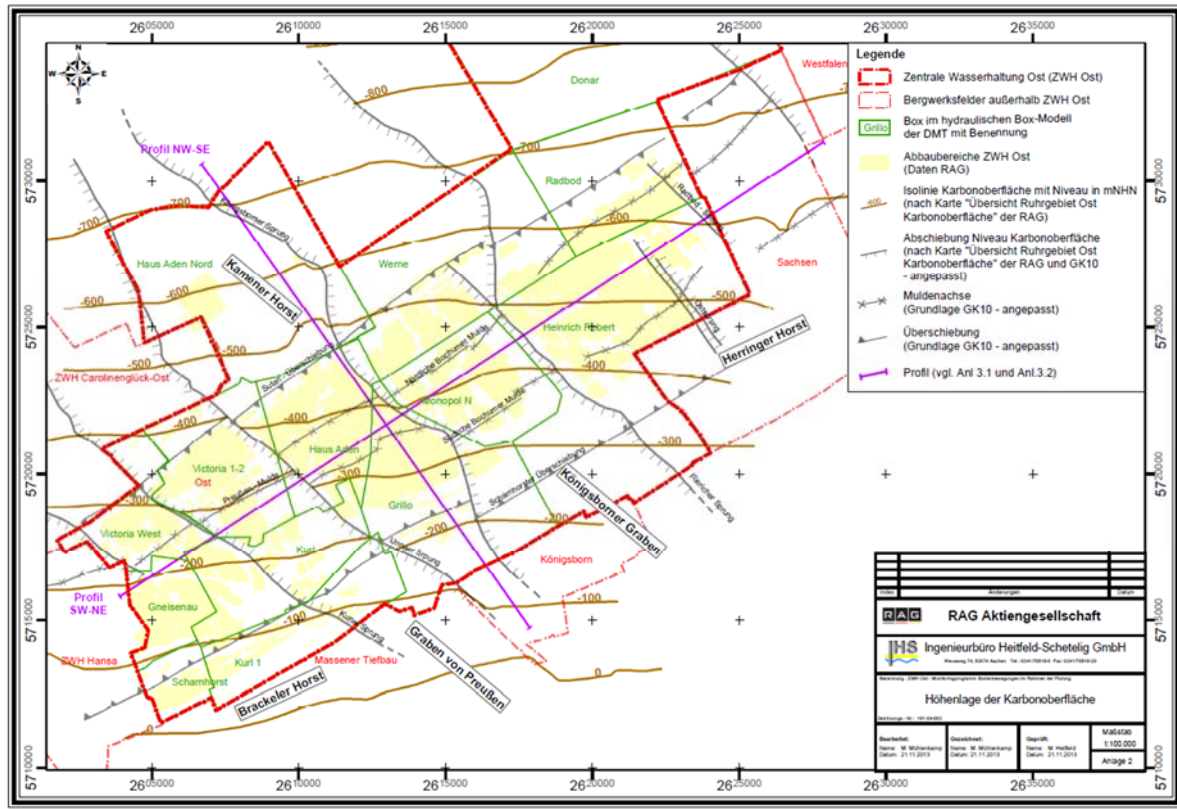


Abb. 34 Großtektonik im Wasserhebungsbereich Aden. IHS (2013).

Einige dieser Sprünge lassen sich bis in das Deckgebirge verfolgen. Bei einem Anstieg des Grubenwassers kann sich ein Wasserdruck auf den Störungen ausbilden. Wie in Kapitel 4 erläutert, reduziert ein Wasserdruck die Scherfestigkeit einer Störung während die Gebirgsspannungen gleich bleiben. In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich ein Ansteigen des Grubenwasserstands auf -380 mNHN auf die Störungen auswirkt und ob die Gefahr einer Reaktivierung damit einhergeht.

Zur Beurteilung der Beanspruchung einer Störung sind folgende Informationen notwendig:

- Orientierung der Störung
- Spannungszustand in der Teufe (Normalspannung σ_N und Scherspannung τ)
- Reibungswinkel φ der Störung
- Wasserdruck p auf der Störung.

