

## Entwicklung einer Gefährdungsmatrix für tragende Pfeiler der bergbaulichen Hohlräume in Mendig (Vordereifel)

GESA AMSTUTZ & ANSGAR WEHINGER & MICHAEL ROGALL

**Kurzfassung:** Unter der Stadt Mendig in der Vordereifel (Rheinland-Pfalz) ist in einer Tiefe von lediglich etwa 15 bis 25 m ein ausgedehntes Hohlraumssystem vorhanden. Die Hohlräume entstanden vorwiegend im 19. Jahrhundert und in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch die bergmännische Gewinnung von Basalt im Kammer-Pfeiler-Bau. Das Tragwerk wird aus stehen gelassenen Basaltpfeilern und der Firste gebildet. Für die Standsicherheit der Hohlräume sind besonders die Elemente und Strukturen der Pfeiler von großer Bedeutung. Bei der ingenieurgeologischen Kartierung der Untertagehohlräume werden die Merkmale der Pfeiler in eigens für Mendig entwickelten Formblättern aufgenommen. Bisher wurde die Standsicherheit bzw. der Gefährdungsgrad der Pfeiler über den Vergleich mit Element- und Strukturlisten bzw. -tabellen bestimmt. Im Rahmen der vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz vorgeschlagenen und betreuten Diplomarbeit von Frau MASSENKEIL, jetzt AMSTUTZ (2012) wurde ein Datenbank-basiertes Punktesystem zur Gefährdungsbeurteilung der Pfeiler entwickelt. Im vorliegenden Artikel werden die Entwicklung und Anwendung dieser Matrix vorgestellt. Bei Anwendung für das Blatt 01 der ingenieurgeologischen Karte von Mendig konnte eine 98-prozentige Übereinstimmung zwischen den beiden Methoden zur Gefährdungsbeurteilung erzielt werden.

**Abstract:** Under the city of Mendig (Rhineland-Palatinate) extensive underground mines remain from former mining activities of the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> century. The cavities have a room-and-pillar structure in a shallow depth of about 15-25 m. During the geo-technical mapping of the underground cavities, the important structures and elements of the pillars are documented in forms, which have been developed especially for this project. So far, the geologist or engineer determined the stability and vulnerability of the pillars by comparison with these forms. In her diploma thesis that was assisted by the State Department for Geology and Mining, MASSENKEIL (2012), now married AMSTUTZ, developed a database-based point system for the risk assessment of the supporting pillars. In the article, the development and application of this matrix are presented. For the risk assessment a 98 percent conformity between the two methods could be proven.

## 1. Einleitung

Niedermendig ist Teil der Stadt Mendig in der Vordereifel. Der dort anstehende quartäre Lavastrom aus porösem Basalt wurde seit vielen Jahrhunderten teils in Tiefbauten und teils in Tagebauten abgebaut. In der Folge entstanden umfangreiche Hohlräume unter Tage, die heute teilweise von Gebäuden und Straßen überbaut sind. Da sich die Hohlräume in einer Tiefe von lediglich 15 bis 25 m unter der Geländeoberfläche befinden, können sich Instabilitäten im Tragwerk auch auf die obertägige Nutzung auswirken. Tatsächlich sind in der Vergangenheit häufiger Tagesbrüche und Geländesenkungen aufgetreten. Bereits in den 1980er bis 1990er Jahren wurden vom damaligen Geologischen Landesamt Rheinland-Pfalz die Hohlräume in Niedermendig in einer Breite von etwa je 50 m beidseits der Laacher See-Straße (L 113) und der Brauerstraße vermessen und geotechnisch aufgenommen. Die Ergebnisse der geotechnischen Aufnahmen sind in Gutachten sowie ingenieurgeologischen Karten dokumentiert (KERZAN et al. 1995, JAHNEL et al. 1996).

Angestoßen durch eine missglückte Sprengung in einem aktiven Basalt-Tagebau und Erschütterungen in der Stadt Mendig am 9. Juli 2010, ist die Standsicherheit der untertägigen Grubenbaue wieder in den Fokus gerückt. Seit dem Jahr 2011 führt das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung von Rheinland-Pfalz die neue und vollständige geotechnische Aufnahme der zugänglichen Hohlräume in Niedermendig durch (ROGALL et al. 2011, WEHINGER & ROGALL 2012). Hierbei sind wesentliche Ziele, die Feststellung möglicher Gefährdungen und die Entwicklung neuer Methoden, um das von der Altbergbau-Problematik betroffene Gebiet effizient und nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik untersuchen zu können. In diesem Zusammenhang wurden auf Vorschlag des LGB auch zwei Diplom-Arbeiten vom Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz vergeben (MASSENKEIL 2012, ROTHE 2013). Der vorliegende Artikel dokumentiert die Methode bzw. Kriterien der geotechnischen Aufnahme und insbesondere die Entwicklung einer Matrix (Punktesystem) zur Ermittlung des Gefährdungsgrades von tragenden Pfeilern.

Die Autoren danken besonders Herrn Diplom-Geologe Klaus Kurz für den intensiven fachlichen Austausch, die Mitteilung seiner Erfahrungen im Rahmen der geotechnischen Aufnahme der Hohlräume und die praktische Mitarbeit vor Ort. Weiterer Dank gilt Herrn Heinz Geilen für seine tatkräftige Unterstützung der Feldarbeiten, die Hilfe bei der Orientierung in den Kellern und die vielen Mitteilungen zur Historie.

## 2. Geographie, Geologie, Bergbau

Die Eifel ist Teil des linksrheinischen Schiefergebirges. Im Tertiär und im Quartär eruptierten hier mehr als 350 Vulkane. Der quartäre Vulkanismus ist auf zwei große geographische Gebiete beschränkt, auf die Osteifel mit dem Zentrum des Laacher Sees und auf die Westeifel mit einer Vulkankette von Bad Bertrich über Gerolstein bis nach Ormont (ROTHE 2006).

Die Verbandsgemeinde Mendig befindet sich im Landkreis Mayen-Koblenz in der Osteifel, 25 Kilometer westlich von Koblenz, etwa fünf Kilometer südlich vom Laacher-See entfernt. Mendig ist bekannt für den historischen Abbau von Basalt für Mühlsteine im Oberen Niedermendiger Lavastrom.

Vor etwa 300 000 Jahren und vor 150 000 Jahren eruptierte der Wingertsberg-Vulkan, dessen Lavaströme nach Süden bis nach Niedermendig flossen. Der Untere Niedermendiger Lavastrom (300 000 Jahre) ist ein kompakter und blasenarmer Leuzit-Nephelin-Tephrit. Meist nur durch eine wenige Meter mächtige, gefrittete Lehm-

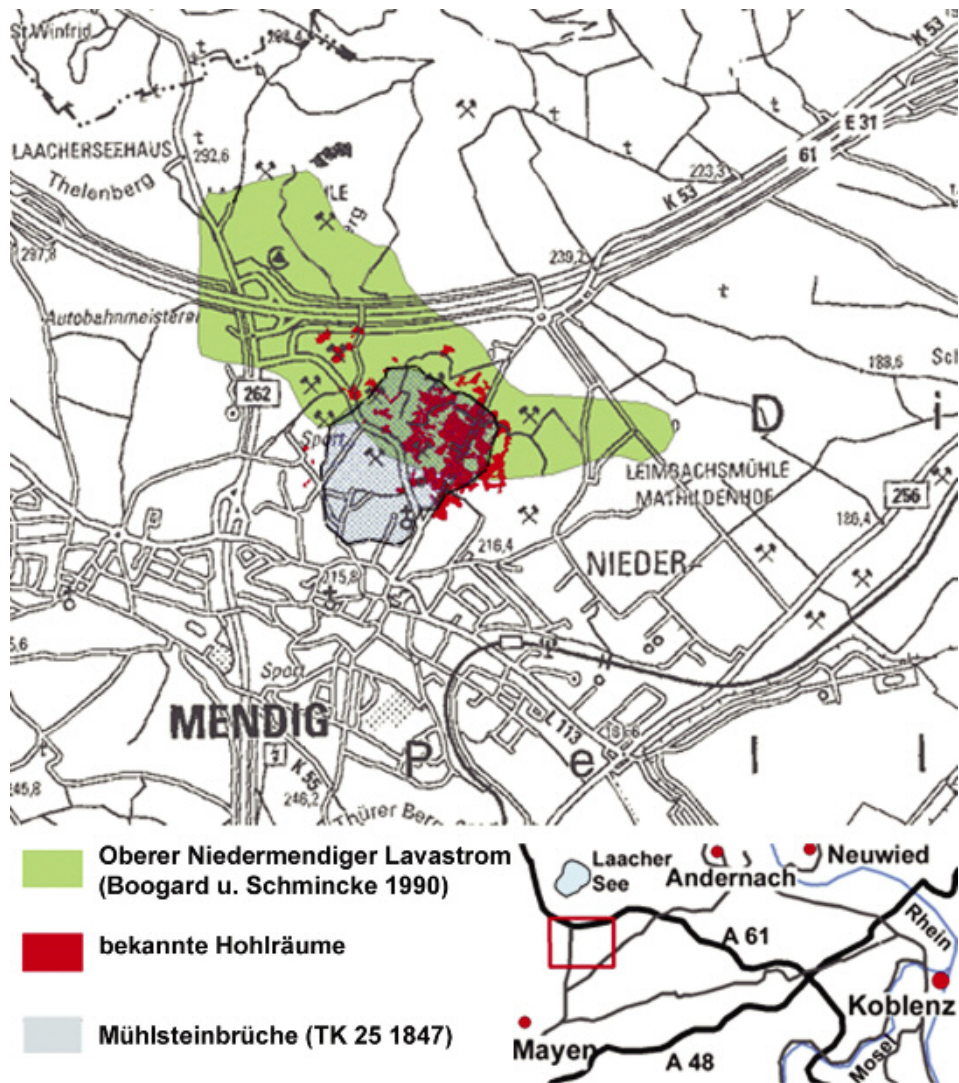


Abb. 1: Lage des Oberen Niedermendiger Lavastroms sowie der bekannten Hohlräume und der Verbreitung der Mühlsteinbrüche gemäß der preußischen Uraufnahme des Jahres 1847 (Grafik: SCHMITZ & WEHINGER, LGB).

schicht getrennt, folgt im Hangenden der Untere Niedermendiger Lavastrom. Seine Struktur ist porös und er wird petrographisch als Nephelin-Leuzit-Tephrit mit Grundgebirgs-Einschlüssen beschrieben (MEYER & SCHUMACHER 2012). Vor allem die Porosität und die im Vergleich zu dichtem Basalt geringere Härte sowie die gute Bearbeitbarkeit und die Möglichkeit, große Blöcke bergen zu können, bestimmen die besondere Eignung des Basalts zur Herstellung hochwertiger Mühlsteine. Der Basalt

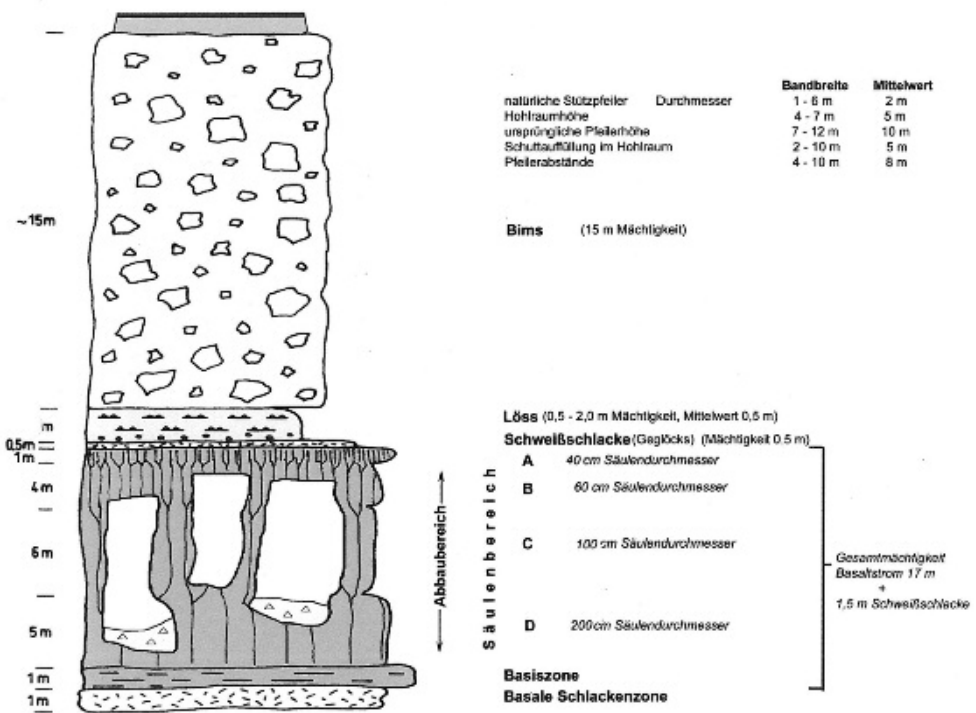
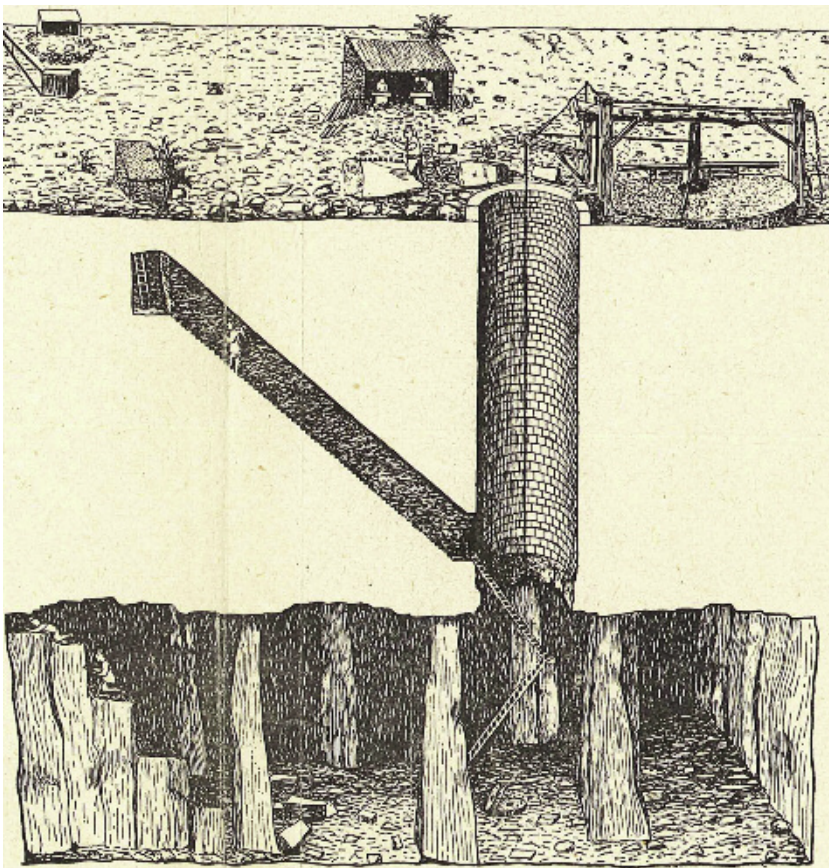


Abb. 2: Schematisches geologisches Profil des Oberen Niedermendiger Lavastroms einschließlich Eintragung bergbaulicher Hohlräume und der hangenden Schichten. Oberhalb einer basalen Schlackenzone und einer Basiszone aus Basalt folgen meist etwa fünfzehn Meter hohe Basaltsäulen, auf die sich der historische Abbau konzentrierte. Die durch vertikale Abkühlungsklüfte getrennten polygonalen Basaltsäulen weisen an deren Fuß einen Durchmesser von bis zu drei Metern auf. Die Kluffabstände nehmen bis zur Firste auf bis etwa 0,5 m ab. Die zusätzlichen Klüfte setzen in der Regel auf halber Höhe des Lavastroms diagonal als Gabelungsklüfte an. Die Lavastromoberfläche, die Topbrekzie, ist schlackig ausgebildet (Schweißschlacke). Die Mucken sind durch Frost abgesprengte Lavabruchstücke, die durch Kryoturbation in den hangenden Löss eingearbeitet wurden. Oberhalb des Lösses lagerte sich vor etwa 13 000 Jahren Tephra (sog. Bims) der Laacher See-Eruption ab (Grafik: ROGALL et al. 2011).

