# Geologische, petrographische, geochemische und gesteinsphysikalische Untersuchungen an Dachschiefern

WOLFGANG WAGNER & HORST BAUMANN & JÖRG F. W. NEGENDANK & FRANK ROSCHIG

Kurzfassung: Das Naturprodukt Schiefer gilt als besonders haltbares Bedachungsmaterial. Traditionell wird in den einschlägigen deutschen Normen, im Gegensatz zu ausländischen Normen, den geologischen und petrographischen Beschreibungen ein hoher Stellenwert beigemessen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die innerhalb eines Forschungsprojekts gewonnenen grundlegenden Erkenntnisse zur Materialqualität von Schiefer dargestellt und möglichst in eine europäische Normung (EN 12326-1 und -2) eingebracht werden.

Um die natürliche Variation innerhalb der untersuchten Lagerstätten zu reduzieren, wurden aus sieben Vorkommen ganze Blöcke als Stichproben entnommen und gleich danach gespalten, um homogene Platten für die Untersuchungen zu gewinnen. Die Probennahme umfaßte deutsche Schiefer des Unterdevon und des Mitteldevon sowie spanische Schiefer des Ordovizium und Unterkambrium.

Es wird ein Überblick über die europäischen Schiefervorkommen und ihre tektonostratigraphische Zugehörigkeit gegeben. Dabei wird besonders auf die geologische Entwicklungsgeschichte der rheinland-pfälzischen Dachschiefer-Vorkommen eingegangen, so wie sie in neueren plattentektonischen Modellen erklärt werden.

Bei den petrographischen Untersuchungen wurden die Methoden nach DIN 52201 erweitert und neue Methoden entwickelt. Die Qualität der Schiefer wird durch die Qualität des Gefüges und eventuell vorhandener schädlicher Bestandteile bestimmt. Die petrographische Analyse erlaubt neben den Aussagen zur Qualität, auch eine Bestimmung der Herkunft des Schiefers.

Es wurden chemische Analysen nicht nur von den sieben Hauptentnahmestellen erstellt sondern von nahezu allen deutschen (inklusive alte Lagerstätten), europäischen und einigen außereuropäischen Dachschiefern. Diese chemischen Vollanalysen zeigen sehr viele Ähnlichkeiten trotz der unterschiedlichen Herkunft der Schiefer.

Dennoch können einige Besonderheiten aufgezeigt werden, die Vorkommens-typisch für gewisse Regionen sind und auch eine Herkunftstrennung von spanischen Schiefern und deutschen Schiefern (eine wichtige angewandte Fragestellung) erlauben. Hierzu erfolgte exemplarisch für eine Reihe von deutschen Schiefern und spanischen Schiefern eine Spurenelementanalyse, die bei Gehalten von Blei und Nickel Unterschiede zeigten.

Im Rahmen der gesteinsphysikalischen Untersuchungen wurden die bestehenden Methoden, die für die Untersuchung von Schiefer in Deutschland angewandt werden, kritisch untersucht (DIN 52102, DIN 52103, DIN 52104, DIN 52112, DIN 52201, DIN 52204 und DIN 52206).

Bei der Biegefestigkeit wurde dazu übergegangen, nur die Bruchlast zu Vergleichszwecken anzuwenden. Die ansonsten für Naturstein übliche Umrechnungsformel zur Biegefestigkeit kann beim Schiefer nicht angewendet werden, da sie wegen der Anisotropie zu atypischen Werten führt. Eine auf 1 mm Spaltstärke normierte Bruchlast führt hingegen zu gut vergleichbaren Werten.

Ferner zeigte sich, daß die Definition "lufttrocken" zu ungenau ist. Zur besseren Reproduzierbarkeit wurde dazu übergegangen, nur getrocknete (110°C) oder wassergesättigte Proben zu verwenden.

Mit einer eigens entwickelten Meßaparatur wurde die Ultraschall-Kompressionswellen-Geschwindigkeit in Richtung der Schieferung bestimmt. Dabei zeigt der Schiefer eine deutliche Anisotropie, wobei das Maximum parallel zum Streichen der Schieferung bzw. der Schichtung liegt (wenn eine deutliche Schichtstreifung vorhanden ist).

Die Festigkeitsminderung durch Belastungstests wie Säure-Test, Temperaturwechsel-Test und Frost-Tau-Wechsel-Test läßt sich besonders gut mit dem Abfall der Kompressionswellen-Geschwindigkeit bestimmen. Sie ist sehr gut mit dem Abfall der Biegefestigkeit nach den gleichen Tests zu vergleichen.

In einem Langzeit-Säure-Test wurde die Testdauer des normalen Säureversuchs (28 Tage) bis auf über 2000 Tage ausgedehnt. Hierbei zeigte sich, daß kalkfreie, qualitativ gute Proben selbst über diesen sehr langen Zeitraum kaum Änderungen und erst recht keine Gefügezerstörungen zeigen. Kalkhaltige Schiefer hingegen können eine Massenzunahme bis über 50 % verzeichnen. Bei Wellasbestzement-Platten (im Vergleich) lösen sich nach 500 Tagen Asbestfasern, obwohl keine Gefügezerstörung erfolgt.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse konnte in der neuen europäischen Schiefernormung inzwischen berücksichtigt werden, z. B. die petrographische Analyse und Details zum Biegeversuch.

Abstract: Geological, petrographical, geochemical and petrophysical investigations of roofing slate

The natural product is considered a particularly durable roofing material. In the German Standards high standing is traditionally attributed to the geological and petrographical methods, quite in contrast to the slate Standards of the neighbouring foreign countries. Within the scope of this approach, in context with new findings, should be included into a European Standardisation (EN 12326-1 and -2). In a research project on the geology of mineral deposits, petrography, geochemistry and petrophysics basic findings on the quality of the material were elaborated.

In Order to eliminate the natural Variation within the deposit that is a product of the geological history of origins, entire blocks were taken from the following seven deposits as random specimens and then split in Order to obtain plates from a part of the deposit considered homogeneous for rockphysical, geochemical and petrographical investigations:

	Age	Name of formation, location
I	Lower Devonian (Siegenian?)	Mayener Dachschieferfolge (Mayen roofing slate sequence), East Eifel, Rhineland-Palatinate (compare fig. 2, no. 4; fig 4)
II	Lower Devonian (Lower Emsian)	Hunsrück shales s. str., Hunsrück NW edge, Rhineland-Palatinate (compare fig. 4)
III	Lower Devonian (Lower Emsian)	Hunsrück shales s. str., Central Hunsrück, Rhineland-Palatinate (compare fig. 4)

IV	Middle Devonian (Eifelian)	Fredeburg beds, East Sauerland, Northrhine-Westphalia (compare fig. 2, no. 10; fig. 4)
V	Middle Devonian (Eifelian)	Fredeburg beds, East Sauerland, Northrhine-Westphalia (compare fig. 2, no. 10)
VI	Ordovician (Caradocian-Ashgillian)	Middle-Argüeira formation, La Cabrera, Province León, Spain (compare fig. 2, no. 1 and fig. 3, no. 2)
VII	Lower Cambrian	Cadana formation, A Terra Cha Province Lugo, Spain (compare fig. 2, no. 1 and fig. 3, no. 4)

For specimen VI the plates were intentionally taken from an area close to the surface where the technical qualities are still imperfect. In the meantime it is exactly this deposit that supplies good slate qualities, however, from deeper depth of mining. Specimen VII represents a phyllitic chlorite slate.

With a few exceptions the European slate deposits date back to the Palaeozoic Era. Almost without exception they are argillaceous slates with a similar sedimentaton history and to an overwhelming part "very-low-grade" metamorphic superimposed rocks, with a pressure-emphasised metamorphosis. They originate, however, from different tectonostratigraphic units.

Together with the slate deposits in Belgium/Luxembourg (fig. 2, no. 5) and possibly also the Moravian slate deposit (compare fig. 2, no. 8) the specimens I,II and III belong to the Rheno-Hercynian zone of the Variscides that formed the southern shelf of the Old Red-Continent. Their folding was caused by the collision of a terrane (so-called Central German ridge) with the above northern continent in the course of the Upper Carboniferous Age (comp. fig. 1 and fig. 4).

The large Spanish deposits (comp. fig. 2, no. 1 and 12, fig. 3) and these of Portugal (fig. 2, no. 6) form part of the Central Iberian zone located in the south of it. In spite of differing tectonostratigraphic classification the European roofing slates partly show deposit-geological similarities.

Orientated thin sections and polished cross-cuts on orientated specimens were made for the petrographical investigations.

The results of the petrographical analysis, essentially carried out pursuant to DIN 52 201 and/or EN 12326 are listed in table 1. Petrographically the specimens I-III and VI are argillaceous slates, specimens IV and V marly argillaceous slates and specimen VII is a phyllitic slate. The porphyroblasts (see table 1:P) may contain quartz, chlorite, carbonate and ore. The matrix (table 1:M) contains sericite and chlorite. In addition, the mica layers/l mm (German: Glimmerlagen/l mm) and the quantile (German: Mengenwert) were determined, i.e. the product from the number of mica layers/mm multiplied by the thickness of the mica layers multiplied by ten. The opaque components, in particular the ores, have a high probative strength for the origin of the slate. Pyrites are typical for German slates (specimens I-V) whilst small roundish framboids predominate in specimen I (and other slates of the eastern Eifel). Small cubic pyrites are typical for specimen II. Ilmenites (FeTiO<sub>3</sub>) only appear in the form of small ores in German slates. Relatively large ilmenites/Leucoxenes and pyrrhotite (German: Magnetkies) pyrites are on the other hand characteristic for the Spanish slates from Galicia (e.g. specimen VI) and León. The contour shapes point to sprouting during higher degrees of metamorphosis.

A modular mineral stock was estimated from the chemical analysis and the microscopical analyses that is listed in table 2 (statements in volume %). The determined mineral components correspond approximately to the standard values by BENTZ & MARTINI (1968) (see table 2, right). Depending on the grain size and the elongation parallel to the cleavage the quartz content may also have a negative or a positive effect on the workability. It is always positive for the hardness of the slate.

VAN RHLJN & MELKERT (1993) consider a sericite content of 46 % positive and below 40 % negative. A carbonate content less 5 % is also favourable and above 10 % unfavourable. VAN RHLJN & MELKERT consider a low chlorite/sericite (including muscovite and paragonite) ratio of below 0.6 favourable whilst higher values of above 0.6 are said to be worse. These approaches are disputed.

The results of the petrographic-mineralogical analyses are also reflected by the chemical analysis although the probative strength for the quality is lower in the overall meaning. Table 3 shows the chemical analyses of the specimen of the serial test; at the same time the proportion of CaO and MgO soluble in ethanoic acid has been determined (see table 3, bottom). Table 4 shows the analysis of other German roofing slates of the Lower Devonian and table 5 these of German roofing slates of the Middle Devonian and the Lower Carboniferous Age. Tables 6 and 7 contain Chemical analyses of the roofing slates from Spain. Table 8 shows other roofing slates in Europe and table 9 analyses of roofing slates from overseas. Slates with lower carbonate content (I-III and IV and table 4) can be clearly distinguished from those with a higher carbonate content (comp. table 3: IV and V and no. 1 in table 5).

Other properties may be characteristic for slates from certain regions. Thus, for example, the  $Na_2O$ - $K_2O$ -ratio in Spanish slates from the Valdeorras region (table 3: VI and table 6) often amounts to more than 1:5. In Germany slates (table 3, no. I-V and table 4 and 5) the same ratio is mostly clearly below 1: 4. Regarding trace elements the lead content in Spanish slates (table 6) is 4 to 5 times higher than in the slates of the eastern Eifel. In the slates of the eastern Eifel (table 4) the nickel concentration is 1.5 times higher to twice as high.

The main part of the project deals with petrophysical investigations. The analyses were carried out pursuant to the methods of DIN 52102 "Density", DIN 52103 "Water Absorption", DIN 52 104 "Freeze Thaw Testing", abbreviated FTW (German: Frost-Tau-Wechsel), DIN 52 112 "Bending Test", DIN 52 204 "Thermal Cycle Test", abbreviated TW (German: Temperatur-Wechsel) and DIN 52206 "Acid Test", abbreviated SV (German: Säure-Versuch).

Normally only the determination of the breaking load is provided for bending strength (DIN 52112). For better comparability the breaking load values were standardised to 1 mm thickness. The conversion factor from the breaking load to the bending strength otherwise applied in DIN 52 112 (and also EN 12326) that is normally used for natural stone was not used because it results in atypical values. The reason for it being the clear anisoptropy of the slate. For reasons of consistency it was eventually decided to use dried values only.

For the quantification of the disaggregation of the fabric after a stress test (e.g. after FTW, TW or SV) the ultrasound compression wave speed was determined. For this purpose special testing equipment was developed (comp. fig. 5). The water content of the specimen plays an important part for the different compression wave speeds (comp. fig. 7, 110 °C dry = German: trocken [110 °C]; air dry = German: lufttrocken; frozen = German: gefroren and water-saturated = German: wassergesättigt). If the compression wave

speed is measured in the direction of the cleavage from various directions, the slate shows a clear anisotropy. Mostly two maxima and minima are shown, with the maximum as a rule running parallel to the strike of the cleavage and the minimum running vertically to it. To the extent there is a clear strike of beds available, the maximum lies in the direction of the strike of beds (comp. fig. 9).

In two exceptional cases there are two speed maxima in one Spanish slate and in specimen V (fig. 11 and fig. 12). This can probably explained by additional disaggregation of the fabric as a result of micro-cracks.

Table 10 shows the water absorption (German: Wasseraufnahme) in percent by weight prior to and after the FTW as well as the bulk densities (each time the average from 10 measurements). For this purpose DIN 52 100 provides standard values and DIN 52 106 requirements (however, for cut stone). Figure 14 shows that there is a connection between the bulk density (German: Rohdichte) and the relative water absorption (Wm,a).

In table 11 the standardised breaking load in N is checked prior to stress tests such as SV, TW and FTW. The same was done with the compression wave speed and its variations in percent after the same stress tests in table 2. The clearest statement is obtained from the decline in the compression wave speed in % (table 12) or in the residual strength of the standardised breaking load in % after the relevant stress test. The abbreviations in table 11 and 12 mean:

- tr = getrocknet 110°C = dried 110°C
- ltr = lufttrocken = air dry
- w g = wassergesättigt = water saturated
- Restf = Restfestigkeit = residual strength after SW, TW and FTW in relation to the comparable condition prior to the test
- $g e_f = gefrorene Probe = frozen specimen$

<sup>°</sup> Figure 13 shows that the residual strength (standardised breaking load) in % of the original strength correlates well with the residual compression wave speed (German: Restkompressionswellengeschwindigkeit) after the acid test. The decline of strength prior and after the SV is of course essentially depending upon the calcium content of the specimens (e. g. very unfavourable in specimens IV and V). There is, however, also a considerable decline of the compression wave speed after FTW (comp. table 12) in specimen VI, a slate with a very high water absorption rate (compare table 10).

In a long-time acid test the duration of the normal acid test was extended up to 2000 days. The results are shown in figure 15. After this very long period the calcium-free specimen I hardly shows any changes, no destruction of the fabric and no increase in mass. Marly slates such as specimen IV and/or other slates with more than 20 %  $CaO_3$  provide an increase in mass of up to more than 50 %. The fabric is already destroyed after a few weeks. After 500 days asbestos fibres come loose on corrugated asbestos sheets (fig. 15 below).

A summary of the results provides stimuli for the new European slate standardisation (EN 12326). In the meantime a good many of the results of this work could be taken into consideration for this purpose such as the petrographical analysis and details on the bending test.

Résumé: Examens géologiques, pétrographiques, géochimiques et pétrophysiques d'ardoise

L'ardoise est considérée comme un matériau de couverture particulièrement durable. A l'opposé des normes en vigueur dans les pays voisins, les normes allemandes accordent une grande importance aux méthodes géologiques et pétrographiques. Les présents travaux tentent d'instaurer une nouvelle approche en parallèle avec les dernières connaissances acquises dans le domaine des normes européenes (EN 12326-1 et -2). Des données élémentaires concernant la qualité des matériaux ont été élaborées dans un projet d'étude qui tient compte de la connaissance des gisements, la pétrographie, la géochimie et la pétrophysique.

Le gisement est le produit d'une genèse géologique, et pour en faire abstraction, nous avons prélevé des blocs entiers dans 7 gisements; nous avons fendu ces blocs afin de disposer de plaques provenant d'une partie homogène du gisement. Sur ce matériel nous avons pratique nos examens pétrophysiques, géochimiques et pétrographiques.

	Age	Nom du gisement/localité
I	Dévonien inférieur (Siegenien?)	Mayener Dachschieferfolge (Schiste ardoisier de Mayen) Eifel de l'Est (Rhénanie-Palatinat) (voir fig. 2, nr. 4, fig. 4)
II	Dévonien inférieur (Emsien inf.)	Schiste du Hunsrück s. str. Bord N-O du Hunsrück, Rhénanie-Palatinat (voir fig. 4)
III	Dévonien inférieur (Emsien inf.)	Schiste du Hunsrück s. str. Hunsrück central, Rhénanie-Palatinat (fig. 4)
IV	Dévonien moyen (Eifelien)	Couches de Fredeburg, Sauerland oriental, Rhénanie du Nord-Westphalia (voir fig. 2: no. 10, fig. 4)
V	Dévonien moyen (Eifelien)	Couches de Fredeburg Sauerland oriental Rhénanie du Nord-Westphalia (voir fig. 2: no. 10)
VI	Ordovicien (Caradocien-Ashgillien)	Argüeira moyen, La Cabrera, Province du Leon, Espagne (voir fig. 2: no. 1 et fig. 3: no. 2)
VII	Cambrien inférieur	Cadana, A Terra Cha, Province de Lugo, Espagne (voir fig. 2: no. 1 et fig. 3: no. 4)

Les plaques de l'échantillon VI ont été prélevées volontairement dans une partie proche de la surface, où les caractéristiques techniques montrent des défauts. C'est pourtant de ce gisement que provient une ardoise de bonne qualité, mais elle est extraite à une plus grande profondeur. L'échantillon VII est une schiste de chlorite phyllitique.

A quelques rares exceptions près, les gisements d'ardoise européens datent du paléozoique. Il s'agit pratiquement toujours de schistes argileux avec un même historique de sédimentation; pour une grande partie, c'est une pierre métamorphe »very low grade«; leur métamorphose a été accentuée par la pression. Cependant, les pierres proviennent de différentes unités tectono-stratigraphiques.

Les échantillons I, II et III proviennent d'un gisement belgo-luxembourgois (graph. 2, no. 5) et peut-être aussi du gisement mährique (voir graph. 2, no. 8) situé dans la zone

rhénohercynique des Variscides qui forment le shelf Continental sud du vieux continent »Oldred«. Leur plissement est intervenu à la suite d'une collision entre un terran sud (qu'on appelle le seuil central européen) avec le continent nord au cours du Carbonifère supérieur (voir graphiques 1 et 4).

Les grands gisements espagnols (voir fig. 2: no. 1 et 12; fig. 3) et portugais (fig. 2: no. 6) font partie de la zone ibérique centrale située au sud de la précédente. Malgré une appartenance tectonostratigraphique différente, l'ardoise européenne montre des similitudes dont certaines sont dûes à l'emplacement du gisement.

Des coupes fines ainsi que des coupes plies des différents échantillons ont servi de substrat pour les différents tests.

Les résultats de l'analyse pétrographique se sont orientés en grande partie au DIN 52201 ou EN 12326, et ils sont listés dans le tableau 1. D'un point de vue pétrographique, les échantillons I-III et VI sont des schistes argileux, les échantillons IV et V des marnes argileuse, et l'échantillon VII des schistes phyllitique. Les prophyroblastes (voir Tabl. 1:P) peuvent contenir du quartz, du chlorite, du carbonate ou du minerai. Les pâtes (Tabl. 1:M) contiennent du séricite et du chlorite. De plus, nous avons recherché les couches de mica/1mm (all.: Glimmerlage/1mm) et la valeur quantitative (all.: Mengenwert), c'est à dire le produit du nombre des couches de mica/mm x l'épaisseur de ces couches x 10. Les composants opaques, en particulier le minerai, sont significatifs de l'origine d'ardoise.

Quelques petits pyrites sont caractéristiques d'ardoise allemand (échantillons I-V), particulièrement les petits framboides ronds de l'échantillon I (présents également dans d'autres schistes de la Eifel de l'Est). Les petits pyrites cubiques sont typiques de l'échantillon II. Dans l'ardoise espagnol de Galice et de Leon (échantillon VI p.ex.) est caractérisé par la présence d'ilménites/leukoxènes et de pyrrhotine. Les profils indiquent une poussée sourvenue durant une phase élevée de la métamorphose.

Les analyses chimiques et microscopiques ont conduit à une estimation modale des minerais telle qu'elle est indiquée au Tableau 2 (données en volume-%). Les teneurs minérales indiquées correspondent à peu près aux valeurs de BENTZ & MARTINI (1968) (voir Tabl. 2 à droite). En fonction de la taille du grain et de sa situation parallèle par rapport à la stratification, la teneur en quartz peut influer positivement ou négativement sur la facilité de travailler la pierre. Dans tous les cas, elle augmente la dureté de la pierre.