Die Streichrichtungen der Störungen liegen meist zwischen 130° und 165° (vgl. Abb. 37) bei einem Einfallen $> 80^\circ$. Der Reibungswinkel von Störungen kann mit $\varphi > 35^\circ$ angenommen werden. Der Wasserdruck p kann konservativ aus dem Pegelstand der nächsten Lotungsstelle abgeschätzt werden. Der Spannungszustand im Unverritzten wurde in Kapitel 7.1 beschrieben.

Um die Normalspannung σ_N und Scherspannung τ auf einer Störung zu berechnen, muss der Einfluss der Abbaue betrachtet werden. Durch einen Abbau werden erst Spannungsspitzen durch Umlagerungsspannungen um den Hohlraum erzeugt. Nach dem Verbrauch des Hangenden über einem Abbau und dem Selbstversatz des Hohlraums (Alter Mann) werden

die Spannungsspitzen wieder abgebaut. In einiger Entfernung zu den Abbauen ist wieder der ursprüngliche Zustand der Gebirgsspannungen vorzufinden.

Diese Betrachtungen wurden exemplarisch an verschiedenen orientierten Störungen mittels einer 3D- numerischen Simulation durchgeführt. Abbildung 35 zeigt ein Modell mit einem Ausschnitt der Strebe im Bergwerk Monopol. Mit dem in Kapitel 7 beschriebenen in-situ Spannungszustand wurden die Umlagerungsspannungen um die Streben berechnet (Abb. 36 und 37).

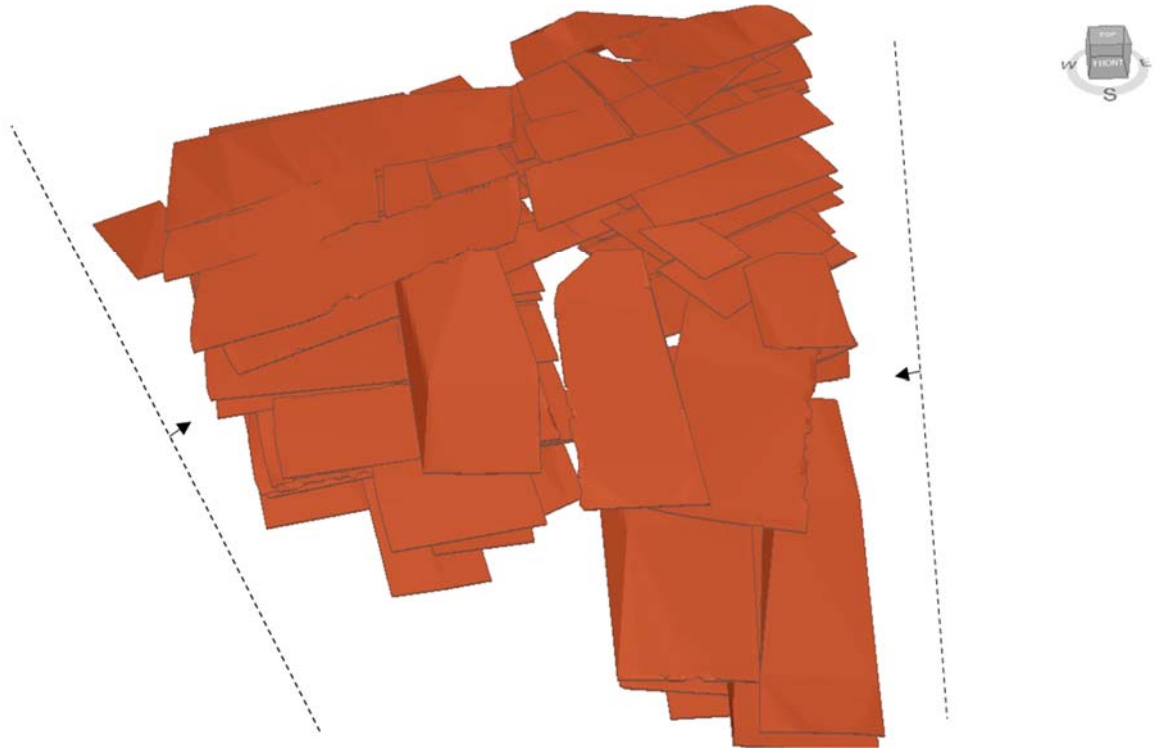


Abb. 35 3D-Modell eines Abbaufeldes mit 6 Flözen, umgrenzt von steilstehenden Störungen (gestrichelte Linien).

