

Identifizierung von Asbestfasern in Stäuben, Pulvern und Pudern mineralischer Rohstoffe

- Grundlagen, Daten und Struktur eines Konzeptes zur Faseridentifizierung -

M. Mattenklott*

Zusammenfassung Die Bestimmung von lungengängigen Asbestfasern in der Luft in Arbeitsbereichen erfolgt mit dem von den Berufsgenossenschaften anerkannten rasterelektronenmikroskopischen Analysenverfahren BGI 505-46 (frühere Bezeichnung: ZH 1/120.46). Die in dieser Analysenvorschrift genannten Auswertekriterien sind zur Bestimmung von Asbestfasern in Stäuben, die bei der Gewinnung bzw. Aufbereitung von Gesteinen anfallen, jedoch nicht hinreichend. Deshalb sollten ergänzende Kriterien verfügbar sein. In dieser Arbeit sind die Elementgehalte der Asbestminerale und typischer Minerale potenziell asbesthaltiger Gesteine zusammengestellt worden. Dabei waren sowohl die natürliche Variabilität bzw. Mischkristallbildung bestimmter Minerale als auch die nur eingeschränkte Genauigkeit der Elementanalyse von EDX-Systemen unter den gegebenen Messbedingungen zu berücksichtigen. Daraus abgeleitet wurde ein Kriterienkatalog zur Abgrenzung der Asbestminerale von anderen Mineralen anhand der chemischen Zusammensetzung (EDX-Analyse mit ZAF-Korrektur). Zur effizienten Anwendung dieser ergänzenden Kriterien zur Faseridentifizierung wird eine Umsetzung des Kriterienkatalogs in Form einer frei verfügbaren Tabelle auf Grundlage des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft EXCEL[®] vorgestellt.

Identification of asbestos fibres in dusts and powders from mineral raw materials

Abstract The determination of respirable asbestos fibres in workplace air is based on a BG-approved method using scanning electron microscopy (method BGI 505-46, former: ZH 1/120.46). The criteria laid down in this method to identify asbestos fibres, however, do not suffice for the determination of asbestos fibres in dusts, generated by quarrying and further treatment of rocks. Additional criteria should therefore be available. The paper contains an overview of asbestos minerals and typical minerals of potentially asbestos-containing rocks and their usual range of chemical composition. The data have been collected with respect to both the natural variability or the mixed crystal growth of certain minerals and the relatively imprecise results of EDX-based analyses of the chemical composition under these special measurement conditions. Using these data it was possible to establish a catalogue of criteria which helps distinguish asbestos minerals from other minerals by referring to the chemical composition. To allow an efficient use of this data-collection, the criteria catalogue was transferred into a free available Microsoft EXCEL[®]-sheet.

* Dr. rer. nat. Markus Mattenklott, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit - BIA, Sankt Augustin

Stichwörter

Asbest, Gesteinsstaub, mineralische Rohstoffe, Faseridentifizierung, BGI 505-46, ZH1/120.46, Faser, chemische Zusammensetzung, REM-EDX-Analyse, Identifizierungskriterien, automatische Auswertung, Konventionen, TRGS 954

1 Einführung

Die Bestimmung von lungengängigen Asbestfasern in der Luft in Arbeitsbereichen erfolgt mit dem von den Berufsgenossenschaften anerkannten rasterelektronenmikroskopischen Analysenverfahren BGI 505-46 (früher: ZH 1/120.46) [1]. Die Anwendung dieser REM-EDX-Methode ermöglicht die Bestimmung der Faserkonzentration und liefert Aussagen über die chemische Zusammensetzung der Partikeln. Anhand dieser Informationen werden nach BGI 505-46 vier verschiedene Fasertypen unterschieden:

- Chrysotilasbest: Mg-, Si-Linie deutlich; Fe-, Mn-, Al-Linie schwach möglich; andere Linien je nach Begleitsubstanz
- Amphibolasbest: Si-, Fe-Linie deutlich; Mg-Linie schwach möglich; andere Linien je nach Begleitsubstanz
- Calciumsulfat: Ca-Linie deutlich; S-Linie vorhanden; weitere Linien bei nicht reinem CaSO_4 möglich
- Sonstige anorganische Fasern: andere Elementspektren mit mindestens einer Linie

In der BGI 505-46 wird darauf hingewiesen, dass eine Identifizierung nach diesen Kriterien nicht in jedem Fall eindeutig ist. Kenntnisse über die im Arbeitsbereich verwendeten Materialien seien im Zweifelsfall zu verwenden. In Bezug auf die meisten technisch eingesetzten asbesthaltigen Produkte ist eine Klassifizierung nach dem genannten Schema ausreichend.

Bei der Identifizierung von Asbestmineral-Fasern in Stäuben, die bei der Gewinnung, Aufbereitung und Verarbeitung mineralischer Rohstoffe entstehen, müssen jedoch die übrigen Mineralkomponenten des jeweiligen Gesteinsvorkommens berücksichtigt werden. Das Auftreten von Asbest, insbesondere von Chrysotil, Tremolit, Aktinolith und untergeordnet auch Anthophyllit, ist bei den in der Bundesrepublik Deutschland abgebauten Gesteinen im wesentlichen an Vorkommen ultrabasischer bis basischer Magmatite und bestimmter metamorpher Gesteine gebunden (siehe TRGS 954, [2]). Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass auch andere Minerale als die Asbestminerale Fasern kritischer Abmessungen liefern. Wenn zur Mineralidentifizierung lediglich die oben genannten Kriterien berücksichtigt werden, besteht für bestimmte Mineralpartikeln eine Verwechslungsmöglichkeit mit Asbestfasern. Inzwischen wurde eine modifizierte Version des rasterelektronenmikroskopischen Verfahrens BGI 505-46 erarbeitet, die die Bestimmung geringer Massengehalte von Asbestfasern in Pulvern, Pudern und Stäuben erlaubt [3]. Hier werden bereits einige weitergehende Kriterien genannt, um anhand des EDX-Spektrums Asbeste von anderen Mineralen zu unterscheiden.

Bei REM-EDX-Untersuchungen bieten sich außerdem die quantitative chemische Zusammensetzung der Partikeln sowie die Verhältnisse der Massenanteile bestimmter Elemente als geeignete Kriterien an, um die Unterscheidungsmöglichkeiten zu verbessern. In dieser Arbeit werden Grundlagen, Daten und Struktur eines entsprechenden Konzepts zur Faseridentifizierung vorgestellt.

Eindeutige, in Regelwerken festgelegte Kriterien für die Abgrenzung von Asbest gegenüber anderen ähnlichen Mineralen, sind bislang nicht aufgestellt worden. Zumeist erfolgt die Zuordnung einer Partikel zur Gruppe der Asbeste oder der sonstigen anorganischen Fasern auf Grundlage der im jeweiligen Labor etablierten Kriterien. Diese Kriterien können sehr unterschiedlich sein und führen demnach auch zu unterschiedlichen Resultaten.

Es ist daher wünschenswert, eine einheitliche Bewertungsgrundlage aufzustellen. Diese müsste detailliert genug sein, um eine eindeutige Identifizierung von Partikeln zu ermöglichen und andererseits effizient in der Handhabung sein, um im Routinebetrieb eingesetzt werden zu können. Die im folgenden erläuterten Festlegungen zur Faseridentifizierung basieren auf Konventionen. Diese Konventionen können Grundlage für eine einheitliche und damit auch vergleichbare Bewertung der Faserkonzentration bzw. des Massegehalts an Asbestfasern in Stäuben mineralischer Rohstoffe sein.

2 Zur Definition der Asbeste

In Anhang IV Nr. 1 der Gefahrstoffverordnung ist der Begriff Asbest definiert. Als Asbest werden die Silikate Chrysotil, Aktinolith, Amosit, Anthophyllit, Krokydolith und Tremolit bezeichnet, sofern Sie eine Faserstruktur aufweisen. Der Begriff Faserstruktur wird hier jedoch nicht definiert.

Für die genannten Minerale können ideale Strukturformeln (Tabelle 1 auf Seite 13) und damit auch jeweils die ideale chemische Zusammensetzung angegeben werden. Die in der Natur vorkommenden bzw. technisch verwendeten Asbeste weisen jedoch selten diese ideale Stöchiometrie auf. Aufgrund von Diadochie (Substitution bestimmter Ionen im Kristallgitter) und Mischkristallbildung zeigen die meisten Minerale eine bestimmte Variabilität ihrer chemischen Zusammensetzung. Durch den teilweisen Ersatz von Si durch Al kann z.B. ein Chrysotil mehrere Massen-% Al enthalten. Die fünf genannten Amphibolasbeste gehören Mischkristallreihen an. In der Regel bezieht sich eine Mineralbezeichnung dabei auf einen bestimmten Bereich einer Mischkristallreihe. Tremolit ist beispielsweise das Endglied einer solchen Reihe. Mit zunehmendem Austausch des Mg durch Fe geht der Tremolit in Aktinolith und schließlich in Ferroaktinolith über, der kein Mg mehr enthält. Der Aktinolith deckt dabei einen Bereich ab, in dem etwa 20 bis 80 % des Mg durch Fe ersetzt sind [4]. Die chemische Zusammensetzung einer Asbestart kann demnach nur durch Angabe einer Spannbreite für die verschiedenen Elementgehalte beschrieben werden.

Von den genannten Amphibolen existieren sowohl faserförmige, als auch nicht-faserförmige, zumeist prismatische ausgebildete Varietäten. Die Namen Amosit und Krokydolith bezeichnen bereits die faserförmige Ausbildung der Minerale Grunerit und Riebeckit. Faserförmiger Aktinolith wird vereinzelt auch als Amianth oder Nephrit bezeichnet.

Mineral	Faserförmige Varietät
Aktinolith	Aktinolith, Amianth, Nephrit
Grunerit	Amosit
Anthophyllit	Anthophyllit
Riebeckit	Krokydolith
Tremolit (Grammatit)	Tremolit

Anhand von Auswertungen des Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisses einer großer Zahl von Partikeln, lassen sich faserförmige und nicht-faserförmige Ausbildungen der Amphibolminerale unterscheiden. Untersuchungen von Campbell et al. [5] haben gezeigt, dass das Maximum des Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisses von Partikeln nicht-faserförmiger Varietäten beispielsweise von Tremolit und Anthophyllit bei $< 3:1$ liegt, während das Maximum des entsprechenden Verhältnisses der faserförmigen Ausbildung bei ca. $10:1$ liegt. Allerdings überlappen sich die Verteilungen der beobachteten Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisse in einem großen Bereich bis etwa zum Verhältnis von $30:1$ bzw. $50:1$.

Bei der Bestimmung der Asbestfaserkonzentration werden jedoch ausschließlich Fasern mit einer Länge $> 5\mu\text{m}$, einem Durchmesser $< 3\mu\text{m}$ und einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von mindestens $3:1$ erfasst [1][2][6], die sogenannten „Fasern kritischer Abmessungen“ (WHO-Fasern). Zu bedenken ist auch, dass bei der Untersuchung von Staubproben die Zahl der Fasern im Vergleich zu den Partikelkollektiven der o.g. statistischen Auswertungen sehr klein ist. Außerdem ist nicht auszuschließen, dass sowohl faserförmige als auch nicht-faserförmige Ausbildungen eines der Asbestminerale im selben Gesteinsvorkommen auftreten oder auch Übergänge zwischen beiden Formen vorliegen.

Die Unterscheidung, ob eine Partikel kritischer Abmessungen eines Gesteinsstaubes der faserförmigen oder nichtfaserförmigen Ausbildung eines Asbestminerals der Amphibolgruppe entstammt, kann deshalb bei Auswertungen mit den rasterelektronenmikroskopischen Methoden [1][3] in der Regel nicht eindeutig erfolgen.

Dieses Problem betrifft auch den in der Gefahrstoffverordnung (Anh. IV Nr. 1) verwendeten Begriff der "freien Asbestfasern" in einem mineralischen Rohstoff. Die TRGS 954 trägt dem durch folgende Definition des Begriffs Rechnung:

Als freie Asbestfasern in einem mineralischen Rohstoff werden solche Asbestfasern bezeichnet, die im einatembaren Staub auftreten, der bei der Aufbereitung der Gesteine entsteht.

Ob eine Asbestfaser aus einem faserförmigen oder nichtfaserförmigen Vorkommen eines Asbestminerals freigesetzt wurde, kann analytisch nicht immer sicher unterschieden werden. Deshalb sind alle Partikeln als freie Asbestfasern zu bewerten, die entsprechend ihrer chemischen Zusammensetzung den sechs Asbestmineralen zuzuordnen sind, die kritischen Abmessungen (Länge $> 5\mu\text{m}$, Durchmesser $< 3\mu\text{m}$, Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis $> 3:1$) aufweisen und in die Luft gelangt sind.

Als Asbestfasern sind bei REM-EDX-Untersuchungen deshalb alle Partikeln zu erfassen, welche die kritischen Abmessungen aufweisen und aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung einem der sechs Asbestminerale zuzuordnen sind. Die Bestimmung der Kristallstruktur der untersuchten Partikeln ist ebenfalls aussagekräftig (z.B. [7][8]), erfolgt jedoch nicht im Rahmen dieser Analysen.

3 Minerale potenziell asbesthaltiger Gesteine

Potenziell asbesthaltige Gesteine, die in der Bundesrepublik Deutschland abgebaut werden, sind Ultrabasite/Peridotite (z.B. Dunit, Lherzolite, Harzburgit), basische Magmatite (z.B. Basalt, Spilit, Basanit, Tephrit, Phonolith, Gabbro, Norit, Diabas) und metamorphe bzw. metasomatisch überprägte basische Gesteine (z.B. Talkgesteine, Grünschiefer, Chlorit- und Amphibolschiefer/-fels (Bsp.: Nephrit), Serpentin, Amphibolit). Um möglicherweise vorkommende Asbestfasern von anderen Mineralpartikeln abgrenzen zu können, sollten die häufigsten der in den genannten Gesteinen enthaltenen

Mineralphasen zum Vergleich herangezogen werden. Von Bedeutung sind hier vor allem Pyroxene, Amphibole (Hornblenden), Olivin, Schichtsilikate (Glimmer, Chlorite, Talk, etc.) und eine Reihe akzessorischer Minerale. Eine entsprechende Zusammenstellung findet sich in Tabelle 1. Mit der Auswahl wurde versucht, einen möglichst großen Bereich typischer Minerale basischer Gesteine der jeweiligen Mineralgruppe zu erfassen.

Feldspäte (einer der wichtigsten Bestandteile der genannten Gesteine), Feldspatvertreter und Zeolithe wurden hier nicht berücksichtigt. Da in diesen Mineralen keine nennenswerten Anteile von Mg und Fe enthalten sind, ist eine Verwechslung mit den Asbesten nicht zu erwarten.