VAN RHIJN & MELKERT (1993) pensent qu'une teneur en séricite de 46% est bonne, une teneur audessous de 40 % en revanche ne l'est pas. Une teneur en carbonate audessous de 5% est aussi bonne, audessus de 10 % ne l'est pas. VAN RHIJN & MELKERT pensent qu'un rapport chlorite/séricite (y compris la muscovite et la paragonite) de moins de 0,6 est avantageux et une valeur au-dessus de 0,6 est moins propice. Cependant, ces opinions sont contestées.

Les résultats de l'analyse pétrographique et minéralogique sont également reflétés par l'analyse chimique, bien qu'ils aient une signification moindre pour la qualité de la pierre.

Le Tableau 3 montre les analyses chimiques des échantillons réalisées dans une expérience systématique; de plus, les teneurs de CaO et de MgO solubles dans le vinaigre ont été déterminées (voir Tab. 3 en bas). Le Tableau 4 montre les analyses chimiques d'autres ardoises allemandes du Dévonien inferieur, Tab. 5 montre celles du Dévonien moyen et du Carbonifère inférieur. Les tableaux 6 et 7 contiennent des analyses chimiques d'ardoise d'Espagne, le tableau 8 celles d'autres ardoises d'Europe et le Tableau 9 celles d'ardoises de couverture d'outre-mer. Les schistes ayant une faible teneur en carbonate (I-III et VI et Tabl. 4) se distinguent facilement de ceux dont la teneur est plus élevée (voir Tabl. 3: IV et V ainsi que no. 1 Tabl. 5). D'autres caractéristiques peuvent être typiques des schistes de certaines régions. Ainsi le rapport  $Na_2O-K_2O$  dans les ardoises espagnols de la région de Valdeorras (Tab. 3: VI et Tab. 6) est souvent supérieur à 1: 5. Le même rapport est souvent bien inférieur à 1:4 pour les ardoises allemands (Tab. 3: no. I-V et Tab. 4 et 5).

En ce qui concerne les élémentstraces, la teneur en plomb des ardoises espagnols (Tab. 6) est de 4 à 5 fois supérieure que celle des ardoises de la Eifel de l'Est (Tab. 4). La concentration de nickel dans les ardoises de la Eifel de l'Est (Tab. 4) est de 1,5 à 2 fois supérieure.

La majeure partie du projet traite des examens pétrophysiques. Les analyses sont effectuées selon les normes DIN 52102 »Masse voluminique apparente à l'état sec«, DIN 52 103 »Absorption d'eau«, DIN 52 104 »Essai de gel et dégel« (en allemand: Frost-Tau-Wechsel = FTW), DIN 52 112 »Essai de flexion«, DIN 52204 »Essai aux Variation de température« (en allemand: Temperaturwechselversuch = TW) et DIN 52 206 »Essai de la résistance aux acides« (en allemand: Säureversuch = SV).

Pour tester la résistance à la flexion, (DIN 52 112), seule la détermination de la charge de rupture est prévue. Afin de faciliter la comparaison, les valeurs de ruptures ont été normées à un millimètre d'épaisseur. Nous n'avons pas retenu les formules que la norme DIN 52 112 (et EN 12326) (Module de rupture charactéristique; en allemand: Biegefestig-keit) préconise habituellement pour convertir la charge de rupture d'une pierre naturelle en résistance à la flexion, car elles induisent des valeur atypiques en raison de l'anisotropie évidente d'ardoise.

Nous avons opté pour des valeurs sèches exclusivement, afin de pouvoir procéder plus facilement à des réductions.

La recherche des vitesses des ondes de compression (ultrason) devait nous aider à quantifier la désagrégation de la structure après un test à la charge (p.ex. FTW, TW ou SV). Pour ce faire, un dispositif de vérification a été spécialement mis au point (voir fig. 5). La teneur en eau de l'échantillon joue un rôle important dans les différentes vitesses des ondes de compression (voir fig. 7; seché (110°C) = en allemand: getrocknet/trocken (110°C); sec à l'air = en allemand: lufttrocken; gelé = en allemand: gefroren; saturé en eau = en allemand: wassergesättigt).

Si l'on mesure la vitesse des ondes de compression en partant de différentes directions par rapport à la stratification, l'ardoise montre une très claire anisotropie. La plupart du temps, il y a deux valeurs maximales et deux valeurs minimales, les maxima se situant en règle générale parallèlement aux directions des clivages et les minima verticalement. Aussitôt que nous sommes en présence de stries de stratification très clairement visibles, les maxima se situent en direction de ces dernières (voir fig. 9).

Deux exceptions apparaissent cependant: dans un schiste espagnol et dans l'échantillon V il y a deux maxima de vitesse (fig. 11 et 12). Ceci est probablement du à une désagrégation supplémentaire de la structure en raison de micro-fissures.

Le Tableau 10 montre l'absorption d'eau (allemande: Wasseraufnahme) en mass – % avant et après FTW ainsi que les masses voluminiques apparentes (moyenne de 10 messures). La norme DIN 52 100 en indique l'étalonnage et la norme DIN 52 106 les exigences (pour les pierres d'ouvrage, il est vrai). Le fig. 14 montre qu'il existe un rapport entre la masse voluminique apparente (allemand: Rohdichte) et l'absorption d'eau relative (allemand: Wm, a).

Le Tableau 11 montre la charge de rupture normalisée en N avant les tests à la charge, SV, TW et FTW; de même, au tableau 12, la vitesse des ondes de compression et leur modification en pour-cent après les tests à la charge. La diminution de la vitesse des ondes de compression en % (Tabl. 12) ou la résistance restante à la charge de rupture normalisée en % après les différents tests à la charge sont les faits les plus significatifs. Les abréviations dans les Tabl. 11 et 12 signifient: tr = seché (allemand: getrocknet) 110°, ltr = sec à l'air (allemand: lufttrocken), wg = saturé en eau (allemand: wassergesättigt), Restf = résistance restante (allemand: Restfestigkeit) après SV, TW et FTW par rapport à un état comparable avant les tests; (gef = test gelé, allemand: gefroren).

Le fig. 13 montre que la résistance restante (allemand: Restfestigkeit; charge de rupture normalisée) en % de la résistance initiale a une bonne corrélation avec la vitesse des ondes de compression restantes (allemand: Restkompressionswellengeschwindigkeit) après le tests à l'acide (SV). La diminution de la résistance restante avant et après SV dépend bien entendu nettement de la teneur en calcaire des échantillon VI, une ardoise à forte absorption d'eau (voir Tabl. 10) montre une forte diminution de la vitesse des ondes de compression après FTW (voir tableau 12).

Dans un test de longue durée à l'acide, la durée habituelle de l'èxposition a été prolongée à plus de 2000 jours. Les résultats apparaissent au fig. 15. L'échantillon I, exempt de calcaire, n'a pratiquement pas été modifié même après une si longue exposition, pas de destruction de la structure, pas d'augmentation de la masse. Les ardoises carbonaté tels que l'échantillon IV et d'autres ardoises d'une teneur de plus de 20 % de CaCO<sub>3</sub> augmentent leurs masses jusqu'à plus de 50 %. Après quelques semaines de test, des lésions apparaissent dans les structures. Sur les plaques d'amiante-ciment Well, les fibres d'amiante sont libérées après 500 jours.

Dans un récapitulatif de tous ces résultats, des incitations ont été faites quant aux nouvelles normes européennes (EN12326). Depuis, bon nombre de résultats ont pu être pris en compte, tels que l'analyse pétrographique et les éléments concernant l'essai de flexion.

### 1. Einleitung

### 1.1. Projekt, Aufgabenstellung

Die Verwendung des Naturproduktes Schiefer ist in den vergangenen zehn Jahren deutlich angestiegen. Damit sind auch diesbezügliche Qualitätsfragen wieder in den Vordergrund gerückt. Immerhin hat dieses Naturprodukt den Ruf, eines der haltbarsten Bedachungsmaterialien überhaupt zu sein. Man kennt über 250 Jahre alte Schieferdeckungen, die noch in funktionstüchtigem Zustand sind.

Bei der Qualitätsbeurteilung von Schiefer wird geologischen und petrographischen Methoden traditionell ein hoher Stellenwert beigemessen (z. B. bei der Erarbeitung der DIN 52201 ca. 1933). Ziel der vorliegenden Arbeit war, diesen Ansatz zusammen mit neuen Erkenntnissen in eine europäische Normung (Erarbeitung der neuen DIN prEN 12326 Teil 1 und 2) einzubringen. Hierzu sollten in einem Forschungsprojekt mit Hilfe der Lagerstättenkunde, Petrographie, Geochemie und Gesteinsphysik grundlegende Erkenntnisse erarbeitet werden. Dabei wurden die bislang vorgesehenen technischen Methoden (DIN 52201) mit moderneren Methoden der Petrographie und Gesteinsphysik verglichen.

Das erweiterte Ziel des Projektes ist die wissenschaftliche Erarbeitung von Grundlagen zur Untersuchung der Lagerstätten und Qualitäten von Dachschiefern als Voraussetzung für eine Optimierung der Produktion und der Qualitätskontrolle in den Betrieben.

### 1.2. Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden 3 Jahre lang (1989-1991) als Projekt im Rahmen des Programms "Wirtschaftsnahe Forschung" vom Ministerium für Wirtschaft, Verkehr,

Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz unterstützt. Der Titel des Forschungsprojekts lautete "Lagerstättenkunde, Qualitätskontrolle und Nutzung des Dachschiefers". Die wissenschaftliche Arbeitsgruppe bestand aus den aufgeführten Autoren. Die Projektleitung lag in den Händen von Prof. Dr. J. F. W. Negendank und Dr. W. Wagner.

Die Untersuchungen erfolgten in den Labors der Abt. Geologie an der Universität Trier. Daneben wurde das Projekt wesentlich durch die Firma Rathscheck Schiefer und Dach-Systeme KG in Mayen mit umfangreichen Unterlagen, Reisekostenunterstützungen und Probenahmearbeiten unterstützt.

Weiterhin stellten die Firmen Johann & Backes OHG, Bundenbach; Nikl. Theis Nachf. Böger Schieferwerk GmbH, Bundenbach, und Magog Schiefergruben GmbH & Co. KG, Fredeburg, Schieferproben zur Verfügung und halfen auch bei der aufwendigen Probenvorbereitung.

Allen Beteiligten gilt unser Dank.

1.3. Qualitätsbeurteilung von Schiefer

Diese Fragestellung möchten wir hier detailliert erläutern:

In die Beurteilung der Qualität eines Dachschiefers greifen vier ganz verschiedene Bereiche ein (HOPPEN 1987); es sind dies

- Materialeigenschaften (Lagerstättensituation, Gesteinsbeschaffenheit etc.)
- Gewinnung und Bearbeitung (Abbau, Fachregeln, Auslesekontrollen)
- Verlegung (Deckarten, Befestigung, Unterkonstruktion)
- Standort und Exposition (Standort des Hauses im Tiefland, Mittelgebirge, Hochgebirge; am Meer oder im Inland; auf dem Land oder im Industriegebiet; Exposition des Daches auf der der Sonne zu- oder abgewandten Seite)

Im wesentlichen machen die vorliegenden Untersuchungen Aussagen zur Qualitätsebene Material und z. T. zur Bearbeitung. Zur Beurteilung dieser beiden Ebenen sollten folgende Überlegungen berücksichtigt werden:

Im Schnitt sind 10 bis 15 % der absolut bewegten Schiefermasse (bei Tagebau 1-5 %, bei Tagebau mit Sägen ca. 10 %) als Dachschiefer verwendungsfähig. Bei der Untersuchung von Dachschieferplatten aus einem Gebinde muß daran gedacht werden, daß Schiefer aus verschiedenen geologischen Lagern stammen können, und daß diese Lager selbst Variationen aufweisen können. Hinzu tritt, daß bei einem Schiefer, der einen erkennbaren Winkel zwischen Schiefer, bei dem Schichtung besitzt, meist weniger Variationen auftreten als bei einem Schiefer, bei dem Schichtung und Schieferplatte, die ganz andere Eigenschaften besitzt als die Schieferplatte, aus der über- bzw. unterlagernden ehemaligen Tonlage. Bei einem Lager, das einen Winkel zwischen Schieferung und Schichtung und einen Wechsel Ton – Silt besitzt, hat der Schiefer des Lagers aufgrund des Schieferungsvorgangs und damit "inniger Verwachsung" der Silt- und Tonpartikel einen einheitlichen Charakter, die Variationen sind geringer.

Bei der Prüfung von Dachschieferplatten aus einem Gebinde muß auch mit folgender Situation gerechnet werden. Bei einer Lagerstätte mit überwiegend sehr guter und selten auftretender schlechter Materialqualität kann bei fehlender Selektion das Gebinde diese schlechte Qualität aufweisen, während eine Lagerstätte mit statistisch mittlerer Qualität durch hohe Selektion den gleichen Standard wie erstere erreichen kann (vgl. WAGNER 1992). Die geprüften Platten sagen also nicht unmittelbar etwas über die Qualität der Lagerstätte aus.

### 1.4. Probennahme

Bei der Untersuchung einer Schieferlagerstätte, die ja auch Variationen aufweist, ist es nicht möglich, ein Lager im Quer- oder Längsschnitt Millimeter für Millimeter zu untersuchen. Die Gewinnungsbereiche sind meist klein und es ist nur der im Abbau befindliche Lagerteil aufgeschlossen. Man ist also darauf angewiesen, repräsentativ erscheinende Proben zu nehmen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in einem Reihenversuch ganze Blöcke als Stichproben entnommen und der Spalterei zugeführt, um genügend Platten aus einem als homogen erscheinenden Teil des Lagers für gesteinsphysikalische, geochemische und petrographische Untersuchungen vorliegen zu haben (vgl. Kap. 4.4.).

Im einzelnen wurden Proben aus folgenden Vorkommen entnommen:

	Alter:	Formationsname/Lokalität
Ι	Unterdevon (Siegen?)	Mayener Dachschieferfolge, Osteifel, Rheinland-Pfalz (vgl. Abb. 2, Nr. 4; Abb. 4)
II	Unterdevon (Unterems)	Hunsrückschiefer i. e. S., Hunsrück NW- Rand, Rheinland-Pfalz (vgl. Abb. 4)
III	Unterdevon (Unterems)	Hunsrückschiefer i. e. S., Mittelhunsrück, Rheinland-Pfalz (vgl. Abb. 4)
IV	Mitteldevon (Eifel)	Fredeburger Schichten, Ost-Sauerland, Nordrhein-Westfalen (vgl. Abb. 2, Nr. 10; Abb. 4)
V	Mitteldevon (Eifel)	Fredeburger Schichten, Ost-Sauerland, Nordrhein-Westfalen (vgl. Abb. 2, Nr. 10)
VI	Ordovizium (Caradoc-Ashgill)	Mittel-Argüeira, La Cabrera, Provinz León, Spanien (vgl. Abb. 2, Nr. 1 und Abb. 3, Nr. 2)
VII	Unterkambrium	Cadana, A Terra Cha, Provinz Lugo, Spanien (vgl. Abb. 2, Nr. 1 und Abb. 3, Nr. 4)

Die Probe VI wurde absichtlich in einem oberflächennahen Bereich entnommen, wo die technischen Eigenschaften noch mangelhaft sind. Bei Probe VII handelt es sich um einen phyllitischen Chloritschiefer.

Neben diesen größeren Stichproben, die für alle Untersuchungen benutzt wurden, wurden für Einzeluntersuchungen auch weitere Stichproben zu Vergleichszwecken herangezogen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind also nicht in allen Eigenschaften mit den Resultaten der untersuchten Platten zu vergleichen, da erstere einen definierten, etwa m Volumenanteil des Lagers (stichprobenartig) umfassen, während die entnommenen Platten aus einem Gebinde aller Wahrscheinlichkeit nach über das gesamte in Abbau befindliche Lager oder verschiedene Lager streuen.



Abb. 1: Permische Plattenkonfiguration mit Lage der Proben I-VII. Punktraster: Cadomisches Basement belegt; \* = Spuren der Saharavereisung; NA, SA: Nord- und Südamorika (aus Franke & MEISCHNER & ONCKEN 1996).

1.5. Geologische bzw. tektonostratigraphische Zuordnung der europäischen Dachschiefer

Bis auf zwei Ausnahmen (Schiefervorkommen in den Pyrenäen, Abb. 2, Nr. 14 und Schiefervorkommen in Italien-Ligurien Abb. 2, Nr. 9) sind alle Schiefervorkommen Europas paläozoischen Alters. Obwohl es sich nahezu durchweg um Tonschiefer ähnlicher Sedimentationsgeschichte (vgl. Kap. 1.6.) und zum überwiegenden Teil um very-lowgrade-metamorph überprägte Gesteine, bei druckbetonter Metmorphose, handelt, entstammen sie doch unterschiedlichen tektonostratigraphischen Einheiten.

Die moderne plattentektonische Sicht der europäischen Variskiden, der die meisten Schiefervorkommen entstammen, spricht von einem Puzzle von verschiedenen kontinentalen Mikroplatten (Terranen), die dann zum späteren Orogen "zusammengebaut" wurden (vgl. FRANKE & MEISCHNER & ONCKEN 1996 und FRANKE & DALLMEYER & WEBER 1995).

Nach paläomagnetischen Befunden beginnt die Driftgeschichte des nördlich gelegenen Avalonia (vgl. Abb. 1) während des Ordovizium mit der Trennung von Amorika und Gondwana. Bis zum Silur hatte sich dieser Mikrokontinent weitgehend an Baltica angelehnt (Gegend des heutigen Skandinavien u. a.). Ihm folgte dann ebenfalls in einer Nordrichtung der Mikrokontinent Amorika und näherte sich im späteren Ordoviz bis tieferen Unterdevon an den Avalonischen Südrand des zum Oldred-Kontinents verschmolzenen Avalonia, Baltica und Laurentia an. Die bereits kaledonisch gefalteten Schiefervorkommen von Nordwales (z. B. Penrhyn; Abb. 2, Nr. 2) und Vorkommen in Nordnorwegen (vgl. Abb. 2, Nr. 11) gehören zu diesem Kontinent.

Vom späten Unterdevon an hat sich etwa entlang der alten Nahtzone Avalonia/Amorika ein neues Becken gebildet, dessen Dehnung bis zur Bildung des rhenoherzynischen (sog. Gießener) Ozeans führte. Der südliche Schelf des alten Oldred-Kontinents (am Nordrand des Gießener Ozeans) ergab die rhenoherzynische Zone der Variskiden. Diese Zone enthält die Entstehungsgebiete der westdeutschen Dachschiefer (Probe I, II und

## Geolog., petrographische, geochemische und gesteinsphysikal. Untersuchungen an Dachschiefern

III). Auch das belgisch-luxemburgische Schiefervorkommen von Martelange (Abb. 2, Nr. 5) und möglicherweise auch das mährische Schiefervorkommen (Moravosilesium) (vgl. Abb. 2, Nr. 8; vgl. WAGNER & STANEK 1991) sind dieser Zone zuzuordnen.

Das südliche Saxothuringikum als Teil von Amorika beinhaltet die thüringischen Schiefervorkommen (Abb. 2, Nr. 7). Ferner ist das Zentral- und Nordamorikanische Massiv mit dem kleinen Schiefervorkommen in Maël Charhaix (Bretagne) hinzuzurechnen.



Abb. 2: Dachschiefer-Gewinnungsstätten in Westeuropa (Numerierung: im Text erwähnte Vorkommen).



Abb. 3: Geologische Übersichtskarte von Spanien mit den wichtigsten Dachschiefer-Gewinnungszonen.

Die großen spanischen Schiefervorkommen (vgl. Abb. 2, Nr. 1 und 12, Abb. 3) und die von Portugal (vgl. Abb. 2, Nr. 6) gehören zur südlich davon gelegenen Zentraliberischen Zone.

Die europäischen Dachschiefer haben somit auch bei lagerstättenkundlichen Ähnlichkeiten eine unterschiedliche Entstehung, Entstehungsgeschichte und tektonostratigraphische Zugehörigkeit.

1.6. Geologische Entstehung von Dachschiefer

Dachschiefer sind gut spaltbare und verwitterungsbeständige Ton- und Siltschiefer, die durch Einengung, Faltung und sehr schwache, druckbetonte Metamorphose eine starke Durchschieferung (englisch: slaty cleavage) erhalten haben. Neben diesen reinen Tonschiefern sind auch Dachschiefer mit höherem Kalkgehalt (laut DIN prEN 12 326 auch "carbonate slate" genannt) oder etwas höher metamorphe Phyllitschiefer untergeordnet als Dachschiefer verwendbar.

