

**Untersuchungen der Gefügeanisotropie von
Carrara-Marmor und deren Einfluss
auf die Verwitterung**

vorgelegt als
Dissertation

an der
Fakultät für Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

von
Flurije Sheremeti-Kabashi

München, April 2002

Gedruckt mit Unterstützung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes

1. Berichterstatter: Prof. Dr. D. D. Klemm
2. Berichterstatter: Prof. Dr. R. Snethlage

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juli 2002

*Mit Respekt und Liebe an meine Eltern,
Hana und Halit Sheremeti,
deren Ausstrahlung und Güte immer beeinflussend
und inspirierend auf mich gewirkt haben*

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Anwendung der Ultraschallmessungen zur Bestimmung der Gefügeanisotropie von Marmor beschrieben. Messungen wurden an sechs seit 1991 am Institut für Geologie in München exponierten 20x20x20 cm Carrara-Marmorwürfel aus dem Euromarble Projekt, an zwei Marmorkugeln, einer aus Carrara mit 10 cm Durchmesser und aus Laaser mit 5 cm Durchmesser und an sechs abgefallenen Grabkreuzen aus dem alten Südfriedhof in München durchgeführt. Die festgestellten stark ausgeprägten Anisotropien der Ultraschalltomographie sowie aufweisende unterschiedliche Anisotropiekoeffizienten zeigten, daß die Berücksichtigung der Orientierung von Calcitkristallen an Marmor zwingend notwendig ist. Als Vergleichsverfahren kam der Universaldrehtisch zum Einsatz. Es konnte sehr schöne Korrelation zwischen den Ergebnissen dieser beiden Methoden festgestellt werden. Die Werte der Verteilungs-Konturliniendiagrammen im Schmidt'schen Netz der minimalen und maximalen Ultraschallgeschwindigkeiten korrespondieren sehr gut zu Orientierung der optischen c-Achsen.

Die durch die thermische Belastung hervorgerufenen Materialveränderungen wurden durch Ultraschallmessungen quantitativ erfaßt. Da die Dauerhaftigkeit eines Marmors neben der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung von seinem Verhalten gegenüber Wasser, speziell vom Frostwiderstand abhängt, wurden 100 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen frischer und verwitterter Marmorproben durchgeführt. Die zusätzliche Registrierung der Veränderungen der Ultraschallgeschwindigkeiten und Porenradienverteilungen erlaubte eine zuverlässigere Unterscheidung des Verwitterungsverhaltens der einzelnen Marmorproben. Als Basis dienten die Ergebnisse aus umfangreichen Untersuchungen senkrecht und parallel zur Orientierung der c-Achsen, welche die Bedeutung der Einregelung der Calcitkristalle unterstreichen.

Die mit drei verschiedenen Konservierungsmitteln behandelten Proben zeigten, daß die Ultraschallgeschwindigkeit zur Wirkung von Steinverfestigern geeignete Informationen liefert.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis	4
Vorwort	6
1. Einleitung	8
2. Materialien und Methoden	12
2.1. Probenmaterial	12
2.2. Gesteinsbeschreibung	14
2.3. Ultraschallmessungen	15
2.3.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens	16
2.3.2. Untersuchungsziel	17
2.3.3. Versuchsdurchführung	18
2.4. Stereonez	23
2.4.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens	23
2.4.2. Untersuchungsziel	23
2.4.3. Versuchsdurchführung	23
2.5. Universaldrehtischmessungen	24
2.5.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens	24
2.5.2. Untersuchungsziel	25
2.5.3. Dünnschliffe	25
2.6. Rasterelektronenmikroskopie	26
2.7. Quecksilberporosimetrie	26
2.7.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens	26
2.7.2. Untersuchungsziel	27
2.7.3. Versuchsdurchführung	28
2.8. Bestimmung der Biegezugfestigkeit	29
2.8.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens	29
2.8.2. Untersuchungsziel	30
2.8.3. Versuchsdurchführung	30
2.9. Wasseraufnahme	32

2.9.1. Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	32
2.9.2. Auftriebs-Verfahren	33
2.9.3. Sättigungswert	34
2.10. Frost-Tau-Wechselversuch	35
2.10.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens	35
2.10.2. Untersuchungsziel	35
2.10.3. Versuchsdurchführung	36
2.11. Thermische Belastung	37
2.12. Konservierungsmittel	38
3. Ergebnisse	41
3.1. Ultraschallmessungen	41
3.1.1. Räumliche Verteilung der Ultraschallgeschwindigkeiten	41
3.1.2. Bestimmung der Orientierung von Calcitkristallen	54
3.1.3. Bestimmung der Geschwindigkeitsanisotropie	58
3.2. Porenraumbezogene Meßwerte	64
3.2.1. Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	64
3.2.2. Wasseraufnahme unter Vakuum und Porosität	66
3.2.3. Porenradienverteilung	69
3.3. Biegezugfestigkeit	74
3.4. Frost-Tau-Wechsel-Versuch	76
3.5. Rasterelektronenmikroskopische Beobachtungen	91
4. Zusammenfassung	95
5. Literaturverzeichnis	103
6. Anhangverzeichnis	106

V o r w o r t

Seit Jahrhunderten galt der Marmor als Baumaterial „für die Ewigkeit“ und spielte wegen seiner Dauerhaftigkeit schon in der Antike für Baukunst und Skulptur eine wichtige Rolle. Viele kulturhistorisch bedeutenden Baudenkmäler wurden aus Marmor errichtet, unter anderem das Parthenon, das Erechteion und die Propyläen. Marmor wird wegen seiner hohen Dichte im allgemeinen für ein sehr witterungsbeständiges, große Zeiträume überdauerndes Material gehalten. Daß dies nicht immer zutrifft, führt uns der zunehmende Verfall von Gebäuden und von Skulpturen in starkem Maß vor Augen (Abb. 1-4). Heute ist jedoch festzustellen, daß Schadensbilder an Bauwerken aus Naturstein oft vielfältig sind durch Überlagerung verschiedener Schadenseinflüsse, die im Zusammenwirken anfangs verhältnismäßig langsam einen schädigenden Prozeß in Gang setzen, jedoch mit zunehmender Zerstörung immer schneller fortschreiten.

Die Forschung hat sich zum Ziel gesetzt, die Bestimmung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Marmor zu erarbeiten, die für die Beurteilung ihrer Veränderung im Laufe des bereits erfolgten Verwitterungsprozesses gegenüber den Eigenschaften des bruchfrischen Materials wichtig ist. Dies erlaubt Aussagen über Art und Umfang des Verwitterungsablaufes sowie über sein zeitliches Fortschreiten. Grundlegend war eine Analyse des Gesteinsgefüges und dessen Anisotropie, die von großer Bedeutung für die Ermittlung des Verwitterungszustandes von Marmor ist.

Die Forschungsarbeit wurde im Rahmen des Expositionsprogramms von EU 496 EUROCORE-EUROMARBLE angefertigt.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. D. D. Klemm, der mit seiner fachlichen und wissenschaftlichen Kompetenz die Entstehung dieser Arbeit begleitet und unterstützt hat.

Großen Gewinn und viele Anregungen habe ich im Laufe der Untersuchung aus zahlreichen Diskussionen und Gesprächen mit Herrn Prof. Dr. R. Snethlage empfangen. Für sein großes Engagement, für die stete Aufrechterhaltung der Kommunikation in dieser Zeit sowie für die Erlaubnis der Benutzung der Laboreinrichtungen des BLfD- Zentrallabors danke ich ihm herzlich. Konkrete Empfehlungen im Zusammenhang mit dieser Untersuchung beruhen auf seinen wissenschaftlichen Recherchen.

Dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr. H. Miller danke ich für die Überlassung des Arbeitsplatzes in den Räumen des Geologischen Institutes sowie für die Erlaubnis zur Benutzung der Institutseinrichtungen.

Dem Deutschen Akademischen Austauschdienst, der durch großzügige vierjährige finanzielle Unterstützung die erzielten Ergebnisse ermöglicht, gebührt mein großer Dank.

Da das private Gutachterbüro Dr. Ettl / Dr. Schuh die Apparatur zur Messung der Ultraschallgeschwindigkeit stellte, ist es mir ein außerordentliches Bedürfnis, mich bei ihnen, für die großartige Unterstützung und die hervorragenden Arbeitsbedingungen recht herzlich zu bedanken, insbesondere bei Dr. L. Sattler. In diesem Zusammenhang danke ich auch dem Labor Dr. Wendler für die Bereitstellung der Meßgeräte.

Außerdem möchte ich mich bei meinem Mitdotorand Herrn Dipl. Mineral. K. Rapp für Beratung und Begleitung bei den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen von Herzen bedanken.

An dieser Stelle danke ich ganz besonders auch, Herrn Dr. N. Koch, Herrn Prof. Dr. L. Masch, Herrn Dipl. Geol. J. Kuckelkorn, Herrn Dr. M. Weger, Herrn Prof. Dr. B. Lammerer, Herrn Dipl. Geol. H. Lorenz, Herrn Dipl. Geol. M. Kocher, Herrn Dipl. Chem. D. Tucic, Frau C. Krutzsch, Frau S. Gräler, Frau B. Sommer und Frau M. Werner, die mit Ihren Tipps und Vorschlägen die Arbeit unterstützt haben.

Für die akkurate Korrekturdurchsicht und viele kritische Anmerkungen sei Herrn Dipl. Sozialpäd. FH A. Werner gedankt.

Für Anregungen, Ratschläge und Hilfe bei der Bearbeitung von Photographien, Abbildungen, Tabellen, Tafeln und Anhängen danke ich meinem Mann Dipl. Arch. L. Kabashi. Am 24 Mai 1998 kamen meine Zwillinge, Aurora und Rigon auf die Welt, die tagesüber von ihm versorgt wurden. An dieser Stelle möchte ich ihm, der nicht nur die lange Zeit der Arbeit geduldig ertragen hat, sondern mir mit verständnisvoller und aufmunternder „Mitarbeit“ zur Seite gestanden ist, nochmals ein ganz besonderes Dankeschön sagen.

Abschließend möchte ich all denjenigen meinen besonderen Dank aussprechen, die -teils auch im Verborgenen - zu diesem Werk beigetragen haben und hier nicht namentlich aufgeführt wurden.

München, April 2002

Flurije Sheremeti-Kabashi

1. Einleitung

Marmor ist ein sehr kulturhistorisch bedeutendes Steinmaterial, welches seit der Antike in unterschiedlichster Form für Bauten und Skulpturen verwendet worden ist. Der zunehmende Verfall von Objekten aus Marmor schreckt die interessierte Öffentlichkeit seit vielen Jahren auf (Abb. 1 und 2). Eine Reihe typischer Probleme, die bei dieser Gesteinsart auftreten, weisen darauf hin, daß die Beständigkeit von Marmor stark von Klima und Luftschadstoffen abhängig ist. Besonders die Auflockerung des Korngefüges, die im fortgeschrittenen Stadium zum totalen Zusammenbruch einer ganzen Skulptur führen kann, stellt einen gefährlichen Schadensmechanismus dar. Die Verformung von Marmorplatten ist nicht nur an Grabplatten auf alten Friedhöfen (Abb. 3) zu beobachten, sondern auch bei Fassadenplatten moderner Bauten (z. B. die stark verformte Carrara-Fassade der Finlandia Halle in Helsinki (Ritter 1992) oder die Fassade des Amoco Buildings in Chicago (Tretwhitt & Tuchmann 1988).



Abb. 1: Marmorreliefplatte auf der Westseite des Siegestores in München. Der feinkörnige Carrara-Marmor sandet stark ab, die Konturen werden unscharf bzw. sind ganz verwischt (Aufnahme im Mai 1997)

Über die Ursachen, die zu solchen Schäden führen, wird vielfältig diskutiert. Nach Ansicht von vielen Autoren wie Neumann (1964), Quervain (1967), Simon & Sneath (1996) und Widhalm (1996) ist die Anisotropie der thermischen Ausdehnung als eine Hauptursache der

Gefügeschwächung bis hin zur Strukturzerstörung anzusehen. Auch das Mikrogefüge, die Textur und das Mikrorißgefüge des Marmors zeichnen in ihrer Gesamtheit für die ausgeprägte Gefügeanisotropie verantwortlich (Siegesmund et al. 1997). Die primäre Gefügeflockung ist thermisch bedingt, führt aber nicht zum Zerfall. Die nachfolgende, durch die Vergrößerung des Porenraumes verstärkte hygri-sche Verwitterung führt in starker Abhängigkeit der Exposition letztlich zu „Verzuckerung“ (Abb. 4) und damit zum vollständigen Zerfall (Koblischek 1997). Hierbei spielen Feuchtigkeitsänderungen und Temperaturschwankungen eine entscheidende Rolle (Schuh 1987). Obwohl Marmor ein sehr dichtes Material ist, besitzt es aufgrund seiner Porenradienverteilung, welche häufig ein Maximum im Bereich 10µm aufweist (Poschlod 1990), eine hohe Saugfähigkeit, so daß Wasser tief in den Porenraum eindringen kann (Snethlage et al. 1999).

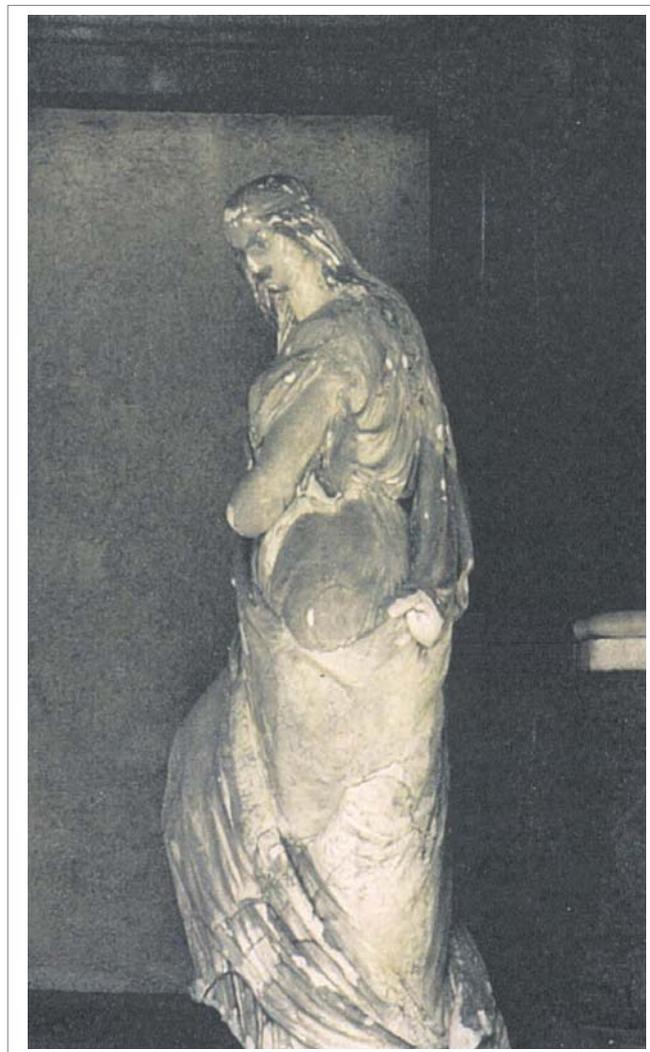


Abb. 2: Die Marmorfigur des Grabmals O. Lindpainter im Alten Südfriedhof. Durch die starke Abwitterung kann es zum Abfallen der Teile kommen (Aufnahme im Mai 2000)

Calcit als Hauptgesteinsbildendes Mineral von Marmor zeigt eine extreme Anisotropie in der thermischen Ausdehnung mit Werten von $\alpha = 26 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ parallel und $\alpha = -6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (Maßzahl siehe Abschn. 2.11) senkrecht zur c-Achse (Kleber 1959). Bei einer Temperaturzunahme dehnt sich also der Kristall in einer Richtung aus und zieht sich in den anderen Richtungen senkrecht dazu zusammen. Ein solches Verhalten führt zu Spannungen zwischen den Kristallen und zu einer Auflockerung der Kornbindung. Dies kann weiterhin, in Abhängigkeit vom Regelungsgrad der Textur (c-Achsenverteilung) zu einem thermisch induzierten Spannungsaufbau im exponierten Marmor führen (Siegesmund et. al. 1997). In diesem Zusammenhang spielt die kristallographische Orientierung von Calcitkristallen eine große Rolle.

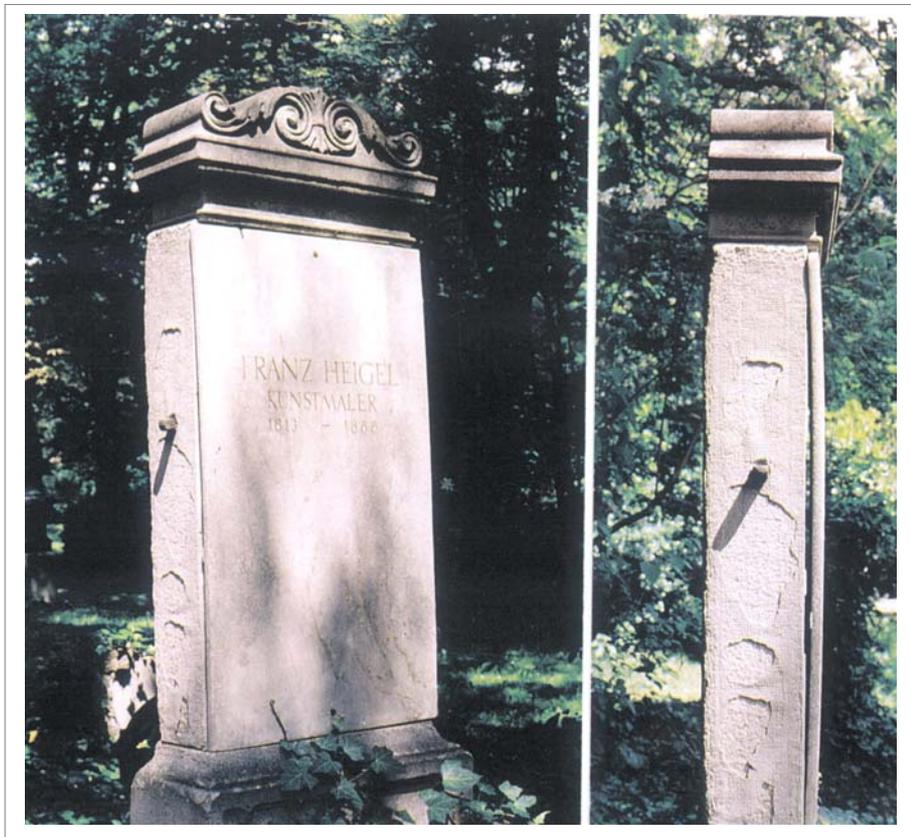


Abb. 3: Verbogene Marmorplatte des Grabmals F. Heigel im Alten Südfriedhof in München (Aufnahme im Mai 2000)

Die Ultraschallgeschwindigkeit zeigt im Calcitkristall ein Maximum von $v_p = 7,73 \text{ Km/s}$ parallel zur a-Achse und ein Minimum $v_p = 5,71 \text{ Km/s}$ parallel zur c-Achse.

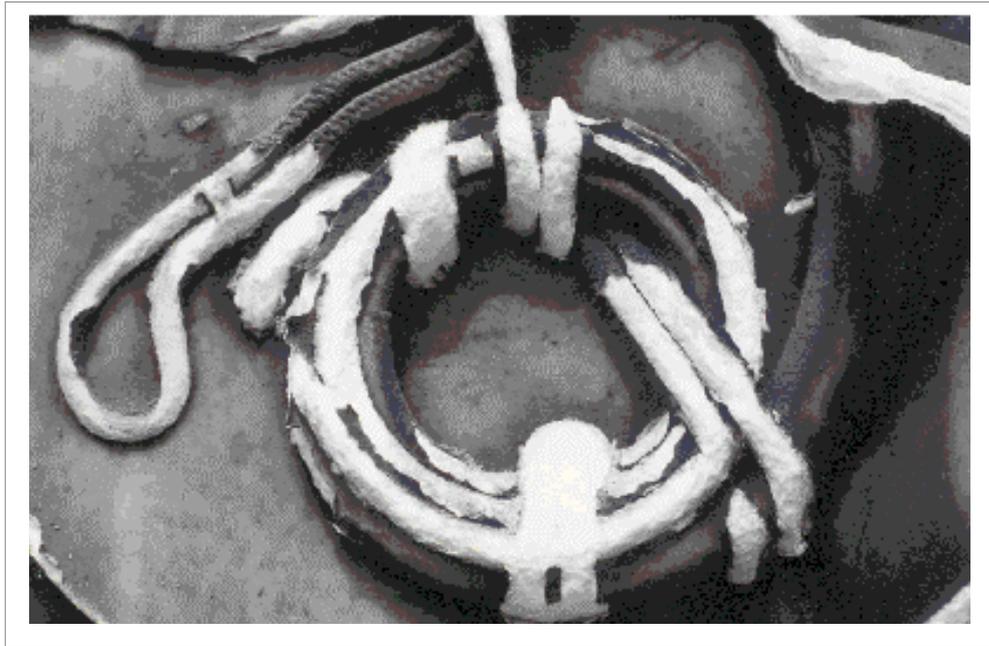


Abb. 4: Ein Beispiel der „Zuckerbildung“ eines Grabmalornamentes im Alten Südfriedhof in München (Aufnahme im Mai 2000)

Durch die Ultraschallmessungen gelingt eine Bestimmung der Orientierung von Calcitkristallen an Marmor und eine Prüfung des Zerstörungsgrades, weil die Ultraschallgeschwindigkeit mit der Schwäche der Kohäsion der Kristallite sinkt. Die Universaldrehtischmessung ist eine sehr sinnvolle Methode zur Ermittlung räumlicher Orientierung optischer Achsen. In dieser Arbeit sollen die Ergebnisse dieser beiden Methoden einander gegenübergestellt und verglichen werden. Hierbei soll festgestellt werden, ob die mit diesen Verfahren ermittelten Kennwerte teilweise oder erheblich voneinander abweichen und ob das Ultraschallverfahren als zerstörungsfreie Methode geeignet ist, die Orientierung von Calcitkristallen zu bestimmen.

Da die Anisotropie-Einflüsse von Bedeutung für alle Dauerhaftigkeitsaspekte sind, sollen im Rahmen dieser Arbeit richtungsabhängige Eigenschaften bestimmt werden. In einer weiteren Versuchsserie sollen Schädigungen der Korngrenzen durch thermische Belastung sowie durch Frost-Tau-Zyklen untersucht werden. Einen weiteren umfangreichen Arbeitsschwerpunkt stellt die Einbeziehung konservierter Marmorproben dar, die mit drei verschiedenen Konservierungsmitteln behandelt wurden. Die Eigenschaften der konservierten Proben sollen mit den gleichen Methoden untersucht werden und ausgehend von den beobachteten Veränderungen sollte eine Aussage über die Wirksamkeit der ausgewählten Konservierungsmittel möglich sein.

2. Materialien und Methoden

2.1. Probenmaterial

Als Probenmaterial zu Untersuchungen dienten sechs Carraramarmorwürfel von 20x20x20 cm, die im Rahmen des Expositionsprogramms EUROMARBLE in München seit 1991 exponiert sind (Snethlage & Simon 1992) (Abb. 5).



Abb. 5: Ansicht eines Tisches mit den ausgelagerten Marmorwürfeln

EUROMARBLE will eine bessere Vorstellung der physikalischen, chemischen und biologischen Verwitterungsprozesse entwickeln, denen die europäischen Marmore an ihrem jeweiligen Standort, abhängig vom Ausmaß der Luftverschmutzung und von klimatischen Faktoren, unterworfen sind. Expositionsstandorte mit vier Marmorarten (Carrara/Italien, Laaser/Italien (Südtirol), Ekeberg/Schweden, Pentelischer/Griechenland) sind an 7 Orten in Europa (Stockholm, Göteborg, Wien, Moskau, München, Messina, Arles) eingerichtet. Die Veränderungen werden mit Ultraschall, Oberflächenrauigkeit, Farbmessung zerstörungsfrei gemessen.

Im Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege wurde eine Probennahme im Alten Südfriedhof in München im Mai 1998 durchgeführt. Aus mehreren

abgefallenen Grabkreuzen wurden insgesamt 16 Bohrkern mit Durchmessern von 4,5cm und einer Länge von 4 bis 7cm entnommen (Tab. 1). Zu den Untersuchungen gehörten auch zwei Marmorkugeln: eine aus Carrara mit 10cm Durchmesser und die andere aus Laaser mit 5cm Durchmesser (Abb. 6). Beide Kugeln werden im Mineralienhandel erworben.

Im folgenden Text, den Abbildungen und Tabellen werden die Marmorproben mit dem entsprechenden Abkürzungen bezeichnet:

- P6 Referenzmarmorwürfel, unverwittert, aufbewahrt am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität in München seit 1991
- P1, P2, P3, P4, P5 verwitterte Marmorwürfel, exponiert auf dem Dach am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie seit 1991
- P7 verwitterte abgefallene Grabkreuze, exponiert im alten Südfriedhof in München seit ca.1900
- P8 Carrara-Marmorkugel, käuflich erworben 1998
- P9 Laaser- Marmorkugel, käuflich erworben 1998

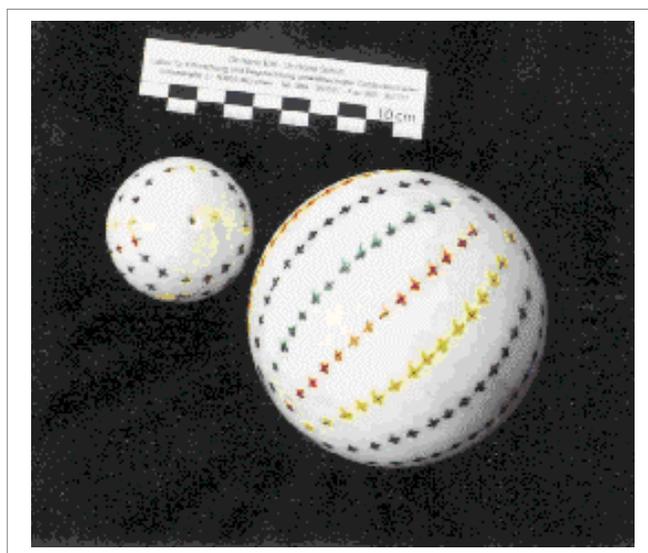


Abb. 6: Die zwei untersuchten Carrara- und Laaser-Marmorkugel

2.2. Gesteinsbeschreibung

MARMOR CARRARA

Vorkommen: Carrara (Provinz Carrara-Massa) in den Apuanischen Alpen (Toscana), südöstlich von La-Spezia. In den Apuanischen Bergen um Carrara gibt es über 1000 Marmorsteinbrüche, die Marmore verschiedener petrographischer Beschaffenheit, darunter auch den ganz rein weißen feinkörnigen „statuario“ liefern.

Geologisches Alter: Unterlias (ca. 170 Mill. Jahre)

Geologische Stellung: Autochthon gebildeter Marmor der Toskanikum-Fazies; durch Deckenüberschiebung der ligurischen Decke bei der alpidischen Orogenese epizonal metamorphisiert

Mineralbestand: Calcit (99%), Quarz, Chlorit, Graphit, Pyrit

Gefügebeschreibung: Feinkörniger (\varnothing 0,4mm), weißer bis grauweißer Marmor; metamorphes Wachstum, granoblastischer Struktur, nach den Druck und Temperaturbedingungen während und nach der Metamorphose geregelte bis mehr oder weniger richtungslos-körnige Textur

Verwendung: weltweit der am meisten verwendete Marmor, der für Bildhauerarbeiten besonders geeignet ist und seit dem Altertum Berühmtheit erlangt hat.

Literatur:

Kote et al. (1971), Ettl & Schuh (1996), Bilbija (1984), Fuchs (1997), Wimmernauer (1985), Kläsener (1997), Poschlod (1990) (siehe Literaturverzeichnis)

MARMOR LAAS

Vorkommen: Laas im Etschtal, westlich von Meran und Bozen; Abbau in zwei Brüchen auf der Südseite des Etschtales, ein gewaltiges Marmormassiv von 1200 - 3100 Meter Höhe in

bisher ungekannten Ausmaßen. Man schätzt diese Marmormengen auf mehr als 500 Millionen Kubikmeter.

Geologisches Alter: Paläozoikum, wahrscheinlich Devon (ca. 370 Mill. Jahre)

Geologische Stellung: Im nordöstlichen Bereich des Campo-Kristallins, an der Grenze zum Ötztalkristallin; während der variszischen und alpidischen Orogenese metamorphisiert

Mineralbestand: Calcit (99%), Dolomit, Quarz, Chlorit, Tremolit, Pyrit

Gefügebesehreibung: Mittelkörniger (\varnothing 1,1 mm), fast rein weißer Marmor; metamorphes Wachstum, granoblastischer Struktur, nach den Druck- und Temperaturbedingungen während und nach der Metamorphose geregelte bis mehr oder weniger richtungslos-körnige Textur

Verwendung: weltweit wegen seiner hervorragenden Schönheit seit Jahrhunderten bis in die neuste Zeit berühmt, wie bedeutende Kulturdenkmäler im Schloß Tirol, die Löwen vor der Feldherrnhalle in München, das Moltkedenkmal in Berlin usw. zeigen

Literatur:

Kote et al. (1971), Ettl & Schuh (1996), Bilbija (1984), Fuchs (1997), Poschlod (1990), Kläsener (1997) (siehe Literaturverzeichnis)

2.3. Ultraschallmessungen (US-Messungen)

Systematische Untersuchungen von Gesteinen mit Hilfe von US-Messungen werden heute in zunehmendem Maße eingesetzt. Die Anwendung des Ultraschalls zur Untersuchung von Gestein dient der Vermessung von Natursteinen zur Qualitätseinstufung nach ihrem Abbau, der Erkennung des Verwitterungszustandes von Natursteinen wie Marmor, der Prüfung der Homogenität und der Gefügestruktur von Stein, sowie der Ortung von Rissen und Mikrorissen durch Auswertung und Analyse des Meßsignals. Da aus denkmalpflegerischen Gründen oft auf die Entnahme von Bohrkernen, die ein optimales Probenmaterial für petrographische und petrophysikalische Untersuchungen darstellen, verzichtet werden muß, erlaubt in solchen Fällen der Ultraschall nun eine zerstörungsfreie Prüfung, ein zerstörungsfreies Messen, obwohl im Grunde genommen auch Druck- und Zugkräfte auftreten. Aber ihre Beträge sind vergleichsweise gering.

2.3.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens

In der Ultraschall-Meßtechnik macht man sich die Ausbreitung mechanischer Wellen in einem festen Medium nutzbar. Unter Welle versteht man dabei die Ausbreitung von Schwingungen, d.h. die periodische Änderung einer Zustandsgröße in einem Körper. Mechanische Wellen breiten sich im Gestein mit einer Geschwindigkeit aus, die von den elastischen und inelastischen Eigenschaften des Mediums abhängig sind. Dispersion, Absorption und Anisotropie, aber auch Korngröße, Verfestigungsgrad, Wassergehalt, Alter der Gesteine, Druck und Temperatur (Lagerungsparameter bei In-situ-Messungen) beeinflussen die Messungen.

Um die medienabhängigen Veränderungen interpretieren zu können, müssen das Schallspektrum und die Ausbreitungsart des von der Schallquelle emittierten Signals beachtet werden. Der Ultraschall, d.h. Frequenzen zwischen 20 kHz und 1 MHz (bei Naturstein), versetzt das feste Medium in Schwingungen und breitet sich so durch die Anregung elastischer Deformationen aus. Bei der Betrachtung von Wellenausbreitungsvorgängen treten zwei ausgezeichnete Richtungen auf:

Ausbreitungsrichtung : Richtung, in der die Welle fortschreitet (Fortpflanzungsrichtung)

Schwingungsrichtung : Richtung, in der die Masseteilchen schwingen.

Betrachtet man zunächst nur die Schwingungsrichtung, werden diese Transversal- (Quer-) und Longitudinalwellen (Längs-) genannt. Die Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung der *Longitudinalwellen* sind identisch, d.h. die einzelnen Stoffteilchen schwingen parallel zur Fortpflanzungsrichtung der Welle. Sie besitzen die größte Geschwindigkeit und erreichen den Signalempfänger zuerst (Primärwelle). *Transversalwellen* benötigen längere Laufzeiten (Sekundärwelle). Die Schwingungsrichtung der einzelnen Massepunkte liegt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. In festen Körpern kann sich eine solche Schub- oder Scherkraft auf die Teilchen benachbarter Ebenen übertragen, deren Querschwingungen jedoch ihrem Abstand von der Erregungsebene entsprechend zeitlich mit einer Geschwindigkeit nachfolgen. Die Welle wird sehr häufig auch als Scherwelle bezeichnet.

Für die vorliegenden Untersuchungen sind Longitudinalwellen von Interesse. Die Durchschallungs- oder Transmissionsmessung ist die am häufigsten angewandte Prüftechnik

und dient der Ermittlung von Longitudinalwellengeschwindigkeit v_l , die sich aus der Zeit, die der Schall zur Durchquerung einer definierten Meßstrecke benötigt, errechnet:

$$v_l = \frac{s}{t}$$

$s \equiv$ Meßstrecke [mm]

$t \equiv$ Ultraschalllaufzeit [μ s]

$v_l \equiv$ Longitudinalwellengeschwindigkeit [km/s]

Bei diesem Verfahren befinden sich der Impulsgeber (Sender) und der Impulsaufnehmer (Empfänger) in einem einzigen Meßkopf. Die Meßstrecke kann je nach Prüfkopfwahl zwischen wenigen Zentimetern und 3-5 Metern liegen.

Die US-geschwindigkeiten in unterschiedlichen Materialien sind sehr unterschiedlich:

Wasser: 1,48 km/s

Luft: 0,33 km/s

Beton: 4,43 km/s

Sandstein: 2,86 km/s

Kalkstein: 4,31 km/s

Marmor (frisch): 6,69 km/s

2.3.2. Untersuchungsziel

Da die Laufgeschwindigkeit longitudinaler Wellen durch die Porosität entscheidend beeinflußt wird, kann man anhand der Laufzeit Rückschlüsse auf die Aufweitung des Porenraums und somit die Verwitterung ziehen. Dadurch hat man ein einfaches Maß zur Beurteilung des allgemeinen Gesteinszustandes. Durch die Arbeiten von Köhler liegen bereits recht weitreichende Erfahrungen vor. Die Laufzeitgeschwindigkeit nimmt vom bruchfrischen zum extrem gefährdeten Marmor von ca. 5 km/s auf 1-2 km/s ab. Er stellte im Jahr 1988 die folgende Skala auf:

bruchfrischer Marmor: $v_l > 5$ km/s

guter Zustand: $v_l = 4-5$ km/s

befriedigender Zustand: $v_l = 3-4$ km/s

beginnende Strukturzerstörung: $v_l = 2-3$ km/s

bedrohlicher Zustand: $v_l = 1,5-2$ km/s

völlige Gefügezerstörung: $v_l < 1,5$ km/s

Eine weitere Entwicklung für diese Einteilung gelingt durch die Einführung der US-Tomographie. Grundlage der US-Tomographie ist die Abhängigkeit der Longitudinalwellengeschwindigkeit vom Verwitterungszustand des Marmors, d.h. vom Grad der Kohäsion der Calcite im Kornverband. Im Ergebnis dieses Verfahrens entstehen flächenhafte Schnitte durch den Stein, welche zunächst eine zweidimensionale Geschwindigkeitsverteilung zeigen. Damit lassen sich bereits gefährdete Bereiche im Stein recht gut erkennen. Mit Hilfe der US-Tomographie wird versucht, auch eine durchschnittliche Orientierung von Calcitkristallen im Marmor zu bestimmen.

2.3.3. Versuchsdurchführung

Für die Beurteilung des Verwitterungszustandes wurde an jedem Marmorwürfel und zwei Marmorkugeln die US-Tomographie ausgeführt. Für die Messung der Ultraschall-Laufzeit wurde ein Ultrasonic USME-C von Krompholz / Pirna mit einer Wellenfrequenz von 46 KHz verwendet (Messgenauigkeit: 1µs). Um eine gute Ankoppelung und damit eine Übertragung des Ultraschallsignal zu erzielen, wurde als Koppelmaterial ein fettfreier Modellerton verwendet, der sich rückstandsfrei entfernen läßt. Die Messungen wurden im Labor Dr. Ettl & Dr. Schuh, Labor zur „Erforschung und Begutachtung umweltbedingter Gebäudeschäden“ in München durchgeführt. Für die Bereitstellung ihres US-Gerätes, für ihre Ratschläge, für die intensiven Diskussionen und technische Hilfe sei herzlich gedankt.

An jedem Würfel und den zwei Kugeln wurde arbiträr ein Koordinatensystem gelegt. Die drei zueinander senkrechten Hauptachsen sind X,Y und Z benannt. Zur Darstellung einer dreidimensionalen Ultraschalltomographie wurden entlang der orthogonalen Hauptebenen XY, XZ und YZ an jedem Würfel und Kugel 180 Ultraschallmessungen durchgeführt (60 Messungen an jeder Ebene außer XZ und YZ Ebene in der Laaserkugel mit 44 Messungen (Abb. 7 und 8)). An der Carrarakugel und Laaserkugel wurde nach der thermischen Belastung (siehe Abschn. 2.11) und nach der Behandlung (siehe Abschn. 2.12) wieder US-Tomographie durchgeführt. Im Anhang 1-6, 9a, 9b, 9c, 10a, und 10b sind die gemessenen Wegstrecken, die US-Laufzeiten und die daraus errechneten Geschwindigkeiten aufgelistet. Die tomographischen Erfassungen und die statistische Auswertung der US-Geschwindigkeiten sind in den Abbildungen 13-21 dargestellt. In Abb. 9 wird die Lage der Messpunkte und die Bezeichnung der sechs Flächen am Beispiel des Würfels erläutert.

Zusätzlich wurden an der Carrarakugel 148 und an der Laaserkugel 48 Messungen entlang der 8 Großkreise durchgeführt (Abb. 10). An jedem Großkreis wurden 16 Messungen (Carrarakugel z.B. Meridian M1: 1→15'; 2→14', 3→13'; 4→12'; 5→11'; 6→10'; 7→9'; 8→8'; 1'→15; 2'→14; 3'→13; 4'→12; 5'→11; 6'→10; 7'→9; und 8'→8 (siehe Anhang 11a und 11b) und 6 Messungen (Laaserkugel z.B. Meridian M1: 1→5'; 2→4'; 3→3'; 1'→5; 2'→4; und 3'→3; (siehe Anhang 12) durchgeführt.

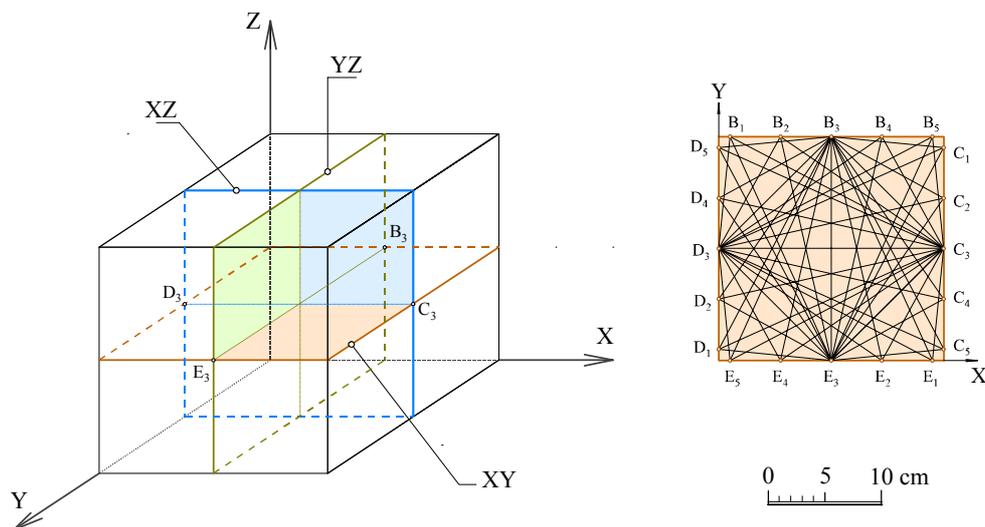


Abb. 7: Koordinatenachsen X, Y, Z mit drei orthogonalen Hauptebenen im Probenwürfel sowie gewählte Messrichtungen

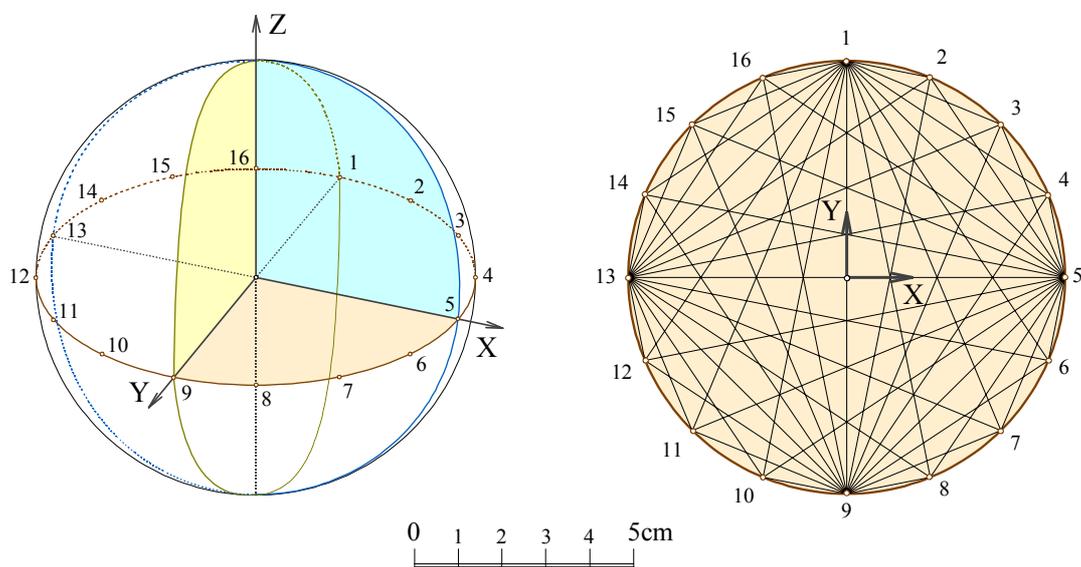


Abb. 8: Koordinatenachsen X, Y, Z mit drei orthogonalen Hauptebenen in der Probenkugel sowie gewählte Messrichtungen.