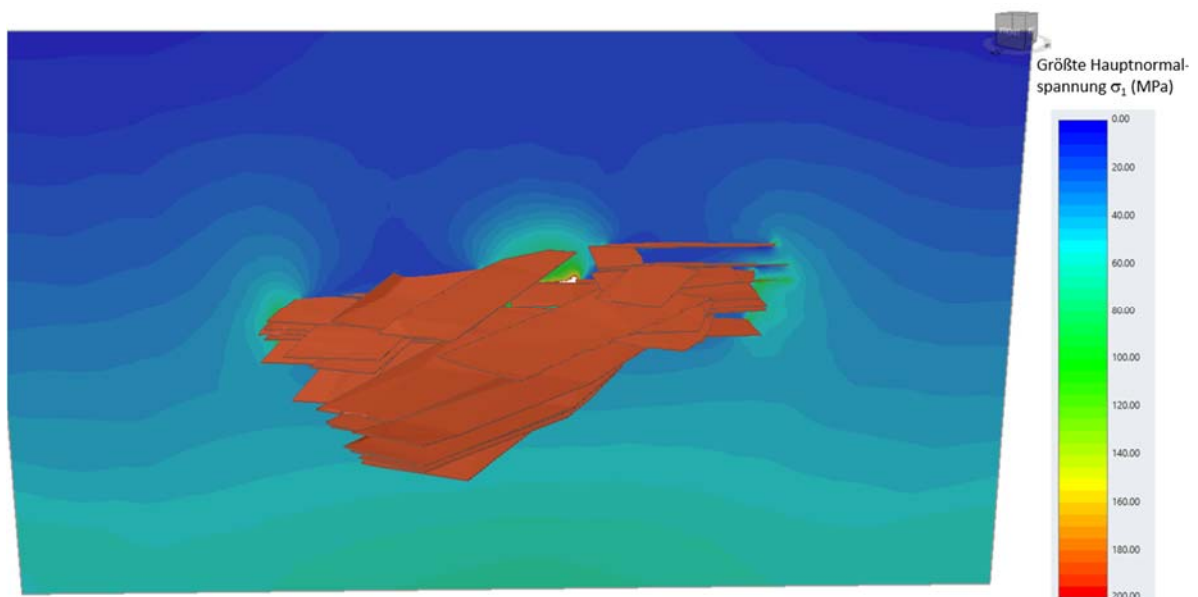


Abb. 36 Vertikaler SW-NE Schnitt mit der größten Hauptnormalspannung σ_1 .