Die Bildung eines Dachschieferlagers wird nur selten und nur in besonderen Sedimentationsräumen bei besonders feinkörniger Sedimentation erreicht. Meist liegt der Bildungsraum in tieferem Wasser oder in weiterer Entfernung vom Liefergebiet, so daß gröberkörnige Einlagerungen vergleichsweise selten vorkommen. Im Bereich des Mayener Dachschiefers (Moselschiefer) und des Hunsrückschiefers i. e. S. handelt es sich bei seltenen Einlagerungen von Sand- und Siltlagen wahrscheinlich um "Tempestite", also Resultate von Sturmflutereignissen an der entfernteren Küste. Die Entstehung einer Dachschieferlagerstätte soll hier exemplarisch anhand der Dachschiefer von Rheinland-Pfalz (Osteifel und Hunsrück) erläutert werden. DITTMAR (1996) legte hierzu ein modernes plattentektonisches Konzept in Anlehnung an Erkenntnisse unter anderem von FRANKE & ONCKEN (1990) vor, das indirekt auch die Dachschieferbildung erklärt:

Die älteste Ablagerung von tonschieferfähigen reinen Tonen erfolgt im Mayener Raum in einem sogenannten "Moselgraben" (Probe I) bereits zur Siegen-Zeit. Erst im Unterems bilden sich auch im Altlayer Raum (Probe II) und im zentralen Hunsrück (Probe III) Becken aus, in denen Tonschiefer entstehen konnten. Diese Beckenbildung wurde vermutlich durch eine gesteigerte Extension der kontinentalen Kruste bewirkt. Zeitgleich erfolgte die Öffnung des Lizard-Gießen-Ostharz-Ozeans südlich des heutigen Rheinischen Schiefergebirges. Am Südrand des Ozeans setzte im Oberdevon die nach Südosten gerichtete Subduktion der ozeanischen Kruste ein, so daß ein aktiver Plattenrand entstand. Die tieferen Stockwerke dieses ehemaligen Kontinentalrandbereichs sind heute in der mitteldeutschen Kristallinschwelle erhalten. Am aktiven Plattenrand wurden Turbidite abgelagert (Gießener Grauwacke). Im höheren Unterkarbon kollidierte dann dieser südliche Mikrokontinent (sog. Mitteldeutsche Schwelle) mit dem nördlich gelegenen rhenoherzynischen Becken. Dabei wurde die ozeanische Kruste weitestgehend subduziert, so daß Relikte des Ozeans im Osteifel-Hunsrücker Raum nicht mehr sicher auszumachen sind. Die Kollision bewirkte dann bis zum Oberkarbon die Faltung der Sedimente der nördlich gelegenen rhenoherzynischen Zone. DITTMAR geht davon aus, daß die sedimentären Abfolgen von ihrem kontinentalen Unterlager abgeschert wurden und mehrere Decken-Einheiten bilden, wie z. B. die Hunsrück-Decke und der nördlich davon gelegene Schuppenfächer der Moselmulde. Dieser Schuppenfächer ist nach neueren Erkenntnissen aus dem aktuellen Dachschieferbergbau (WAGNER & HOPFEN 1995) wesentlich mehr verschuppt als bisher angenommen.

Diese tektonischen Strukturen gehören aber nur dem unteren Teil eines ganzen Deckenstapels bzw. einer großräumigen Duplexstruktur an, die im Hangenden ursprünglich auch ein weiteres Deckensystem (Lizard-Gießen-Harz-Decken) mit den typischen Sedimenten der Gießener Grauwacke und vielleicht Teilen des Ozeanbodens enthielt. Dieses hangende Deckensystem ist aber inzwischen im westlichen Rheinischen Schiefergebirge gänzlich erodiert, so daß es sich bei den dort anstehenden tektonischen Einheiten um relativ tief gelegene Teile des Orogens handelt. Allerdings ist die ehemalige tektonische Überlagerung aus dem Metamorphosegrad der heute anstehenden Gesteine, so auch der Dachschiefer, zu folgern.

Abb. 4 stellt die verschiedenen Stadien dieser Entwicklung dar, wobei der untere Teil (orogenes Endstadium) der Abbildung keinen konkreten Zeitabschnitt wiedergibt, sondern lediglich die vermutete Gesamtgeometrie des Gebirgsteiles vor dem Einsatz der spätorogenen Extension und der späteren Einebnung zeigt.

## 2. Petrographische Untersuchungen

Für die petrographischen Untersuchungen wurden orientierte Dünnschliffe zur Bestimmung des transparenten Mineralbestandes sowie Anschliffe zur Analyse der Erzphasen angefertigt. Die Orientierung der Dünnschliffe ermöglicht dabei die Bestimmung des Winkels von Schieferungs- und Schichtflächen mit dem Mikroskop. Neben der mineralspezifischen Analyse wurden die Anzahl der Glimmerlagen pro Millimeter und die Gefügeausbildung des Schiefers als qualitatives und für bestimmte Lokalitäten charakteristisches Merkmal bestimmt. Wolfgang Wagner & Horst Baumann & Jörg F. W. Negendank & Frank Roschig







Abb. 4: Skizzen zur geologischen Entwicklung im Bereich der Vorkommen von Probe I, II und III (nach DITTMAR 1996).

Die petrographische Analyse anhand der Dünnschliffe und Anschliffe ergab, daß eine genaue Charakterisierung der Schiefer möglich ist. Die Assoziation der Mineralphasen und die Feststellung der Gefügemerkmale im Dünn- und Anschliff erlaubt die Angabe des Vorkommens, d.h. der Provenienz. Damit ist es erstmals möglich, die Herkunft des Dachschiefers (mit der Untersuchung am besten mehrerer Schieferplatten, manchmal genügt bei sehr typischen Charakteristika auch nur eine einzige Platte) anzugeben. Dabei besteht das Untersuchungsverfahren aus einer Kombination der Dünnschliffuntersuchung (mit dem Polarisationsmikroskop) und der Anschliffuntersuchung (mit dem Erzmikroskop). Im Dünnschliff lassen sich die Porphyroblasten bestimmen und so der Anteil an Karbonaten und organischer Substanz, und wie diese im Schiefer eingebunden sind (s. Tab. 1). Damit ist auch die petrographische Ansprache möglich, ob reiner Tonschiefer, Tonschiefer mit Siltlinsen oder Siltschiefer vorliegt. Ebenso ist der Winkel zwischen Schieferung und Schichtung feststellbar.

Die opaken Bestandteile sind einmal feinverteilter Graphit sowie die Erzbestandteile. Bei den Erzen, die in Porphyroblasten und als Grundmasseerze regelmäßig bis unregelmäßig verteilt auftreten, schwankt die Größe von über 1 mm bis zu Pigmentgröße. Der Anteil in Vol.-% kann sich ebenso zwischen weniger als 1 % bis über 7 % bewegen. Die einzelnen Phasen eignen sich hervorragend zur Herkunftsunterscheidung.

 Pyrit FeS<sub>2</sub> (kub.): quadratisch, rund-kugelig, pigmentartig; Framboide verschiedener Größe, Framboidnester, z. T. perlschnurartig aufgereiht, Pyritlagen entlang der Schiefrigkeit.

Pyrite sind in deutschen Schiefern charakteristisch, so die Framboide in Probe I bzw. andere Schiefer der Osteifel, quadratische Pyrite für Probe II, während Pyrite in spanischen Schiefern seltener sind. (z. B. Probe VI u. a.)

- <sup>-</sup> Markasit  $FeS_2$  (orth): Fehlt völlig in deutschen Schiefern (Proben I bis V), tritt aber in spanischen Schiefern (z. B. Probe VI u. a.) neben Magnetkies (Pyrrhotin) auf.
- Magnetkies Fe<sub>1x</sub>S<sub>x</sub> tritt in großen Kristallen und in Bändern parallel der Schieferung auf, z. T. mit Kupferkies verknüpft. Fehlt völlig in deutschen Schiefern (Proben I bis V) und ist typisch für die spanischen Schiefer, was einen höheren Metamorphosegrad anzeigt (Temperatur).
- Kupferkies CuFeS<sub>2</sub> vergesellschaftet mit Magnetkies und Pyrit. Typisch in spanischen Schiefern, z. B. Probe VI u. a., wenn auch in geringen Anteilen.
- Ilmenite FeTiO<sub>3</sub> treten in deutschen Schiefern (Proben I bis V u. a.) als kleine Erze auf, bilden jedoch in den spanischen Schiefern aus Galizien und León große Porphyroblasten, die z. T. in Leukoxen umgewandelt sein können. Die Umrißformen weisen auf Sprossung während höherer Metamorphosegrade hin.
- Leukoxen: wie Ilmenit
- Titanomagnetite C 1 C 7 (deuterische Oxidationsstufen und hydrothermale bzw. Tieftemperaturoxidationsphasen mit Maghemit, Hämatit und Titanit): äußerst selten. Auftreten z. B. im Schiefer von Penrhyn/Nord Wales.
- "Limonit": selten (Mischung aus Goethit und Lepidokrokit).

In den Erzanschliffen sind als Erzminerale, überwiegend Pyrite und ihre verschiedenen Ausbildungsformen, Ilmenite, Leukoxene, Magnetkies, Markasit und manchmal auch Kupferkies zu erkennen.

Die deutschen Schiefer Proben I bis V besitzen dabei aufgrund ihres geringeren Metamorphosegrades überwiegend Pyrite und kleine Ilmenite, während ein Großteil der spanischen Schiefer große Ilmenite / Leukoxene und Magnetkies mit selten Kupferkies und Markasit als Folge eines höheren Metamorphosegrades aufweisen. Die Probe I ist deutlich durch filigrane, pigmentartige Pyritframboide von den Proben II und III zu

Tab. 1: Petrogra	Iphie und Gefüge	der Proben der Re	sihenuntersuchung	g (Dünnschliffaus	vertung).		
Lokalität	Ι	II	Ш	IV	V	N	IIA
Petrographische Beschreibung	Tonschiefer mit Siltlinsen	Tonschiefer mit Siltlinsen	Tonschiefer mit Siltlinsen	mergeliger Tonschiefer mit Siltlinsen	mergeliger Tonschiefer mit Silt- (Karbonat-)linsen	Tonschiefer	Phyllitschiefer
	P.: Quarz, Chlorit, (selten Karbonat)	P.: Chlorit z. T. Quarz (selten) Muskovit und Karbonat	P:: Quarz, Chlorit, (selten Karbonat)	P.: Quarz, Karbonat, Erz	P.: Quarz, Karbonat, Erz	P.: Quarz, Chlorit, Muskovit	P.: Karbonat, Quarzit, Quarz, Erz
	M.: Sericit, Chlorit	M.: Sericit, Chlorit	M.: Sericit, Chlorit	M.: Sericit, Chlorit	M.: Sericit, Chlorit	M.: Chlorit, Sericit	M.: Fe-Chlorit
Einzelproben	1,1,1,2,1,3,1,4,1,5	П,1, П,2, П,3, П,4, П,5	Ш,1, Ш,2, Ш,3, Ш,4, Ш,5	IV,1, IV,2, IV,3, IV,4, IV,5	V,1, V,2, V,3, V,4, V,5	VI,1, VI,2, VI,3, VI,4, VI,5	VII,1 VII,2, VII,3, VII,4, VII,5
Winkel sf/ss (Einzelmessungen)	5° 7° 10° 10° 11°	8° 8°	//	// kl. 10° 12° 15°	8° ≈8° 7°	ø 15°	klein
Glimmerlagen/1 mm (Einzelwerte)	105 94 87 92 111	102 101 110 105 80	87 83 83 80 95	61 65 66 64 66	52 57 53 56 53	114 82 94 80 102	90 65 78 70 86
Glimmerlagen/1 mm (Durchschnitt)	97,8	9'66	85,6	64,4	54,2	94,4	77,8
Mengenwert (Durchschnitt)	2,8	4	4,1	1,3	1,2	2,6	6,4
Bemerkungen	1,3: Erzlinsen und Sültlagen 1,4: Siltlinsen und Erzameicherung	wenig Erze, Pyrit (Quadrate) in Nestern lagenförmig, z.T. Framboide IJ,4. häufig Pyrit	Schiefrigkeit oft undeut- lich III.3: häufig Erznester, kazhonatreiche Sittlagen III.5: dünne Erzlagen Wechselschichtung Ton-/Siltschiefer	IV, 2. Erznester IV.3. Erzanteicherung in Schichtung IV.4. großer Karbonat- porphyroblast (1 mm)	V.1: Porphyroblasten eckig, micht eingeregelt	wenig Erze, Erzpigment	Erze (1,05–0,075 mm)

chliffa Ú. dor Poih ş 1: Petrographie und Gefüge der Proh

P = Porphyroblasten M = Grundmasse

Wolfgang Wagner & Horst Baumann & Jörg F. W. Negendank & Frank Roschig

148

unterscheiden. Dabei ist z. B. das Vorkommen von Probe II durch kleine quadratische Pyrite gekennzeichnet.

Das Mikrogefüge läßt sich im Dünnschliff und im Anbruch im Raster-Elektronenmikroskop beobachten.

Die Orientierung und Dichte der Glimmerlagen ist unterschiedlich und wird mit Hilfe des von WAGNER (1994 b) und WAGNER et al. (1994) entworfenen Methode erfaßt. Dabei werden in Anlehnung an HIRSCHWALD (1911) und BENTZ & MARTINI (1968) die Anzahl der Glimmerlagen/mm und die Dicke der Glimmerlagen gemessen und deren Verbindung zu einem Gefügenetz abgeschätzt. Aus der Anzahl der Glimmerlagen und deren Dicke wird der Mengenwert berechnet:

Mengenwert = 10 mal Dicke mal Anzahl der Glimmerlagen.

Der Mengenwert weist auf den Volumen-Anteil der Minerale hin, die die Schieferungsflächen, d. h. die Spaltfähigkeit bilden. Die Anzahl der Glimmerlagen und der Mengenwert der untersuchten Proben liegen deutlich über den Mindestwerten für Dachschiefer, nämlich 40 Glimmerlagen/mm und Mengenwert 0,4 (vgl. Tab. 1).

Die durchgeführten Raster-Elektronenmikroskopaufnahmen dokumentieren ebenso die Orientierung und das Neuwachstum der Glimmer. Interessant ist z. B. der Vergleich von zwei Vorkommen, der von Penrhyn und der vom Escorialschiefer (Bernardos, Prov. Segovia/Zentralspanien). Hier kann man beobachten, was von WEBER (1976) beschrieben wurde. Im Falle des Penrhynschiefers (vgl. Kap. 1.4.) ist die Glimmerorientierung schlecht, z. T. scheint sie in die Schieferungsflächen flexurartig eingebogen. Demgegenüber zeigt der deutlich höher metamorphe Phyllit des Escorial (Bernardos, vgl. Abb. 3, Nr. 9) eine deutliche Orientierung durch Neuwachstum der Glimmer. Beim Phyllit in Probe VII erkennt man die höhere Metamorphose lichtmikroskopisch auch an dem höheren Mengenwert (vgl. Tab.1). Alle anderen Schiefer zeigen Übergänge zwischen den beiden obengenannten Extremtypen. Dabei ist auffällig, daß fast alle Schiefer durch schieferflächenparallele Phyllosilikatneubildungen im Sinne von WEBER (1976) charakterisiert sind. In den Schiefern der Osteifel treten noch Flexuren auf. Der höhere Metamorphosegrad der spanischen Schiefer ist an den etwas stärker orientierten Phyllosilikaten zu erkennen.

Der modale Mineralbestand ist bedingt durch die geringe Korngröße der Minerale im Tonschiefer nur mit großem Aufwand zu bestimmen. Daher erfolgte in Tab. 1 nur die Bestimmung der Porphyroblasten und die Abschätzung des Mineralbestands der Grundmasse. Nur unter Zuhilfenahme der chemischen Vollanalyse (Tab. 3) und der Mikroskopanalysen konnte ein modaler Mineralbestand für die Proben des Reihenversuchs abgeschätzt werden (vgl. Tab. 2). Erwartungsgemäß bestehen alle untersuchten Schieferproben vorwiegend aus Sericit. Hierin sind auch große Muskovite und der nur röntgenographisch eindeutig bestimmbare Paragonit (Na-Glimmer) gestellt worden. Der Sericitgehalt (inklusive Muskovit und Paragonit) schwankt zwischen 40 und 50 %. Nur bei höher kalkhaltigen Schiefern (Probe V) liegt er einmal darunter.

Deutlichere Unterschiede gibt es beim Chloritgehalt. Bei den kalkarmen Schiefern liegt der Chloritgehalt bei I etwas niedriger als bei II und III und bei VI (Spanien) mit 27 bis 28 % relativ am höchsten. Insgesamt schwankt er zwischen 20 und 28 % und liegt nur bei kalkhaltigen Schiefern IV und V deutlich darunter. Bei Probe VII handelt es sich um einen phyllitischen Chloritschiefer, bei dem wohl Eisenchlorit überwiegt.

Der Quarzgehalt schwankt zwischen 23 und 35 %. In den Vorkommen I, III, V und VI wurden jeweils 5 unterschiedliche Platten untersucht. Selbst in jeweils einem Vorkommen (z. B. I) schwankt der Quarzgehalt zum Teil erheblich, was wohl mit unterschied-

8
-
Ž
ц.
Angaben
°,
Reihenversuch
des
Proben
Ы
σ
Mineralbestand
er
Modal
ä
Tab.

*...* 

Sericit (inkl.         41-51 %         43 %         42-47 %         4           Muskowit u.         41-51 %         43 %         42-47 %         4           Paragonit)         19-20 %         23 %         22-26 %         1           Chlorit         19-20 %         23 %         32-24 %         2           Quarz         33-25 %         30 %         32-24 %         2           Karbonate         kleiner gleich         1 %         1 %         1           Ruti/Illmenti/         2 %         2 %         2 %         2 %           Tlanomagnetit         2 %         2 %         2 %         8	41-42 % 17-18 % 28-27 % 11-9 % 1 % kleiner 1 %	V 36-37 % 15-16 % 30-26 % 18-13 % 1 % kleiner 1 %	VI 44-50 % 25 % 27-23 % kleiner 1 % 2 % 2 %	VII 46 % 17 % ** 34 % * 1 % 2 % kleiner 1 %	Beurteilung n. N positiv größer 46 % kleiner 5 %	<b>an Rhijin &amp; M</b> t 40-46 % 5-10 %	llkert 1993 negativ kleiner 40 % größer 10 %	Richtwerte Bentz & Mart um 40 % wichtig für Schiel um 30 % wichtig für Härte Körnung bis 10 % Calcit bis 4 % Pyrit
Sometige         1 %         1 %         1 %           Chlorit/Sericit-         0,37-0,48         0,54         0,50-0,55         0,	1 % 0,41-0,45	2 % 0,41-0,45	1 % 0,50-0,58	1 % 0,37	kleiner 0,6	0,6-0,8		

\*\* insbes. Fe-Chlorit

Wolfgang Wagner & Horst Baumann & Jörg F. W. Negendank & Frank Roschig

150

lichen sedimentären Sandeinschaltungen in den einzelnen Schieferplatten zu begründen ist.

Die verschiedenen Minerale haben Einfluß auf das technische Verhalten und die Haltbarkeit des Schiefers. Eine Übersicht hierzu geben BENTZ & MARTINI (1968). Demnach soll der Sericitgehalt (in BENTZ & MARTINI auch "Tonminerale" genannt) um 40 % betragen und wichtig für die Schieferung, d.h. die Spaltbarkeit sein.

Der Quarzgehalt ist wichtig für die Härte des Schiefers und kann sich bei höheren Werten auch negativ auf die Bearbeitbarkeit und die Lochbarkeit auswirken. Er beeinflußt die Spaltbarkeit nur dann negativ, wenn die Auslängung der Quarze entlang der Schieferung unvollkommen ist.

VAN RHIJN & MELKERT (1993) entwickelten aufgrund der Untersuchung von Altdächern in den Niederlanden eine Klassifizierung von Schieferqualitäten, die in einem komplizierten Entscheidungsbaum aufgrund von petrographischen Beobachtungen und aufgrund des modalen Mineralbestands den einzelnen Schiefern sogar eine bestimmte Lebensdauer zuordnet:

Gut = über 80 Jahre Lebensdauer

Mittel = 50 bis 80 Jahre Lebensdauer

Schlecht = unter 50 Jahre Lebensdauer

Soweit diese Eigenschaften den Mineralbestand betreffen, sind diese in Tab. 2 vereinfacht dargestellt, wobei nur die Bewertung "positiv" und "negativ" berücksichtigt wurde. Die Klassifizierung in gut, mittel und schlecht, ist bei der Beurteilung von Vorkommen bzw. der Proben des Reihenversuchs nicht sehr hilfreich, weil selbst relativ gleichmäßige Vorkommen doch innerhalb von Grenzen schwanken und somit oft in verschiedene Klassen gleichzeitig fallen.