Die nach US -Tomographie erhaltenen US -Meßwerte ermöglichen die Bestimmung der durchschnittlichen Orientierung von Calcitkristallen an Marmorproben (für die Würfel P1,

P2, und P6 dienten Messungen entlang dreier Hauptebenen und für die Kugeln Messungen entlang der Großkreise (siehe Abb. 22-26). Die Art der Darstellung ist im Abschn. 2.4 erläutert. Zur Bestimmung der räumlichen Verteilung der Ultraschall l-Wellengeschwindigkeiten an den sechs Marmorwürfeln und zwei Marmorkugeln erfolgten insgesamt 1636 Einzelmessungen. Um eine statistische Aussage über den Verwitterungszustand der Würfel P2, P3, und P5 in Abhängigkeit von der Expositionszeit und deren Klima zu erhalten, wurde an diesen Würfeln drei Jahren später (März 2000) wieder eine Ultraschalltomographie durchgeführt (an diesen Würfeln wurden keine Bohrkerne entnommen, so war es möglich, die Messungen an den identischen Meßstellen wieder durchzuführen).

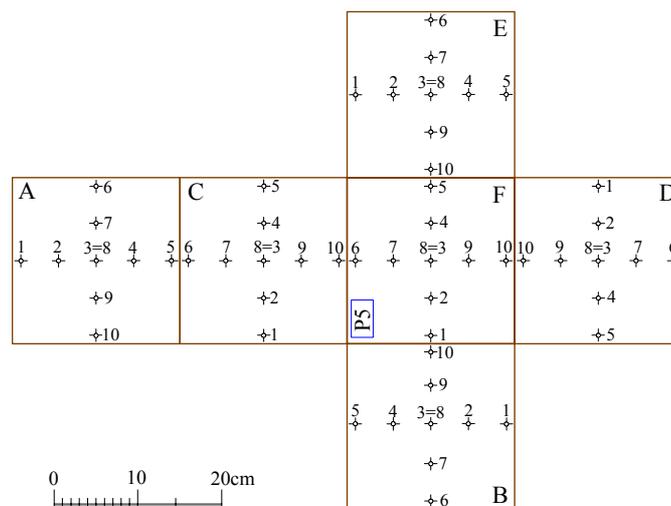


Abb. 9: Mantelfläche des markierten Würfels

Zur Prüfung der mit Ultraschallmessungen erhaltenen Ergebnisse und weiteren Untersuchungen wurden an den Würfeln P1, P2 und P6 in den drei Raumrichtungen insgesamt 14 Bohrkerne mit 4,5cm Durchmesser und 7cm Länge entnommen. Die Bezeichnung der Bohrkerne ist in Tab. 1 dargestellt.

Tab 1: Die Bezeichnung der untersuchten Marmorbohrkerne.

Marmorproben	Bohrkernbezeichnungen
P1	1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F, 1A1, 1B1, 1C1, 1D1, 1E1, 1F1, 1A2, 1F2
P2	2A, 2B, 2C, 2D, 2E, 2F, 2A1, 2B1, 2C1, 2D1, 2E1, 2A2, 2F2, 2A3
P6	6A, 6B, 6C, 6D, 6E, 6F, 6A1,6B1, 6C1, 6D1, 6E1, 6F1, 6A2, 6F2, 6F3
P7	GK1a, GK1b, GK2a, GK2b, GK2c, GK3, GK4a, D1, GK4b, GK5a, GK5b, GK6a, GK6b, GK6c, GK6d, GP1, GP2.

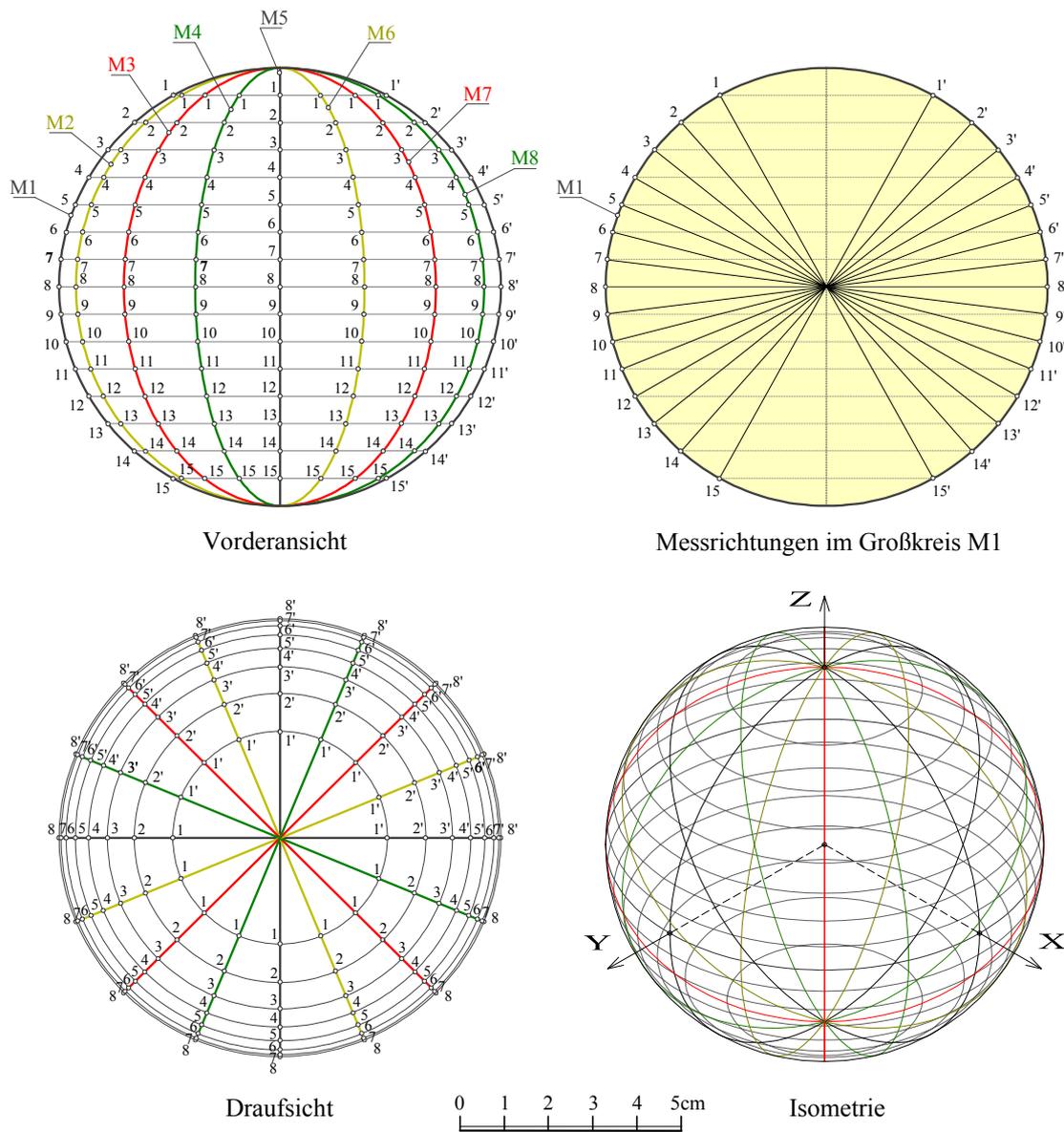


Abb. 10: Darstellung der Markierung und Ultraschallmessrichtungen in der Carrarakugel entlang der Großkreise.
M1 bis M8 \equiv Großkreise

Die entnommenen Bohrkern in den XZ und YZ Ebenen wurden parallel zum Maximum der c-Achsen orientiert. Für die Orientierung wurden an diesen Bohrkernen die erhaltenen Orientierungsdaten der Häufungen der maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten, berechnet mit Computerprogramm „SPHERISTAT“, eingetragen (Siehe Abschn. 3.1.2). Um die Geschwindigkeitsanisotropie im Bohrkern zu bestimmen, wurden Ultraschallmessungen an 11 Bohrkernen an drei Ebenen: Ebene 1, Ebene 2 und Ebene 3 der XZ und YZ Ebene in radialen Meßrichtungen, die um 30° gegeneinander verschwenkt sind, durchgeführt. 8 Bohrkern (1A2, 1F1, 1F2, 2A2, 2F2, 6A2, 6F1 und 6F2) dienen für die Untersuchung der Gefüge-

anisotropie bei der thermischen Belastung und Konservierung (graph. Darstellung in Abb. 27-31) und 3 Bohrkerne (1A1, 2A1 und 6A1) bei der Frost-Tau-Wechsel-Belastung (graph. Darstellung in Abb. 44-46). Die Methodologie der Messungen ist in Abb. 11 gezeigt. Im Anhang 13a, 13b, 13c, 19a, und 19b sind die gemessenen US-Laufzeiten, Wegstrecken und die daraus errechneten US-Geschwindigkeiten aufgelistet.

Im weiteren Verlauf der Ultraschalluntersuchungen wurden an jedem Bohrkern aus den Marmorproben drei Messungen quer und eine durch die Länge des Bohrkerne durchgeführt (Abb. 12). 18 Bohrkerne (5 aus den Würfeln P1, P2 und P6 und 3 aus abgefallenen Grabkreuzen im Alten Südfriedhof (P7)) dienen für die Bestimmung der Veränderung der US-Geschwindigkeit bei der zyklischen Frost-Tau-Wechsel-Belastung (Abschn. 2.10). Die Meßwerte sind im Anhang 7, 8, 18a, 18b 18c und 18d aufgelistet. Die Veränderung der US-Geschwindigkeiten sind in Abbildungen 39-42 dargestellt.

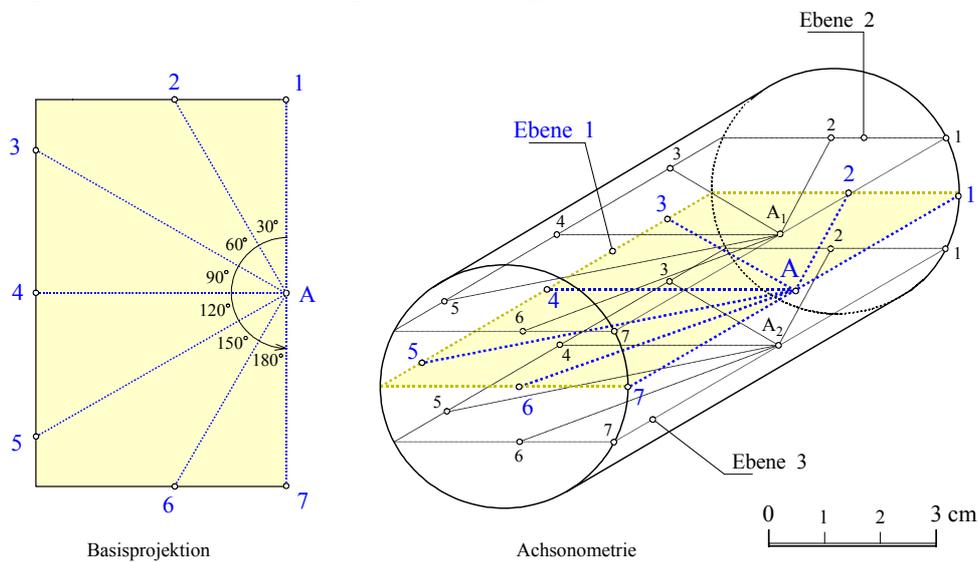


Abb. 11: Darstellung der Ultraschallmessrichtungen an drei Ebenen im Bohrkern

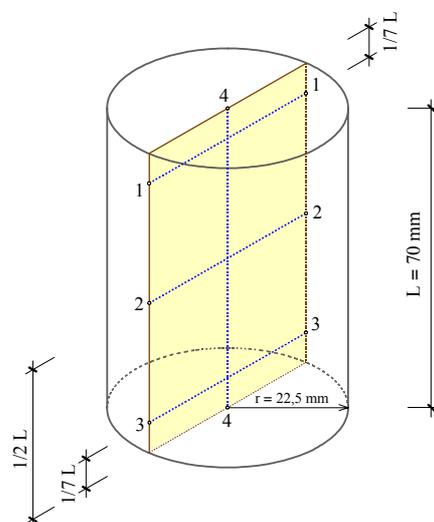


Abb. 12: Darstellung der Ultraschallmessrichtungen im Bohrkern

2.4. Stereonetz

2.4.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens

Die für Orientierungsdaten am häufigsten verwendete Art der Darstellung ist die Lagekugelprojektion der unteren Halbkugel. Für die statistische Auswertung ist die flächentreue im Schmidt'schen Netz geeignet, da Flächengrößen und somit Häufigkeiten pro Flächeneinheit durch die Projektion nicht verändert werden. Das Schmidt'sche Netz bildet jeden Punkt auf einer Kugel durch die Rotation der Verbindungslinie zwischen Punkt und Auflagepunkt der Kugel auf Abbildungsebene (Netzebene) ab. Aus einem Längen- und Breitengradnetz auf der Kugel wird nach diesem Verfahren das Schmidt'sche Netz in der Abbildungsebene. Längengrade sind Großkreise, während Breitengrade Kleinkreise darstellen. Winkel werden bei dieser Projektion nicht winkeltreu übertragen, doch lassen sie sich entlang von Großkreisen ablesen. Orientierungsdaten von Flächen können entweder als Großkreise oder als Polpunkte im Schmidt'schen Netz eingetragen werden. Zur statistischen Auswertung eignet sich die Polpunktdarstellung, während die Großkreisdarstellung die strukturellen Zusammenhänge optisch besser repräsentiert und für verschiedene Konstruktionen (z.B. Winkelmessung, Rotation von Daten) gebraucht wird. Von Lineardaten wird der Lineardurchstoßpunkt im Schmidt'schen Netz konstruiert.

2.4.2. Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchung war die näherungsweise durchschnittliche Ermittlung der Orientierung von Calcitkristallen an Marmor. Diese Bestimmung wird erforderlich sein für die weitere Ermittlung der Geschwindigkeitsanisotropie zur Beurteilung der Anisotropieeffekte bei vergleichender Prüfung vor und nach einer thermischer Belastung, Frost-Tau-Wechselbelastung oder Behandlung von Marmor.

2.4.3. Versuchsdurchführung

Zur statistischen Auswertung der US-Tomographie-Meßwerte wurden die einzelne Meßrichtungen als geraden Linien (Lineare) gedacht. Die Lage einer Geraden im Würfel oder in der Kugel wurde durch Streichen (Azimut) und Fallen bestimmt. Zur Ermittlung eines Maximums oder Minimums der US-Geschwindigkeiten wurde die Häufigkeit der Lineardurchstoßpunkte pro Flächeneinheit gemessen und in Konturliniendiagrammen dargestellt. Die verwendeten Daten wurden mit Hilfe vom Computerprogramm „SPHERISTAT“ berechnet.

Die statistische Auswertung der US-Geschwindigkeiten im Schmidt'schen Netz sind in Abbildungen 22-26 dargestellt.

2.5. Universaldrehtischmessungen

2.5.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens

Mit einem Universaldrehtisch (im folgenden kurz U-Tisch genannt) an einem Polarisationsmikroskop ist es möglich, an Mineralien die räumliche Orientierung optischer Achsen einzumessen. Die meisten Messungen können an normalen Dünnschliffen mit einer Dicke von etwa 25-30 μm durchgeführt werden.

Der U-Tisch ist ein Zusatzgerät, das auf den Mikroskoptisch eines normalen Polarisationsmikroskopes aufgesetzt wird. Der Dünnschliff wird in eine Glaskugel, die in zwei Segmente geteilt ist, eingesetzt. Die Segmente gibt es mit verschiedenen Lichtbrechungsindizes, um sie den jeweiligen Brechungsindizes der einzumessenden Minerale anzupassen. Die Glaskugel mit dem Dünnschliff in ihrer Mitte kann um drei Achsen des U-Tisches gedreht werden. In der Ausgangsstellung, das ist die Stellung, in der alle Winkelmesser auf 0 gestellt sind, *Normalachse* (N-Achse) senkrecht, die *Horizontalachse* (H-Achse) und *Kontrollachse* (K-Achse) liegen waagrecht und sind in „Nord-Süd“ – bzw. „Ost-West“ –Richtung orientiert. Hinzu kommt die vertikale *Mikroskopachse* (M-Achse), die in der Ausgangsstellung mit der Normalachse des U-Tisches zusammenfällt. Da der U-Tisch während der Messung gekippt wird, haben die N- und M-Achse unterschiedliche Bedeutung.

Der Meßvorgang für die Eimessung von Kristallachsen besteht darin, Symmetrieebenen der optischen Indikatrix in die Symmetrieebenen des Mikroskops zu bringen, d.h. daß der Pol der Symmetrieebene durch Schwenken um die U-Tisch-Achsen parallel zur K-Achse eingestellt wird. Eine solche Ebene ist dann erreicht, wenn bei einer Drehung um die K-Achse (bei gekreuztem Polarisator und Analysator) keine Aufhellung mehr eintritt. Eine der Hauptachsen der optischen Indikatrix liegt dann parallel zur K-Achse (bzw. eine Symmetrieebene der Indikatrix in der Symmetrieebene des Mikroskops). Bei optisch einachsigen Kristallen (z.B. Calcit) kommt hinzu, daß die *optische Achse* parallel oder senkrecht zur K-Achse liegt. Da die *kristallographischen Achsen* optisch einachsiger Kristalle mit der optischen Achse zusammenfallen, kann mit Hilfe des U-Tisches die kristallographische Orientierung der

Kristalle auf einfache Weise ermittelt werden. Calcit ist optisch negativ, d.h. die X-Achse der Indikatrix liegt parallel zur optischen Achse. Um die Raumlage der kristallographischen c-Achse von Calcit zu ermitteln, wird der Mikroskopisch, nachdem das Meßobjekt in der K-Achse in eine konstante Dunkelstellung gebracht wurde, um 45° gegen den Uhrzeigersinn in die sog. *Regelstellung* gedreht. Kommt es zur Aufhellung, kann die optische Achse entweder parallel oder senkrecht zur K-Achse liegen. Das Meßobjekt wird um die H-Achse bis zur Dunkelstellung gekippt. Die K-Achse wird in Nullstellung zurückgedreht. Die optische Achse liegt parallel zur K-Achse, wenn es bei Drehung um die M-Achse zur Aufhellung kommt. Liegt sie senkrecht zur K-Achse, bleibt es bei Drehung in der Dunkelstellung. Die Raumlage der Calcit-c-Achse ergibt sich aus den Winkeln der N- und H-Achsen (Azimuth und Kippwinkel) und deren Eintrag ins Schmidtsche Netz. Zum Eintrag ins Schmidtschen Netz müssen die Winkel am U-Tisch abgelesen werden. Einfacher ist es, sich eines Dateneingabeprogramms zu bedienen, in dem die abgelesenen Werte über die Tastatur eingegeben und direkt in eine Graphik auf dem Bildschirm umgesetzt werden (z.B. Programm SPHERISTAT).

2.5.2. Untersuchungsziel

Es wird die Bestimmung der räumlichen Orientierung von Calcitkristallen im Marmor durch US-Messungen bei vergleichenden Ergebnisse überprüft. Die Ermittlung der kristallographischen c-Achsen von Calcitkristallen im Marmor mit Hilfe des U-Tisches ist eine seit langem angewandte, bewährte Methode, mit der in vielen Fällen recht brauchbare quantitative Aussagen gemacht werden können. Da die US-Verfahren vor allem im Rahmen der *zerstörungsfreien Werkstoffprüfung* genutzt werden, wird erfahren, ob mit dieser Meßmethode näherungsweise auch eine genaue qualitative und ausreichende quantitative Ermittlung der räumliche Orientierung zu erreichen ist.

2.5.3. Dünnschliffe

Zur Dünnschliffherstellung wurden aus den Bohrkernen 1A2, 2A2 und 6A2, entnommen aus den Marmorwürfeln P1, P2 und P6, entsprechende Probenstücke in der Größe des Dünnschliffes herausgesägt. Da bei der US-Tomographie die Unterschiede zwischen der maximalen und der minimalen US-Geschwindigkeit in XY Ebene der Würfeln P1, P2 und P6 sehr gut auftreten (siehe Abb. 16), wurden die Dünnschliffe parallel zu dieser Ebene orientiert. Es wurden 150 bis 170 optische c-Achsen pro Dünnschliff ermittelt. Die Winkelangaben

(Asimuth und Kippwinkel) wurden mit Hilfe des SPHERISTAT-Programmes ausgewertet. Die statistische Darstellung von Orientierungsdaten ist in Abb. 22c, 23c und 24c erläutert.

2.6. Rasterelektronenmikroskopie

Um die Veränderungen im Porengefüge und die Kornkontakte der natürlich und künstlich verwitterten Proben gegenüber dem unverwitterten Marmor zu untersuchen, wurden an den Bohrkernen 1F1(P1), 2A(P2), 6F(P6), GK5a und GK6d (P7) Dünnschliffe angefertigt und unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Jeder Bohrkern wurde quer halbiert: eine Hälfte wurde thermisch zwei Stunden auf 500 °C (siehe Abschn. 2.11) und die andere mit 100 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen (siehe Abschn. 2.10) belastet. Nach den Belastungen wurden wieder entsprechende Probenstücke herausgesägt und mit Araldit XW 396 getränkt. Dieses Harz dringt in den Porenraum ein und gibt dem Gestein die nötige Festigkeit für die Schliffpräparation. Die Gefügeunterschiede zwischen den Proben wurden photographisch dokumentiert und sind in den Tafeln 1, 2 und 3 gegeneinandergestellt.

2.7. Quecksilberporosimetrie

2.7.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens

Das übliche und aussagekräftige Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilung ist die Quecksilberporosimetrie (Grimm 1990). Diesem Meßverfahren liegt das Kapillargesetz zugrunde. Dies besagt für nicht benetzende Flüssigkeiten mit einem Randwinkel $\theta > 90^\circ$, daß zu jedem Kapillarradius r ein bestimmter Druck p angegeben werden kann, den man aufbringen muß, um eine bestimmte Flüssigkeit, hier Quecksilber, in die Kapillare hineinzupressen. Die Auswerteformel lautet (aus Poschlod 1990):

$$r = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{p}$$

r ≡ Kapillarradius [m]

σ ≡ Oberflächenspannung [N/m]

θ ≡ Randwinkel [---]

p ≡ Druck [Pa]

Für den Randwinkel (θ) von Quecksilber wird üblicherweise $141,3^\circ$ angesetzt; die Oberflächenspannung (σ) des Hg beträgt 0,48 N/m. Zwischen Druck (p) und Porenradius (r) besteht nach Umwandlung obiger Gleichung folgende Beziehung:

$$r = \frac{2 \cdot 0,48 \cdot \cos 141,3^\circ}{p} = \frac{7,5}{p}$$

$r \equiv$ Kapillarradius [μm]

$p \equiv$ Druck [bar]

Der Meßvorgang sieht wie folgt aus: Die Probe (ca. 2 cm³) befindet sich in einem zweiseitigen Glasgefäß, einem sogenannten Dilatometer. Der untere Teil, der eigentliche Probenbehälter, wird mit einem eingeschliffenen Glasstopfen verschlossen, der in einer hochpräzisen Kapillare ausläuft. In einem Niederdruckteil wird das Gefäß mit der Probe evakuiert und bis zur Maximalhöhe mit Hg aufgefüllt. Anschließend wird das Dilatometer schrittweise bis zum Erreichen des Normaldrucks belüftet. Hierbei wird die Absenkung des Hg-Meniskus in der Kapillare registriert. Die Absenkung ist ein Maß für die von der Probe bei einer bestimmten Druckstufe aufgenommene Hg-Menge. Im Niederdruckteil wird der Porenanteil oberhalb von $r = 7,5 \cdot 10^{-6}$ m bestimmt. Nach Erreichen des Normaldrucks wird das Meßgefäß in das Hochdruckporosimeter umgesetzt. Im Hochdruckteil des Gerätes läßt sich der allseitige Druck kontinuierlich bis auf 2000 bar steigern. Während der Druckerhöhung kann für bis zu 630 Meßpunkte der jeweilige Druck und die dazugehörige Hg-Absenkung registriert werden. Die Meßdaten werden mit Hilfe vom Computer ausgewertet.

Ist für einen Meßpunkt der Druck und die dazugehörige Hg-Menge bekannt, läßt sich aus dem Druck des Kapillarradius und aus der Hg-Menge das Porenvolumen bestimmen, welches durch Öffnungen mit dem berechneten Radius gefüllt wurde. Die Aufarbeitung der Meßdaten erfolgt durch eine statistische Verteilung der Radien und Volumina auf der Basis eines idealisierten Porenmodells. Ein solches Modell gibt eine berechenbare Porengeometrie, meist Zylinder oder Kugeln, und eine berechenbare Verbindung der Poren durch Kapillaren vor.

2.7.2. Untersuchungsziel

Die Porosität spielt eine wichtige Rolle für die Verwitterungsbeständigkeit, da ihr Vorhandensein das Eindringen von Schadstoffen in den Stein ermöglicht und zu Zerstörungen im Steininneren führen kann. Die Gesamtporosität wird oft als einzige Größe eingegeben. Sie umschreibt allerdings das System größenordnungsmäßig. Bessere und genauere Aussagen sind möglich, wenn man noch die Porengrößenverteilung kennt, denn es ist ein wesentlicher Unterschied, ob ein Stein viele kleine Poren oder wenige große Poren enthält. Es sei bemerkt, daß die Verwitterungsbeständigkeit durch dicht abgeschlossene sowie grobe Poren nur wenig oder überhaupt nicht gemindert wird, da hier Porenwasserfüllung in der Regel nicht

100prozentig ist (siehe Abschn. 2.9.3). Dagegen wird sie durch miteinander verbundene feine Poren (Kapillaren) und Haarrisse ungünstig beeinflusst.

Das Eindringen von Wasser und das Transportverhalten von Wasser im Stein sind abhängig von der Porengröße. Grob werden die Poren eines Stoffes in Mikro- und Makroporen unterteilt. Der Grenzwert liegt bei etwa $0,1\mu\text{m}$. In den Poren $> \text{ca. } 1\text{mm}$ wird Wasser als Sickerströmung transportiert. Die kleineren Poren $> 0,1\mu\text{m}$ bis $< 0,1\text{mm}$ beeinflussen im wesentlichen den Wassertransport in Form von Kapillarität und Dampfdiffusion. In den Poren $< 0,1\mu\text{m}$ tritt Kapillarkondensation auf. Die Kenntnis der Porenradienverteilung läßt direkte Rückschlüsse auf dessen Flüssigkeitstransport und, in Verbindung mit der Kenntnis der Wasseraufnahmefähigkeit und des Sättigungswertes, auf dessen Frostbeständigkeit zu.

2.7.3. Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der Porengrößeverteilung wurden die Messungen von Herrn Dipl. Geol. H. Lorenz am Paläontologischen Institut der Universität in Erlangen an einem Gerät der Fa. Micromeritics Typ: Poresizer 9329 durchgeführt. Für die Durchführung der Messungen, für seine Unterstützung und viele wertvolle Hinweise möchte ich ihm besonderen Dank aussprechen. Bei den durchgeführten Untersuchungen erfolgte die Annahme des eingebrachten Quecksilbers und Auswertung auf der Basis eines Zylinder-Porenmodells.

Für die vorliegende Arbeit wurden insgesamt 70 frische und verwitterte Marmorproben, vor allem in Bezug auf ihre Exponierungsdauer und ihrer Verwitterungsgrad, untersucht. Weil der Anteil des veränderten Porenraumes an der Oberfläche der Marmorproben in der Regel höher als im Kern sein sollte, wurden für die Untersuchungen Probenscheiben aus den Bohrkernen 1A und 1E (P1), 2A und 2E (P2), 6A und 6E (P6) und GP1, GP2, GK6, GK5 und GK4 (P7) an der Oberfläche und im Kern gewählt. An den Bohrkernen 1A (P1) und GK1 (P7) wurden Probenscheiben nach der thermischen Belastung (zwei Stunden auf $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, siehe Abschn. 2.12) entnommen (graph. Darstellung in Abb. 34 und 35).

Um eine Veränderung der Porenstruktur während der Versuchsreihen zur Frost-Tau-Wechsel-Verwitterung (siehe Abschn. 2.10) zu bestimmen, wurde eine systematische Probenentnahme (Scheiben mit einem Durchmesser von $4,5\text{ cm}$ und einer Dicke von $\text{ca. } 6\text{mm}$) an den Bohrkernen 1E1 (P1), 2E1 (P2), 6E1 (P6) und GK2c (P7) am Ende 25, 50, 75 und 100 Auftauphase zur quecksilberporosimetrischen Messung. Es wurde analysiert, ob die mit fort-

schreitender Zyklenzahl auf die Einwirkung der Frost-Tau-Wechsel-Prozesse auftretenden Verschiebungen in den Porenradienverteilungen zurückzuführen sind. Die Porenradienverteilungs-Histogramme sind in den Abbildungen 47 bis 50 dargestellt.

Da die US-Messungen in den orientierten Marmorbohrkernen (siehe Abschn. 2.3.3) unter Berücksichtigung der durch das Korngefüge bedingten Anisotropie durchgeführt wurden, war es ebenfalls von Interesse, ob sich ein Unterschied in der Porenradienverteilung in Schnitten senkrecht und parallel zur Orientierung der c-Achsen aufgrund der Korrespondierung von der minimalen US-Geschwindigkeit ($v_{l,min}$) zu den U-Tischmessungen der optischen c-Achsen nachweisen läßt. Um einen direkten Vergleich mit den US-Messungen zu ermöglichen, wurden im orientierten Bohrkern 2A (P2) Probestücke (ca. 4,0x1,5x0,5 cm) parallel und senkrecht zur $v_{l,min}$ für Hg-Porosimetrie entnommen. In der Schnittlage parallel zur $v_{l,min}$ wurde das Probenstück mit Länge (4,5 cm) parallel zur $v_{l,min}$ und in der Schnittlage senkrecht zur $v_{l,min}$ mit Länge (4,5 cm) senkrecht zur $v_{l,min}$ orientiert. Der Bohrkern wurde quer halbiert: eine Hälfte wurde thermisch zwei Stunden auf 500 °C (siehe Abschn. 2.11) und die andere mit 100 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen (siehe Abschn. 2.10) belastet. Nach den Belastungen wurden wieder entsprechende Probestücke derselben orientierter Schnittlage parallel und senkrecht zur $v_{l,min}$ für Hg-Porosimetrie angefertigt. Die Unterschiede zwischen den Poren-größenverteilungen in Schnitten senkrecht und parallel zur Orientierung der c-Achsen sind in Abb. 36 dargestellt. Die Meßprotokolle der quecksilberporosimetrischen Messungen sind im Anhang 20, 21 und 22 aufgelistet.

2.8. Bestimmung der Biegezugfestigkeit

2.8.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens

Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit wird in der Baustoffkunde normalerweise mit der einaxialen Versuchsordnung in Anlehnung an DIN 52 112 ermittelt. Ein prismatischer Prüfkörper (4x4x16 cm) wird durch eine senkrecht wirkende Last bis zum Bruch belastet. Die Feuchtigkeit des Gesteins kann die Festigkeit erheblich beeinflussen. Es sollte deshalb darauf geachtet werden, daß die Proben einen bauüblichen Feuchtewert nicht über- oder unterschreiten.

Aufgrund des begrenzten Probenangebotes und der generell kleinräumigeren Untersuchungsanforderungen in der Restauration und Denkmalpflege (z.B. Profilmessungen) kommt in neuerer Zeit vor allem die sog. biaxiale Biegezugfestigkeit als Belastungsgröße zur Anwendung. In diesem Prüfverfahren wird eine Gestein-Kreisplatte auf eine ringförmige Metallschneide gelegt. Nun wird die Probe von oben symmetrisch über einen zweiten, kleineren Ring mit wachsender Kraft belastet. Als biaxiale Biegezugfestigkeit wird die erreichte maximale Biegespannung definiert, die an Scheiben durch eine ringförmig eingeleitete Last erzeugt wird (Sattler 1992). Weiterführende Literatur zur Beschreibung und Versuchsparameter dieses Verfahrens findet sich in (Sattler 1992).

2.8.2. Untersuchungsziel

Untersuchungsziel war die Bestimmung der Biegezugfestigkeit im allgemeinen oder deren Veränderung bei vergleichender Betrachtung der Kennwerte der bruchfrischen Marmorproben in Verbindung mit exponierten Marmorproben. Im weiteren wird überprüft, ob die Messungen eine Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und US-Geschwindigkeit ergeben.

2.8.3. Versuchsdurchführung

Die Messungen wurden von Herrn Dipl. Geol. M. Kocher und Herrn Dipl. Chem. D. Tucic an der Universalprüfmaschine ZWICK 1488 des Bayerisches Landesamtes für Denkmalpflege in München durchgeführt. Für die Durchführung der Biegezugprüfungen, für ihre ständige Hilfsbereitschaft und die aufschlußreichen Diskussionen möchte ich mich ganz besonders bedanken.

Für alle untersuchten Marmorproben wurde die Biegezugfestigkeit an Scheiben von der Oberfläche und aus dem Kern mit einem Durchmesser von ca. 45mm und einer Dicke von ca. 5mm bestimmt. Um die natürlichen Festigkeitsunterschiede des Marmors herauszuarbeiten, wurden 6 Proben aus frischen Marmorwürfeln (P6), 6 aus exponierten Marmorwürfeln am Institut für Geologie in München seit 1991 (P1 und P2) und 4 aus abgefallenen Grabkreuzen, exponiert im alten Südfriedhof in München seit ca. 1900 (P7) genommen. Die geprüften Proben sind in Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 2: Probenauswahl der Biegezugmessungen

	P1	P2	P6	P7
Kern	1A, 1D, 1C	2B, 2D, 2F	6B, 6C, 6D	GK3, GK5a
Oberfläche	1B, 1C, 1F	2C, 2D, 2F	6B, 6C, 6D	GK1a, GK5b

Die biaxiale Biegezugfestigkeit (σ_{bz}) berechnet sich nach Wittmann und Prim aus (Sattler 1992):

$$\sigma_{bz} = \frac{3F}{4\pi d^2} \left[2(1+\nu) \ln \frac{a}{b} + \frac{(1+\nu)(a^2 - b^2)}{R^2} \right]$$

σ_{bz} \equiv biaxiale Biegezugfestigkeit [N/mm²]

F \equiv Kraft (über Ringe eingeleitet) [N]

d \equiv Dicke des Prüfkörpers [mm]

ν \equiv Querdehnung (Poissonzahl) [---]

a \equiv Radius des unterlagernden Belastungsringes [mm]

b \equiv Radius des auflagernden Belastungsringes [mm]

R \equiv Radius des Prüfkörpers [mm]

Versuchsparameter:

- Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm / min
- obere Stützweite: $2b = 20$ mm
- untere Stützweite: $2a = 60$ mm
- zur Berechnung der Biegezugfestigkeit wurde als Poissonzahl $\nu = 0,25$ angenommen
- die Belastungskraft (F) wurde mit Hilfe von Kraftmessdosen System Hottinger – Baldwin (Bereich 0 – 2000 N) gemessen.

Die Biegezugfestigkeit wurde mit der maximalen Belastungskraft (F_{max}), für die der Bruch angenommen wird, berechnet. Die Mittelwerte der Biegezugfestigkeit sind in Tab. 8 zusammengefaßt. Die Messwerte sind in Anhang 16 aufgelistet. Eine Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und US-Geschwindigkeit ist in Abb. 37 dargestellt.

2.9. Wasseraufnahme

Man kann besonders zwei Einflußfaktoren als Verursacher der Verwitterung ansehen. Es sind dies das Wasser und die von ihm transportierten Schadstoffe. Die Aufnahme von wässrigen Lösungen ist deshalb für alle Baustoffe ein entscheidendes Kriterium. In allen Fällen ist die Feuchtigkeitsaufnahme verbunden mit einer Schadstoffaufnahme und letztlich entscheidet die Feuchtigkeitsaufnahme über die Lebensdauer eines Baustoffs. Die Bestimmung der reduzierten Wasseraufnahme nach einer Konservierungsmaßnahme ist eine Maßzahl für die Wirksamkeit eines Schutzmittels. Das Verhalten von Wasser in porösen Systemen stellt deshalb die Grundlage zum Verständnis der Verwitterungsvorgänge dar.

2.9.1. Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck ist die maximale Wassermenge, die ein Gestein unter atmosphärischen Bedingungen aufnimmt. Dieser Wert ist erforderlich für die weitere Ermittlung des zur Beurteilung der Frostunempfindlichkeit wichtigen Sättigungswertes und zur vergleichenden Beurteilung der Wasseraufnahmemenge vor und nach einer Behandlung.

Die Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck erfolgte in Anlehnung an DIN 52 103. Die Bohrkern (siehe Tab. 1) wurden im Wärmeschrank bei $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ bis zur Massenkonstanz getrocknet. Danach wurden die Proben in einem Exsikator auf Raumtemperatur von 18 bis 28°C abgekühlt. Die getrockneten und gewogenen Proben wurden in einer Lage – 1 h bis zur Hälfte, dann vollständig mit $(3 \pm 0,5)$ cm Überdeckung bei Atmosphärendruck in destilliertes Wasser von 18 bis 28°C zur Massekonstanz gelagert. Die Massekonstanz einer Probe bzw. Meßprobe gilt als erreicht, wenn sich deren Masse innerhalb von 24 h um nicht mehr als 0,1% ändert. Die Differenz aus dem Naßgewicht und dem Ausgangstrockengewicht ergab die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Wg, a). Der gewichtsbezogene Wasseraufnahmegrad wird gemäß folgender Formel berechnet:

$$Wg, a (\text{Gew.}\%) = \frac{(m_a - m_t)}{m_t} 100\%$$

$m_t \equiv$ Trockengewicht [g]

$m_a \equiv$ Naßgewicht [g]

$Wg, a \equiv$ Atmosphärendruck [Gew.%]

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Abb. 32 dargestellt. Die Meßwerte sind in Anhang 14 enthalten.

2.9.2. Auftriebs-Verfahren

Die Reindichte (Quotient aus Gewicht und Gesteinsgerüstvolumen), die Rohdichte (Quotient aus Gewicht und Volumen von Gesteinsgerüst und Porenraum) und die Gesamtporosität (die offenen und geschlossenen Poren) wurden mit dem Auftriebs-Verfahren nach DIN 52102 bestimmt. Das private Labor Dr. Wendler, Fachlabor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege in München stellte dankenswerterweise die Apparatur des Auftriebsverfahrens zur Verfügung.

Hierzu wurden Marmorbohrkerne (siehe Tab. 1) und zwei Marmorkugeln P8 und P9 im Wärmeschrank bei $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ bis zur Gewichtkonstanz getrocknet. Danach wurden die Proben in einem Exsikkator auf Raumtemperatur von 18 bis $28 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt. Die getrockneten und gewogenen Proben wurden zunächst bei einem Druck von 3Pa entlüftet, danach wurden sie mit Wasser überdeckt und drei Wochen später anschließend naß gewogen. Die Differenz aus dem Naßgewicht und dem Ausgangstrockengewicht ergibt die aufgenommene Wassermenge (Wasseraufnahme unter Vakuum ($W_{v,v}$)), deren Volumen das Porenvolumen der Proben darstellt. In einem mit Wasser gefüllten Becherglas wurde dann das durch den Auftrieb reduzierte Gewicht der wassergesättigten Proben gemessen. Die Differenz aus Ausgangstrockengewicht und Auftriebsgewicht repräsentiert das Gewicht der vom Mineralkörper verdrängten Flüssigkeitsmenge. Das Volumen dieser Flüssigkeitsmenge ist mit dem Volumen des Mineralkörpers identisch. Aus dem Ausgangstrockengewicht, dem Porenvolumen und dem Mineralkörpervolumen ließen sich anschließend die Werte für die Reindichte (ρ_{rein}), die Rohdichte (ρ_{roh}) und die Porosität (P) errechnen:

$$\rho_{rein} = \frac{m_t \cdot \rho_{H_2O}}{m_t - m_{au}}$$

$$\rho_{roh} = \frac{m_t \cdot \rho_{H_2O}}{m_n - m_{au}}$$

$$P \approx W_{v,v} (\text{Vol.}\%) = \frac{(m_n - m_t)}{m_n - m_{au}} 100\%$$

$\rho_{rein} \equiv$ Reindichte [g/cm^3]

$\rho_{roh} \equiv$ Rohdichte [g/cm^3]

$\rho_{H_2O} \equiv$ Wasserdichte [g/cm^3]

$m_t \equiv$ Trockengewicht [g]

$m_{au} \equiv$ Auftriebsgewicht [g]

$m_n \equiv$ Naßgewicht [g]

$P \equiv$ Porosität [Vol.%]

$W_{v,v} \equiv$ Wasseraufnahme unter Vakuum [Vol.%]

Die Wasseraufnahme unter Vakuum (Wg,v) in Gewichtsprozent ($Gew.%$) wird analog der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Wg,a) berechnet:

$$Wg,v (Gew.%) = \frac{(m_n - m_t)}{m_t} 100\% \quad Wg,v \equiv \text{Wasseraufnahme unter Vakuum [Gew.]\%}$$

Die Reindichte, die Rohdichte, Wasseraufnahme unter Vakuum und Porosität wurden in den Bohrkernen 1A2, 1C, 1D, 1F1 und 1F2 (P1); 2A2, 2B, 2C und 2F2 (P2); 6A2, 6D, 6F1 und 6F2 (P6); GK4a und GK5b (P7) und den zwei Marmorkugeln P8 und P9 auch nach der thermischen Belastung (zwei Stunden auf 500 °C) und Behandlung (siehe Tab. 3) bestimmt, um Aufschluß über die Folgen der Erwärmung und die Wirksamkeit der Konservierungsmittel zu liefern. Die Zusammenhänge der Ergebnisse sind in Tab. 6 aufgeführt. Ein Vergleich zwischen der vom Auftriebsverfahren und Hg-Porosimetrie gelieferten Daten für Roh-, Rein-dichte und Porosität ist in Tab. 7 dargestellt. Eine Korrelation zwischen Porosität und US-Geschwindigkeit ist in Abb. 33 eingetragen. Die Meßprotokolle sind in Anhang 15 und 16 aufgelistet.

2.9.3. Sättigungswert

Der Sättigungswert eines Gesteins dient zur Beurteilung des Frost-Tauwechsel-Widerstands. Dieser Wert kennzeichnet den Anteil von Poren, der bei Atmosphärendruck nicht mit Wasser gefüllt wird und damit als „Ausweichraum“ für gefrierendes Wasser verfügbar ist. Der Sättigungswert ist danach das Verhältnis der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck zur Wasseraufnahme unter Vakuum:

$$S = \frac{Wg,a}{Wg,v}$$

$Wg,a \equiv$ Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck [Gew.]\%

$S \equiv$ Sättigungswert [---]

$Wg,v \equiv$ Wasseraufnahme unter Vakuum [Gew.]\%

Er gibt z.B. Hinweise auf die Frostgefährdung eines Gesteins. Liegt der Sättigungswert nahe bei 1, bedeutet das, daß schon unter Atmosphärendruck fast der ganze Porenraum mit Wasser gefüllt ist und somit das Gestein äußerst frostempfindlich ist; der bei der Eisbildung entstehende hydraulische Druck kann nicht mehr über die sonst noch wenig gefüllten kleinen Porenkanäle abgebaut werden. Material mit S-Werten unter 0,89% gilt als nicht oder wenig frostgefährdet.