Abb. 4: Illustration des historischen, untertägigen Basaltabbaus in Niedermendig. Die Basaltsäulen wurden von oben nach unten abgebaut. Die Förderung erfolgte über senkrechte Schächte, die Bergleute (Leyer) führen über tonnlägige Treppenschächte und Leitern ein (Grafik: HÖRTER et al. 1955).



Abb. 3: Untertägiger Grubenbau in Niedermendig mit natürlichen Restpfeilern aus Basalt. Rechts vom Pfeiler in der Bildmitte ist ein Firstausbruch vorhanden. Oben rechts im Bild befindet sich ein Red Crack an der Firste. Im Bildhintergrund links ist ein Schüttkegel eines verfüllten Schachts zu erkennen. Es ist typisch, dass rund um den Schacht drei Restpfeiler zur Stabilisierung des Hohlraums stehen gelassen wurden (Foto: TeamXmedia 23.10.2012 im Auftrag des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz).



von Niedermendig wird seit alters her als „Weichbasalt“ bzw. „Mühlsteinbasalt“ bezeichnet. Im Unterschied zu nahezu allen anderen Anwendungen von Naturstein sind zu harte bzw. dichte Partien des Basalts für die Mühlsteinherstellung als Stein schlechter Qualitäten ausgesondert worden (WEHINGER 2004).

Der Obere Niedermendig Lavastrom ist etwa zweieinhalb Kilometer lang und bis zu 25 m mächtig. Der Lavastrom besitzt infolge der Erhaltung einen typischen horizontalen Aufbau, der auch die felsmechanischen Eigenschaften beeinflusst (siehe Abb. 2).

Die Gewinnung des Basalts erfolgte zumindest seit dem 18. Jahrhundert untertägig. Die untertägigen Hohlräume im Niedermendig Lavastrom sind unregelmäßig im Kammer-Pfeiler-Bau ausgebildet und weisen eine Vielzahl von natürlichen Restpfeilern aus Basalt auf. Die Höhe der Abbaukammern im Niedermendig Lavastrom umfasst eine Spannweite von Kriechhöhe bis zu mehr als 10 Meter. Die Förderung der Mühl-/Werksteine aus den untertägigen Grubenbauen erfolgte über Schächte, wobei der Abstand zwischen den Schächten in der Regel zehn bis fünfzig Meter beträgt. Häufig wurden nach dem Abbau die Schächte mit Abraum oder Basalt-Kleinschlag der Mühlstein-/Werksteinproduktion oder Müll verfüllt. Die Abb. 3 zeigt ein Foto und Abb. 4 einen Prinzipschnitt zur Illustration des Tiefbaus. Die Gesamtfläche der Hohlräume in Niedermendig wird auf etwa 400 000 m<sup>2</sup> geschätzt.

### 3. Ingenieurgeologische Kartierung

#### 3.1. Einführung

Die ersten ingenieurgeologischen Karten der Hohlräume in Niedermendig im Maßstab 1 : 200 wurden nach dem Tagesbruch auf dem Sportplatz am 2. März 1988 vom damaligen Geologischen Landesamt Rheinland-Pfalz erstellt. Diese Karten sind den Gutachten von KERZAN et al. 1995 und JAHNEL et al. 1996 beigelegt. Des Weiteren wurden die Karten von SCHERSCHEL (1999) und fortlaufend im Landesamt für Geologie und Bergbau ergänzt. Seit dem Jahr 2011 werden die vorhandenen Karten neu bearbeitet und weitere Hohlraumbereiche erstmals geotechnisch erfasst (ROGALL et al. 2011, WEHINGER & ROGALL 2012). Bis Ende 2012 umfasste die ingenieurgeologische Karte von Niedermendig 19 Kartenblätter. Im Rahmen der Diplomarbeiten von MASENKEIL (2012) und ROTHE (2013) wurden die Hohlräume auf Blatt 01 ingenieurgeologisch neu aufgenommen. Dabei nimmt das Besucherbergwerk Niedermendig einen Großteil dieses Kartenblattes ein.

Für die ingenieurgeologische Bewertung der Standsicherheit der tagesnahen Grubenbaue werden die für die Standsicherheit relevanten **Elemente** und **Strukturen** des Kammer-Pfeiler-Baus bzw. deren charakteristischen Eigenschaften erfasst.

Hauptelemente des Kammer-Pfeiler-Baus sind die Geometrie bzw. Abmessungen sowie das Tragwerk. **Das Tragwerk besteht aus den Hauptelementen Pfeiler und Firste** („natürliches Dach“). Die Pfeiler und die Firste der untertägigen Hohlräume zeigen einen großen Formenschatz an Strukturmerkmalen.

Die Tragfähigkeit der **Pfeiler** ist zunächst abhängig von der Geometrie, das sind die Pfeilerhöhe und der Durchmesser, deren Verhältnis (Schlankheitsgrad) sowie von der lithologischen Ausprägung und dem Gesamtzustand des Pfeilers. Weiteren Einfluss auf die Standsicherheit haben die Art, Anzahl und Ausbildung der Trennflächen. Dabei sind geologisch bedingte Merkmale (primäre Trennflächen) und Elemente, die während und nach dem bergmännischen Abbau von Basalt entstanden (sekundäre Trennflächen), zu unterscheiden. Die Abb. 5 zeigt exemplarisch einige der Pfeiler auf Blatt 01 der ingenieurgeologischen Karte.



Abb. 5: Beispiele für Pfeiler auf dem Blatt 01 der ingenieurgeologischen Karte des LGB. Die oberen beiden Fotos zeigen die natürlichen Restpfeiler P010404 (links) und P011008 (rechts). Diese Pfeiler weisen erhebliche Brüche auf und sind hoch bzw. sehr hoch gefährdet. Im Bild unten links ist ein historischer, künstlicher Pfeiler aus gestapelten Mühlsteinen abgebildet (Pfeiler P011111) – der Pfeiler ist intakt und von ihm geht keine Gefährdung aus. Das Bild unten rechts zeigt den natürlichen Basaltpfeiler P010809 (mittlere Gefährdung) sowie den gemauerten Pfeiler P010803 (keine Gefährdung). Der natürliche Pfeiler weist historische Metallpinne und -gurte auf, die noch intakt sind (Fotos: MASSENKEIL, ROTHE).

Die **Firste** im Niedermendiger Lavakeller ist in der Regel im Bereich der sogenannten Glocken am Top des Basaltlavastromes gelegen. Bei natürlichen oder künstlichen Unregelmäßigkeiten, wie zum Beispiel Nachbrüchen, kann die Firste auch im Hangenden des Basaltes wie in der Schweißschlacke, in den Mucken, im Löss oder im Bims angeordnet sein (vergleiche mit Abb. 2). Idealerweise sollte die Firste im Bereich des Grubenbaues ein regelmäßiges Bild aus Basaltsäulen ergeben.

Des Weiteren zeigt eine Vielzahl der Tragwerke **historische Sicherungen**. Dabei handelt es sich um Eisenpinne, Holzkeile, Metallgurte und -ketten. Außerdem wurden schon in der Vergangenheit künstliche Pfeiler aus Mühlsteinen, Bruchsteinen und Ziegelsteinen errichtet. Diese Sicherungen weisen auf bereits früher erkannte Standsicherheitsdefizite hin.

Die geotechnische Erfassung der Pfeiler und Hohlräume erfolgt mit Hilfe von Formblättern, die bereits Anfang der 1990er Jahre im Geologischen Landesamt Rheinland-Pfalz entwickelt und bis heute weiterentwickelt wurden (siehe Abschnitt 3.2).

### 3.2. Formblätter

Das **Pfeilerformblatt** beinhaltet neben der Pfeilernummer unter Nennung des Hohlraumes Informationen über die Pfeilerausbildung, Angaben über primäre und sekundäre Trennflächen sowie den Pfeilerzustand (Abb. 6). Darüber hinaus wird auch der unter Tage klassifizierte Gefährdungsgrad protokolliert. Bei der Pfeilerausbildung wird der Blick auf die Höhe und den Durchmesser (minimal und maximal) gelegt. Aus diesen Angaben wird der Schlankheitsgrad berechnet, welcher für die Einstufung einer möglichen vom Pfeiler ausgehenden Gefahr bedeutsam ist. Die primären und sekundären Trennflächen werden mit ihrer Anzahl, Öffnungsweite und ihrem Durchtrennungsgrad aufgenommen. Der Pfeilerzustand, also die Beschreibung von Pfeilerform, Abplatzungen, Zerrüttungen und Auflockerungen, wird auf dem Formblatt festgehalten und die genannten Merkmale werden nach kleinräumiger und großräumiger Ausbildung sowie schwacher und starker Ausprägung geordnet.


Der gesamte Hohlraum wird auf einem **Formblatt für Hohlräume** dokumentiert (Abb. 7). Dabei werden allgemeine Daten über die Abmessungen des Hohlraumes, über die Sohle, die Mauern, Schüttkegel und Wasserzutritte festgehalten und Angaben über Pfeiler und Informationen über die Firste notiert. Bei der Aufnahme der Firststrukturen werden Ausbrüche, deren Fläche und Anzahl, Trennflächen, Sicherungen, Auflockerungsgrad sowie abgestürzte Glocken berücksichtigt. Weitere Auffälligkeiten werden unter „Bemerkungen“ protokolliert. Abschließend wird ein Gefahrengrad unter Tage eingestuft, der sich aus dem Gefahrengrad der Tragwerke, der Firstausprägung, der Hohlraumgeometrie und den Schüttkegeln zusammensetzt.

---

Abb. 6: Formblatt des LGB zur geotechnischen Erfassung eines Restpfeilers mit Eintragungen für den hoch gefährdeten Pfeiler P010404. Für den als Beispiel genannten Pfeiler (siehe auch Abb. 5) ergibt sich bei Anwendung des Matrixsystems eine Punktzahl von 289 (vergleiche mit Tab. 3). Folgende Merkmale liefern die größten Anteile an der Gefährdungsbeurteilung: durchtrennte Klüfte, Trennflächenöffnungen > 3 mm, stark gekrümmte Pfeiler, Abplatzung und Zerrüttung des Pfeilers (verändert nach MASSENKEIL 2012).



P010404

Hohlraumkartierung Niedermendig		 Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz			
HOHLRAUM:	H0104	Bearbeiter:	Massenkeil	ANLAGE:	1.1.4
PFEILER:	P010404	Datum:	Juni 2012		

<b>Pfeilerausbildung:</b>	
Art:	Basaltpfeiler
Pfeilerhöhe:	Basaltpfeiler
ø minimal:	4,20m
ø maximal:	2,50m (Sohle)
Säulenzahl oben:	-
Säulenzahl unten:	4
Schlankheitsgrad:	3      Ø:1,68
Felsspron:	ja, an zwei unterschiedlichen Scherklüften
Sicherungen:	-
intakt/defekt:	
Pfeilerform:	<input type="radio"/> schwach gekrümmt <input type="radio"/> stark gekrümmt
Bemerkungen:	Rezente Abplatzungen, eine Teilsäule befindet sich auf der Sohle.