Nach dieser Beurteilung von VAN RHIJN & MELKERT wären Proben I und III günstig und II und III ungünstiger zu bewerten. Obwohl deren Arbeit viele interessante Details und Beobachtungen enthält, ist ihre Aussagekraft für heutige Schiefervorkommen begrenzt. Die Studie beruht ausschließlich auf Altdächern, d. h. nur aus der Beobachtung von einer kleinen Auswahl von Schiefern, die heute noch auf dem Markt sind. Bei den Proben des Reihenversuchs wären nur die Gewinnungsstätten der Proben I, IV und V schon länger als 50 Jahre in Betrieb. Alle anderen Gewinnungsstätten (so auch II und III) sind erst ungefähr 20 bis 30 Jahre in Produktion. Aus der Untersuchung von Eigenschaften und der Bewertung von Beobachtungen dieser Auswahl von Schiefern, formulieren VAN RHIJN & MELKERT verschiedene Anforderungen, ohne daß die Eigenschaft oder die Beobachtung als Ursache für Verwitterungsanfälligkeit exakt nachgewiesen wurde. So wird das Chlorit/Sericit (inklusive Muskovit usw.)- Verhältnis zur Qualitätsbeurteilung hinzugezogen, ohne daß geklärt ist, ob dies eine wesentliche Ursache für die Verwitterungsbeständigkeit bzw. -unbeständigkeit von Schiefer ist. Es ist nämlich auch möglich, daß ein hoher Verhältniswert nur eine zufällige Eigenschaft der Schiefer ist, die aus anderen Gründen auf den Altdächern nicht so haltbar waren. Immerhin zeigt die Arbeit beim Karbonatgehalt und bei den Gefügeuntersuchungen Zusammenhänge auf, die durch Befunde in unserem Forschungsvorhaben bestätigt werden konnten.

Der Mineralbestand, das Mikrogefüge und die anderen petrographischen Eigenschaften des Schiefers, spielen für die Qualität und die Bearbeitbarkeit in der Praxis eine wichtige Rolle. Allerdings sind die Zusammenhänge der verschiedenen Eigenschaften höchst kompliziert und i.d.R. ist es nicht möglich, eine Eigenschaft isoliert zu werten. Die Verwitterungsanfälligkeit von verschiedenen Mineralien (z. B. Karbonat, einzelne Erztypen) kann vermindert werden, wenn sie in das Glimmergefüge geschützt eingebaut sind.

ИЛ	59,49 0.98	19,22	2,14	4,64	0,05	3,14	0,47	2,02	3,99	0,12	3,60	98,96					
VI,2	54,62 1.14	21,59	1,83	6,78	0,07	2,80	0,37	1,24	3,36	0,24	5,04	80'66		0,12	0,21	0,07	0,15
VI,1	53,01 1.22	23,46	0,95	7,24	0,07	2,92	0,40	1,33	3,91	0,27	5,10	16'66		0,14	0,25	0,12	0,25
V,5	49,52 0,68	14,62	1,69	4,20	0,08	3,14	10,35	0,85	3,07	0,11	11,8	100,11	1	8,81	15,73	0,43	06'0
V,4	50,98 0.67	14,98	1,74	4,02	20'0	3,12	8,55	0,85	3,20	0,10	10,6	98,88		7,47	13,33	0,35	0,73
V,3	50,84 0.68	14,41	2,02	3,98	0,08	3,15	9,49	0,87	3,03	0,11	11,4	100,06		8,00	14,28	0,41	0,86
V,2	52,33 0.67	14,66	1,71	4,16	0,07	3,09	8,31	0,85	3,14	0,12	10,4	99,54		2,06	12,60	0,35	0,73
L'1	48,53 0.67	14,09	1,69	4,60	0,08	3,11	11,03	0,85	2,97	0,12	12,4	09'66		9,35	16,69	0,46	96'0
IV,5	53,22 0.76	16,28	1,66	4,77	0,08	3,44	6,15	1,00	3,18	0,11	0′6	86'66		5,03	8,98	0,31	0,65
IV,4	53,18 0.75	16,47	1,78	4,64	0,07	3,46	5,78	0,94	3,54	0,12	8,6	99,33		4,69	8,37	0,31	0,65
IV,3	52,88 0,73	15,64	1,47	4,70	0,08	3,38	6,66	66'0	3,28	0,13	0'6	98,94		5,57	9,94	0,33	69'0
IV,2	52,38 0,76	16,04	1,63	4,66	0,08	3,12	6,57	66'0	3,44	0,12	9,5	99,59		5,33	9,51	0,32	0,67
IV,1	52,16 0,76	15,89	1,70	4,71	0,08	3,38	6,28	66'0	3,40	0,15	9,4	99,20		5,22	9,32	0,33	0,69
III,5	56,59 0,98	20,63	1,74	6,00	0,14	2,78	0,53	1,14	3,79	0,13	5,5	99,95		0,38	0,68	0,16	0,33
III,4	54,91 0,96	20,78	1,49	6,18	0,19	2,84	0,81	1,11	3,77	0,11	5,6	98,78		0,68	1,21	0,27	0,56
Ш,3	58,62 0,89	19,68	1,52	5,99	0,14	2,73	0,55	1,18	3,42	0,13	5,0	99,85		0,38	0,68	0,16	0,33
III,2	58,21 0,91	19,32	1,14	6,22	0,19	2,74	0′0	1,16	3,36	0,15	5,4	99,70		0,66	1,18	0,28	0,59
III,1	52,87 0,98	22,20	2,98	5,98	0,13	2,86	0,61	0,99	4,12	0,24	6,0	100,20		0,32	0,57	0,13	0,27
Ш	56,15 1,01	20,64	0,80	6,55	0,15	2,73	0,67	0,82	3,88	0,10	5,74	99,24		0,52	0,93	0,24	0,50
I,5	54,75 1,02	21,46	1,76	5,44	0,12	2,65	0,86	1,14	4,36	0,16	5,9	99,62		0,43	0,77	0,34	0,71
I,4	58,74 0,82	17,91	1,42	5,87	0,17	2,79	1,38	1,11	3,27	0,15	6,0	99,63		0,61	1,09	0,39	0,82
I,3	57,96 0,87	18,42	1,75	5,73	0,17	2,84	1,36	1,13	3,37	0,18	5,9	89'66		0,64	1,14	0,34	0,71
I,2	57,61 0,89	19,36	16′1	5,41	0,13	2,67	1,01	1,17	3,73	0,18	5,9	100,00		0,13	0,23	0,26	0,54
I,1	55,96 0,94	19,70	1,29	5,89	0,14	2,65	1,12	1,16	3,80	0,14	6,2	98,99		0,11	0,19	0,31	0,65
	SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	FeO	MnO	MgO	CaO	$Na_2O$	$K_2O$	$P_2O_5$	GV 1050°	Σ		CaO	CaCO <sub>3</sub>	MgO	MgCO <sub>3</sub>

Wolfgang Wagner & Horst Baumann & Jörg F. W. Negendank & Frank Roschig

152

Tab. 3: Chemische Analysen (Gew.-%) der Proben des Reihenversuchs.

### 3. Chemische Analysen der Tonschiefer

Die petrographisch-mineralogische Analyse spiegelt sich in gewisser Weise in der chemischen Analyse wider, obwohl die Aussagekraft einer chemischen Analyse über die technischen Eigenschaften gegenüber einer Dünnschliffanalyse geringer ist. Von den Tonschiefern der verschiedenen Vorkommen wurden Vollanalysen der Hauptelemente sowie essigsäurelösliches CaO bzw. MgO (Tab. 3 bis 9) und einige Spurenelemente ausgewählter Proben (Tab. 4, 6 und 7) bestimmt. Bei den Vollanalysen ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt, das Wasser (H<sub>2</sub>O+, H<sub>2</sub>O-) aber auch SO<sub>2</sub> sowie SO<sub>3</sub> im Glühverlust enthalten.

Ein Vergleich der Analysen der verschiedenen Vorkommen läßt erkennen, daß man damit das einzelne Vorkommen nicht eindeutig identifizieren kann, jedoch sind die einzelnen Regionen differenzierbar. So zeichnen sich die Analysen der Proben IV und V deutlich durch ihren hohen CaO-Gehalt und Glühverlust aus, eine Folge des hohen Karbonatgehaltes. Die Schiefer IV führen 52 bis 53 Gew.-% SiO<sub>2</sub> und 5,5 bis 6,66 Gew.-% CaO. Das Verhältnis von Na<sub>2</sub>O zu K<sub>2</sub>O liegt um 1: 3 bis 1: 4. Demgegenüber ist der CaO-Gehalt in Probe V höher (8,5- 11 Gew.-%), der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt um 1 % niedriger. Der Glühverlust liegt aufgrund des höheren Karbonatgehaltes deutlich höher.

Der TiO<sub>2</sub>-Gehalt von Probe IV liegt bei 0.76 %, während er bei der unmittelbar benachbarten Gewinnungsstätte (Probe V) etwa 0.68 % beträgt. Diese karbonathaltigen Sauerländer Schiefer sind deutlich von den rheinland-pfälzischen, fast karbonatfreien Schiefern des Hunsrücks (Probe II und III) und der Osteifel (Probe I u. a.) zu unterscheiden.

Die Schiefer des Hunsrücks zeigen dabei einen höheren  $Al_2O_3$ -Gehalt (18-21 Gew.-%) als die Sauerländer Schiefer; ihr CaO-Gehalt schwankt zwischen 0,5 und 0,9 Gew.-%. Das  $Na_2O : K_2O$ -Verhältnis liegt um 1: 3 bis 1: 4. Die Schiefer der Osteifel (Moselschiefer u. a. Probe I) sind sehr ähnlich, ihr CaO-Gehalt schwankt zwischen 0,39 und 1,41 Gew.-%. Der MgO-Gehalt liegt im Schnitt niedriger als bei den Sauerländer Schiefern. Haben die Schiefer der Osteifel im Schnitt einen SiO<sub>2</sub>-Gehalt von 56 bis 58 Gew.-%, so fallen die Thüringer Schiefer (vgl. Tab. 5: Nr. 2) mit ca. 62 Gew.-% SiO<sub>2</sub> deutlich heraus. Ihr CaO-Gehalt ist gering, ebenso der Glühverlust.

Die wichtige Gruppe der spanischen Schiefer der Valdeorras-Region (Galizien) zeichnet sich bis auf eine Ausnahme durch einen sehr niedrigen CaO-Gehalt aus (vgl. Tab. 6), was sich auch im niedrigen Glühverlust widerspiegelt. Auffällig ist der im Schnitt höhere  $Al_2O_3$ -Gehalt, im Vergleich zu Probe I sowie das viel höhere  $Na_2O/K_2O$ -Verhältnis, das oft größer als 1: 5 ist. Ein anderes Charakteristikum stellt der oft im Schnitt unter 2 (ca. 1,75 %) liegende MgO-Gehalt der Proben dar.

Es erübrigt sich aufgrund der nicht vollständigen Daten, die Vollanalysen der anderen Vorkommen (vgl. Tab. 7 bis 9) im einzelnen zu diskutieren. Erwähnenswert erscheint aber noch das Vorkommen von Penrhyn/Nord-Wales, bei dem der SiO<sub>2</sub>-Gehalt bei 59 Gew.-% liegt und deren  $Al_2O_3$ -Gehalte ca. 20 Gew.-% betragen. Diese Schiefer fallen aber besonders dadurch auf, daß der Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt um 8 % liegt (rote, Hämatit-reiche Schiefer), während sie sonst bei den spanischen und deutschen Schiefern um 1 Gew.-% pendeln, mit Ausnahme des Thüringer Schiefers, dessen Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt sich zwischen 0,08 und 0,48 Gew.-% bewegt. Penrhyn fällt auch dadurch auf, daß das  $Na_2O/K_2O$ -Verhältnis 1: 1,5 beträgt.

Die Streuung der Spurenelementgehalte (Tab. 4 und 6) veranlaßte uns, lediglich einen Analysenvergleich zwischen den Schiefern der Osteifel und den spanischen Schiefern aus Valdeorras durchzufuhren. Bei aller Vorsicht der Interpretation lassen sich folgende Feststellungen treffen:

 Der Blei-(Pb-)Gehalt ist bei diesen spanischen Schiefern im Schnitt um das Vier- bis Fünffache höher als in den Schiefern der Osteifel und liegt bei ersterem um 20 ppm.

		2				Osti	aifel						Mittelhu	ınsrück	Mitte	Irhein
SiO <sub>2</sub>	53,39	41,69	57,60	60,08	56,85	58,22	57,58	59,80	56,16	57,39	56,96	58,04	60,06	57,37	58,21	59,37
$TiO_2$	1,06	1,18	96'0	0,87	0,92	0,93	0,95	0,86	0,94	06'0	0,98	0,81	0,92	1,01	26'0	1,01
$AI_2O_3$	21,60	28,54	18,98	18,16	20,20	19,70	19,0	17,74	20,10	19,70	20,40	18,40	19,00	20,57	18,89	20,67
$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	1,24	1,15	1,11	1,29	1,08	1,02	1,33	0%0	0,46	1,28	0,95	0,95	0,92	1,18	0,66	1,09
FeO	6,89	8,20	6,14	5,28	6,28	6,23	5,94	5,98	7,42	5,98	6,29	8,77	5,59	6,02	6,29	5,30
MnO	0,11	0,10	0,12	0,12	0,12	60'0	0,16	0,18	0,16	0,12	0,11	0,10	0,13	0,17	0,24	0,08
MgO	3,23	3,60	2,74	2,66	2,79	2,73	2,81	2,83	3,13	2,69	2,93	3,75	2,50	2,64	2,70	2,38
CaO	0,68	0,39	0,83	0,95	0,48	0,54	1,19	1,41	0,81	0,93	0,63	0,42	0,67	0,82	1,25	0,37
$Na_2O$	1,02	0,46	1,21	1,06	1,05	1,03	0,98	1,13	1,13	1,00	1,14	0,82	1,29	1,11	66'0	1,16
$\rm K_2O$	3,96	5,71	3,38	3,43	3,91	3,88	3,54	3,15	3,42	3,66	3,82	2,66	3,45	2,89	3,13	3,98
$P_2O_5$	0,22	0,18	0,20	0,21	0,23	0,25	0,28	0,15	0,17	0,40	0,15	0,18	0,16	0,14	0,11	0,12
GV	5,81	7,04	5,51	5,21	5,14	5,01	5,56	5,65	5,27	4,96	5,01	4,82	4,55	5,04	5,61	4,57
0201																
N	99,21	98,81	98,81	99,35	99,05	99'66	99,32	99 <b>'</b> 68	99,17	99,01	99,37	99,72	99,24	96'66	99,11	100,1
CaO	0,52	0,22	0,62	0,87	0,35	0,43	0,95	0,78	0,46	0,68	0,36	0,15	0,48	0,45	0,92	0,28
CaCO <sub>3</sub>	0,92	0,39	1,11	1,55	0,62	0,77	1,70	1,39	0,82	0,63	0,64	0,27	0,86	0%0	1,61	0,50
MgO	0,21	0,10	0,26	0,29	0,15	0,17	0,32	0,31	0,17	0,24	0,14	0,08	0,19	0,15	0,34	0,11
MgCO <sub>3</sub>	0,44	0,21	0,54	0,61	0,31	0,36	0,66	0,65	0,36	1,10	0,29	0,17	0,40	0,31	0,71	0,23
Spurene	lemente	(uudd)														
					F											
Zn	106	128	104	104	116	98	128			116						
ï	76	96	72	<u>66</u>	128	74	72			76						
ť	132	198	126	128	144	128	132			140						
Pb	4	9	13	7	27	7	15			11						
Ag	0,62	0,75	0,53	0,54	0,61	0,48	0,78			1,18						

Tab. 4: Chemische Analysen (Gew.-%), Rheinland-Pfalz, Dachschiefer des Unterdevon.

Wolfgang Wagner & Horst Baumann & Jörg F. W. Negendank & Frank Roschig

154

- Die Nickel-(Ni-) Konzentrationen sind bei den Schiefern der Osteifel um das Eineinhalbfache bis Doppelte angereichert (ca. 75 ppm zu ca. 35 ppm).
- Die Chrom-(Cr-) Gehalte der Schiefer der Osteifel sind gegenüber den spanischen Schiefern erhöht.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß bis auf den CaO-Gehalt und die anderen oben aufgezeigten geringen Abweichungen, die chemische Zusammensetzung bei allen Dachschiefern, selbst bei Dachschiefern aus Übersee (vgl. Tab. 9) unabhängig von der Qualität und der geologischen Zuordnung, doch ziemlich einheitlich ist. Eine chemische Analyse gibt also nur wenig qualitätsrelevante Informationen. Bei nicht qualitätsrelevanten Parametern treten in den verschiedenen Vorkommen geringe Unterschiede auf, die möglicherweise als Unterscheidungsmerkmal genutzt werden und Grundlage zu weiteren Untersuchungen sein können. Daher sind die vollständigen Analysen in Tab. 3 bis 9 aufgeführt.

Tab. 5: Chemische Analysen (Gew.-%), sonstiges Deutschland, Dachschiefer des Mitteldevon und Unterkarbon.

		1			2	
SiO <sub>2</sub>	53,62	53,18	19,82	62,36	62,12	62,80
TiO <sub>2</sub>	0,81	0,77	0,68	1,00	0,91	0,90
$Al_2O_3$	15,78	16,11	14,07	19,36	18,44	17,98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,17	1,13	1,78	0,47	0,08	0,48
FeO	5,05	5,16	3,93	5,47	7,96	6,19
MnO	0,10	0,07	0,07	0,07	0,08	0,10
MgO	3,50	3,44	3,15	1,94	2,20	2,18
CaO	6,55	5,65	9,43	0,17	0,17	0,72
Na <sub>2</sub> O	1,02	0,91	0,80	1,22	1,13	0,88
K <sub>2</sub> O	3,16	3,60	3,13	3,41	2,75	2,82
$P_2O_5$	0,08	0,12	0,15	0,12	0,12	0,12
GV 1050 °C	9,36	9,28	12,38	4,46	3,90	4,88
Σ	100,20	99,72	99,39	100,05	99,86	100,05
CaO	6,16	5,47	8,73	0,07	0,06	0,41
CaCO <sub>3</sub>	11,00	9,76	15,58	0,12	0,11	0,73
MgO	0,41	0,40	0,51	0,03	0,03	0,15
MgCO <sub>3</sub>	0,86	0,84	1,13	0,06	0,06	0,31

1 = Mitteldevon, Sauerland, Nordrhein-Westfalen (vgl. Abb. 2, Nr. 10)

2 = Unterkarbon, Thüringen (vgl. Abb. 2, Nr. 7)

Lab. o: Ch	emische	Analyser	ו (Gew'	%), Nord	west-Spai	nien/Prc	ovinz Ore	nse, Valc	leorras, l	Dachschi	efer des l	Mittleren	bis Ober	en Ordov	izium.
$SiO_2$	57,10	59,87	59,33	59,24	62,06	58,56	58,55	58,57	56,71	57,51	57,83	61,09	52,83	52,34	61,56
$TiO_2$	1,12	1,08	1,01	0,95	1,04	1,02	1,08	0,98	1,02	1,01	1,04	0,93	1,18	1,01	0,89
$Al_2O_3$	22,62	19,10	20,58	21,37	16,93	21,50	21,43	21,38	22,84	21,76	21,68	19,97	22,21	24,50	15,35
$Fe_2O_3$	1,45	0,81	1,29	16'0	0,96	1,02	1,43	1,27	1,65	2,14	0,58	66'0	0,87	0,85	69'0
FeO	5,13	6,13	5,18	5,62	5,84	5,47	5,56	5,84	5,39	5,20	6,52	5,49	7,60	7,85	5,38
MnO	0,04	0,05	0,04	0,05	60′0	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,07	0,04	60'0	60′0	0,12
MgO	1,72	2,19	1,72	1,75	2,27	1,73	1,81	1,85	1,60	1,67	1,97	1,62	2,96	2,22	1,90
CaO	0,18	0,45	0,15	0,18	0,94	0,11	0,22	0,16	0,14	0,11	0,16	0,32	0,47	0,29	3,09
$Na_2O$	0,93	1,66	0,71	0,74	1,64	0,64	0,65	0,71	0,65	0,63	1,08	0,79	1,49	1,22	1,61
$\rm K_2O$	5,07	3,76	4,95	5,02	3,13	4,91	5,06	5,00	5,55	5,19	4,83	4,55	3,63	2,99	2,57
$P_2O_5$	0,11	0,16	0,14	0,11	0,34	0,11	0,25	0,12	0,11	0,13	0,12	0,25	0,29	0,15	0,20
GV 1050°	4,07	4,24	3,90	4,12	4,26	4,33	4,05	3,95	4,24	4,39	3,93	3,80	5,15	6,00	5,73
Σ	98,88	08′66	00'66	100,06	99,50	98,94	100,16	99,88	26'66	99,78	99,81	99,84	98,77	99,21	60'66
CaO	0,11	0,27	60′0	90′0	0,78	0,08	0,11	0,10	0,08	60′0	60'0	60'0	0,24	0,08	2,67
CaCO <sub>3</sub>	0,20	0,48	0,16	0,11	1,39	0,14	0,20	0,18	0,14	0,16	0,16	0,16	0,42	0,14	4,77
MgO	0,04	0,07	0,04	0,05	0,08	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,01	0,06	0,13	0,11
MgCO <sub>3</sub>	0,08	0,15	0,08	0,10	0,17	0,06	0,08	0,06	0,06	0,08	0,06	0,02	0,13	0,27	0,23
Spurenelei	nente (p]	(mc	~												
Zn	106	96	104		104	80	114	106	90	224	172	118	98		130
Ņ	38	38	10		36	32	42	14	38	32	94	64	34		58
Cr	98	86	98		86	88	98	96	104	92	100	88	72		110
$\mathbf{P}\mathbf{b}$	28	29	16		25	140	21	13	23	21	29	60	35		36
Ag	0,55	0,49	0,50		06′0	0,49	0,70	0,71	0,50	0,57	0,64	0,64	0,44		69′0

Wolfgang Wagner & Horst Baumann & Jörg F. W. Negendank & Frank Roschig

Geolog., petrographische, geochemische und gesteinsphysikal. Untersuchungen an Dachschiefern

	1				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			· · · · ·		
	1		2	3		4			5	
SiO <sub>2</sub>	58,79	51,95	55,79	58,41	49,32	56,86	60,60	60,244	66,68	60,03
TiO <sub>2</sub>	1,02	1,29	1,21	1,09	1,14	1,01	0,92	1,03	0,86	0,86
$Al_2O_3$	21,10	23,43	21,41	21,76	25,10	22,50	17,51	18,78	15,01	16,89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,98	0,99	0,47	1,25	1,16	0,64	0,52	0,71	1,60	2,86
FeO	6,30	7,67	7,33	5,19	8,81	7,14	6,00	5,98	4,06	4,00
MnO	0,10	0,09	0,07	0,03	0,05	0,05	0,10	0,10	0,09	0,10
MgO	2,18	2,88	2,56	1,95	2,60	2,11	2,13	2,72	2,23	3,29
CaO	0,26	0,35	0,32	0,29	0,59	0,38	1,93	0,31	0,36	0,95
Na <sub>2</sub> O	1,15	1,07	1,80	1,26	1,30	1,19	1,42	2,28	2,27	2,06
K <sub>2</sub> O	4,05	4,51	3,13	3,59	3,44	3,07	2,97	3,62	2,96	3,48
$P_2O_5$	0,14	0,43	0,25	0,21	0,18	0,12	0,19	0,11	0,09	0,12
GV 1050 °C	3,93	5,27	4,23	4,71	6,40	4,98	5,00	3,22	2,80	5,00
Σ	100,00	99,93	98,87	100,01	100,09	100,05	99,29	99,10	99,01	99,64
····				1				1		
CaO	0,09	0,08	0,08	0,16	0,29	0,16	1,73	0,11	0,16	0,67
CaCO <sub>3</sub>	0,16	0,14	0,14	0,29	0,52	0,29	3,09	0,20	0,29	1,20
MgO	0,04	0,05	0,03	0,06	0,13	0,10	0,05	0,10	0,34	3,78
MgCO <sub>3</sub>	0,08	0,10	0,06	0,13	0,27	0,21	0,10	0,21	0,71	7,91
	1	1		1	1			1		

Tab. 7: Chemische Analysen (Gew.-%), sonstige Dachschiefer Spaniens.