4 Vergleichsdaten für die Bewertung von Ergebnissen der Partikelanalyse

Als Kriterium zur Abgrenzung der Asbestminerale von den anderen in Gesteinsstäuben enthaltenen Mineralen wird die chemische Zusammensetzung sowie das Verhältnis bestimmter Elementanteile zueinander herangezogen. Statt der idealen chemischen Zusammensetzung, werden als Unterscheidungskriterien die zu erwartenden Variationsbreiten der Elementgehalte der einzelnen Mineralphasen bewertet (Tabelle 2, Seite 14). Bei der Zusammenstellung der Vergleichsdaten wurden für die einzelnen Mineralgruppen folgende Festlegungen getroffen:

Asbeste: Als Grundlage wurden die in der Literatur aufgeführten Spannbreiten der realen Zusammensetzung technisch der Asbestminerale verwendet. Allerdings mussten einige Einschränkungen vorgenommen werden, da offensichtlich auch „exotische“ Asbestvarianten mit einbezogen wurden. Hier sind die ungewöhnlich großen Gehalte an CaO im Chrysotil (10 %[†]), Na₂O im Aktinolith/Tremolit (8 %) und an Al₂O₃ im Anthophyllit (8 %) und Amosit (9 %) sowie der auffällig niedrige Gehalt an MgO im Chrysotil (23 %) und der fehlende CaO-Anteil im Aktinolith/Tremolit zu nennen. Entgegen den mineralogischen Festlegungen weist der Amosit eine deutlich größere Spanne an Fe-Anteilen und damit korrespondierend auch Mg-Anteilen auf, die hier Berücksichtigung fand. Die Zusammensetzung des Aktinoliths wurde nicht bis zum reinen Ferroaktinolith ausgedehnt, da dieser in der Regel nicht vorkommt. Statt dessen wurde der Bereich des Aktinoliths zum Mg-reichen Tremolit erweitert.

Die Amphibolasbeste zeigen in ihrer realen chemischen Zusammensetzung mehr oder weniger kontinuierliche Übergänge zu Phasen anderer Mineralgruppen. Von der Aktinolith-Tremolit-Reihe sind Übergänge zu Hornblenden der Tschermakitreihe üblich. Daher wurde als Abgrenzung zu diesen Mineralen der Al-Anteil der Asbeste etwas strenger an die idealen Vorgaben angepasst (vergl. Tabelle 3, Seite 15).

Andere Minerale: Die Spannbreite der Elementgehalte der Minerale wurde so gewählt, dass möglichst große Bereiche von Mischkristallreihen abgedeckt werden. Da nicht alle Varietäten einzelner Mineralgruppen in die Vergleichsliste aufgenommen werden konnten, bietet sich dieses Vorgehen an[‡].

5 Modifizierung der Daten zur chemischen Zusammensetzung

Die an Partikeln aufgenommenen EDX-Spektren werden mittels ZAF-Korrektur für die Oxide Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, CaO, MnO, FeO, TiO₂ sowie das Ion SO₄²⁻ ausgewertet. Beim Einsatz von goldbesputterten Filtern muss in jedem Fall auch Au berücksichtigt werden, da dessen M-Linie die

[†] Angaben in % beziehen sich generell auf Massenanteile

[‡] detaillierte Angaben zu den Festlegungen für die einzelnen Mineralgruppen können angefordert werden, s. Schlussbemerkung

K-Linie des Si und die K-Linie des S überlagert. Die Oxide (ohne Au) werden auf die Summe von 100 % normiert.

Die Vergleichsdaten für Asbeste und weitere Minerale müssen entsprechend modifiziert werden. Ausgehend von der idealen chemischen Zusammensetzung und den erläuterten Variationsbreiten der Elementgehalte wurden für jedes Mineral die Gehalte der oben genannten Oxide berechnet und auf die Summe von 100 % normiert. Da mittels EDX-Analyse keine unterschiedlichen Wertigkeiten von Elementen erfasst werden können, wurde dreiwertiges Fe (z.B. in Krokydolith und Hornblenden enthalten) als FeO berechnet. Kristallwasser bzw. Anteile an Hydroxylgruppen einiger Minerale wurden nicht berücksichtigt, da eine Berechnung anhand des O-Anteils zu große Fehler birgt. Bei Mineralen mit größeren H₂O- bzw. OH-Anteilen (z.B. Chrysotil) ergeben sich dadurch deutliche Änderungen bei der Berechnung der Vergleichsdaten.

Beispiel Chrysotil:

	MgO	SiO ₂	H ₂ O
Ideale chemische Zusammensetzung:	43,6 %	43,4 %	13,0 %
Vergleichsdaten für Identifizierung:	50,2 %	49,8 %	-

Ti wird in der Regel als TiO₂ ausgewiesen. Angaben als Ti₂O₃ können vereinfachend mit der Formel $TiO_2 = Ti_2O_3/0,9$ umgerechnet werden.

Weiterhin musste berücksichtigt werden, dass die mittels EDX-Analyse bestimmte Zusammensetzung einer Partikel durch unterschiedliche Einflüsse (z.B. Faserdicke, -geometrie) neben den statistischen Fehlern auch mit systematischen Fehlern behaftet sein kann. Diese können im Einzelfall nicht ermittelt werden. Deshalb wurde die Spannbreite der Elementgehalte in Abhängigkeit vom Elementgehalt (< 1 % / < 4 % / < 6 % / > 6 %) zusätzlich um jeweils ± 1 % / ± 2 % / ± 2,5 % / ± 3 % erweitert. Die so modifizierten Daten der Asbeste und aller Vergleichsminerale sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

6 Abgrenzungskriterien

Auf Grundlage der Vergleichsdaten wurde ein Kriterienkatalog erstellt, der in den meisten Fällen eine Abgrenzung der Asbestminerale gegenüber den übrigen aufgeführten Mineralen anhand verschiedener Elementgehalte bzw. bestimmter Verhältnisse von Elementgehalten ermöglicht. In Tabelle 3 sind für jeden Vergleich als Auswahl die markantesten Kriterien aufgelistet. Überlappen sich die Spannbreiten der Gehalte eines Elements der beiden zu vergleichenden Minerale nur geringfügig (≤ 1,5 %, Ausnahmen: 2 % bei Talk/Tremolit, 3,5 % bei Aktinolith/Tremolit), so wurde im Überlappungsbereich eine neue Abgrenzung festgelegt („Überlappungskriterium“, in Tabelle 3 fett gesetzt, vergl. Tabelle 2). Ist der Überlappungsbereich bei einem Element beider Minerale größer, aber nicht wesentlich, wurde das Kriterium in Tabelle 3 in Klammern gesetzt. Eine Unterscheidung der Minerale anhand dieses Kriteriums ist nur möglich, wenn der Elementgehalt im Asbestmineral außerhalb des genannten Bereichs liegt: Enthält z.B. ein Anthophyllit mehr als 9 % Fe, kann er von Saponit unterschieden werden, bei kleineren Fe-Gehalten ist dies zumeist nicht möglich.

Bei einigen Vergleichen ist eine Abgrenzung des Asbests von anderen Mineralen nur eingeschränkt bzw. nicht möglich (grau unterlegt in Tabelle 3). Damit bleiben auch bei Anwendung des vorgestellten Kriterienkatalogs einige Querempfindlichkeiten bestehen. So lassen sich Anthophyllit, Amosit und Aktinolith nur eingeschränkt von jeweils bestimmten Klinopyroxenen unterscheiden. Die begrenzte

Unterscheidungsmöglichkeit von Anthophyllit und Saponit sowie Krokydolith und Montmorillonit ist hier nicht bedeutend. Neben den in Tabelle 3 genannten Kriterien werden jedoch generell alle Elementgehalte der Probe mit den zulässigen Spannbreiten der Elemente aller Minerale des Kriterienkatalogs verglichen. Dadurch ist auch bei den genannten Querempfindlichkeiten häufig noch eine Zuordnung einer Partikel zu Asbest oder einem sonstigen Mineral anhand wenig markanter Kriterien möglich. Das Prinzip der Identifizierung einer Aktinolith-Partikel anhand der chemischen Zusammensetzung ist vereinfacht in der Abbildung 1 dargestellt.

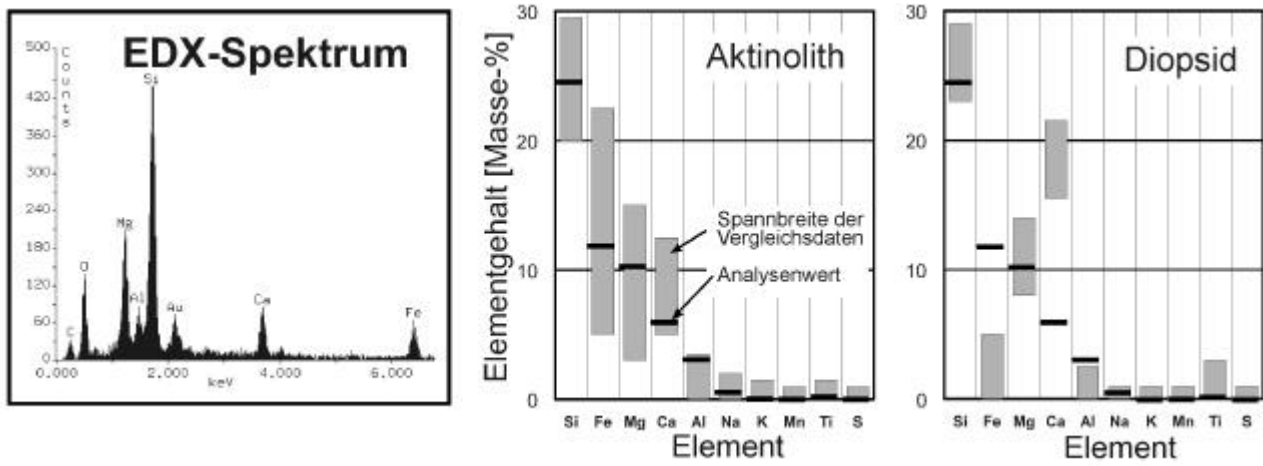


Abbildung 1: EDX-Spektrum eines Partikels aus einem Gesteinsstaub. Anhand der EDX-Analyse und der nachfolgenden ZAF-Korrektur werden die Oxidgehalte der Partikeln ermittelt ("Analysewert" in den Diagrammen). Ein Vergleich mit den Vergleichsdaten (hier nur zwei von insgesamt 50 Mineralen) erlaubt eine Identifizierung der faserförmigen Partikel; in diesem Fall handelt es sich um Aktinolith.

7 Automatische Faseridentifizierung

Um den Arbeitsaufwand der Überprüfung sämtlicher Kriterien bei jeder Faseridentifizierung zu reduzieren, wurde auf Grundlage des Tabellenkalkulationsprogramms EXCEL[®] eine Auswertetabelle erstellt (Tabelle 4, Eingabefelder sind gelb unterlegt, siehe Seite 16). Die Tabelle ist so ausgelegt, dass sowohl Elementgehalte als auch Oxidgehalte eingegeben werden können und eine nachträgliche Normierung auf die Summe von 100 % der Oxidgehalte möglich ist. Damit können zu Vergleichszwecken auch Literaturdaten von Mineralzusammensetzungen herangezogen werden (z.B. bei Hinweisen auf eventuelle Querempfindlichkeiten oder ungewöhnliche chemische Zusammensetzung von Asbesten). Sammlungen von Analysendaten können in einer weiteren Tabelle hinterlegt werden, so dass diese jederzeit direkt verfügbar sind. Eine Übertragung von Analysen aus der Datensammlung in die Identifizierungstabelle wird durch Makros erleichtert. Bei Anpassung der Vergleichsdaten können die Analyseergebnisse auch direkt als Peakhöhen bzw. -intensitäten erfasst werden. Ergänzend können Angaben zur Probe, Geräteparameter sowie die Abmessungen der jeweils untersuchten Partikel eingegeben werden. Die zur Prüfung anhand des Kriterienkatalogs benutzten Elementgehalte (werden bei Eingabe von Oxidgehalten automatisch berechnet) und Verhältnisse bestimmter Elementgehalte, werden im linken unteren Teil der Tabelle angezeigt.

Nach Eingabe der Analysendaten werden sämtliche Kriterien innerhalb von Sekunden automatisch geprüft. Für die vier Asbeste Chrysotil, Anthophyllit, Tremolit und Aktinolith sind die relevanten Kriterien mit Bewertung aufgeführt. Ist ein Kriterium nicht erfüllt, werden als ergänzende Information die Minerale genannt, gegenüber denen beim geprüften Elementgehalt bzw. Elementverhältnis keine Abgrenzung besteht („fehlendes Kriterium“). Im unteren rechten Teil der Tabelle ist ein Vergleich der eingegebenen Analysenergebnisse mit den übrigen Mineralen dokumentiert. Die Zahl hinter dem jeweiligen Mineral ist die Anzahl der Elementgehalte, die nicht mit den Analysenwerten übereinstimmen.

Sollte die Kriterienprüfung die untersuchte Partikel weder als Asbestmineral noch als eines der übrigen Minerale identifizieren, kann die Spannbreite der Elementgehalte variabel vergrößert werden. In einem Eingabefeld kann in % relativ die untere und obere Begrenzung der Elementgehalte verkleinert bzw. vergrößert werden („zusätzliche Toleranz“, z.B. Fe-Gehalt: 15-25 %, bei zusätzlicher Toleranz von 20 % beträgt die Spannbreite 12-30 %). Es besteht außerdem die Option, die zusätzliche Toleranz der Elementgehalte (maximal 99 %) aller Minerale automatisch bis zu dem Wert zu vergrößern, bei dem eines der Minerale eine Übereinstimmung mit den Analysendaten ergibt („Treffertoleranz“). Da eine vergrößerte Spannbreite der zulässigen Elementgehalte auch die Trefferwahrscheinlichkeit für eines der sechs Asbestminerale vergrößert, sind diese, unter Berücksichtigung der vergrößerten Spannbreite, zum Kontrollvergleich mit aufgeführt.

Als Resultat der automatischen Kriterienprüfung wird die identifizierte Faserart angegeben, bei bekannten Faserabmessungen wird außerdem das Volumen und die Masse der Faser berechnet (Werte der Dichte der Minerale sind in der Tabelle hinterlegt).