<b>Primäre Trennflächen</b>					
<b>Gabelungsklüfte</b>		<b>Horizontalklüfte</b>		<b>Durchtrennungsgrad</b>	
Anzahl	Öffnungsweite	Anzahl	Öffnungsweite	<input type="radio"/> Teilsäule betroffen	<input checked="" type="radio"/> kompletter Pfeiler
<input checked="" type="radio"/> keine	<input type="checkbox"/> < 1 mm	<input type="radio"/> keine	<input type="checkbox"/> < 1 mm		
<input type="radio"/> einige	<input type="checkbox"/> 1-3 mm	<input type="radio"/> einige	<input type="checkbox"/> 1-3 mm		
<input type="radio"/> mehrere	<input type="checkbox"/> > 3 mm	<input checked="" type="radio"/> mehrere	<input checked="" type="checkbox"/> > 3 mm		
<input type="radio"/> viele	_____ max. Öffnungsweite	<input type="radio"/> viele	_____ max. Öffnungsweite		

<b>Sekundäre Trennflächen</b>					
<b>Risse</b>		<b>Brüche</b>		<b>Durchtrennungsgrad</b>	
Anzahl	Öffnungsweite	Anzahl	Öffnungsweite	<input type="radio"/> Teilsäule betroffen	<input checked="" type="radio"/> kompletter Pfeiler
<input type="radio"/> keine	<input checked="" type="checkbox"/> < 1 mm	<input type="radio"/> keine	<input type="checkbox"/> < 1 mm		
<input checked="" type="radio"/> einige	<input type="checkbox"/> 1-3 mm	<input type="radio"/> einige	<input type="checkbox"/> 1-3 mm		
<input type="radio"/> mehrere	<input type="checkbox"/> > 3 mm	<input checked="" type="radio"/> mehrere	<input checked="" type="checkbox"/> > 3 mm		
<input type="radio"/> viele	_____ max. Öffnungsweite	<input type="radio"/> viele	_____ max. Öffnungsweite		

<b>Pfeilerzustand</b>		
Abplatzungen	Zerrüttungen	Auflockerungen
<input type="radio"/> kleinräumig	<input type="radio"/> schwach	<input type="radio"/> schwach
<input checked="" type="radio"/> großräumig	<input type="radio"/> stark	<input checked="" type="radio"/> stark

<b>Gefährungsgrad</b>			
<input type="radio"/> gering	<input type="radio"/> mittel	<input checked="" type="radio"/> hoch	<input type="radio"/> sehr hoch


Hohlraumkartierung Niedermendig		 Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz			
Kartenblatt:	01	Bearbeiter:	Massenkeil	ANLAGE:	1.3.4
		Datum:	Juli 2012		
HOHLRAUM:	H0104				
<b>Hohlraumgeometrie:</b>					
mittlere Höhe:	6,00 m	max. Höhe:	7,20 m	Fläche [m <sup>2</sup> ]:	
		min. Höhe:	4,50 m	Volumen [m <sup>3</sup> ]:	
<b>Sohlausbildung:</b>	relativ eben, mit Bimssand und Lagermauern, Mauersteine				
<b>Schüttkegel:</b>	Anzahl:				
Schachtnr.:	S103	Ausbildung:	Müll und Basaltschutt, Schüttwinkel 40°		
		Höhe:	bis zur Firste		
Schachtnr.:		Ausbildung:			
		Höhe:			
<b>Bergwasser:</b>	schwach tropfend				
<b>Stützpfeiler:</b>	Anzahl:	8 natürliche Pfeiler			
	Gefährdung:	keine (6), hoch (2)			
	Bemerkungen:	Wandbereiche unauffällig. Kettensicherung der Pfeiler stark korrodiert, halten jedoch der Zugfestigkeit stand starke Scherbrüche an P010404, werden bereits durch Felsspione überwacht P010406: Verlust eines Felsspions			
<b>Firste:</b>	Gefährdung:	mittel			
	Ausbildung:	wenige Ausbrüche bis in die Glocken, Mucken, Schweißschlacke; Gesamtfläche der Ausbrüche 2-4m <sup>2</sup> Glockenausbildung größtenteils regelmäßig Rauschpel Saß Flächen >4m <sup>2</sup> Metallkeile und Holzpinne als Sicherungen vorhanden, Holzkeile verrottet Auflockerung der Firste im mittleren Stadium, eine abgestürzte, am Boden liegende Glocke keine Red Cracks			
<b>Hohlraum gesamt:</b>	Gefährdung:	überwiegend mittel			
	Bemerkungen:	weiteres Abstürzen von Glocken ist möglich.			

Abb. 7: Formblatt des LGB zur geotechnischen Erfassung eines Hohlraums mit Eintragungen für den überwiegend mittel gefährdeten Hohlraum H0104 (Beispiel). In diesem Hohlraum sind sechs Pfeiler ohne besondere Auffälligkeiten sowie zwei hochgefährdete Pfeiler (z. B. P010404; siehe Abb. 6) vorhanden. Die Firste zeigt unter anderem folgende Auffälligkeiten: Ausbrüche, alte Sicherungen und Auflockerungen (MASSENKEIL 2012).

## 4. Pfeilerbewertung mit Elementen und Strukturen

### 4.1. Elemente und Strukturen

#### **Pfeilergeometrie**

Zur Beschreibung der Pfeilergeometrie wurde die Anzahl der einen Pfeiler bildenden Einzelsäulen im Bereich der Sohle und der Firste gezählt sowie der minimale und maximale Säulendurchmesser bestimmt. Stabilitätsmindernde Gabelungsklüfte und die Anzahl der Pfeilerbildenden Säulen geben einen Hinweis auf das aufgeschlossene Säulenniveau.

Weiterhin wurden die Pfeilerhöhe und der Umfang der Pfeiler ermittelt. Bei kleineren und zugänglichen Pfeilern erfolgte die Messung des Umfangs direkt vor Ort. Bei schlechter Zugänglichkeit oder größerer Erstreckung erfolgte die Messung über die Kartengrundlage im Geoinformationssystem (GIS). Über die Pfeilerhöhe und den Durchmesser wurde der maximale Schlankheitsgrad (Pfeilerhöhe dividiert durch den minimalen Durchmesser) und der durchschnittliche Schlankheitsgrad (Pfeilerhöhe dividiert durch den durchschnittlichen Pfeilerdurchmesser) bestimmt. Weiterhin wurden gegebenenfalls Besonderheiten der Pfeilerform (schwache oder starke Krümmungen oder Verdrehungen) beschrieben.

#### **Trennflächen**

Bei den Trennflächen lassen sich folgende verschiedene Absonderungsklüfte, die bei der Abkühlung des Lavastromes entstanden sind, unterscheiden (ROGALL et al. 2011):

- Abkühlungsklüfte
- Gabelungsklüfte
- Horizontalklüfte

**Vertikale Abkühlungsklüfte (kA)** begrenzen mit hexagonalen, teilweise pentagonalen oder tetragonalen Flächen einzelne Basaltsäulen. Sie verlaufen parallel zur Säulenachse. Die Abkühlungsklüfte zeigen meist  $\pm$  gerade, ebene Verläufe und raue Oberflächen. Die Öffnungsweiten und die Durchtrennungsgrade der vertikalen Abkühlungsklüfte reichen in ihrer Spannweite von einem nicht durchtrennenden Haarriss bis zur vollständigen Durchtrennung mit Öffnungsweiten von mehreren Zentimetern. Bereichsweise tritt auf der Oberfläche auch eine intensive gelbbraune Färbung („Gelbschwarte“) auf, die durch eingespülten Löss oder Lösslehm verursacht wurde. Die „Gelbschwarte“ gibt einen Hinweis auf eine weniger ausgeprägte Versiegelung der Lavastromoberfläche durch Schlacken.

**Gabelungsklüfte (kG)** gehen aus den vertikalen Abkühlungsklüften hervor. Sie verlaufen schräg zur Säulenachse (Einfallswinkel  $20-60^\circ$ ) und stellen listrisch auslaufende Abkühlungsklüfte dar. Sie treten häufig im oberen bis zentralen Säulenbereich auf und bilden damit die Übergangszone zu einem tiefer liegenden Säulenniveau mit größeren Säulendurchmessern. Die Gabelungsklüfte zeigen einen ebenen bis stufigen Verlauf und eine raue, gelblich-graue Oberfläche. Die Öffnungsweiten reichen von nicht durchtrennenden Haarrissen bis zur vollständigen Durchtrennung mit Öffnungsweiten bis in den Zentimeterbereich. Besondere Beachtung kommt dem Verlauf der Gabelungsklüfte zu. Auf den gebogenen Klufflächen ist das Herausgleiten von Teilsäulen insbesondere dann möglich, wenn die listrische Fläche nach außen weist und die Säule von Nachbarsäulen nicht oder nur gering eingespannt wird.

**Horizontalklüfte (kH)** sind horizontal oder senkrecht zur Säulenachse verlaufende Abkühlungsklüfte. Sie durchtrennen meistens nur eine Säule und entstehen wie die vertikalen Abkühlungsklüfte durch die Verminderung des Materialvolumens bei der

Abkühlung des Basalts. Sie haben einen stufigen bis ebenen Verlauf mit Öffnungsweiten von nicht durchtrennenden Haarrissen bis vollständiger Durchtrennung mit Öffnungen im Millimeter- bis Zentimeter-Bereich. Horizontalklüfte sind von Gabelungsklüften teilweise nicht unterscheidbar, wenn sie nur auf einer Säulenfläche erkennbar als scheinbar horizontale Trennfuge aufgeschlossen werden.

Neben den bei der Abkühlung entstandenen Absonderungsklüften treten Trennflächen als **Bewegungsklüfte** aufgrund druckhafter Deformationen in Form von **Rissbildungen** bis letztlich bei vollständiger Durchtrennung des Gesteinskörpers (**Bruchbildung**) auf. Sie lassen sich auf vulkanotektonische oder tektonische Vorgänge, Erschütterungen oder Spannungsumlagerungen (Druck-, Zugspannungen) zurückführen. Bei der Geländeaufnahme wird unterschieden zwischen der Rissbildung in Form von **Trennungsklüften (kT)** (Normalöffnung, senkrecht zur Rissfläche) und **Scherklüften (kS)** (bei erkennbarem relativem Versatz der Kluffkörper). Kennzeichnend ist die nicht vollständige Durchtrennung eines Gesteinskörpers. Bei vollständiger Durchtrennung eines Säulenbereichs wurde die Struktur als **Spaltbruch (SpBr)** oder **Scherbruch (SchBr)** angesprochen. Außerdem wurden **Abplatzungen (Abplz)** oder **Zerrüttungen (Zerr)** als weitere Erscheinungen druckhafter Deformationen in die Beschreibung aufgenommen. Die Kluffflächen der Risse und Brüche sind rau mit einem meist ebenen bis stufigen Verlauf.

Neben der Trennflächenart ist auch die zeitliche Entwicklung wichtig für die Gefährdungsabschätzung. Während und nach dem Erkalten des Lavastroms wurden die Abkühlungsklüfte durch vulkanotektonische Ereignisse überprägt. Verstaltungen und Versätze von Basaltsäulen oder Teilsäulen an den Abkühlungsklüften können diesen Ereignissen ebenso zugerechnet werden, wie die Ausbildung von kleinräumigen Zerrüttungen bis Bruchbildungen.

Weitere spröde Deformation fand durch Spannungsumlagerungen während oder nach der Bergbautätigkeit, über die Reaktivierung der vorhanden Abkühlungs- oder Trennungsklüfte oder durch neue druckhafte Verformungen statt. Hinweise für die spätere Bildung sind erkennbare Versätze älterer Trennflächen oder „frische“, das sind schwarze, Bruchflächen.

Zu Zeiten der Brauerei-Nutzung der Hohlräume als Gär- und Lagerkeller im 19. Jahrhundert wurden von Deformationen und Spannungsumlagerungen betroffene Bereiche erkannt und gesichert. Die Sicherung erfolgte dabei über die Herstellung künstlicher Pfeiler oder die Stabilisierung der vorhandenen Tragwerke mittels Umgürtungen oder Ummauerungen.

Hinweise zur zeitlichen Einordnung der Deformationen sind relevant, da insbesondere andauernden Spannungsumlagerungen Bedeutung für eine aktuelle Gefährdung zukommt. Als Anzeichen rezenter („junger“) Rissbildung ist das Auftreten frischer Klufföffnungen und Bruchflächen oder Abplatzungen zu sehen, wobei sich „junge“ Abplatzungen und Rissöffnungen, insbesondere in zur Zeit der Brauereinutzung weiß gestrichenen Hohlräumebereichen, durch entsprechende Aufbrüche der Bemalung erkennen lassen.

#### 4.2. Pfeilerbewertung

Während der Kartierung wurden alle untertägigen Pfeiler der Hohlräume H0101 bis H0110, die auf dem Blatt 01 der ingenieurgeologischen Karte von Niedermendig des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) verzeichnet sind, auf amtseigenen Formblättern aufgenommen. Zusätzlich wurde eine Gefahrenabschätzung unter Tage durchgeführt. Die Abschätzung des vom Pfeiler ausgehenden

Gefahrenpotentials beruht auf den oben beschriebenen Elementen und Strukturen der Standsicherheitsbewertung der natürlichen Restpfeiler, die in stabilitätserhaltende und stabilitätsmindernde Faktoren eingeteilt werden (JAHNEL et al. 1996). Der Gefahrenggrad umfasst fünf Stufen (ROGALL et al. 2011).

### **Einteilung der Elemente und Strukturen in standsicherheitsbewertende Faktoren**

Mit der Tab. 1 wurden die Pfeiler unter Tage beurteilt. Eine Ansammlung der Faktoren führt zu einem erhöhten Verbruchsrisiko der Grubentragwerke im Oberen Niedermendiger Lavastrom.

Zunächst wird die Pfeilergeometrie bewertet (Tab. 1). Dabei werden Schlankheitsgrade der Tragwerke  $\leq 3$  als stabilitätserhaltend eingeschätzt. Schlankheitsgrade zwischen drei und vier werden als gering stabilitätsmindernd, mit Werten zwischen vier und fünf als mittelmäßig stabilitätsmindernd und Schlankheitsgrade mit dem Wert  $\geq 5$  als stark stabilitätsmindernd ermesen. Der Durchmesser ist in der Tab. 1 kursiv geschrieben, da dieser Wert bereits in die Berechnung des Schlankheitsgrades einfließt. Es gibt eine Ausnahme, die bei der Bewertung der Standsicherheit der natürlichen Restpfeiler jedoch zu beachten ist: Das sind Pfeiler, deren maximaler Schlankheitsgrad (maximale Höhe im Verhältnis zum minimalen Durchmesser) hohe Werte annimmt und bei dem die Differenz zwischen dem minimalen Durchmesser und dem maximalen Durchmesser mehr als sechs beträgt. Sie weisen eine stark elongierte Form auf und haben unter Tage eher den Charakter einer statisch tragenden Wand aus Basaltsäulen, weshalb sie als stabilitätserhaltend gelten. Wenn die Pfeilerform gerade ist, ist er in seiner Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt. Weist seine Form eine schwache oder starke Krümmung auf, so wird dies gering bzw. stark standfestigkeitsmindernd gewertet.