Spurenelemente (ppm)

Zn	150	120	122
Ni	58	50	42
Cr	124	106	106
Pb	17	21	19
Ag	0,69	0,65	0,70

1 = Mittelordovizium, Los Oscos, Provinz Lugo/Oviedo (vgl. Abb. 3, Nr. 7)

2 = Mittel- bis Oberordovizium, La Cabrera, Provinz León (vgl. Abb. 3, Nr. 2)

3 = Mittelordovizium, Alto Bierzo, Provinz León (vgl. Abb. 3, Nr. 6)

4 = Mittelordovizium, El Caurel, Provinz Lugo/León (vgl. Abb .3, Nr. 3)

5 = Oberes Präkambrium bis Unterkambrium, Bernardos, Provinz Segovia/Zentral-Spanien (Quarzitphyllit) (vgl. Abb. 3, Nr. 9)

Iab. o: Chein	ISCIIE AII	IIJSEII (Gt	CW701, SL	nisuge Lo	actiscinet	odoma ia	ġ							
	-	5		~			4		5	6	7	8		6
SiO <sub>2</sub>	52,31	55,08	50,21	50,61	59,19	58,10	59,01	59,01	52,33	59,91	57,88	60,77	61,45	52,34
TiO <sub>2</sub>	0,88	0,95	1,03	1,06	66'0	1,01	0,95	0,91	0,96	1,00	0,86	1,15	1,03	1,07
$Al_2O_3$	20,23	20,25	26,40	26,25	20,36	20,84	20,19	19,89	20,43	19,09	14,55	18,09	17,54	24,50
$\mathrm{Fe_2O_3}$	14,86	1,03	1,97	1,67	8,19	8,34	7,47	8,47	1,92	2,07	4,39	1,63	1,20	0,61
FeO	1,30	6,22	96'9	7,31	0,79	0,63	0,94	1,11	6,82	2,72	2,34	5,06	5,40	7,41
MnO	0,50	0,22	0,08	0,08	0,19	0,18	0,24	0,24	0,12	0,08	0,17	0,10	0,10	0,10
MgO	1,50	3,34	2,00	1,96	2,17	2,16	2,29	2,29	3,47	2,67	2,09	2,26	2,32	2,13
CaO	0,34	1,51	0,23	0,24	0,85	0,86	0,75	0,74	1,26	1,11	5,67	0,82	0,76	0,77
$Na_2O$	1,15	0,89	1,17	1,19	2,07	1,99	1,90	2,04	0,89	2,68	3,12	2,25	2,59	0,93
K <sub>2</sub> O	3,27	4,17	3,07	3,11	3,00	3,03	2,78	2,73	3,90	4,28	2,40	3,91	3,42	3,17
$P_2O_5$	0,18	0,14	0,15	0,16	0,10	60′0	0,08	0,08	0,19	0,12	0,11	0,20	0,10	0,19
GV 1050°C	3,32	6,86	5,60	5,50	3,30	3,40	3,40	3,34	6,92	3,62	6,24	3,66	3,24	6,00
Σ	78'66	100,66	98,87	99,41	101,20	100,63	100,00	100,85	99,21	99,35	99,82	06'66	99,15	99,52
CaO	0,10	1,24	0,07	0,07	60′0	0,10	0,10	0,11	0,88	0,23	5,03	0,08	0,05	0,61
CaCO <sub>3</sub>	0,18	2,21	0,12	0,12	0,16	0,18	0,18	0,20	1,57	0,41	8,98	0,14	60′0	1,09
MgO	0,08	0,55	0,17	0,16	0,03	0,04	0,03	0,04	0,42	0,12	0,08	0,11	0,05	0,23
MgCO <sub>3</sub>	0,17	1,15	0,36	0,33	0,06	0,08	0,06	0,08	0,88	0,25	0,17	0,23	0,10	0,48
1 = Unterord 2 = Unterdev	ovizium, on, Marte	Vielsalm, Jange, Aı	Ardenne, dennen,	n, Belgier Belgien (1	n (vgl. Al vgl. Abb.	ob. 2, Nr. 2, Nr. 5)	5)	í						
3 = Mittelord 4 = Kambriui	ovizium, n, Penrhy	Angers-1 /n (purpu	rélazé, U ir), Nord-	ep. Anjou Wales, G	ı, Frankre roßbritan	ach (vgl. nien (vgl	Abb. 2, 1 . Abb. 2,	Nr. 3) Nr. 2)						
5 = Unterdev 6 /7 - Fokam	on, Ober hrium Vi	marteling setertana-	en, Luxei Fiord (6 =	nburg (v§ = oriin 7	51. Abb. 2 = тоt) Fi	t, Nr. 3) nnmark	Norwege	n (vel. A	bb, 2. Nr.	(11)				
8 = Eokambri	ium, Fria	rfjord, Fin	nmark, N	Jorwegen	(vgl. Ab	b. 2, Nr.	11)	D		Ì				
9 = Ordovizio	um, Valoı	ngo/Portc	o, Portugi	ıl (vgl. Al	ob. 2, Nr.	() ()								

Wolfgang Wagner & Horst Baumann & Jörg F. W. Negendank & Frank Roschig

158

Geolog., petrographische, geochemische und gesteinsphysikal. Untersuchungen an Dachschiefern

	1	2				3				4
SiO <sub>2</sub>	65,45	63,55	32,37	35,49	66,39	59,68	39,66	63,91	64,14	49,53
TiO <sub>2</sub>	1,04	0,87	0,37	0,65	0,77	0,76	0,53	0,80	0,75	0,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,42	16,43	6,86	10,62	14,08	18,91	11,23	17,56	17,42	14,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,57	1,16	1,17	1,03	1,40	7,60	1,24	0,69	0,92	9,04
FeO	0,10	4,80	2,19	3,09	3,81	0,80	3,32	4,82	5,59	1,59
MnO	n.d.	0,08	0,05	0,07	0,05	0,02	0,09	0,11	0,05	0,19
MgO	0,22	3,10	11,13	2,85	2,57	1,92	3,32	2,26	2,27	4,33
CaO	0,07	0,61	17,63	21,57	1,77	0,10	17,84	0,28	0,39	4,54
Na <sub>2</sub> O	1,11	2,19	0,62	0,85	1,79	0,09	1,00	1,31	2,15	0,21
K <sub>2</sub> O	4,93	3,38	1,21	1,95	2,35	7,57	2,09	3,64	3,14	7,00
$P_2O_5$	0,05	0,14	0,14	0,10	0,23	0,11	0,24	0,12	0,21	0,08
GV 1050 °C	3,54	3,42	26,27	21,59	5,21	3,18	19,02	4,00	3,10	9,08
Σ	100,50	99,73	100,01	99,86	100,42	100,74	99,58	99,56	100,14	100,32
w.k		1								
CaO	0,04	0,38	12,40	20,36	1,68	0,09	16,35	0,09	0,08	1,78
CaCO <sub>3</sub>	0,07	0,68	22,13	36,34	3,00	0,16	29,19	0,16	0,14	3,18
MgO	0,02	0,05	5,26	0,89	0,38	0,03	0,43	0,05	0,04	0,95
MgCO <sub>3</sub>	0,04	0,10	11,00	1,86	0,80	0,06	0,90	0,11	0,08	1,98
	1	1	1						1 -	

Tab. 9: Chemische Analysen (Gew.-%), Dachschiefer aus Übersee.

1 = Proterozoikum, Kanye, Botswana, Süd-Afrika

2 = Genauere Zuordnung unbekannt, Belo Horizonte, (graugrün) Minas Gerais, Brasilien

3 = Genauere Zuordnung unbekannt, China

4 = Genauere Zuordnung unbekannt, (Nord-) Indien

## 4. Gesteinsphysikalische Untersuchungen an Dachschiefern

4.1. Vorbemerkungen

Zur gesteinsphysikalischen Charakterisierung von Dachschiefern existieren seit einigen Jahrzehnten Prüfnormen, die allerdings wenig Beachtung finden, da ihre Aussagekraft häufig nur einen Ausschluß von vollkommen untauglichem Dachschiefer zuläßt, was aber auch dem Kundigen ohne aufwendige und teure Untersuchungen möglich ist. Gründe für die geringe Aussagekraft bisheriger gesteinsphysikalischer Untersuchungen sind teilweise ungeeignete Probenahme-Methoden, aber auch veraltete Prüftechnik und eine nicht reproduzierbare Versuchsdurchführung. An diesen beiden Punkten setzen unsere gesteinsphysikalischen Untersuchungen an.

Prüfnormen, die bisher Anwendung bei Dachschiefern finden, sind: DIN 52101 (Probenahme)

DIN 52102 (Dichte, Rohdichte, Dichtigkeitsgrad, Gesamtporosität)

DIN 52103 (Wasseraufnahme und Sättigungswert)

DIN 52104 (Frost-Tau-Wechsel-Versuch)

DIN 52112 (Biegeversuch)

DIN 52 204 (Temperaturwechselversuch)

DIN 52 206 (Säureversuch)

Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit wurde bei den Ergebnissen des Biegeversuchs nach DIN 52112 nicht die berechnete Biegefestigkeit zugrunde gelegt, sondern eine auf 1 mm Spaltstärke normierte Biegekraft (Erläuterungen s. unten).

Ein Problem aller gesteinsphysikalischen und petrographischen Untersuchungen ist, daß Stichproben genommen werden, und deren Repräsentanz für einen größeren Bereich fraglich sein kann.

Der Begriff Dachschiefer und die Bewertung obiger Prüfverfahren wird in der DIN 52201 festgelegt. Die Art der Probennahme wird in DIN 52101 geregelt. Die in obigen Normen beschriebenen Prüfverfahren sind vom physikalischen Ansatz her sicherlich geeignet, gesteinsphysikalische Parameter zu erfassen. Es wurde daher versucht, Ursachen für die starke Streuung der Meßwerte in den einzelnen Versuchen und nicht reproduzierbaren Versuchsergebnisse zu eruieren.



Abb. 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung von Ultraschallwellengeschwindigkeiten mit Wasserspaltankoppelung (Selbstbau).

## Geolog., petrographische, geochemische und gesteinsphysikal. Untersuchungen an Dachschiefern

Da die Prüfverfahren für Dachschiefer, wie sie heute angewendet werden, vorwiegend zu qualitativen Aussagen führen, die oft nicht quantifizierbar sind, war die erste Überlegung, welche physikalische Eigenschaft des Gesteins sich während möglichst vieler Prüfverfahren quantifizierbar verändert und auch reproduzierbar meßbar ist. Sowohl bei Frost-Tau-Wechsel-Versuchen, Temperaturwechselversuchen als auch bei den Säureversuchen wird das Gesteinsgefüge bei problematischen Gesteinen aufgelockert, im Extremfall, zum Beispiel im Säureversuch, der Gesteinsverband sogar zerstört. Eine



Abb. 6: Flußdiagramm der gesteinsphysikalischen Bearbeitung der Proben I bis VII.

solche physikalische Zustandsänderung läßt sich beispielsweise mit Kompressionswellen erfassen. Ultraschallwellen eignen sich wegen ihrer geringen Wellenlänge hierzu besonders gut und werden daher häufig in der Materialprüfung eingesetzt (Abb. 6).

4.2. Ultraschallwellengeschwindigkeiten zur Quantifizierung von Gefügeauflockerungen

Ultraschallwellen werden in der Materialprüfung vor allem in Bezug auf ihre Wellengeschwindigkeit und auf die Schallschwächung eingesetzt. Bei den zu untersuchenden Schieferplatten ist die Schallschwächung nur sehr schwer meßbar (Geberankopplung); daher wurde auf die Bestimmung der Schallschwächung verzichtet und nur die Wellengeschwindigkeit und ihre Veränderung während der gesteinsphysikalischen Versuche untersucht. Die Kompressionswellengeschwindigkeiten in Dachschiefern können Hinweise auf die Wasseraufnahme und die Biegefestigkeit einer Dachschieferplatte liefern.

Eine vorläufige Auswahl von Prüfköpfen erfolgte nach Angaben in der Literatur, vor allem KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER (1986). Sender-Empfänger-Prüfköpfe zeigten sich nach ersten Versuchen als ungeeignet, so daß Durchschallungsmessungen mit getrenntem Sender und Empfänger verwendet wurden. Grundsätzlich ist eine hohe Frequenz der Prüfköpfe vorteilhaft, allerdings muß mit steigender Frequenz auch die Sendeleistung erhöht werden. Nach einigen Versuchen wurde sich für hochgedämpfte 1 MHzbzw. 2 MHz-Prüfköpfe entschieden.

Die Geberankopplung erfolgte zunächst über einen direkten Kontakt und Koppelpaste. Bedingt durch die Oberflächenrauhigkeit der Schieferplatten war die Ankopplung häufig nicht optimal, und es mußte daher eine Anlage mit Wasservorlauf hergestellt werden (Abb. 5).

Nach weiteren Versuchen an Dachschieferplatten wie z. B. Probe I und VII (vgl. Kap. 1.) wurde deutlich, daß die Wellengeschwindigkeit in Dachschiefern in starkem Maß von der Wassersättigung abhängig ist (Abb. 7). Bei den weiteren Versuchen wurden daher die Wellengeschwindigkeiten im wassergesättigtem Zustand gemessen.

Zur Bestimmung der Wellengeschwindigkeit wird die Dicke des Prüfkörpers möglichst genau gemessen, da die zu errechnende Wellengeschwindigkeit bei gegebener Laufzeit direkt proportional zur Prüfkörperdicke ist. Dieses banale Problem der Dickenmessung kann bei Dachschieferplatten erhebliche Probleme verursachen, da die Plattenoberflächen rauh und auch nicht immer planparallel sind. Die relativ ungenaue Dickenmessung ist daher für die Meßgenauigkeit der ausschlaggebende Faktor. Ein Anschleifen der Platten ist auch keine Lösung, da dadurch die Platteneigenschaften unkontrolliert verändert werden können. Die Genauigkeit einer einzelnen Wellengeschwindigkeit dürfte bei ca. 100 m/s, in Ausnahmefällen bei 200 m/s liegen.

Nach Durchsicht verschiedener Prüfprotokolle zu technischen Untersuchungen nach den geltenden DIN-Normen zu Temperaturwechselversuchen (TW), Frost-Tau-Wechsel (FTW) und Säureversuch (SV) an Dachschiefern war offensichtlich, daß die übliche Angabe der Massenänderung der Schieferplatten während dieser Versuche keine völlig befriedigende quantitative Aussage zur Qualitätsminderung durch diese Versuche liefert. Wir erweiterten aus den oben angeführten Gründen daher die Versuchsdurchführung bei TW, FTW und SV derart, daß wir die Ultraschallwellengeschwindigkeiten der Platten jeweils vor und nach den entsprechenden Versuchen bestimmten, und zwar normal zur Schieferung. Nach zunächst ermutigenden Ergebnissen ergaben sich Probleme mit der Reproduzierbarkeit der Wellengeschwindigkeiten. Wir stellten fest, daß die Wellengeschwindigkeiten stark von der Wassersättigung der Platten abhängig sind. Die DIN-Normen für TW und FTW sehen lufttrockene Proben beim Versuch vor. Was ist aber lufttrocken? Wann ist dann eine bis auf 110°C getrocknete Platte lufttrocken? Es

### Geolog., petrographische, geochemische und gesteinsphysikal. Untersuchungen an Dachschiefern

sollten daher nur noch Wellengeschwindigkeiten an vorher wassergesättigten Platten gemessen werden. Unter dieser Voraussetzung sind die Geschwindigkeiten reproduzierbar. Eine weitere Verbesserung der Meßwerte brachte die Wasserspaltankoppelung, wie oben beschrieben.



Abb. 7: Einfluß des Wassergehaltes bzw. des Aggregatzustandes des Wassers auf die Ultraschallwellengeschwindigkeit für Proben aus den Lokalitäten I, VI, VII.

## 4.3. Anisotropie der Ultraschallwellengeschwindigkeit innerhalb der Schieferungsebenen

Der Metamorphosegrad eines Schiefers (das heißt, das Ausmaß der Wirkung von Temperatur und Druck, dem er seit seiner Entstehung ausgesetzt war) kann in weiten Bereichen variieren und könnte einen Einfluß auf die gesteinsphysikalischen Eigenschaften haben. Die anisotropen Deformationen, die ein solches Gestein in der Schieferungsebene erfährt, können beispielsweise an eingeschlossenen Fossilien nachvollzogen werden. Diese Deformationen bringen ebenfalls eine Einregelung von Mineralen mit sich. Da Minerale im allgemeinen in Bezug auf ihre physikalischen Eigenschaften anisotrop sind, läßt sich der Regelungsgrad eines Schiefers mit Hilfe von Ultraschallwellengeschwindigkeiten bestimmen.

Zur Bestimmung der Anisotropie der Ausbreitung von Ultraschallwellen in der Schieferungsebene wurden regelmäßige Zwölfecke hergestellt und diese durchschallt. Mit dieser Versuchstechnik kann die Geschwindigkeit der Ultraschallwellen in sechs verschiedenen Richtungen gemessen werden. Dies erwies sich als ausreichend. Die Erfahrungen, die bei den Messungen an Schieferplatten gesammelt werden, zeigten, daß eine Wasserspaltankoppelung bessere Daten liefert.

Die Anisotropie der Ultraschallwellengeschwindigkeiten in der Schieferungsebene wurden für 45 europäische Dachschiefer dokumentiert. In einem Graph mit dem Richtungsazimut der Messung als X-Achse und der Wellengeschwindigkeit als Y-Achse sind die Meßwerte aufgetragen. Aus den Meßwerten wurde ein kubischer Spline berechnet und als Kurve dargestellt. Dieser kubische Spline zeigt über die 360° des Meßazimuts bei fast allen Proben einen einfachen Verlauf mit zwei Extremwerten (ein Geschwindigkeitsminimum und ein Geschwindigkeitsmaximum vgl. Abb. 8, 9 u. 10). Splines mit höherer Frequenz zeigen ausnahmsweise 3 von 21 Proben aus Spanien und die Probe aus dem Vorkommen V (vgl. Abb. 11 u. 12). Bei diesen Proben scheinen die zusätzlichen Minima und Maxima durch Mikrorisse bedingt zu sein. Die orientiert genommenen Proben zeigen ein Geschwindigkeitsminimum in der Fallrichtung der Schieferung und ein Geschwindigkeitsmaximum in der Streichrichtung der Schieferung, wenn makroskopisch keine Schichtung zu erkennen ist. Ist makroskopisch eine Schichtung zu erkennen, so ist in Richtung der Delta-Achse der Schichtung auf der Schieferung die Geschwindigkeit der Ultraschallwellen am größten und senkrecht dazu am kleinsten. Diese Richtung kennt man in z. B. Spanien als sogenannten "longrain". Bei Schiefern mit "longrain" ist dies die Richtung der geringsten Festigkeit (vgl. DIN prEN 12326).