Folgende Konventionen wurden für die automatische Auswertung aufgestellt:

- Zusätzliche Toleranz 0-10 %: Wird durch die automatische Auswertung kein Asbestmineral, sondern ein anderes Mineral vorgeschlagen, ist zu prüfen, ob bei einer zusätzlichen Toleranz von 10 % auch ein Asbestmineral identifiziert wird. Ist dies der Fall, wird die Partikel als Asbest bewertet.
- Zusätzliche Toleranz 11-20 %: Eine Partikel ist nur dann als eines der Asbestminerale einzustufen, wenn die notwendige zusätzliche Toleranz den Wert von 20 % relativ nicht übersteigt und nicht bereits bei einer kleineren Toleranzvergrößerung ein anderes Mineral identifiziert wurde.
- Ist die Identifizierung einer Partikel als Asbestmineral bereits aufgrund bestimmter Elementverhältnisse (z.B. Si/Mg) auszuschließen, ändert auch eine Toleranzvergrößerung dieses Ausschlusskriterium nicht. Die für Amosit und Krokydolith zu prüfenden Elementverhältnisse sind nicht in der Tabelle aufgeführt, werden aber automatisch geprüft (Amosit: $\text{Si/Mg} > 1,5$, $\text{Si/Fe} < 2$, $\text{Si/Al} > 5$; Krokydolith: $\text{Si/Mg} > 2$, $\text{Si/Fe} < 3$, $\text{Si/Al} > 6$).
- Die für Einzelfälle festgelegten Überlappungskriterien (s. Abschnitt 6) werden nicht automatisch geprüft. Anhand der normierten Analysenwerte (linker unterer Teil der Tabelle 4) kann in Einzelfällen kontrolliert werden, als welches der beiden Minerale die zu untersuchende Partikel identifiziert wird.
- Gibt es im Zusammenhang mit der untersuchten Probe Hinweise auf besondere Asbestvarietäten, z.B. Chrysotil mit besonders großem Gehalt an Al oder Na etc., ist das entsprechende begrenzende Kriterium auszusetzen bzw. die für das Asbestmineral zulässige Spannbreite des Elementgehalts entsprechend zu erweitern. Im Einzelfall können dadurch bestimmte Unterscheidungskriterien nicht

herangezogen werden. Dies hat vor allem dann Bedeutung, wenn es für zwei Minerale nur ein markantes Unterscheidungskriterium gibt. So ist z.B. ein Fe-reicher Talk von Anthophyllit nicht zu unterscheiden und ein Fe-ärmerer Anthophyllit kann nicht von Talk abgegrenzt werden.

- Die Feststellung, dass die untersuchte Partikel keines der sechs Asbestminerale ist, hat auch dann Bestand, wenn keines der anderen möglichen Minerale identifiziert wurde.

Die im Kriterienkatalog aufgelisteten Minerale zum Vergleich mit den Asbestmineralen sind eine allgemeine Zusammenstellung. Bei Bedarf können weitere bzw. andere Minerale nach der oben beschriebenen Weise erfasst und in den Kriterienkatalog und die Auswertetabelle aufgenommen werden. Die jetzige Fassung der Auswertetabelle bietet Platz für 44 Minerale.

8 Apparative Voraussetzungen, Messbedingungen

Das EDX-Analysesystem sollte möglichst mit einem Leichtelement-Detektor (mit ultradünmem Fenster oder fensterlos) ausgestattet sein. Der Einsatz dieser Detektoren erlaubt gegenüber anderen Detektoren eine bessere Auflösung, ein besseres Signal-Untergrund-Verhältnis und eine größere Intensitätsausbeute bei leichten Elementen (Na - Si). Diese Aspekte sind vor allem für die quantitative Auswertung der EDX-Spektren von Bedeutung. Zur Vorgehensweise bei der Analyse sei auf die modifizierte Version des rasterelektronenmikroskopischen Verfahrens BGI 505-46 verwiesen [3]. Für die Berechnung der Oxidgehalte hat sich in bisherigen Tests eine standardlose ZAF-Korrektur bewährt. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der aufgeführten Identifizierungskriterien wurden Untersuchungen an Partikeln von 25 bekannten Mineralproben durchgeführt.

9 Anwendungsbereich des Kriterienkatalogs

Entwickelt wurde der Kriterienkatalog, weil Probleme bei der Identifizierung der Art faserförmiger Partikeln in Gesteinsstäuben bestanden. Als Ergänzung des in [3] beschriebenen REM-EDX-Verfahrens wird das in dieser Arbeit erläuterte Identifizierungsprinzip inzwischen im Rahmen der Ermittlungen nach TRGS 954 [2] eingesetzt (Abbildung 2). Wird ein potenziell asbesthaltiges Gestein abgebaut (z.B. Diabas oder Gabbro), ist entweder durch Bestimmung des Massenanteils freier Asbestfasern oder aber durch Bestimmung der emissionsbezogenen Faserkonzentration zu klären, ob das Gestein gemäß den Konventionen der TRGS 954 als asbesthaltig zu bewerten ist. Ist dies der Fall, müssen eine Ausnahmegenehmigung vom Expositionsverbot des § 15a der GefStoffV beantragt und geeignete organisatorische, persönliche und technische Schutzmaßnahmen aus den Vorgaben der TRGS 954 angewendet werden.

Neben dieser Anwendung ist das in [3] beschriebene Messverfahren mit den ergänzenden Kriterien zur Faseridentifizierung auch geeignet, in Verkehr gebrachte mineralische Rohstoffe (z.B. Talkumpulver) auf den Massenanteil freier Asbestfasern zu überprüfen. Nach Anh. IV Nr. 1 der GefStoffV ist die Gewinnung, Aufbereitung und Weiterverarbeitung von natürlich vorkommenden mineralischen Rohstoffen nur dann zulässig, wenn deren Massengehalt freier Asbestfasern 0,1 % nicht überschreitet.

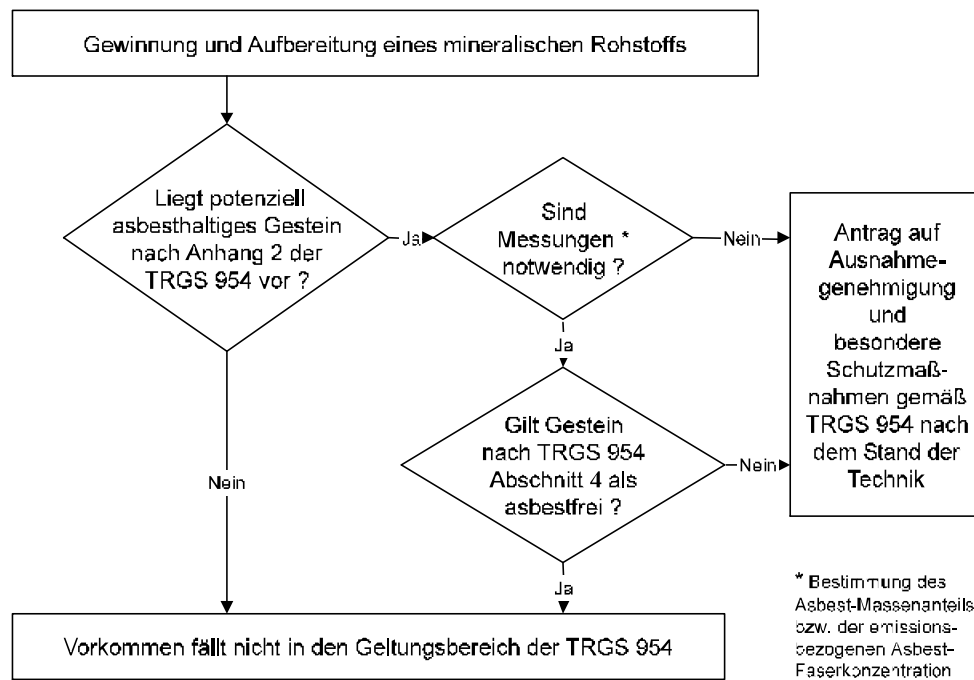


Abbildung 2: Prinzip der Ermittlungen nach TRGS 954 (Erläuterungen im Text)

Die ergänzenden Identifizierungskriterien sind auf die Bestimmung der Art lungengängiger Fasern in Stäuben, Pulvern bzw. Pudern mineralischer Rohstoffe (z.B. Gesteinsaufbereitung, Talkum) ausgerichtet. Die Anwendung des Kriterienkatalogs zur Faseridentifizierung an Stäuben, die beim Einsatz (potenziell) asbesthaltiger technischer Produkte entstehen, kann dagegen Probleme bereiten. Asbestfasern in technischen Produkten sind häufig kontaminiert, typisch ist z.B. ein deutlicher Ca-Peak im EDX-Spektrum von Chrysotilfasern aus Asbestzementen.

Es ist denkbar, das Prinzip der Faseridentifizierung auch auf andere Bereiche zu übertragen. Z. B. könnte, anstatt der Minerale, die chemische Zusammensetzung bestimmter künstlicher Mineralfasern in der Vergleichsdatei dokumentiert werden. Die Auswertung von Proben mittels REM-EDX könnte dann eine Zuordnung von Fasern zu bestimmten Produkten erleichtern. Die Sulfatkomponente ist für die Identifizierung von Fasern in Gesteinsstäuben relativ unbedeutend, ist jedoch für den Fall einer Anwendung des Identifizierungsprinzips auf technische Produkte bereits in die Kriterienliste mit aufgenommen worden.

10 Diskussion

Ein generelles Problem bei der Abgrenzung der Asbeste gegen andere Mineralphasen anhand der chemischen Zusammensetzung ist die Festlegung bestimmter Maximalgehalte von Elementen. In den hier dokumentierten Kriterien wurde z.B. für das Element Al der maximale Gehalt in Asbesten auf 3,5 % festgelegt (normierter Wert nach Abschnitt 5). Daraus können sich im Einzelfall Probleme ergeben. In [12] ist z.B. ein Anthophyllit beschrieben, der 8 % Al_2O_3 enthält (normiert nach Abschnitt 5: 4,3 % Al). Liegen keine Vorkenntnisse zu diesem Vorkommen vor, die bei der Auswertung Berücksichtigung finden können, würde dieser Anthophyllit nicht als solcher erkannt. Sollten jedoch alle Varietäten der Asbestminerale berücksichtigt werden, wäre eine Unterscheidung der Asbeste von den zum Vergleich herangezogenen Mineralen zumeist nicht mehr möglich. Die Spannbreiten der Elementgehalte verschiedener Minerale würden sich deutlich überlappen. Deshalb wurde auf die beschriebenen Konventionen zurückgegriffen, mit der Option, im *begründeten* Einzelfall Identifizierungskriterien zu modifizieren.

Um eine einheitliche Identifizierung von Asbestfasern und deren Abgrenzung gegenüber anderen faserförmigen Mineralpartikeln zu gewährleisten, sollte als Beurteilungsgrundlage eine definierte Datenbasis verwendet werden. Der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Datensatz zur chemischen Zusammensetzung von Mineralen und die daraus abgeleiteten Identifizierungskriterien sollen als Vorschlag für eine einheitliche Datenbasis verstanden werden. Der Kriterienkatalog kann systematisch erweitert werden. Erfolgen Erweiterungen oder Modifizierungen der Vergleichsdaten auf der bestehenden Grundlage sind diese auch für andere Analytiker nachvollziehbar und gegebenenfalls auch anwendbar.

Neben den Tests im eigenen Labor wurden die gleichen Testpräparate auch in zwei weiteren Labors mit unterschiedlicher Geräteausstattung analysiert und ausgewertet. Auch hier konnte der Kriterienkatalog zur Faseridentifizierung mit gutem Resultat eingesetzt werden. Vor dem Routineeinsatz des Kriterienkatalogs sollten im jeweiligen Labor jedoch ebenfalls Tests mit Asbest-Standards und anderen bekannten Mineralpräparaten durchgeführt werden.

Anerkennung

Für die Unterstützung bei der Erarbeitung der Identifizierungskriterien sowie der Analyse von Testpräparaten mittels REM-EDX zur Verifizierung des Kriterienkatalogs danke ich Frau Dr. Binde, Frau Plitzko, Frau Bergmann und Herrn Dr. Riediger.

Literatur

1. HVBG, BGZ: Verfahren zur getrennten Bestimmung von lungengängigen und anderen anorganischen Fasern - Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren. Von den Berufsgenossenschaften anerkannte Analysenverfahren zur Feststellung der Konzentration krebserzeugender Arbeitsstoffe in der Luft am Arbeitsplatz, BGI 505-46, Carl Heymanns Verlag KG, Köln, 1991.
2. Technische Regel für Gefahrstoffe „Empfehlungen zur Erteilung von Ausnahmegenehmigungen von § 15a Abs. 1 GefStoffV für den Umgang mit asbesthaltigen mineralischen Rohstoffen und Erzeugnissen in Steinbrüchen“ (TRGS 954), B ArbBl (1997) Nr. 12.

3. Verfahren zur analytischen Bestimmung geringer Massengehalte von Asbestfasern in Pulvern, Pudern und Stäuben mit REM/EDX (Kennzahl 7487). In: BIA-Arbeitsmappe - Messung von Gefahrstoffen, Loseblatt-Ausgabe, 18. Lfg. IV/97, Erich Schmidt Verlag, Bielefeld.
4. Tröger, W.E.: Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale, Teil 1 Bestimmungstabellen. 4. Auflage, E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1971.
5. Campbell, W.J., R.L. Blake, L.L. Brown, E.E. Cather, J.J. Sjöberg: Selected Silicate Minerals and Their Asbestiform Varieties, Mineralogical Definitions and Identification-Characterisation. Information Circular 8751, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1977.
6. Richtlinie des Rates vom 19. September 1983 über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Asbest am Arbeitsplatz. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 263/25 (83/477/EWG) mit Änderungen der Richtlinie vom 25. Juni 1991 in: Nr. L 206/16 (91/382/EWG), 1983/1991.
7. Manke, J.: Faseranalytik im menschlichen Lungengewebe mittels der analytischen Rastertransmissions-Elektronenspektroskopie. Dissertation, Gießen, 1989.
8. Woitowitz, H.J., G. Hillerdal, A. Calavresoz, K.H. Berghäuser, K. Rödelberger, K.-H. Jöckel: Risiko- und Einflußfaktoren des diffusen malignen Mesothelioms (DMM). Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, FB 698, Bonn, 1993.
9. Rösler, H.J.: Lehrbuch der Mineralogie. 5. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1991.
10. Tröger, W.E.: Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale, Teil 2 Textband. 2. Auflage, E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1969.
11. Ramdohr, P., Strunz, H. (Hrsg.): Klockmann's Lehrbuch der Mineralogie. - 15. umgearbeitete Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1967
12. Deer, W.A., R.A. Howie, J. Zussmann: Rock-Forming Minerals, Vol. 2 Chain Silicates. 7. Auflage, Longman, Großbritannien, 1974.

Bemerkung: Die Auswertetabelle auf Grundlage des Tabellenkalkulationsprogramms EXCEL[®] 5.0 (oder höhere Versionen) unter WINDOWS^ä ist frei verfügbar. Sie kann direkt im Internet-Service des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitssicherheit - BIA (Stichwort "Hilfen zur Faseridentifizierung (Asbest)") unter <http://www.hvbg.de/d/bia/fac/fac.htm> oder unter Zusendung einer formatierten Leerdiskette sowie eines adressierten und frankierten Rückumschlags angefordert werden. Auf demselben Wege werden auch ergänzende Angaben zur Zusammenstellung der Vergleichsdaten sowie weitere Tabellen zur Zusammensetzung (Elemente/Oxide) technisch eingesetzter Asbeste und aller aufgeführten Minerale zur Verfügung gestellt.

Dr. rer. nat. Markus Mattenklott

Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit - BIA, Sankt Augustin

Stand: 17.07.2000

Tabelle 1: Wichtige Minerale potenziell asbesthaltiger Gesteine, einschließlich der Asbestminerale); Strukturformeln, teilweise vereinfacht (nach [9 bis 11]); Erläuterungen zu den Mineralgruppen im Text.