Diese Überlegung liegt die Volumenvergrößerung des Wassers beim Gefrieren zugrunde, die ja ca. 1/11 beträgt. Demnach sollten Steine ca. 0,89 % Poren besitzen, in die Wasser normalerweise nicht eindringen kann. Diese Poren sollen dann den Druck beim Gefrieren aufnehmen können. Die Durchschnittswerte des Sättigungsgrades der Marmorproben sind in Tab. 5 dargestellt. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Anhang 16 aufgeführt.

2.10. Frost-Tau-Wechsel-Versuch

2.10.1. Kurzbeschreibung des Verfahrens

Die Prüfung des Frostwiederstandes erfolgt nach DIN 52 104. Die bei Atmosphärendruck oder im Vakuum von 30 mbar Restdruck wassergetränkten Proben (Probekörper regelmäßiger oder unregelmäßiger Form oder Körnungen) werden in der Regel mindestens zehn Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt, wobei sie an der Luft oder unter Wasser auf eine Temperatur von etwa -20 °C abgekühlt und in einem Wasserbad von $(20 \pm 3)\text{ °C}$ aufgetaut werden. Nach Beendigung der festgelegten Anzahl von Frost-Tau-Wechsel werden die Veränderungen der Proben (Rißbildungen, Gewichtsverlust, Absplitterungen, gegebenenfalls die Festigkeitsveränderungen) festgestellt.

2.10.2. Untersuchungsziel

Frostschäden sind die bekannteste Schadensform, die auf physikalische Einflüsse im Sinne einer Sprengwirkung zurückzuführen sind. Diese Sprengwirkung führt zur Auflockerung und Zerstörung des Gefüges. Frostschäden kommen dadurch zustande, daß sich das in den Poren eines Baustoffes befindliche Wasser beim Gefriervorgang ausdehnt, und falls der Sprengdruck ausreicht wird das Gefüge gesprengt. Das Wasser vergrößert beim Gefrieren sein Volumen um etwa 1/11. Es entsteht dabei ein maximaler Druck von ca. 212 N/mm^2 bei -22 °C in geschlossenen Hohlräumen (Weber 1985). Nachdem die Volumensvergrößerung des Wassers während des Gefriervorganges begrenzt ist und bei ca. 9 % liegt, muß eine Pore im Baustoff zu mehr als 10/11 oder mehr als 91 % mit Wasser gefüllt sein, damit die Sprengung des Gefüges eintreten kann. Dazu muß noch die Porengeometrie und Porenradialenverteilung beachtet werden. Es kommt hierbei insbesondere auf die Gestalt des Porenhalses bzw. die Porenöffnung an. Bei weiten Porenhälsen kann oftmals ein Druckausgleich stattfinden, bei dünnen und engen Porenhälsen besteht diese Möglichkeit nur, wenn die Abkühlung langsam

vonstatten geht. Bei schneller Abkühlung kann der Druck nicht mehr abgegeben werden, es kommt zur Frostsprengung.

Ziel der Versuche war die Ermittlung der Frostempfindlichkeit der einzelnen Proben gegenüber einem standardisierten Frost-Tauch-Wechsel-Versuch sowie die Bestimmung von Veränderungen des Porengefüges bei Prozessen der Frost-Tauch-Wechsel-Verwitterung.

2.10.3. Versuchsdurchführung

Es wurde eine Frostbeanspruchung unter Wasser in Anlehnung an DIN 52104 an bruchfrischen und verwitterten Marmorproben durchgeführt.

Probenmaterial: 5 Bohrkern von 4,5cm Durchmesser und 7cm Länge pro Marmorwürfel; 1A1, 1B1, 1C1, 1D1 und 1E1 (P1); 2A1, 2B1, 2C1, 2D1 und 2E1 (P2); 6A1, 6B1, 6C1, 6D1 und 6E1 (P6) ; 3 Bohrkern von 4,5cm Durchmesser und 4 bis 7cm Länge aus den Proben P7; GK1b, GK2c und GK4b (Abb. 11 und 12)

Probenvorbereitung: Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C; Abkühlung auf Raumtemperatur; Bestimmung des Ausgangstrockengewichts; Bestimmung der Ausgangsultraschallgeschwindigkeit; maximale Wassersättigung unter Atmosphärendruck; Bestimmung des Ausgangsnaßgewichts; Bestimmung der Ausgangsultraschallgeschwindigkeit der nassen Proben (Abb. 11 und 12)

Versuchsablauf: zyklische Frost-Tau-Wechsel-Belastung; Lagerung der Proben unter vollständiger H₂O-Bedeckung in Kunststoffdosen; 12 Stunden Gefrierphase bei -30 °C und 12 Stunden Auftauphase bei +30 °C; maximale Dauer 100 Zyklen

Versuchsauswertung: Bestimmung des Massenverlustes durch Wiegen nach jedem zehnten Zyklus am Ende der Auftauphase; bei ausreichend gutem Erhaltungszustand Bestimmung der US-Geschwindigkeiten der nassen Proben; Regelmäßige Probenentnahme (Scheiben mit einem Durchmesser 4,5 cm und eine Dicke ca. 6 mm) am Ende 25, 50, 75 und 100 Auftauphase zur quecksilberporosimetrischen Messung (siehe Abschn. 2.7.3)

Die Ergebnisse sind in Abbildungen 39-50 eingetragen. Die Meßprotokolle sind in Anhang 17, 18a, 18b, 18c, 18d, 19a, 19b und 22 aufgeführt.

2.11. Thermische Belastung

Eine Dehnung kann verursacht werden durch die Einwirkung einer Kraft (mechanische Dehnung). Eine Dehnung kann aber auch ohne Krafteinwirkung entstehen, nämlich dann, wenn ein Gegenstand erwärmt wird (Wärmedehnung). Baustoffe sind täglich und jahreszeitlich bedingten Temperaturwechseln ausgesetzt. Besonders bei klarem Wetter ist der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht meist groß. In der Nacht erfolgt die Abkühlung der Erdoberfläche durch Abstrahlung der Wärme in die Atmosphäre. Mineralische Baustoffe reagieren auf Abkühlung bzw. Erwärmung mit Volumenveränderung und dem Auftreten von Spannungen zwischen der oberen Gesteinszone und dem unbelasteten Kern. Zudem wird das Gefüge durch das vielfach anisotrope Ausdehnungsverhalten von Kristallen sowie der verschiedenen Minerale belastet. Diese Belastung bewirkt Spannungen, die zu Verformungen oder zur Ausbildung von Rissen und Sprüngen führen. Die thermische Ausdehnung kann dann bei der Schadensbeurteilung nicht außer Acht gelassen werden (Sneathlage 1984).

Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α (auch als Längenausdehnungskoeffizient genannt) gibt die relative Längeänderung an in 10^{-6} m/m je K (aus Hoffmann 1987):

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \cdot \frac{1}{dv} = \frac{dl}{l_0 \cdot dv} \quad \text{in} \quad \left[\frac{m/m}{K} \right] = \left[\frac{1}{K} \right]$$

$l_1 = l_0 \equiv$ Anfangslänge vor der Temperaturänderung (Bezugslänge)

$l_2 \equiv$ Endlänge nach der Temperaturänderung

$dl \equiv$ Längeänderung infolge der Temperaturänderung

$dv \equiv$ Temperaturänderung (positiv bei Erwärmung, negativ bei Abkühlung)

Da die Längeänderungen in den hier betrachteten Fällen in der Regel sehr klein sind, verwendet man zu ihrer Benennung genormte Unterteilungen des Meters: 10^{-6} m = μ m; 10^{-3} = mm, 10^{-2} = cm. Hierbei wird deshalb das Verhältnis m/m gekürzt, so daß die Maßzahl nur noch mit K^{-1} benannt wird.

Calcit als wesentliches gesteinsbildendes Mineral von Marmor zeigt eine ausgeprägte Einkristallanisotropie. Der Wärmeausdehnungskoeffizient α von Calcit ist extrem anisotrop (Kleber 1959): $\alpha = 26 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ parallel und $\alpha = -6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ senkrecht zur kristallographischen c-Achse, d.h. Calcit kontrahiert bei Erwärmung normal zur c-Achse und expandiert parallel zur c-Achse. Ein solches Verhalten führt entweder zu Spannungen zwischen zwei

Kristallen (nämlich dort, wo sich beide ausdehnen), oder zu einer Auflockerung der Kornbindung zwischen beiden. Auf diese Weise entstehen Mikrorisse an den Korngrenzen, die in weiterer Folge zur Zunahme der Porosität führen können. Die so entstandene Porosität erhöht auch die Wasseraufnahme von Marmor und macht ihn daher auch für Frost sowie für Schäden durch hygri sche Dehnung und im Wasser gelöste Salze und Schadstoffe empfindlich (Widhalm et. al. 1996).

Da die intergranularen (Korngrenzen) Risse vorwiegend für die zuckerkörnige Verwitterung verschiedenster Marmore verantwortlich sind, wurde eine thermische Belastung an bruchfrischen und verwitterten Marmorproben durchgeführt. Die thermisch belasteten Proben sind in Tab. 3 dargestellt (siehe Abschn. 2.12). Außerdem wurden noch die Proben 2A (P2), 6F (P6) und GK5a und GK6d (P7) belastet. Die Erwärmung erfolgte im Muffelofen. Es wurde folgendes Temperaturprogramm durchgeführt: ausgehend von Raumtemperatur wurde die Temperatur in 30 Minuten auf den Maximalenwert (500 °C) erhöht, zwei Stunden konstant gehalten, und danach in der Luft auf Raumtemperatur abgekühlt. Nach drei Tagen erfolgten US-, Wasseraufnahme- und quecksilberporosimetrische Untersuchungen (siehe Abschn. 2.3.3., 2.7.3. und 2.9.2.).

2.12. Konservierungsmittel

Die Konservierung ist das Grundprinzip der Erhaltungsarbeit an Baudenkmalern aus Naturstein (lat.: conservare ≡ bewahren). Durch Konservierung soll der Zustand des Bauwerkes, wie er sich heute darstellt, erhalten und möglichst für die Zukunft gesichert werden. Man versucht, einer weitergehenden Verwitterung der Bausubstanz durch geeignete Maßnahmen entgegenzutreten. Dabei sind bereits eingetretene Substanzverluste an Steinmaterial, zum Beispiel abgewitterte Teile von Skulpturen, nicht etwa Anlaß für eine Erneuerung des betreffenden Bauteils, sonder sie machen einen Teil des historischen Zeugniswertes aus. Ziel der Konservierung muß es sein, weiteren Verlusten möglichst vorzubeugen , den Zustand zu sichern und den Verwitterungsprozeß zu verlangsamen.

Stark verwitterte Marmore werden seit über 21 Jahre vor allem mit der Acrylharzvolltränkung (AVT) konserviert. In der Fachtagung „Natursteinsanierung Bern 93“ erläuterte die Firma IBACH in Bamberg sein Acrylharz-Volltränkungs-Verfahren (sog. IBACH-Verfahren), das bis heute unter der Konservierungsmitteln eine Sonderstellung einnimmt. Diese Methode hat sich bei der Konservierung von Marmor-Objekte, die im Freien aufgestellt sind, seit vielen Jahren

hervorragend bewährt (Snethlage et.al. 1999). Ziel des Verfahrens ist die vollständige Durchdringung des Steines mit Reaktionsharz, in diesem Falle mit monomeren Methylmethacrylat (MMA), das im Stein unter Druck und Temperaturerhöhung zu Polymethylmetacrylat (PMMA) auspolymerisiert. Der erste Schritt des Verfahrensablaufs ist die schonende und konsequente Trocknung, damit die Poren trocken und aufnahmefähig werden. Allein diese Trocknung ist ein wesentlicher Grund dafür, daß eine AVT vor Ort nicht möglich ist. Voraussetzung dafür ist, daß die zu behandelnden Objekte transportabel sind. Je nach Größe des Objektes und Gesteinsart werden die Kunstwerke 10 bis 500 Stunden getrocknet, mit einer Oberflächenschutzschicht versehen, in den Tränkbehälter eingelegt und in einem Vakuum-Druckkessel eingefahren. Die Trängung erfolgt nach zwei Vakuumphasen bei maximal 25 bar mit Schutzgas. Das überflüssige MMA wird anschließend über eine Filteranlage in die Vorratsbehälter zurückgepumpt. Durch Wärmezufuhr erfolgt die Aushärtung, die Polymerisation, des in den Kapillaren des Steins befindlichen MMA zu PMMA –d.h. zu Acrylglas. Nach der Abschluß dieses Prozesses und Abkühlung werden die Oberflächen gereinigt.

Für die Untersuchungen wurden folgende Steinfestigungsmittel ausgewählt:

Acrylharz: Paraloid B 72, ein Ethylmethacrylat-Methylacrylat Copolomer (3% in Aceton / Etanol (1:1))

„Bologna Cocktail“ (Rossi-Manaresi et al. 1979):

Lösung A: Paraloid B 72 (30% in Xylol / Toulol (1:1))

Lösung B: DRI FILM 104 70% in aromatischen Lösungsmittel

Lösung A + Lösung B + Chlorothen + Aceton: 15:5:40:40

Polykieselsäureester (: Polykieselsäureester + Etanol: 1:1

Acrylharz (Paraloid B 72) zählt zu den verbreitetsten organischen Harzen in der Baustoffkonservierung und hat sich nach bisheriger Erfahrung als alterungsbeständig erwiesen. Dieses Harz ergibt bereits in geringer Konzentration große Festigkeit, und es bleibt sehr beständig gegen UV-Strahlung und Feuchtigkeit. Die Acrylharze werden je nach Porengröße in 1-15 prozentiger in den Porenraum eingebracht. Beim Verdampfen des Lösungsmittels polymerisieren die Acrylmonomere und bilden einen filmartigen Überzug an den Porenwänden. Wegen der geringen Eindringtiefe sind Acrylharze nur für die Vollträngung zu empfehlen.

Kieselsäure kann wie andere Säuren auch, mit Alkohol unter Bildung von Estern reagieren, die als Kieselsäureester (KSE) bezeichnet werden. Ein Vorteil der KSE gegenüber den Acrylharzen ist die gute Eindringtiefe. Die Umwandlung von KSE in festigendes Kieselgel bedarf

der Katalyse, d. h. die Reaktion muß durch Katalysatoren in Gang gesetzt werden. Als Katalysator wirkt auch die Vernetzung einzelner Moleküle, die sog. Vorhydrolyse. Der durch Vorhydrolyse entstandene Polykieselsäureester (PKSE) besteht bei dem Produkt der Firma INTERACRYL (in Kienberg in der Schweiz) aus 3 bis 5 KSE-Molekülen. Sie liegen in einer sich verzweigenden Kette aneinander. Durch diese Polymerisation erhöht sich der Wirkstoffgehalt. PKSE kann mit Lösenmittel weiter verdünnt werden. Zur Bildung des festigenden Kieselgels benötigt der PKSE Wasser. Dieses Wasser zieht er einerseits aus der im Stein vorhandenen Schicht von Wassermolekülen, was durch das zugesetzte hygroskopische Lösemittel Ethanol erleichtert wird.

„Bologna Coctail“ wurde von Rossi-Manaresi et al. Zur Konservierung der Fassade von San Petronio, Bologna (Istrischer u. Veroneser Kalkstein sowie Marmor im skulpturellen Bereich ausgewählt. Es ist eine Mischung von Acrylpolymeren und Silikone. Silikone, die sowohl Silan- als auch Estergruppen aufweisen, werden zu festigender Imprägnierung von Stein eingesetzt, weil sie sowohl hydrophobierende als auch festigende Eigenschaften aufweisen. Sie wirken der Verschmutzung des Baustoffes entgegen und zu Verringerung weiterer Schäden durch Wasseraufnahme.

Für die Konservierung wurden 2 Marmorkugeln (P8 und P9), 4 Bohrkerne pro Marmorwürfel (P1, P2 und P6) und 2 Bohrkerne aus den Marmorproben P7 verwendet. Die untersuchten Proben sind in Tab. 3 aufgelistet. Ziel der Untersuchung war die Prüfung der Wirksamkeit der bekannten Konservierungsmittel mit Hilfe des US-Verfahrens.

Tab. 3: Probenauswahl für die Konservierungsmittel.

Konservierungsmittel	Probe
Acrylharz	1C, 1D, 1F1, 2B, 6F1
Polykieselsäureester	1A2, 2A2, 2C, 6A2, GK5b, P9
„Bologna Cocktail“	1F2, 2F2, 6D, 6F2, GK4a, P8

Zunächst wurden die Proben thermisch belastet (siehe Abschn. 2.11) und danach in der Luft abgekühlt. Weiterhin wurden diese Proben ganz in die Tränkflüssigkeit eingetaucht und dort für 24 Stunden belassen. Anschließend wurden die Proben aus den Tränkbehälter entnommen und vier Wochen im Labor gelagert. Um die aufgenommene Menge an Lösungsmittel und den Anteil des tatsächlich polymerisierten Acrylharzes und SiO₂ – Gelanteil zu bestimmen, wird die Probe einmal unmittelbar nach der Tränkung und ein zweites mal nach abgelaufener Erhärtung (ca. 1 Monat) gewogen. Eine erste Überprüfung der Konservierung erfolgte mittels zerstörungsfreier Ultraschallanalyse.

3. Ergebnisse

3.1. Ultraschallmessungen

3.1.1. Räumliche Verteilung der Ultraschallgeschwindigkeiten

Mit Hilfe der gemessenen maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten läßt sich der Anisotropiekoeffizient berechnen: $(v_{\max} - v_{\min}) / v_{\text{mean}}$ (see e.g. Cesnokov 1977, in Schön 1983). Anhand der Tab. 4 ist festzustellen, daß jeder Marmorwürfel und die zwei Marmorkugeln unterschiedliche Anisotropiekoeffizienten aufweisen, den höchsten im Würfel P1 und den niedrigsten im Würfel P6.

Tab. 4: Kennzeichnende Anisotropiekoeffizienten.

Probe	Ebene	Anisotropiekoeffizient
P1	XY	0,3
	YZ	0,3
	XZ	0,3
P2	XY	0,3
	YZ	0,1
	XZ	0,3
P6	XY	0,2
	YZ	0,2
	XZ	0,1
P7		0,5

Probe	Ebene	Anisotropiekoeffizient			
		1997		2000	
P3	XY	0,2	0,4	0,3	0,5
	YZ	0,2		0,5	
	XZ	0,3		0,4	
P4	XY	0,2	0,3	0,3	0,3
	YZ	0,2		0,3	
	XZ	0,3		0,3	
P5	XY	0,3	0,4	0,4	0,5
	YZ	0,2		0,4	
	XZ	0,3		0,3	

Probe	Ebene	Anisotropiekoeffizient					
		Präerwärmung		Posterwärmung		Postbehandlung	
P8	XY	0,3	0,3	0,9	0,9	0,5	0,6
	YZ	0,2		0,6		0,5	
	XZ	0,2		0,4		0,5	
P9	XY	0,3	0,3	0,8	0,8	0,6	0,7
	YZ	0,3		0,6		0,6	
	XZ	0,3		0,7		0,7	

Nach drei Jahren steigt der Anisotropiekoeffizient bei den Würfeln P3 und P5 auf 0,5. Die thermisch belasteten Kugeln (siehe Abschn. 2.11) liefern Anisotropiekoeffizienten zwischen 0,3 und 0,9. Nach der Tränkung (siehe Abschn. 2.12) wurden etwas niedrigere Werte ermittelt. Wie die Messungen ergaben, weisen die Meßwerte eine deutliche p-Wellengeschwindigkeitsanisotropie auf. Es muß aber berücksichtigt werden, daß der Anisotropiekoeffizient nicht den Grad der Orientierung von Calcitkristallen darstellt (Sheremeti-Kabashi et al. 2000). Erhöhte oder gesenkte Korn-Korn-Kontakte üben einen starken Einfluß auf die

Ermittlung dieses Wertes, so daß dies nur als Anzeige für die Entwicklung der Zerstörung interpretiert werden kann (Zezza 1990). Der Würfel P6 zeigt im Vergleich zu anderen Marmorproben den niedrigsten Anisotropiekoeffizient, da dieser keiner Verwitterung - Exposition ausgesetzt war.

Die Ultraschallmessung wird zunehmend eingesetzt, um den Verwitterungszustand von Marmor zu charakterisieren. Wie Köhler (1988) nachweisen konnte, nimmt die Laufzeitgeschwindigkeit vom bruchfrischen zum extrem gefährdeten Marmor von ca. 5 Km/s auf 1-2 Km/s ab. Er stellte mit Hilfe der US-Laufzeiten die folgenden Schadensklassen auf:

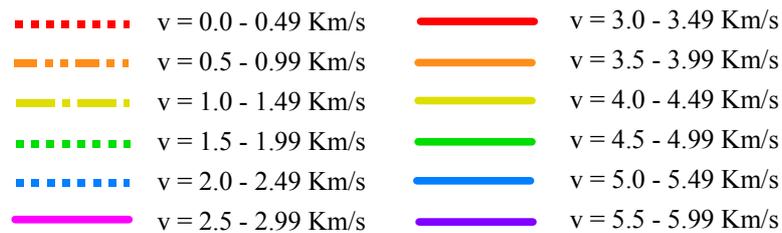
bruchfrischer Marmor:	$v_1 > 5$ Km/s
guter Zustand:	$v_1 = 4-5$ Km/s
befriedigender Zustand:	$v_1 = 3-4$ Km/s
beginnende Strukturzerstörung:	$v_1 = 2-3$ Km/s
bedrohlicher Zustand:	$v_1 = 1,5-2$ Km/s
völlige Gefügezerstörung:	$v_1 < 1,5$ Km/s

Da die US-Geschwindigkeit mit der Schwäche der Kohäsion der Kristallite sinkt, wird dabei eine Geschwindigkeitsreduktion als Folge von Verwitterung mit einem Zuwachs an Porosität in Verbindung gebracht. Aus dieser Einteilung ist festzustellen, daß die Meßwerte mit einer US-Geschwindigkeit von $> 4,0$ Km/s ungefährdete Bereiche repräsentieren. Bereiche mit Geschwindigkeiten zwischen $4,0$ und $2,0$ Km/s zeigen einen Anfang der Gefügezerstörung, die sich größtenteils auf den oberflächennahen Bereich beschränken. Die Meßwerte mit einer Geschwindigkeit von $< 1,5$ Km/s repräsentieren Bereiche akuter Gefährdung. Die Auflockerung des Gefüges ist stark und kann im fortgeschrittenen Stadium zum totalen Zusammenbruch einer Skulptur führen. Wie später gezeigt wird, ist eine ausreichende Anzahl von Messungen in verschiedenen Richtungen notwendig, um eine qualitative Aussage bei der Interpretation von US-Untersuchungen zur Ermittlung des Verwitterungszustandes von Marmor treffen zu können. Es soll daher in erster Linie die Anisotropie des Marmorgefüges berücksichtigt werden.

Calcit, als das wesentliche gesteinsbildende Mineral, weist eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der US-Wellen in Abhängigkeit verschiedener kristallographischer Richtungen auf. Die Ultraschallgeschwindigkeit zeigt im Calcitkristall ein Maximum von $v_p=7,73$ Km/s parallel zur a-Achse und ein Minimum $v_p=5,71$

Km/s parallel zur c-Achse. Die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen US-Geschwindigkeit ist ca. 2 Km/s (Siegesmund et al. 1997). Dementsprechend ist ein Gesamtgestein anisotrop, wenn die gesteinsbildenden Minerale eine Vorzugsorientierung aufweisen (intrinsische Anisotropie). Die intrinsische Anisotropie kann leicht ca. 10% betragen, was zu einer „natürlichen“ Geschwindigkeitsvariation (ohne fortgeschrittene Zerstörung) bei unverwitterten Marmoren von ca. 0,5 Km/s führen kann (Weiss et al. 2001).

Für die vorliegenden Untersuchungen erfolgte die Einteilung der US-Geschwindigkeiten zu insgesamt 12 Gruppen:



Durch statistische Auswertung der Ultraschallgeschwindigkeit läßt sich sehr deutlich der unterschiedliche Verwitterungszustand der Marmorwürfel und Kugeln nachweisen. Der aufbewahrte Marmorwürfel P6 weist grundsätzlich keine gefährdeten Bereiche auf. Fast 60% der Meßwerte liegen im Bereich zwischen 5,0-5,49 Km/s, was dem Zustand eines bruchfrischen Marmors entspricht. Dagegen zeigen die seit 1991 exponierten Marmorwürfel P1 bis P5 jeweils ca. 1-1,5 Km/s geringere bzw. gute und befriedigende Zustände (Abb. 13).

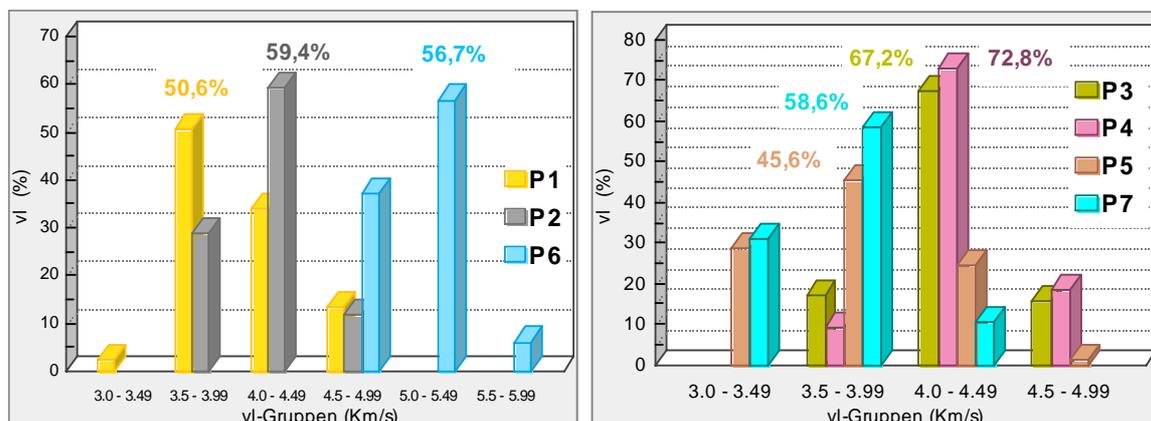


Abb. 13: Statistischer Vergleich der Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen Proben P1 bis P7.

Bei den Proben P5 und P7 finden sich gleiche Ultraschallgeschwindigkeiten, obwohl sie eine unterschiedliche Exponierungsdauer besitzen. Nach makroskopischen Beobachtungen an dem Marmorwürfel P5 kann festgestellt werden, daß das Gefüge, neben den durch die Metamorphoseprozesse erzeugten Strukturen und Texturen, Relikte der Stylolithe vormetamorpher Sedimentgefüge enthält. An den Marmorwürfeln P3, P4 und P5 haben die

Messungen im Jahr 2000 im Vergleich mit den 1997 an den identischen Meßstellen gemessenen Werten gezeigt, daß die sich Ultraschallgeschwindigkeiten um 0,5 Km/s verändert haben (Abb. 14). Die wesentliche Veränderungen sind an dem Würfel P5 eingetreten. Die Minimalwerte der Ultraschallgeschwindigkeiten weisen auf den Bereich „beginnende Strukturzerstörung“ hin.

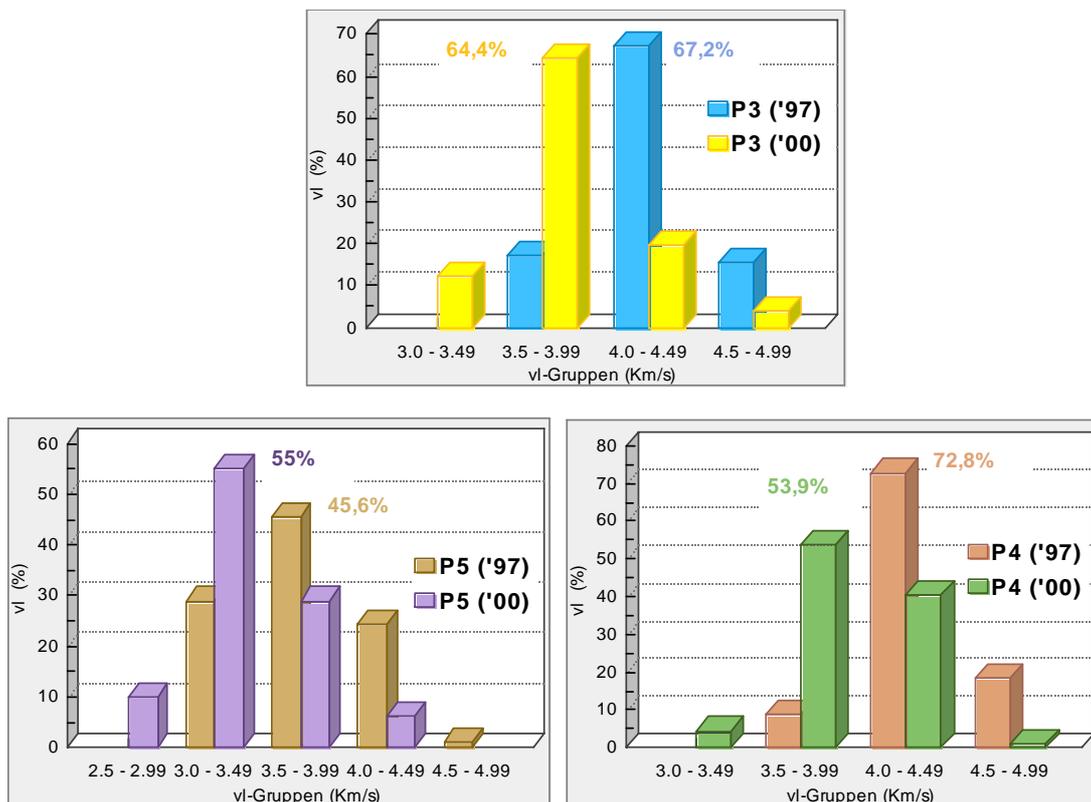
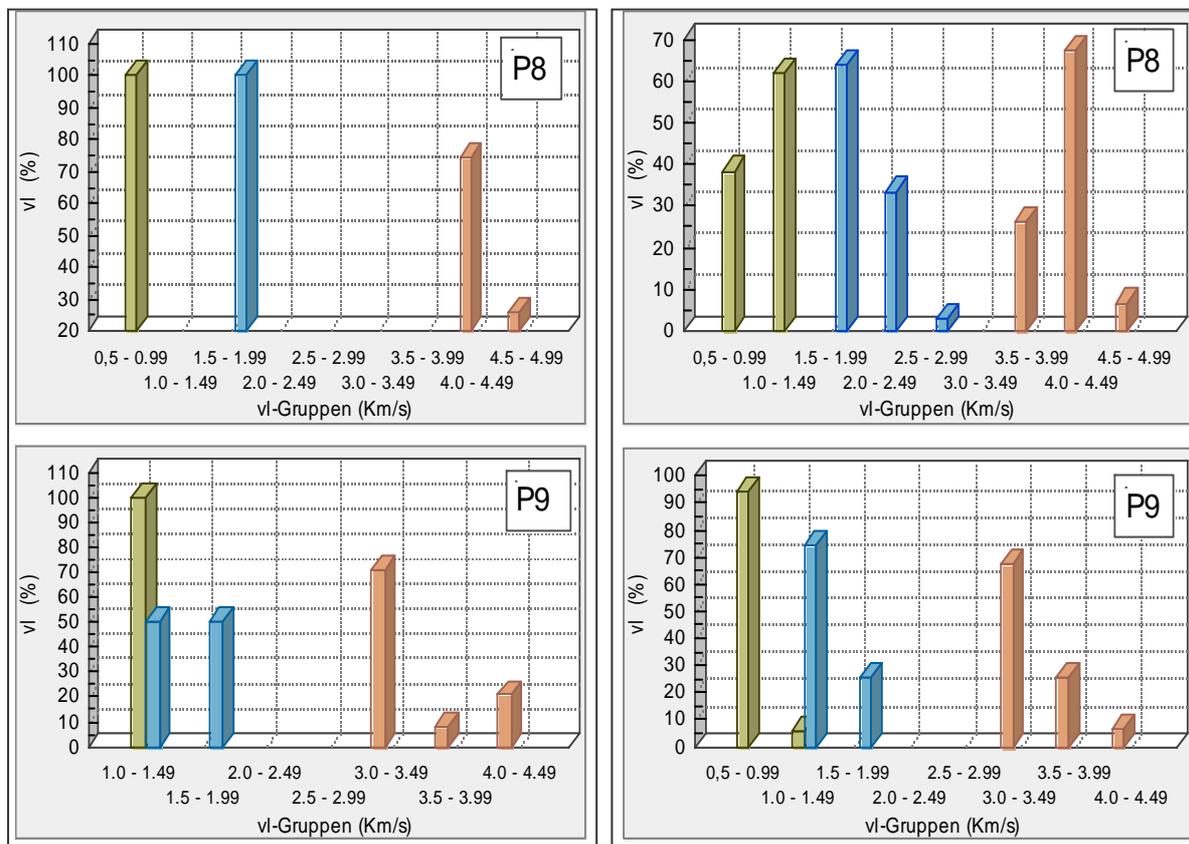


Abb. 14: Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeiten an den Marmorwürfeln P3, P4 und P5 zwischen 1997-2000.

Die Abb. 15 zeigt den Vergleich zwischen Ultraschallmessungen entlang der Großkreise und der XY, YZ und XZ Ebenen an der Carrarakugel P8 und der Laaserkugel P9. Entlang der Großkreise war die p-Wellengeschwindigkeit in der Carrarakugel kaum anisotrop. Fast 75% der US-Geschwindigkeiten treten zwischen 4,0-4,49 Km/s auf, so daß die Kugel als isotrop betrachtet werden konnte. Auch die Meßwerte nach der thermischen Belastung (zwei Stunden 500 °C) und nach der Behandlung mit „Bologna Cocktail“ liegen in einer Geschwindigkeitsgruppe. In jedem Fall ist aber offensichtlich, daß alle durch das Zentrum verlaufenen Ultraschallmessungen nicht zu ausreichenden Schlußfolgerungen geführt haben. Im Gegensatz zeigen die XY, XZ und YZ Richtungen eine deutliche p-Wellengeschwindigkeitsanisotropie (siehe Ab. 15). Da die US-Geschwindigkeitsgruppen zwischen

diesen zwei Meßarten sehr unterschiedlich sind, ist eine ausreichende von Messungen in verschiedenen Richtungen erforderlich, um zuverlässige Aussagen über die Anisotropie einer Probe zu gewinnen.

An der Laaserkugel P9 zeigen die US-Geschwindigkeiten entlang der Großkreise sowohl vor und nach der thermischen Belastung (zwei Stunden 500 °C) als auch nach der Behandlung mit PKSE ähnliche Verhältnisse wie in XY, YZ und XZ Richtungen. Nach der thermischen Belastung erbrachte die US-Untersuchung an den beiden Kugeln erschreckende Ergebnisse. Die US-Geschwindigkeiten hatten zwischen 2,5-4 Km/s abgenommen. Die Meßwerte liegen im Bereich zwischen 0,5-1,49 Km/s, was dem Zustand einer völligen Gefügezerstörung entspricht. Nach der Behandlung waren die Ultraschallgeschwindigkeiten von zum Teil unter 1 Km/s auf Werte zwischen 1,5 bis 3 Km/s gestiegen .



a

b

Prärwärmung Posterwärmung Postbehandlung

Abb. 15: Vergleich der Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen der Carrarakugel P8 (mit „Bologna Coctail“ behandelt) und der Laaserkugel P9 (mit PKSE behandelt) vor und nach der Erwärmung (2 Stunden 500 °C) und Behandlung.

15a: Messungen entlang der Großkreise.

15b: Messungen entlang der XY, YZ und XZ Ebenen.

Mit Hilfe der zweidimensionalen Geschwindigkeitsverteilung-Ultraschalltomographie wurden je nach Marmorwürfel und –Kugel teilweise stark ausgeprägte Anisotropien festgestellt. Bei einem Vergleich der tomographischen Erfassungen bei den Würfeln P1, P2 und P6 ist jedoch zu beachten, daß die Geschwindigkeitsanisotropie bei dem Würfel P6 schwächer als bei P1 und P2 ausgeprägt ist (Abb. 16). Die Differenz zwischen der maximalen $v_p = 5,8$ Km/s und der minimalen $v_p = 4,76$ Km/s beträgt im frischen Würfel P6 1,04 Km/s. Selbst im Calcitkristall ist diese Differenz zwischen der maximalen und der minimalen US-Geschwindigkeit ca. 2 Km/s (Siegesmund et al.1997). In den Würfeln P1 ($v_{\max} = 4,9$ Km/s, $v_{\min} = 3,1$ Km/s) und P2 ($v_{\max} = 5$ Km/s, $v_{\min} = 3,7$ Km/s) ist die Differenz höher und beträgt 1,8 bzw. 1,3 Km/s. An der XZ Ebene des Würfels P1 weichen Werte unter 3,5 Km/s deutlich vom Normalwert ab (der Mittelwert 4.04 Km/s wurde als Normalwert angesehen), was bedeutet, daß die entsprechenden Stellen deutlich Unterschiede in Porenraum und Gefüge aufweisen. In den Bereichen, in denen Werte zwischen 3,5-3,99 Km/s auftreten, sind ebenfalls Gefügestörungen zu erwarten.

Wegen der vormetamorphen Sedimentgefüge weist Würfel P5 (Abb. 19) an jeder Ebene gefährdete Bereiche auf. An zahlreichen Stellen treten Ultraschallgeschwindigkeiten unter 2,7 Km/s auf. Die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Ultraschallgeschwindigkeit ist im Zeitraum von 1997 bis 2000 von 1,53 auf 1,88 Km/s gestiegen. In den Abb. 17 und 18 erkennt man, daß die Würfeln P3 und P4 gleichmäßig im Verlauf der Zeit verwittert sind. Bei dem Würfel P4 ist nur eine sehr geringe Veränderung der Differenz zwischen maximalem und minimalem Ultraschallwert zu erkennen. Im Zeitraum von 1997 bis 2000 erhöht sich diese Differenz lediglich von 1,35 auf 1,36 Km/s. Auch der Anisotropiekoeffizient veränderte sich nicht (siehe Tab. 4).

Wie die Messungen ergaben, treten die maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten nur in zwei Ebenen jedes Würfels auf, woraus sich ableiten läßt, daß in jeder Probe eine Ebene wegen ihrer vernachlässigbar geringen richtungsbedingten Unterschiede als nahezu isotrop betrachtet werden kann.

Auch in der Carrara- und der Laaserkugel wurde eine qualitative Anisotropiebewertung mit der US-Tomographie ermittelt. Während bei der Carrarakugel P8 die XY Ebene als nahezu isotrop angenommen werden kann, ist in Ebenen den XZ und YZ eine geringe Anisotropie festzustellen (Abb. 20). In der XY Ebene ist die Ausbreitung der p-Geschwindigkeitswellen gleichwertig und 73,3% davon treten im Bereich zwischen 4,0-4,49 Km/s auf. Die Differenz zwischen minimalem und maximalem Mittelwert der US-Geschwindigkeiten beträgt 0,44 in

der XZ und 0,6 Km/s in der XY Ebene, die verglichen mit demselben Wert in den Würfeln P1-P6 deutlich niedriger ist. Im Fall der Laaserkugel P9 liegen die US-Geschwindigkeiten aufgrund der Gefügezerstörung zu 68% im Bereich zwischen 3,0 und 3,49 Km/s (Abb. 21). Im Unterschied zu YZ und XZ Ebenen zeigt die XY Ebene keine deutliche p-Wellengeschwindigkeitsanisotropie.

Die nach der thermischen Belastung erhaltenen US-Meßwerte repräsentieren Bereiche akuter Gefährdung. An beiden Kugeln hatten die US-Geschwindigkeiten zwischen 75% und 80% abgenommen. Die Betrachtung der Anisotropie an der Laaserkugel ließ zunächst keine Tendenz erkennen. Die Konservierung der Carrarakugel mit „Bologna Coctail“ und der Laaserkugel mit Polykieselsäureester (PKSE) führte zu einer Zunahme der US-Geschwindigkeiten bis 150% (von 0,5-1,49 auf 1,5-2,99 Km/s). Der errechnete polymerisierte und SiO₂-Gelanteil beträgt an der Carrarakugel 0,082% und an der Laaserkugel 0,24%.

Durch Postbehandlungsschalltomographie (Abb. 20 und 21) kann nachgewiesen werden, daß die „Bologna Coctail“ Behandlung zu einer deutlicher Verbesserung der US-Geschwindigkeiten des Materials als PKSE führte. Obwohl das Festigermaterial „Bologna Coctail“ vermutlich nicht tief eindringen konnte, wurde eine Verfestigung der Oberfläche bewirkt. Wegen der sehr geringen spezifischen Oberfläche des Marmors von ca. 0,1 m²/g führte PKSE mit seiner geringen Klebekraft (Snethlage et al. 1999) nicht zu einer ausreichenden Festigung. Man kann davon ausgehen, daß bei schwerer Schädigung eine wirksame Behandlung unter Atmosphärendruck nicht erwartet werden kann.