Mit den durchgeführten Untersuchungen läßt sich aus der Geschwindigkeitsanisotropie der Ultraschallwellen in der Schieferungsebene kein Qualitätskriterium ableiten.

4.4. Ergebnisse gesteinsphysikalischer Untersuchungen an Proben von sieben ausgewählten Lokalitäten im Reihenversuch

Wie in Kap. 1. beschrieben, wurden aus den Lokalitäten I, II, III, IV, V, VI und VII Stichproben entnommen. Die Probenahme der Dachschieferplatten erfolgte wie in DIN 52 101 vorgeschrieben.

Die Proben I bis V wurden in der Lagerstätte unter Anwesenheit eines Geologen und jeweils mindestens eines Firmenvertreters genommen. Die Spaltung und Zurichtung der Platten erfolgte unter Anwesenheit der oben genannten Personen am gleichen Tag durch Mitarbeiter der jeweiligen Firmen. Vor dem Spalten wurden mit Diamantsägen Blöcke von 100 mm Breite und 200 mm Länge gesägt.

Die Schiefer VI und VII sind aus einem Lager entnommen und in gespaltenem Zustand in der Universität Trier in Platten von 100 mm x 200 mm mit einer Diamantsäge zugerichtet worden. Diese spanischen Dachschiefer können nicht als typische Qualität spanischer Dachschiefer gelten. Die Probe VI wurde gerade deshalb ausgewählt, weil sie aus einem neu eröffneten Tagebau stammte, und zwar aus einem oberflächennahen Bereich, das heißt, noch aus der Zone, die noch nicht die Qualität zeigt, die bei einem Fortschreiten des Abbaus erzielt werden kann. Für vergleichende gesteinsphysikalische Untersuchungen sollte aber ein Schiefer mit fraglicher Qualität als Referenz dienen.

Die Probe VII wurde als Phyllitschiefer wegen ihres gegenüber den oben genannten Dachschiefern höheren Metamorphosegrades in die Untersuchungen einbezogen.

Von diesen sieben Dachschiefervarietäten wurden Rohdichte und Wasseraufnahme gemessen sowie Säureversuch, Temperaturwechselversuch, Frost-Tau-Wechsel-Versuch, Biegeversuch und Ultraschallmessungen allein und in Kombination miteinander durchgeführt. Zur besseren Übersicht wurde eine Art Flußdiagramm (vgl. Abb. 6) entwickelt, das die Art, Anzahl und Kombination der durchgeführten gesteinsphysikalischen Versuche zeigt. Bei einigen Versuchen wurde auch die Anzahl beispielsweise der Frost-Tau-Wechsel Zyklen gegenüber der DIN variiert (vgl. Tab. 10), um den Einfluß unterschiedlicher Zyklenzahlen zu studieren. Auf diese Besonderheiten wird jeweils hingewiesen.

Die Ergebnisse der gesteinsphysikalischen Versuche der verschiedenen Probenlokalitäten werden im folgenden getrennt voneinander dargestellt und es wird auf Besonderheiten abgehoben. In einem abschließenden Kapitel werden die Meßdaten gemeinsam betrachtet und interpretiert.

(ue)	
Aessung	
10 N	
aus	
werte	
hnitts	
rchscl	
ģ	
ichten	
Rohd	
nnd	
.w%	
ര്	
n T	
chiefe	
Dachs	
von ]	
nahme	
serauf	
Was	
10	
Tab.	

Lokalität	Wasser- aufnahme (1 bar) ohne Vorversuche (Wm, a)	Wasser- aufnahme 150 bar ohne Vorversuche (Wm, d)	Sättigungs- wert	Wasser- aufnahme (1 bar) nach FTW	Wasser- aufnahme 150bar nach FTW	Sättigungs- wert nach FTW	Rohdichte g/cm³
	0,32 %	0,33 %	26'0	0,38 %	0,35 %	1,09	2,78
П	0,60 %	0,61 %	0,98	,	I	1	2,76
III	0,38 %	0,38 %	1,00	` t `,	<b>I</b>	I	2,79
IV	0,68 %	0,68 %	1,00	a ke P	<b>I</b> 	I	2,74
Λ	0,54 %	0,54 %	1,00	, <b>I</b>	Ĩ	I	2,75
ΛΙ	1,11 %	1,22 %	0,91	1,24 %	1,32 %	0,94	2,72
ПЛ	0,37 %	0,37 %	1,00	0,45 %	0,37 %	1,22	2,77
Richtwerte n. DIN 52100	ca. 0,5–0,6 %	I	I	Į	I	I	ca. 2,7–2,8
Anforderungen n. DIN 52106 (für Werksteine)	< 0,5 % > 0,5 %	1 1	- < 0,75	I I		I I	I I
Anforderungen n. DIN prEN 12326-1	Code A1: < 0,6 % Code A2: > 0,6 % + FTW	·	e arta				

Geolog., petrographische, geochemische und gesteinsphysikal. Untersuchungen an Dachschiefern

Probe I

Mit Platten der Probe I wurden die gesteinsphysikalischen Untersuchungen an Dachschiefern begonnen und verschiedene Versuchsverfahren getestet. Zwei Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen hier, in Form von Abbildungen, wegen ihrer allgemeinen Bedeutung dargestellt werden.





An ca. 240 Dachschieferplatten sind die Geschwindigkeit von Kompressionswellen normal zur Schieferung gemessen worden (Abb. 8). Die Platten waren lufttrocken und wurden im Direktkontakt mit Koppelpaste gemessen. Der Mittelwert von 4617 m/s ist mit einer großen Zahl von Meßwerten dieser Größenordnung vertreten. Es ist allerdings auch eine beachtliche Anzahl von Messungen mit deutlich höherer bzw. geringerer Geschwindigkeit vorhanden. Das zeigt, daß die Geschwindigkeit allein nur beschränkt geeignet ist, eine Qualitätsaussage zu machen. Wichtiger und aussagekräftiger sind Geschwindigkeitsdifferenzen, die an gleichen Platten vor und nach einem gesteinsphysikalischen Versuch gemessen werden. Trotzdem läßt sich aus dem Mittelwert der Geschwindigkeit zumindest eine grobe Qualitätsabschätzung ableiten. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß Dachschiefer, deren Geschwindigkeiten normal zur Schieferung in lufttrockenem Zustand unter 3000 m/s liegen, im allgemeinen von minderer Qualität sind (vgl. Tab. 12).

Bei den Schieferplatten aus dem Frost-Tau-Wechsel-Versuch mit 50 Zyklen ist die Wasseraufnahme vor dem Versuch, nach 25 Zyklen und nach Versuchsende bestimmt worden. Die jeweilige Wasseraufnahme zeigte erstaunlicherweise nur eine geringe Zunahme nach 50 FTW, und zwar von 0,32 Gew.-% auf 0,37 Gew.-%. Die Wasseraufnahme hat sich nach 25 FTW gegenüber dem Anfangszustand überhaupt nicht geändert. Die Qualitätsminderung muß also wohl nicht immer linear mit der Beanspruchung wachsen. Günstig für einen repräsentativen gesteinsphysikalischen Versuch dürfte daher eine möglichst hohe Zahl von Zyklen, verknüpft mit hoher Probenzahl sein.





Abb. 9: Anisotropie der Ultraschallwellengeschwindigkeit kubischer Spline mit Geschwindigkeitsmaximum bei 70 $^{\circ}$  (250 $^{\circ}$ ), Probe I.



Abb. 10: Anisotropie der Ultraschallwellengeschwindigkeit kubischer Spline mit Geschwindigkeitsmaximum bei 130 $^{\circ}$  (310 $^{\circ}$ ), Probe III.





Abb. 11: Anisotropie der Ultraschallwellengeschwindigkeit kubischer Spline mit drei Geschwindigkeitsmaxima bei 40°, 70°, 150° (220°, 250°, 330°), Probe aus Spanien.



Abb. 12: Anisotropie der Ultraschallwellengeschwindigkeit kubischer Spline mit zwei Geschwindigkeitsmaxima bei  $0^{\circ}/360^{\circ}$ ,  $70^{\circ}$  ( $180^{\circ}$ ,  $250^{\circ}$ ), Probe V.

168

Auffällig ist, daß beim FTW mit 25 Zyklen die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck zwar steigt (vgl. Tab. 10), bei der Wasseraufnahme im Autoklaven unter 150 bar Druck, die Wasseraufnahme mit dem Ausgangswert vor Versuchsbeginn aber wieder identisch ist. Dies zeigt wohl eine besondere Struktur der Poren. Bei einem normalen Wasseraufnahmeversuch unter Druck kann sich das Wasser bereits auf alle Poren genügend ausdehnen. Die Druckwirkung bei der Frostsprengung im FTW übersteigt diese Druckverhältnisse nicht und führt auch zu keiner größeren Wasseraufnahme.

Die Biegeversuche an wassergesättigten, unbeanspruchten Platten und Platten nach Säureversuch, Temperaturwechselversuch und Frost-Tau-Wechsel-Versuch mit einer auf 1 mm Plattenstärke normierten Biegekraft von 76 Newton (N), 71 N, 66 N und 74 N zeigen, daß durch diese Versuche nur eine sehr geringe Qualitätsminderung der Dachschieferplatten eingetreten ist. Diese Biegeversuche zeigen aber auch, daß bei ihrer Durchführung darauf zu achten ist, daß vergleichbare Bedingungen vorherrschen. Darunter ist aber nicht nur eine gleiche Belastungsgeschwindigkeit etc. zu verstehen, sondern vor allem gleicher Wassergehalt der Proben. Dies zeigen vor allem die beiden FTW-Versuche mit anschließendem Biegeversuch. War die normierte Biegekraft ohne Vorversuche bei lufttrockenen Platten 101 N und bei wassergesättigten 76 N, so ist die normierte Biegekraft nach den FTW-Versuchen bei lufttrockenen Platten 108 N. bei wassergesättigten Proben 74 N. Aus diesen Daten folgt auch, daß der Begriff lufttrocken als Beschreibung eines Wassergehaltes aus den DIN-Normen getilgt werden sollte, da lufttrocken nicht reproduzierbar ist. Die normierte Biegekraft nach FTW (108 N) liegt nämlich zwischen dem Wert für die trockenen, (110°C) unbeanspruchten Proben (114 N) und dem der lufttrockenen, unbeanspruchten Proben (101 N) (vgl. Tab. 11).

Die Veränderung der Ultraschallwellengeschwindigkeiten durch die gesteinsphysikalischen Versuche ergibt ein ähnliches Bild wie die der Biegeversuche. Die Wellengeschwindigkeit wird nur um wenige 100 m/s gemindert. Voraussetzung ist aber auch hier, daß die Platten unter einem definierten Wassergehalt gemessen werden (vgl. Tab. 12).

#### Probe II

Die für die Versuche verwendeten Dachschieferplatten liegen im Vergleich der Kennwerte aller Probenlokalitäten im Mittelfeld. Auffällig ist die merkliche Veränderung der physikalischen Kennwerte beim Säureversuch (s. Tab. 11 und 12). Hier ist ein deutlicher Unterschied zu dem anderen von uns untersuchten Dachschiefer I bis III bzw. VI bis VII.

## Probe III

Die Proben des Dachschiefers zeigen bei allen Versuchen überdurchschnittlich gute gesteinsphysikalische Kennwerte (im Vergleich zu den Proben der anderen Lokalitäten). Vor allem beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch zeigen sowohl die Ultraschallwellengeschwindigkeiten normal zur Schieferung (4128 m/s vor Versuch, 4114 m/s nach Versuch, vgl. Tab. 12) als auch die normierte Biegekraft (vor Versuch 111 N, nach FTW-I 95 N, nach FTW-II 100 N), daß der Schiefer durch den Versuch kaum eine Materialveränderung erfahren hat (vgl. Tab. 11).

#### Probe IV

Dieser Schiefer ist wie Probe V durch einen höheren Karbonatgehalt gekennzeichnet. Nachdrücklich wirkt sich dies im Säureversuch aus. Die normierte Biegekraft reduziert sich auf ca. 1/3 (lufttrocken und wassergesättigt) der Ausgangsfestigkeit (vgl. Tab. 11, Abb. 13). Gravierender veränderte sich die Ultraschallwellengeschwindigkeit normal zur

Versucher	
ach gesteinsphysikalischen	•
Veränderung n	•
ton und deren	
efern in New	rsuchen).
von Dachschi	destens 10 Ver
te Biegekraft	hnitt aus mine
11: Normier	eils Durchscl
Tab.	(iew

Lokalität	Biege- festigkeit in N/mm <sup>2</sup>			Normierte Biegekraft			Restf. nach SV in %	Restf. nach TW	Restf. nach FTW in ø
-	(ltr.)	tr. (110°C)	ltr.	% von tr.	wg.	% von tr.	97 III	% III	<i>%</i> III
Ι	(29,8)	114	(101)	88,60	76	66,7	(69,3 []tr]) 93,4 (wg)	86,8 (wg)	(106,9 []tr]) 97,4 (wg)
Π	(58,1)	133	(102)	76,69	75	56,4	(62,7 [ltr]) 80,0 (wg)	90,7 (wg)	(89,3 []tr])
III	(75,0)	188	(152)	80,85	111	59,0	(61,2 [ltr]) 78,4 (wg)	75,7 (wg)	(88,3 [ltr])
IV	(57,6)	143	(114)	79,72	78	54,6	(26,3 [ltr]) 32,1 (wg)	93,6 (wg)	(92,3 [ltr])
Λ	(49,5)	94	(66)	105,32	77	6'18	(45,5 [ltr]) 19,5 (wg)	76,6 (wg)	(87,0 [ltr])
IA	(29,7)	106	(57)	53,77	60	56,6	(116,0 [ltr]) 190,0 (wg)	79,7 (wg)	(161,4 [ltr])
IIV	(36,6)	93	(61)	65,59	49	52,7	(68,9 [ltr]) 153,0 (wg)	74,5 (wg)	(126,2 [ltr])
Richtwerte nach DIN 52100 (z.T. umgerechnet)	(50-80)	I	(ca. 90- 150)	1	I	I	I	ł	ł
Önorm B 3123-1	1	I	1	Į	I	1	I	Ι	größer = 80 (tr)
tr = getrocknet 11( ltr = lufttrocken wg = wassergesättig SV = Säureversuch	oc St	Restf. = Rest vor TW = Tem FTW = Fros	tfestigkeit (n dem Versuc nperaturwech st-Tau-Wechs	ach Säurever h; tr, 1tr oder hselversuch selversuch	such, TW u wg)	nd FTW jewei	ls bezogen auf	den vergleich	ıbaren Zustand

= lufttrockene Werte sind für Vergleichszwecke ungeeignet (vgl. Text)

FTW ()

Wolfgang Wagner & Horst Baumann & Jörg F. W. Negendank & Frank Roschig

170

ab. 12: Kompressionswellengeschwindigkeit und deren Veränderung in % nach Säureversuch, Durchschnittswerte aus jeweils 5 Messungen).	TW und FTW	
ab. 12: Kompressionswellengeschwindigkeit und deren Veränderung in $^{9}$ Durchschnittswerte aus jeweils 5 Messungen).	% nach Säureversuch,	
ab. 12: Kompressionswellengeschwindigkeit und derer Durchschnittswerte aus jeweils 5 Messungen).	ה Veränderung in $^9$	
ab. 12: Kompressionswellengeschwindig Durchschnittswerte aus jeweils 5 Messur	keit und derei	ıgen).
ab. 12: Kompressionswe Durchschnittswerte aus j	llengeschwindig	eweils 5 Messun
ab. 12: F Durchsci	Kompressionswe	hnittswerte aus j
	ab. 12: F	<b>Durchsc</b>

			Säureversu	ich	Ab-	Tempe	raturwechs	elversu	ch Ab-	FT	N I		Ab- nahme	FTW I		
	gef	VOF	nach	Diff.	nahme in %	VOF	nach	Diff.	nahme in %	vor	nach	Diff.	in %	vor	nach	Diff.
12	4736	(4414 [ltr]) 4150 (wg)	(4107 [ltr]) 3628 (wg)	(-307) -512	(6,96) 7,52	(4581 [ltr])	(4355 [ltr]) (35 TW)	(-226)	(4,93)	5066 (wg) (25 f	4557 (wg) TW)	-499	9,87	(4567 [ltr]) (4 (50 FTV	(118 [ltr]) (	-499)
22		(3800 [ltr]) 3858 (wg)	(3262 [ltr]) 3332 (wg)	(-537) -526	(14,13) 13,63	4214 (wg)	4090 (wg) (25 TW)	- 124	(2,94)	3815 (wg)	3709 (wg)	-106	2,78			
27		(4190 [ltr]) 4395 (wg)	(3800 [ltr]) 4048 (wg)	- 390) - 390	(9,31) 8,87	4024 (wg)	3769 (wg) (25 TW)	-255	6,34	4128 (wg)	4114 (wg)	-14	0,34			
061		(4092 [ltr]) 4210 (wg)	(2130 [ltr]) -	(-1962) -4210	(47,95) 100,00	4048 (wg)	3934 (wg) (25 TW)	- 114	0,03	4096 (wg)	4062 (wg)	-94	2,29			-
554		(4148 [ltr]) 4230 (wg)	(2552 [ltr]) -	(-1596) -4230	(38,48) 100,00	3946 (wg)	3873 (wg) (25 TW)	-43	1,09	3993 (wg)	4000 (wg)	+7	0			
531	3858	(3640 [ltr]) 3983 (wg)	(3543 [ltr]) 3494 (wg)	(-97) -489	(2,66) 12,50	(3412 [ltr])	(2998 [ltr]) (35 TW)	(-414)	(12,13)	4191 (wg)	3676 (wg)	-378	12,29	3476 (wg) 3	(98 (wg)	-378
148	3978	(4162 [ltr]) 4444 (wg)	(3845 [ltr]) 4062 (wg)	(-317) -382	(7,62) 8,60	(2958 [ltr])	(2780 [ltr]) (35 TW)	(-178)	6,02	4756 (wg)	4389 (wg)	-447	7,72	4742 (wg) 4	295 (wg)	- 447

gef. = gefrorene Probe
() = Intitrockene Werte sind für Vergleichszwecke ungeeignet (vgl. Text, weitere Abkürzungen s. Tab. 11)

Geolog., petrographische, geochemische und gesteinsphysikal. Untersuchungen an Dachschiefern

Schieferung. Von den 10 Platten im Säureversuch (5 Platten lufttrocken und 5 Platten wassergesättigt) war nur noch an einer Platte eine Wellengeschwindigkeit zu bestimmen; Bei allen anderen Platten war die Aufblätterung in der Schieferungsebene so stark, daß die Sendeleistung des Ultraschallgerätes zu gering zur Durchdringung der Platten war.



Abb. 13: Restbiegefestigkeit in Prozent bezogen auf die Ausgangsbiegefestigkeit (Platte vor Säureversuch) und Restkompressionswellengeschwindigkeit in Prozent bezogen auf die Ausgangswellengeschwindigkeit (Platte vor Säureversuch).

Die Wasseraufnahme der Platten (ohne Vorversuche) mit 0,68 Gew.-% (vgl. Tab. 10) liegt nach DIN 52 106 über dem kritischen Wert (0,5 %) für die Verwitterungsbeständigkeit. Die europäische Norm DIN prEN 12326, Teil 1, legt einen Wert von 0,6 % fest (Schiefer mit Werten darüber müssen in einen 100 fachen FTW).

Das Verhalten der Platten im Temperaturwechselversuch und im Frost-Tau-Wechsel-Versuch war dagegen tadellos. Die Biegeversuche, die nach zwei Frost-Tau-Wechsel-Versuchen ausgeführt wurden, sind ein gutes Beispiel dafür, daß der Biegeversuch, wenn er richtig angesetzt (Wassergehalt!) wird, die Veränderung der Materialeigenschaften reproduzierbar wiedergibt. War die normierte Biegekraft bei Platten ohne Vorversuche 78 N, so war sie nach den FTW-Versuchen, im Mittel 72 N, bzw. 71 N. Die Ultraschallwellengeschwindigkeiten normal zur Schieferung zeigten im Rahmen der Meßgenauigkeit keine Materialveränderung an (vgl. Tab. 12).