Mineral	Strukturformel
Chrysotil	$Mg_3[(OH)_4Si_2O_5]$
Anthophyllit	$Mg_7[(OH)_2Si_8O_{22}]$
Anthophyllit (Fe)	$Mg_{4,9}Fe_{2,1}[(OH)_2Si_8O_{22}]$
Amosit	$Mg_{3,2}Fe_{3,8}[(OH)_2Si_8O_{22}]$
Amosit (Fe)	$Mg_{1,7}Fe_{5,3}[(OH)_2Si_8O_{22}]$
Tremolit	$Ca_2Mg_5[(OH)_2Si_8O_{22}]$
Aktinolith	$Ca_2Mg_{3,46}Fe_{1,54}[(OH)_2Si_8O_{22}]$
Ferroaktinolith	$Ca_2Fe_5[(OH)_2Si_8O_{22}]$
Krokydolith (Mg)	$Na_2Mg_{1,1}Fe^{2+}_{1,9}Fe^{3+}_2[(OH)_2Si_8O_{22}]$
Krokydolith	$Na_2Fe^{2+}_3Fe^{3+}_2[(OH)_2Si_8O_{22}]$
Olivin	$Mg_{1,8}Fe_{0,2}[SiO_4]$
Olivin (Fe)	$Mg_{1,4}Fe_{0,6}[SiO_4]$
Diopsid	$CaMg[Si_2O_6]$
Diop. Augit	1 Teil Diopsid + 1 Teil Augit
Diop. Augit (Al)	1 Teil Diopsid + 1 Teil Augit (Al)
Ägirinaugit	$NaFe[Si_2O_6] + Ca_{0,74}Mg_{0,74}Fe_{0,37}Al_{0,15}[Al_{0,15}Si_{1,85}O_6]$
Augit	$Ca_{0,764}Mg_{0,764}Fe_{0,382}Al_{0,09}[Al_{0,09}Si_{1,91}O_6]$
Augit (Al)	$Ca_{0,72}Mg_{0,72}Fe_{0,36}Al_{0,2}[Al_{0,2}Si_{1,8}O_6]$
Pigeonitaugit	$Ca_{0,555}Mg_{0,8325}Fe_{0,4625}Al_{0,15}[Al_{0,15}Si_{1,85}O_6]$
Pigeonitaugit (Fe)	$Ca_{0,555}Mg_{0,37}Fe_{0,925}Al_{0,15}[Al_{0,15}Si_{1,85}O_6]$
Pigeonit	$Ca_{0,185}Mg_{1,11}Fe_{0,555}Al_{0,15}[Al_{0,15}Si_{1,85}O_6]$
Pigeonit (Fe)	$Ca_{0,185}Mg_{0,74}Fe_{0,925}Al_{0,15}[Al_{0,15}Si_{1,85}O_6]$
Enstatit	$Mg_2[Si_2O_6]$
Bronzit	$Mg_{1,6}Fe_{0,4}[Si_2O_6]$
Hypersthen	$Mg_{1,2}Fe_{0,8}[Si_2O_6]$
Fe-Hypersthen	$Mg_{0,8}Fe_{1,2}[Si_2O_6]$
Pargasit	$Ca_2NaMg_3Fe^{2+}Al[(OH)_2Al_2Si_6O_{22}]$
Hastingsit	$Ca_2NaMg_{2,8}Fe^{2+}_{1,2}Fe^{3+}[(OH)_2Al_2Si_6O_{22}]$
Basalt. Hornbl.	$Ca_2NaMg_{3,5}Fe^{2+}_{0,5}Fe^{3+}_{0,6}Ti_{0,4}[(OH)_2Al_2Si_6O_{22}]$
Kaersutit	$Ca_2Na_1Mg_{2,8}Fe^{2+}_{1,2}Ti[(OH)_2Al_2Si_6O_{22}]$
Tschemmakit	$Ca_2Mg_{2,1}Fe^{2+}_{0,9}Fe^{3+}_{0,5}Al_{1,5}[(OH)_2Al_2Si_6O_{22}]$
Tschemmakit (Fe)	$Ca_2Mg_{1,5}Fe^{2+}_{1,5}Fe^{3+}_{0,5}Al_{1,5}[(OH)_2Al_2Si_6O_{22}]$
Pennin	$Mg_{4,05}Fe_{0,5}Al_{1,2}[(OH)_8Al_{0,7}Si_{3,3}O_{10}]$
Klinochlor	$Mg_{4,225}Fe_{0,5}Al_{1,2}[(OH)_8Al_{1,05}Si_{2,95}O_{10}]$
Grochaut	$Mg_{4,4}Fe_{0,5}Al_{1,2}[(OH)_8Al_{1,4}Si_{2,6}O_{10}]$
Diabantit	$Mg_{2,3}Fe_{2,1}Al_{1,3}[(OH)_8Al_{0,7}Si_{3,3}O_{10}]$
Pyknochlorit	$Mg_{2,525}Fe_{2,05}Al_{1,3}[(OH)_8Al_{1,05}Si_{2,95}O_{10}]$
Rhipidolith	$Mg_{2,775}Fe_2Al_{1,3}[(OH)_8Al_{1,45}Si_{2,55}O_{10}]$
Brunsvigit	$Mg_{0,45}Fe_3Al_{1,7}[(OH)_8AlSi_3O_{10}]$
Afrosiderit	$Mg_{0,85}Fe_{2,6}Al_{1,7}[(OH)_8Al_{1,4}Si_{2,6}O_{10}]$
Talk	$Mg_3[(OH)_2Si_4O_{11}]$
Muskovit	$KAl_2[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$
Phlogopit	$KMg_3[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$
Biotit	$KMg_{2,4}Fe_{0,6}[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$
Biotit (Fe)	$KMg_{1,5}Fe_{1,5}[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$
Vermiculit	$Mg_{2,36}Fe^{3+}_{0,48}Al_{0,16}[(OH)_2Al_{1,28}Si_{2,72}O_{10}] \cdot Mg_{0,32} \cdot (H_2O)_4$
Nontronit	$Fe^{3+}_2[(OH)_2Al_{0,33}Si_{3,67}O_{10}] \cdot Na_{0,33} \cdot (H_2O)_4$
Montmorillonit	$Al_{1,67}Mg_{0,33}[(OH)_2Si_4O_{10}] \cdot Na_{0,33} \cdot (H_2O)_4$
Saponit	$Mg_{2,6}Fe_{0,4}[(OH)_2Al_{0,33}Si_{3,67}O_{10}] \cdot Ca_{0,0825}Na_{0,165} \cdot (H_2O)_4$
Sepiolith	$Mg_4[(OH)_2Si_6O_{15}] \cdot 2H_2O + 4H_2O$
Epidot	$Ca_2Al_2,5Fe^{3+}_{0,5}[O OH SiO_4 Si_2O_7]$
Zoisit	$Ca_2Al_3[O OH SiO_4 Si_2O_7]$
Prehnit	$Ca_2Al[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$
Pumpellyit	$Ca_2Mg_{0,5}Fe_{0,5}Al_{2,5}[(OH)_2SiO_4 Si_2O_7]$

Tabelle 2: Variationsbreite der chemischen Zusammensetzung von Mineralen potenziell asbesthaltiger Gesteine, einschließlich der Asbestminerale, als Grundlage für die Identifizierung von Mineralpartikeln mittels EDX-Analyse (Erläuterungen in Abschnitt 4 und 5); Fe^{3+} wurde als Fe^{2+} berechnet, die Werte wurden normiert auf 100 % der Oxide der angegebenen Elemente (ohne H_2O !); als maximaler S-Gehalt wird für alle Minerale 1 % angenommen.

Mineral	Massenanteile in %								
	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Ti
Chrysotil	0 - 1,5	24,0 - 33,5	0 - 3,5	17,0 - 26,5	0 - 1,0	0 - 3,5	0 - 1,0	0 - 6,0	0 - 1,5
Anthophyllit	0 - 1,5	10,0 - 25,0	0 - 3,5	23,0 - 32,0	0 - 1,5	0 - 3,5	0 - 1,5	0 - 17,0	0 - 1,5
Amosit	0 - 1,5	2,0 - 12,5	0 - 3,5	20,0 - 28,5	0 - 1,0	0 - 3,5	0 - 1,5	15,0 - 38,0	0 - 1,5
Tremolit	0 - 2,0	11,5 - 19,0	0 - 3,5	23,0 - 31,5	0 - 1,5	5,0 - 13,0	0 - 1,0	0 - 6,0	0 - 1,5
Aktinolith	0 - 2,0	3,0 - 15,0	0 - 3,5	20,0 - 29,5	0 - 1,5	5,0 - 12,5	0 - 1,0	5,0 - 22,5	0 - 1,5
Krokydolith	2,5 - 8,0	0 - 11,0	0 - 3,5	22,0 - 28,0	0 - 1,0	0 - 3,5	0 - 1,0	10,0 - 33,0	0 - 1,5
Olivin	0 - 1,0	24,0 - 33,0	0 - 1,0	16,0 - 22,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,0	4,5 - 15,0	0 - 1,0
Olivin (Fe)	0 - 1,0	18,0 - 26,0	0 - 1,0	14,5 - 20,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,0	15,0 - 24,0	0 - 1,0
Diopsid	0 - 1,0	8,0 - 14,0	0 - 2,5	23,0 - 29,0	0 - 1,0	15,5 - 21,5	0 - 1,0	0 - 5,0	0 - 3,0
Diop. Augit	0 - 1,0	6,5 - 12,5	0,5 - 3,0	22,0 - 28,0	0 - 1,0	13,0 - 19,0	0 - 1,0	2,5 - 6,5	0 - 3,0
Diop. Augit (Al)	0 - 1,0	6,5 - 12,5	1,5 - 5,0	21,0 - 27,0	0 - 1,0	13,0 - 18,5	0 - 1,0	2,5 - 6,5	0 - 3,0
Ägirinaugit	2,5 - 8,0	2,0 - 6,5	1,0 - 4,0	21,0 - 27,0	0 - 1,0	3,5 - 9,5	0 - 1,0	14,0 - 20,0	0 - 3,0
Augit	0 - 1,0	5,5 - 11,5	1,0 - 4,0	20,5 - 26,5	0 - 1,0	10,5 - 16,5	0 - 1,0	6,5 - 12,5	0 - 3,0
Augit (Al)	0 - 1,0	4,5 - 10,5	2,5 - 7,0	19,5 - 25,5	0 - 1,0	10,0 - 16,0	0 - 1,0	6,0 - 12,0	0 - 3,0
Pigeonitaugit	0 - 1,0	6,0 - 11,5	2,0 - 5,5	20,0 - 26,0	0 - 1,0	7,0 - 13,0	0 - 1,0	8,5 - 14,5	0 - 3,0
Pigeonitaugit (Fe)	0 - 1,0	2,0 - 6,5	2,5 - 6,0	18,5 - 24,5	0 - 1,0	6,5 - 12,5	0 - 1,0	18,5 - 24,5	0 - 3,0
Pigeonit	0 - 1,0	9,0 - 15,0	2,5 - 6,0	20,5 - 26,5	0 - 1,0	2,0 - 5,5	0 - 1,0	11,0 - 17,0	0 - 3,0
Pigeonit (Fe)	0 - 1,0	4,5 - 10,5	2,5 - 6,0	19,5 - 25,5	0 - 1,0	2,0 - 5,5	0 - 1,0	19,0 - 25,0	0 - 3,0
Enstatit	0 - 1,0	21,0 - 27,0	0 - 3,0	25,0 - 31,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 6,5	0 - 1,0
Bronzit	0 - 1,0	15,0 - 21,5	0 - 3,0	23,5 - 29,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,0	6,0 - 16,0	0 - 1,0
Hypersthen	0 - 1,0	10,0 - 16,0	0 - 3,0	22,0 - 28,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,0	16,0 - 24,5	0 - 1,0
Fe-Hypersthen	0 - 1,0	5,0 - 11,0	0 - 3,0	20,5 - 26,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,0	24,0 - 31,5	0 - 1,0
Pargasit	1,5 - 6,5	5,5 - 11,5	6,5 - 12,5	17,0 - 23,0	0 - 2,0	6,5 - 12,5	0 - 1,0	3,5 - 9,5	0 - 2,0
Hastingsit	1,5 - 6,5	5,0 - 11,0	3,5 - 9,0	16,0 - 22,0	0 - 2,0	6,0 - 12,0	0 - 1,0	11,0 - 17,0	0 - 3,5
Basalt. Hornbl.	1,5 - 5,0	7,0 - 13,0	3,5 - 9,5	17,0 - 23,0	0 - 2,0	6,5 - 12,5	0 - 1,0	4,0 - 10,0	0 - 4,5
Kaersutit	1,5 - 5,0	5,0 - 11,0	3,5 - 9,0	16,0 - 22,0	0 - 2,0	6,0 - 12,0	0 - 1,0	4,5 - 10,5	2,5 - 8,0
Tschermakit	0 - 2,0	3,0 - 9,0	8,5 - 14,5	17,0 - 23,0	0 - 2,0	6,5 - 12,5	0 - 1,0	6,5 - 12,5	0 - 3,0
Tschermakit (Fe)	0 - 2,0	2,5 - 7,0	8,0 - 14,0	17,0 - 23,0	0 - 2,0	6,5 - 12,5	0 - 1,0	10,0 - 16,0	0 - 3,0
Pennin	0 - 1,0	15,5 - 24,5	7 - 13,5	16,0 - 22,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,5	0 - 13,0	0 - 1,0
Klinochlor	0 - 1,0	15,5 - 25,5	9,5 - 15,0	13,5 - 19,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,5	0 - 13,0	0 - 1,0
Grochaut	0 - 1,0	16,0 - 26,5	11,0 - 17,0	11,5 - 17,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,5	0 - 13,0	0 - 1,0
Diabantit	0 - 1,0	4,0 - 18,5	6,5 - 13,5	14,0 - 20,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,5	8,5 - 32,0	0 - 1,0
Pyknochlorit	0 - 1,0	4,0 - 19,0	8,5 - 15,5	12,0 - 18,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,5	8,5 - 32,0	0 - 1,0
Rhipidolith	0 - 1,0	5,0 - 20,0	9,0 - 18,0	10,0 - 16,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,5	8,5 - 32,0	0 - 1,0
Brunsvigit	0 - 1,0	0 - 6,5	8,5 - 15,5	11,5 - 17,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,5	25,5 - 40,0	0 - 1,0
Afrosiderit	0 - 1,0	0 - 8,0	10 - 18,5	9,5 - 15,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,5	24,0 - 39,0	0 - 1,0
Talk	0 - 1,0	17,0 - 23,0	0 - 2,0	28,0 - 34,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 3,0	0 - 1,0
Muskovit	0 - 3,5	0 - 1,0	17 - 24,5	19,0 - 27,0	6,0 - 13,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 3,0	0 - 1,0
Phlogopit	0 - 2,5	15,0 - 21,5	4,0 - 10,0	18,0 - 24,0	6,0 - 13,0	0 - 1,5	0 - 5,0	0 - 6,0	0 - 3,0
Biotit	0 - 2,5	11,0 - 16,0	4,0 - 9,5	17,0 - 23,0	5,5 - 12,5	0 - 1,5	0 - 3,0	5,0 - 13,5	0 - 6,0
Biotit (Fe)	0 - 2,5	5,0 - 11,5	3,5 - 9,0	16,0 - 22,0	5,5 - 12,0	0 - 1,5	0 - 3,0	13,5 - 22,0	0 - 6,0
Vermiculit	0 - 1,0	13,0 - 20,0	7,0 - 13,0	17,0 - 23,0	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,0	4,0 - 12,0	0 - 1,0
Nontronit	1,0 - 4,0	0 - 3,0	1,0 - 8,0	23,5 - 29,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 1,0	20,0 - 31,5	0 - 1,0
Montmorillonit	1,0 - 4	1 - 4,5	8,0 - 16	29,0 - 35,0	0 - 2,0	0 - 4,0	0 - 1,0	0 - 12,0	0 - 1,0
Saponit	0,5 - 2,0	13,5 - 19,5	1,0 - 4,0	24,0 - 30,0	0 - 1,0	0,5 - 2,0	0 - 1,0	3,0 - 9,0	0 - 1,0
Sepiolith	0 - 1,5	15,5 - 21,5	0 - 3,5	29,5 - 35,5	0 - 1,0	0 - 3,5	0 - 1,0	0 - 6,0	0 - 1,5
Epidot	0 - 1,0	0 - 3,0	12,0 - 18,0	15,5 - 21,5	0 - 1,0	14,5 - 20,5	0 - 3,0	3,0 - 9,0	0 - 1,0
Zoisit	0 - 1,0	0 - 3,0	15,0 - 21,0	16,0 - 22,0	0 - 1,0	15,0 - 21,0	0 - 3,0	0 - 3,0	0 - 1,0
Prehnit	0 - 1,0	0 - 3,0	10 - 16,5	18,5 - 24,5	0 - 1,0	17,0 - 23,5	0 - 1,0	0 - 5,5	0 - 1,0
Pumpellyit	0 - 1,0	1,5 - 5,0	9,0 - 15,0	15,5 - 21,5	0 - 1,0	15,0 - 21,0	0 - 1,0	3,0 - 9,0	0 - 1,0