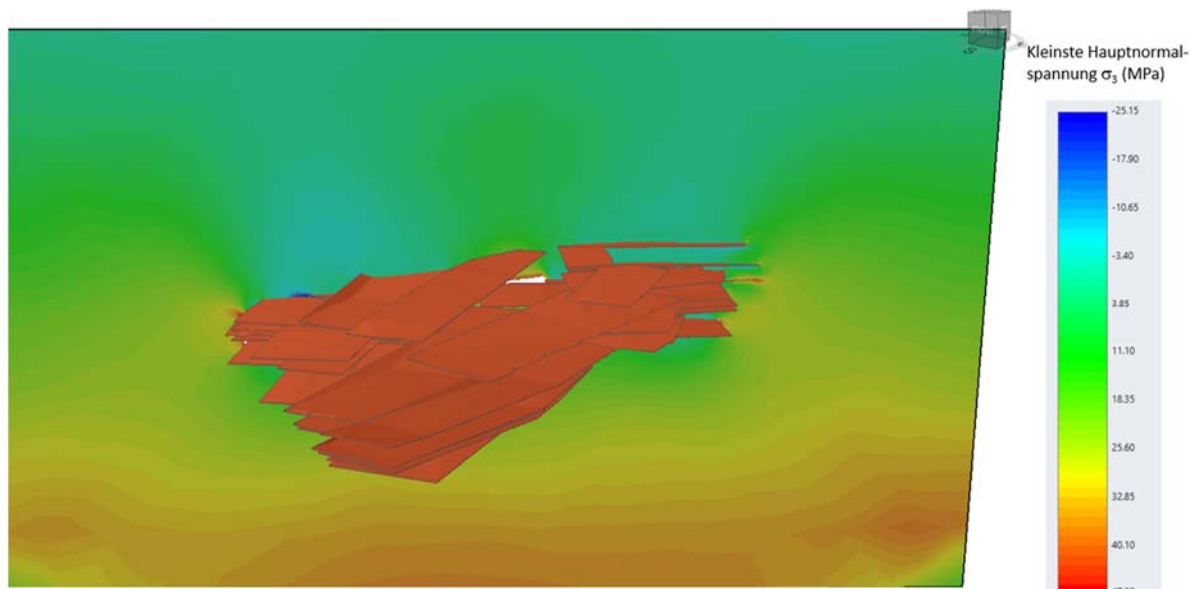


Abb. 37 Vertikaler SW-NE Schnitt mit der kleinsten Hauptnormalspannung σ_3 .

Die Spannungsspitzen nahe der Strebe sind gut zu erkennen. Aus diesen Umlagerungsspannungen an einem Punkt mit einem Abstand von ca. 50 m von den Streben in einer Teufe von -1100 mNHN wurden die Normalspannung σ_N und Scherspannung τ für verschieden orientierte Störungen berechnet. Dazu wurde der Streichwinkel der Störung zwischen 0° und 360° variiert, das Einfallen blieb mit 80° konstant (Abb. 38). Damit sind alle theoretischen Störungsorientierungen berücksichtigt.

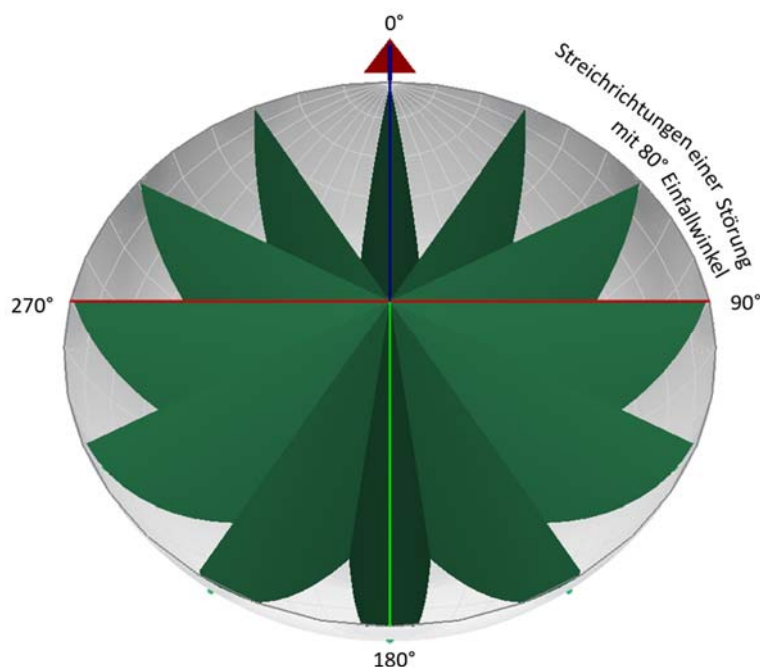


Abb. 38 Perspektivische Kluftrose mit 24 verschiedenen Störungen, auf denen die Normalspannung σ_N und Scherspannung τ aus Umlagerungsspannungen berechnet wurden.

Für den Kluftwasserdruck wurde ein Grubenwasserstand von -380 mNHN angenommen. Daraus ergibt sich eine Wassersäule von 720 m, dies entspricht einem Wasserdruck $p = 7,2$ MPa. Die Scherfestigkeit τ_p einer völlig durchtrennten Störung mit dem Reibungswinkel φ wird beschrieben mit

$$\tau_p = \sigma_{N\text{ eff}} \cdot \tan \varphi = (\sigma_N - p) \cdot \tan \varphi \quad (14)$$