Als Nächstes werden die an den Tragwerken vorhandenen Trennflächen betrachtet (siehe Tab. 1). Vertikale Abkühlungsklüfte, die die einzelnen Basaltsäulen voneinander separieren, gehen nicht in die Bewertung der Standsicherheit der natürlichen Restpfeiler in Niedermendig ein, da die Kraft, die ein Pfeiler standhalten muss, größtenteils parallel zu dem Verlauf der Kluftrichtung wirkt. Sind auf einem Basaltpfeiler keine Trennflächen oder wenige horizontale Klüfte mit Öffnungsweiten unter einem Millimeter vorhanden, die die einzelnen Säulen nicht horizontal durchtrennen, so gilt dieses Kriterium als stabilitätserhaltend. Die Existenz von Gabelungsklüften, Scherbrüchen und Spaltbrüchen auf den Tragwerken, deren Öffnungsweite weniger als drei Millimeter beträgt, wird als gering stabilitätsmindernd gewertet. Sind Gabelungsklüfte mit Öffnungsweiten  $> 3$  Millimeter vorhanden, bei denen Teilsäulen nicht abgleiten können, da sie möglicherweise eingekeilt sind oder sich unmittelbar zwischen intakten Basaltsäulen befinden, werden diese als mittelmäßig stabilitätsmindernd beurteilt. Nur wenn für die (Teil-)Säulen die Möglichkeit des Abgleitens besteht, werden sie als stark stabilitätsreduzierend gewertet. Horizontale Klüfte an natürlichen Restpfeilern des oberflächennahen Grubenbaus in Mendig sind ausschlaggebend für die Standsicherheitsbewertung, wenn sie weiter als drei Millimeter geöffnet sind und einzelne oder alle Säulen, aus denen der Restpfeiler besteht, (mehrfach) durchtrennen. Bei Rissbildungen gelten rezente Risse als stabilitätsmindernd, da sie Anzeiger für rezente Bewegungen und Druckänderungen im Bereich des Pfeilers darstellen. Scherbrüche, deren Öffnungsweite mehr als drei Millimeter beträgt und bei denen der Versatz der Scherung erkannt werden kann, werden als mittelmäßig stabilitätsmindernd verstanden. Sind des Weiteren noch Säulenabplatzungen zu erkennen, mindern Scherbrüche die Stabilität des Basaltragwerkes massiv. Auch Spaltbrüche stellen ein erhöhtes Risiko für die Standfestigkeit der natürlichen Restpfeiler dar, vor allem dann, wenn

ihre Öffnungsweite mehr als drei Millimeter beträgt und durch Bruch entstandene Säulenabplatzungen existieren.

Als Letztes muss noch der Pfeilerzustand auf stabilitätserhaltende und stabilitätsmindernde Faktoren untersucht werden (Tab. 1). Dabei zählt zu den stabilitätserhaltenden Kriterien nur das Fehlen von Abplatzungen, Auflockerungen und Zerrüttungen. Können an einem Tragwerk kleinräumige Abplatzungen erkannt werden, so wird seine Standsicherheit gering abgestuft, werden großräumige Abplatzungen festgestellt, ist die Standsicherheit mittelmäßig eingeschränkt. Sind an einem Pfeiler Auflockerungen oder gar Zerrüttungen vorhanden, ist die Gefahr, die von ihm ausgeht hoch. Schwache Auflockerungs- und Zerrüttungsgrade, zum Beispiel an Teilsäulen, bedeuten eine mittlere Herabstufung der Stabilität, starke Auflockerungen und Zerrüttungen schränken die Stabilität des natürlichen Basalt Pfeilers in erheblichem Maße ein. Sind an einem Pfeiler keine oder intakte Sicherungen vorhanden, wird das als stabilitätserhaltend gewertet. Leicht beschädigte Sicherungen gelten als gering stabilitätsmindernd, Sicherungen mit stark eingeschränktem Wirkungsgrad gelten als mittelmäßig stabilitätsmindernd und defekte oder ehemals vorhandene Sicherungen beeinträchtigen die Standfestigkeit eines Pfeilers massiv.

### **Pfeilergefährdungsgrad**

Alle Pfeiler wurden in fünf Gefahrenklassen eingeteilt (erstmalig in JAHNEL et al. 1996). Die Gefahrengrade berücksichtigen die Angaben der Tab. 1. Der Gefährdungsgrad setzt sich aus der Art der Faktoren, ihrer Häufigkeit und ihrer Kombination zusammen.

**Keine Gefährdung** geht von Pfeilern ohne feststellbare stabilitätsmindernde Faktoren aus. Befinden sich an einem Tragwerk wenige (bezogen auf die gesamte Erstreckung des Pfeilers) gering stabilitätsmindernde Faktoren, gilt der Pfeiler weiterhin als nicht gefährdet. In dieser Einstufung sollten sich nur Pfeiler befinden, deren Trennflächen primären Bildungsursprung haben (kA, kG, kH). Beispielsweise wurden an einem Pfeiler mit der Erstreckung von zwei Metern Durchmesser und sechs Metern Höhe zwei nicht durchtrennende Horizontalklüfte (wenige) mit einer Öffnungsweite unter einem Millimeter und drei Risse kartiert. Somit beeinträchtigen diese Faktoren die Standsicherheit des Tragwerkes nicht.

Tragwerke, die mit einer **geringen Gefährdung** eingestuft werden, weisen wenige bis einige stabilitätsmindernde, meist gering bis mittelmäßig standsicherheitsmindernde Faktoren auf. Dies sind primäre Trennflächen, manchmal mit ungünstigem Verlauf, deren Öffnungsweite durchaus mehr als einen Millimeter, aber weniger als drei Millimeter betragen kann (kA, kG, kH). Es ist möglich, dass unter diese Einordnung Tragwerke mit einzelnen sekundären Trennflächen fallen können (kT, kS). Diese sollten sich aber auf eine kleine Öffnungsweite (unter einem Millimeter) beschränken und Bewegungen in Form eines Scherungsversatzes sollten nicht erkennbar sein. Der Pfeilerzustand sollte höchstens von leichten Deformationen oder kleinräumigen Abplatzungen gekennzeichnet sein.

Natürliche Restpfeiler, von denen eine **mittlere Gefährdung** ausgeht, weisen einige bis mehrere stabilitätsmindernde Faktoren auf. Dies bedeutet, dass sie häufig von primären und sekundären Trennflächen durchzogen sind, die in ihrem Erscheinungsbild mehr als drei Millimeter geöffnet sein können und ganze Säulen und Teilsäulen zertrennen (kA, kG, kH). Der Pfeiler weist kleinräumige Rissbildungen (kT, kS) und Abplatzungen jedoch keine Zerrüttungen auf. Weitere Elemente aus der Tab. 1 können bei mittel gefährdeten Pfeilern auftreten. Falls Sicherungen an Tragwerken mit mittle-

Tab. 1: Elemente und Strukturen der Tragwerke der untertägigen Hohlräume, eingeteilt in bewertende Faktoren (Stabilitäterhaltend, Stabilitätsmindernd) (aus MASSENKEL 2012, erweitert nach KERZAN et al. 1995, JAHNEL et al. 1996 und ROGALL et al. 2011).

Faktoren	Stabilitäterhaltend	Stabilitätsmindernd		
		gering	mittel	stark
<b>Pfeilergeometrie</b>				
Schlankheitsgrad	> 3	3 bis 4	4 bis 5	> 5
Durchmesser	Differenz des minimalen zum maximalen Durchmesser > 6 m			
Pfeilerform	nicht vorhanden	schwache Krümmung		starke Krümmung
<b>Trennflächen (TF)</b>				
Gabelungsklüfte (KG)	nicht vorhanden	Öffnungsweite < 3 mm	Öffnungsweite > 3 mm, ein Abreiten der Teilsäule ist nicht möglich	Öffnungsweite > 3 mm, die (Teil-)Säule kann abreiten
Horizontale Klüfte (KH)	nicht vorhanden, Klüfte mit Öffnungsweiten < 1 mm, die nicht säulendurchtrennend sind	Öffnungsweite > 1 mm ohne Teilsäulendurchtrennung	Öffnungsweite > 1 mm mit Säulendurchtrennung	Öffnungsweite > 1 mm mit mehrfacher Säulendurchtrennung
Risse (KT/KS)	nicht vorhanden	alte Risse	rezente Rissbildungen	
Scherbrüche (SchBr)	nicht vorhanden	Öffnungsweite < 3 mm	Öffnungsweite > 3 mm und erkennbarer Versatz	Öffnungsweite > 3 mm und erkennbarem Versatz und durch Scherung entstandene Säulenteilabplatzungen
Spaltbrüche (SpBr)	nicht vorhanden	Öffnungsweite < 3 mm	Öffnungsweite > 3 mm	Öffnungsweite > 3 mm und durch Bruch entstandene Säulenteilabplatzungen
<b>Pfeilerzustand</b>				
Abplatzungen (Abplz)	nicht vorhanden	kleinräumige Abplatzungen (an Teilsäulen)	großräumige Abplatzungen	
Auflockerungen	nicht vorhanden		schwacher Auflockerungsgrad	starker Auflockerungsgrad
Zerrüttungen (Zerr)	nicht vorhanden		kleinräumige Zerrüttungen (an Teilsäulen)	Zerrüttung eines Pfeilers
Sicherungen	nicht vorhanden; vorhanden und intakt	vorhanden, leicht beschädigt	vorhanden, stark eingeschränkter Wirkungsgrad	vorhanden und defekt oder ehemals vorhanden

rem Gefahrenpotential vorhanden sind, sind diese zumeist in ihrem Wirkungsgrad eingeschränkt, nicht selten sind die ehemals angebrachten Sicherungen defekt.

Eine **hohe Gefährdung** wird natürlichen Restpfeilern zugewiesen, die viele stabilitätsmindernde Faktoren zeigen. Solche Pfeiler sind, neben zahlreichen, weit geöffneten und durchtrennenden primären und sekundären Trennflächen (kA, kG, kH, kT, kS), oft von negativen Pfeilerzuständen, wie großräumigen Abplatzungen, Zerrüttungen (Zerr) auf Einzelsäulen und schwachen Auflockerungen betroffen. Ist die ursprüngliche Funktion der Pfeilersicherung nicht mehr gegeben, kann der Pfeiler seine lasttragende, stützende Aufgabe nicht mehr erfüllen.

Ein vollständig zerlegter Pfeiler, der vor allem von starken Zerrüttungen und Auflockerungen bzw. Brüche (SpBr/SchBr) betroffen ist, gilt nicht mehr als standsicher, sodass ihm eine **sehr hohe Gefährdung** zugeteilt wird. Im Rahmen der aktuellen Kartierung zeigte sich, dass eine Einteilung in 4 Gefahrenklassen sinnvoller ist. Die Einstufung „keine Gefährdung“ wurde in die Gefahrenklasse „geringe Gefährdung“ integriert.

## 5. Pfeilerbewertung mit einem Matrixsystem

### 5.1. Entwicklung des Matrixsystems

Um das natürliche Tragwerk des Oberen Niedermendiger Lavastroms objektiv bewerten zu können, wurde eine rechnerische Bewertungsmatrix entwickelt. Ihre Funktionsweise ist die Berechnung speziell gewichteter Einflussgrößen, die zu einer Gesamtpunktzahl im Ergebnis führen. Die Ziele der Bewertungsmatrix für die untertägigen Tragwerke sind:

- die automatisierte Standsicherheitsbewertung der Tragwerke
- die repräsentative und objektive Bewertung der Basaltpfeiler
- die vom Bearbeiter unabhängige Standsicherheitsbewertung
- die quantitative Gefährdungsbeurteilung und
- das Durchführen einer Validierung

Während der Entwicklung der Bewertungsmatrix für untertägige Pfeiler in den Hohlräumen des Oberen Niedermendiger Lavastromes wurden den stabilitäts erhaltenden sowie den stabilitätsmindernden Strukturelementen Gefahrenpunkte zugeteilt, die in ihrer Summe die oben genannten Gefahrenklassen widerspiegeln.

Zunächst erfolgte die Punktevergabe in einer MS Excel-Tabelle, bei der Pfeilergeometrie, Trennflächenausbildung, Trennflächenart und Pfeilerzustand berücksichtigt wurden. Anschließend wurde mit der Programmiersprache Visual Basic eine Pfeiler-eingabemaske erstellt, die zusätzlich zu der Excel-Bewertungstabelle die Rechts- und Hochwerte der Pfeiler mit einbezieht und über eine Speicher-, Lösch- und Änderungsfunktion verfügt. Um diese Funktionen nutzen zu können und vor allem das Speichern von Pfeilerdaten zu ermöglichen, wurde eine Oracle Datenbank (Oracle Database XE 11.2) mit der in Visual Basic programmierten Eingabemaske verbunden (siehe auch Kap. 5.4.).

### 5.2. Punktesystem

Der Gefährdungsgrad der Tragwerke wird analog zu den Gliedern der „Grundbruchformel“ nach DIN 4017-1 aus der Kombination unterschiedlicher Einflusstypen gebildet. Hier sind dies die **Pfeilergeometrie**, die **Trennflächenart**, die **Trennflächenausbildung** und der **Pfeilerzustand** (Abb. 8). Dabei bekommen Faktoren, deren stabilitätsmindernde Wirkung gering ist, niedrige Wertungen (bis 20 Bewertungspunkte), stark stabilitätsbeeinflussende Faktoren werden höher gewertet und erhalten deshalb





Abb. 8: Einflussstypen zur Berechnung des Gefahrengades eines untertägigen Pfeilers in Niedermendig. Die Vergabe der Bewertungspunkte beruht auf den stabilitätserhaltenden und stabilitätsmindernden Faktoren der Pfeiler.

Werte ab 20 Bewertungspunkten. Die maximale Punktzahl pro Faktor beträgt 150 Punkte (Tab. 2).

### Pfeilergeometrie

Die Pfeilergeometrie wird über den Schlankheitsgrad, den Durchmesser und die Pfeilerform beschrieben. Je größer der Zahlenwert des Schlankheitsgrades ist, desto mehr Punkte (maximal 20) werden einem Pfeiler zugesprochen (Tab. 2). Der Durchmesser stellt ein Kombinationsfeld dar. Das bedeutet, dass Pfeiler, deren minimaler Durchmesser kleiner als einen Meter misst, bei den stabilitätsmindernden Faktoren der Trennflächenarten stärker gewichtet werden als Pfeiler mit einem Durchmesser von über einem Meter. Beträgt die Differenz des maximalen Durchmessers zum minimalen Durchmesser mehr als sechs, so wird dies als stabilitätserhaltend gewertet (siehe Tab. 2), so dass 25 Punkte von der Summe der Bewertungspunkte abgezogen werden. Die Gesamtpunktzahl eines Pfeilers wird um 30 Bewertungspunkte verringert, wenn die Differenz des minimalen Durchmessers zum maximalen Durchmesser  $\geq 6$  und der Schlankheitsgrad  $\geq 5$  beträgt (siehe Tab. 2). Ist der Pfeiler schwach oder stark gekrümmt, so werden 10 oder 68 Punkte addiert.