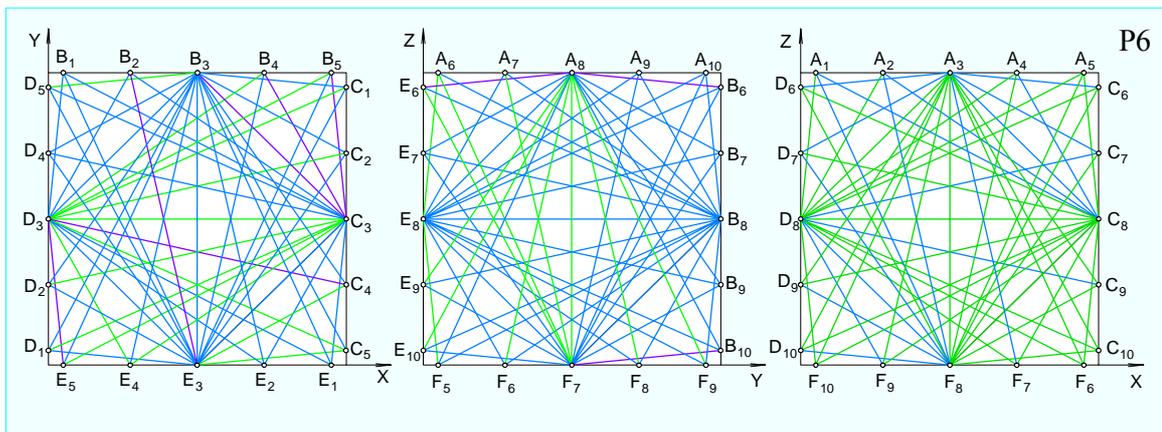
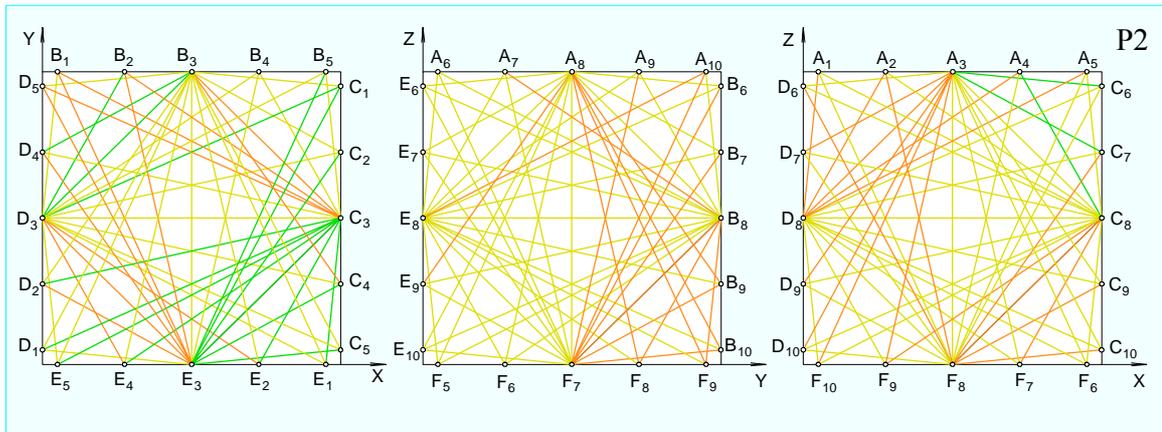
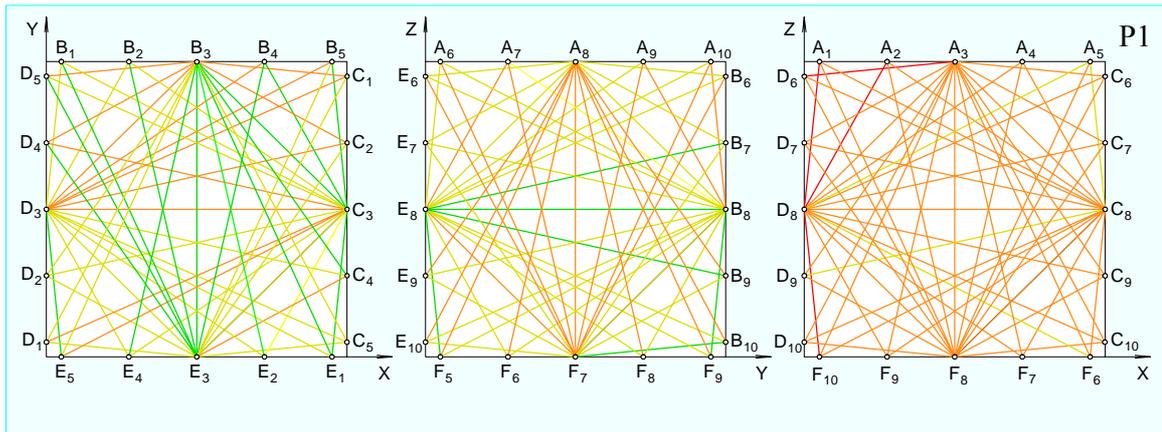


Abb. 16: Vergleich der tomographischen Erfassungen in den Marmorwürfeln P1, P2 und P6

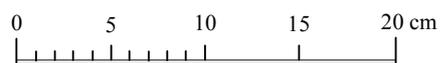
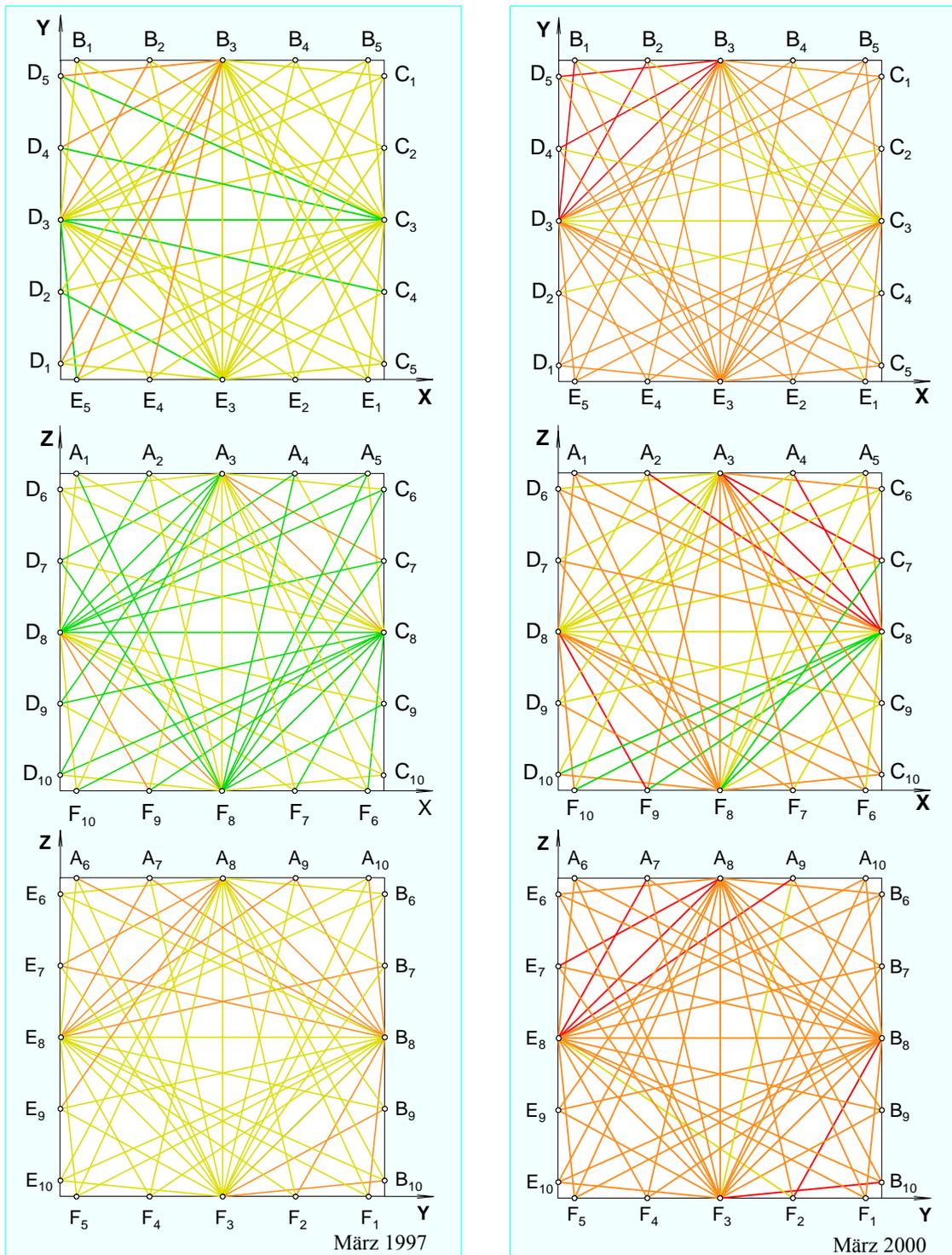


Abb. 17: Veränderung der tomographischen Erfassungen im Marmorwürfel P3 zwischen 1997-2000

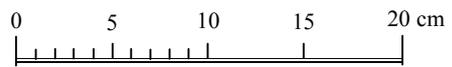
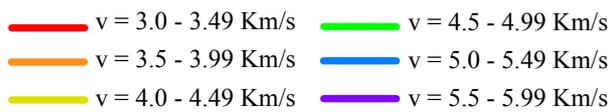
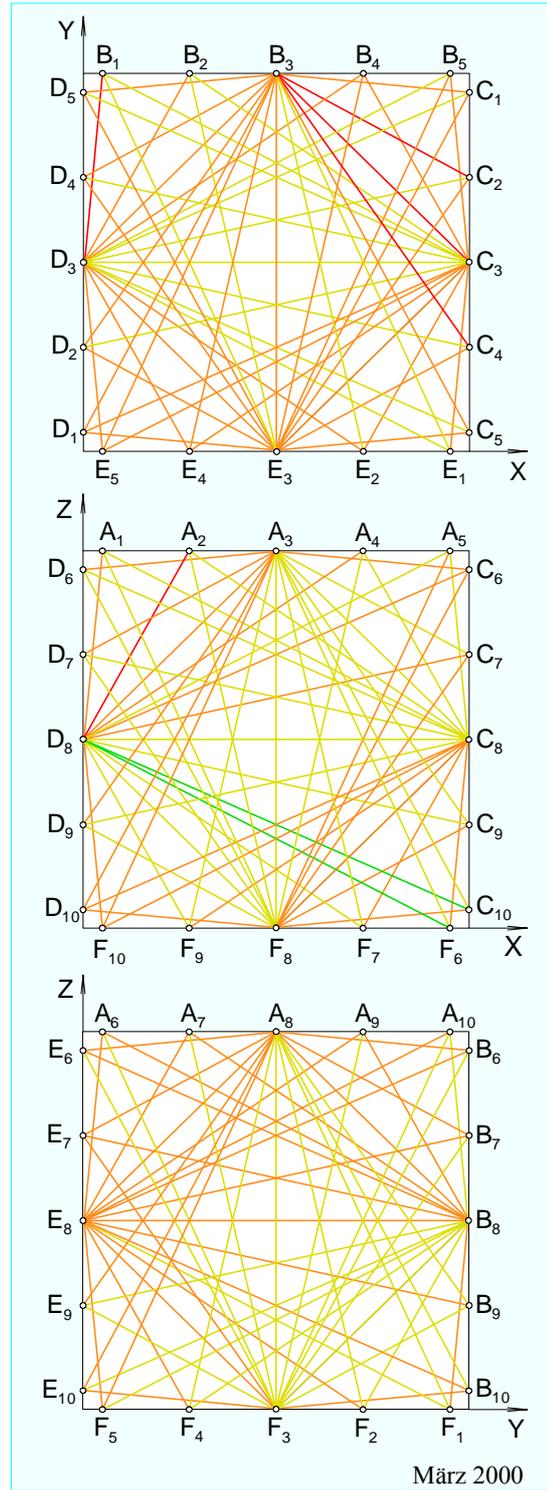
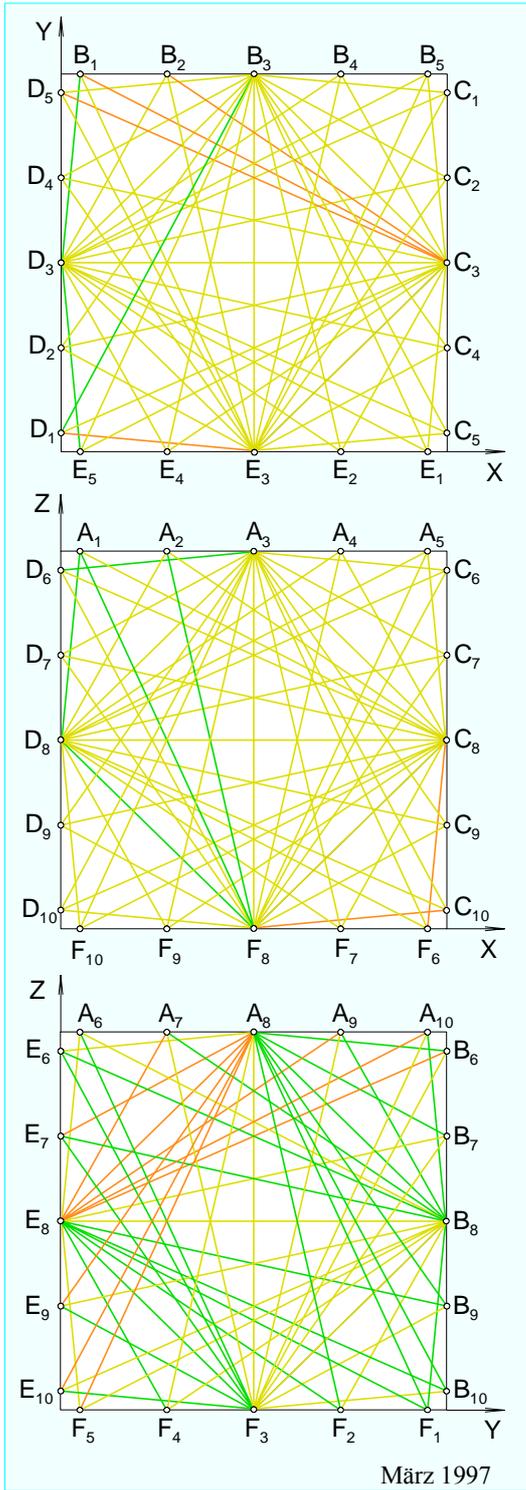


Abb. 18: Veränderung der tomographischen Erfassungen im Marmorwürfel P4 zwischen 1997-2000

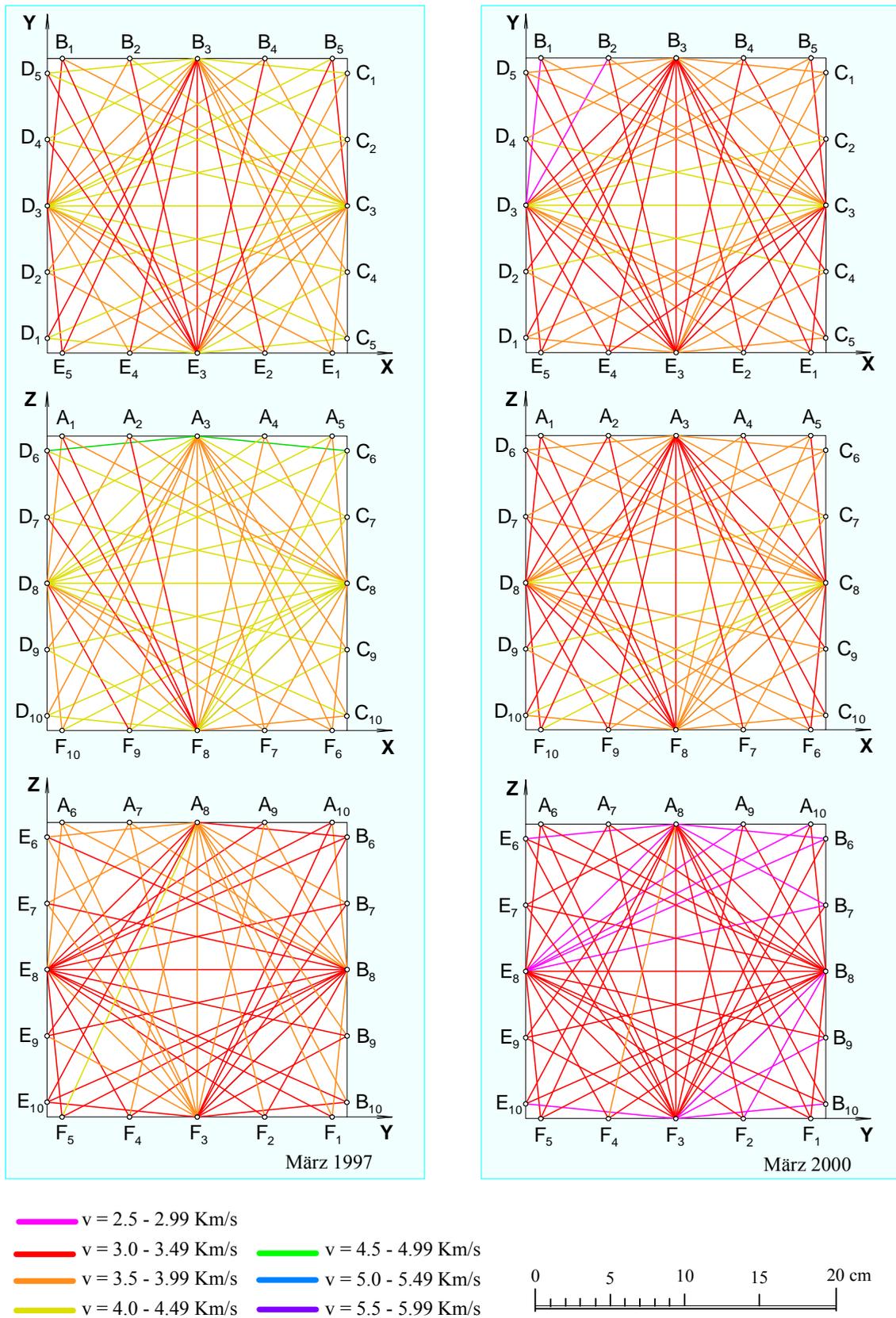


Abb. 19: Veränderung der tomographischen Erfassungen im Marmorwürfel P5 zwischen 1997-2000

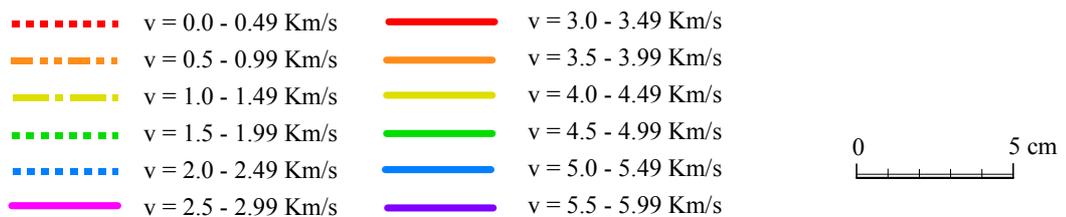
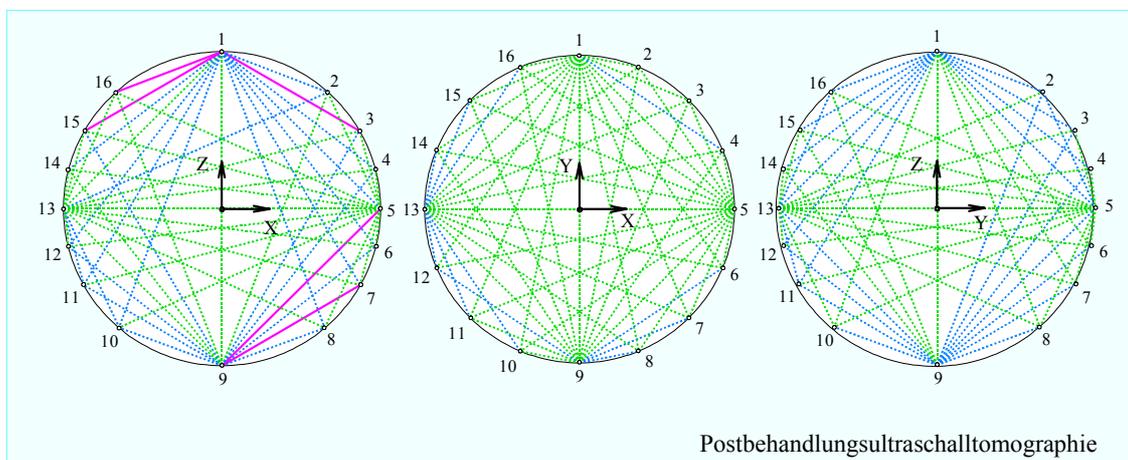
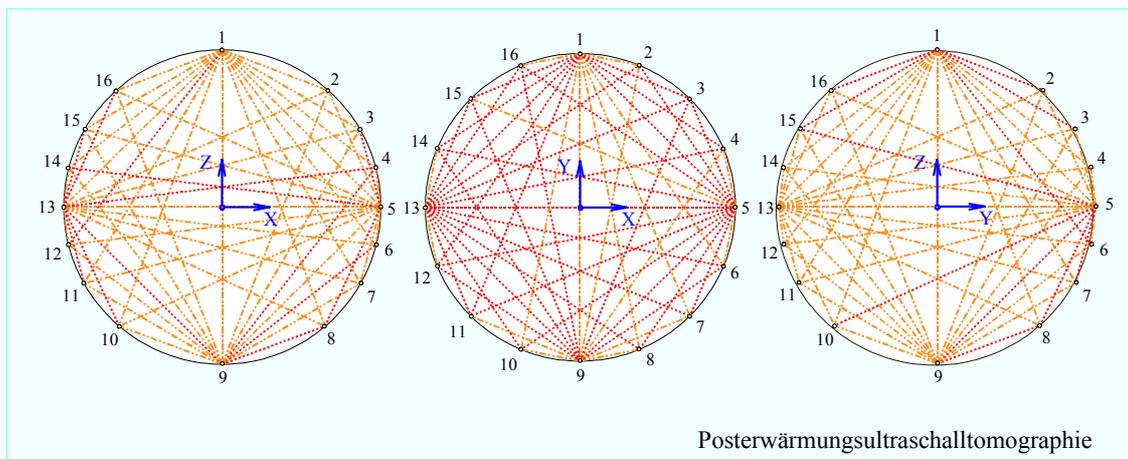
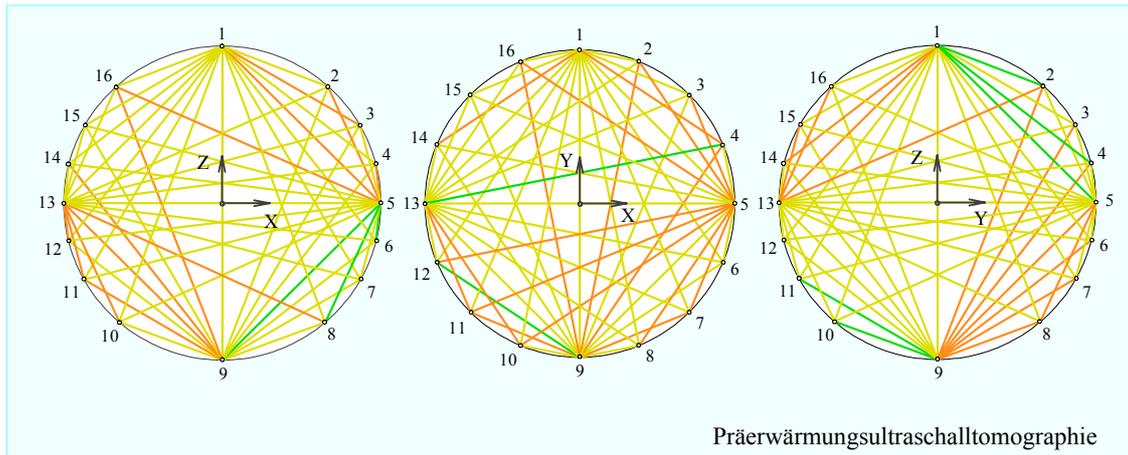


Abb. 20: Vergleich der tomographischen Erfassungen in der Carrarakugel P8 vor und nach der Erwärmung (2 Stunden auf 500 °C) und Behandlung mit "Bologna Coctail"

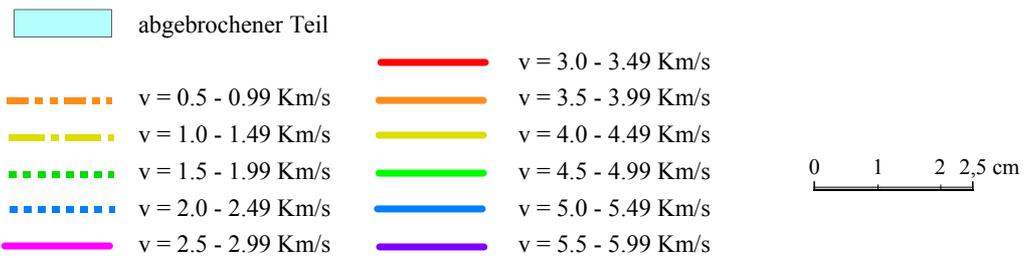
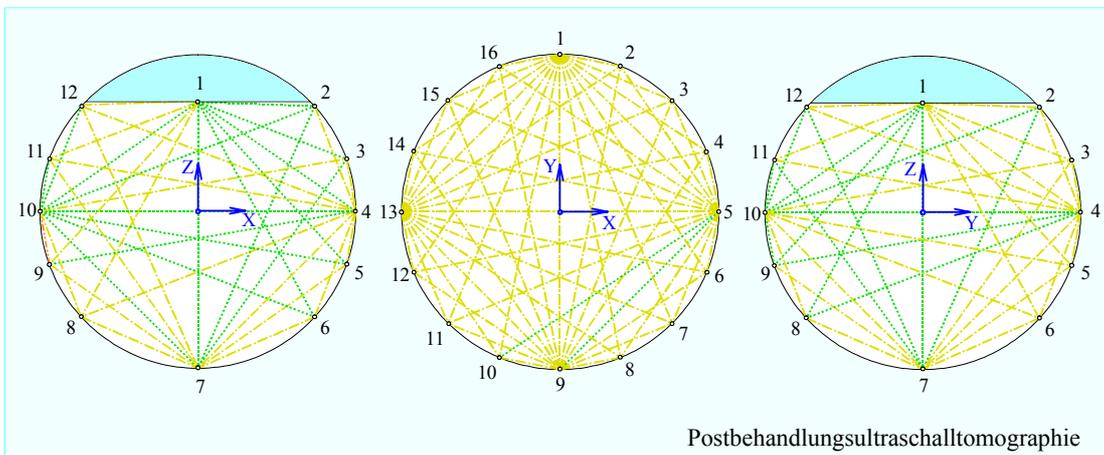
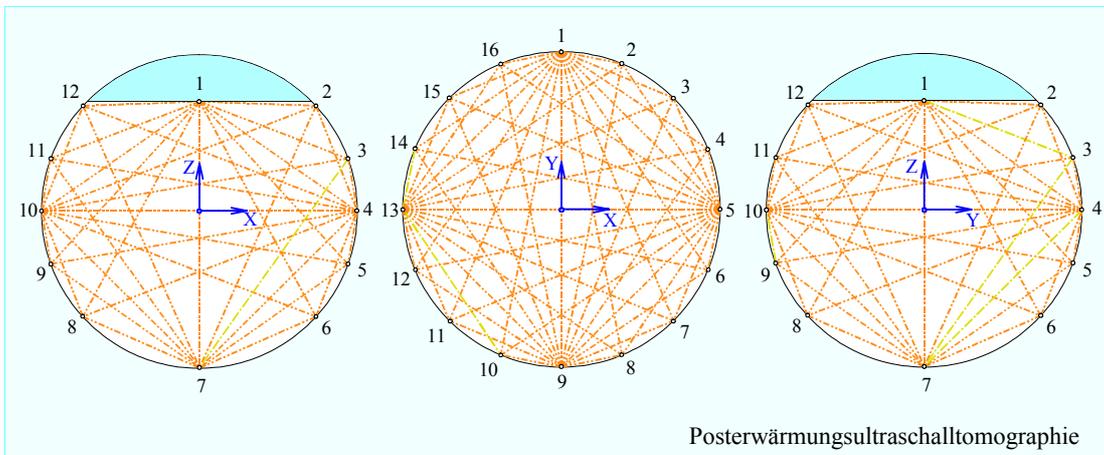
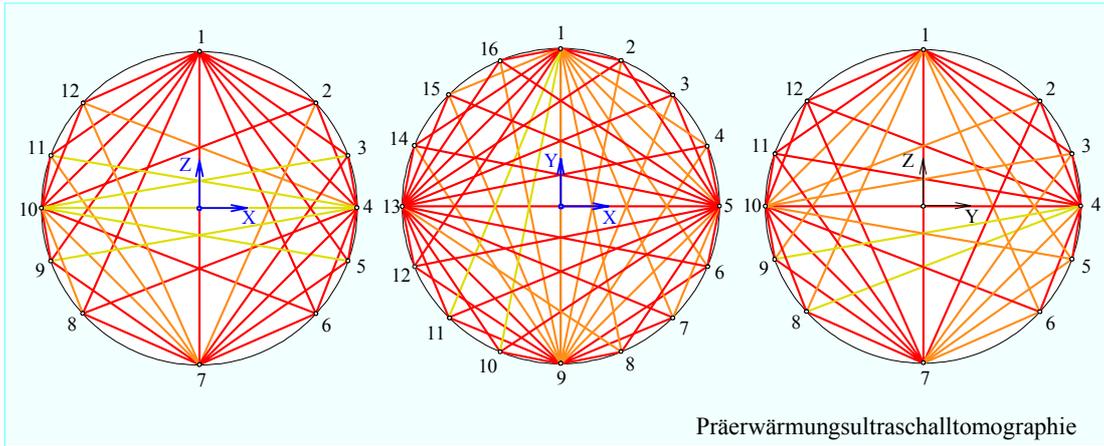


Abb. 21: Vergleich der tomographischen Erfassungen in der Laaserkugel P9 vor und nach der Erwärmung (2 Stunden auf 500 °C) und Behandlung mit PKSE

3.1.2. Bestimmung der Orientierung von Calcitkristallen

Bei den Diagrammen nach Abb. 22a+b und 23a+b ist gut zu erkennen, daß die Häufungen der maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten bei den Würfeln P2 und P6 um angenähert 90° von einander verschoben sind. Gleichzeitig ist aber auch gut zu erkennen, daß die optischen c-Achsen der beiden Würfel ein starkes Maximum aufweisen (P2: $315^\circ/18,6^\circ$ und P6: $16,7^\circ/14,1^\circ$) (Abb. 22c und 23c).

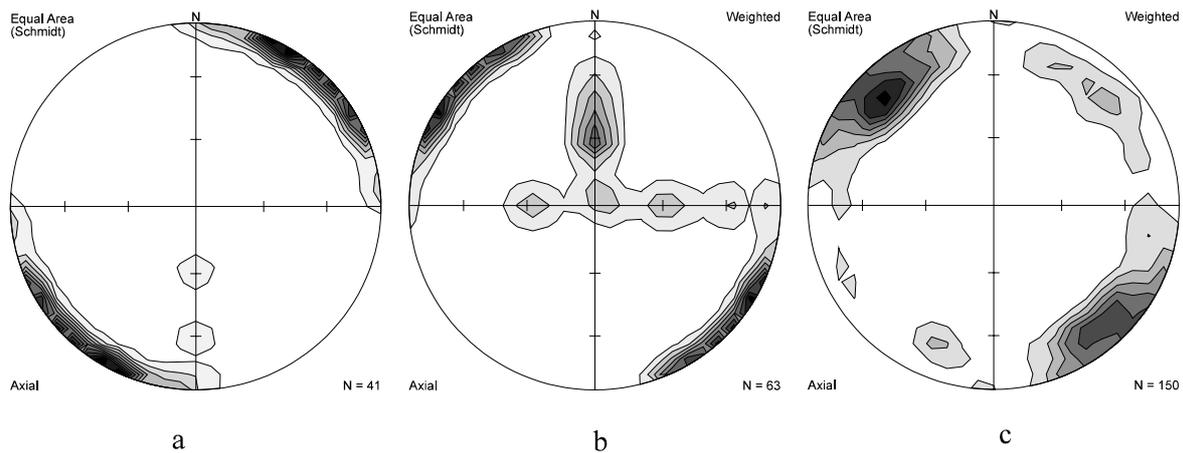


Abb. 22: Die Verteilung der US-Geschwindigkeiten und optischen c-Achsen an Marmorwürfel P2.

22a: Maxima der US-Geschwindigkeiten. Kontourlinien: 4,2; 4,3; 4,4; 4,5; 4,6; 4,7; 4,8; 4,9; 5,0 km/s

22b: Minima der US-Geschwindigkeiten. Kontourlinien: 3,9; 3,8; 3,7; 3,6; 3,5; 3,4; 3,3; 3,2; 3,1 km/s

22c: das Maximum der Verteilung der optischen c-Achsen.

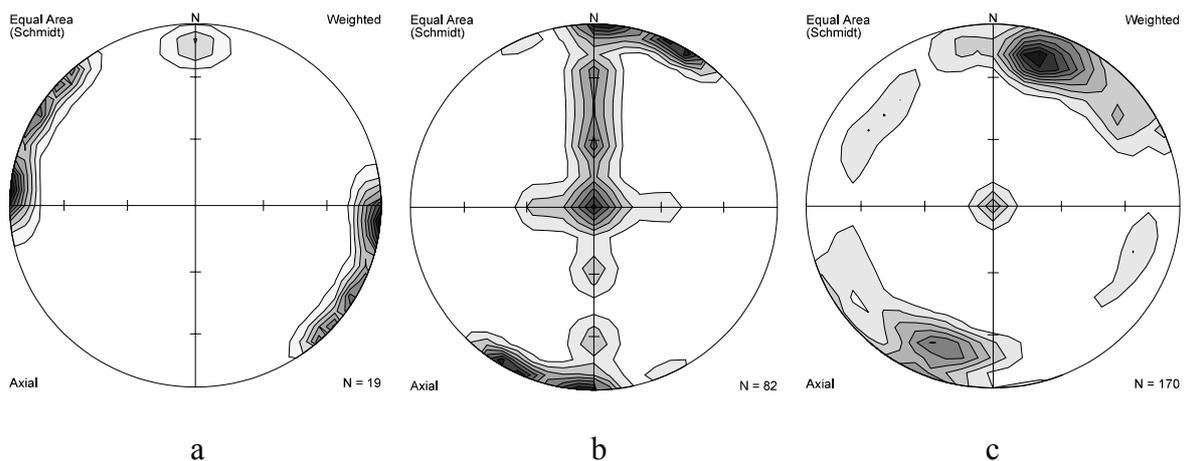


Abb. 23: Die Verteilung der US-Geschwindigkeiten und optischen c-Achsen an Marmorwürfel P6.

23a: Maxima der US-Geschwindigkeiten. Kontourlinien: 5,0; 5,1; 5,2; 5,3; 5,4; 5,5; 5,6; 5,7; 5,8 km/s

23b: Minima der US-Geschwindigkeiten. Kontourlinien: 5,4; 5,3; 5,2; 5,1; 5,0; 4,9; 4,8; 4,7; 4,6 km/s

23c: das Maximum der Verteilung der optischen c-Achsen.

Die Polpunktmaxima der Verteilung der maximalen und minimalen p-Wellengeschwindigkeiten beträgt: v_{\max} : $94,8^\circ/0,4^\circ$ und v_{\min} : $4,8^\circ/0,4^\circ$ im Fall zu P6 und v_{\max} : $211^\circ/3,2^\circ$ und v_{\min} : $301^\circ/3,2^\circ$ im Fall zu P2. Die Werte der minimalen US-Geschwindigkeiten korrespondieren sehr gut zur Orientierung der optischen c-Achsen, was die gute Übereinstimmung der Messungen des Ultraschalles mit denen des Universaldrehtisches zeigt. Diese Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit den Merkmalen von Calcitkristallen, bei denen die minimale US-Geschwindigkeit der Richtung der c-Achsen entspricht. Im entgegengesetzten Fall sind bei dem Würfel P1 das Maximum von minimalen US-Geschwindigkeiten und optischen c-Achsen ca. 30° von einander entfernt (Abb. 24). Die Polpunktmaxima der Verteilung der maximalen und minimalen p-Wellen-geschwindigkeiten beträgt: v_{\max} : $94,8^\circ/0,4^\circ$; v_{\min} : $180^\circ/0^\circ$ und Maximum der optischen c-Achsen $31^\circ/3,2^\circ$.

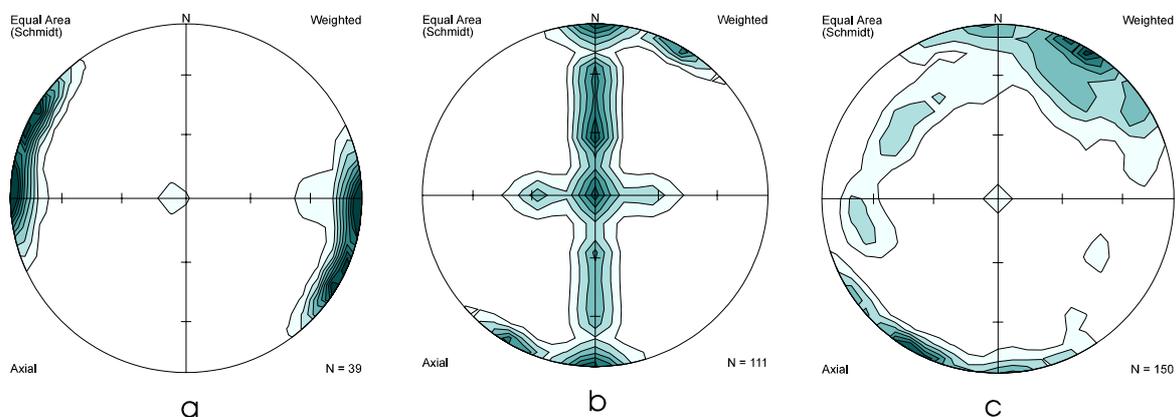


Abb. 24: Die Verteilung der US-Geschwindigkeiten und optischen c-Achsen an Marmorwürfel P1.

24a: Maxima der US-Geschwindigkeiten.

Kontourlinien: 4,0; 4,1; 4,2; 4,3; 4,4; 4,5; 4,6; 4,7; 4,8 km/s

24b: Minima der US-Geschwindigkeiten. Kontourlinien: 3,5; 3,4; 3,3; 3,2; 3,1; 3,0 km/s

24c: das Maximum der Verteilung der optischen c-Achsen.

Es ist mit großer Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß die Verwitterungserscheinungen die Abweichung zwischen den Ergebnissen dieser beiden Methoden bewirken. Im Vergleich zur Laaserkugel treten an der Carrarakugel die Häufungen der maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten scharf auf (v_{\max} : $225^\circ/80,4^\circ$ und v_{\min} : $315^\circ/80,4^\circ$ (Abb. 25a+b)). Bei stark rekristallisierten, grobkörnigen Marmoren, wie im Fall der Laaserkugel, sind reliktsche Gefügestrukturen mit Einregelungen der kristallographischen c-Achsen in der Regel kaum noch erkennbar (Cramer 1998). Die Häufungen minimaler und maximaler US-Geschwindigkeiten betragen: (v_{\max} : $270^\circ/0^\circ$ und v_{\min} : $315^\circ/61^\circ$ (Abb. 26a+b)). Da die US-Geschwindigkeiten der Temperaturen auf 500°C hoch belasteten Kugeln verschlechtert wurden (die Meß-

werte der US-Messungen entlang der Großkreise liegen in einer US-Geschwindigkeitsgruppe (siehe Abb. 15a), ist nur die Häufung minimaler US-Geschwindigkeiten an der Carrarakugel (v_{\min} : $315^{\circ}/80,4^{\circ}$ (Abb. 25c)) und maximaler US-Geschwindigkeiten an der Laaserkugel (v_{\max} : $270^{\circ}/0^{\circ}$ (Abb. 26c)) bemerkbar.

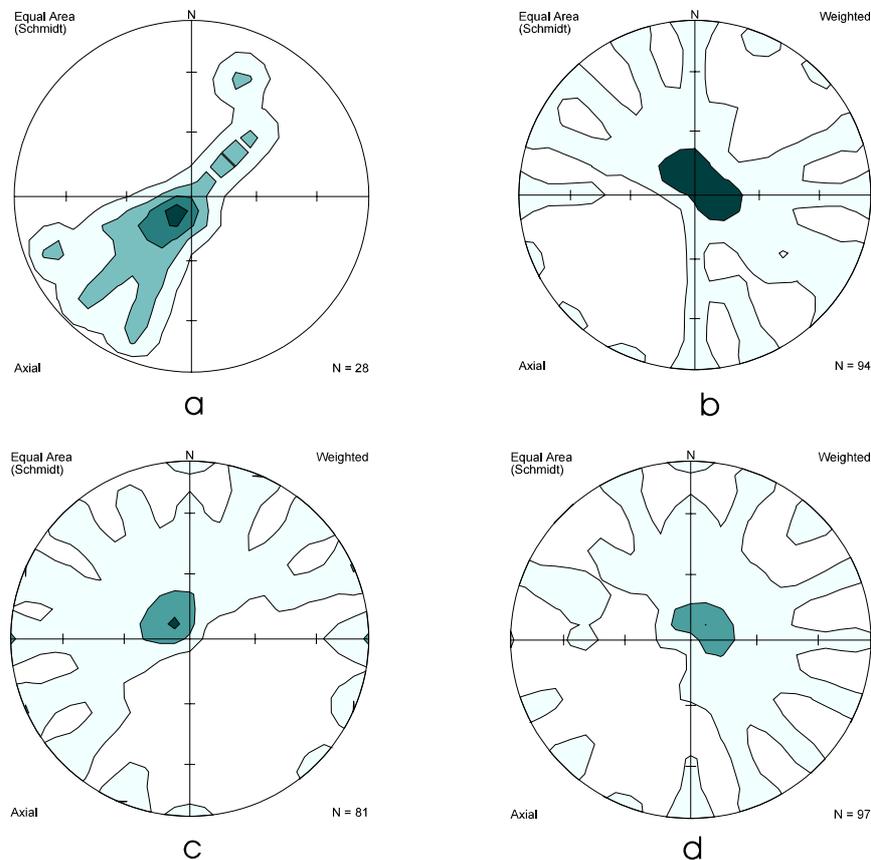


Abb. 25: Die Verteilung der US-Geschwindigkeiten vor und nach der Behandlung an Carrarakugel P8.

25a: Maxima der US-Geschwindigkeiten. Kontourlinien: 4,5; 4,6; 4,7; 4,8 km/s

25b: Minima der US-Geschwindigkeiten. Kontourlinien: 4,3; 4,2 km/s

25c: Minima der US-Geschwindigkeiten nach der thermischen Belastung (2 Stunden 500°C).
Kontourlinien: 0,9; 0,8; 0,7 km/s

25d: Maxima der US-Geschwindigkeiten nach der Behandlung mit „Bologna Coctail“.
Kontourlinien: 1,7; 1,8; 1,9 km/s

Die starke Verringerung der US-Geschwindigkeiten durch thermisch-induzierte Risse (siehe Abschn. 3.1.3) beschwert die Differenzpolfigur der Geschwindigkeitsverteilungen (Abb. 25c und 26c), da die Geschwindigkeitsverteilung eine geringe Anisotropie zeigt. Die Polpunktmaxima der Verteilung der maximalen und minimalen p-Wellen-geschwindigkeiten beträgt nach der Behandlung: v_{\max} : $45^{\circ}/80,4^{\circ}$ im Fall zu P8 und v_{\max} : $270^{\circ}/0^{\circ}$ und v_{\min} : $180^{\circ}/0^{\circ}$ im Fall zu P9 (Abb. 25d und 26d+e).