Die Störung ist nicht überbeansprucht, wenn die Scherspannung τ kleiner oder gleich der Scherfestigkeit τ_p ist. Die Grenzbedingung für ein Versagen der Störung lautet also

$$\tau \leq \tau_p = (\sigma_N - p) \cdot \tan \varphi \quad (15)$$

Scherspannung τ , Normalspannung σ_N und Wasserdruck p sind konstant. Die Stabilität der Störung hängt allein vom Reibungswinkel φ ab. Damit kann der Mindestreibungswinkel φ_{mob} (= mobilisierter Reibungswinkel) für eine standsichere Störung berechnet werden:

$$\varphi_{\text{mob}} \geq \arctan \left(\frac{\tau}{\sigma_N - p} \right) \quad (16)$$

Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse für den Mindestreibungswinkel φ_{mob} für eine standsichere Störung. Gezeigt werden hier die beiden Fälle $p = 0$ MPa (gilt für einen Bereich mit aktiver Sumpfung) und $p = 7,2$ MPa (gilt für einen Grubenwasserstand auf -380 mNHN). Deutlich zu erkennen ist, dass je nach dem Streichen der Störung ein unterschiedlicher Mindestreibungswinkel φ_{mob} erforderlich ist.

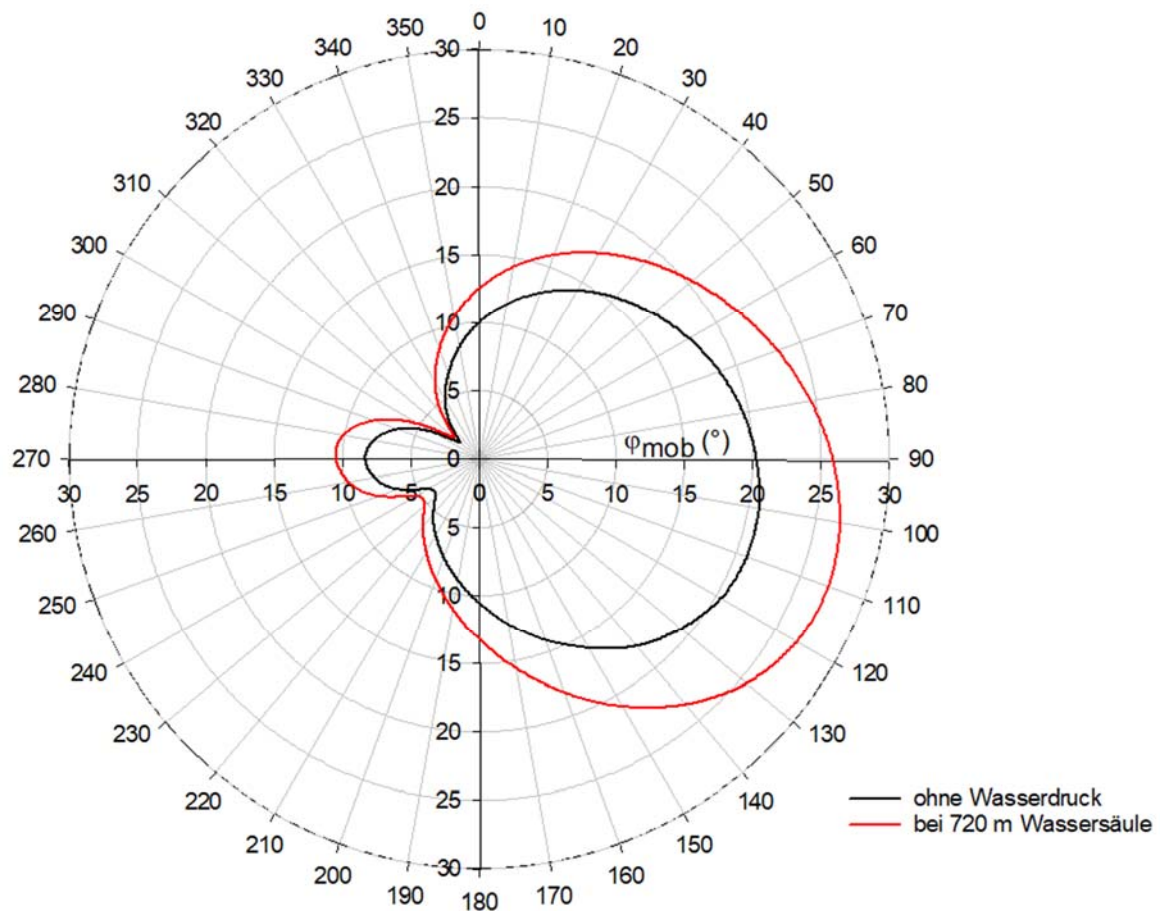


Abb. 39 Erforderlicher Mindestreibungswinkel φ_{mob} für verschieden streichende Störungen ohne Wasserdruck und bei Grubenwasserstand -380 mNHN (= 720 m Wassersäule).

Bei höherem Grubenwasserstand wird ein höherer Reibungswinkel für eine standsichere Störung benötigt. Die größte Beanspruchung einer Störung liegt bei einem Streichen von 115° und einem Fallwinkel von 80° nach NE vor. Hier beträgt der Mindestreibungswinkel $\varphi_{\text{mob}} \geq 27^\circ$. Wie in Kapitel 7.2. beschrieben, sind Reibungswinkel auf Trennflächen in Sandstein und Tonschiefer $> 32^\circ$. Nur Spiegelharnische haben in der Regel kleiner Reibungswinkel.

Festzustellen ist aus diesen Berechnungen, dass ausschließlich nach N/NE einfallende Störungen mit Streichrichtungen zwischen 80° und 130° signifikant beansprucht werden. Da die aktuellen Reibungswinkel φ i.d.R. deutlich höher als die notwendigen Reibungswinkel φ_{mob} sind, kann nur theoretisch von lokalem Versagen von großen Störungen mit Spiegelharnischen ausgegangen werden. Dieser Versagensmechanismus wurde im Wasserhebungsbereich Aden noch nie festgestellt (Rische et al., 2023, FloodRisk, 2023).