### Probe V

Im Säureversuch zeigt dieser Schiefer, ebenso wie Probe IV, in unseren Versuchen eine starke Schädigung. Vor allem die Platten, die lufttrocken in den Säureversuch gingen, zeigten eine deutlich geringere Beanspruchung. Bei allen fünf Platten konnte noch die Wellengeschwindigkeit normal zur Schieferung bestimmt werden (vor SV 4118 m/s;

nach SV 2552 m/s; vgl. Tab. 12). Trotz eines höheren Karbonatgehaltes als bei Schiefer IV waren die Proben im Säureversuch weniger beansprucht. Diese geringere Schädigung durch den Säureversuch könnte durch die höhere Rohdichte, vor allem aber durch eine geringere Wasseraufnahme (0,54 Gew.-%) bedingt sein. Beim Temperaturwechselversuch und beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch zeigen die Platten durchschnittliche Werte (vgl. Tab. 11).

## Probe VI

Mit Ausnahme der Ergebnisse beim Säureversuch zeigen die gesteinsphysikalischen Versuche (FTW, TW und Biegeversuche) der Proben VI die gesteinsphysikalisch ungünstigsten Kennwerte (vgl. Tab. 10 u. 11). Ganz augenfällig wird dies bei der Wasseraufnahme mit mehr als 1 Gew.-%. Diese Wasseraufnahme liegt um mehr als das Doppelte über dem Wert (0,5 %), den die DIN 52106 (Beurteilungsgrundlagen für die Verwitterungsbeständigkeit) als typisch für bedingt brauchbar bzw. nicht verwitterungsbeständig ansieht.

### Probe VII

Die Dachschieferproben der Lokalität VII zeigen in allen gesteinsphysikalischen Versuchen Ergebnisse im Mittelfeld aller untersuchten Proben. Auffällig bei diesen Platten ist die große Streuung der gesteinsphysikalischen Kennwerte einzelner Platten. So ist beispielsweise die normierte Biegekraft an wassergesättigten Platten ohne Vorversuche 49 N, nach dem Säureversuch (wassergesättigt) aber 75 N. Die Wasseraufnahme nach 25 FTW steigt von 0,38 % (Gew.-%) auf 0,45 % und zeigt damit eine starke Veränderung eines gesteinsphysikalischen Parameters durch den FTW an (vgl. Tab. 10).

4.5. Zusammenfassende Betrachtungen zu den einzelnen gesteinsphysikalischen Methoden

Im Kapitel 4.4. wurden die Ergebnisse der verschiedenen gesteinsphysikalischen Untersuchungen an Proben der sieben Dachschieferlokalitäten dargestellt. Auf Besonderheiten bei einzelnen Versuchen wurde eingegangen. Die gewonnenen Gesteinsparameter sollen im folgenden interpretiert werden und ihre Eignung für eine gesteinsphysikalische Qualitätseinstufung von Dachschieferplatten herausgearbeitet werden.

### - Wasseraufnahme und Rohdichte

Die Wasseraufnahme von Dachschiefern vor und nach gesteinsphysikalischen Versuchen ist in Tab. 10 dargestellt, und zwar der Mittelwert von 5 Platten. In der gleichen Tabelle werden auch die Mittelwerte der Rohdichten dargestellt. Ein klarer Zusammenhang dieser beiden Kenngrößen ist festzustellen. Eine geringe Rohdichte korreliert mit einer hohen Wasseraufnahme und eine hohe Rohdichte mit einer geringen Wasseraufnahme (vgl. Abb. 14). Die Dachschieferproben I und II zeigen die höchsten Rohdichten (2,78 g/cm<sup>3</sup>, 2,79 g/cm<sup>3</sup>) und die geringste Wasseraufnahme (0,32 und 0,38 Gew.-%). Die geringste Rohdichte (2,72 g/cm<sup>3</sup>) und höchste Wasseraufnahme (1,11 Gew.-%) haben die Platten der Probe VI. Die übrigen Lokalitäten liegen zwischen diesen Endwerten. Die Parameter Rohdichte und Wasseraufnahme scheinen schon eine Qualitätseinstufung widerzuspiegeln, wie sie auch durch die anderen gesteinsphysikalischen Versuche festzustellen ist, das heißt, eine hohe Rohdichte und geringe Wasseraufnahme spricht für einen Schiefer mit guten gesteinsphysikalischen Kennwerten, geringe Rohdichte und hohe Wasseraufnahme für einen Schiefer mit schlechten Kennwerten.



Abb. 14: Schiefer-Rohdichte im Vergleich zur relativen Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck (Wm, a).

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei Betrachtung der Ultraschallwellengeschwindigkeit der gleichen Platten. Die Proben I und III zeigen hohe Wellengeschwindigkeiten (4912 m/s und 4727 m/s), VI geringe (3631 m/s, vgl. Tab. 12).

Neben der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Wm, a) wurde auch die Wasseraufnahme unter Druck (Wm, d) im Autoklaven bei 150 bar hydrostatischem Druck bestimmt. Dieser Parameter brachte keine zusätzliche Information, da die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und bei 150 bar im Rahmen der Meßgenauigkeit gleich groß war (vgl. Tab. 10).

In der deutschen Naturstein-Normung (DIN 52106) mißt man der Wasseraufnahme unter Druck (Wm, d) gerade dann positive Bedeutung bei, wenn die Wasseraufnahme unter Druck deutlich höher ist als die Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck. Dies wird als Sättigungswert ausgedrückt (Quotient Wm, a zu Wm, d), der unter 0,75 als günstig gilt. Die untersuchten Dachschiefer haben jedoch (wie übrigens die meisten qualitativ guten Dachschiefer) durchweg höhere Sättigungswerte (vgl. Tab. 10).

- Biegeversuch

Drei Faktoren sind für die Reproduzierbarkeit der Biegeversuche von entscheidender Bedeutung. Wird der Biegeversuch an lufttrockenen Platten vorgenommen, führt dies aus den schon weiter oben ausgeführten Gründen häufig zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen. Wir haben für alle Lokalitäten Biegeversuche an trockenen (110°C), lufttrockenen und wassergesättigten Dachschieferplatten durchgeführt (s. Tab. 11). Allein durch den unterschiedlichen Wassergehalt der Platten beim Versuch kann die normierte Biegekraft um fast 100 % verändert werden. Nach DIN 52 112 wird das Versuchsergebnis bei Dachschieferplatten durch die Bruchkraft dargestellt. Dies muß ebenfalls zu nicht reproduzierbaren Daten führen, da die Schieferdicke von im Mittel ca. 6 mm natürlich auch 5 mm oder 7 mm sein kann. Auf Grund dieser Schwankung der Plattendicke kann die Bruchkraft um ein gutes Drittel verändert sein (Voraussetzung: Bruchkraft ist proportional zur Plattendicke). Eine wesentliche Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Meßwerte trat ein, als die Bruchkraft, wie oben geschildert, auf 1 mm dicke Platten normiert wurde; in den Daten ist daher bei den Biegeversuchen immer diese normierte Biegekraft angegeben. Die Umrechnung der Bruchkraft auf eine Biegefestigkeit nach DIN 52 112 führt beim Dachschiefer zu atypischen Werten. Bedingt durch die deutliche Anisotropie ist diese Formel, die für andere Natursteine entwickelt wurde, auf Schiefer nicht übertragbar. Es ist darauf zu achten, daß alle Versuche mit gleicher Lastzunahme gefahren werden. Werden diese Punkte beachtet, so sind die normierten Biegekräfte reproduzierbar. Drei mal zwei Biegeversuch-Sätze an wassergesättigten Platten der Proben III, IV und V nach jeweils 25 Frost-Tau-Wechseln belegen dies (jeweils Durchschnitt aus 10 Versuchen):

Lokalität	normierte B	iegekraft (N)
	Versuch I	Versuch II
III	95	100
IV	72	71
V	65	69

In diesen Beispielen sind die Abweichungen zwischen Biegeversuch I und Biegeversuch II weniger als 5 %. Den Einfluß von lufttrockenen Platten bzw. wassergesättigten Platten auf die normierte Biegekraft zeigen zwei Biegeversuche an Platten der Probe I. Obwohl die lufttrockenen Platten 50 FTW unterzogen wurden und die wassergesättigten nur 25 FTW, ist die normierte Biegekraft der lufttrockenen Platten 108 N und die der wassergesättigten nur 74 N.

Aus den Versuchsergebnissen folgt bei geeigneten Voraussetzungen eindeutig, daß Biegeversuche sinnvoll zur Beurteilung der Veränderungen bei Dachschieferplatten im Säureversuch (SV), Temperaturwechselversuch (TW) und Frost-Tau-Wechsel-Versuch (FTW) einzusetzen sind, wenn die oben angeführten Punkte beachtet werden. Qualitätsunterschiede lassen sich gut herausarbeiten. In der österreichischen Natursteinnormung sieht man eine Restfestigkeit (trocken) von weniger als 80 % der Ursprungsfestigkeit nach 25 Frost-Tau-Wechseln als problematisch an (Önorm B 3123-1 1990) (vgl. Tab. 11). - Säureversuch (SV)

Die Säureversuche wurden entsprechend DIN 52 206 durchgeführt. Anschließend wurden die Platten einem Biegeversuch unterzogen. Vor und nach Versuchsbeginn haben wir die Ultraschallwellengeschwindigkeiten normal zur Schieferung gemessen. Die DIN 52206 beschreibt die Auswirkung des Säureversuchs durch die Massenänderung der eingelagerten Dachschieferplatten. Daher wurde diese ebenfalls gemessen. Zur Charakterisierung der Dachschieferveränderungen wurden die Massenänderung, die Änderung der Ultraschallwellengeschwindigkeit und die normierte Biegekraft verwendet. Daneben wurden die makroskopisch beobachteten Plattenveränderungen wie Farbe, Belag und Rißbildung festgehalten. Alle vier gemessenen bzw. beobachteten Parameter lassen nach dem Säureversuch eindeutig zwei Gruppen von Dachschiefern erkennen. Die Dachschiefer I, III, VI und VII zeigen nur geringe Veränderungen durch den Säureversuch, während die Schiefer IV und V sehr stark in ihren physikalischen Kennwerten verändert wurden (vgl. Tab. 11 u. 12). Die Probe II nimmt eine Mittelstellung zwischen diesen beiden Gruppen ein. Nicht alle vier Parameter sind gleich gut zur Charakterisierung der Veränderungen der Schieferplatten geeignet. Die Massenänderung scheint die kritische Größe zu sein. Die Probe III zeigt für die wassergesättigten Platten eine gemittelte Massenänderung von 0,32 % und für die lufttrockenen Platten von 0,39 %. Biegekraft (102 N und 102 N) und Ultraschallwellengeschwindigkeitsdifferenz (-347m/s und -390 m/s) ergeben für wassergesättigte und für lufttrockene Platten praktisch identische Werte (vgl. Abb. 13). Die lufttrockenen Proben VI und VII weisen nach 14 Tagen ein Massendefizit (Absplitterungen) auf. Nach 28 Tagen zeigen sie, wie alle anderen Platten, eine Massenzunahme. Am deutlichsten tritt die Veränderung der physikalischen Gesteinseigenschaften beim Säureversuch durch die Ultraschallmessungen hervor. Die wassergesättigten Proben IV und V sind so stark verändert, daß keine Messungen mehr möglich waren. Bei den lufttrockenen Platten zeigt sich, daß die Probe V weniger geschädigt ist als die Probe IV (bei IV war die Ultraschallwellengeschwindigkeit nur noch an einer Platte meßbar, bei V an allen fünf Platten).

Bei der Interpretation der Biegekräfte nach dem Säureversuch fällt auf, daß bei dickeren Platten die normierte Biegekraft weniger stark absinkt als bei dünnen Platten (dies ist wohl dadurch zu erklären, daß die Platten vor allem von den Oberflächen her angegriffen werden). Der Einflußfaktor Plattendicke ist somit nicht durch Normierung korrigierbar. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu allen anderen durchgeführten Biegeversuchen. In den Säureversuch sollten also immer gleich dicke Platten eingebracht werden. Ein Beispiel von Platten der Probe VI soll dies belegen. Der Mittelwert der normierten Biegekraft ist bei den lufttrockenen Platten 60 N und bei den wassergesättigten 114 N, obwohl im Säureversuch üblicherweise die wassergesättigten Proben stärker verändert werden und somit ihre Bruchlast gegenüber der der lufttrockenen Platten entsprechend geringer ist. Die wassergesättigten Platten haben aber Dicken bis 7,45 mm, die lufttrockenen nur bis 5,5 mm. Auch ein Vergleich der normierten Biegekraft von unterschiedlich dicken lufttrockenen Platten nach dem Säureversuch zeigt den gleichen Effekt. Die dickste Platte mit 5,5 mm hat eine normierte Biegekraft von 85 N, die dünnste Platte mit 4,0 mm eine normierte Biegekraft von 30 N!

Bei der makroskopischen Beschreibung der Platten nach den Säureversuchen waren vor allem bei den Proben I und VI nach Abtrocknen der Platten kleine, feste Kügelchen zu sehen, die nach einiger Zeit trüb wurden und eine leicht gelblich-grüne Farbe annahmen. Es handelt sich röntgenographisch um ein Heptahydratvitriol, und zwar um den Melanterit (FeSO<sub>4</sub> x 7H<sub>2</sub>O). Dieses Mineral entsteht als Neubildung z. B. aus Schwefelkies und ist abwaschbar.

- Langzeit-Säureversuch

Bei den meisten Tests der Materialprüfung, so auch in der Prüfung von Naturstein und Dachschiefer, handelt es sich um sogenannte "Zeitraffer-Tests". Erstes Ziel solcher Tests ist die Reproduzierbarkeit. Dagegen wird oft die Frage, ob ein solcher Test wirklich langzeitliche Umweltbedingungen nachstellt, als nicht so wichtig erachtet (vgl. WAGNER 1996). Bei der Erarbeitung der DIN prEN 12326 stand vor allem der Säuretest im Mittelpunkt der Diskussion. Daneben kam auch die Frage auf, inwieweit Langzeitwirkungen bei guten Schieferqualitäten ohne Kalkgehalt mit einem Test über den Zeitraum von nur 28 Tagen (wie bei DIN 52 206 vorgesehen) vorausgesagt werden können. Daß gute Schiefer außerordentlich lange halten (oft länger als das Zubehör, wie z. B. Nägel oder die Unterkonstruktion) ist ja hinreichend bekannt. Allerdings haben sich die atmosphärischen Verhältnisse in den letzten Jahrzehnten teilweise deutlich verschlechtert (Stichwort: Saurer Regen, der vom Säuretest nachgestellt wird), und es ist bekannt, daß es jetzt Verwitterungsprozesse gibt, zu denen es früher nicht gekommen ist. Nachweislich verwittern dadurch problematische Schiefer tatsächlich schneller. Aber was ist mit sehr guten Schieferqualitäten? Halten die jetzt in der heutigen Atmosphäre tatsächlich noch über 200 Jahre?

Diese Überlegungen und die auch oben erläuterten Ergebnisse führten im Hause Rathscheck zu einem 5 Jahre währenden Langzeittest. Die Prüfbedingungen entsprechen der DIN 52206, wobei allerdings die Kontrollwägungen in größeren Abständen erfolgten.

Zunächst verläuft der Test bei kalkhaltigen Schiefern (z. B. unter anderem Probe IV) wie allgemein bekannt. Es erfolgt schon nach wenigen Tagen eine Farbänderung von der Ursprungsfarbe blaugrau zu hellgrau. Bereits nach wenigen Wochen setzen langsam Aufweicherscheinungen ein. Erste Gefügezerstörungen erfolgen zum Teil bereits in den ersten Wochen. Diese Zerstörungen gehen auch fortschreitend weiter, so daß die untersuchten Platten z. B. nach ca. 200 bis 300 Tagen völlig zerstört sind und nur noch mit Hilfsmitteln (durchlöcherte Plastikfolie) weiterhin in der Testatmosphäre gehalten werden können.

Alle diese Prozesse, auch die Farbänderung, scheinen zunächst an die Umwandlung von Kalk zu Gips gebunden zu sein, dabei nimmt die Masse kräftig zu. Nach der ersten Gefügezerstörung von ca. 200 bis 300 Tagen nimmt die Geschwindigkeit zwar ab (vgl. Abb. 15), jedoch gibt es noch nach 5 Jahren deutliche Massenzunahme mit auch fortschreitenden Zerstörungserscheinungen. Die untersuchten Schiefer haben also keinesfalls eine schützende Gipskruste gebildet, wie das bei manchen Kalksteinen der Fall sein kann.

Eine stöchiometrische Überprüfung des Umwandlungsprozesses Kalkspat (CaCO<sub>3</sub>) zu Gips (CaSO<sub>4</sub> x 2 H<sub>2</sub>O) zeigt, daß dieser Prozeß keinesfalls die gesamte Massenänderung bewirkt haben kann, sondern wahrscheinlich nur die merklichere Reaktion in den ersten 200 bis 300 Tagen bis zur deutlichen Gefügezerstörung. Durch die Gipsbildung ist nämlich nur eine Massenänderung von ca. 7 bis 15 % zu erwarten (bei Kalziumkarbonatgehalten von 10 bis 20 %). Der darüber hinaus gehende Massenzuwachs ist auf andere Prozesse, z. T. auch auf die erhebliche Wasseraufnahme der stark zerstörten Probe zurückzufuhren. Zwei Kontrollmessungen nach 2200 Tagen ergaben bei einer Trocknung von 40 °C eine Massenabnahme bis zur Gewichtskonstanz von 12,4 % bzw. 17,4 % (nach 4 Tagen) bzw. bei 110°C eine Massenabnahme von nochmals zusätzlich 10,7 % bzw. 8,7 %.

Betrachtet man einen kalkfreien Tonschiefer (z. B. Probe I) so zeigt sich, daß das Verhalten der ersten 24 Tage (normaler Testzeitraum von DIN 52 206) auch auf längere Zeit-



Abb. 15: Ergebnisse von Langzeit-Säuretests unterschiedlicher Schiefertypen und einer Wellasbestplatte (industriell) zum Vergleich.

räume von z. B. 5 Jahren übertragbar ist. Bis auf die bereits geschilderte Farbänderungen gab es auch über diesen langen Zeitraum hinweg keine Veränderungen. Die Massenzunahme betrug max. 0,6 %. Im Vergleich dazu traten Gewichtszunahmen von 51 % bei Probe IV oder bis zu 70 % bei anderen kalkhaltigen Schiefern auf (vgl. Abb. 15).

Aufschlußreich ist daneben auch ein Langzeit-Vergleichsversuch mit Wellasbestzement. Das Festigkeitsgefüge des Asbest-Zement-Gemischs ist selbst über den weiten Zeitraum stabil geblieben. Kritisch ist jedoch zu bewerten, daß sich bereits nach ca. 400 Tagen Fasern aus dem Verband herauslösen. Die in der Praxis oft geäußerte Anregung, doch die zahlreichen Asbest-Zement-Dächer zu lassen wie sie sind und eine aufwendige Entsorgung mit den auftretenden Asbestose-Gefahren zu unterlassen, wird durch diese Ergebnisse nicht gestützt.

Trotz dieser sehr interessanten Ergebnisse führen natürlich Langzeitversuche bei der Normendiskussion nicht sehr viel weiter, da die Materialprüfung zu Recht überschaubare und damit handhabbare Prüfzeiträume fordert. Andererseits sollten Versuchsbedingungen auch nicht so abgeschwächt werden (wie von HEISS & ZALLMANZIG 1994 und KIRCHNER & ZALLMANZIG 1995 aufgrund von wenigen Testergebnissen aus dem regional begrenzten Bereich der Proben IV und V vorgeschlagen), daß während der Versuchszeit keine Reaktionen mehr auftreten können, die für bestimmte Schiefertypen durchaus charakteristisch sind. Auch ist zu bedenken, daß bei einem begrenzten Säuredargebot im Testzeitraum, höher kalkhaltige Schiefer untypisch günstige Ergebnisse zeigen, da die Säure durch den Kalkgehalt der Proben schon frühzeitig gepuffert wird.

- Temperaturwechselversuch (TW)

Die Auswirkung des Temperaturwechselversuchs wird nach DIN 52204, vor allem nach den makroskopisch beobachteten Veränderungen der Platten während des Versuchs beschrieben.

Zusätzlich kann der Biegeversuch nach Versuchsende zur Beurteilung herangezogen werden. Im Projekt wurden weiterhin die Ultraschallwellengeschwindigkeiten der Dachschieferplatten vor Versuchsbeginn und im Anschluß an den Versuch gemessen und der Massenverlust durch den Versuch bestimmt. Die Platten der Proben I, VI und VII wurden 35 Temperaturwechseln ausgesetzt, die der Proben II, III, IV und V nur 25 Temperaturwechseln (25 Temperaturwechsel entsprechen der Empfehlung der DIN 52204). Eine Zusammenstellung der Daten ist in Tab. 11 und 12 gegeben.