### Trennflächenausbildung

Die Trennflächenausbildung wird über die Merkmale Durchtrennungsgrad, Öffnungsweite und das Vorhandensein von Rissen charakterisiert (siehe Tab. 1 und 2). Konnten Trennflächen festgestellt werden, erhält ein Tragwerk 5 Punkte. Sind Trennflächen vorhanden, wird unterschieden, ob die maximale Trennflächenausbildung als räumlich begrenzte Trennflächen oder als säulendurchtrennende Trennflächen kartiert wurde, sodass entweder 10 Punkte (räumlich begrenzte Ausbildung) oder 25 Punkte (durchtrennende Trennflächen) vermerkt werden (Tab. 2). Die Wertung der

maximal ausgebildeten Öffnungsweite der zur Beurteilung anstehenden Trennflächen wird von 10 bis 20 Punkten gestaffelt, für das Vorhandensein von Rissen erhalten die natürlichen Restpfeiler 5 Bewertungspunkte (Tab. 2).

Als Nächstes werden die **Trennflächenarten** berücksichtigt, wobei Scher- und Spaltbrüche, Gabelungsklüfte und horizontale Klüfte in die Bewertung aufgenommen werden (Tab. 2). Entscheidend bei der Bewertung der Trennflächen ist der Durchmesser eines Pfeilers, so dass Tragwerke, deren Durchmesser weniger als einen Meter messen, höhere Bewertungspunkte erhalten als vergleichsweise dickere Pfeiler. Die Anzahl der Trennflächen ist maßgeblich für die Punktzahlvergabe: Es wird unterschieden in wenige, mehrere und sehr viele Trennflächen. Diese Abstufung ist abhängig von der räumlichen Erstreckung des Tragwerkes und erfolgt visuell unter Tage. Schmale Pfeiler mit einem Durchmesser bis etwa zweieinhalb Meter, die einen Scherbruch aufweisen, werden als Pfeiler mit wenigen Scherbrüchen klassifiziert. Zeigen sie hingegen drei oder vier Scherbrüche, so werden sie als Tragwerke mit mehreren Scher- und Spaltbrüchen eingestuft. Werden mehr als fünf Scherbrüche an einem vergleichsweise kleinräumig erstreckten Pfeiler dokumentiert, so erhält das Tragwerk die Bewertungspunkte für sehr viele Scher- und Spaltbrüche. Großräumig ausgedehnte Pfeiler, vor allem jene, deren Aussehen einer Wand aus einzelnen Basaltsäulen gleicht, werden erst als Tragwerke mit mehreren Scher- und Spaltbrüchen bezeichnet, wenn an einer Vielzahl der einzelnen Teilsäulen Scher- und Spaltbrüche nachzuweisen sind. Zeigen auch die großen Tragwerke eine hohe Zahl von Scher- und Spaltbrüchen, so erhalten sie die Bewertungspunkte für sehr viele Scher- und Spaltbrüche. Analog werden Gabelungsklüfte und horizontale Klüfte bewertet. Aufgrund der schwer bewertbaren Aussage über die Anzahl der Trennflächen wurde versucht, ein Trennflächenindex für die verschiedenen Parameter zu errechnen:  $I_T = F/A$ , wobei  $I_T$  der spezifische Trennflächenindex ist ( $I_S$  = Index für Scher- und Spaltbrüche,  $I_G$  = Index für Gabelungsklüfte,  $I_H$  = Index für Horizontale Klüfte), der über das Verhältnis von Pfeilerfläche  $F$  zur Anzahl der Trennflächen  $A$  bestimmt wird. Wegen der unregelmäßigen Pfeilerausbildung und der dadurch bedingten erschwerten Berechnung der Pfeilerfläche und des möglichen Vorhandenseins von Trennflächen, die bei der äußeren Betrachtung der natürlichen Tragwerke in den oberflächennahen Grubenbauen in Niedermendig nicht sichtbar sind, konnte kein sinnvoller automatisierter Trennflächenindex erstellt werden, so dass weiterhin die visuell eingestuften Tendenzen *wenige Trennflächen, mehrere Trennflächen und sehr viele Trennflächen* bewertet werden müssen.

Das Vorhandensein von Sicherungen wird bei der Vergabe von Bewertungspunkten berücksichtigt. Weisen die Sicherungen zudem einen eingeschränkten Wirkungsgrad auf und sind sie gar defekt, so werden weitere Punkte zu dem Gesamtergebnis addiert (Tab. 2).

Bei der Bewertung des **Pfeilerzustandes** wird unterschieden, ob ein Tragwerk von Auflockerung betroffen ist, ob der Pfeiler durch kleinräumige oder großräumige Abplatzungen charakterisiert ist und ob kleinräumige oder großräumige Zerrüttungen einen Pfeilerzustand beschreiben (Tab. 2).

Insgesamt können maximal 608 Bewertungspunkte erreicht werden.

Die Einteilung der erreichten Bewertungspunkte je Pfeiler wird in Tab. 3 dargestellt. Tragwerke der oberflächennahen Grubenbaue mit der Summe der Bewertungspunkte von  $\leq 100$  Punkte werden als Pfeiler, von denen keine Gefahr ausgeht, bezeichnet. Erreicht ein Tragwerk Punkte von 100 bis 199, so werden sie als Pfeiler mit geringer Gefährdung angesehen. Pfeiler, die zwischen 200 bis 255 Punkte erreichen, sind Pfei-

## Entwicklung einer Gefährdungsmatrix für tragende Pfeiler

Tab. 2: Punktevergabe und Auswirkung auf die Stabilität für die einzelnen Elemente und Strukturen der natürlichen Restpfeiler: grün unterlegte Felder sind stabilitätserhaltende Faktoren, orange unterlegte Felder zeigen schwach stabilitätsmindernde Faktoren (Punktzahl <20) und rot unterlegte Felder zeigen stark stabilitätseinschränkende Faktoren mit mehr als 20 Bewertungspunkten (MASSENKEIL 2012).

Merkmale und Strukturelemente	Ausprägung	Punktevergabe und Auswirkung auf die Stabilität
<b>Pfeilergeometrie</b>		
<b>Schlankheitsgrad</b>	Schlankheitsgrad $\leq 3$	1
	Schlankheitsgrad 3 bis 4	6
	Schlankheitsgrad 4 bis 5	15
	Schlankheitsgrad $\geq 5$	20
<b>Durchmesser (Dm)</b>	minimaler Dm $\leq 1\text{m}$	Kombi-Feld
	minimaler Dm $\geq 1\text{m}$	Kombi-Feld
	Differenz Dm <sub>min</sub> zu Dm <sub>max</sub> $\geq 6\text{m}$	-25
	Differenz Dm <sub>min</sub> zu Dm <sub>max</sub> $\geq 6\text{m}$ und Shg $\geq 5$	-30
<b>Pfeilerform</b>	schwach gekrümmt	10
	stark gekrümmt	68
<b>Trennflächenausbildung</b>		
<b>Durchtrennungsgrad</b>	räumlich begrenzt, Teilsäulen betreffend	15
	durchtrennend, ganzer Pfeiler durchtrennt	30
<b>Öffnungsweite</b>	Öffnungsweite $\leq 1\text{mm}$	10
	Öffnungsweite 1mm bis 3mm	15
	Öffnungsweite $\geq 3\text{mm}$	20
<b>Risse</b>	Risse	5
<b>Trennflächenarten</b>		
<b>Scher- und Spaltbrüche</b>	wenige Scher- und Spaltbrüche bei Pfeiler-Dm $\leq 1\text{m}$	40
	wenige Scher- und Spaltbrüche bei Pfeiler-Dm $> 1\text{m}$	20
	mehrere Scher- und Spaltbrüche bei Pfeiler-Dm $\leq 1\text{m}$	70
	mehrere Scher- und Spaltbrüche bei Pfeiler-Dm $> 1\text{m}$	40
	sehr viele Scher- und Spaltbrüche bei Pfeiler-Dm $\leq 1\text{m}$	80
	sehr viele Scher- und Spaltbrüche bei Pfeiler-Dm $> 1\text{m}$	50
<b>Gabelungsklüfte</b>	wenige Gabelungsklüfte bei Pfeiler-Dm $\leq 1\text{m}$	30
	wenige Gabelungsklüfte bei Pfeiler-Dm $> 1\text{m}$	20
	mehrere Gabelungsklüfte bei Pfeiler-Dm $\leq 1\text{m}$	50
	mehrere Gabelungsklüfte bei Pfeiler-Dm $> 1\text{m}$	30
<b>Horizontale Klüfte</b>	wenige horizontale Klüfte bei Pfeiler-Dm $\leq$ und $> 1\text{m}$	20
	mehrere horizontale Klüfte bei Pfeiler-Dm $\leq 1\text{m}$	30
	mehrere horizontale Klüfte bei Pfeiler-Dm $> 1\text{m}$	25
<b>Pfeilerzustand</b>		
<b>Sicherungen</b>	Sicherungen vorhanden	20
	eingeschränkte Wirkungsweise (leicht beschädigt)	10
	ohne Wirkung (defekt)	20
<b>Pfeilerzustand</b>	kleinräumige Abplatzungen	25
	großräumige Abplatzungen	50
	Pfeiler schwach aufgelockert	80
	Pfeiler stark aufgelockert	100
	Zerrüttungen (Teilsäulen betreffend)	50
	Pfeiler vollständig zerrüttet	150
	<b>maximale Summe:</b>	<b>608</b>

ler mit mittlerer Gefährdung. Die Einstufung in hohe Gefährdung erfolgt bei 256 bis 349 Punkten. Alle Pfeiler, deren Summe mehr als 350 Punkte aufweist, erhalten eine sehr hohe Gefährdung.

Tab. 3: Punktzahlbereiche sowie deren Gefahrenklassifikation für natürliche Restpfeiler in Niedermendig (ROGALL et al. 2011, WEHINGER & ROGALL 2012).

Gefahrenklassifikation	Punktzahlbereich
keine Gefährdung	≤ 100 Punkte
geringe Gefährdung	> 100 bis 199 Punkte
mittlere Gefährdung	≥ 200 bis 255 Punkte
hohe Gefährdung	≥ 256 bis 349 Punkte
sehr hohe Gefährdung	≥ 350 Punkte

### 5.3. Formel zur Berechnung der Gefahrengade von natürlichen Stützpfeilern

Um eine Bewertung der natürlichen Tragwerke der Niedermendig Basaltgruben ohne die an einen Computer gebundene Eingabematrix berechnen zu können, wurde eine Formel hergeleitet. Diese Formel beinhaltet vier Glieder, die zu dem Gesamtergebnis G (G = Gefahrenpotential) addiert werden (siehe Tab. 4).

Tab. 4: Formel zur Berechnung des Gefahrengades G eines untertägigen Tragwerkes in Niedermendig (erweitert nach MASSENKEIL 2012).

$G = (s_{\lambda} + d \times 5 + def) + 5 (x + \ddot{o}w + ri) + 10 (b + g + k) + 10 (si_1 + si_2 + a + f + z)$			
<b>Pfeilergeometrie</b> $s_{\lambda}$ = Beiwert des Schlankheitsgrades $d$ = Beiwert des Durchmessers $def$ = Pfeilerform	<b>Trennflächen-ausbildung</b> $x$ = Beiwert des Durchtrennungsgrades $\ddot{o}w$ = Öffnungsgrad $ri$ = Beiwert der Risse	<b>Trennflächenart</b> $b$ = Anzahl der Scher- und Spaltbrüche $g$ = Anzahl der Gabelungsklüfte $k$ = Anzahl der Horizontalklüfte	<b>Pfeilerzustand</b> $si_1$ = 1. Beiwert der Sicherung $si_2$ = 2. Beiwert der Sicherung $a$ = Ausprägung der Abplatzung $f$ = Ausprägung der Auflockerung $z$ = Ausprägung der Zerrüttung

Das **erste Glied** der Formel umfasst die Gefahrenbewertung, die durch die **Pfeilergeometrie** entsteht. Dabei wird der Beiwert  $s_\lambda$  des Schlankheitsgrades  $\lambda$  (Tab. 5) zum Beiwert  $d$  des Durchmessers addiert (Tab. 6), wobei der Schlankheitsgrad durch die Division des minimalen Durchmessers durch die maximale Höhe ( $\lambda = d_{\min}/h_{\max}$ ) berechnet und der Durchmesser mit  $D_{\text{ges}} = D_{\min} - D_{\max}$  ermittelt wird. Des Weiteren wird der Beiwert  $\text{def}$ , der die Pfeilerform eines natürlichen Restpfeilers beschreibt, addiert (Tab. 7).

Tab. 5: Beiwert  $s$  des Schlankheitsgrades.

$\lambda$	$\leq 3$	$> 3 \leq 4$	$> 4 \leq 5$	$> 5$
$s_\lambda$	1	6	15	20

Tab. 6: Beiwert  $d$  des Durchmessers.

$D_{\text{ges}}$	$< 6$	$\geq 6$	$\geq 6$ und $\lambda > 5$
$D$	0	-5	-6

Tab. 7: Beiwerte  $\text{def}$  der Pfeilerform.

	Ausprägung der Krümmung		
	keine	schwach	stark
$\text{def}$	0	10	68

Das Glied, das die Geometrie der natürlichen Tragwerke enthält, lautet:  $(s_\lambda + d \times 5 + \text{def})$ . Der Faktor 5 ist der Faktor des Durchmessers, der mit dem Beiwert  $d$  zu einem Produkt multipliziert wird, welches Teil des zu berechnenden Gefährdungsgrades der natürlichen Basaltpfeiler ist.