Die Werte der Verteilungs-Konturliniendiagramme im Schmidt'schen Netz der minimalen und maximalen US-Geschwindigkeiten lassen erkennen, daß die Einregelung der Calcitkristalle bei den Würfeln stärker als bei den Kugeln ausgeprägt ist. Diese für Calcit nachweisbare Gefügeregelung läßt sich in Beziehung bringen zu der in Abschn. 3.1.1 nachgewiesene Geschwindigkeitsanisotropie. Während die Marmorwürfel P1-P6 deutlich anisotrop sind, sind die Carrara- und Laaserkugel gering anisotrop.

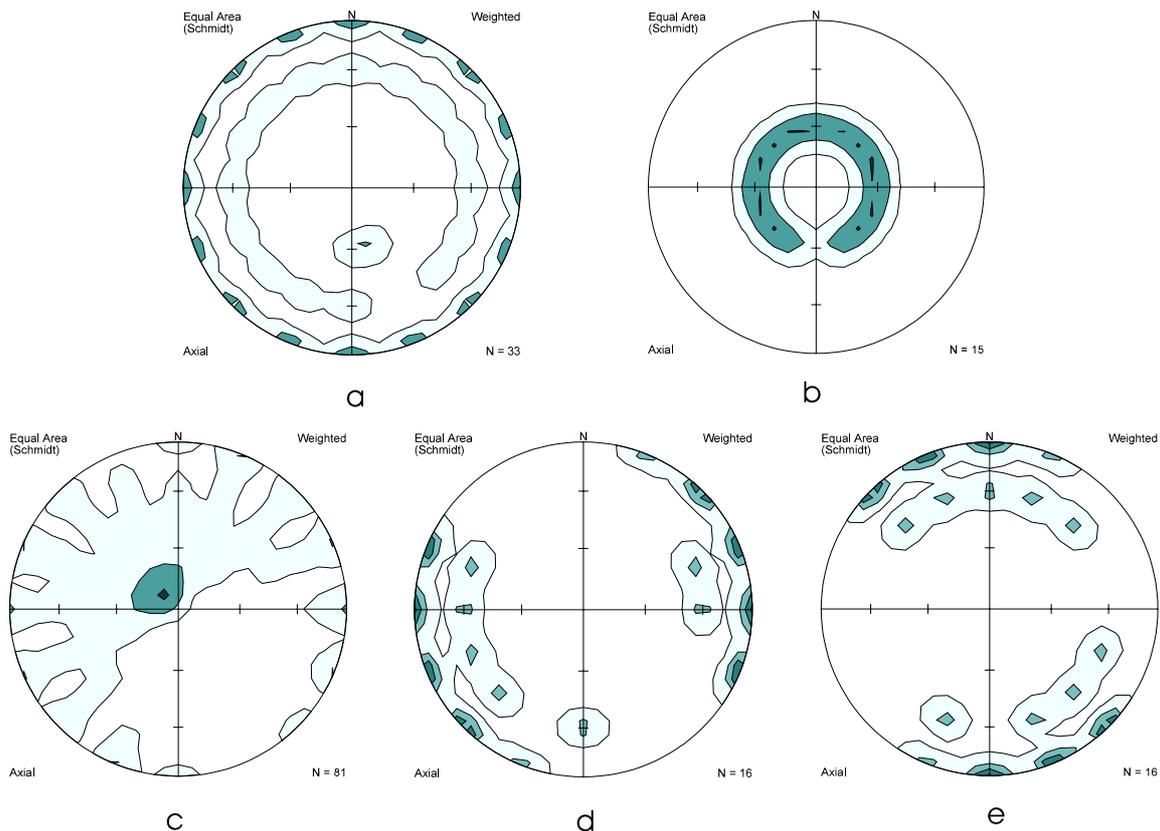


Abb. 26: Die Verteilung der Geschwindigkeiten vor und nach der Behandlung an der Laaserkugel P9.

26a: Maxima der US-Geschwindigkeiten. Konturlinien: 4,2; 4,3 km/s

26b: Minima der US-Geschwindigkeiten. Konturlinien: 3,3; 3,2; 3,1 km/s

26c: Maxima der US-Geschwindigkeiten nach der thermischen Belastung (2 Stunden 500 °C).
Konturlinien: 1,0; 1,1; 1,2 km/s

26d: Maxima der US-Geschwindigkeiten nach der Behandlung mit PKSE.
Konturlinien: 1,4; 1,5; 1,6 km/s

26e: Minima der US-Geschwindigkeiten nach der Behandlung mit PKSE.
Konturlinien: 1,6; 1,5; 1,4 km/s

3.1.3. Bestimmung der Geschwindigkeitsanisotropie

In der Ebene parallel zur kristallographischen Orientierung von Calcitkristallen sind die US-Geschwindigkeiten richtungsabhängig, d.h. es läßt sich eine signifikante Geschwindigkeitsanisotropie nachweisen. Der experimentelle Schritt ist in Abb. 11 erläutert. Die Richtungen minimaler und maximaler US-Geschwindigkeiten sind um genau 90° von einander verschieden und fallen im Rahmen der Meßgenauigkeit mit der Streich- und Einfallrichtung zusammen. Legt man die Z-Achse in die Richtung von $v_{l,max}$ und die Y-Achse in die Richtung $v_{l,min}$, ist das Koordinatensystem eindeutig als Bezugssystem der elastischen Anisotropie festgelegt. Die Abb. 27 zeigt die Ergebnisse der gemessenen US-Geschwindigkeiten in den Ebenen parallel zu Orientierung von Calcitkristallen im Bohrkern (Abb. 27a). Bei den Messungen in der Ebene parallel zur den XZ-Achsen, die nicht parallel zur Orientierung von Calcitkristallen ist, kann für die US-Geschwindigkeiten keine signifikante Abhängigkeit von der Durchschallungsrichtung im Bohrkern nachgewiesen werden (Abb. 27b).

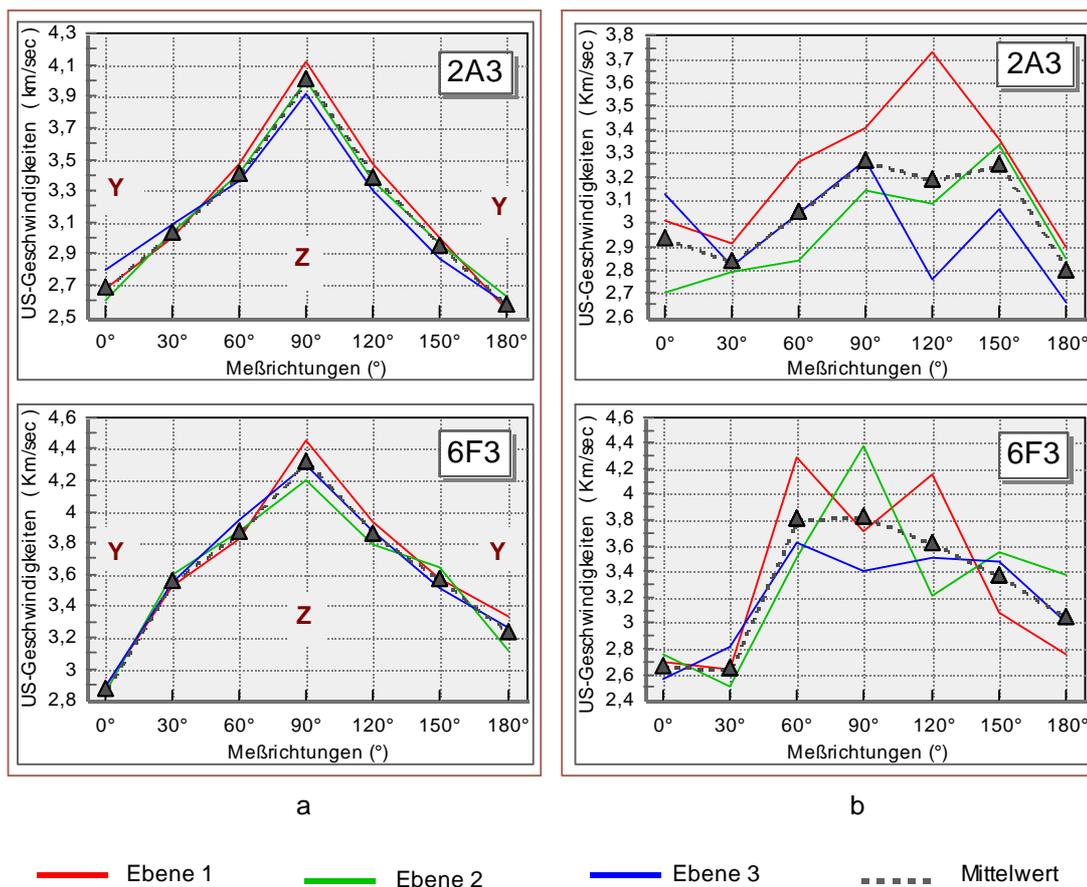


Abb. 27: Die Verteilung der Ultraschallgeschwindigkeiten in den gezogenen Bohrkernen aus den Marmorwürfeln P2 (2A3) und P6 (6F3)

27a: Die Ultraschallmeßrichtungen in orientiertem Bohrkern parallel zu Orientierungsebenen (Ebene 1, Ebene 2 und Ebene 3 siehe Abb. 11)

27b: Die Ultraschallmeßrichtungen in unorientiertem Bohrkern parallel zu XZ-Achsen

In den Abbildungen 28, 29, 30, und 31 sind Veränderungen der US-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von Gefügeanisotropie parallel zur Orientierung von Calcitkristallen orientierter Bohrkern aus den Würfeln P1, P2 und P6 dargestellt. Anhand von Durchschallungen kann resultiert werden, daß die Calcitkristalle in allen drei Würfeln gut orientiert sind (Sheremeti-Kabashi et al. 2000). Die Anisotropieeffekte, d.h. die Richtungen maximaler und minimaler US-Geschwindigkeiten korrelieren sowohl nach thermischer Belastung als auch nach Behandlung sehr gut miteinander. Die US-Geschwindigkeiten sind stark richtungsabhängig. Die Differenzen zwischen minimaler und maximaler US-Geschwindigkeit betragen über 1 Km/s. Zunächst erscheint es verwunderlich, daß die nach der thermischen Belastung erhaltenen US-Meßwerte in die Richtung von $v_{1,max} = 0,5-1\text{Km/s}$ (10-20%) mehr als in die Richtung $v_{1,min}$ abgenommen hatten. Werden aber die thermischen Anisotropieeffekte bedacht, so läßt sich diese Diskrepanz gut interpretieren. Calcit als hauptgesteinsbildendes Mineral von Marmor ist thermisch extrem anisotrop: der Wärmeausdehnungskoeffizient parallel (\parallel) bzw. normal (\perp) zur kristallographischen c-Achse beträgt $\alpha_{\parallel} = 26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bzw. $\alpha_{\perp} = -6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (Kleber 1959). Bei einer Temperaturzunahme von etwa 650°C zeigt Calcit eine lineare thermische Expansion parallel zur c-Achse von 2% und kontrahiert 0,5% normal zur c-Achse (Bilbija 1984). Wie Widhalm et al. (1996) nachweisen konnte, ist die maximale richtungsabhängige thermische Ausdehnung von Marmor etwas mehr als doppelt so groß wie die minimale. Da die untersuchten Marmorproben einen hohen Regelungsgrad der Calcitkristalle aufweisen, wären konkret thermisch-induzierte Risse senkrecht zur Orientierung der c-Achsen zu erwarten (Sigesmund et al. 1997).

Auch nach der Behandlung ist ein Unterschied im Verlauf der US-Geschwindigkeiten senkrecht und parallel zu Orientierung der c-Achsen zu beobachten. Die Unterschiede zwischen der Wirksamkeit der Festigungsmittel sind tendenziell gering. Die Aufnahme von Acrylharz ist mit ca. 0,03% gering, von „Bologna Coctail“ ca. 0,08% und von Polykieselsäurester scheint sie höher zu sein, ca. 0,27%. Die Konservierung ergibt in allen Bohrkernen eine deutliche, aber nicht ausreichende US-Geschwindigkeitszunahme, trotzdem kann sie damit als wirksam eingestuft werden. Die Wirkung der „Bologna Coctail“-Behandlungen ist in diesem Fall für die Konservierung das günstigste Ergebnis. Sie führte zu einer Zunahme der US-Geschwindigkeiten in die Richtung von $v_{1,max} = 37,3\%$ (ca. 12% mehr als in die Richtung $v_{1,min}$).

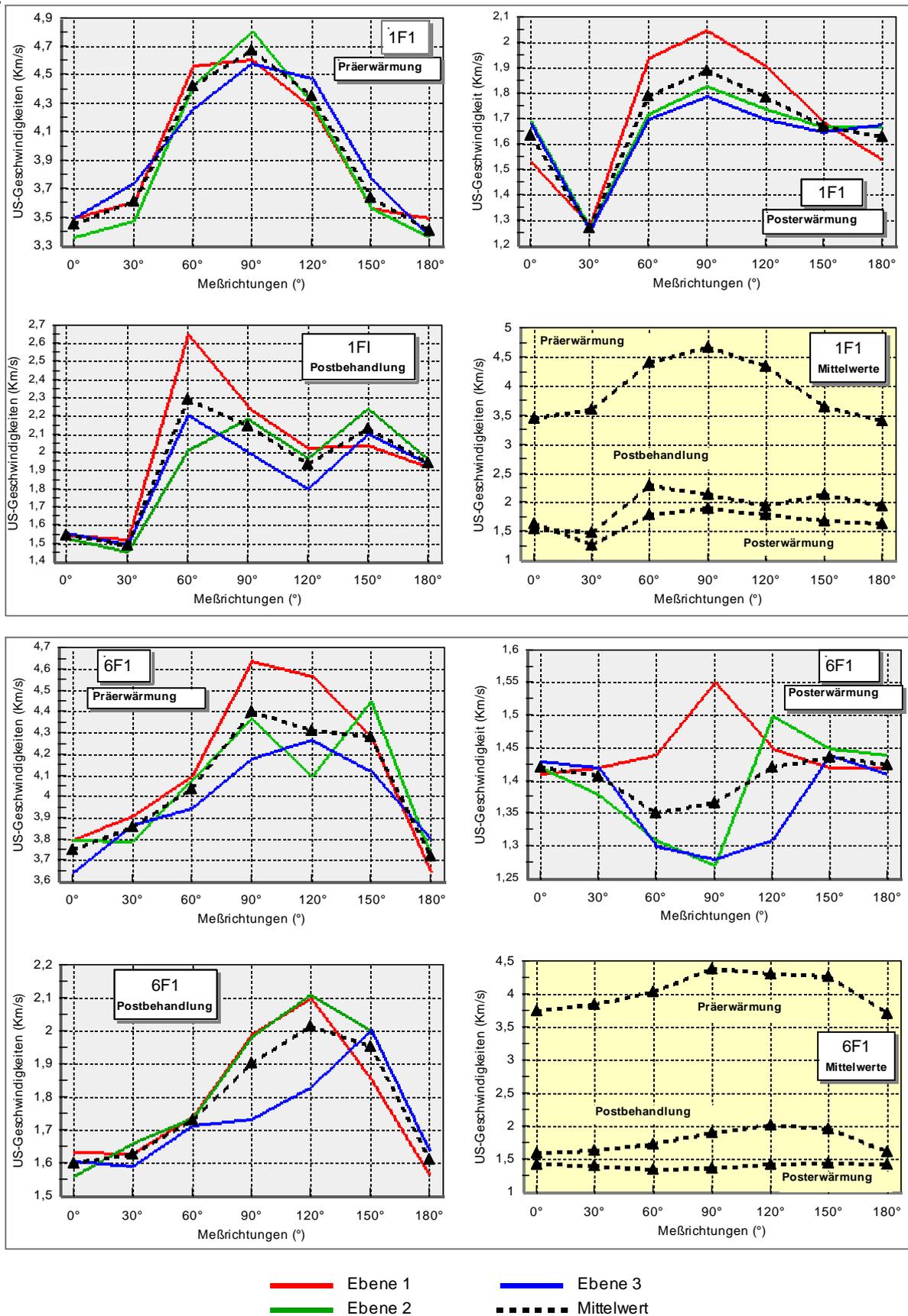
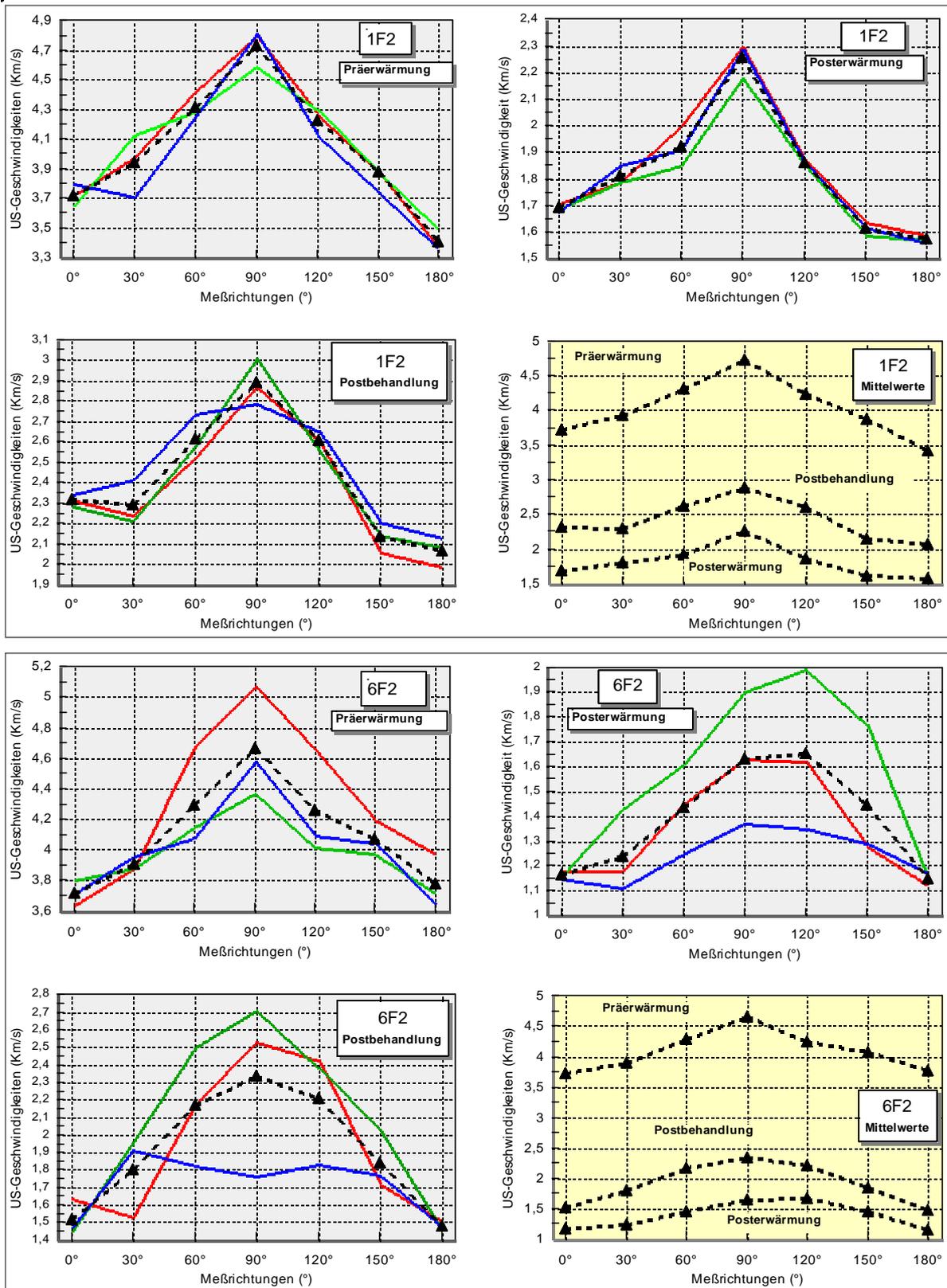


Abb. 28: Darstellung von US-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von Gefügesanisotropie in den Borkernen 1F1 (P1) und 6F1 (P6) vor und nach der Erwärmung (2 Stunden auf 500°C) und Behandlung mit Acrylharz



— Ebene 1 — Ebene 3
— Ebene 2 - - - - Mittelwert

Abb. 29: Darstellung von US-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von Gefügesanisotropie in den Borkernen 1F2 (P1) und 6F2 (P6) vor und nach der Erwärmung (2 Stunden auf 500°C) und Behandlung mit "Bologna Coctail"

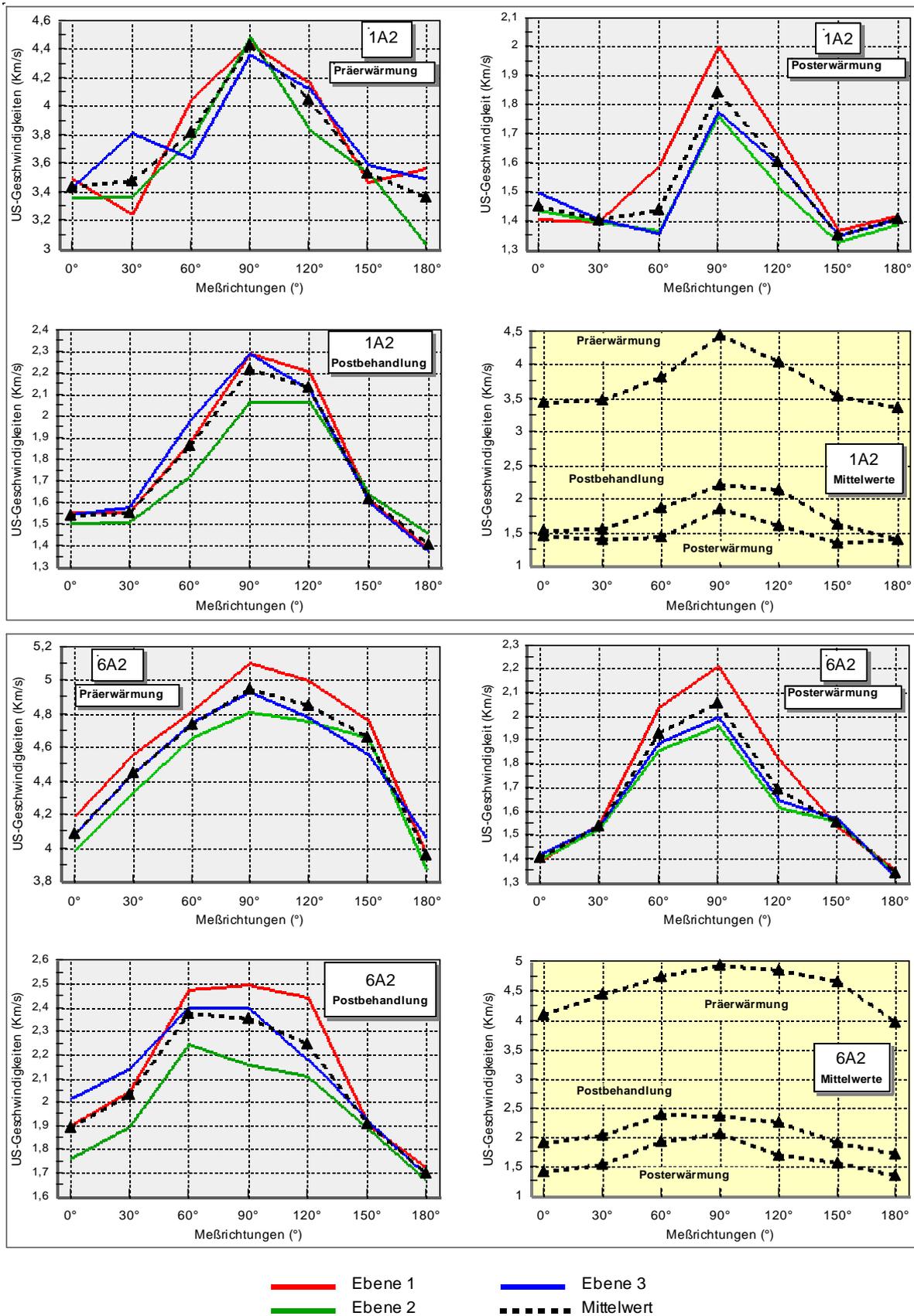


Abb. 30: Darstellung von US-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von Gefügesanisotropie in den Borkernen 1A2 (P1) und 6A2 (P6) vor und nach der Erwärmung (2 Stunden auf 500°C) und Behandlung mit PKSE

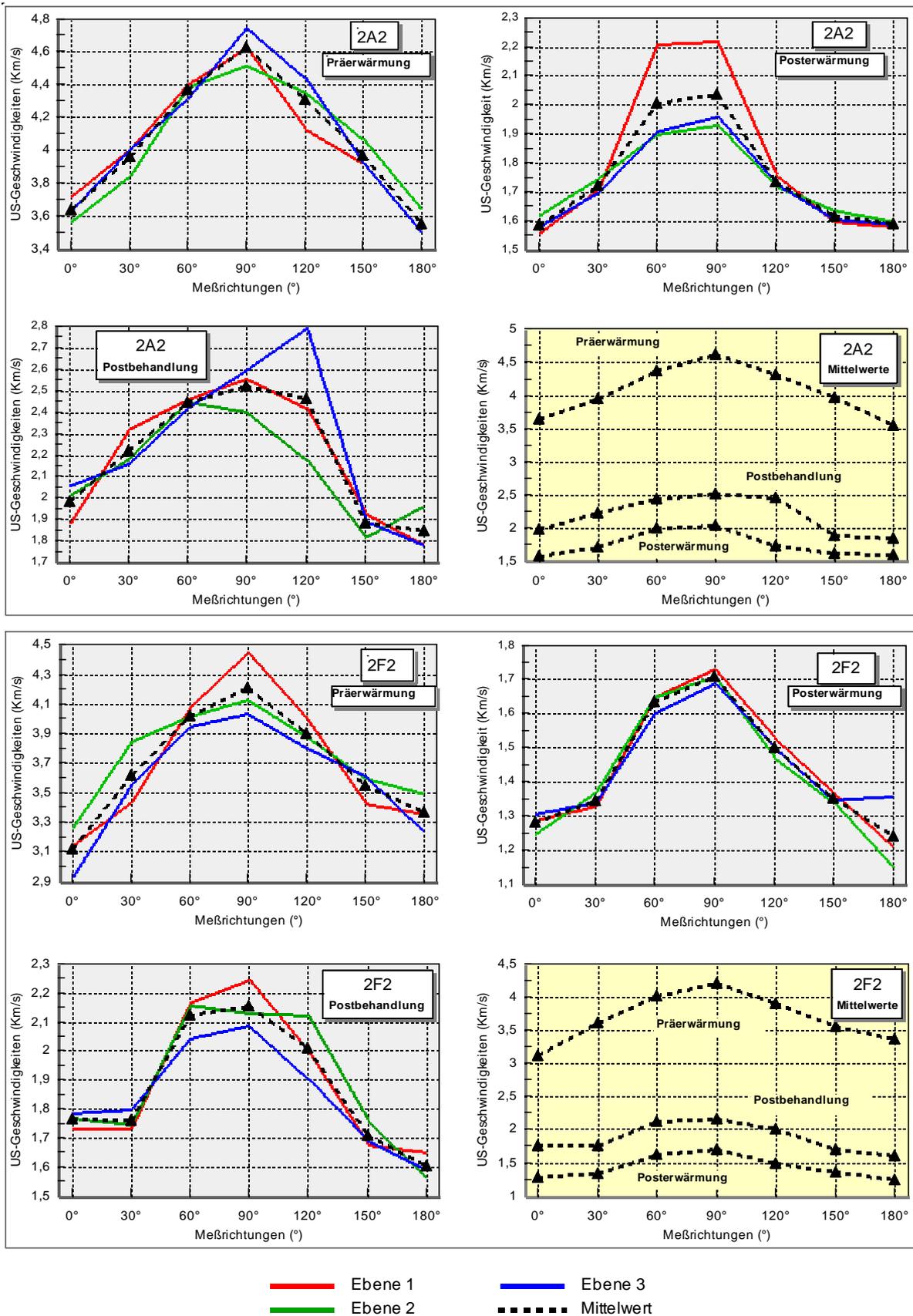


Abb. 31: Darstellung von US-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von Gefügesanisotropie in den Borkernen 2A2 (P2) und 2F2 (P6) vor und nach der Erwärmung (2 Stunden auf 500°C) und Behandlung mit PKSE (2A2) und "Bologna Coctail" (2F2)

3.2. Porenraumbezogene Meßwerte

3.2.1. Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Die Wasseraufnahmemessungen ergaben Unterschiede in der Saugfähigkeit zwischen Proben gleichen Gesteinstyps (Tab. 5).

Tab. 4: Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und Sättigungswert

Probe	Wasseraufnahme Gew. %	S-Wert (..)
P1	0,26	0,85
P2	0,30	0,84
P6	0,23	0,79
P7	0,52	0,88

Am meisten Wasser nahmen erwartungsgemäß Bohrkerne aus abgefallenen Grabkreuzen (P7), über 100 Jahre exponiert im alten Südfriedhof in München, am wenigsten die aus frischem Marmorwürfel (P6) auf. Nach Hg- Porosimetrieuntersuchungen treten also hier Unterschiede in der Porengröße und Porenradienverteilung auf, die sicherlich verwitterungsbedingt sind. In der grafischen Darstellung (Abb. 32) der aufgesaugten Wassermenge in Abhängigkeit von der Zeit sind bei Marmorproben zwei Bereiche zu unterscheiden: Ein erster Bereich, welcher die hohe Wasseraufnahme nach einem Tag repräsentiert, sowie ein zweiter, welcher auch, in weit geringerem Maße als vorher, weiterhin Wasseraufnahme messen läßt. Daraus ist zu schließen, daß im Laufe des Saugvorganges nicht eine absolute Sättigung des untersuchten Materials zu erwarten ist. Eine Wassersättigung der Materialprobe unter Vakuum - Einwirkung bestätigt dies.

Neben der hohen anfänglichen Wasseraufnahme in allen Diagrammen in Abb. 32 zeigen die Kurven der Proben P1, P2 und P7 im Vergleich zu P6 zwischen 5 - 10 Tagen abermals Sprünge und werden erst dann konstant. Ungewöhnlich bei den Proben ist außerdem, daß sie sehr lange brauchen, bis sie konstant werden. Die Gründe hierfür sind nicht einfach zu finden. Die Wasseraufnahmefähigkeit eines Gesteins hängt in erster Linie von dessen Porenradienverteilung ab und erst in zweiter Linie von dessen Feuchtetransport im Gestein. Da der unverwitterte Carrara- Marmor mehr Poren im Bereich zwischen 0,08 – 0,12 µm besitzt (siehe Abb. 34), kann Wasser wegen seiner hohen Saugfähigkeit tief in den Porenraum eindringen.

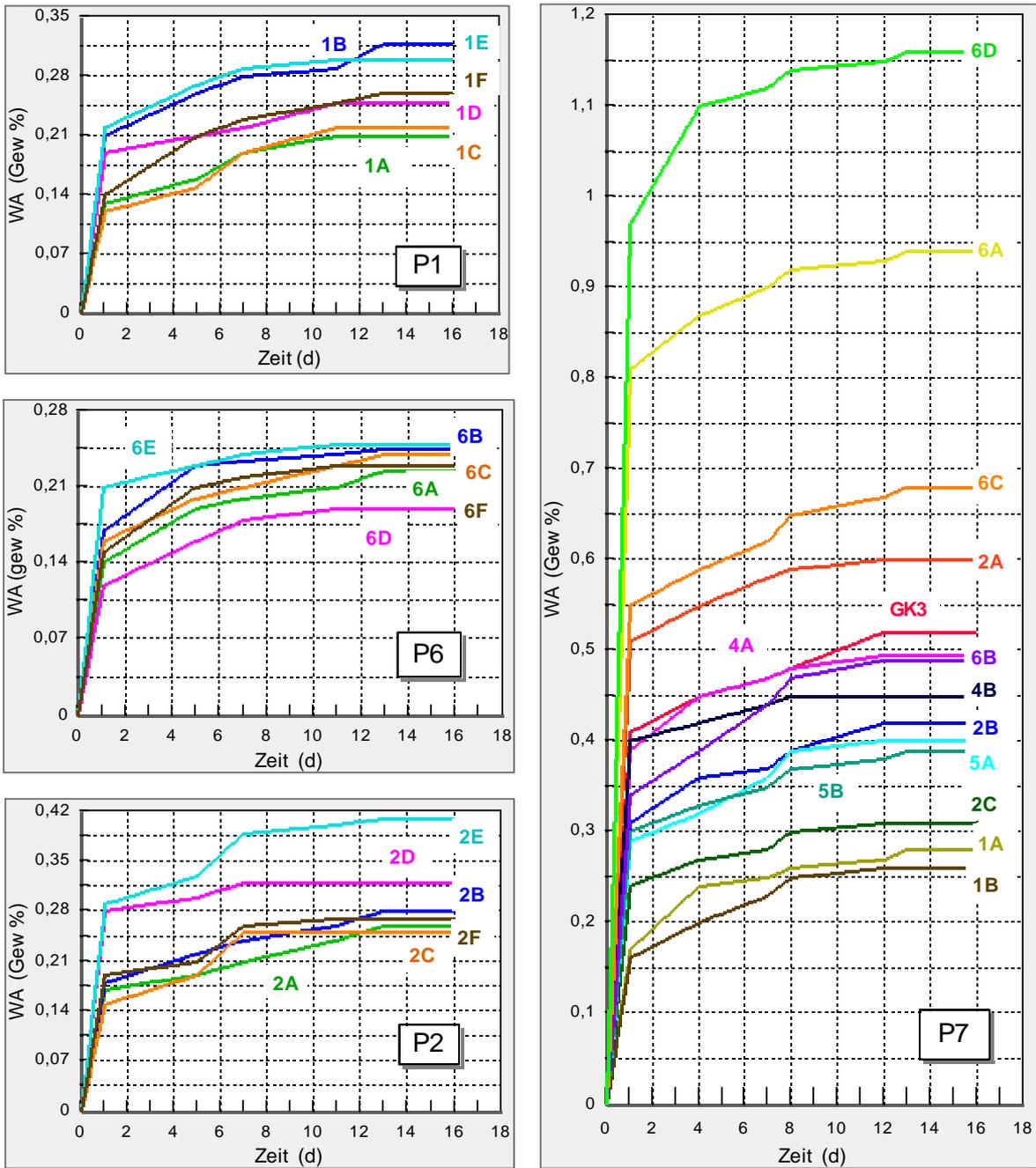


Abb. 32: Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck in den Proben P1, P2, P6 und P7

Eine andere Ursache kann sein, daß die Kommunikation im Porensystem in den Proben P7, (über 100 Jahre exponiert im alten Südfriedhof in München), P1 und P2 (seit 1991 exponiert am Institut für Geologie in München) im Vergleich zur frischen Probe P6 höher ist. Die Rasterelektronenmikroskopische Beobachtungen zeigen innerhalb der Probe P7 Anhäufungen kleiner Hohlräume, die durch Fließkanäle miteinander verbunden sind (siehe Tafel 2 und 3).

Der von Hirschwald (1908, siehe in Schuh 1987) als Entscheidungskriterium über die Frostbeständigkeit herangezogene S-Wert von 0,9 wird von keiner Probe erreicht. Die Meßwerte liegen zwar alle darunter, unter ungünstigen Umständen (sehr starker Frost in kurzer Zeit) könnte der Carrara-Marmor aber Schäden davontragen (Poschlod 1990).

3.2.2. Wasseraufnahme unter Vakuum und Porosität

Auch bei der Wasseraufnahme unter Vakuum treten deutliche Unterschiede in der Saugfähigkeit auf. Je stärker verwittert ein Marmor ist, desto höher ist sein Wasseraufnahmevermögen. Ergebnisse der Messungen sind in Tab. 5 zusammengestellt.

Tab. 6: Zusammenstellung der porenraumbezogenen Meßwerte der untersuchten Marmorproben vor und nach der Behandlung.

Probe	Präerwärmung				Posterwärmung (2 Stunden auf 500 °C)				Postbehandlung							
	WA Gew. %	Roh- dichte g/cm ³	Rein- Dichte g/cm ³	Poros. Vol.%	WA Gew. %	Roh- Dichte g/cm ³	Rein- dichte g/cm ³	Poros. Vol.%	Roh- dichte g/cm ³	Rein- dichte g/cm ³	Acrylharz		Polykiesel- säureester		„Bologna Coctail“	
											WA Gew. %	Poros. Vol.%	WA Gew. %	Poros. Vol.%	WA Gew. %	Poros. Vol.%
P1	0,29	2,69	2,70	0,78	0,97	2,64	2,71	2,59	2,65	2,71	0,9	2,38	0,68	1,81	0,56	1,51
P2	0,32	2,69	2,71	0,87	1,02	2,64	2,70	2,37	2,63	2,68	0,7	1,87	0,65	1,70	0,80	2,08
P6	0,27	2,69	2,72	0,73	0,85	2,65	2,71	2,26	2,65	2,71	0,76	2,02	0,60	1,60	0,84	2,16
P7	0,45	2,67	2,71	1,31	0,88	2,64	2,71	2,34	2,66	2,71	-	-	0,75	1,99	0,64	1,85
P8	0,15	2,70	2,70	0,39	1,11	2,64	2,72	2,92	2,65	2,70	-	-	-	-	0,72	1,92
P9	0,24	2,67	2,67	0,64	1,13	2,60	2,68	2,94	2,64	2,69	-	-	0,67	1,78	-	-

In den Proben P1, P2, P6 und P7 wurden, basierend auf den Meßwerten von Bohrkernen Mittelwerte berechnet. Carrarakugel P8 hat die niedrigste Porosität. Verglichen mit dem Referenzwürfel P6 zeigten die Würfeln P1 und P2 nach 7 Jahren Auslagerungszeit ca. 19% bzw. 7% höhere Porosität. Bei den über 100 Jahre im alten Südfriedhof in München exponierten Proben P7 wurde die Porosität durch die Verwitterung verändert. Sie steigt bis auf 3,29 Vol% in der Probe GK6d (siehe Anhang 16). Die Proben Gk6a, GK6b, GK6c und

GK6d (P7) besitzen eine höhere Porosität an der Oberfläche als im Kern. Nach der Zunahme der Porosität ist es möglich, daß das Gefüge progressiv von außen nach innen auflockert (Köhler 1991).

Durch die thermische Belastung wurde die stärkste Erhöhung der Wasseraufnahme unter Vakuum erreicht. Eine extreme Wasseraufnahmefähigkeit konnte bei der Carrarakugel und der Laaserkugel festgestellt werden. Die Erwärmung führte zu einer Zunahme der Wasseraufnahme bis 640% (von 0,15 auf 1,11 Gew.%) in der Carrarakugel und ca. 370% in der Laaserkugel (von 0,24 auf 1,13 Gew.%). In der Probe P6 war die Wasseraufnahme um 214% auf 0,85 Gew.% höher. In der P2 und P1 um 219 bzw. 234% auf 1,02 bzw. 0,97 Gew.%. In der Probe P7 steigt die Wasseraufnahme um 79% auf 1,31 Gew.%. Die Werte für die Porosität steigen nach der Erwärmung je nach Verwitterungsgrad um 79% auf 2,34 Vol.% in der P7 und 649% auf 2,92 Vol% in der P8. Es mußte vor allem bei der Erwärmung eine Gefügeauflockerung bei Marmor durch das thermisch anisotrope Verhalten der Calcitkristalle in Kombination mit der entstehungsbedingten Vorzugorientierung erfolgt sein. Da das Wasseraufnahmevermögen eines Gesteins mit seinem Hohlraumgehalt zunimmt, deuten auch diese Meßergebnisse der Wasseraufnahme auf eine Gefügeauflockerung hin. Im Vergleich zu den anderen Proben zeigen die Proben aus dem alten Südfriedhof vor und nach der thermischen Belastung geringe Unterschiede in der Wasseraufnahme. Es ist mit großer Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß bei anisotrop-thermischen Expansion-Kontraktion-Zyklen während der Freibewitterung fast alle resultierenden Spannungen an den Korngrenzen abgebaut wurden, so daß bei der neuen thermischen Belastung geringe weitere Korngrenzerisse aufzutreten sind (vgl.: Abschn. 3.5).

Die Tab. 6 zeigt, daß die Konservierung zu einer Reduktion des Wasserzutritts führte. Eine Weniger stark ausgeprägte Senkung der Wasseraufnahme bzw. Porosität zeigte sich bei dem Acrylharz. Diese Behandlung hat fast keine spürbare Auswirkung auf die Wasseraufnahme in der Probe P1. In der Probe P6 sinkt der Wert um 11% auf 0,76 Gew.%. in der P2 um 31% auf 0,70 Gew.%. Die Polykieselsäureesterbehandlung hat stärkeren Einfluß auf den Porenraum. Die größte Reduktion der Saugfähigkeit ist in der Laaserkugel P9 zu beobachten. Der Wert der Wasseraufnahme unter Vakuum sinkt um ca. 41% auf 0,67 Gew.%. Zwischen den Proben P1, P2 und P6 liegen geringe Unterschiede. In der Probe P7 sinkt der Wert um 15% auf 0,75 Gew.%. Im Falle der Behandlung mit „Bologna Coctail“ ist das Wasseraufnahmevermögen in Carrarakugel P8 um 35% und in der Probe P1 30% niedriger

mit den Werten 0,72 bzw. 0.56 Gew.%, bezogen auf die unbehandelten Kugelproben, was mit den Ergebnissen der US-Geschwindigkeiten übereinstimmt (vgl. Abschn. 3.1.3).

Generell lassen sich keine große Unterschiede zwischen der Wirksamkeit der Festigungsmittel feststellen. Die Konservierung führte zu einer Verbesserung der US-Geschwindigkeiten des Materials, aber die Porosität liegt im Betrag immer noch in der Region eines aufgelockerten Marmorgefüges (1,51-2,16 Vol.%).

Tab. 7: Gegenüberstellung der Hg-Porosimetrie und der Auftriebsverfahren.

Probe		Hg-Porosimetrie			Auftriebsverfahren		
		Porosität Vol %	Rohdichte g/cm ³	Reindichte g/cm ³	Porosität Vol %	Rohdichte g/cm ³	Reindichte g/cm ³
P1	1A	1,15	2,68	2,71	0,70	2,70	2,72
	1E	0,73	2,67	2,69	0,94	2,69	2,71
P2	2A	1,88	2,65	2,70	0,83	2,70	2,72
	2E	1,72	2,66	2,71	1,29	2,69	2,72
P6	6A	1,27	2,68	2,71	0,76	2,72	2,72
	6E	0,97	2,68	2,71	0,86	2,69	2,72
P7	GK1a	1,45	2,68	2,72	0,91	2,69	2,72
	GK1b	1,09	2,67	2,70	0,83	2,69	2,72
	GK2b	0,77	2,66	2,70	0,95	2,69	2,71
	GK2c	0,81	2,68	2,70	1,18	2,68	2,71
	GK4b	1,46	2,66	2,70	1,48	2,67	2,71
	GK5	1,56	2,67	2,71	1,22	2,68	2,71
	GK6a	1,22	2,67	2,71	2,93	2,62	2,7
	GK6d	1,90	2,66	2,71	3,29	2,62	2,71

Ein Vergleich zwischen den vom Auftriebsverfahren und Hg-Porosimetrie gelieferten Daten für die Roh-, Reindichte und Porosität ist in Tab. 7 aufgeführt. Der Tabelle kann man entnehmen, daß bei den Roh- und Reindichtemessungen mittels zweier Meßmethoden geringe Unterschiede auftreten. Die Gesamtporosität enthält Fehler, da sie nicht aus dem spezifischen Intrusionvolumen direkt berechnet wird, sondern sich aus den Dichtewerte ableitet. Dabei betragen Schwankungen 11-140%. Die beiden Methoden benötigen unterschiedliche Probengrößen. Eine Gesteinsprobe für die Hg-Porosimetrie beträgt etwas mehr als 2cm³, was bei Marmor, bezüglich seiner lokalen Inhomogenitäten nicht repräsentativ genug ist.