Tabelle 3. Auswahl der markantesten Kriterien zur Abgrenzung der Asbestminerale von anderen Mineralen potenziell asbesthaltiger Gesteine, anhand der mittels REM-EDX-Analyse ermittelten chemischen Zusammensetzung von Partikeln. Die Angaben beziehen sich auf Werte aus den Tabellen 3 und 4. Angaben als relative Zahlen (z.B. Verhältnis der Massenanteile von Si und Mg: Si/Mg<1) bzw. als Elementgehalt in Masse-% (z.B. Ca-Anteil: Ca<5); Fett gesetzt: Im Einzelfall geändertes Abgrenzungskriterium; Grau unterlegt bzw. in Klammern: Unterscheidung anhand genannter Kriterien nicht immer möglich^b. Weitere Erläuterungen im Text.

Mineral	Abgrenzungskriterium des Minerals gegenüber dem Asbestmineral					
	Chrysotil	Anthophyllit	Amosit	Tremolit	Aktinolith	Krokydolith
Anthophyllit	Si/Mg>1	-				
Amosit	Si/Mg>1, Fe>10	Mg<11, Fe>16	-			
Tremolit	Si/Mg>1, Ca>5	Ca>5 (Fe<5)	Ca>5, Fe<5, Mg>12	-		
Aktinolith	Si/Mg>1, Ca>5	Ca>5 (Mg<15)	Ca>5 (Fe<22,5)	Mg<13, Fe>5,5	-	
Krokydolith	Si/Mg>1, Mg<11, Na>2,5	Mg<10,5, Na>2,5	Na>2,5	Mg<11, Ca<3,5, Na>2,5	Ca<3,5, Na>2,5	-
Olivin	Si/Fe<4 ^{a)}	Si/Mg<1	Si/Mg<1	Si/Mg<1, Ca<1	Si/Mg<1, Ca<1	Si/Mg<1, Na<1
Diopsid	Si/Mg>1, Ca>15,5	Ca>15,5 (Mg<14, Fe<5)	Ca>15,5, Fe<5	Si/Ca<2,4 (Mg<14)	Si/Ca<2,4, Fe<5, Ca>15,5	Na<1, Fe<5
Diop. Augit	Si/Mg>1, Ca>13	Ca>13 (Mg<12,5, Fe<6,5)	Ca>13, Fe<6,5	Si/Ca<2,4 (Mg<12,5)	Si/Ca<2,4, Ca>13	Na<1, Fe<6,5
Ägirinaugit	Si/Mg>1, Fe>14	Ca>3,5 Na>2,5 (Fe>14)	Ca>3,5, Na>2,5	Na>2,5, Mg<6,5	Na>2,5 (Mg<6,5)	Ca>3,5
Augit	Si/Mg>1, Fe>6,5	Ca>10,5 (Mg<11,5)	Ca>10,5, Fe<12,5	Si/Ca<2,4, Mg<11,5	Si/Ca<2,4 (Fe<12,5)	Na<1, Ca>10,5
Augit (Al)	Si/Mg>1, Fe>6	Ca>10, Mg<10	Ca>10, Fe<12 (Al>3,5)	Si/Ca<2,4, Mg<10,5	Si/Ca<2,4 (Fe<12)	Na<1, Ca>10
Pigeonitaugit	Si/Mg>1, Fe>8,5	Ca>7, Mg<10,5 (Fe>8,5)	Ca>7, Fe<14,5 (Al>3,5)	Mg<11,5, Fe>8,5	(Al>3,5, Fe<14,5)	Na<1, Ca>7
Pigeonitaugit (Fe)	Si/Mg>1, Fe>18,5	Ca>6,5, Mg<6,5, Fe>18,5	Ca>6,5 (Al>3,5)	Mg<6,5, Fe>18,5	(Al>3,5, Mg<6,5, Fe>18,5)	Na<1, Ca>6,5
Pigeonit	Si/Mg>1, Fe>11	(Ca>3,5, Mg<15, Fe>11)	Fe<16 (Mg>9, Al>3,5)	Ca<5, Fe>11	Ca<5 (Al>3,5)	Na<1 (Fe<17)
Pigeonit (Fe)	Si/Mg>1, Fe>19	Mg<10, Fe>19 (Ca>3,5)	(Fe<25, Al>3,5)	Ca<5, Fe>19, Mg<10,5	Ca<5 (Al>3,5, Fe>19)	Na<1
Enstatit	Si/Mg>1	(Mg>21, Fe<6,5)	Mg>21, Fe<6,5	Ca<1, Mg>21	Ca<1, Mg>21	Na<1, Mg>21, Fe<6,5
Bronzit	Si/Mg>1, Fe>6	(Fe>6)	Mg>15, Fe<15,5	Ca<1, Fe>6	Ca<1, Mg>15	Na<1, Mg>15
Hypersthen	Si/Mg>1, Fe>16	Fe>16,5 (Mg<16)	Si/Mg<2,4 (Mg>10)	Ca<1, Fe>16	Ca<1 (Mg>10, Fe>16)	Na<1, Mg>10,5
Fe-Hypersthen	Si/Mg>1, Fe>24	Fe>24, Mg<10,5	(Fe>24)	Ca<1, Mg<11, Fe>24	Ca<1, Fe>24	Na<1 (Fe>24)
Hornblenden	Si/Mg>1, Al>3,5	Al>3,5	Al>3,5	Al>3,5	Al>3,5	Al>3,5
Chlorite	Si/Fe<4 ^{a)} , Al>5	Al>5	Al>5	Al>5	Al>5	Al>5
Talk	Si/Mg>1	Fe<3	Mg>17, Fe<3	Mg>18, Ca<1	Mg>17, Fe<3, Ca<1	Mg>17, Fe<3, Na<1
Glimmer	Si/Mg>1, Si/Al<4, K>5,5	Si/Al<4, K>5,5	Si/Al<4, K>5,5	Si/Al<4, K>5,5	Si/Al<4, K>5,5	Si/Al<4, K>5,5
Vermiculit	Si/Mg>1, Al>7	Al>7	Al>7, Fe<13	Al>7, Ca<1	Al>7, Ca<1	Al>7, Mg>13
Nontronit	Mg<3, Fe>20	Mg<3, Fe>20	Mg<2,5, Na>1,5 (Al>3,5)	Mg<3, Fe>20 (Al>3,5)	Mg<3 (Fe>20, Al>3,5)	(Mg<3, Na<4)
Montmorillonit	Si/Mg>1, Al>8	Mg<4,5, Al>8	Fe<12, Al>8, Na>1,5	Mg<4,5, Al>8	Al>8 (Fe<12)	Al>8, Fe<12
Saponit	Si/Mg>1	(Fe<9)	Mg>13,5, Fe<9	Ca<2	Ca<2, Mg>14,5 (Fe<9)	Mg>13,5, Fe<9
Sepiolith	Si/Mg>1	(Fe<6)	Mg>15,5, Fe<6	Ca<3,5	Ca<2, Mg>15,5 (Fe<6)	Na<1,5, Mg>15,5, Fe<6
Epi./Preh./Pump.	Mg<5, Ca>14,5, Al>9	Mg<5, Ca>14,5, Al>9	Ca>14,5, Al>9	Mg<5, Al>9	Al>9	Ca>14,5, Al>9

^{a)} Es wird vorausgesetzt, daß ein Olivin mindestens 5% und ein Chlorit mindestens 4,5% Fe enthält;

^{b)} Eine Unterscheidung der Minerale anhand dieses Kriteriums ist nur möglich, wenn der Gehalt des Elements im Asbestmineral außerhalb des genannten Bereichs liegt (Bsp.: enthält ein Anthophyllit mehr als 9% Fe, kann er von Saponit unterschieden werden).

Tabelle 4: Bildschirmansicht der Tabelle zur automatischen Faseridentifizierung (Eingabefelder gelb unterlegt, Erläuterungen in Abschnitt 8)