Das **zweite Glied** setzt sich aus der **Trennflächenausbildung** der natürlichen Restpfeiler zusammen. Es werden die Produkte aus den spezifischen Faktoren für den Durchtrennungsgrad, die Öffnungsweite und der Angabe über Risse und den dazugehörigen Beiwerten addiert. Der Faktor des Durchtrennungsgrades  $X$  hat den Zahlenwert 5, die Beiwerte  $x$  können aus der Tab. 8 entnommen werden. Die Faktoren der Öffnungsweite ( $\text{Öw}$ ) und der Risse ( $\text{Ri}$ ) betragen ebenfalls 5, ihre Beiwerte  $\text{öw}$  und  $\text{ri}$  sind den Tab. 9 und 10 zu entnehmen.

Tab. 8: Beiwerte  $x$  des Durchtrennungsgrades.

Art	keine Trenn- flächen vorhanden	Trenn- flächen vorhanden	räumlich begrenzte Trennflächen	vollständig durchtrennt
$x$	0	1	2	5

Tab. 9: Beiwerte  $\ddot{ow}$  des Trennflächenöffnungsgrades.

Öffnungs- grad	nicht vorhanden	$\leq 1\text{mm}$	$> 1\text{mm}$ $\leq 3\text{mm}$	$> 3\text{mm}$
$\ddot{ow}$	0	2	3	4

Tab. 10: Beiwerte  $ri$  der Risse.

Risse	keine Risse	Risse vorhanden
$ri$	0	1

Das Glied, das die Trennflächenausbildung beschreibt, lautet:  $(X \times x + \ddot{O}w \times \ddot{ow} + Ri \times ri)$  oder  $(5 \times x + 5 \times \ddot{ow} + 5 \times ri)$ . Es kann zu:  $5(x + \ddot{ow} + ri)$  vereinfacht werden.

**Glied drei** beinhaltet die verschiedenen Trennflächen, die an einem natürlichen Restpfeiler vorhanden sind, weshalb es als das Glied der **Trennflächenarten** bezeichnet wird. Dabei geht die Anzahl der Scher- und Spaltbrüche ( $S_b$ ), der Gabelungsklüfte ( $G_k$ ) und der horizontalen Klüfte ( $H_k$ ) mit ihrer Multiplikation des zugehörigen spezifischen Beiwertes als Summe ein. Bei der Bestimmung der Beiwerte wird unterschieden, ob der Pfeiler einen minimalen Durchmesser von mehr oder weniger als einen Meter hat.  $S_b$ ,  $G_k$  und  $H_k$  betragen 10, die Beiwerte der Scher- und Spaltbrüche ( $b$ ), der Gabelungsklüfte ( $g$ ) und der horizontalen Klüfte ( $k$ ) sind in den Tab. 11 bis 13 ablesbar.

Somit lautet das dritte Glied:  $(b \times S_B + g \times G_K + k \times H_k)$  oder vereinfacht auch:  $10(b + g + k)$ .

Das **vierte** und letzte **Glied** beschreibt den **Zustand des Pfeilers**. Dabei werden Sicherungen ( $Si$ ), Abplatzungen ( $A$ ), Auflockerungen ( $Af$ ) und Zerrüttungen ( $Z$ ), deren Zahlenwert jeweils 10 beträgt, mit ihren jeweiligen Beiwerten ( $si_1$  und  $si_2$ ,  $a$ ,  $f$  und  $z$ ) addiert. Die Beiwerte werden in den Tab. 14 bis 17 dargestellt.

Tab. 11: Beiwerte b der Scher- und Spaltbrüche.

b		Anzahl der Scher- und Spaltbrüche			
		keine	Wenige	mehrere	viele
∅	$D_{ges} \leq 1m$	0	4	7	8
	$D_{ges} > 1m$	0	2	4	5

Tab. 12: Beiwerte g der Gabelungsklüfte.

g		Anzahl der Gabelungsklüfte		
		keine	wenige	mehrere
∅	$D_{ges} \leq 1m$	0	3	5
	$D_{ges} > 1m$	1	2	3

Tab. 13: Beiwerte k der horizontalen Klüfte.

k		Anzahl der horizontalen Klüfte		
		keine	wenige	mehrere
∅	$D_{ges} \leq 1m$	0	2	3
	$D_{ges} > 1m$	0	2	2,5

Tab. 14: Beiwerte si der Sicherungen.

$si_1/si_2$	nicht vorhanden	vorhanden	leicht beschädigt	defekt
	$si_1$	0	2	0
$si_2$	0	0	1	2

Tab. 15: Beiwerte a der Abplatzungen.

	Ausprägung der Abplatzung		
	keine	klein- räumig	groß- räumig
a	0	2,5	5

Tab. 16: Beiwerte f der Auflockerungen.

	Ausprägung der Auflockerung		
	keine	schwach	stark
f	0	8	10

Tab. 17: Beiwerte z der Zerrüttungen.

	Ausprägung der Zerrüttung		
	keine	klein- räumig	groß- räumig
z	0	5	15

Das letzte Glied lässt sich als  $(si_1 \times si + si_2 \times si + a \times A + f \times Af + z \times Z)$  bzw. als  $10 \times (si_1 + si_2 + a + f + z)$  zusammenfassen.

Die Formel für die Berechnung der von einem natürlichen Restpfeiler ausgehenden Gefahr lautet also:

$$G = (s_\lambda + d \times 5 + def) + (5 \times x + 5 \times \ddot{ow} + 5 \times ri) + (b \times S_B + g \times G_K + k \times H_K) + (si_1 \times si + si_2 \times si + a \times A + f \times Af + z \times Z)$$

In ihrer vereinfachten Form kann sie als:

$$G = (s_\lambda + d \times 5 + def) + 5 \times (x + \ddot{ow} + ri) + 10(b + g + k) + 10(si_1 + si_2 + a + f + z)$$

dargestellt werden.

#### 5.4. Erstellung des VB-Dialogs zur Gefährdungsberechnung

Die Erstellung des VB-Dialogs (VB = Visual Basic; siehe Abbildung 9) zur Gefahrenberechnung der Tragwerke der oberflächennahen Grubenbaue in Niedermendig erfolgte, um die Excel Tabelle, die diese Berechnung bis dahin durchführte, zu ersetzen. Die Excel-Tabelle ist unübersichtlich und für den Anwender umständlich auszufüllen. Um die Berechnung des Gefahrengrades anwenderfreundlicher, übersichtlicher und korrekt zu gestalten, wurde mit Microsoft Visual Basic 2010 Express eine Eingabe-



maske entwickelt. Bei der Programmierung wurde beachtet, dass stets die identifizierbaren Parameter wie Hohlraumnummer und Pfeilernummer sowie die Parameter zur Geometrie (Schlankheitsgrad und Durchmesser) einzugeben sind, um die Berechnung eines Gefahrengrades durchführen und den dadurch generierten Datensatz korrekt abspeichern zu können. Der Berechnung des Gefahrengrades liegt das Punktesystem zu Grunde. Um einen Datensatz eines Pfeilers speichern, ändern, anzeigen oder löschen zu können, werden die Datensätze der Gefährdungsberechnung in einer Oracle Datenbank (Oracle Database XE 11.2) vorgehalten.

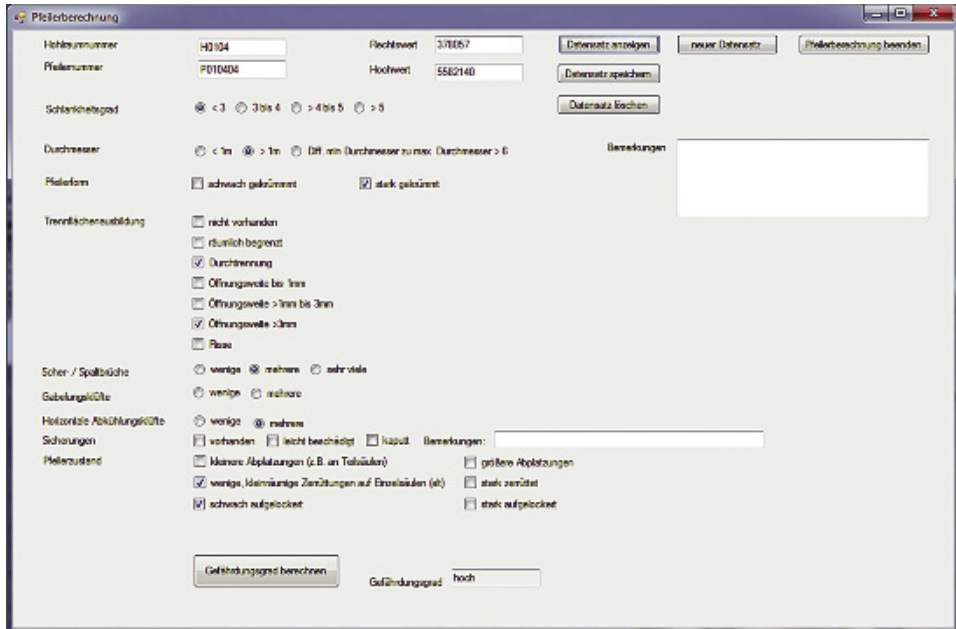


Abb. 9: VB-Dialog zur Berechnung des Gefahrengrades eines Pfeilers in den untertägigen Grubenbauen in Niedermendig (verändert nach MASSENKEIL 2012).

## 5.5. Ergebnisse

Im Zuge der Diplomarbeiten von MASSENKEIL (2012) und ROTHE (2013) wurde das Blatt 01 der ingenieurgeologischen Karte von Niedermendig des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz neu kartiert. Die meisten der 110 Pfeiler sind natürliche Basaltsäulen, sieben Pfeiler sind künstlich errichtete Tragwerke, wie Mühlsteinpfeiler und Pfeiler in Bullflex-Bauweise.

### Pfeilerbewertung mit Elementen und Strukturen (visuell beurteilte Gefahrengrade)

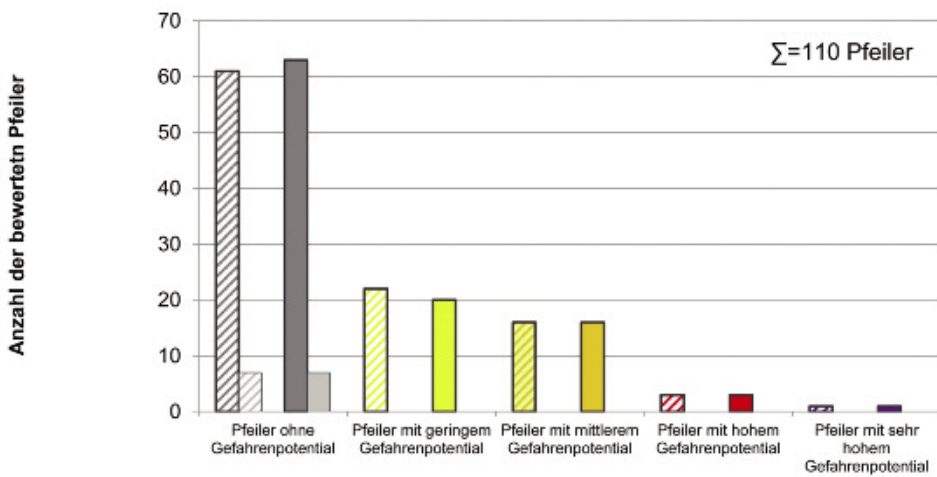
Bei der visuellen Prüfung zeigten 70 der insgesamt 110 Pfeiler keine erkennbare Gefährdung. 20 Pfeiler wiesen eine geringe und 16 Pfeiler eine mittlere Verbruchgefährdung auf. Es wurden nur 3 natürliche Restpfeiler aus Basalt, deren Zustand als hoch gefährdet gilt, kartiert und nur 1 Pfeiler der Tragwerke erwies sich als sehr hoch gefährdet.

Allerdings sind die genannten Pfeiler nicht regelmäßig auf dem Blatt 01 verteilt: Einige Bereiche des Blattes 01 verzeichnen insgesamt ein höheres oder niedrigeres Verbrauchsrisiko aufgrund der unterschiedlichen Risiken, die von den natürlichen Restpfeilern ausgehen. Auffällig ist die Verteilung der Gefahrenpotentiale der basaltischen Tragwerke in H0104. Dort wurden acht Pfeiler aufgenommen, von denen sechs Pfeiler (75 %) keine Gefährdung verzeichnen. Die restlichen zwei Pfeiler (25 %) wurden in ein hohes Gefahrenpotential eingestuft.

**Pfeilerbewertung mit dem Matrixsystem (berechnete Gefahrengrade)**

Die Verteilung der errechneten Gefahrenpotentiale der einzelnen Hohlräume ähnelt der Verteilung der visuell beurteilten Pfeiler stark. Bei Anwendung des Matrixsystems erwiesen sich 68 Pfeiler als tragfähig und ohne feststellbare Mängel und wurden deshalb ohne Gefährdung eingestuft. Bei 22 Tragwerken ergab sich eine geringe Gefährdung, 16 natürliche Restpfeiler wurden mit mittelmäßigem Gefahrenpotential beurteilt, 3 Pfeiler wurden als hoch gefährdet und 1 Pfeiler als sehr hoch gefährdet klassifiziert.

Die Abb. 10 zeigt einen Vergleich der visuellen Gefahreneinschätzung mit dem errechneten Gefahrenpotential eines natürlichen Restpfeilers. Beim Vergleich der beiden Methoden der Pfeilerbewertung gab es nur bei 2 Tragwerken (2 %) eine Abweichung.



**berechnete Gefahrengrade**

natürliche Restpfeiler	61	22	16	3	1
künstliche Restpfeiler	7	0	0	0	0

**visuell beurteilte Gefahrengrade**

natürliche Restpfeiler	63	20	16	3	1
künstliche Restpfeiler	7	0	0	0	0

Abb. 10: Gefahrengrade der untertägigen Restpfeiler in Niedermendig auf Blatt 01 der ingenieurgeologischen Karte. Schraffierte Balken zeigen die mit der Bewertungsmatrix berechneten Pfeilergafahrengrade und die voll ausgefüllten Balken zeigen die visuell bewerteten Pfeiler dar. Bei 110 untersuchten Pfeilern wurde nur bei zwei Pfeilern ein unterschiedlicher Gefahrengrad ermittelt (nach MASSENKEIL 2012).