Eine Korrelation von US-Geschwindigkeiten und Porosität zeigt, daß die US-Geschwindigkeit zur Bestimmung der Porosität nicht geeignet ist (Abb. 34).

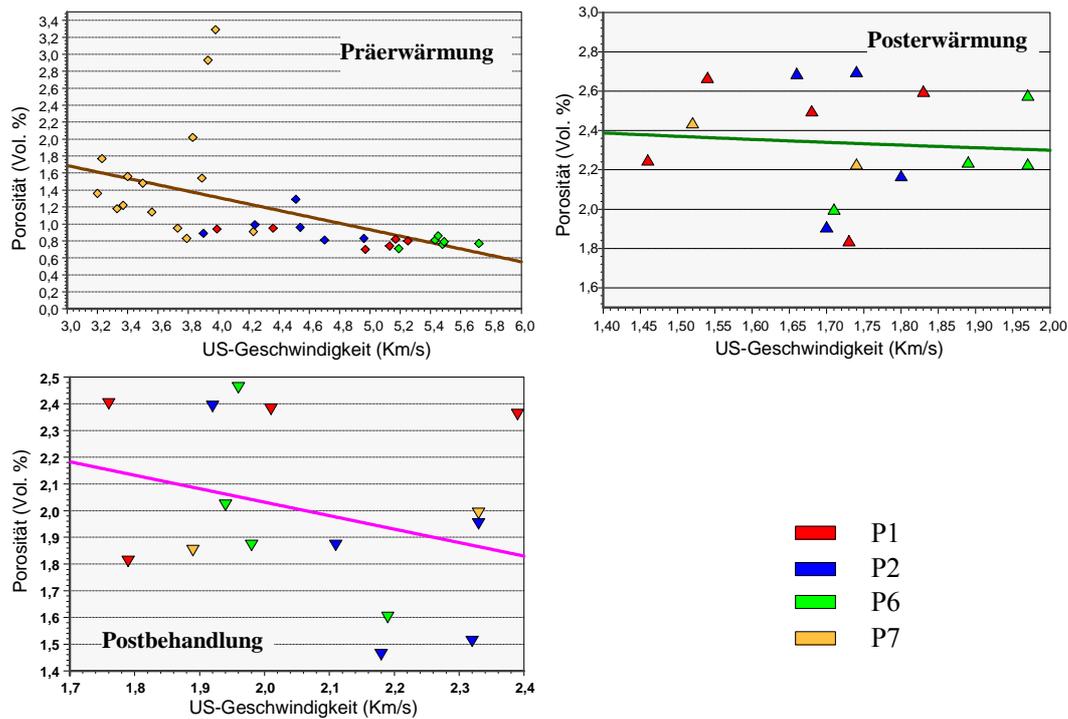


Abb. 33: Korrelation von Porosität mit US-geschwindigkeit

3.2.3. Porenradienverteilung

Die Meßergebnisse der Proben sind in Porenradienverteilungs- Histogrammen dargestellt (Abb. 34, 35, und 36). Die Porenradienbereiche liegen zwischen 0,03-200 μm . Die Verteilung der Proben P1 und P2 je Porenradienklasse zeigt in der Porenradienklasse 0,20-0,31 μm ein Maximum. Die frische Probe P6 weist geringere Porenanteile in der Porenradienklasse 0,20-0,31 μm auf und hat ein Maximum bei der Porenradienklasse 0,08-0,12 μm . Es gibt deutliche Unterschiede zwischen den Messungen an der Oberfläche und im Kern. An der Oberfläche ist der Anteil der Poren größer als im Kern (Abb. 34). Besonders die poröseren Proben P7 weisen ein starkes Maximum des Porenvolumens in den Porenradienklassen 0,05-0,12 μm (GP1 und GP2), 0,12-0,5 μm (GK6), 0,05-0,12 μm (GK1) und 0,12-0,31 μm (GK5 und GK4) auf. Die Probe D1 (P7), ein Beispiel der „Zuckerbildung“ des Marmor hat einen hohen Anteil an Kapillarporen. Das Maximum der Porengröße ist verglichen mit den anderen Proben deutlich erhöht. Es liegt in der Porenradienklasse 2-3,15 μm (Abb. 35).

Nach Poschlod (1990) haben die verschiedenen Marmore sehr ähnliche Porenradienverteilungen. Die aus Berechnungsverfahren gewonnenen Werte für Porenradien stimmen mit

den Ergebnissen von Poschlod befriedigend überein. Auf der einer Seite kann es sein, daß bei seinen Untersuchungen gerätebedingt die Poren mit einem Radius $>45\ \mu\text{m}$ und $<0,014\ \mu\text{m}$ nicht mehr erfaßt wurden. Auf der anderen Seite sind Poren mit Radius $45\ \mu\text{m}$ bei der Dünnschliffauswertung nicht sichtbar. Erst Poren mit einem Radius $>60\ \mu\text{m}$ werden im Mikroskop erfaßt (Mausfeld & Hoffmann, 1992), obwohl theoretisch eine maximale Mikroskopieauflösung bei $\pm 1\ \mu\text{m}$ liegt.

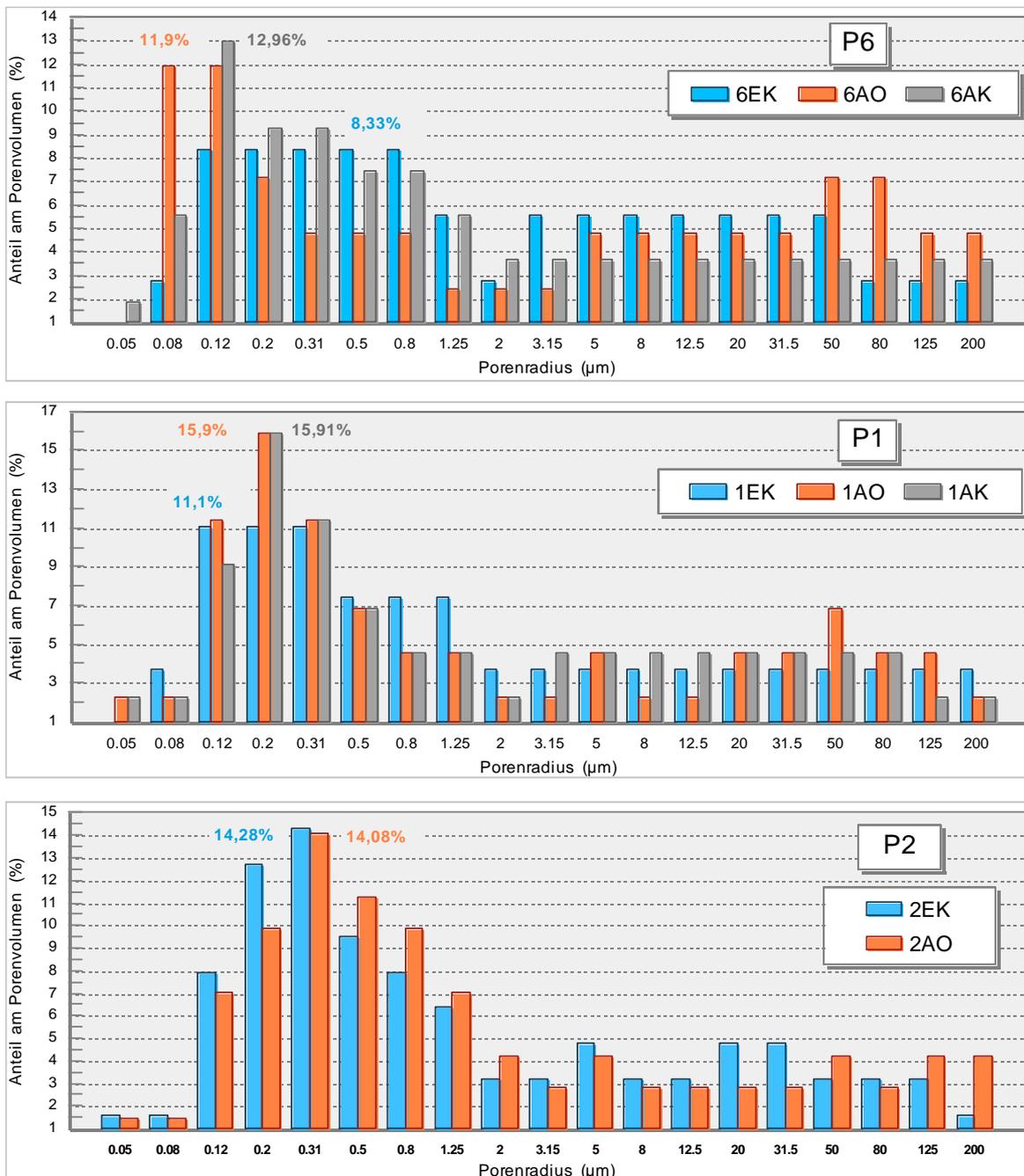


Abb. 35: Verteilungen der relativen Porenvolumina pro Porenradienklasse in den Proben P1, P2 und P6. 6EK, 6AK, 1EK, 1AK und 2EK – Messungen im Kern. 6AO, 1AO und 2AO – Messungen an der Oberfläche.

Die Histogramme (Abb. 35 und 36) zeigen, daß die thermische Belastung große Veränderungen in der Porenraumverteilung der Proben P1, P2 und P7 bewirkt hat. Sowohl bei der Probe 1A (P1), wie auch bei der Probe GK1 (P7) ist keine Häufigkeit der kleinen Porenradienklassen 0,03-1,25 μm zu beobachten. Die Probe 1A hat mit 5-6 μm den höchsten und häufigsten Porenradius mit einem deutlichen Anteil größerer Radien. Sie hat ein Maximum bei 5-6 μm , weist aber im Bereich zwischen 0,05-2,0 μm keinen Anteil auf. Probe P7 dagegen zeichnet sich durch ein steiles Maximum zwischen 2,0-3,15 μm aus. Der hohe Anteil an Kapillarporen läßt sich mit der Wasseraufnahme bzw. Porosität erklären (vgl. Abschn. 3.2.2).

Bei vergleichender Betrachtung der Porengrößenverteilung in Schnitten senkrecht und parallel zur Orientierung der c-Achsen treten bei den durchgeführten Untersuchungen in der Probe 2A (P2) klare Unterschiede auf. Die entsprechenden Porengrößenverteilungen sind in Abbildung 36 dargestellt. Die Probe zeigt bezüglich der gesamten Porengrößenverteilung für den Schnitt parallel zur Orientierung der c-Achsen deutlich höhere Porenradien als senkrecht zu c-Achsen.

Es konnte ein sehr guter Unterschied zwischen Porenradienverteilungen nach der Erwärmung und 100 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen, daß bei der Frost-Tau-Wechsel-Belastung parallel zu c-Achsen die Porenradienklassen im Bereich zwischen 5-200 μm überwiegend höher sind als bei der Belastung senkrecht zu c-Achsen (Abb. 37). Im Bereich zwischen 0,08-3,15 μm sind Porenradienklassen parallel zu c-Achsen wesentlich geringer als senkrecht zu c-Achsen. Die im 3.1.3 Kapitel beschriebenen thermischen Anisotropieeffekte wirken sich direkt auf die Porenradienverteilungen aus. Die Porenradien parallel zu c-Achsen sind nach der Erwärmung im Bereich zwischen 20-200 μm bis zu doppelt so groß wie senkrecht zu c-Achsen. Die Unterschiede zwischen den Porenradienverteilungen senkrecht und parallel zu c-Achsen dagegen sind in anderen Bereichen tendenziell geringer. Dies kann mit thermisch-induzierten Rissen senkrecht zur Orientierung der c-Achsen erklärt werden (vgl. Abschn. 3.1.3). Die Posterwärmungsporosität aus Quecksilberporosimeterdaten ist 6,66% parallel und 2,62% senkrecht zu c-Achsen.

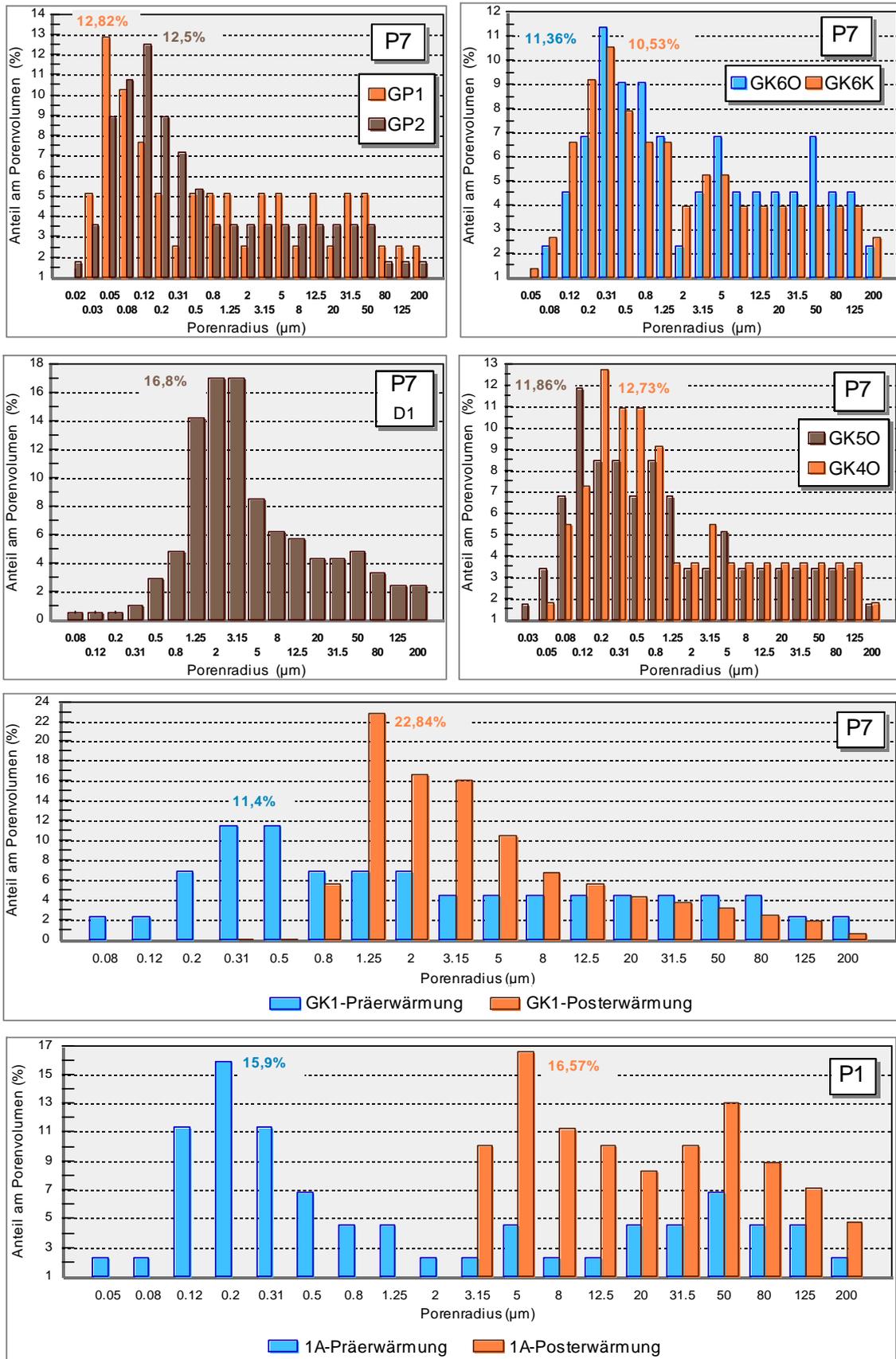
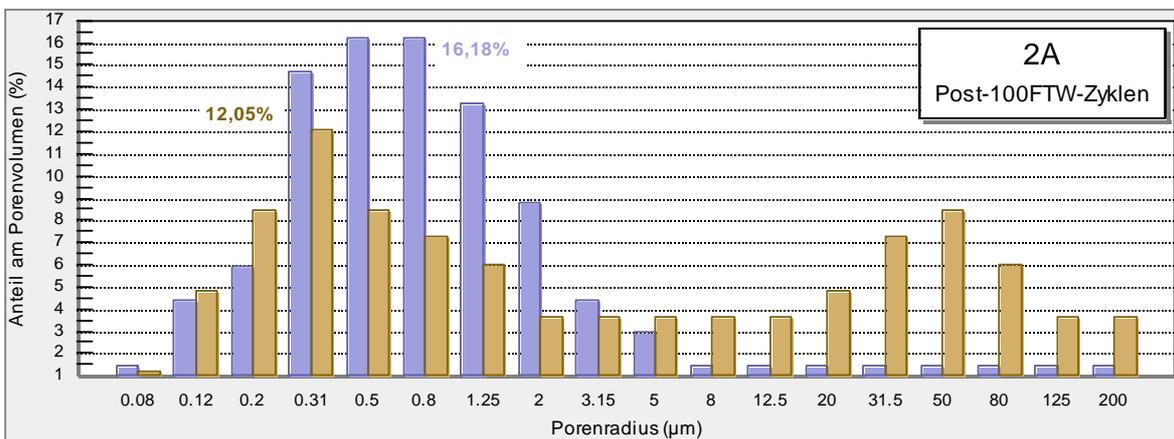
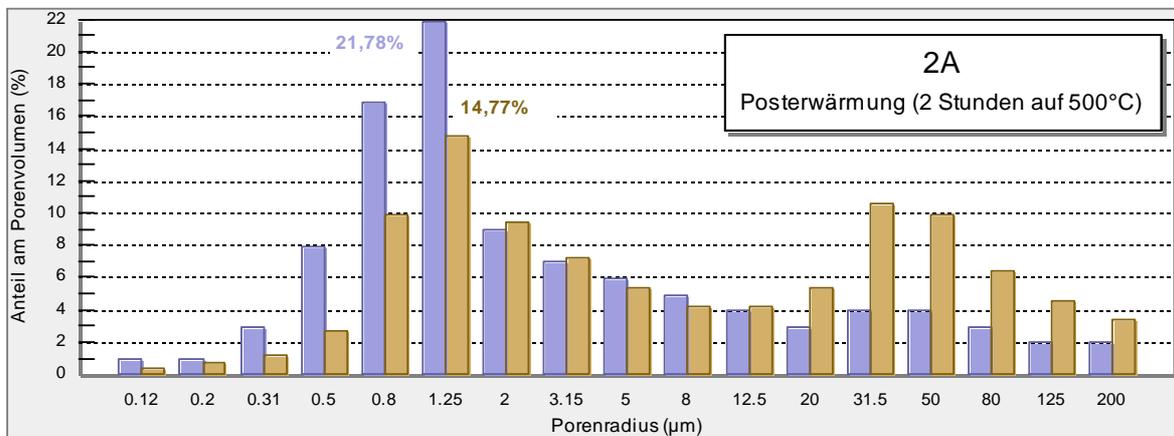
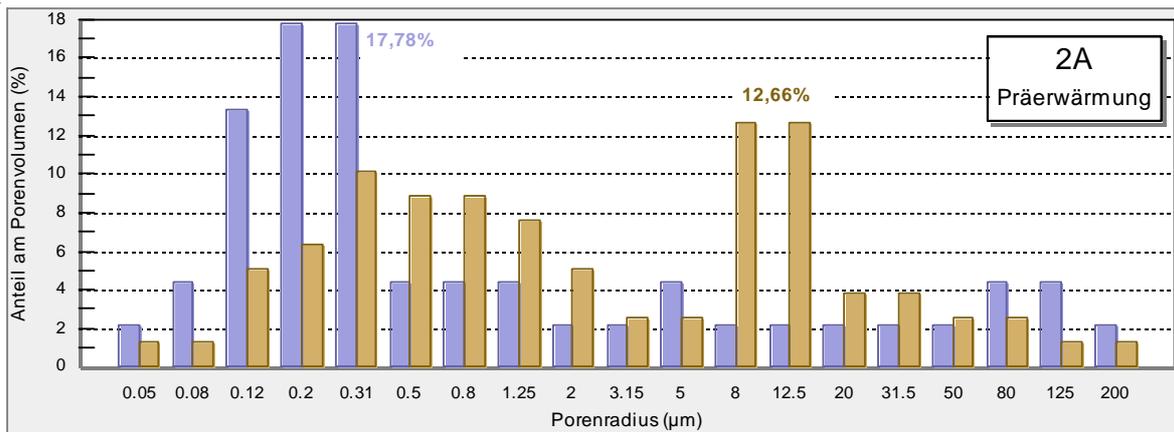


Abb. 35: Vergleich der Porenradienverteilungen der Marmorproben P7 und P1 vor und nach der thermischen Belastung (2 Stunden auf 500°C). GK6K-Messung im Kern; GK6O, GK50 und GK40 - Messungen an der Oberfläche



■ Senkrecht zu c - Achsen
 ■ Parallel zu c - Achsen

Abb. 36: Anisotropie der Porenradienverteilungen senkrecht und parallel zu c-Achsen in der Probe 2A (P2)

3.3. Biegezugfestigkeit

In Tab. 8 sind die Mittelwerte der Biegezugfestigkeit und des E-Moduls zusammengefasst.

Tab. 8: Biaxiale Biegezugfestigkeit

Probe	Biaxiale Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [KN/mm ²]
P1	5,91	9,33
P2	6,22	10,53
P6	8,26	14,27
P7	7,87	12,82

Die Referenzprobe P6 besitzt die höchsten Festigkeitswerte. Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten der abgefallenen Grabkreuze P7, mit einer 100jährigen Freibewitterung, unterscheiden sich nicht wesentlich von den Ergebnissen der Referenzprobe P6 und den 8jährigen Auslagerungsproben P1 und P2. Das E-Modul ist bereits durch die Freibewitterung kontinuierlich bis zur Probe P1 abgefallen.

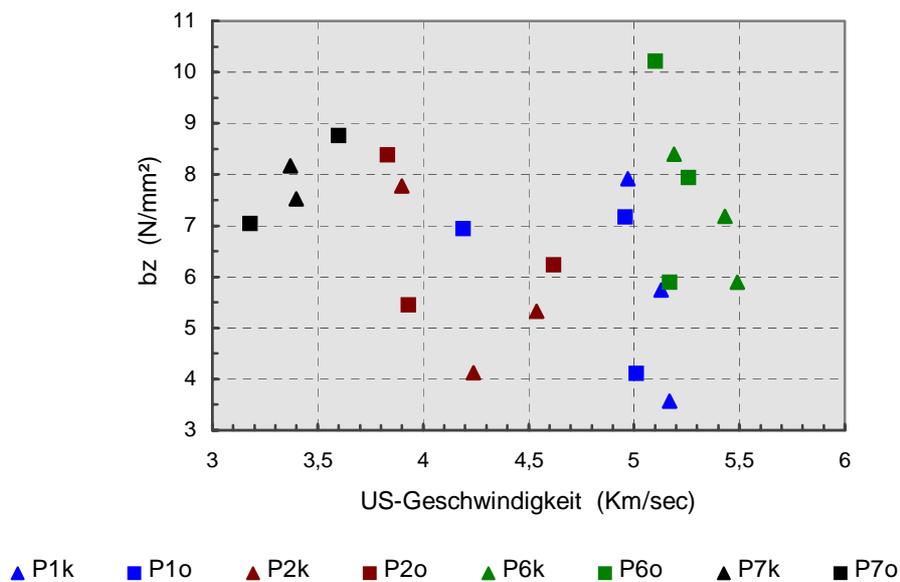


Abb. 37: Biegezugfestigkeit als Funktion der US-Geschwindigkeit für Marmor.

P1o, P2o, P6o, P7o - Messungen an der Oberfläche

P1k, P2k, P6k, P7k - Messungen im Kern

In der Abb. 37 sind an den entsprechenden Proben die Biegezugfestigkeiten als Funktion der US-Geschwindigkeit dargestellt. Eine Korrelation zwischen Biegezugfestigkeiten und US-Geschwindigkeit existiert nicht. In Abb. 38 ergeben sich für alle Marmorproben Zusammenhänge unabhängig davon, ob man die Korrelationsmöglichkeit mit der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck oder mit der Porosität heranzieht. Bei ersterer wird Kapillarporosität bewertet, während bei letzterer auch der Mikroporositätsanteil berücksichtigt ist.

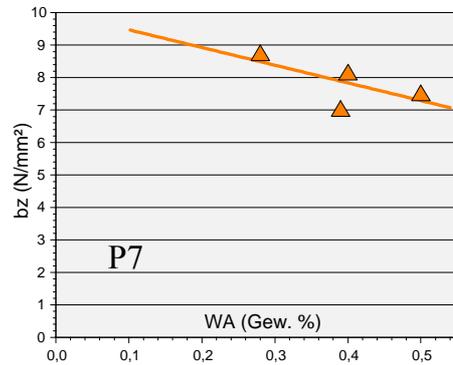
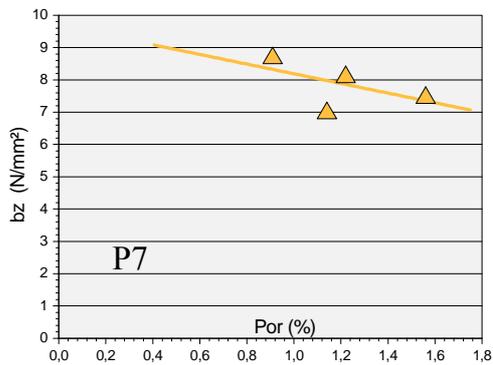
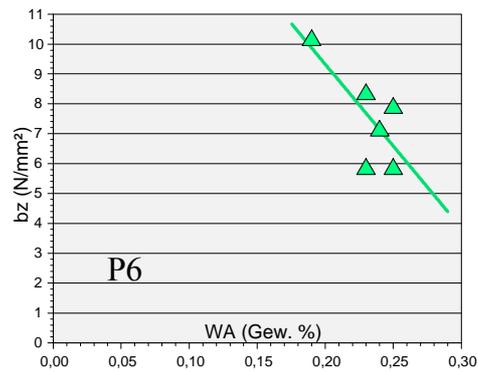
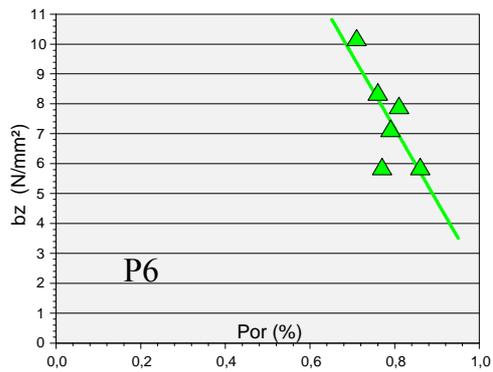
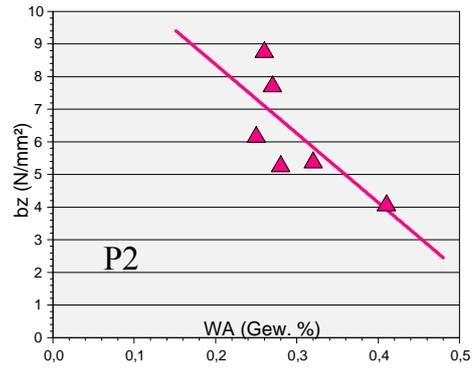
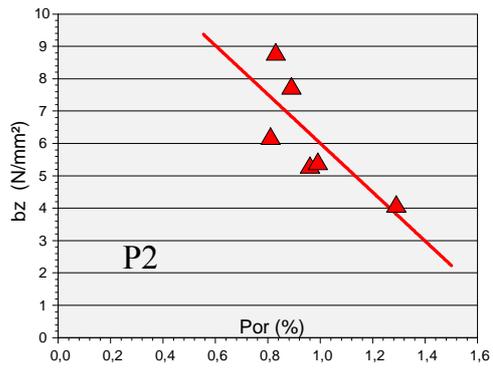
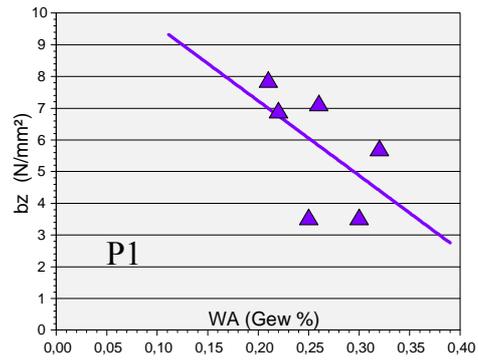
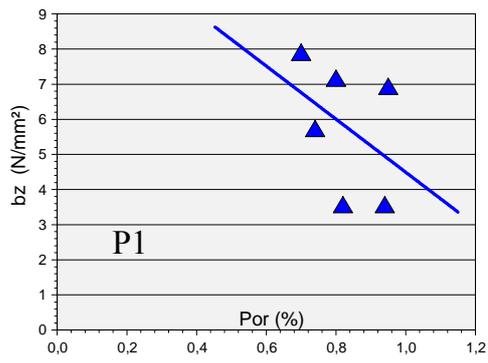


Abb. 38: Korrelationen sowohl bei der Abhängigkeit von der Porosität als auch der Abhängigkeit von der WA unter Atmosphärendruck

3.4 Frost-Tau-Wechsel-Versuch

Die durch Frost-Tau-Wechsel-Belastung induzierte Schädigung konnte durch Masse-, Porenradien- und US-Geschwindigkeitsmessungen bestätigt werden. Die Masseveränderungen und die Veränderung der US-Geschwindigkeiten sind in Abbildungen 39 bis 42 dargestellt. Die Art der durchgeführten US-Messung im Bohrkern ist in Abb.12 erläutert. Alle Proben zeigen bis zu 100 Zyklen keine erkennbaren makroskopischen Veränderungen. Nach jedem Zyklus läßt sich feststellen, daß einem deutlichen Masseverlust jeweils eine Abnahme der US-Geschwindigkeit vorangeht. Die graphischen Darstellungen des Frost-Tau-Wechsel-Zyklus-Verlaufs zeigen, daß sich für jede Marmorprobe eine charakteristische Kurvenform ergibt.

Der Porenraum spielt hier eine wichtige Rolle für die Frostbeständigkeit, da ihr Vorhandensein das Eindringen von Wasser in den Stein ermöglicht, und zu Zerstörungen im Steininneren führt. Nach Porenradienverteilungshistogrammen besitzen Marmorproben einen hohen Anteil an Mikro- und Kapillarporen. Sind die Kapillarporen gut miteinander verbunden, dann läßt sich diese Art Poren bei entsprechendem Wasserangebot mit Wasser füllen. Bei Frostwirkung kann das Steingefüge mangels Ausweichräume hohen Sprengdrücken ausgesetzt sein. In allen Diagrammen zeigen die Kurven, daß der Schädigungsfortschritt fast kontinuierlich abläuft. So beobachtete man eine rasche Abnahme der US-Geschwindigkeit am Anfang des Frost-Tau-Wechsel-Versuchs. Ab 30 bis zu 80 Zyklen reagieren die Proben nur noch durch die leichte Masse- und US-Geschwindigkeitsveränderung. Ab 80 Zyklus ist bei vielen Proben ein Anstieg der US-geschwindigkeit bei gleichzeitigem leichten Masseverlust, der ab 90 Zyklus wieder zu einem Stillstand kommt. Das läßt sich sehr gut mit Veränderungen der Porenradienverteilungen vergleichen (Abb. 47 bis 50).

Im statistischen Vergleich der Mittelwerte der Veränderung der Masse und US-Geschwindigkeit (Abb. 43) wird zuerst deutlich, daß der Feuchteeinfluß und das Eiswachstum auf das Verhalten der untersuchten Marmorproben von sehr unterschiedlicher Bedeutung ist. Die Mittelwerte der Gewichtsverluste an den Proben P1, P2 und P6 sind praktisch fast gleich. Die Proben verlieren an ihrer Masse bis ca. 0,15%. Erhöhter Masseverlust läßt sich bei der Probe P7 beobachten. Sie verliert an ihrer Masse ca. 0,23%.