Datei Bearbeiten Ansicht Einfügen Format Extras Daten Fenster ?																																																																																																																																																																																																																																			
Bearbeiter/in:		Proben-Kennz.:		Interne Nr.:		Auswertedatum: 17.07.00																																																																																																																																																																																																																													
Chemische Zusammensetzung der Partikel <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Masse-%</th> <th>Peakh.</th> <th>Integr. Intensität</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Na</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Mg</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Al</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Si</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>S</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>K</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ca</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Mn</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Fe</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ti</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Element	Masse-%	Peakh.	Integr. Intensität	Na				Mg				Al				Si				S				K				Ca				Mn				Fe				Ti				<table border="1"> <thead> <tr> <th>Chrysotil</th> <th>nein</th> <th>Anthophyllit</th> <th>nein</th> <th>Tremolit</th> <th>ja</th> <th>Aktinolith</th> <th>nein</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Kriterium:</td> <td colspan="2">Kriterium:</td> <td colspan="2">Kriterium:</td> <td colspan="2">Kriterium:</td> </tr> <tr> <td>Si deutlich</td> <td>(17 - 26,5) nein</td> <td>Si deutlich</td> <td>(23 - 32) ja</td> <td>Si deutlich</td> <td>(23 - 31,5) ja</td> <td>Si deutlich</td> <td>(20 - 29,5) ja</td> </tr> <tr> <td>Mg deutlich</td> <td>(24 - 33,5) nein</td> <td>Mg deutlich</td> <td>(10 - 25) ja</td> <td>Mg deutlich</td> <td>(11,5 - 19) ja</td> <td>Fe deutlich</td> <td>(5 - 22,5) nein</td> </tr> <tr> <td>Fe möglich</td> <td>(< 6) ja</td> <td>Fe schwach-deutl.</td> <td>(3 - 17) nein</td> <td>Ca deutlich</td> <td>(5 - 13) ja</td> <td>Ca deutlich</td> <td>(5 - 12,5) ja</td> </tr> <tr> <td>Al möglich</td> <td>(< 3,5) ja</td> <td>Al möglich</td> <td>(< 3,5) ja</td> <td>Al möglich</td> <td>(< 3,5) ja</td> <td>Mg schwach-deutl.</td> <td>(3 - 15) nein</td> </tr> <tr> <td>Ca möglich</td> <td>(< 3,5) nein</td> <td>Ca möglich</td> <td>(< 3,5) nein</td> <td>Fe möglich</td> <td>(< 6) ja</td> <td>Al möglich</td> <td>(< 3,5) ja</td> </tr> <tr> <td>Na schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) -</td> <td>Na schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) -</td> <td>Na schwach mögl.</td> <td>(< 2) -</td> <td>Na schwach mögl.</td> <td>(< 2) -</td> </tr> <tr> <td>K schwach mögl.</td> <td>(< 1) -</td> <td>K schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) -</td> <td>K schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) -</td> <td>K schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) -</td> </tr> <tr> <td>Mn schwach mögl.</td> <td>(< 1) ja</td> <td>Mn schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) ja</td> <td>Mn schwach mögl.</td> <td>(< 1) ja</td> <td>Mn schwach mögl.</td> <td>(< 1) ja</td> </tr> <tr> <td>Ti schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) -</td> <td>Ti schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) -</td> <td>Ti schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) -</td> <td>Ti schwach mögl.</td> <td>(< 1,5) -</td> </tr> <tr> <td>S in Spuren</td> <td>(< 1) -</td> <td>S in Spuren</td> <td>(< 1) -</td> <td>S in Spuren</td> <td>(< 1) -</td> <td>S in Spuren</td> <td>(< 1) -</td> </tr> <tr> <td>Si / Mg</td> <td>(< 1) nein</td> <td>Si / Mg</td> <td>(> 1) ja</td> <td>Si / Mg</td> <td>(> 1) ja</td> <td>Si / Mg</td> <td>(> 2) nein</td> </tr> <tr> <td>Si / Fe</td> <td>(> 4) ja</td> <td>Si / Al</td> <td>(> 8) ja</td> <td>Si / Ca</td> <td>(> 2,4) ja</td> <td>Si / Ca</td> <td>(> 2,4) ja</td> </tr> <tr> <td>Si / Al</td> <td>(> 5) ja</td> <td colspan="2">fehlendes Kriterium:</td> <td>Si / Al</td> <td>(> 5) ja</td> <td>Si / Al</td> <td>(> 5) ja</td> </tr> <tr> <td colspan="4">fehlendes Kriterium:</td> <td colspan="4">fehlendes Kriterium:</td> </tr> <tr> <td colspan="4">- (Si/Mg) Andere Asbeste, Pyroxene Hornblenden, Talk, Saponit</td> <td colspan="4">- (Si/Mg) Chrysotil, Olivin, Mg-Chlor.</td> </tr> <tr> <td colspan="4">- (Mg) Hornblenden, Pyroxene (außer Enstatit), Epi./Zoi./Preh./Pump.</td> <td colspan="4">- (Mg) Olivin, Enst., Bronz., Hypers. Mg-/Mg-Fe-Chlorite, Talk, Verm. einige Glimmer, Saponit</td> </tr> <tr> <td colspan="4">- (Fe<3) Talk, ev. Fe-armer Anthophyllit</td> <td colspan="4">- (Fe) Tremolit, Diopsid, Diop./Augit, Enstatit, einige Hornbl. u. Chlorite, Talk, Verm., Mont., Sapo., Epi.-Pu.</td> </tr> <tr> <td colspan="4">- (Fe<6,5) Enstatit, Saponit</td> <td colspan="4">- (Al<3,5) Pigeonitaugit / (Fe)</td> </tr> <tr> <td colspan="4">- (Ca) Klinopyroxene, Aktinolith, Tremolit, Epi./Zoi./Preh./Pump.</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td colspan="4">- (Ca) Hornblenden, einige Pyroxene</td> <td colspan="4">-</td> </tr> </tbody> </table>				Chrysotil	nein	Anthophyllit	nein	Tremolit	ja	Aktinolith	nein	Kriterium:		Kriterium:		Kriterium:		Kriterium:		Si deutlich	(17 - 26,5) nein	Si deutlich	(23 - 32) ja	Si deutlich	(23 - 31,5) ja	Si deutlich	(20 - 29,5) ja	Mg deutlich	(24 - 33,5) nein	Mg deutlich	(10 - 25) ja	Mg deutlich	(11,5 - 19) ja	Fe deutlich	(5 - 22,5) nein	Fe möglich	(< 6) ja	Fe schwach-deutl.	(3 - 17) nein	Ca deutlich	(5 - 13) ja	Ca deutlich	(5 - 12,5) ja	Al möglich	(< 3,5) ja	Al möglich	(< 3,5) ja	Al möglich	(< 3,5) ja	Mg schwach-deutl.	(3 - 15) nein	Ca möglich	(< 3,5) nein	Ca möglich	(< 3,5) nein	Fe möglich	(< 6) ja	Al möglich	(< 3,5) ja	Na schwach mögl.	(< 1,5) -	Na schwach mögl.	(< 1,5) -	Na schwach mögl.	(< 2) -	Na schwach mögl.	(< 2) -	K schwach mögl.	(< 1) -	K schwach mögl.	(< 1,5) -	K schwach mögl.	(< 1,5) -	K schwach mögl.	(< 1,5) -	Mn schwach mögl.	(< 1) ja	Mn schwach mögl.	(< 1,5) ja	Mn schwach mögl.	(< 1) ja	Mn schwach mögl.	(< 1) ja	Ti schwach mögl.	(< 1,5) -	Ti schwach mögl.	(< 1,5) -	Ti schwach mögl.	(< 1,5) -	Ti schwach mögl.	(< 1,5) -	S in Spuren	(< 1) -	S in Spuren	(< 1) -	S in Spuren	(< 1) -	S in Spuren	(< 1) -	Si / Mg	(< 1) nein	Si / Mg	(> 1) ja	Si / Mg	(> 1) ja	Si / Mg	(> 2) nein	Si / Fe	(> 4) ja	Si / Al	(> 8) ja	Si / Ca	(> 2,4) ja	Si / Ca	(> 2,4) ja	Si / Al	(> 5) ja	fehlendes Kriterium:		Si / Al	(> 5) ja	Si / Al	(> 5) ja	fehlendes Kriterium:				fehlendes Kriterium:				- (Si/Mg) Andere Asbeste, Pyroxene Hornblenden, Talk, Saponit				- (Si/Mg) Chrysotil, Olivin, Mg-Chlor.				- (Mg) Hornblenden, Pyroxene (außer Enstatit), Epi./Zoi./Preh./Pump.				- (Mg) Olivin, Enst., Bronz., Hypers. Mg-/Mg-Fe-Chlorite, Talk, Verm. einige Glimmer, Saponit				- (Fe<3) Talk, ev. Fe-armer Anthophyllit				- (Fe) Tremolit, Diopsid, Diop./Augit, Enstatit, einige Hornbl. u. Chlorite, Talk, Verm., Mont., Sapo., Epi.-Pu.				- (Fe<6,5) Enstatit, Saponit				- (Al<3,5) Pigeonitaugit / (Fe)				- (Ca) Klinopyroxene, Aktinolith, Tremolit, Epi./Zoi./Preh./Pump.				-				- (Ca) Hornblenden, einige Pyroxene				-			
Element	Masse-%	Peakh.	Integr. Intensität																																																																																																																																																																																																																																
Na																																																																																																																																																																																																																																			
Mg																																																																																																																																																																																																																																			
Al																																																																																																																																																																																																																																			
Si																																																																																																																																																																																																																																			
S																																																																																																																																																																																																																																			
K																																																																																																																																																																																																																																			
Ca																																																																																																																																																																																																																																			
Mn																																																																																																																																																																																																																																			
Fe																																																																																																																																																																																																																																			
Ti																																																																																																																																																																																																																																			
Chrysotil	nein	Anthophyllit	nein	Tremolit	ja	Aktinolith	nein																																																																																																																																																																																																																												
Kriterium:		Kriterium:		Kriterium:		Kriterium:																																																																																																																																																																																																																													
Si deutlich	(17 - 26,5) nein	Si deutlich	(23 - 32) ja	Si deutlich	(23 - 31,5) ja	Si deutlich	(20 - 29,5) ja																																																																																																																																																																																																																												
Mg deutlich	(24 - 33,5) nein	Mg deutlich	(10 - 25) ja	Mg deutlich	(11,5 - 19) ja	Fe deutlich	(5 - 22,5) nein																																																																																																																																																																																																																												
Fe möglich	(< 6) ja	Fe schwach-deutl.	(3 - 17) nein	Ca deutlich	(5 - 13) ja	Ca deutlich	(5 - 12,5) ja																																																																																																																																																																																																																												
Al möglich	(< 3,5) ja	Al möglich	(< 3,5) ja	Al möglich	(< 3,5) ja	Mg schwach-deutl.	(3 - 15) nein																																																																																																																																																																																																																												
Ca möglich	(< 3,5) nein	Ca möglich	(< 3,5) nein	Fe möglich	(< 6) ja	Al möglich	(< 3,5) ja																																																																																																																																																																																																																												
Na schwach mögl.	(< 1,5) -	Na schwach mögl.	(< 1,5) -	Na schwach mögl.	(< 2) -	Na schwach mögl.	(< 2) -																																																																																																																																																																																																																												
K schwach mögl.	(< 1) -	K schwach mögl.	(< 1,5) -	K schwach mögl.	(< 1,5) -	K schwach mögl.	(< 1,5) -																																																																																																																																																																																																																												
Mn schwach mögl.	(< 1) ja	Mn schwach mögl.	(< 1,5) ja	Mn schwach mögl.	(< 1) ja	Mn schwach mögl.	(< 1) ja																																																																																																																																																																																																																												
Ti schwach mögl.	(< 1,5) -	Ti schwach mögl.	(< 1,5) -	Ti schwach mögl.	(< 1,5) -	Ti schwach mögl.	(< 1,5) -																																																																																																																																																																																																																												
S in Spuren	(< 1) -	S in Spuren	(< 1) -	S in Spuren	(< 1) -	S in Spuren	(< 1) -																																																																																																																																																																																																																												
Si / Mg	(< 1) nein	Si / Mg	(> 1) ja	Si / Mg	(> 1) ja	Si / Mg	(> 2) nein																																																																																																																																																																																																																												
Si / Fe	(> 4) ja	Si / Al	(> 8) ja	Si / Ca	(> 2,4) ja	Si / Ca	(> 2,4) ja																																																																																																																																																																																																																												
Si / Al	(> 5) ja	fehlendes Kriterium:		Si / Al	(> 5) ja	Si / Al	(> 5) ja																																																																																																																																																																																																																												
fehlendes Kriterium:				fehlendes Kriterium:																																																																																																																																																																																																																															
- (Si/Mg) Andere Asbeste, Pyroxene Hornblenden, Talk, Saponit				- (Si/Mg) Chrysotil, Olivin, Mg-Chlor.																																																																																																																																																																																																																															
- (Mg) Hornblenden, Pyroxene (außer Enstatit), Epi./Zoi./Preh./Pump.				- (Mg) Olivin, Enst., Bronz., Hypers. Mg-/Mg-Fe-Chlorite, Talk, Verm. einige Glimmer, Saponit																																																																																																																																																																																																																															
- (Fe<3) Talk, ev. Fe-armer Anthophyllit				- (Fe) Tremolit, Diopsid, Diop./Augit, Enstatit, einige Hornbl. u. Chlorite, Talk, Verm., Mont., Sapo., Epi.-Pu.																																																																																																																																																																																																																															
- (Fe<6,5) Enstatit, Saponit				- (Al<3,5) Pigeonitaugit / (Fe)																																																																																																																																																																																																																															
- (Ca) Klinopyroxene, Aktinolith, Tremolit, Epi./Zoi./Preh./Pump.				-																																																																																																																																																																																																																															
- (Ca) Hornblenden, einige Pyroxene				-																																																																																																																																																																																																																															
Oxid <table border="1"> <tbody> <tr><td>Na₂O</td><td>0</td></tr> <tr><td>MgO</td><td>29,6</td></tr> <tr><td>Al₂O₃</td><td>0,09</td></tr> <tr><td>SiO₂</td><td>58,5</td></tr> <tr><td>SO₄²⁻</td><td>0</td></tr> <tr><td>K₂O</td><td>0</td></tr> <tr><td>CaO</td><td>9,92</td></tr> <tr><td>MnO</td><td>0,3</td></tr> <tr><td>FeO</td><td>1,56</td></tr> <tr><td>Fe₂O₃</td><td></td></tr> <tr><td>TiO₂</td><td>0</td></tr> <tr><td>(TiO₂ = Ti₂O₃ / 0,3)</td><td></td></tr> </tbody> </table>				Na ₂ O	0	MgO	29,6	Al ₂ O ₃	0,09	SiO ₂	58,5	SO ₄ ²⁻	0	K ₂ O	0	CaO	9,92	MnO	0,3	FeO	1,56	Fe ₂ O ₃		TiO ₂	0	(TiO ₂ = Ti ₂ O ₃ / 0,3)		Geräteparameter <table border="1"> <tbody> <tr><td>Fenster:</td><td></td></tr> <tr><td>Detektor:</td><td></td></tr> <tr><td>Raumwinkel [sr]:</td><td></td></tr> <tr><td>Spannung [kV]:</td><td></td></tr> </tbody> </table>				Fenster:		Detektor:		Raumwinkel [sr]:		Spannung [kV]:																																																																																																																																																																																													
Na ₂ O	0																																																																																																																																																																																																																																		
MgO	29,6																																																																																																																																																																																																																																		
Al ₂ O ₃	0,09																																																																																																																																																																																																																																		
SiO ₂	58,5																																																																																																																																																																																																																																		
SO ₄ ²⁻	0																																																																																																																																																																																																																																		
K ₂ O	0																																																																																																																																																																																																																																		
CaO	9,92																																																																																																																																																																																																																																		
MnO	0,3																																																																																																																																																																																																																																		
FeO	1,56																																																																																																																																																																																																																																		
Fe ₂ O ₃																																																																																																																																																																																																																																			
TiO ₂	0																																																																																																																																																																																																																																		
(TiO ₂ = Ti ₂ O ₃ / 0,3)																																																																																																																																																																																																																																			
Fenster:																																																																																																																																																																																																																																			
Detektor:																																																																																																																																																																																																																																			
Raumwinkel [sr]:																																																																																																																																																																																																																																			
Spannung [kV]:																																																																																																																																																																																																																																			
Partikel <table border="1"> <tbody> <tr><td>Länge [µm]:</td><td>33</td></tr> <tr><td>Durchm. [µm]:</td><td>2,8</td></tr> <tr><td>Formfaktor:</td><td>0,33</td></tr> <tr><td>L / D:</td><td>11,8</td></tr> <tr><td>Volumen [µm³]:</td><td>85,4</td></tr> <tr><td>Dichte [g/cm³]:</td><td>3,0</td></tr> <tr><td>Masse [pg]:</td><td>256,133</td></tr> </tbody> </table>				Länge [µm]:	33	Durchm. [µm]:	2,8	Formfaktor:	0,33	L / D:	11,8	Volumen [µm ³]:	85,4	Dichte [g/cm ³]:	3,0	Masse [pg]:	256,133	Mögliche Minerale (Bewertung: Anzahl nicht übereinstimmender Elementgehalte) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Zusätzliche Toleranz der Elementgehalte in % relativ:</th> <th>0</th> <th>Treffertoleranz berechnen?</th> <th>n</th> <th>Treffertoleranz:</th> <th>-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Olivin</td><td>4</td><td>Pigeonit (Fe)</td><td>5</td><td>Pennin</td><td>3</td><td>Biotit</td><td>6</td></tr> <tr><td>Olivin (Fe)</td><td>4</td><td>Enstatit</td><td>2</td><td>Klinochlor</td><td>3</td><td>Biotit (Fe)</td><td>6</td></tr> <tr><td>Diopsid</td><td>2</td><td>Bronzit</td><td>2</td><td>Grochaut</td><td>4</td><td>Vermiculit</td><td>4</td></tr> <tr><td>Diop. Augit</td><td>4</td><td>Hypersthen</td><td>3</td><td>Diabantit</td><td>4</td><td>Nontronit</td><td>5</td></tr> <tr><td>Diop. Augit (Al)</td><td>5</td><td>Fe-Hypersthen</td><td>4</td><td>Pyknochlorit</td><td>4</td><td>Montmorillonit</td><td>5</td></tr> <tr><td>Ägirinaugit</td><td>5</td><td>Pargasit</td><td>5</td><td>Rhipidolith</td><td>4</td><td>Saponit</td><td>4</td></tr> <tr><td>Augit</td><td>5</td><td>Hastingsit</td><td>5</td><td>Brunsvigit</td><td>5</td><td>Epidot</td><td>5</td></tr> <tr><td>Augit (Al)</td><td>5</td><td>Basalt. Hornbl.</td><td>5</td><td>Aphrosiderit</td><td>5</td><td>Zoisit</td><td>4</td></tr> <tr><td>Pigeonitaugit</td><td>4</td><td>Kaersutit</td><td>6</td><td>Talk</td><td>2</td><td>Prehnit</td><td>4</td></tr> <tr><td>Pigeonitaugit (Fe)</td><td>4</td><td>Tschermakit</td><td>4</td><td>Muskovit</td><td>5</td><td>Pumpellyit</td><td>5</td></tr> <tr><td>Pigeonit</td><td>5</td><td>Tschermakit (Fe)</td><td>4</td><td>Phlogopit</td><td>4</td><td>Sepiolith</td><td>2</td></tr> <tr><td>Kontrollvergleich</td><td></td><td>Chrysotil</td><td>3</td><td>Tremolit</td><td>1</td><td>Amasit</td><td>3</td></tr> <tr><td>mit den Asbestmineralen</td><td></td><td>Anthophyllit</td><td>2</td><td>Aktinolith</td><td>2</td><td>Kryodolith</td><td>4</td></tr> </tbody> </table>				Zusätzliche Toleranz der Elementgehalte in % relativ:	0	Treffertoleranz berechnen?	n	Treffertoleranz:	-	Olivin	4	Pigeonit (Fe)	5	Pennin	3	Biotit	6	Olivin (Fe)	4	Enstatit	2	Klinochlor	3	Biotit (Fe)	6	Diopsid	2	Bronzit	2	Grochaut	4	Vermiculit	4	Diop. Augit	4	Hypersthen	3	Diabantit	4	Nontronit	5	Diop. Augit (Al)	5	Fe-Hypersthen	4	Pyknochlorit	4	Montmorillonit	5	Ägirinaugit	5	Pargasit	5	Rhipidolith	4	Saponit	4	Augit	5	Hastingsit	5	Brunsvigit	5	Epidot	5	Augit (Al)	5	Basalt. Hornbl.	5	Aphrosiderit	5	Zoisit	4	Pigeonitaugit	4	Kaersutit	6	Talk	2	Prehnit	4	Pigeonitaugit (Fe)	4	Tschermakit	4	Muskovit	5	Pumpellyit	5	Pigeonit	5	Tschermakit (Fe)	4	Phlogopit	4	Sepiolith	2	Kontrollvergleich		Chrysotil	3	Tremolit	1	Amasit	3	mit den Asbestmineralen		Anthophyllit	2	Aktinolith	2	Kryodolith	4																																																																																																
Länge [µm]:	33																																																																																																																																																																																																																																		
Durchm. [µm]:	2,8																																																																																																																																																																																																																																		
Formfaktor:	0,33																																																																																																																																																																																																																																		
L / D:	11,8																																																																																																																																																																																																																																		
Volumen [µm ³]:	85,4																																																																																																																																																																																																																																		
Dichte [g/cm ³]:	3,0																																																																																																																																																																																																																																		
Masse [pg]:	256,133																																																																																																																																																																																																																																		
Zusätzliche Toleranz der Elementgehalte in % relativ:	0	Treffertoleranz berechnen?	n	Treffertoleranz:	-																																																																																																																																																																																																																														
Olivin	4	Pigeonit (Fe)	5	Pennin	3	Biotit	6																																																																																																																																																																																																																												
Olivin (Fe)	4	Enstatit	2	Klinochlor	3	Biotit (Fe)	6																																																																																																																																																																																																																												
Diopsid	2	Bronzit	2	Grochaut	4	Vermiculit	4																																																																																																																																																																																																																												
Diop. Augit	4	Hypersthen	3	Diabantit	4	Nontronit	5																																																																																																																																																																																																																												
Diop. Augit (Al)	5	Fe-Hypersthen	4	Pyknochlorit	4	Montmorillonit	5																																																																																																																																																																																																																												
Ägirinaugit	5	Pargasit	5	Rhipidolith	4	Saponit	4																																																																																																																																																																																																																												
Augit	5	Hastingsit	5	Brunsvigit	5	Epidot	5																																																																																																																																																																																																																												
Augit (Al)	5	Basalt. Hornbl.	5	Aphrosiderit	5	Zoisit	4																																																																																																																																																																																																																												
Pigeonitaugit	4	Kaersutit	6	Talk	2	Prehnit	4																																																																																																																																																																																																																												
Pigeonitaugit (Fe)	4	Tschermakit	4	Muskovit	5	Pumpellyit	5																																																																																																																																																																																																																												
Pigeonit	5	Tschermakit (Fe)	4	Phlogopit	4	Sepiolith	2																																																																																																																																																																																																																												
Kontrollvergleich		Chrysotil	3	Tremolit	1	Amasit	3																																																																																																																																																																																																																												
mit den Asbestmineralen		Anthophyllit	2	Aktinolith	2	Kryodolith	4																																																																																																																																																																																																																												
Faser gemäß WHO-Definition Partikel gemäß Konventionen identifiziert als: Tremolit				Standardisierte Analysenverhältnisse der Elementgehalte: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Anteil</th> <th>Si/Mg</th> <th>Si/Al</th> <th>Si/Ca</th> <th>Si/Fe</th> <th>Mg/Fe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Na</td><td></td><td></td><td>> 100</td><td>3,86</td><td>22,55</td><td>14,72</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>17,86</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Al</td><td>0,05</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Si</td><td>27,35</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>S</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>K</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ca</td><td>7,09</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Mn</td><td>0,23</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Fe</td><td>1,21</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ti</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Element	Anteil	Si/Mg	Si/Al	Si/Ca	Si/Fe	Mg/Fe	Na			> 100	3,86	22,55	14,72	Mg	17,86						Al	0,05						Si	27,35						S							K							Ca	7,09						Mn	0,23						Fe	1,21						Ti																																																																																																																																																					
Element	Anteil	Si/Mg	Si/Al	Si/Ca	Si/Fe	Mg/Fe																																																																																																																																																																																																																													
Na			> 100	3,86	22,55	14,72																																																																																																																																																																																																																													
Mg	17,86																																																																																																																																																																																																																																		
Al	0,05																																																																																																																																																																																																																																		
Si	27,35																																																																																																																																																																																																																																		
S																																																																																																																																																																																																																																			
K																																																																																																																																																																																																																																			
Ca	7,09																																																																																																																																																																																																																																		
Mn	0,23																																																																																																																																																																																																																																		
Fe	1,21																																																																																																																																																																																																																																		
Ti																																																																																																																																																																																																																																			
FASER-IDENTIFIZIERUNG 11, 6/99 - BIA, St. Augustin -				Änderung:																																																																																																																																																																																																																															