13. Zusammenfassung

Die erste Fragestellung beim Grubenwasseranstieg auf -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Aden lautet:

Ist das Auftreten von Erschütterungen an den Grubenwasseranstieg gekoppelt?

Für die Bereiche Heinrich Robert, Haus Aden und Grillo sowie mit Einschränkungen auch für den Bereich Monopol besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Grubenwasseranstieg und Erschütterungen. Aus Abbildung 7 ist ersichtlich, dass das Gebirge sofort mit seismischen Ereignissen auf Grubenwasseranstieg reagiert.

In den anderen Bereichen sind beim bisherigen Grubenwasseranstieg keine Erschütterungen bekannt geworden.

Die zweite Fragestellung beim Grubenwasseranstieg auf -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Aden lautet:

Welche Schwinggeschwindigkeiten durch Erschütterung können beim Grubenwasseranstieg auf -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Aden erwartet werden?

Im Bereich Heinrich Robert ist beim Anstieg des Grubenwassers auf -380 mNHN mit Erschütterungen zu rechnen. Beim bisherigen Grubenwasseranstieg auf ca. -800 mNHN wurden 2200 Erschütterungen registriert (Tab. 4). Während des Abbaus 1994- 2011 wurden hier durch Spannungsumlagerungen Schwächezonen im Gebirge beansprucht und führten zu Erschütterungen. Erschütterungen in diesem Bereich während des Grubenwasseranstiegs legen den Schluss nahe, dass wieder Schwächezonen aktiviert wurden. Die Erschütterungen beim Grubenwasseranstieg bis auf -800 mNHN waren deutlich geringer als beim Abbau. Die

Größe der berechneten Versagensflächen beim Grubenwasseranstieg liegt bei ca. 1/5 der Größe der Versagensflächen beim Abbau.

Die zu erwartende Erschütterungsentwicklung in den Abbaubereichen des Bereichs Heinrich Robert beim Grubenwasseranstieg bis auf -380 mNHN ist in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tab. 15 Zu erwartende Erschütterungsentwicklung im Bereich Heinrich Robert beim Grubenwasseranstieg bis auf -380 mNHN.