Somit wurde eine **98%-ige Übereinstimmung** zwischen visueller und rechnerisch ermittelter Pfeilergefährdung erzielt, was im Rückschluss nicht nur die ingenieurgeologische Aufnahme in ihrer Richtigkeit bestätigt, sondern auch ein Beleg für die mathematisch korrekte Aussagekraft beider Methoden ist. Den Berechnungen nach befinden sich in H0105 10 Pfeiler ohne Gefährdung und 3 Pfeiler mit geringer Gefährdung. In H0106 wurden 4 Tragwerke ohne Gefährdung eingestuft, 5 Tragwerke mit geringer Gefährdung und ein Pfeiler mit mittlerer Gefährdung. Die abweichenden Pfeiler wurden visuell ohne Gefährdung eingestuft, rechnerisch wurde ihnen eine geringe Gefährdung zugesprochen. Der Grad der Abweichung beträgt bei zwei Pfeilern je einen Bewertungspunkt. Sie sollten  $\leq 100$  Punkte erhalten, berechnet wurden jedoch 101 Bewertungspunkte.

## 6. Ingenieurgeologische Karten

### Einführung

Die Ergebnisse der geotechnischen Aufnahme wurden in ein geographisches Informationssystem (ArcGIS) eingetragen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die verschiedenen Elemente und Strukturen bzw. Beobachtungen getrennt in einer Hohlraum- und einer Firstkarte dargestellt. Eine Kombination der Merkmale, die auf der Hohlraumkarte und der Firstkarte dargestellt werden, bilden die Gefahrengrade, die auf der Gefahrenkarte verzeichnet wurden.

### Hohlraumkarte

Auf der Hohlraumkarte der ingenieurgeologischen Karte des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz können alle hohlraumgliedernden Elemente abgelesen werden. Darunter gehören die Tragwerke, die entweder als natürliche Restpfeiler aus Basaltsäulen oder als künstliche Pfeiler (Mühlstein-, Bullflex- oder gemauerter Pfeiler) dargestellt sind. Weiterhin sind Mauern, Schächte sowie deren Schüttkegel und Schüttmaterial, Hohlraum- und Besucherbergwerksgrenze und Treppe abgänge eingezeichnet. Die Tragwerke sind auf dieser Karte in den Farben dargestellt, die die von ihnen ausgehende Gefahr widerspiegeln. Die Abb. 11 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt der Hohlraumkarte. Im Bereich des Besucherbergwerks ist ein hoch gefährdeter Pfeiler (P010303) vorhanden. Zur Stabilisierung des Tragwerks wurde bereits in der Vergangenheit direkt daneben ein künstlicher Pfeiler aus Mühlsteinen (P010304) hergestellt. Die Pfeiler P010208 und P010308 weisen eine mittlere Gefährdung auf. Für diese Pfeiler ist eine messtechnische Überwachung zu empfehlen. Auf der Hohlraumkarte werden neben dem Gefahrenpotential der Tragwerke auch die Spannweiten zwischen den Tragwerken und die Hohlraumbereichsgrenzen verdeutlicht.

### Firstkarte

Die Firstkarte (Abb. 12) zeigt die Strukturen der Firste im Untersuchungsgebiet. Die wichtigsten Strukturelemente sind in der Tab. 18 zusammengestellt. Historische Sicherungen, wie beispielsweise Eisenbolzen und Klemmkeile aus Holz oder Metall weisen auf bereits in der Vergangenheit erkannte Standsicherheitsdefizite hin.

### Gefahrenkarte

Das Gefährdungspotential von Hohlräumen ergibt sich aus der summarischen Betrachtung aller stabilitätsbestimmenden Faktoren. Die Gefahrenkarte bewertet das Entstehen einer Einsturzgefahr mit gering bis sehr hoch für die kartierten Hohlräume.

Tab. 18: primäre Strukturelemente der Firste mit Gewichtung für die Standsicherheitsbewertung.

Primäre Strukturelemente der Firste	Erläuterung	Gewichtung für die Standsicherheitsbewertung
unregelmäßige Firstausprägung	Die Säulenköpfe weisen irreguläre, asymmetrische, verjüngende und teilweise pyramidale Formen auf. Das Gefahrenpotential ist erhöht, da hier die Spannungsverteilung gestört ist	mittlere Gewichtung
Red Cracks	Vertikale, keilförmige, rot verfüllte Spalten im Basalt. Im Bereich der Red Cracks ist die Standfestigkeit der Firste stark herabgesetzt	starke Gewichtung
Rauschpel Säß	Subhorizontale Trennflächen mit buckeliger Oberflächenausprägung im Firstbereich. Bei Mobilisierung dieser Trennflächen können ganze Firstbereiche herunterbrechen	starke Gewichtung

Die gefährdeten Bereiche werden auf der Gefahrenkarte dargestellt (Abb. 13). Das Besucherbergwerk Niedermendig umfasst die Hohlräume H0101, H0102 und H0103. Die Hohlräume H0101 und H0103 sowie der größte Anteil des Hohlraums H0102 weisen keine gefährdeten Bereiche auf. Lediglich der nördlichste Teil des Hohlraums H0102 weist eine Zone mittlerer Gefährdung auf. Hier befindet sich in der unregelmäßig ausgeprägten Firste ein Red Crack, in seiner nahen Umgebung ereigneten sich bereits zwei Ausbrüche bis in die Mucken. Aufgrund der Zugehörigkeit zum Besucherbergwerk, wurde dieser Bereich auf Empfehlung des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz vom Betreiber des Bergwerks durch ein Metallgelande abgesperrt. Der insgesamt gute Zustand des Besucherbergwerks ist den regelmäßigen Überprüfungen sowie bereits durchgeführten Sicherheits- bzw. Sanierungsmaßnahmen geschuldet. Besonders hervorzuheben ist die Verklebung großer Teile der Firste mit einem Zwei-Komponenten-Kleber aus Epoxid-Harz.

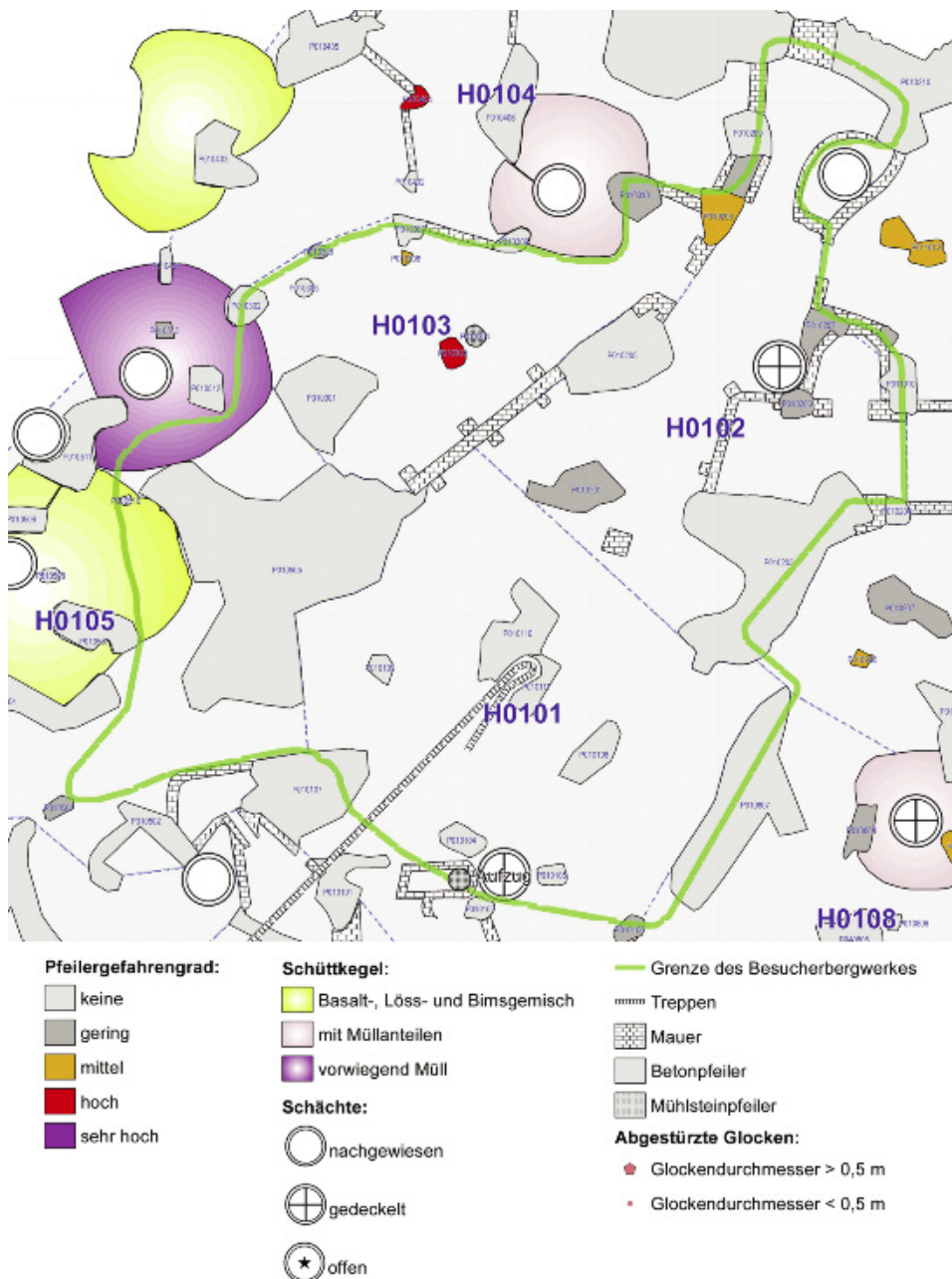


Abb. 11: Ausschnitt der Hohraumkarte auf Blatt 01 der Ingenieurgeologischen Karte von Niedermendig (MASSENKEIL 2012). Die grüne Linie grenzt das Besucherbergwerk ab. Die Bildbreite entspricht in der Wirklichkeit 75 m. Norden zeigt nach oben.

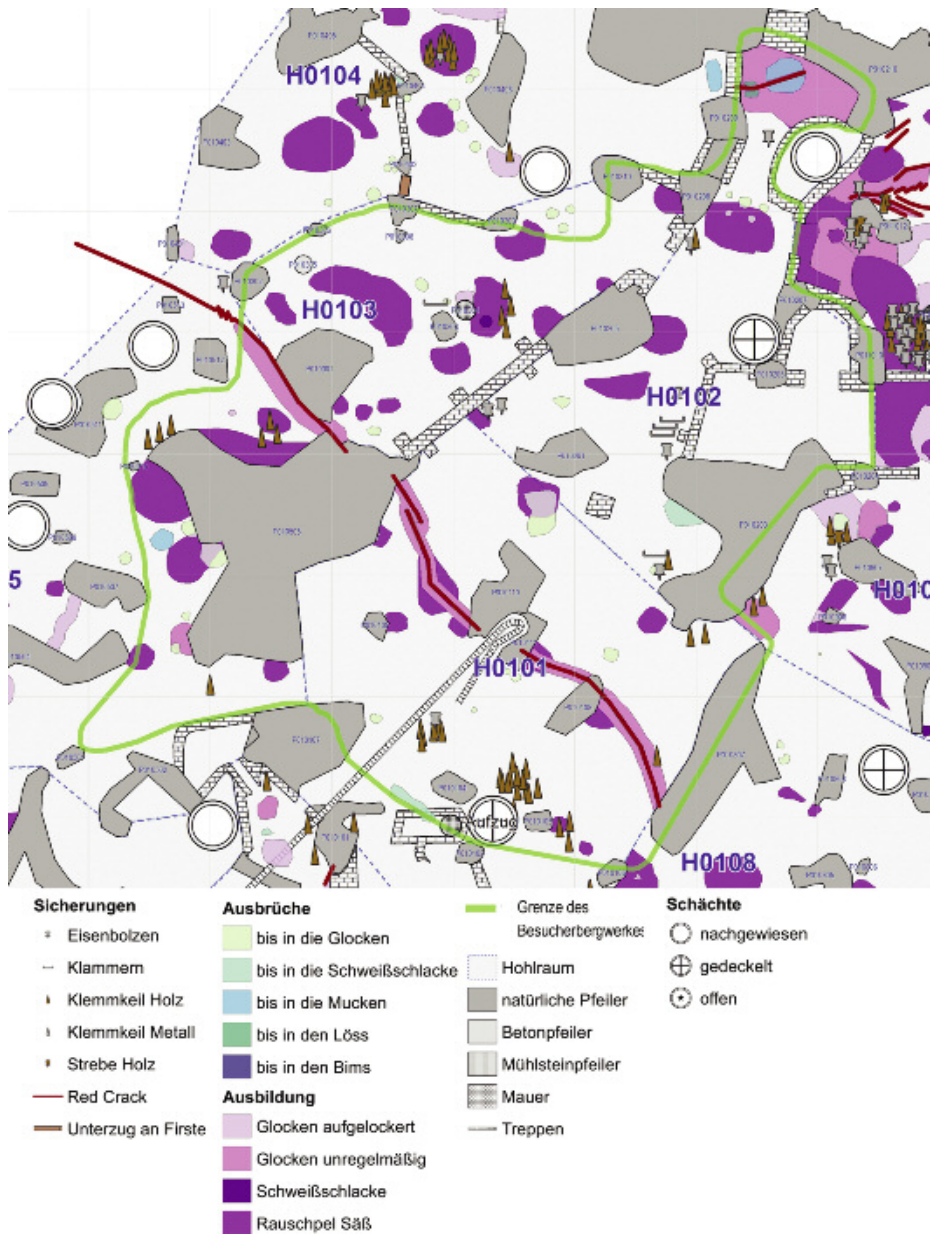


Abb. 12: Ausschnitt der Firstkarte auf Blatt 01 der Ingenieurgeologischen Karte von Niedermendig (MASSENKEIL 2012). Die Firsten der Hohlräume weisen Schwächungen unterschiedlicher Ursachen auf. Beispiele für Schwächungen sind Red Cracks (rot verfüllte Spalten), Rauschpel Säß (subhorizontale Trennflächen im Firstbereich), Auflockerungen und Ausbrüche (bereits eingetretene Verformungen). Auffallend ist, dass sich im Einflussbereich eines Red Cracks die Firste unregelmäßig ausgeprägt hat. (Ausschnitt wie Abb. 11).