Vergleichsdaten für die Bewertung von Ergebnissen der Partikelanalyse

Als Kriterium zur Abgrenzung der Asbestminerale von den anderen in Gesteinsstäuben enthaltenen Mineralen wird die chemische Zusammensetzung sowie das Verhältnis bestimmter Elementanteile zueinander herangezogen (Tabellen A1 und A2). Statt der idealen chemischen Zusammensetzung, werden als Unterscheidungskriterien die zu erwartenden Variationsbreiten der Elementgehalte der einzelnen Mineralphasen bewertet. Bei der Zusammenstellung der Vergleichsdaten wurden für die einzelnen Mineralgruppen folgende Festlegungen getroffen (allgemeine Strukturformeln sind auf die hier erfassten Varietäten einer Mineralgruppe reduziert):

Asbeste: Als Grundlage wurden die in Tabelle A3 aufgeführten Spannbreiten der realen Zusammensetzung der Asbestminerale verwendet. Allerdings mussten einige Einschränkungen vorgenommen werden, da offensichtlich auch „exotische“ Asbestvarianten mit einbezogen wurden. Hier sind die ungewöhnlich großen Gehalte an CaO im Chrysotil (10 %^a), Na₂O im Aktinolith/Tremolit (8 %) und an Al₂O₃ im Anthophyllit (8 %) und Amosit (9 %) sowie der auffällig niedrige Gehalt an MgO im Chrysotil (23 %) und der fehlende CaO-Anteil im Aktinolith/Tremolit zu nennen. Entgegen den mineralogischen Festlegungen weist der Amosit eine deutlich größere Spanne an Fe-Anteilen und damit korrespondierend auch Mg-Anteilen auf, die hier Berücksichtigung fand. Die Zusammensetzung des Aktinoliths wurde nicht bis zum reinen Ferroaktinolith ausgedehnt, da dieser in der Regel nicht vorkommt. Statt dessen wurde der Bereich des Aktinoliths zum Mg-reichen Tremolit erweitert.

Die Amphibolasbeste zeigen in ihrer realen chemischen Zusammensetzung mehr oder weniger kontinuierliche Übergänge zu Phasen anderer Mineralgruppen. Von der Aktinolith-Tremolit-Reihe sind Übergänge zu Hornblenden der Tschermakitreihe üblich. Daher wurde als Abgrenzung zu diesen Mineralen der Al-Anteil der Asbeste etwas strenger an die idealen Vorgaben angepasst (vgl. Tabelle 3 auf Seite 15).

Olivin: Von der Mischkristallreihe Forsterit-Fayalit ist als häufiger Vertreter in basischen Gesteinen ein Olivin anzutreffen, dessen molares Mg:Fe-Verhältnis zwischen 9:1 und 7:3 liegt [1][2]. Die Zusammensetzung der zwei aufgeführten Olivine wurde so gewählt, daß dieser Bereich abgedeckt ist.

Pyroxene: Allgemeine Formel: (X,Y)₂[Z₂O₆] mit: X, Y = Ca, Mg, Fe²⁺, Al; Z = Si, Al [2]. Generell muss unterschieden werden zwischen Ortho- und Klinopyroxenen. Die Orthopyroxene sind durch Enstatit, Bronzit, Hypersthen und Fe-Hypersthen vertreten. Die hier gewählte Zusammensetzung deckt den Bereich der entsprechenden Mischkristallreihe mit Ausnahme des sehr seltenen reinen Fe-haltigen Endgliedes ab. Die Klinopyroxene sind vom Ca-reichen Diopsid, über den Augit bis zum Ca-armen Pigeonit vertreten, lediglich die sehr Fe-reichen Vertreter dieser Gruppe wurden nicht aufgenommen. Da Übergänge zwischen den einzelnen Klinopyroxenen zu beobachten sind, wurden die Spannweiten der Elementzusammensetzung entsprechend ausgeweitet (abgesehen von der Mischungslücke zwischen Pigeonitaugit und Pigeonit). Als zusätzliches Abgrenzungskriterium zu den Asbestmineralen wird der mögliche Ti-Anteil in Pyroxenen (von bis zu einigen Masse-%) angesehen. Anhand des Aluminiumanteils kann nur in wenigen Fällen eine Unterteilung zwischen Pyroxenen und Amphibolasbesten erfolgen, er liegt für beide Mineralgruppen in der Regel

^a Angaben in % beziehen sich generell auf Massenanteile

bei unter 5 % Al_2O_3 . Als weiterer typischer Pyroxen in einer Reihe basischer Magmatite wurde auch der Na-haltige Ägirinaugit in die Vergleichsdatei aufgenommen.

Hornblenden: Allgemeine Formel: $\text{A}_{0-1}\text{X}_2\text{Y}_5[(\text{OH})_2\text{Z}_8\text{O}_{22}]$ mit $\text{A} = \text{Na}, \text{Ca}$; $\text{X} = \text{Na}, \text{Ca}, \text{Mg}$; $\text{Y} = \text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}$; $\text{Z} = \text{Si}, \text{Al}$ [2] (vergl. auch [3]). Es wurden sechs für basische Gesteine typische Hornblenden ausgewählt. Die Festlegung der Variabilität der chemischen Zusammensetzung der einzelnen Hornblendearten wurde nach Angaben aus [2] vorgenommen. Es wurde nicht die gesamte auftretende Spannbreite, sondern nur der Bereich der dominierenden Zusammensetzung berücksichtigt. Als wichtigstes Merkmal zur Abgrenzung der Hornblenden von den Amphibolasbesten wird der Al_2O_3 -Gehalt gewertet, der bei den Hornblenden zumeist über 10 % liegt.

Chlorite: Allg. Formel: $\text{Mg}_{6-x_1-y-0.5(x_1-x_2)}\text{Fe}^{2+}_y\text{Al}_{x_2}[(\text{OH})_8\text{Si}_{4-x_2}\text{Al}_{x_2}\text{O}_{10}]$ (Nomenklatur und Gliederung nach TRÖGER u. TROCHIM in [2]). Mit den ausgewählten acht Chloritvarietäten (Pennin bis Afrosiderit) ist fast das gesamte Feld der Mg-Fe-Chlorite abgedeckt (außer dem fast Mg-freien Bavalit). Die Spannbreite der chemischen Zusammensetzung der einzelnen Chlorite wurde so gewählt, dass auch alle Übergänge zwischen den einzelnen Varietäten erfasst sind. Da sich, abgesehen vom hier nicht relevanten $\text{Fe}_{2+}/\text{Fe}_{3+}$ -Verhältnis, die chemische Zusammensetzung der Ortho- und Leptochlorite nicht unterscheidet, stehen die acht genannten Chlorite ebenfalls für die Varietäten Delessit, (Mg-)Thuringit, (Mg-)Chamosit und Klementit. Wie bei den Hornblenden auch, stellt der große Al_2O_3 -Gehalt eine Abgrenzung zu den Amphibolasbesten dar.

Andere Schichtsilikate: Die Glimmer sind durch den Muskovit und die Biotitreihe vertreten. Der Fluorgehalt der Glimmer (diadoch für OH-Gruppen) wurde nicht berücksichtigt. Die Spannbreite der chemischen Zusammensetzung der Varietäten Phlogopit, Biotit und Biotit (Fe) decken die Biotitreihe, bis auf deren Fe-reiche Glieder, kontinuierlich ab.

Montmorillonit und Nontronit bilden eine kontinuierliche Mischkristallreihe. Die Spannbreite der Fe- bzw. Al-Gehalte wurde daher von den reinen Endgliedern ausgehend erweitert.

Weiterhin aufgenommen wurden auch Vermiculit (mittlere Zusammensetzung nach [2]), Saponit (mittlere Zusammensetzung nach [1]) und Talk (geringe Fe- und Al-Anteile werden zugelassen).

Weitere Minerale: Als akzessorische Minerale mit teils nadelförmiger Ausbildung sind in basischen Gesteinen häufig Vertreter der Epidotgruppe sowie Prehnit und Pumpellyit anzutreffen.

Literatur

1. Rösler, H.J.: Lehrbuch der Mineralogie. 5. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1991.
2. Tröger, W.E.: Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale, Teil 2 Textband. 2. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1969.
3. Leake, B.E., A.R. Woolley, C.E.S Arps, W.D. Birch, M.C. Gilbert, J.D. Grice, F.C. Hawthorne, A. Kato, H.J. Kisch, V.G. Krivovichev, K. Linthout, J. Laird, J. Mandarino, W.V. Maresch, E.H. Nickel, N.M.S. Rock, J.C. Schumacher, D.C. Smith, N.C.N. Stephenson, L. Ungaretti, E.J.W. Whittaker, G. Jouzhi: Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. Eur. J. Mineral., 9, S. 623-651, 1997.
4. Rödelsperger, K., Gerhard, J.: Asbest: Mineralogie - Eigenschaften - Verwendung. - in: Bossenmayer, J., Schumm, H.-P., Tepassee, R. (Hrsg.): Asbest-Handbuch, Ergänzbare Leitfaden für die Sanierungspraxis, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin, 1991 (2. Lieferung)
5. VDI-Richtlinie 3492 Blatt 1 "Messen anorganischer Partikel in der Außenluft. Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren. 40 S., Beuth Verlag, Berlin, 1991
6. Speil & Leineweber, 1969 - zitiert in: Autorenkollektiv: Luftqualitätskriterien, Umweltbelastung durch Asbest und andere faserige Feinstäube. - Berichte 7/80, Umweltbundesamt, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1980
7. Hodgson, A.A.: Chemistry and physics of asbestos. - in: Michaels, L., Chissick, S.S. (Ed.): Asbestos, Volume 1, Properties, Applications, and Hazards. - John Wiley & Sons, Chichester - New York - Brisbane - Toronto, 1979
8. Berger, H.: Asbest-Fibel, Stuttgart, 1961
9. Selikoff & Lee, 1978 - zitiert in: Autorenkollektiv: Luftqualitätskriterien, Umweltbelastung durch Asbest und andere faserige Feinstäube. - Berichte 7/80, Umweltbundesamt, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1980
10. Noll, W.: Asbest. Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Band 8, 1974.