Stärkstes Ereignis während Abbau	Zu erwartendes maximales Ereignis beim Grubenwasseranstieg	Zu erwartende maximale Schwinggeschwindigkeit beim Grubenwasseranstieg
$M_L = 2,93$	$M_L = 2,3$	11,5 mm/s

Aus den Analysen der abbaubedingten Erschütterungen (1994-2011) und der Erschütterungen aus dem Anstieg des Grubenwassers bis 30.05.2023 beziehen sich die oben genannten Aussagen auf das Verhalten von Schwächezonen im Teufenbereich von – 1600 mNHN bis ca. -1100 mNHN. Der geplante Grubenwasseranstieg bis auf -380 m NN wird bisher inaktive Schwächezonen in diesem seichteren Teufenbereich beanspruchen und ggf. zum Versagen bringen.

Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass Schwächezonen in diesem Teufenbereich mit höheren Magnituden und Schwinggeschwindigkeiten versagen. Die in-situ Gebirgsspannungen werden mit geringerer Teufe abnehmen und die für Scherspannungen verantwortlichen Differenzspannungen werden somit geringer. Weiterhin sind Schwächezonen in geringeren Teufen meist kohäsionslos und versagen vorwiegend aseismisch.

Knoll (2016, S. 14) arbeitete die Erfahrungen mit Erschütterungen aus dem gut dokumentierten Grubenwasseranstieg in der Lagerstätte Schlemma/Alberoda auf und folgert, dass flutungsbedingte Ereignisse „...etwa eine Magnitudeneinheit unterhalb jener der rein bergbaulichen Ereignisselagen“. Diese Aussage kann aus den Erfahrungen und Analysen beim Abbau und dem Grubenwasseranstieg im Wasserhebungsbereich Haus Aden quantitativ belegt werden.

Für den Bereich Monopol sind beim Grubenwasseranstieg im Zeitraum Dezember 2019 bis 31.05.2023 insgesamt 6 Ereignisse registriert worden. Diese geringe Anzahl von Daten erlaubt keinen seriösen Vergleich der Ereignissen während des Abbaus (2263 Datensätze) mit denen des Grubenwasseranstiegs (6 Datensätze). Eine erste Abschätzung lässt eine Aktivierung von 1/10 der Bruchflächen während des Abbaus vermuten. Damit wären

maximale Schwinggeschwindigkeiten von 1,11 mm/s für den weiteren Grubenwasseranstieg anzunehmen.

Für den Bereich Grillo / Haus Aden kann mangels registrierter Ereignisse keine Prognose aus Datensätzen aus dem Abbau abgeleitet werden. Es gibt aber keine Hinweise, dass der bislang größte Wert für die Schwinggeschwindigkeit von 2,9 mm/s übertroffen werden wird.

Dieselbe Aussage gilt auch für alle anderen Bereiche. Es liegen weder Ereignisse während des Abbaus noch während des bisherigen Grubenwasseranstiegs vor. Möglicherweise werden vermutlich ausschließlich aseismische Störungen angetroffen. Es ist daher davon auszugehen, dass keine Erschütterungen beim weiteren Grubenwasseranstieg auftreten werden bzw. dass das Potential für Erschütterungen gering ist.

Die dritte Fragestellung beim Grubenwasseranstieg auf -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Aden lautet:

Ist nach Beendigung des Grubenwasseranstiegs auf -380 mNHN im Wasserhebungsbereich Aden das Auftreten weiterer Erschütterungen ausgeschlossen?

Die Entwicklung des Porenwasserdrucks im Gebirge ist zeitabhängig und von der Permeabilität des Gebirges abhängig. Es sind zahlreiche Strecken vorhanden, so dass sich Grubenwasser schnell, dem Streckengefälle folgend, ausbreiten kann. Eine effektive Wasserdruckerhöhung auf Schwächezonen mit nachfolgendem seismischen Ereignis hängt von der Gebirgsdurchlässigkeit ab und kann Monate dauern.

Es wurde in Kapitel 13 gezeigt, dass eine erschütterungsrelevante Aktivierung der großen Störungen unwahrscheinlich ist.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass keine größeren Ereignisse als die bisherigen Erschütterungen selbst bei einem weiteren Grubenwasseranstieg auftreten.

Dortmund, den 21. September 2023




Prof. Dr.-Ing. Michael Alber