Bei den Versuchen zeigte sich, daß die unterschiedliche Zahl der Temperaturwechsel kaum Einfluß auf die nach dem Versuch festgestellte normierte Biegekraft oder die Veränderung der Ultraschallwellengeschwindigkeit hat. Generell ist die Abnahme der normierten Biegefestigkeit nicht größer als 25 %, mit einem Bestwert von < 2 % (Probe IV). Die Reproduzierbarkeit der normierten Biegefestigkeit ist gut bis akzeptabel (jeweils Durchschnitt aus 10 Werten):

Lokalität	normierte B	iegekraft (N)
	Versuch I	Versuch II
III	74	94
IV	77	70
V	58	60

Die Ultraschallwellengeschwindigkeit zeigt während des Versuchs keine starke Abnahme. Aus dem Rahmen fallen die Probe VI mit der größten Geschwindigkeitsdifferenz (Abnahme um 12,1 %) und Probe VII mit einer sehr geringen Geschwindigkeit vor und nach dem Versuch (2958/2780 m/s). Die Proben VI und VII zeigen nach TW auch die geringste normierte Biegekraft (48 N/37 N). Das Massendefizit war ebenfalls bei diesen Schiefern mit 0,06 und 0,08 % am größten.

- Frost-Tau-Wechsel-Versuch (FTW)

Die Auswirkungen des Frost-Tau-Wechsel-Versuchs (FTW) werden nach DIN 52104 durch Gewichtsverlust beim Versuch und gegebenenfalls durch einen anschließenden Biegeversuch festgestellt. Im Projekt wurden zusätzlich Ultraschalluntersuchungen an allen Proben durchgeführt, und zwar wurden die Platten vor Versuchsbeginn und nach Abschluß der Versuche gemessen. Bei den Proben I, VI und VII sind nach Versuchsende zusätzlich die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und unter 150 bar gemessen worden. Die Zusammenstellung der Daten erfolgte in Tab. 10.

Die Proben VI und VII wichen im Massendefizit deutlich von allen anderen Proben mit 0,08 % und 0,2 % ab. Die Proben I bis V zeigten mit 0,05 % bis 0,06 % ein einheitliches Bild. Es ist zu sehen, daß die Platten der Probe I im lufttrockenen Zustand und nach 50 FTW deutlich besser in der normierten Biegekraft sind, als die der Proben VI und VII (I = 108 N; VII = 72 N bzw. 80 N; VI = 84 N bzw. 98 N). Nach 25 FTW liegen die Proben I, II, IV und V in der normierten Biegekraft (an wassergesättigten Platten) auf gleichem Niveau (74 N; 72 N/71 N; 65 N/69 N; 67 N). Die Platten der Lokalität III liegen in der normierten Biegekraft deutlich höher (95 N/100 N), was aber auch auf eine insgesamt höhere normierte Biegekraft der unbeanspruchten Platten zurückzuführen ist. Die prozentuale Abnahme ist ähnlich wie bei den Schiefern I, II, IV und V.

Die Ultraschallmessungen mit der Technik der Wasserspaltankopplung (Proben II, III, IV und V) zeigen ein ähnliches Bild wie die normierten Biegekräfte (vgl. Tab. 12). Die Platten der Proben II, III, IV und V weisen praktisch keine reduzierten Wellengeschwindigkeiten auf, sind also durch den Versuch kaum geschädigt. Die Ultraschallmessungen an den Proben I, VI und VII sind nicht direkt vergleichbar, da sie mit anderer Versuchstechnik und noch ohne Beachtung des genauen Wassergehaltes gemessen wurden.

Ultraschallmessungen und Biegeversuche zeigen, daß der FTW die Platten nur gering beansprucht, daß aber geringe Beanspruchungsunterschiede feststellbar sind.

 Wertung der Ergebnisse gesteinsphysikalischer Untersuchungen an Proben von sieben Lokalitäten

Eine zusammenfassende Wertung aller gesteinsphysikalischen Untersuchungen ist schwierig, da zum Beispiel im Frost-Tau-Wechsel-Versuch andere Gesteinseigenschaften eine Rolle spielen als beim Säureversuch. Für jeden Versuchstyp (FTW etc.) läßt sich durch die gemessenen Parameter eine relative Abfolge der jeweiligen Veränderungen der physikalischen Eigenschaften treffen. Proben die durch die Beanspruchungen keine oder nur geringe Veränderungen zeigen, sind qualitativ sicher höher zu bewerten als solche Proben, die stark verändert wurden. Die Proben IV und V mit erhöhtem Kalkgehalt (vgl. Tab. 2 und 3) zeigen auch stärkere Entfestigung nach dem Säuretest, sowohl in der Biegefestigkeit als auch in der Abnahme der Kompressionswellengeschwindigkeit (vgl. Abb. 13). Allerdings nicht proportional zum Kalkgehalt, sondern es spielen auch petrographische und Gefüge-Eigenschaften eine Rolle, die zum relativ besseren Ergebnis bei V trotz höheren Kalkgehalts führen. Bei der Biegefestigkeit insgesamt (Tab. 11) könnte auch das Gefügemerkmal Winkel zwischen Schieferung und Schichtung (S1/S0) eine Rolle spielen. So hat der einzige Massenschiefer III (vgl. ARBEITSGRUPPE DACHSCHIEFER TRIER 1989, WAGNER 1994 b) auch die besten Werte, während die Druckschiefer (mit deutlichem Winkel) geringere Werte zeigen. Allerdings ist bei diesem Massenschiefer (Probe III) auch die Festigkeitsabnahme nach TW und FTW mit am höchsten.

## 5. Zusammenfassung der Ergebnisse als Anregung für die neue europaweite Schiefernormung (DIN prEN 12326 Teil 1 und 2)

Die Probenahme sollte entsprechend DIN 52 101 erfolgen. Wenn möglich, sollte sie in der Lagerstätte getätigt werden.

Die Probevorbereitung muß präziser als bisher in den DIN-Normen geregelt, durchgeführt werden. Es ist sinnvoll, für alle Versuche eine einheitliche Plattengröße von 200 mm mal 100 mm und eine möglichst einheitliche Dicke von ca. 5 mm vorzuschreiben. Dadurch wird erreicht, daß verschiedene gesteinsphysikalische Versuche nacheinander an der gleichen Platte durchgeführt werden können. Weiterhin ist es sinnvoll, die Platten mittels Diamantsäge zu formatieren; dadurch wird eine bessere Reproduzierbarkeit der Versuche erzielt. Generell sollten Untersuchungen nicht an lufttrockenen Proben vorgenommen werden, da dieser Wassergehalt nicht exakt definiert ist. Die Versuchsergebnisse sind besser reproduzierbar, wenn wassergesättigte oder getrocknete Proben für die Versuche verwendet werden.

Die Rohdichte sollte nach DIN 52102 bestimmt werden, und zwar an Einzelstücken nach dem Auftriebverfahren (VB 1).

Die Wasseraufnahme wird abweichend von DIN 52103 besser an Platten mit den Abmessungen 200 mm mal 100 mm mal 5 mm durchgeführt. Es genügt die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck zu prüfen.

Der Biegeversuch sollte nach DIN 52112 mit Mittelpunktbelastung und definierter Lastzunahme durchgeführt werden. Das Versuchsergebnis wird dabei als normierte Biegekraft angegeben (Bruchkraft / Plattendicke an der Bruchstelle). Bei Biegeversuchen nach einem vorangegangenen gesteinsphysikalischen Versuch werden die Platten im wassergesättigten Zustand geprüft. Beim Biegeversuch an Platten ohne Vorversuch werden je 10 Platten wassergesättigt und getrocknet (110 °C) geprüft. Der bislang in den Normen vorgesehene Zustand "lufttrocken" führt zu unnötigen Ergebnisschwankungen. Bei Platten die eine  $\delta$ -Linie zeigen, können die Bruchlasten streuen, da diese in einem weiten Bereich von der Orientierung der Biegeschneide zur  $\delta$ -Linie abhängig sind. Dieser Effekt ist u. a. in einer Gruppe von spanischen Schiefern zu beobachten.

Temperaturwechselversuch (TW) und Frost-Tau-Wechsel-Versuch (FTW) sollten nach DIN 52 204 bzw. DIN 52 104 durchgeführt werden. Die Plattenschädigung durch die Versuche kann durch Ultraschallmessungen normal zur Schieferung vor und nach dem Versuch an wassergesättigten Platten ermittelt werden. Es sollten die jeweiligen Absolutgeschwindigkeiten (Wasserspaltankoppelung) und die Geschwindigkeitsdifferenzen angegeben werden. Beiden Versuchen (TW/FTW) wird ein Biegeversuch nachgeschaltet. Unter bestimmten Umständen ist es sinnvoll, vor diesen Biegeversuchen, die Wasseraufnahme der Platten unter Atmosphärendruck zu bestimmen. Der Erfahrung nach ist es am besten, bei beiden Versuchen, FTW und TW, die Versuchsauswirkungen auf die Platten quantifizierbar mit Ultraschallwellenuntersuchungen, Biegeversuch und Wasseraufnahme zu erfassen.

Der Säureversuch sollte weitgehend nach DIN 52206 durchgeführt werden. Die günstigste Plattengröße ist aber 200 mm mal 100 mm mal 5 mm (aus den in Kap. 4.5. angeführten Argumenten ist eine möglichst einheitliche Plattendicke bei allen Säureversuchen besonders wichtig). Die Platten werden mit einer Diamantsäge formatiert. Die Platten gehen anstatt lufttrocken, getrocknet (110°C) in den Versuch. Zusätzlich werden vor und nach dem Versuch die Ultraschallwellengeschwindigkeiten normal zur Schieferung gemessen. Dem Säureversuch folgt ein Biegeversuch an wassergesättigten Platten. Wird eine gesteinsphysikalische Untersuchung nach dem vorgestellten Schema durchgeführt, läßt sich die gesteinsphysikalische Qualität eines Dachschiefers, auch aus einer bisher unbekannten Lagerstätte, relativ zu der eines bereits untersuchten Dachschiefers, feststellen. Sollen die gesteinsphysikalischen Eigenschaften eines Schiefers aus laufender Produktion überwacht werden, würden unseres Erachtens häufigere Bestimmungen der Rohdichte oder der Wasseraufnahme genügen, um eine gleichmäßige gesteinsphysikalische Qualität der Schiefer zu sichern. Bei signifikanter Änderung dieser Parameter können dann Versuche entsprechend den oben gemachten Vorschlägen durchgeführt werden.

Zwischenzeitlich konnten einige dieser Erkenntnisse unter tatkräftigem Engagement aus dem vorgestellten Forschungsvorhaben mit in die Europäische Normung eingebracht werden. So sieht die DIN prEN 12326-2 z. B. eine lufttrockene Prüfung nicht mehr vor sondern eine Trocknung bei 110°C.

Die Einführung der Messung der Kompressionswellengeschwindigkeit vor und nach Belastungsversuchen wird trotz besserer Aussagekraft bislang abgelehnt, weil geeignete Geräte hierfür in der europaweiten Materialprüfung noch nicht eingeführt sind.

Als ein entscheidender Schritt für die Anwendbarkeit der neuen europäischen Schiefernorm erwies sich die Einführung der petrographischen Analyse in die Norm DIN prEN 12326 Teil 2, obwohl dies in den wichtigen Schieferstandards des europäischen Auslands bislang nicht verankert war. Die jetzt genormte Methodik entspricht der erarbeiteten Vorgehensweise, wie sie in Kap. 2. beschrieben ist. Die DIN prEN 12 326 weist der Petrographie die Aufgabe der "Identifikation" zu. Das heißt die Petrographie muß klären, ob es sich tatsächlich um Tonschiefer i. e. S. (Dachschiefer i. e. S.) handelt oder um Sonderfälle von z. B. höher kalkhaltigen Schiefern (sogenannten "carbonate slates"), bzw. Schiefern mit höherem Metamorphosegrad (z. B. Phyllitschiefer) oder gar um nur gut spaltbare Gesteine, die keinesfalls Schiefer sind. Außerdem soll hiermit die Herkunft des Schiefers eingeengt und wenn nötig kontrolliert werden können. Beides ist anerkanntermaßen Voraussetzung für eine richtige Wertung aller technischen Testergebnisse, die im Rahmen der Norm erfaßt werden.

Die im Rahmen des Forschungsprojekts gewonnenen petrographischen Ergebnisse lassen darüber hinaus auch Qualitätsaussagen zu. Dies wurde bislang in der neuen Europäischen Norm bedauerlicherweise bis jetzt noch nicht berücksichtigt.

#### Schriften

- ARBEITSGRUPPE DACHSCHIEFER, TRIER (1989): Die gesteinskundliche Analyse von Dachschiefern (DIN 52201 A). – Der Dachdeckermeister, 6-89, S. 14-24, Bochum.
- BENTZ, A. & MARTINI, H.J. (1968): Lehrbuch der angewandten Geologie. II/l, S. 1226-1229, 3 Tab., (Enke) Stuttgart.
- DIN 52 100 (1935): Prüfung von Naturstein Richtlinien zur Prüfung und Auswahl von Naturstein. 5 S., (Beuth) Berlin.
- DIN 52 101 Entwurf (1986): Prüfung von Naturstein Probenahme. 20 S., (Beuth) Berlin.
- DIN 52 102 (1988): Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen Bestimmung von Dichte, Trockenrohdichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität. 10 S., (Beuth) Berlin.
- DIN 52 103 (1988): Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert. 4 S., (Beuth) Berlin.
- DIN 52104 (1982): Prüfung von Naturstein Frost-Tau-Wechsel-Versuch. 6 S., (Beuth) Berlin.

Geolog., petrographische, geochemische und gesteinsphysikal. Untersuchungen an Dachschiefern

DIN 52106 Entwurf (1992): Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen – Untersuchungen zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit. 14 S., (Beuth) Berlin.

DIN 52112 (1988): Prüfung von Naturstein - Biegeversuch. 3 S., (Beuth) Berlin.

DIN 52201 (1985): Dachschiefer, Begriff, Prüfung. 3 S., (Beuth) Berlin.

- DIN 52204 (1985): Prüfverfahren für Dachschiefer Temperaturwechselversuch. 2 S., (Beuth) Berlin.
- DIN 52206 (1975): Prüfung von Dachschiefer. Säureversuch. 1 S., (Beuth) Berlin.
- DITTMAR, U. (1996): Profilbilanzierung und Verformungsanalyse im südwestlichen Rheinischen Schiefergebirge. – Beringeria (Würzburger geowiss. Mitt.), 17,346 S., 85 Abb., 7 Tab., 15 Taf., 1 Anl., Würzburg.
- EUROPÄISCHE NORM DIN-pr EN 12326-1 (1997): Schiefer und andere Natursteinprodukte für Dachdeckungen und Außenwandbekleidungen – Teil 1: Produktanforderungen. 15 S., (Beuth) Berlin.
- EUROPÄISCHE NORM DIN-pr EN 12326-2 (1996): Schiefer und andere Natursteinprodukte für Dachdeckungen und Außenwandbekleidungen – Teil 2: Prüfverfahren. 36 S., (Beuth) Berlin.
- FRANKE, W. & DALLMEYER, D. & WEBER, K. (1995): Geodynamic evolution. In: DALLMEYER,
  D. & FRANKE, W. & WEBER, K. (Hrsg.): Pre-Permien Geology of Central and Western Europe, S. 579-593, (Springer) Berlin Heidelberg New York.
- FRANKE, W. & MEISCHNER, D. & ONCKEN, O. (1996): Geologie eines passiven Plattenrandes: Devon und Unterkarbon im Rechtsrheinischen Schiefergebirge. – Exkursion der geol. Vereinigung, 3, 74 S., 49 Abb., Gießen.
- FRANKE, W. & ONCKEN, O. (1990): Geodynamic evolution of the North-Central-Variscides
   a comic strip. In: FREEMAN, R. & IESE, P. & MÜLLER, S. (Hrsg.): The European Geotraverse: Integrative Studies, S. 187-194, Strasbourg.
- HEISS, K. & ZALLMANZIG, J. (1994): Schiefer landschaftsprägend und denkmalgerecht. Bautenschutz u. Bausanierung, 5 u. 6/94, 4 S., 4 Abb., (Müller) Köln.
- HIRSCHWALD, J. (1911): Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. IX. Teil: Die Dachschiefer einschließlich der Tonschiefer im allgemeinen und ihre Prüfung. S. 592-904, Berlin.
- HOPPEN, E. A. (1986/87): Schiefer, natürlicher Baustoff für Kenner und Könner. Deutsches Dachdeckerhandwerk (DDH), Teil 1: 107. Jg. 21/86 S. 14-18, Teil 2: 22/86, S. 30-34, Teil 3: 108. Jg, 1/87, S. 18-22, Köln.
- JUNG, D. (1994): Zur Frage der Qualitätsbeurteilung von Dachschiefer. Schriftenreihe Schiefer-Fachverband in Deutschland e. V., 4, S. 157, 35 Abb., Bonn.
- KHORASANI, R. (1994): Einfluß von Karbonatgehalt und Gefügemerkmalen auf die Witterungsbeständigkeit von Dachschiefern, beschrieben an zwei Fallbeispielen mit Sauerländer Schiefer. – Schriftenreihe Schiefer-Fachverband in Deutschland e.V., 4, S. 119-137, 14 Abb., Bonn.
- KIRCHNER, K. & ZALLMANZIG, J. (1995): Lagerstättenkundliche Übersichtsuntersuchung und materialkundliche Charakterisierung der westfälischen Schiefergruben. – Metalla, 2/2, S. 63-78, 9 Abb., 6 Tab, Bochum.
- KRAUTKRÄMER, J. & KRAUTKRÄMER, H. (1986): Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 708 S., (Springer) Berlin Heidelberg New York Tokyo.
- NEGENDANK, J. F. W. & WAGNER, W. & BAUMANN, H. & ROSCHIG, F. (1991): Projekt Wirtschaftsnahe Forschung – Dachschiefer. Abschlußbericht: 161 S., 15 Abb., 27 Tab., 3 Taf., Anhang A bis H: 148 S., 52 Abb., 117 Tab., Universität Trier, Abt. Geologie, Trier [unveröff.].

- ÖNORM B 3123 TEIL 1 (1990): Prüfung von Naturstein, Verwitterungsbeständigkeit, Beurteilungskriterien. 11. S., (O.N.) Wien.
- VAN RHIJN, J. C. & MELKERT, M. J. A. (1993): Petrographical Criteria for the examination of roof slates. Expertise, 74 S., (Rockview) Amsterdam.
- WAGNER, W. (1992): Dachschiefer in der Lagerstätte. Schriftenreihe Schiefer-Fachverband in Deutschland e. V., 1, S. 75-82, Bonn.
- W. (1994 a): Geologische Vorgaben zur Gewinnung und zur Optimierung der Gesteinsausnutzung im Dachschieferbergbau. – Mainzer geowiss. Mitt., 23, S. 39-50, 8 Abb., 1 Tab., Mainz.
- W. (1994 b): Die Gesteinskundliche Analyse des Dachschiefers nach DIN 52201 A. Schriftenreihe Schiefer-Fachverband in Deutschland e. V., 3, S. 139-145, Bonn.
- W. (1996): Geologie und Europäische Normung Erkenntnisse aus der Normung von Schiefer, Natursteinen und Gesteinskörnungen. – Nachr. deutsch. geol. Ges., 58, S. 33 – 39, 3 Tab., Hannover.
- WAGNER, W. & HOPFEN, E. A. (1995): Forschungen zur Modernisierung des Schieferbergbaus. – Schriftenreihe GDMB, 73, 333 S., 105 Abb., 7 Tab., Clausthal-Zellerfeld.
- WAGNER, W. & LE BAIL, R. & HACAR-RODRIGUEZ, M. & STANEK, S. (1994): European roofing slates, part 1: Remarks to the Geology of Mineral Deposits. - Z. angew. Geol., 40, 2, S. 68-74, 6 Fig., Stuttgart.
- WAGNER, W. & LE BAIL, R. & HACAR-RODRIGUEZ, M. & STANEK, S. (1995): European roofing slates, part 2: Geology of selected Examples of Slate Deposits. - Z. angew. Geol., 41,1, S. 21-26, 8 Fig., Stuttgart.
- WAGNER, W. & STANEK, S. (1991): Loziska štipatelných jílouých bridlic v Europe se zvláštním zretelem na moravskoslezsky kulm. – Geologicky pruzkum, 5/91, S. 135-138, 3 Abb., 1 Tab., 1 Taf., Prague.
- WEBER, K. (1976): Gefügeuntersuchungen an transversalgeschieferten Gesteinen aus dem östlichen Rheinischen Schiefergebirge (Ein Beitrag zur Genese der transversalen Schieferung). Geol. Jb., D 15, S. 3-98, Hannover.

Anschriften der Autoren:

Dr. WOLFGANG WAGNER, Öffentl. bestellter u. vereidigter Sachverständiger für Schiefer und Schieferbergbau, Am Sürchen 8, D-56727 Mayen.

Dr. Horst Baumann, Abt. Geologie, Universität Trier, D-54286 Trier.

Prof. Dr. Jörg F. W. NEGENDANK, Direktor Aufgabenbereich 3: Struktur & Evolution der Lithosphäre, Geo Forschungszentrum Potsdam, Telegrafenberg 17 A, D-14473 Potsdam. Dr. FRANK ROSCHIG, Konrad-Adenauer-Str. 64, D-69207 Sandhausen.

Manuskript eingegangen am 12. 5. 1997