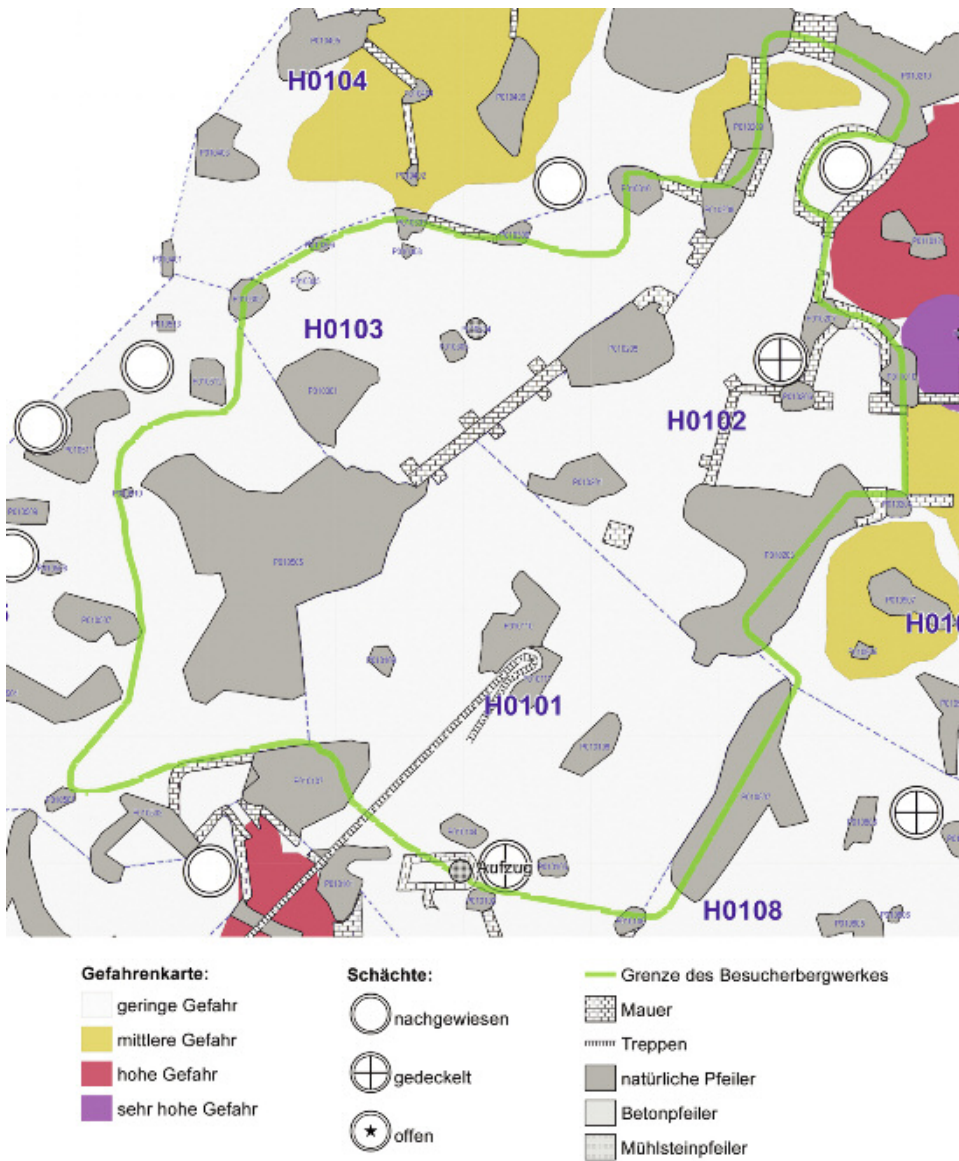


Abb. 13: Ausschnitt der Gefahrenkarte auf Blatt 01 der Ingenieurgeologischen Karte von Niedermendig (MASSENKEIL 2012). Für das Besucherbergwerk wurden keine gefährdeten Bereiche ermittelt. Ausgenommen hiervon ist eine kleine Teilfläche am nördlichen Rand. Diese wurde mittlerweile abgesperrt (Ausschnitt wie Abb. 11).

### 7. Kontroll-, Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen

Ziel aller geotechnischen Aufnahmen, Standsicherheitsanalysen und Ermittlungen von Gefährdungspotentialen ist das Erkennen eines Handlungsbedarfs zum Schutz von Sachgütern sowie von Leib und Leben. Die Verbindung der oberirdischen Situation mit dem Gefahrenpotential gibt Auskunft über die Notwendigkeit sowie die Dringlichkeit von vorsorgenden oder sichernden Maßnahmen. In der Tab. 19 werden in allgemeiner Form an die Situation angepasste Maßnahmen genannt. In den geotechnischen Berichten, wie ROGALL et al. (2011) sowie den Diplomarbeiten von MASSENKEIL (2012) und ROTHE (2013) werden konkrete Maßnahmen für einzelne Pfeiler und Hohlraumbereiche genannt.

Tab. 19: Auflistung der empfohlenen Maßnahmen für auffällige Pfeiler und Hohlräume in Abhängigkeit vom Gefährdungspotential und der oberirdischen Situation. Die Dringlichkeit der Maßnahme wird durch die Farbgebung verdeutlicht.

Oberirdische Situation	Gefährdung	Empfohlene Maßnahmen
Grünfläche	mittel	Jährliche Beobachtung, ggf. messtechnisch überwachen
Straße, Wohnhaus	mittel	Jährliche Beobachtung, ggf. messtechnisch überwachen
Grünfläche	hoch	Jährliche Beobachtung, messtechnisch überwachen, Sicherungen prüfen
Straße, Wohnhaus	hoch	Jährliche Beobachtung, messtechnisch überwachen, Sicherungen prüfen, ggfs. Sicherungen instand halten
Grünfläche	sehr hoch	Halbjährliche Beobachtung, messtechnisch überwachen, ggfs. Pfeiler sanieren
Straße, Wohnhaus	sehr hoch	Halbjährliche Beobachtung, messtechnisch überwachen, ggfs. Pfeiler sanieren oder neuen Pfeiler errichten

Ab einer mittleren Gefahr sollten Pfeiler und Hohlräume regelmäßig durch einen Geotechniker visuell überprüft und messtechnisch überwacht werden, sodass rezente Bewegungen an natürlichen Tragwerken erkannt werden können. Besonders dringend ist diese Maßnahme an Pfeilern, die sich im Einflussbereich eines nachsackenden Schüttkegels befinden. Zur messtechnischen Überwachung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung:

- Felsspione: Messung der Breite von Rissen und Spalten
- Zielmarken: Abstandsmessung, beispielsweise zwischen Sohle und Firste
- 3D-Scans: Ermittlung flächiger Verformungen, Sackungen, Ausbrüche

Insgesamt wurden in Niedermendig vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz im Rahmen eines Mess- und Überwachungsprogramm bis Ende 2012 insgesamt 160 Felsspione und 10 Paare von Zielmarken angebracht. Für einen Hohlraum wurde testweise eine Wiederholung eines 3D-Scans durchgeführt.



## 8. Ausblick

Weiterführende Überlegungen zur Bewertungsmatrix und der Nutzung des Geoinformationssystems ArcGIS 10 bieten sich an: Um die Aussage über die Anzahl der Trennflächen in der vorliegenden Bewertungsmatrix repräsentativ darstellen zu können, sollte die Idee der Erstellung des Trennflächenindex  $I_T = F/A$  weiterentwickelt werden. Ein Grundgedanke ist es, die einzelnen Tragwerke aus Basaltsäulen in einer sinnvollen Dimension als Quader anzunehmen. Hierzu könnten Informationen der dreidimensionalen Scannerbefahrung genutzt werden. Des Weiteren könnte zusätzlich zu der rechnerischen Pfeilerbewertungsmatrix eine automatisierte Bewertung der Firste, der Hohlraumgeometrie und der Schüttkegel herausgearbeitet werden. Die Beurteilung der Firste könnte über speziell erstellte Indizes der einzelnen Faktoren erfolgen (das Verhältnis der Firststrukturfläche pro Gesamtfirstfläche, z. B. für Rauschpel Säß in H0101:  $I_{RS} = F_{RS,H0101} / F_{H010,Ges}$  wobei  $F_{RS,H0101}$  die Fläche der Firststruktur Rauschpel Säß [m<sup>2</sup>] in H0101 und  $F_{H010,Ges}$  die Gesamtfläche [m<sup>2</sup>] des Hohlraumes H0101 ist). Dies würde eine vom Bearbeiter unabhängige, objektive und repräsentative Bewertung der Firste ermöglichen. Die Gesamtgefährdung eines Hohlraumes könnte als Summe aus der Pfeilergefährdung, Firstgefährdung, Schüttkegel- und Hohlraumgeometriebewertung dargestellt werden.

Es besteht die Möglichkeit, eine automatisierte Kartendarstellung in ArcGIS10 zu erstellen, bei der Gefährdungsflächen anhand von Kombination und Anzahl der Strukturmerkmale (wie Sicherungen, Rauschpel Säß, gefährdeten Pfeilern etc.) in einem begrenzten Bereich farblich visualisiert werden können. Gefährdungen sind dann direkt erkennbar. Hierfür müsste festgelegt werden, bei welcher Anzahl und Kombination Flächen gelb (geringe Gefährdung), orange (mittlere Gefährdung), rot (hohe Gefährdung) und violett (sehr hohe Gefährdung) gefärbt werden. Die Flächen könnten über Raster im Geoinformationssystem definiert werden. Des Weiteren ist die Erstellung von dreidimensional visualisierten geotechnischen und felsmechanischen Modellen denkbar.

## Schriften

- BOOGARD, van den P., & SCHMINCKE, H.-U. (1990). Vulkanologische Karte der Osteifel 1:50 000. Koblenz.
- DIN 4017-1 (03-2006): Baugrund - Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flächengründungen. 23 S., 9 Abb., Anhang, (Beuth) Berlin.
- HÖRTER, F. & MICHELS, F.X. & RÖDER, J. (1955): Die Geschichte der Basaltlava-Industrie von Mayen und Niedermendig und seiner Nachbargebiete. – Jb. Geschichte und Kunst des Mittelrheins und seiner Nachbargebiete, 6./7. Jahrgang 1954/1955, S. 7 – 32, 14 Abb., 1 Tafel, (Raiffeisendruckerei) Neuwied.
- JAHNEL, CHR. & NORTMEYER, U. & SCHERSCHEL, J. & SCHWAB, L. 6 WANNER, TH. & KERZAN, K. (1996): Standsicherheit der ehemaligen Grubenbaue unter der L 113 in Niedermendig (Az. 32/895/88). Gutachten des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz Mainz vom 15.03.1996, 92 S., 4. Anl., Mainz. – [unveröff.].
- KERZAN, K. & FEUERBACH, J. & NORTMEYER, U. & SCHERSCHEL, J. (1995): Standsicherheit der ehemaligen Grubenbaue unter der Brauerstraße in Niedermendig (Az. 32/895/88). Gutachten des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz Mainz vom 24.01.1995, 133 S., 5. Anl., Mainz. – [unveröff.].
- MASSENKEIL, G. (2012): Ingenieurgeologische Kartierung und Bewertung der oberflächennahen Grubenbaue im Oberen Niedermendiger Lavastrom (Eifel) einschließlich der Erstellung einer rechnerischen Bewertungsmatrix. Diplomarbeit Institut für Geowissenschaften Univ., 102 S., 31 Abb., 35 Tab., Anhang, Mainz. – [unveröff.].

- MEYER, W. (1994): Geologie der Eifel. 3. Aufl., 618 S., 154 Abb., (Schweizerbart) Stuttgart.
- MEYER, W. & SCHUMACHER, K.-H. (2012): Geopark Vulkanland Eifel – Lava-Dome und Lavakeller in Mendig. – bergbau – Zeitschrift für Rohstoffgewinnung, Energie, Umwelt, S. 113–123, Essen.
- ROGALL, M. (2007): 500 Jahre untertägiger Basaltabbau in Niedermendig: Ein Überblick zur Abbaugeschichte und heutigen Problematik. – Zeitschrift zur Geschichte des Berg- und Hüttenwesens, 2/2007, 13. Jg., S. 28–45, (Charivari) Idar-Oberstein.
- ROGALL, M. & WEHINGER, A. & KURZ, K. (2011): Kartierung und ingenieurgeologische Standsicherheitsbeurteilung ausgewählter Hohlräumebereiche in Niedermendig (Pilotprojekt) (Az. 3322-1332-10/V6). Geotechnischer Bericht des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz Mainz vom 21.12.2011, 68 S., 7 Anl., Mainz. [unveröff.].
- ROTHER, P. (2006): Die Geologie Deutschlands – 48 Landschaften im Portrait. 2. Aufl., 240 S., (Wissenschaftliche Buchgesellschaft) Darmstadt.
- ROTHER, Y. (2013): Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Standsicherheit von Hohlräumen im Oberen Niedermendiger Lavastrom einschließlich einer historischen Recherche von geotechnisch-altbergbaulichen Schadensfällen und Abbauen. Diplomarbeit Institut für Geowissenschaften Univ. Mainz, 78 S., 47 Abb., 7 Tab., Anlagen, Mainz. – [unveröff.].
- SCHERSCHEL, J. (1999). Ingenieurgeologisch-geotechnische Untersuchungen zum Gefährdungspotential oberflächennaher Grubenbaue des ehemaligen Basaltabbaus im oberen Niedermendiger Lavastrom, Niedermendig (Quartär, Eifel). Diplomarbeit Institut für Geowissenschaften Univ. Mainz, 169 S., 50 Abb., 6 Tab., 6 Anlagen, 3 Beilagen, Mainz. – [unveröff.].
- WEHINGER, A. (2004): Der Obere Niedermendiger Basaltstrom – Lagerstätte und Bergbau. – Mainzer geowiss. Mitt., 32, S. 111–130, 13 Abb., 4 Tab., Mainz.
- WEHINGER, A. & ROGALL, M. (2012): Erkundung und geotechnische Bewertung von Untertageanlagen ehemaligen Basaltbergbaus in Mendig (Vordereifel). 12. Altbergbau-Kolloquium der TU Clausthal, 8. bis 10. November 2012 in Goslar, S. 257–271, 8 Abb., 3. Tab., (VGE) Essen.

Anschriften der Verfasser:

Diplom-Geologin GESA AMSTUTZ,  
Bleichstraße 1, D-65232 Taunusstein.  
Diplom-Geologe ANSGAR WEHINGER,  
Diplom-Geologe Dr. MICHAEL ROGALL,  
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz,  
Emy-Roeder-Straße 5, D-55129 Mainz.

Manuskript eingegangen am 24.5.2013