Dr. rer. nat. Markus Mattenklott

Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit - BIA, Sankt Augustin

Stand: 18.07.2000

Anlagen: Tabellen A1 bis A3

Tabelle A1. Chemische Zusammensetzung von Mineralen potenziell asbesthaltiger Gesteine, einschließlich der Asbestminerale, entsprechend den in Tabelle 1 (Seite 13) aufgeführten Strukturformeln (zusätzlich enthalten die Basalt. Hornblende 3,3 % und der Kaersutit 8,2 % Ti₂O₃).

Mineral	Massenanteile in % (ohne H ₂ O, normiert auf 100 %)								Quotient aus Massenanteilen				
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	Si/Mg	Si/Al	Si/Ca	Si/Fe	Mg/Fe
Chrysotil		50,2		49,8					0,8				
Anthophyllit		37,0		63,0					1,3				
Anthophyllit (Fe)		23,8		58,0			18,2		1,9			1,9	1,0
Amosit		14,6		54,5			30,9		2,9			1,1	0,4
Amosit (Fe)		7,4		51,7			40,9		5,4			0,8	0,1
Tremolit		25,4		60,5		14,1			1,8		2,8		
Aktinolith		16,5		57,0		13,3	13,1		2,7		2,8	2,6	1,0
Ferro-Aktinolith				50,5		11,8	37,7				2,8	0,8	
Krokydolith (Mg)	7,0	5,0		54,4			15,5	18,1	8,4			1,0	0,1
Krokydolith	6,8			52,4			23,5	17,4				0,8	
Olivin		49,4		40,9			9,8		0,6			2,5	3,9
Olivin (Fe)		35,4		37,6			27,0		0,8			0,8	1,0
Diopsid		18,6		55,5		25,9			2,3		1,4		
Diop. Augit		16,1	2,1	53,2		22,4	6,2		2,6	22,6	1,6	5,1	2,0
Diop. Augit (Al)		15,7	4,6	51,8		21,9	5,9		2,66	9,9	1,5	5,3	2,1
Ägirinaugit	6,8	6,5	3,4	50,8		9,1	5,8	17,5	6,0	13,4	3,6	1,4	0,2
Augit		13,7	4,1	51,0		19,0	12,2		2,9	11,0	1,8	2,5	0,9
Augit (Al)		13,0	9,1	48,3		18,0	11,6		2,9	4,7	1,8	2,5	0,9
Pigeonitaugit		15,0	6,8	49,5		13,9	14,8		2,6	6,4	2,3	2,0	0,8
Pigeonitaugit (Fe)		6,2	6,4	46,5		13,0	27,8		5,8	6,4	2,3	1,0	0,2
Pigeonit		20,2	6,9	50,2		4,7	18,0		1,9	6,4	7,0	1,7	0,9
Pigeonit (Fe)		12,8	6,6	47,7		4,5	28,5		2,9	6,4	7,0	1,0	0,3
Enstatit		40,1		59,9					1,2				
Bronzit		30,2		56,3			13,5		1,4			2,5	1,7
Hypersthen		21,4		53,2			25,4		1,9			1,3	0,7
Fe-Hypersthen		13,5		50,4			36,1		2,9			0,8	0,3
Pargasit	3,6	14,2	18,0	42,4		13,2	8,5		2,3	2,1	2,1	3,0	1,3
Hastingsit	3,5	12,8	11,5	40,8		12,7	9,7	9,0	2,5	3,1	2,1	1,4	0,6
Basalt. Hornblende	3,6	16,4	11,9	42,0		13,1	4,2	5,6	2,0	3,1	2,1	2,7	1,4
Kaersutit	3,5	12,9	11,6	41,1		12,8	9,8		2,5	3,1	2,1	2,5	1,0
Tschermakit		10,1	21,2	42,9		13,3	7,7	4,8	3,3	1,8	2,1	2,2	0,7
Tschermakit (Fe)		7,0	20,8	42,0		13,1	12,5	4,6	4,6	1,8	2,1	1,5	0,3
Pennin		33,0	19,6	40,1			7,3		0,9	1,8		3,3	3,5
Klinochlor		34,2	23,0	35,6			7,2		0,8	1,4		3,0	3,7
Grochaut		25,3	26,4	31,1			7,2		0,7	1,0		2,6	3,8
Diabantit		17,0	18,7	36,5			27,7		1,7	1,7		0,8	0,5
Pyknochlorit		18,6	21,9	32,5			27,0		1,4	1,3		0,7	0,5
Rhipidolith		20,4	25,5	27,9			26,2		1,1	1,0		0,6	0,6
Brunsvigit		3,1	23,4	30,7			42,8		7,7	1,2		0,4	0,1
Afrosiderit		5,9	27,0	26,7			40,5		3,5	0,9		0,4	0,1
Talk		33,5		66,5					1,5				
Muskovit			40,2	47,4	12,4					1,0			
Phlogopit		30,3	12,8	45,1	11,8				1,2	3,1			
Biotit		23,1	12,2	43,1	11,3		10,3		1,4	3,1		2,5	1,7
Biotit (Fe)		13,5	11,4	40,4	10,5		24,1		2,3	3,1		1,0	0,4
Vermiculit		28,2	19,2	42,7				10,0	1,2	2,0		2,8	2,4
Nontronit	2,5		4,1	54,1				39,2		11,6		0,9	
Montmorillonit	2,9	3,8	24,4	68,9					14,0	2,5			
Saponit	1,3	27,5	4,4	57,9		1,2	7,6		1,6	11,6	31,2	4,6	2,8
Sepiolith		30,9		69,1					1,7				
Epidot			27,7	39,2		24,4		8,7		1,2	1,1	3,0	
Zoisit			34,3	40,5		25,2				1,0	1,1		
Prehinit			25,9	45,7		28,4				1,6	1,1		
Pumpellyit		4,5	22,6	40,0		24,9	8,0		6,9	1,6	1,1	3,0	0,4

Tabelle A2: Chemische Zusammensetzung von Mineralen potenziell asbesthaltiger Gesteine, einschließlich der Asbestminerale, entsprechend den in Tabelle 1 (siehe Seite 13) aufgeführten Strukturformeln.

Mineral	Massenanteile in % (Fe ³⁺ als Fe ²⁺ , normiert auf 100 % der Oxide, ohne H ₂ O!)								
	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Ti
Chrysotil		30,2		23,3					
Anthophyllit		22,3		29,5					
Anthophyllit (Fe)		14,4		27,1				14,1	
Amosit		8,8		25,5				24,0	
Amosit (Fe)		4,4		24,2				31,8	
Tremolit		15,3		28,3		10,1			
Aktinolith		10,0		26,7		9,5		10,2	
Ferro-Aktinolith				23,6		8,4		29,3	
Krokydolith (Mg)	5,3	3,1		25,9				25,1	
Krokydolith	5,1			24,9				30,9	
Olivin		29,8		19,1				7,6	
Olivin (Fe)		21,3		17,6				21,0	
Diopsid		11,2		25,9		18,5			
Diop. Augit		9,7	1,1	24,9		16,0		4,8	
Diop. Augit (Al)		9,5	2,5	24,2		15,7		4,6	
Ägirinaugit	5,1	4,0	1,8	24,2		6,6		17,1	
Augit		8,3	2,2	23,8		13,6		9,5	
Augit (Al)		7,8	4,8	22,6		12,9		9,0	
Pigeonitaugit		9,0	3,6	23,2		9,9		11,5	
Pigeonitaugit (Fe)		3,8	3,4	21,7		9,3		21,6	
Pigeonit		12,2	3,7	23,5		3,3		14,0	
Pigeonit (Fe)		7,7	3,5	22,3		3,2		22,2	
Enstatit		24,2		28,0					
Bronzit		18,2		26,3				10,5	
Hypersthen		12,9		24,9				19,8	
Fe-Hypersthen		8,1		23,5				28,1	
Pargasit	2,7	8,6	9,5	19,8		9,4		6,6	
Hastingsit	2,6	7,8	6,2	19,2		9,1		14,0	
Basalt. Hornbl.	2,7	10,0	6,3	19,7		9,4		7,2	2,2
Kaersutit	2,6	7,8	6,2	19,2		9,1		7,6	2,5
Tschemakit		6,1	11,3	20,1		9,6		9,3	
Tschemakit (Fe)		4,3	11,0	19,7		9,4		13,1	
Pennin		19,9	10,4	18,8				5,6	
Klinochlor		20,6	12,2	16,6				5,6	
Grochait		21,3	14,0	14,5				5,6	
Diabantit		10,3	9,9	17,0				21,6	
Pyknochlorit		11,2	11,6	15,2				21,0	
Rhipidolith		12,3	13,5	13,0				20,3	
Brunsvigit		1,9	12,4	14,3				33,3	
Afrosiderit		3,5	14,3	12,5				31,5	
Talk		20,2		31,1					
Muskovit			21,3	22,2	10,3				
Phlogopit		18,3	6,8	21,1	9,8				
Biotit		13,9	6,5	20,1	9,3			8,0	
Biotit (Fe)		8,2	6,0	18,9	8,8			18,8	
Vermiculit		17,2	10,2	20,1				7,1	
Nontronit	1,9		2,3	26,3				28,5	
Montmorillonit	2,2	2,3	12,9	32,2					
Saponit	1,0	16,6	2,3	27,1		0,9		5,9	
Sepiolith		18,6		32,3					
Epidot			14,8	18,5		17,6		6,1	
Zoisit			18,2	18,9		18,0			
Prehnit			13,7	21,4		20,3			
Pumpellyit		2,7	12,0	18,7		17,8		6,2	

Tabelle A3: Vergleich der idealen (kursiv gesetzt) und beobachteten chemischen Zusammensetzung der Asbestminerale; ideale Daten entsprechend den Strukturformeln aus Tabelle 1 (siehe Seite 13) (Angaben aus der Literatur gerundet).

Asbestart	% in Massenanteilen								
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	H ₂ O
<i>Chrysotil ideal</i>		43,6		43,4					13,0
[4]	-	23 - 43	0 - 3	38 - 54		0 - 10	0 - 3	0,1 - 5	10 - 14
[5]	0 - 1	38 - 42	0 - 2	36 - 44	0 - 1	0 - 2	0 - 3	0 - 5	12 - 14
[6], 5 Analysen	<0,1	40 - 42	0,3 - 0,8	38 - 44	<0,1	<0,1 - 1,0	<0,1 - 2,4	0,4 - 4,0	13 - 14
[7], 5 Analysen	≤0,1	38 - 41	3,1 - 4,7	39 - 41	<0,2	0,9 - 2,0	0,3 - 2,0	0,1 - 1,6	12 - 13
[8]	-	39 - 44	0,2 - 1,5	37 - 44		<0,1 - 5	0 - 6	0,1 - 5	12 - 15
[10]	-	38 - 43	<0,1 - 3,5	39 - 44		-	<0,1 - 4,5 ^{b)}		12 - 15
<i>Anthophyllit ideal (0% FeO)</i>		36,1		61,6					2,3
<i>(18% FeO)</i>		23,3		56,8			17,8		2,1
[4]	-	18 - 34	0 - 8	50 - 59		0 - 3	3 - 21	0 - 5	2 - 5
[5]	0 - 1	17 - 34	0 - 3	53 - 60	0 - 1	0 - 3	3 - 20	0 - 5	1 - 6
[8], [9]	-	28 - 34	0,5 - 1,5	56 - 58	-	-	3 - 12	-	1 - 6
<i>Amosit ideal (30% FeO)</i>		14,3		53,4			30,3		2,0
<i>(40% FeO)</i>		7,2		50,7			40,2		1,9
[4]	-	10 - 21	0 - 9	48 - 53		0 - 2	17 - 47	0 - 4	1 - 3
[5]	0 - 1	1 - 7	0 - 1	49 - 53	0 - 1	0 - 2	34 - 44	0 - 5	2 - 5
[9]	<0,1	1 - 7	-	49 - 53	0 - 0,4	-	34 - 44	-	2,5 - 4,5
[8]	0,5 - 2,5 ^{a)}	1 - 7	2 - 9	49 - 53		0,5 - 2,5 ^{a)}	34 - 44	-	2 - 5
[10]	0 - 2,5 ^{a)}	0,7 - 6,2	5,7 - 9,4	49 - 53		0 - 2,5 ^{a)}	34 - 44	-	2,2 - 3,0
<i>Tremolit ideal</i>		24,8		59,2		13,8			2,2
[4]	-	22 - 25	0 - 5	55 - 60		10 - 15	0 - 3	0 - 5	0 - 2,3
[5]	0 - 2	20 - 26	0 - 3	55 - 60	0 - 1	10 - 15	0 - 5	0 - 5	1 - 3
[9]	0 - 1,5	21 - 26	0 - 2,5	55 - 60	0 - 0,6	11 - 13	0 - 4	0 - 0,5	0,5 - 2,5
<i>Aktinolith ideal</i>		16,2		55,8		13,0	12,9		2,1
<i>(Ferro-Akt.)</i>				49,6		11,6	37,0		1,9
[4]	0 - 1	1 - 20	0 - 4	47 - 56		10 - 13	5 - 24	0 - 5	1 - 3
[5]	0 - 2	12 - 20	0 - 3	51 - 56	0 - 1	10 - 13	5 - 15	0 - 5	1 - 3
[9]	0,5 - 1,5	15 - 20	1,5 - 3	51 - 56	0 - 0,5	10 - 12	5 - 15	0 - 3	1,5 - 2,5
[8] Trem. u. Akt.	0 - 9	0 - 30	1 - 4	53 - 62		0 - 18	1,5 - 5	-	0,5
<i>Krokydolith ideal (0% MgO)</i>	6,6			51,4			23,0	17,1	1,9
<i>(13% MgO)</i>	6,5	13,2		50,6			14,4	16,8	1,9
[4]	6 - 7	0,1 - 13	0 - 1	44 - 56		0 - 3	10 - 25	10 - 20	1 - 5
[5]	4 - 9	0 - 3	0 - 1	49 - 56	0 - 1	0 - 3	13 - 21	13 - 20	2 - 5
[9]	4 - 8,5	0 - 3	0 - 0,2	49 - 53	0 - 0,4	0,3 - 2,7	13 - 20	17 - 20	2,5 - 4,5
[7], 6 Analysen	4,6 - 6,9	1,1 - 13	0 - 4,0	51 - 59	<0,1 - 0,4	0,5 - 1,5	3,8 - 21	13 - 19	1,8 - 2,8
[8]	4,0 - 6,5	0 - 3	-	49 - 53		-	13 - 20	17 - 20	2,5 - 4,5
[10]	7,5 - 9	0 - 3	-	51 - 52		-	35,5 - 36 ^{b)}		3,5 - 4

^{a)} CaO + Na₂O^{b)} FeO + Fe₂O₃