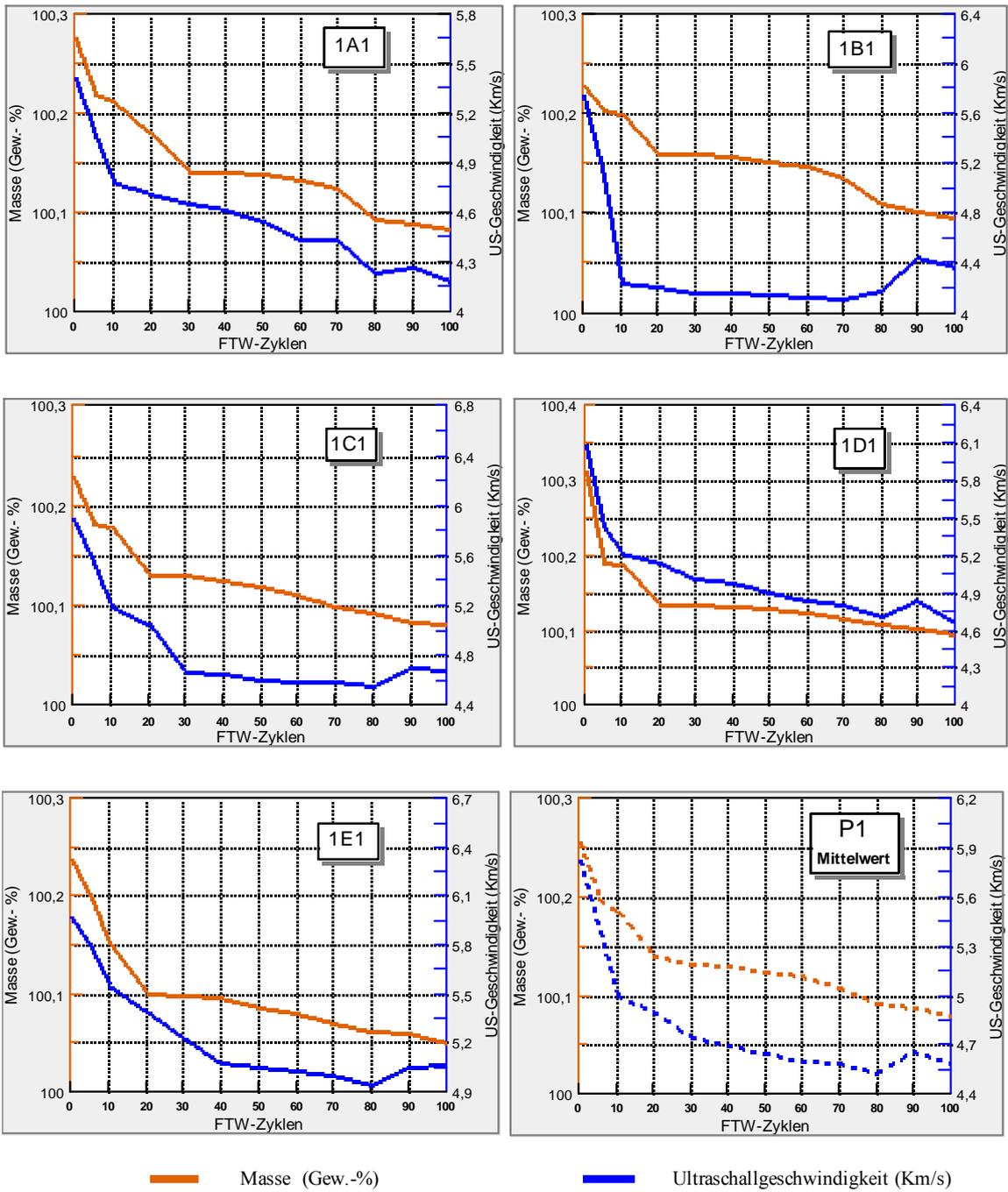


Abb. 39: Veränderung der Masse und der US-Geschwindigkeit in der Probe P1

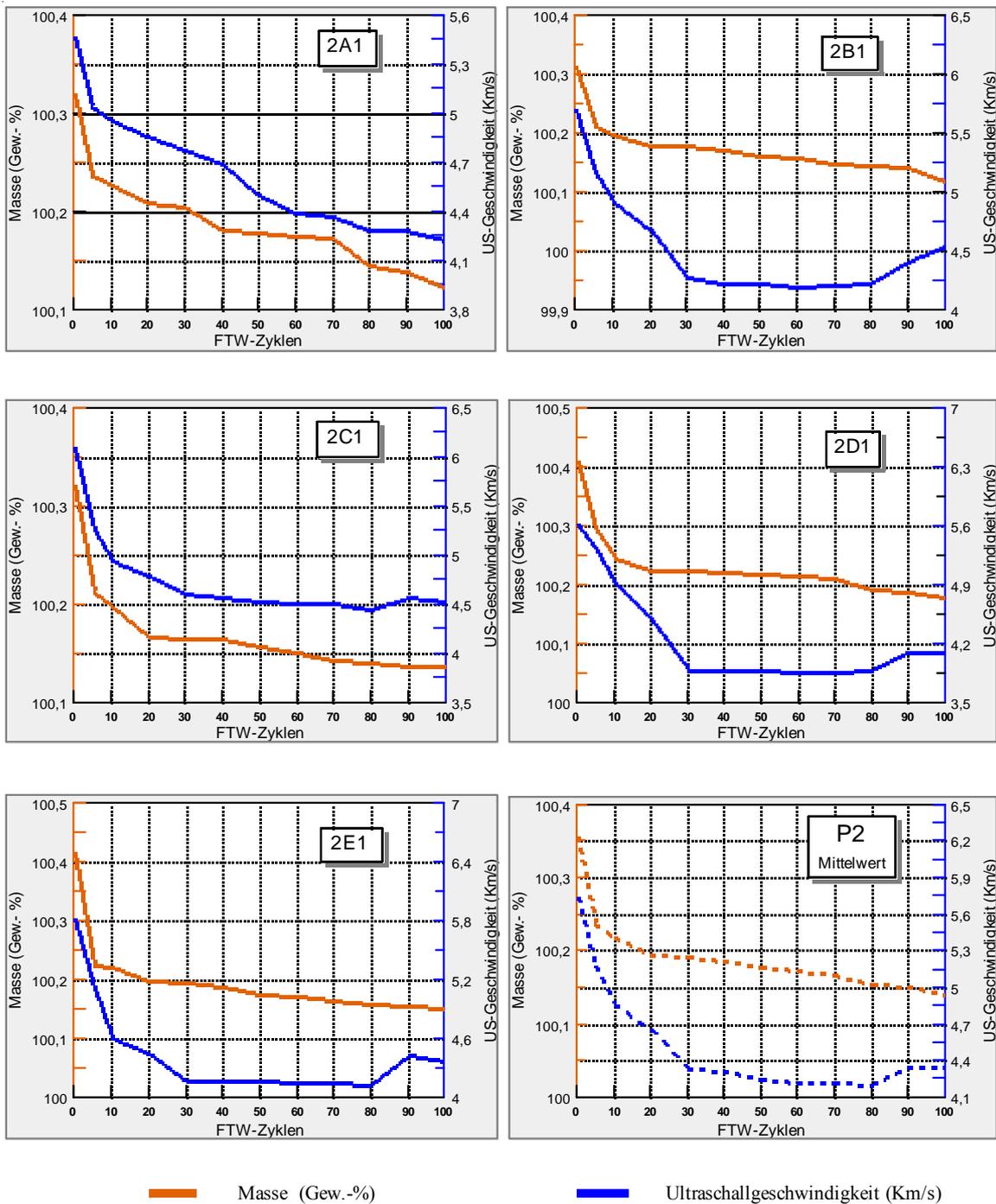


Abb. 40: Veränderung der Masse und der US-Geschwindigkeit in der Probe P2

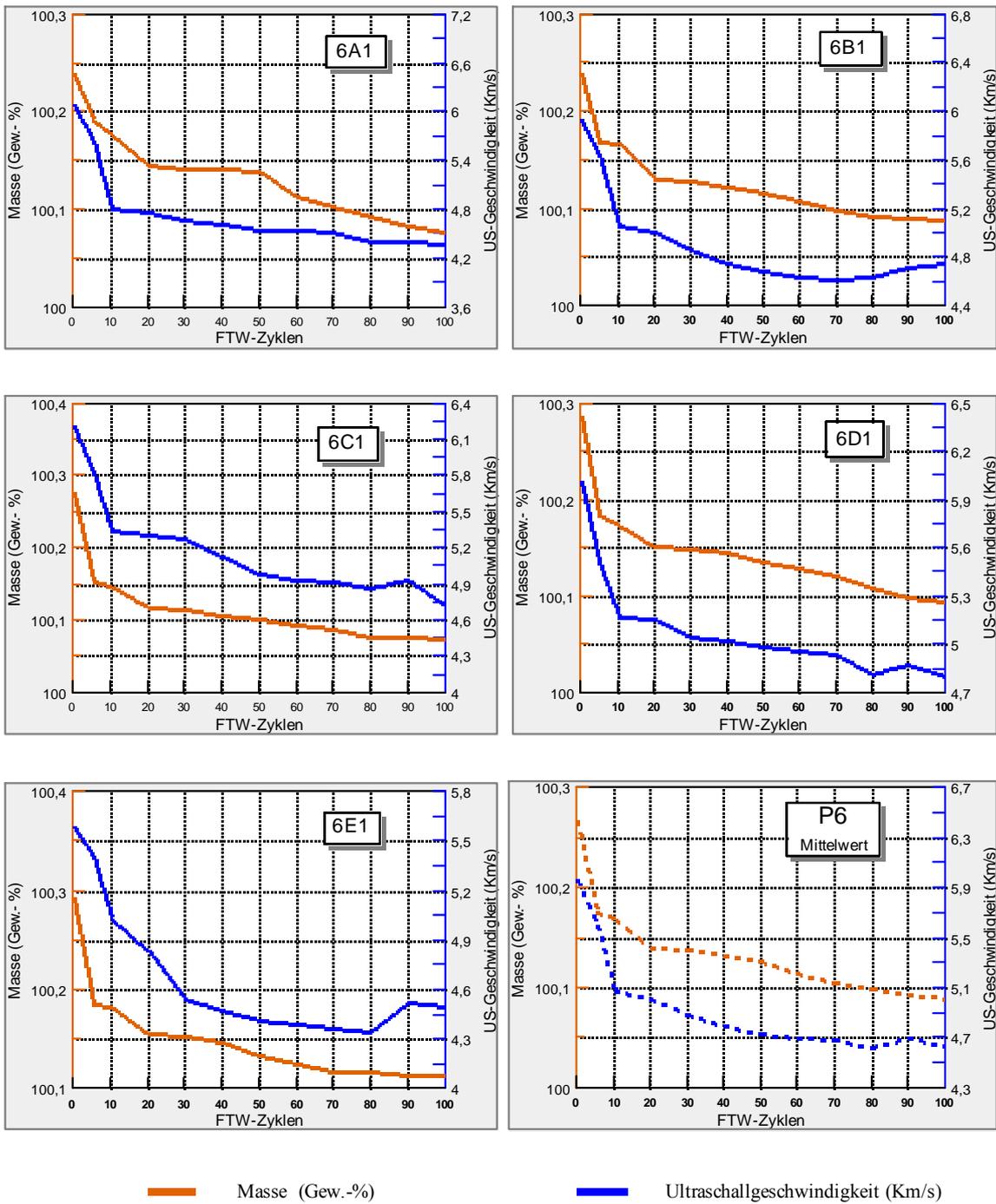


Abb. 41: Veränderung der Masse und der US-Geschwindigkeit in der Probe P6

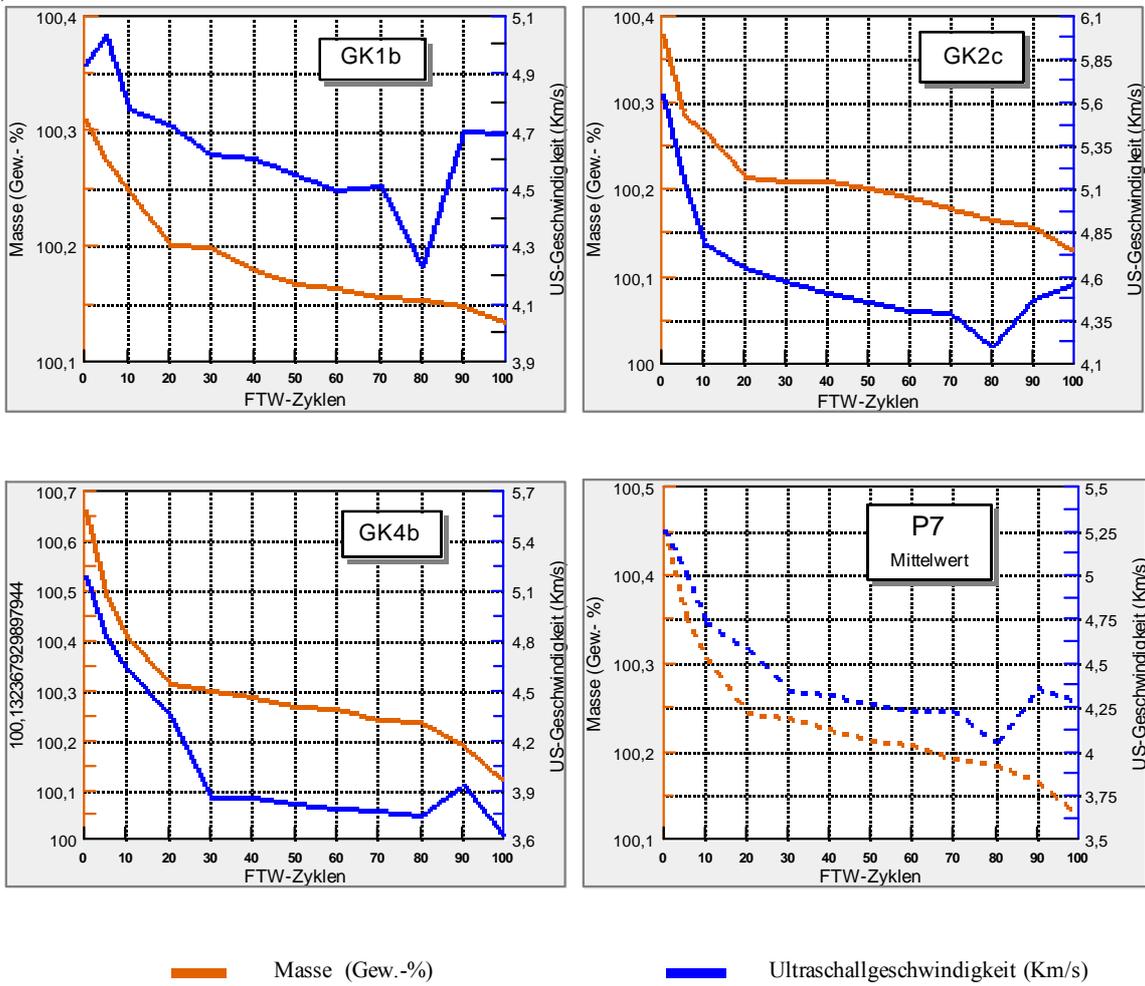


Abb. 42: Veränderung der Masse und der US-Geschwindigkeit in der Probe P7

Bei der US-geschwindigkeiten lassen sich deutliche Unterschiede zwischen trockener und wassergesättigter Probe beobachten. Auffällig ist, daß in wassergesättigten Proben P7 die US-Geschwindigkeiten deutlich zunehmen (ca. 75%), da diese am meisten Wasser aufgenommen haben. In den Proben P6, P2 und P1 ist eine Zunahme der US-Geschwindigkeiten von ca. 28 (P6) bis ca. 35% (P2 und P1) zu beobachten. Erwartungsgemäß ist die US-Geschwindigkeitszunahme in der frischen Probe P6 am niedrigsten. Die Frost-Tau-Wechsel-Belastung erzeugt nach 100 Zyklen in allen Proben eine deutliche US-Geschwindigkeitsabnahme von ca.1 bis 2 Km/s. Die über 100 Jahre exponierten Proben P7 zeigen weniger Schädigung bei starken Frost in kurzer Zeit als die Proben P1 und P2 nach 7 Jahren Auslagerungszeit und Referenzprobe P6. Auch im Vergleich thermisch belasteter Proben kommt man zu ähnlichen Ergebnissen wie in der Tab. 6. Bei den Proben P1, P2 und P6 sind nach 100 Frost-Tau-Zyklen die US-Geschwindigkeiten im trockenen Zustand die Werte zwischen 28 bis 40% weniger (2,83 bzw. 3,0 Km/s), während sie bei der Probe P7 ca. 15% niedriger beträgt (2,61 Km/s).

Im Vergleich zu den US-Werten vor dem Frost-Tau-Weschel-Versuch, zeigt die Probe P6 nach 100 Frost-Tau-Zyklen, eine signifikant niedrigere US-Geschwindigkeit als die Proben P1, P2 und P7, so daß sie möglicherweise stärker bei den zyklischen Belastung geschädigt wurde. Zusammenfassend liegen die US-Geschwindigkeiten der Marmorproben nach der Frost-Tau-Wechsel-Belastung im Bereich zwischen 2,61 und 3,02 Km/s. Nach Köhler´s Skala (1998) weisen die US-Meßwerte auf den Bereich „beginnende Srukturzerstörung“ hin.

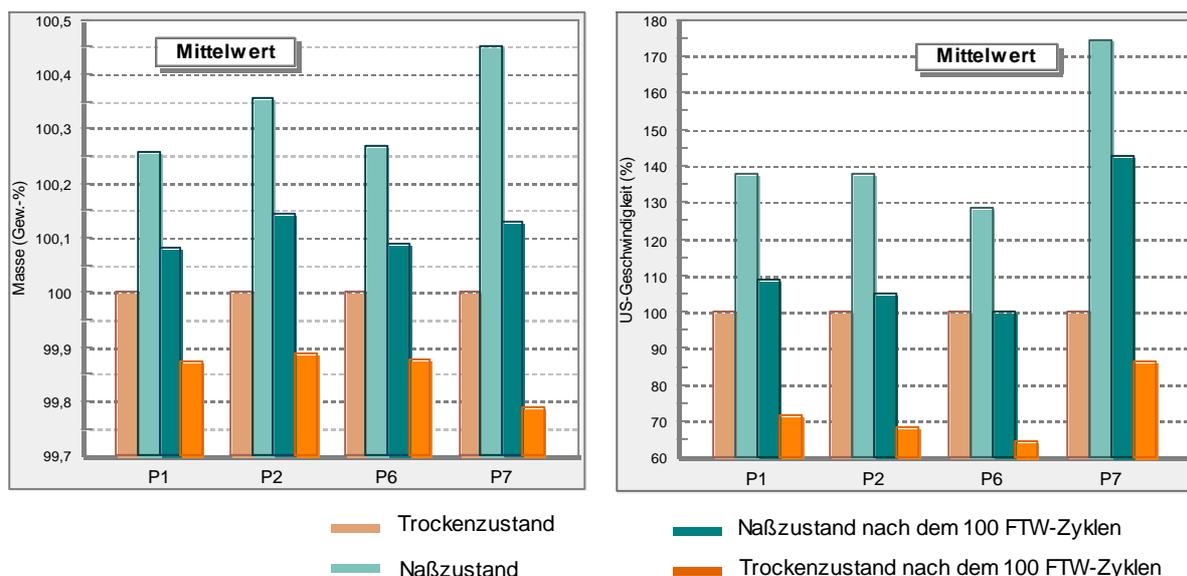


Abb. 43: Vergleich der Masse und US-Geschwindigkeiten zwischen Proben P1, P2, P6 und P7 vor und nach den 100 Frost-Tau-Wechsel-Versuchen

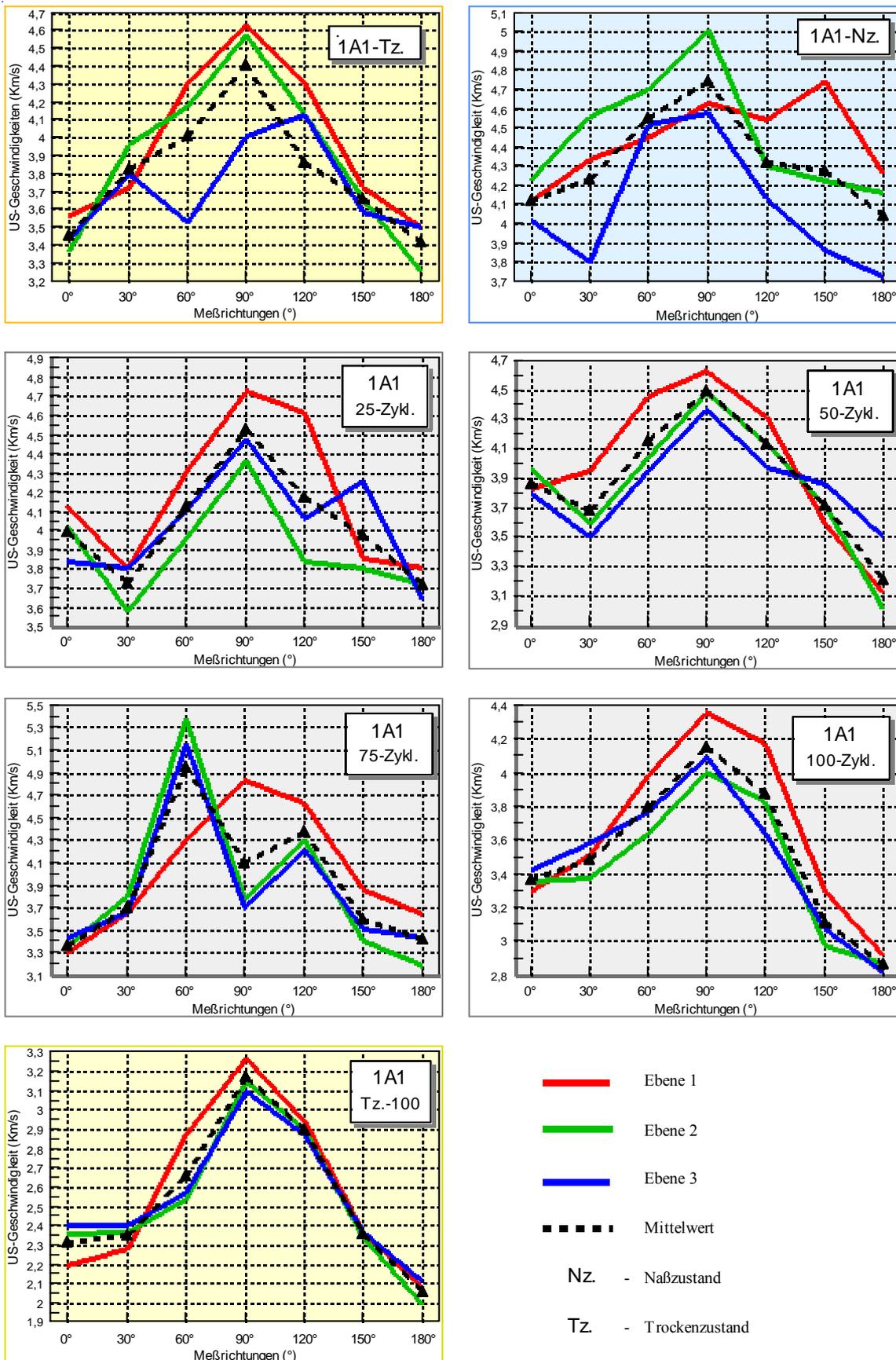


Abb. 44: Darstellung der US-Geschwindigkeitsanisotropie im Verlauf der Frost-Tauwechselfersuche im Bohrkern 1A1 (P1)

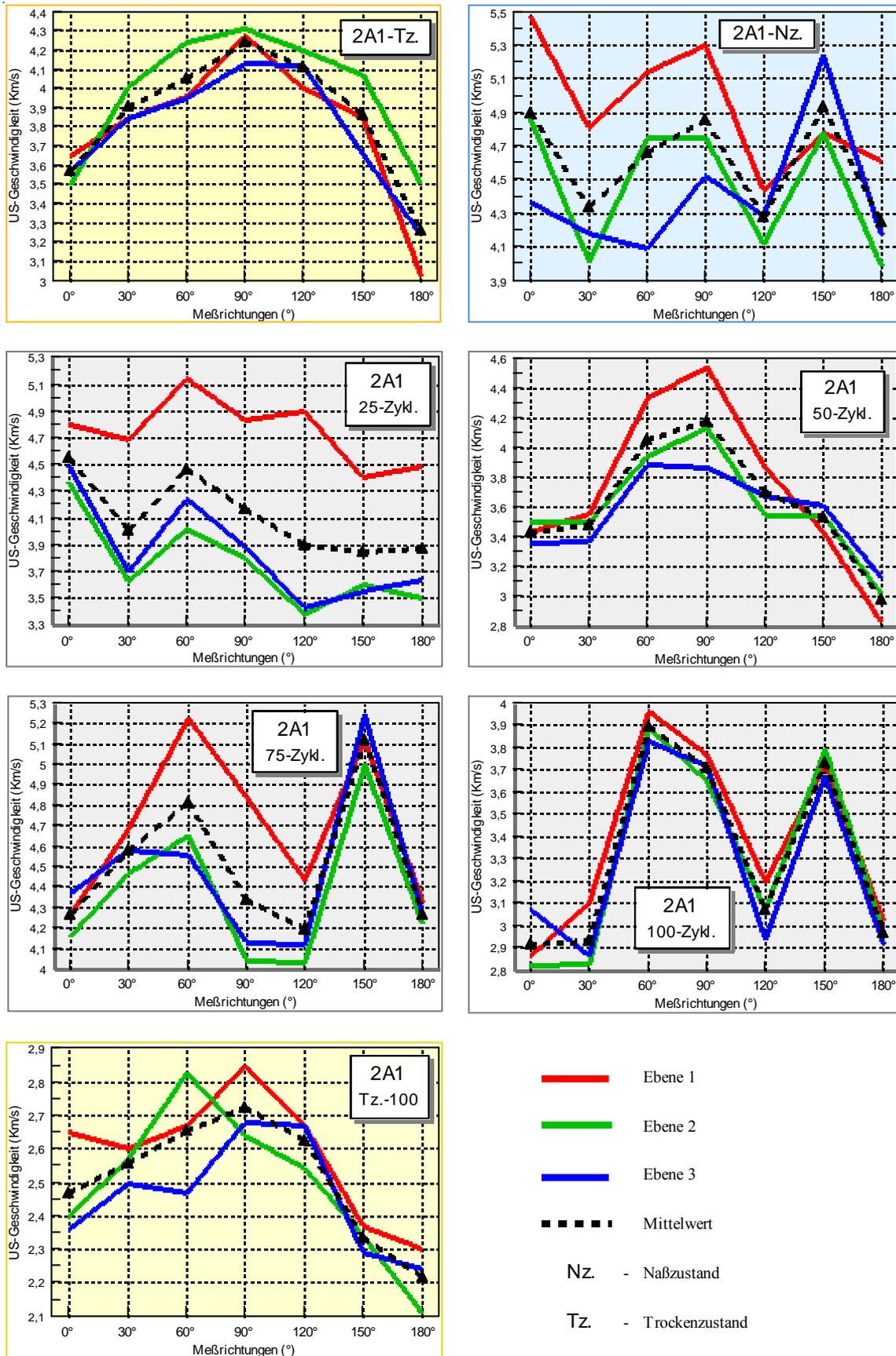


Abb. 45: Darstellung der US-Geschwindigkeitsanisotropie im Verlauf der Frost-Tauwechselfersuche im Bohrkern 2A1 (P2)

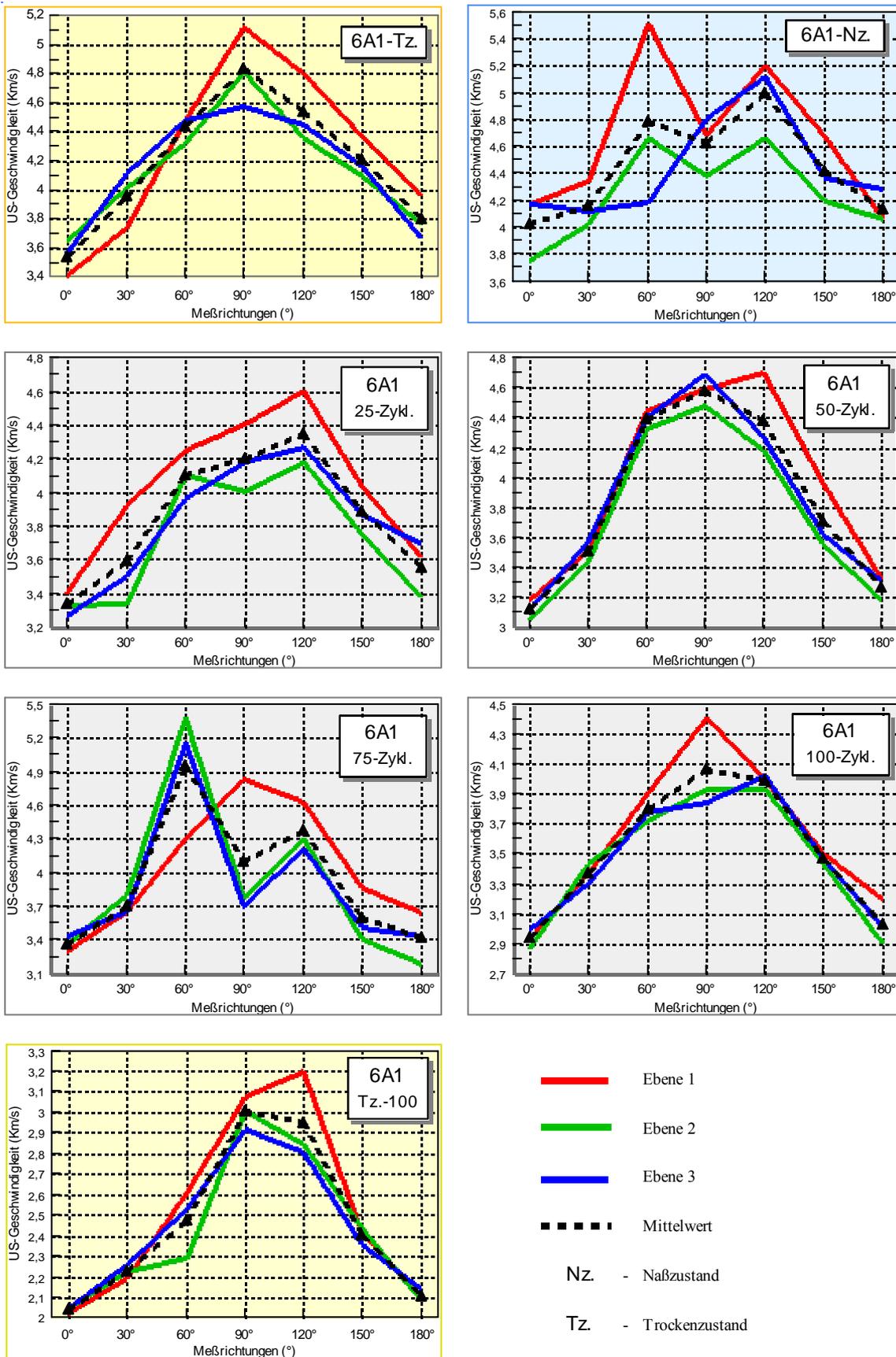


Abb. 46: Darstellung der US-Geschwindigkeitsanisotropie im Verlauf der Frost -
Tauwechselfersuche im Bohrkern 6A1 (P6)

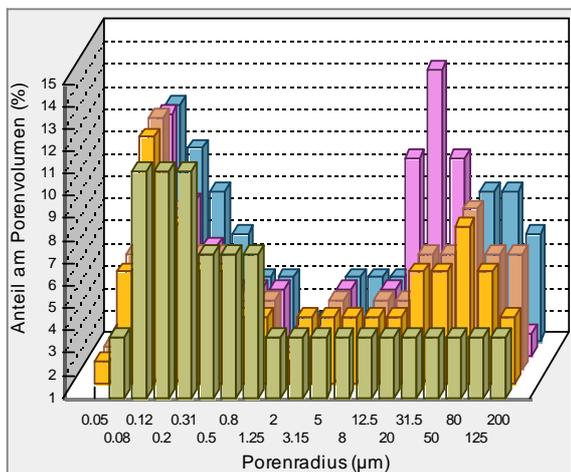
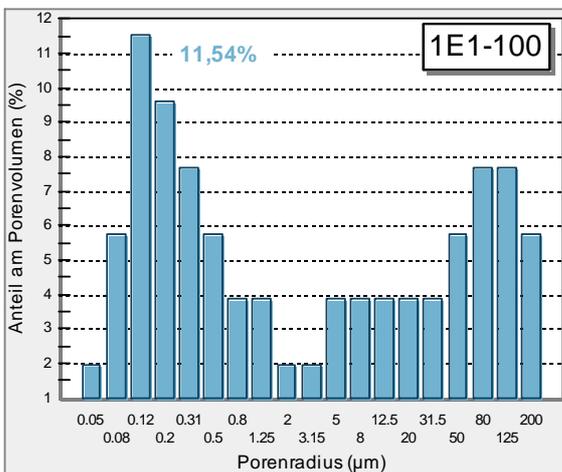
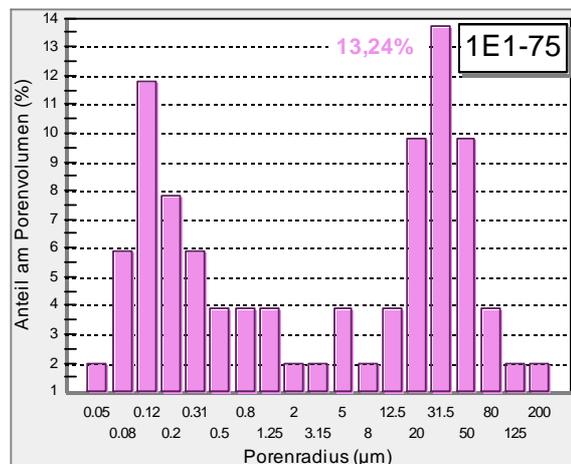
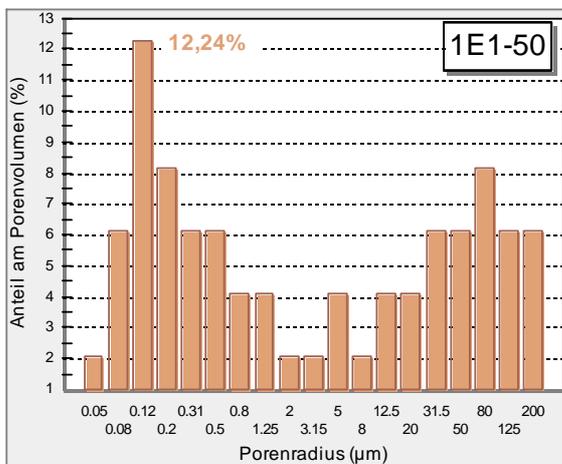
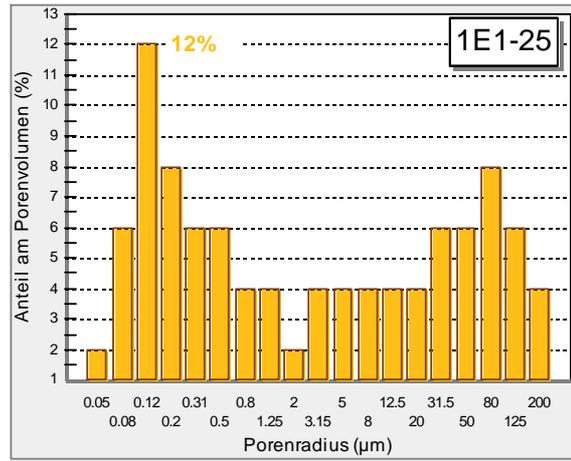
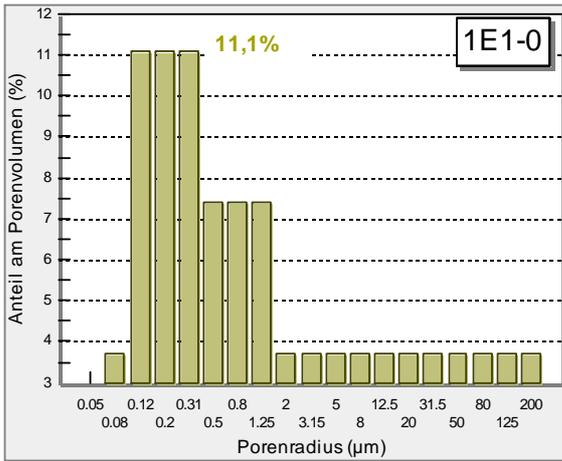
In Abbildungen 44 bis 46 ist die US-Geschwindigkeitsanisotropie als Funktion der Zyklenzahl dargestellt. Die Art der durchgeführten US-Messung im Bohrkern ist in Abb. 11 erläutert. Man beobachtete eine stark mit der Zyklenzahl schwankende Schallgeschwindigkeit. In der feuchten Probe 2A1 (Abb. 45) läßt sich nach den 75 und 100 Zyklen keine Geschwindigkeitsanisotropie nachweisen. Die Proben 1A1 (Abb. 44) und 6A1 (Abb. 46) zeigten nach dem 75 Zyklus auch eine Streuung der US-Geschwindigkeitswerte. Eine Erklärung hierfür ist, daß die unterschiedlichen Feuchteveränderungen und Temperaturen, sowie das Eiswachstum in den Marmorproben während der Zyklenzahl eine große Rolle spielten, so daß sich Ultraschall unterschiedlich schnell fortpflanzte. Eine andere Ursache ist, daß der Riss-Einfluss bei wassergesättigten Gesteinsproben geringer als bei trockenen Proben ist.

Die Anisotropieeffekte, d.h. die Richtungen der maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten korrelieren aber in den trockenen Proben vor und nach 100 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen sehr gut miteinander. Die Änderung der Schallgeschwindigkeit zwischen der Frost-Tau-Wechsel-Belastung parallel und senkrecht zur Orientierung der c-Achsen beträgt nur ca. 6%. Sie nimmt bei den trockenen Proben nach 100 Zyklen parallel zu c-Achsen etwas mehr ab als bei der Belastung senkrecht zu c-Achsen. Die Ursachen der Unterschiede sind im Gefüge der Probe zu suchen. Die Art der Ribildung (viele kleine oder wenige große Risse, Mikrorissbildung, das Zusammenwachsen von Mikrorissen etc.) hat einen wesentlichen Einfluß auf die Porenradienverteilung, so daß eine einfache Korrelation zwischen US-Geschwindigkeit und Porenradienverteilung existiert (vgl. Abb. 36).

In den Abbildungen 47 bis 50 sind die Ergebnisse weiterführender Versuchsreihen zur Frost-Tau-Wechsel-Verwitterung dargestellt. Durch quecksilberporosimetrische Messungen konnten Veränderungen der Porenstruktur nachgewiesen werden. Die gewählte Darstellungsweise ermöglicht es, die mit fortschreitender Zyklenzahl auftretenden Verschiebungen in den Porenradienverteilungen zu unterscheiden. In den Diagrammen ist zu beobachten, daß Poren mit einem Radius $>200 \mu\text{m}$ messbedingt nicht erfaßt werden konnten. Aus den Verteilungshistogrammen ist aber ersichtlich, daß in diesem Bereich vielleicht auch größere Poren vorhanden sein sollten. Für alle Proben wurde eine sich mit zunehmender Versuchsdauer intensivierende Veränderung der Porenradienverteilung besonders im Bereich zwischen $2\text{-}200 \mu\text{m}$ registriert. Bei der Probe GK2c (P7) ist die Veränderung der Porenradienklasse niedriger bezogen auf die Vergleichsproben 1E1 (P1), 2E1 (P2) und 6E1 (P6), was mit den Ergebnissen der US-Geschwindigkeiten übereinstimmt (vgl. Abb. 41).

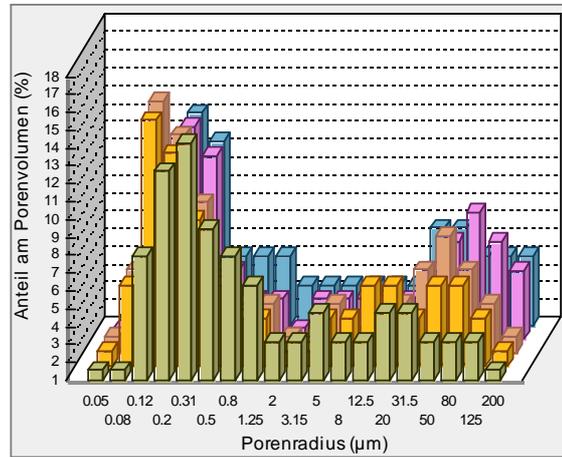
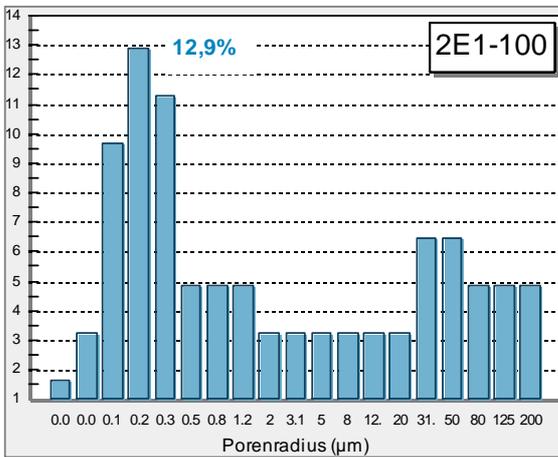
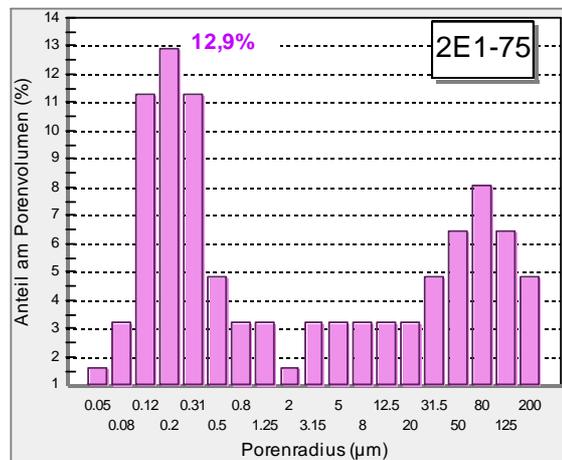
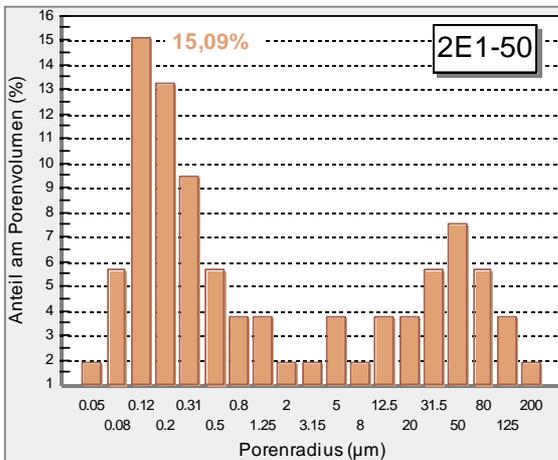
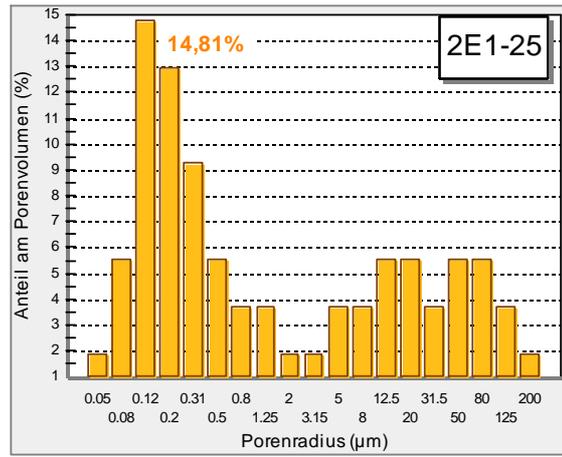
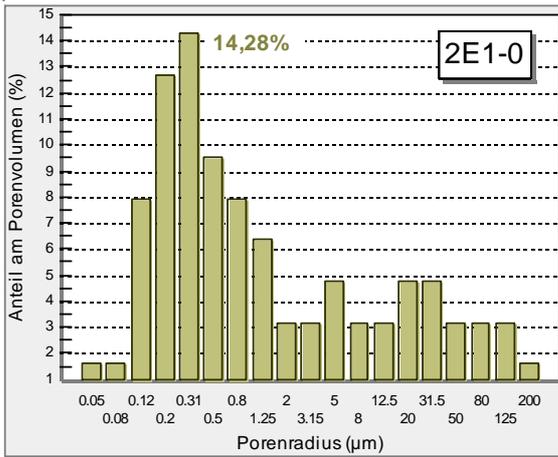
Bei der frischen Probe 6E1 (Abb. 49) liegt die maximale Veränderung deutlich über 5 Vol.% an Mikroporen und ca. 9 Vol.% an Kapillarporen bezogen auf die unbehandelte Vergleichsprobe. Bei der Probe Gk2C (Abb. 50), über 100 Jahre exponiert im alten Südfriedhof in München liegt die maximale Veränderung nur 0,4 Vol.% an Mikroporen und 2 Vol.% an Kapillarporen. Daraus läßt sich schließen, daß bei der untersuchten Proben dieser Varietät der maximal 100 Frost-Tau-Weschel-Zyklen keine große Veränderungen der Porenstruktur eingetreten sind. Dies stimmt sehr gut mit der Ergebnisse der thermischen Belastung überein.

Im Abschnitt 3.2.1. (Tab.5) ist zu sehen, daß der von Hierschwald (1908, siehe in Schuh 1987) als Entscheidungskriterium über die Frostbeständigkeit herangezogene S-Wert von keinen Marmorproben erreicht wird. Die US-, Porenradienverteilungsmessungen und REM-Beobachtungen zeigen aber, daß die Frost-Tau-Wechsel-Belastung zur Schädigung des Gefüges durch das ein Erweitern der Mikrorisse entlang der Korngrenzen der Calcitkristallen führte. Das einfache Modell des S-Wertes genügt also nicht, die Vorgänge der Frostsprengung zu beschreiben (Snethlage 1984). Sie werden in großem Maße von der Porenverteilung beeinflusst, so daß Frostsprengung im Gestein mit einem Sättigungswert $< 0,9$ bei ungünstiger Porenradienverteilung auftreten kann.



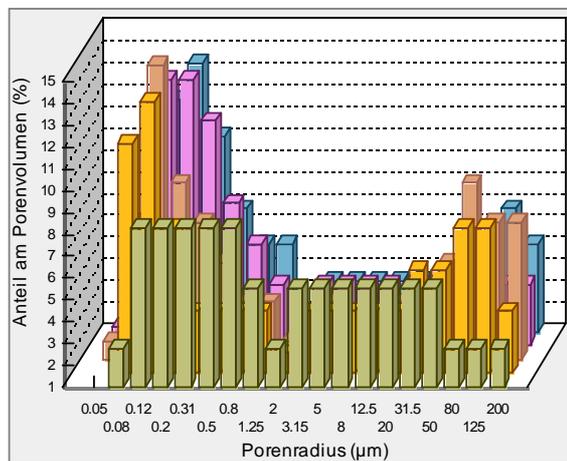
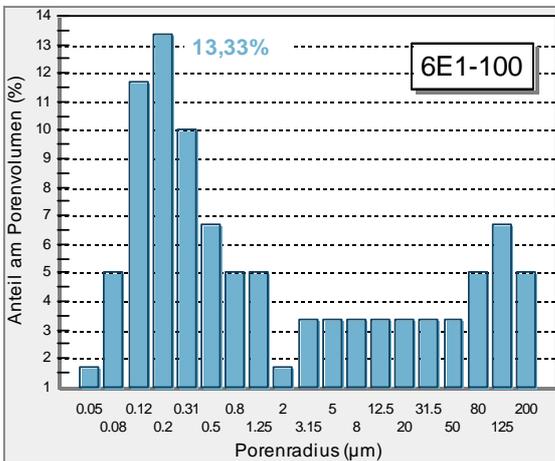
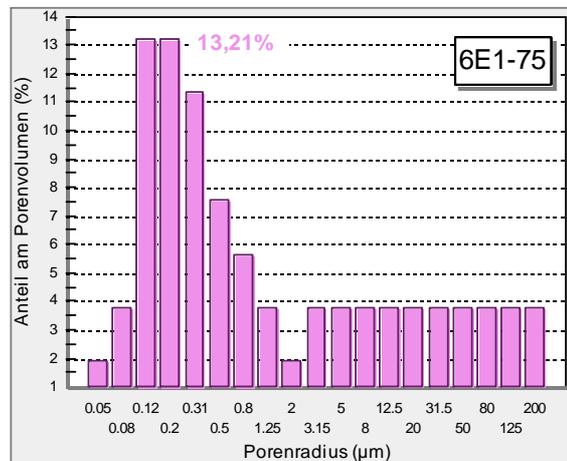
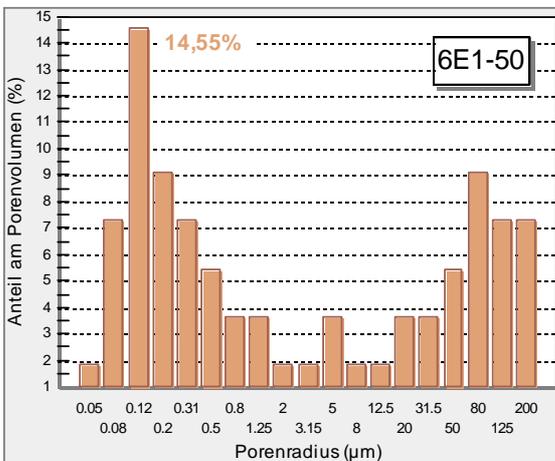
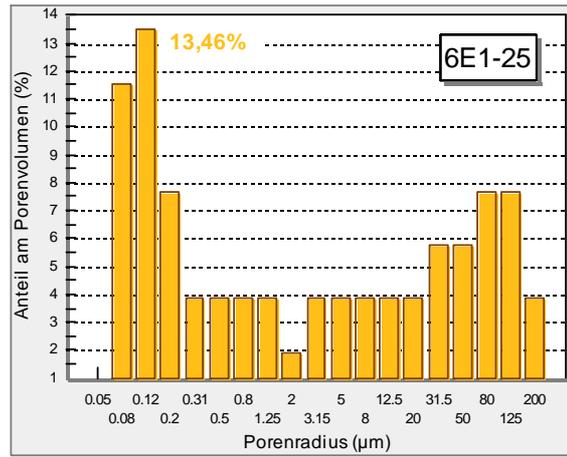
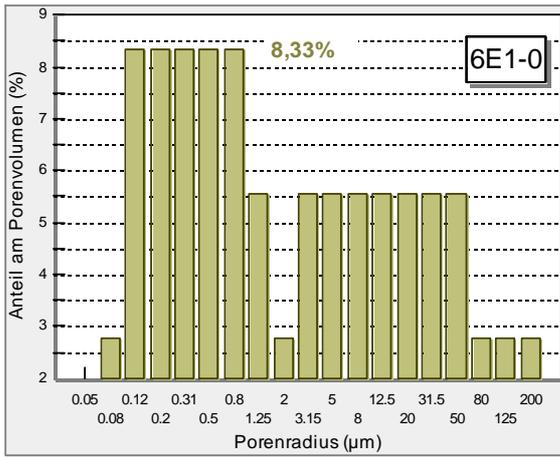
0; 25; 50; 75 und 100 - Frost-Tauwechselzyklen

Abb. 47: Porenradienverteilungen zur Frost-Tauwechselverwitterung in der Probe 1E1 (P1)



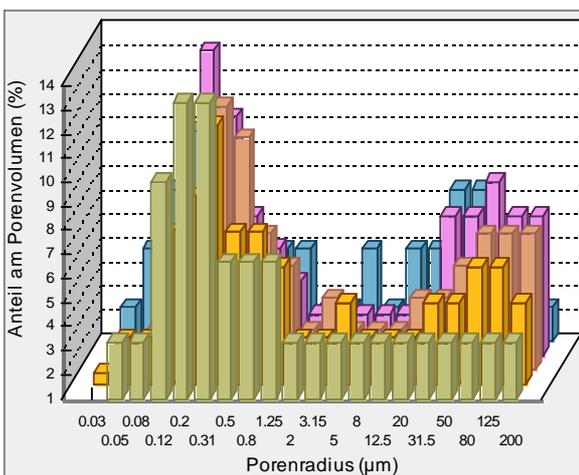
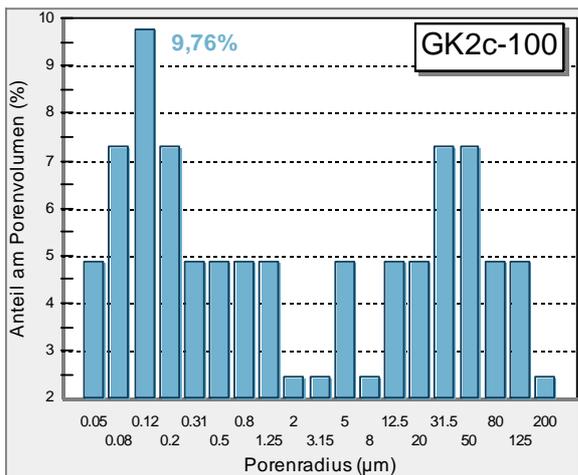
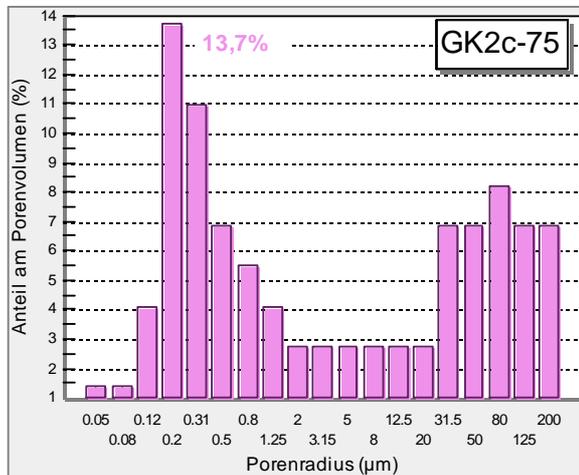
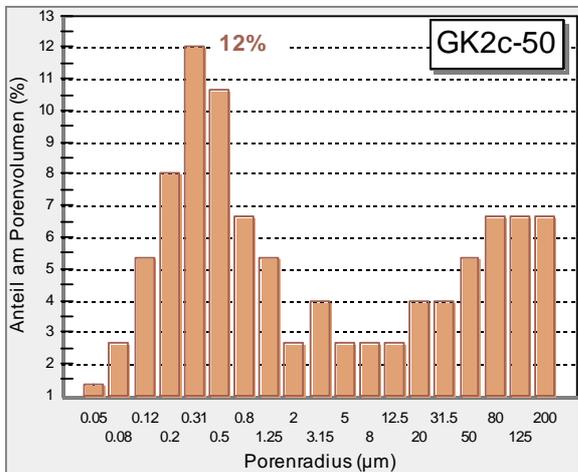
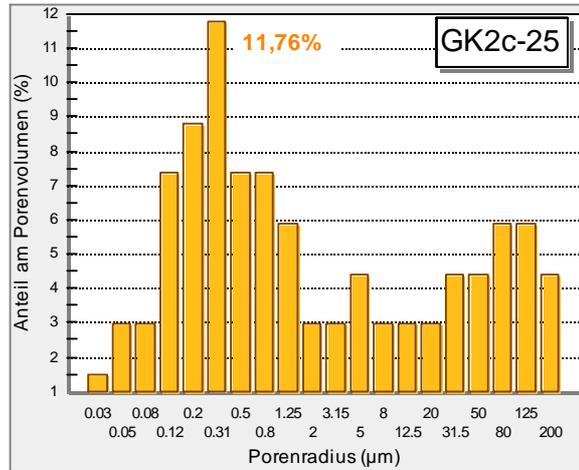
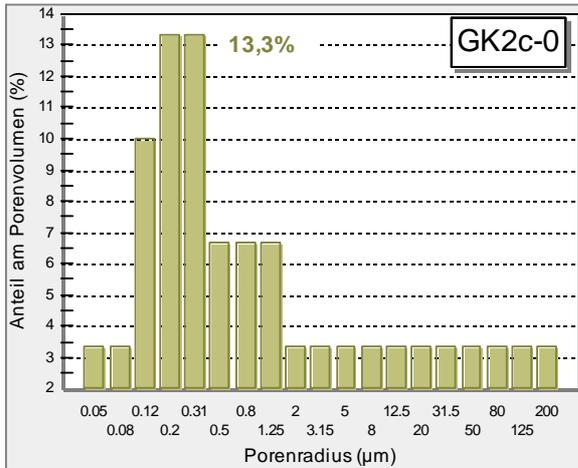
0; 25; 50; 75 und 100 - Frost-Tauwechselzyklen

Abb. 48: Porenradienverteilungen zur Frost-Tauwechselverwitterung in der Probe 2E1 (P2)



0; 25; 50; 75 und 100 - Frost-Tauwechselzyklen

Abb. 49: Porenradienverteilungen zur Frost-Tauwechselverwitterung in der Probe 6E1 (P6)



0; 25; 50; 75 und 100 - Frost-Tauwechselzyklen

Abb. 50: Porenradienverteilungen zur Frost-Tauwechselfröderung
in der Probe GK2c (P7)

3.5. Rasterelektronenmikroskopische Beobachtungen

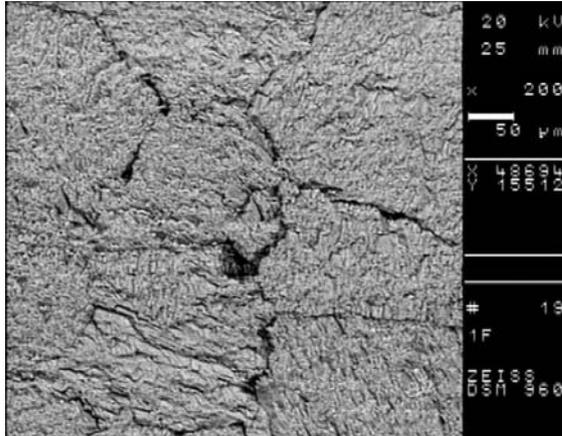
Anhand der Tafeln 1 und 2 lassen sich generell keine große Gefügeunterschiede zwischen den Proben 1F1 (P1), 2A (P2) und 6F (P6) feststellen, außer daß innerhalb der Referenzprobe 6F die Risse feiner sind. An den Proben 1F1 und 2A können Änderungen der Porenraumverhältnisse nachgewiesen werden. Die REM-Aufnahmen zeigen, daß bei der Erwärmung die Lockerung der Kohäsion zwischen Calcitkristallen höher ist als bei der Frost-Tau-Wechselbelastung. Daraus ist zu schließen, daß für die Verwitterung von großer Bedeutung die ausgeprägt anisotrope thermische Expansion-Kontraktion-Zyklen des Marmorgefüges sind, welche eine Öffnungsweite der Mikro- und Kapillarporen hervorrufen. Darunter stehen zur besseren Vergleichbarkeit die Porenradienverteilungen (vgl. Abb. 35, 36 und 47-52), aus welchen die Tendenzen der Zunahme des Porenraums nachgewiesen werden können. Dieser Vorgang läßt sich experimentell durch eine erhöhte Wasseraufnahme (siehe Abschn. 3.2) und US-Geschwindigkeitsabnahme (siehe Abschn. 3.1.3 und 3.4) nachweisen.

Die REM-Beobachtungen zeigen innerhalb der Proben GK5a und GK6d (P7) (Tafel 2 und 3) deutlich erkennbare kleine Nester bzw. Anhäufungen kleiner Hohlräume infolge verwitterungsbedingter Veränderungen im Porengefüge. In der Tafel 3 erweisen die zwei sichtbaren Risse, zu denen das Harz durchgelaufen ist, eine gute Verbindung der Hohlräume miteinander. Es ist mit großer Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß es durch das Erweitern der Risse entlang der Korngrenzen infolge periodischer Erwärmung im Tages- und Jahresrhythmus zur Gefügauflockerung kommt. Bei Vorhandensein offener Porenräume und entsprechender Durchfeuchtung (Wasseraufnahme bestätigt dies, siehe Abschn 3.2.1) wird die Auflösung von Calcitflächen durch physikalische und chemische Verwitterung beschleunigt.

Im Vergleich zu den Proben 1F1, 2A und 6F zeigt die Marmorprobe aus dem altem Südfriedhof GK6d (Tafel 2) vor und nach thermischer Belastung keine großen Unterschiede der Porenraumverhältnisse. Offenbar wurden bei anisotrop-thermischen Expansion-Kontraktion-Zyklen während der Freibewitterung fast alle resultierenden Spannungen an den Korngrenzen abgebaut, so daß bei der neuerlichen Erwärmung geringe weitere Korngrenzerisse aufgetreten sind.

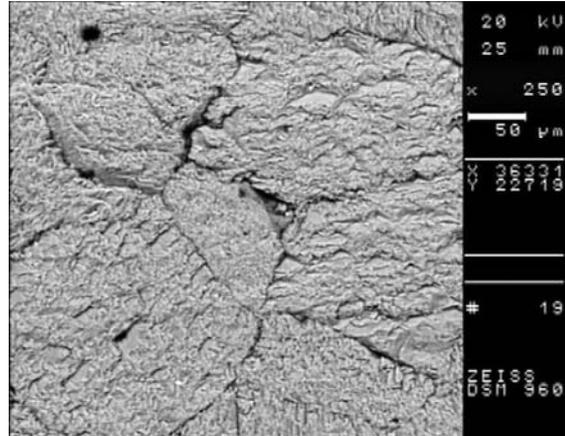
Tafel 1: REM – Aufnahme in der Marmorprobe 1F1 (P1) und 2A (P2)

1F1 (P1)

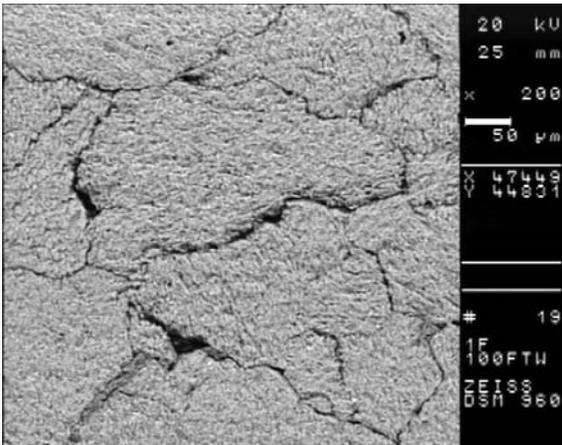


200-fach, Bildmaß 484 x 484 μm
REM – Aufnahme (Präerwärmung)

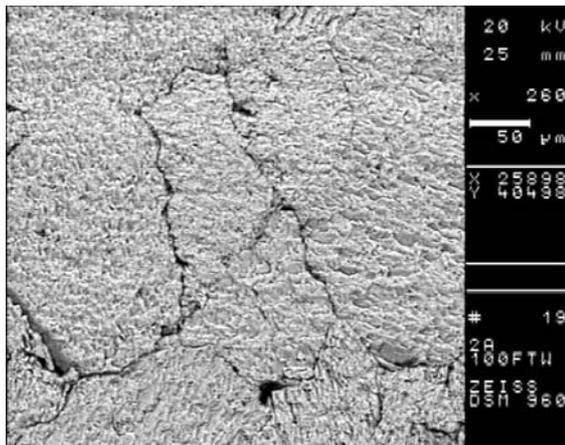
2A (P2)



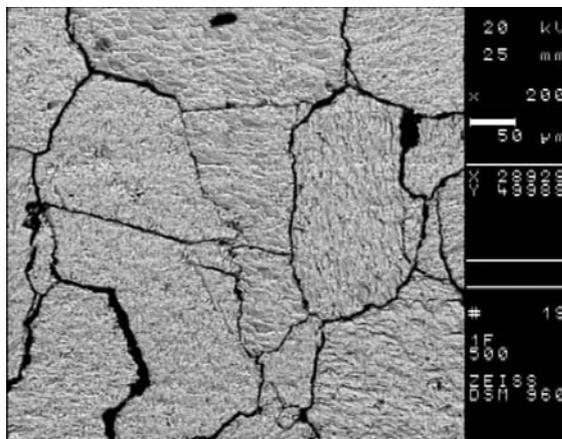
250-fach, Bildmaß 437 x 437 μm
REM – Aufnahme (Präerwärmung)



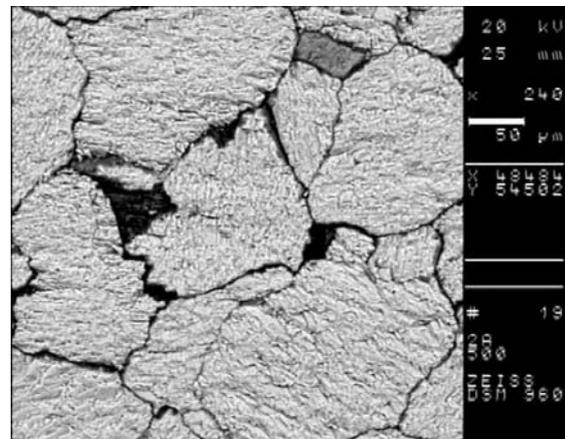
200-fach, Bildmaß 484 x 484 μm
REM – Aufnahme (Post-100FTW-Zyklen)



260-fach, Bildmaß 403 x 403 μm
REM – Aufnahme (Post-100FTW-Zyklen)



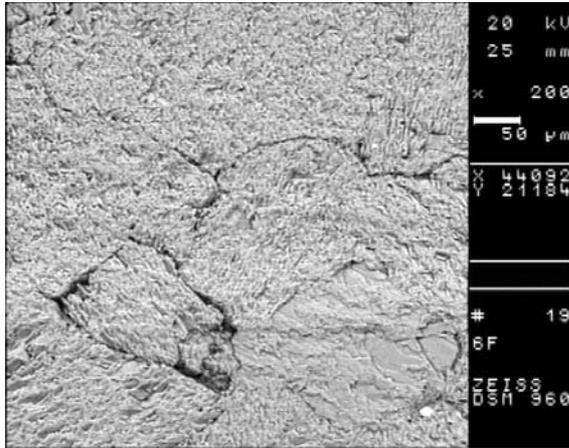
200-fach, Bildmaß 484 x 484 μm
REM – Aufnahme (Posterwärmung, 2 Stunden
auf 500 °C)



240-fach, Bildmaß 408 x 408 μm
REM – Aufnahme (Posterwärmung, 2 Stunden
auf 500 °C)

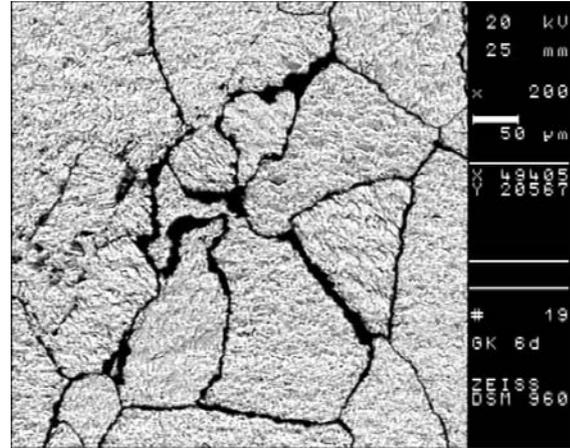
Tafel 2: REM – Aufnahme in der Marmorprobe 6F (P6) und GK6d (P7)

6F (P6)

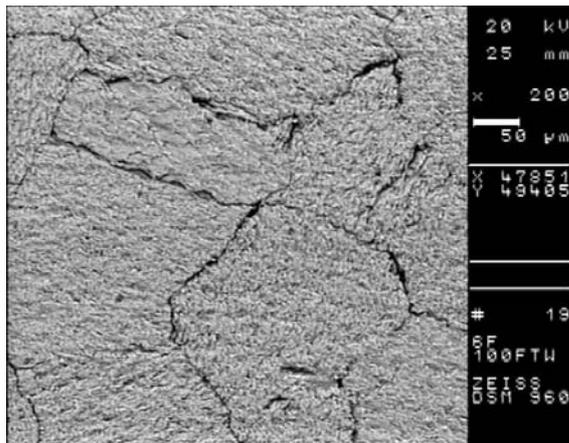


200-fach, Bildmaß 494 x 494 µm
REM – Aufnahme (Präerwärmung)

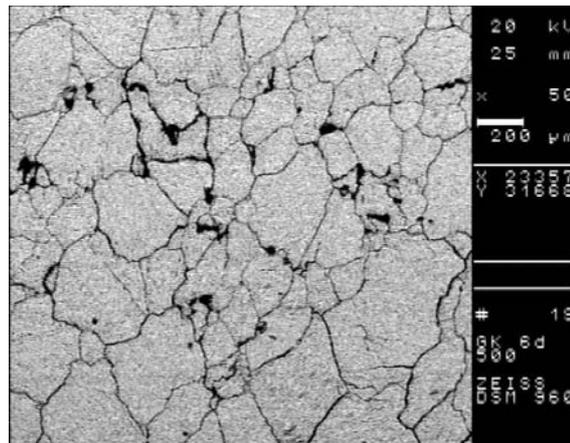
GK6d (P7)



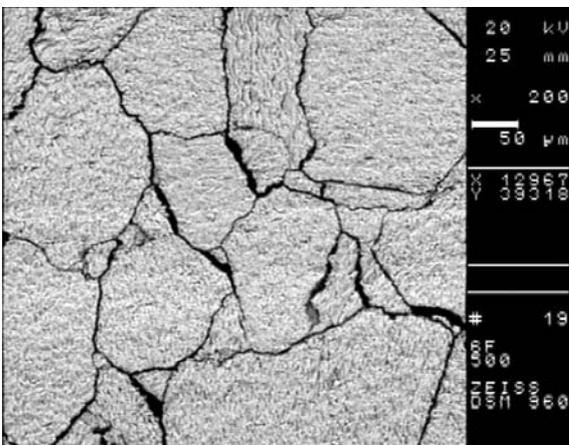
200-fach, Bildmaß 470 x 470 µm
REM – Aufnahme (Präerwärmung)



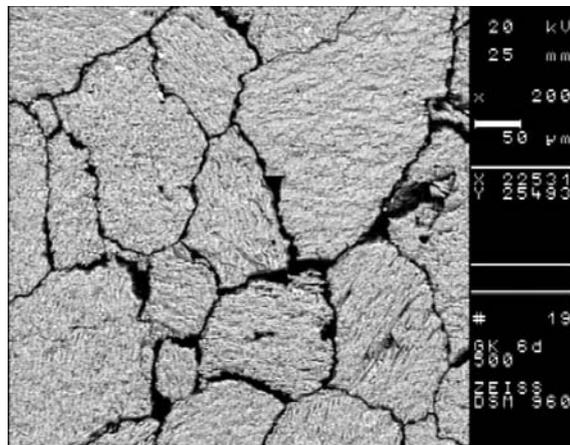
200-fach, Bildmaß 471 x 471 µm
REM – Aufnahme (Post-100FTW-Zyklen)



50-fach, Bildmaß 1,98 x 1,98 mm
REM – Aufnahme (Posterwärmung, 2 Stunden auf 500 °C)



200-fach, Bildmaß 494 x 494 µm
REM – Aufnahme (Posterwärmung, 2 Stunden auf 500 °C)



200-fach, Bildmaß 470 x 470 µm
REM – Aufnahme (Posterwärmung, 2 Stunden auf 500 °C)

4. Zusammenfassung

Art und Umfang der zu entnehmenden Proben sowie die Verfahren ihrer Entnahme aus dem Bauwerk können abhängig von Untersuchungsziel und Prüfungsmethode unterschiedlich sein. Sind zum Beispiel zur Analyse der Zusammensetzung von Verkrustungen an der Steinoberfläche lediglich geringe Teile des Steins erforderlich, die sich leicht ablösen lassen, so müssen zur Prüfung mechanischer Festigkeiten größere Steinproben ausgebaut werden. Auch die Anzahl notwendiger Proben bestimmt die Menge auszubauenden Steinmaterials. In jedem Fall sind mit einer Probenentnahme Zerstörungen am Bauwerk verbunden. Unter Beachtung des Grundsatzes der möglichst weitgehenden Bewahrung der Originalsubstanz sollte die Entnahme der Probenanzahl und -größe soweit wie möglich minimiert oder ganz darauf verzichtet werden.

Die Entwicklung zerstörungsfreier Prüfverfahren ist zur Zeit ein wichtiges Forschungsziel. Die Ultraschall-(US)-Verfahren, die vor allem im Rahmen der *zerstörungsfreien Werkstoffprüfung* genutzt werden, werden heute zunehmend eingesetzt, um den Verwitterungszustand von Marmor zu beurteilen. Eine weitere Entwicklung gelingt durch die Einführung der US-Tomographie. Durch dieses Verfahren lassen sich gefährdete Bereiche im Stein, die durch unterschiedliche Longitudinalwellengeschwindigkeiten charakterisiert sind, recht gut erkennen.

Diese Forschung hat daher in erster Linie die praktische Durchführung der US-Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Marmor beschrieben, aber auch die physikalischen Hintergründe der Verwitterungsprozesse aufgeklärt, die von thermischen und Frost-Tau-Wechsel-Belastungen ausgelöst werden und starken Einfluß auf die Konservierung haben. Für die Untersuchungen sind sechs seit 1991 am Institut für Geologie in München exponierte 20x20x20 cm Carrara-Marmorwürfel (P1 bis P5) aus dem EUROMARBLE Projekt, ein frischer 20x20x20 cm Carrara-Marmorwürfel, der keiner Verwitterung-Exposition ausgesetzt war (P6), zwei Marmorkugeln aus Carrara mit 10 cm Durchmesser (P8) und aus Laaser mit 5 cm Durchmesser (P9) sowie sechs abgefallene Grabkreuze, über 100 Jahre exponiert im alten Südfriedhof in München (P7) ausgewählt worden. Das Expositionsprogramm EUROMARBLE (Sneathlage & Simon 1992) will eine bessere Vorstellung der physikalischen, chemischen und biologischen Verwitterungsprozesse entwickeln, die für die zuckerkörnige Verwitterung verschiedenster Marmore verantwortlich sind. Zur Untersuchung wurden, außer *US-Verfahren* (US-Tomographie) folgende Laborverfahren angewandt: *Prüfen auf Gewicht und Struktur* (Dichte, Porosität und Porengröße-

analyse), *Prüfen auf mechanischer Festigkeit* (Biegezugfestigkeit), *Prüfen auf Wasseraufnahme* (Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und unter Vakuum, Sättigungswert), *Prüfen auf Temperaturverhalten* (thermische Belastung), *Prüfen auf Verwitterungsbeständigkeit* (Frost-Tau-Wechsel-Versuch), *Prüfen mit besonderen Hilfsmitteln / Geräten* (Dünnschliffe, Universaldrehtischmessungen, Stereonetz und Rasterelektronenmikroskopie) und *Prüfen auf Konservierbarkeit* (Aufnahme und Wirkung von Festigungsmitteln). Es konnten schöne Korrelationenkriterien zwischen den Ergebnissen der angewandten Untersuchungsmethoden festgestellt werden.

Der Verwitterungszustand des Marmors wurde mit Hilfe der US-Tomographie, die an jedem Marmorwürfel und zwei Marmorkugeln ausgeführt wurde, charakterisiert. Wie die Untersuchungen ergaben, weisen die Meßwerte eine deutliche p-Wellen-Geschwindigkeitsanisotropie auf. Calcit, als der wesentliche gesteinsbildende Mineral in Marmor, zeigt eine Richtungsabhängigkeit der US-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit verschiedener kristallographischer Richtungen auf. Die Ultraschallgeschwindigkeit zeigt im Calcitkristall ein Maximum von $v_p = 7,73$ Km/s parallel zur a-Achse und ein Minimum $v_p = 5,71$ Km/s parallel zur c-Achse. Die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen US-Geschwindigkeit ist ca. 2 Km/s (Siegesmund et al. 1997). Mit Hilfe der gemessenen maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten wurde der Anisotropiekoeffizient berechnet: $(v_{\max} - v_{\min}) / v_{\text{mean}}$. Die Anisotropie-Effekte der untersuchten Marmore sind, je nach Ausprägung der kristallographischen Orientierung von Calcitkristallen, unterschiedlich groß. Den höchsten Anisotropiekoeffizient weist der Würfel P1 (0,5) und den niedrigsten der Würfel P6 (0,2) auf, da dieses keiner Verwitterung-Exposition ausgesetzt war. Es muß aber berücksichtigt werden, daß der hohe Anisotropiekoeffizient nicht dem hohen Grad der Orientierung von Calcitkristallen entspricht, weil die Dichteinhomogenitäten sowie die erhöhten oder voringeten Korn-Korn-Kontakte, hervorgerufen durch die Metamorphose oder durch die Verwitterung selbst, einen starken Einfluß auf die Ermittlung dieses Wertes ausüben. Nach makroskopischen Beobachtungen an dem Würfel P5, der einen Anisotropiekoeffizient von 0,5 aufweist, wurde festgestellt, daß das Gefüge Relikte der Stylolithe vortetamorpher Sedimentgefüge enthält.

Beide Kugeln lieferten den Anisotropiekoeffizient von 0,3. Die Anisotropie der Kugeln, die durch thermisch-induzierte Risse (thermische Belastung erfolgte 2 Stunden auf 500 °C) stark verändert wurde, konnte den Anisotropiekoeffizientwert in der Carrarakugel 0,9 und in der Laaserkugel 0,8 erreichen.

Messungen an den Marmorwürfeln P1, P2, P3, P4 und P5 haben gezeigt, daß die US-Geschwindigkeiten im Zeitraum von 1991-1997 bzw. 1997-2000 um 1 km/s bzw. 0,5 km/s im Vergleich zu dem Referenzmarmorwürfel P6 abgenommen haben. Die abgefallenen Grabkreuze aus dem Alten Südfriedhof zeigen ca. 2 km/s geringere US-Geschwindigkeit, was für ca. 100 Jahre Exponierungsdauer einen sehr guten Zustand bedeutet. Diese Ergebnisse unterstreichen die Skala von Köhler (1988), mit deren Hilfe der Verwitterungsgrad des Marmors beurteilt werden kann.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß das Verfahren der US-Geschwindigkeitsmessung geeignet ist, die durchschnittliche Orientierung von Calcitkristallen an Marmor zu bestimmen. Die Methode erfordert jedoch eine ausreichende tomographische Messung in allen Richtungen im Marmorwürfel oder in der Marmorkugel. Die nach US-Tomographie erhaltenen US-Meßwerte ermöglichten die Bestimmung der durchschnittlichen Orientierung von Calcitkristallen an Marmorproben. Um die Orientierung von Calcitkristallen zu bestimmen, müssen die US-Geschwindigkeiten in den orientierten Proben richtungsabhängig sein. Da bei der US-Tomographie die Unterschiede zwischen der maximalen und der minimalen US-Geschwindigkeit in XY Ebene der Würfel P1, P2 und P6 sehr gut auftraten, wurden die Dünnschliffe parallel zu dieser Ebene orientiert. Es wurden 150 bis 170 optische c-Achsen pro Dünnschliff ermittelt. Die Darstellung der Orientierungsdaten der US-Meßrichtungen (eines Maximums der maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten) und der ermittelten optischen c-Achsen erfolgte in Form von Polpunktdiagrammen im Schmidt'schen Netz in der unteren Halbkugelprojektion. In den Würfeln P2 und P6 korrespondieren die Ergebnisse der US-Geschwindigkeiten sehr gut zu Universaldrehtischmessungen der optischen c-Achsen, bei denen die minimale US-Geschwindigkeit der Richtung der c-Achse entspricht. Ausnahmsweise sind bei dem Würfel P1 das Maximum von minimalen US-Geschwindigkeiten und optischen c-Achsen ca. 30° von einander entfernt. Die Verwitterungserscheinungen bewirkten die Abweichung zwischen den Ergebnissen dieser beiden Methoden.

An der Carrara- und Laaserkugel traten die Häufungen der maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten um angenähert 90° von einander auf. Nach der thermischen Belastung wurden die US-Geschwindigkeiten der Temperaturen auf 500°C hoch belasteten Kugeln verschlechtert. Die Meßwerte der US-Messungen entlang der Großkreise lagen zwischen 0,5 und 0,99 Km/s an der Carrarakugel und 1,0 und 1,49 Km/s an der Laaserkugel. Es waren nur die Häufung minimaler US-Geschwindigkeiten an der Carrarakugel und maximaler US-Geschwindigkeiten an der Laaserkugel bemerkbar. Die starke Verringerung der US-Gesch-

windigkeiten durch thermisch-induzierte Risse veränderte die Differenzpolfigur der Geschwindigkeitsverteilungen, da die Geschwindigkeitsverteilung eine geringe Anisotropie zeigte. Die Werte der Verteilungs-Konturliniendiagramme im Schmidt'schen Netz der minimalen und maximalen US-Geschwindigkeiten lassen erkennen, daß die Einregelung der Calcitkristalle bei den Würfeln stärker als bei den Kugeln ausgeprägt ist.

In den Ebenen parallel zum Maximum der minimalen US-Geschwindigkeiten bzw. kristallographischen Orientierung von Calcitkristallen sind die US-Geschwindigkeiten richtungsabhängig, d.h. es konnte eine signifikante Geschwindigkeitsanisotropie nachgewiesen werden. Die Richtungen minimaler und maximaler US-Geschwindigkeiten sind um genau 90° voneinander verschieden und fallen im Rahmen der Meßgenauigkeit mit den Orientierungsdaten (Streich- und Einfallrichtung) zusammen. Legt man die Z-Achse in die Richtung von $v_{l,max}$ und die Y-Achse in die Richtung $v_{l,min}$, ist das Koordinatensystem eindeutig als Bezugssystem der elastischen Anisotropie festgelegt. Anhand von Durchschallungen konnte ermittelt werden, daß die Calcitkristalle in allen Bohrkernen der drei Marmorwürfel gut orientiert sind (Sheremeti-Kabashi et al. 2000).

Die Anisotropieeffekte, d.h. die Richtungen maximaler und minimaler US-Geschwindigkeiten korrelierten sowohl nach der thermischen Belastung als auch nach der Behandlung sehr gut miteinander. Die US-Geschwindigkeiten sind stark richtungsabhängig. Die Differenzen zwischen minimaler und maximaler US-Geschwindigkeit betragen über 1Km/s. Mit den nach der thermischen Belastung erhaltenen US-Meßwerten konnte nachgewiesen werden, daß die US-Geschwindigkeiten senkrecht zu c-Achsen 10-20% mehr als parallel zu c-Achsen abgenommen haben. Da die untersuchten Marmorproben einen hohen Regelungsgrad der Calcitkristalle aufweisen, wären konkret thermisch-induzierte Risse senkrecht zur Orientierung der c-Achsen zu erwarten (Sigesmund et al. 1997). Die Ursachen liegen in den Anisotropien der Mikrostruktur, wobei sowohl die Anisotropien im Calcitkorngerüst als auch die im Porensystem von Bedeutung sind.

Calcit als hauptgesteinsbildendes Mineral von Marmor ist thermisch extrem anisotrop: der Wärmeausdehnungskoeffizient parallel (\parallel) bzw. normal (\perp) zur kristallographischen c-Achse beträgt $\alpha_{\parallel} = 26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bzw. $\alpha_{\perp} = -6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (Kleber 1959), d.h. Calcit kontrahiert bei Erwärmung normal zur c-Achse und expandiert parallel zur c-Achse. Bei einer Temperaturzunahme von etwa 650°C zeigt Calcit eine lineare thermische Expansion parallel zur c-Achse von 2% und kontrahiert 0,5% normal zur c-Achse (Bilbija 1984). Wie Widhalm

(1996) nachweisen konnte, ist die maximale richtungsabhängige thermische Ausdehnung von Marmor etwas mehr als doppelt so groß wie die minimale. Ein solches Verhalten führt entweder zu Spannungen zwischen zwei Kristallen (nämlich dort, wo sich beide ausdehnen), oder zu einer Auflockerung der Kornbindung zwischen beiden. Thermische Spannungen bewirken so Zergleitungen im Kristall selbst und ein Abheben einzelner Kristalle voneinander (rasterelektronenmikroskopische Beobachtungen bestätigen dies). Bei der subvalenten Bindung entstehen auf diese Weise Mikrorisse, so daß die Kohäsion der Kristallite durch Korndeformation und Kornbewegungen entlang der Korngrenzen geschwächt wird. Bei der prävalenten Bindung werden die Körner durchgerissen. Es ist deshalb sehr wichtig zu wissen, wie die Calcitkristalle innerhalb des Marmors angeordnet sind, und ihre Korngröße, Korngrenzgeometrie und kristallographische Orientierung zu kennen.

Bei Marmoren mit einem großen Regelungsgrad der Calcitkristalle entsteht ein System von Parallelmikrorissen im Gesteininneren. Mit der Zunahme der Zerstörung des Gefüges, d. h. durch das Erweitern der Mikrorisse entlang der Korngrenzen der Calcitkristalle, erhöht sich die Anzahl der Poren. Die Unterschiede in der Porosität wurden durch die Porenradienverteilungen und die Wasseraufnahme charakterisiert. Da die thermische Belastung 2 Stunden auf 500 °C erfolgte, ist keine Häufigkeit der kleinen Porenradienklassen 0,013-1,25 µm zu beobachten. Es bildet sich ein Porenradiusmaximum bei 5-6 µm heraus. Marmore besitzen Plattenspaltporen. Die Kapillarkraft ist bei den Plattenspaltporen kristalliner Naturwerksteine etwa doppelt so groß wie bei den „normalen“ zylinderförmigen Poren von Sedimentgesteinen (Poschlod 1990). Daher können das Wasser und die Schadstofflösungen relativ schnell und tief in das Innere des Steins eindringen. Letztlich führt die verstärkte hygrische Verwitterung zu „Verzuckerung“ und damit zum vollständigen Zerfall.

Die REM-Beobachtungen zeigen innerhalb der Proben P7, über 100 Jahre exponiert im alten Südfriedhof in München, kleine Nester der Hohlräume, die durch Fließkanäle miteinander verbunden sind. Dieser Vorgang läßt sich experimentell durch eine erhöhte Wasseraufnahme nachweisen. In diesen Proben, die während der Freibewitterung mehreren Aufheizzyklen ausgesetzt waren, sind bei der neuerlichen Erwärmung geringe weitere Korngrenzerisse aufgetreten. Auf der einen Seite kann es sein, daß bei anisotrop-thermischen Expansion-Kontraktion-Zyklen während der Freibewitterung fast alle resultierenden Spannungen an den Korngrenzen abgebaut wurden. Auf der anderen Seite kann es sein, daß wegen der großen Anzahl der Porenräume genügend Freiräume für die neuen thermischen Dehnungsbewegungen bestehen. Im Einklang mit den dilatometrischen Messungen konnte Widhalm et.

al. (1996) feststellen, daß thermisch induzierte Gefügauflockerungen primär bei der ersten Erwärmung erfolgen. Wiederholte Erwärmungen führen im wesentlichen zu keiner weiteren Schädigung des Gefüges.

Zusammenfassend kann die thermische Wechselbeanspruchung alleine nicht für die beobachteten Schäden an Marmor im Außenbereich verantwortlich sein, ruft aber eine Öffnungsweite der Mikro- und Kapillarporen hervor, die Marmor für die nachfolgenden schädigenden Einflüsse von Wasser bei Temperaturschwankungen (z.B. Frost), empfindlicher macht.

Fassaden- und Grabplatten sind ebenfalls starken Spannungen unterworfen, wenn die Art ihrer Befestigung ihnen keinen Spielraum für die Wärmedehnung bietet. Wenn solche Marmorplatten in ihrer Ausdehnung behindert werden, verbiegen sie sich und bilden feine Oberflächenrisse aus, wodurch eine weitere Zerstörung begünstigt wird. Mehrere miteinander starr verbundene Tafeln verhalten sich dabei so wie ein ganzes Stück. Bei der Montage von Marmorplatten an Außenfassaden sollten an den Verbindungsplatten genügend Freiräume zur Verfügung stehen, so das die entstehenden thermischen Dehnungsbewegungen gefahrlos abgebaut werden können. Auch der Fugenmörtel muß in seinen Eigenschaften möglichst auf die Marmoreigenschaften abgestimmt werden, damit die Haftung an den Verbindungsflächen durch unterschiedliche thermische Dehnung nicht abreißen kann. Aufgrund der kristall-thermischen Eigenschaften von Calcit, wäre es daher empfehlenswert, das unterschiedliche Wärmeausdehnungsverhalten bei der Verankerung der Platten berücksichtigen zu können. Es sollten daher von den Marmorherstellern Voruntersuchungen durchgeführt werden, um eine durchschnittliche Orientierung von Calcitkristallen anzugeben. Das zerstörungsfreie US-Verfahren erlaubt das. Zu wünschen wäre auch eine Angabe des maximalen und minimalen Wärmeausdehnungskoeffizienten α .

Die Porenradienverteilungen sind für die Beurteilung des Verwitterungsverhaltens von Marmoren von großer Bedeutung. Eine wichtige Rolle spielen auch die Porenformen. Marmor besitzt Plattenspaltporen (Poschlod 1990). Zur Berechnung der Porenradienverteilungen ist die Ausgangsformel, die auf einem Zylinderporen-Modell basiert, hinsichtlich der bei kristallinen Naturwerksteinen vorliegenden Plattenspaltporen modifiziert worden. Die Messungen wurden dankenswerterweise von H. Lorenz durchgeführt. Meßtechnisch wurden mit der Quecksilberhochdruckporosimetrie Poren mit einem Radius zwischen 0,03 und 200 μm erfasst. Frische Marmorproben besitzen ein deutliches

Porenradienmaximum zwischen 0,08 und 0,12 μm . Die Verteilung der Proben P1 und P2, seit 1991 exponiert im Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie in München, zeigt in der Porenradienklasse je Porenradienklasse zwischen 0,20 und 0,31 μm . Auffällig ist die Porenradienverteilung der Probe D1 (P7), über 100 Jahre exponiert im alten Südfriedhof in München, mit einem Porenradienmaximum bei 3,15 μm . Das weist ein Beispiel der „Zuckerbildung“ des Marmors, der einen hohen Anteil an Kapillarporen hat, auf.

Anhand des Vergleiches zwischen Porenradienverteilungen nach der Erwärmung und Frost-Tau-Wechsel-Belastung wurde festgestellt, daß der Anteil an Poren senkrecht zu c-Achsen nach der Erwärmung höher liegt. Dies kann mit der Anisotropie der Calcitkristalle erklärt werden (siehe Abschn.3.1.3.). Da nach den 100 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen parallel zu c-Achsen die Porenradien-verteilungen überwiegend höher als senkrecht zu c-Achsen sind, kann gefolgert werden, daß Marmor bei den Frost-Tau-Wechsel-Versuchen ein langsames Mikrorißwachstum senkrecht zur c-Achse zeigt.

Die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen trockenen und wassergesättigten Proben schwankt zwischen 0,5- 2,0 Km/s. Erwartungsgemäß ist die Zunahme der US-Geschwindigkeiten in den frischen Proben (P6) am niedrigsten und in den Proben (P7), über 100 Jahre exponiert im alten Südfriedhof in München am höchstens. Während in P6 US-Geschwindigkeiten bis ca. 28% steigen, läßt sich eine Zunahme der US-Geschwindigkeiten in den Proben aus den alten Südfriedhof (P7) bis 70% beobachten, da diese am meisten Wasser aufgenommen haben.

Bei den Ergebnissen der US-Geschwindigkeitsanisotropie als Funktion der Frost-Tau-Wechsel-Zyklenzahl wurde festgestellt, daß die wassergesättigten Proben in einigen Fällen keine deutliche Geschwindigkeitsanisotropie nachweisen. Man beobachtete eine stark mit der Zyklenzahl Veränderung der US-Geschwindigkeit. Eine Erklärung hierfür ist, daß die hohe Zyklenzahl bei Proben zu einer stärkeren Gefügeschwächung durch eine größere Anzahl von kleineren Mikrorissen führte (Porenradienverteilungen bestätigen dies). Vermutlich spielten die unterschiedlichen Feuchteveränderungen und Temperaturen in den Marmorproben während der Zyklenzahl eine große Rolle, so daß sich Ultraschall unterschiedlich schnell fortpflanzte. Eine andere Ursache ist, daß der Risseinfluss bei wassergesättigten Gesteinsproben geringer als bei trockenen Proben ist. Die Anisotropieeffekte, d.h. die Richtungen der maximalen und minimalen US-Geschwindigkeiten korrelieren aber in den trockenen Proben vor und nach 100 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen sehr gut miteinander. Die US-Geschwindigkeiten haben ca. 6% höher parallel zu c-Achsen abgenommen. Die maximalen US-Gesch-

windigkeiten betragen Werte zwischen 2,7 und 3,2 Km/s und die minimalen zwischen 2,0 und 2,4 Km/s.

Mit den Ergebnissen der weiterführenden Versuchsreihen zur Frost-Tau-Wechsel-Verwitterung konnten Masse- und Porenstrukturveränderungen nachgewiesen werden. Die Mittelwerte der Gewichtsverluste an den Proben P1, P2 und P6 waren praktisch fast gleich. Die Proben verlieren an der Masse bis 0,15%. Erhöhter Masseverlust läßt sich bei der Probe P7 beobachten, die an der Masse ca. 0,23% verliert. Die zusätzliche Registrierung der Veränderungen der US-Geschwindigkeiten erlaubte eine zuverlässigere Unterscheidung des Verwitterungsverhaltens der einzelnen Marmorproben. Veränderungen der US-Geschwindigkeiten während einer Frost-Tau-Wechsel-Verwitterung können demnach auf Veränderung der Porenradienverteilungen der gemessenen Proben zurückgeführt werden.

Für alle Proben wurde eine sich mit zunehmender Versuchsdauer intensivierende Veränderung der Porenradienverteilungen registriert. In den Diagrammen ist zu beachten, daß die Poren mit einem Radius $>200 \mu\text{m}$ messbedingt nicht erfaßt werden konnten. Aus den Verteilungshistogrammen ist aber ersichtlich, daß in diesem Bereich vielleicht auch größere Poren vorhanden sein sollten. Bezug auf Abbildungen 47-50 ist für die übrigen 4 Marmorproben eine deutliche Zunahme der Mikro- und Kapillarporen zu beobachten. Die maximalen Veränderungen liegen für eine Porenklasse bei über 1 bis 5 Vol. % im Bereich zwischen $0,05\text{-}5 \mu\text{m}$ und über 1 vol.% bis 9 vol. % im Bereich $5\text{-}200 \mu\text{m}$.

Bei den mit Acrylharz, Polykieselsäureester und „Bologna Coctail“ gefestigten Marmorproben läßt sich mit Hilfe der US-Messung und der porenraumbezogenen Meßwerte überprüfen, inwieweit eine Festigung im Sinne einer Konservierungsmaßnahme bewirkt wurde. Obwohl das Festigermaterial „Bologna Coctail“ vermutlich nicht tief eindringen konnte (siehe Abb. 20), konnte durch Postbehandlungsultraschalltomographie (siehe Abb. 20, 58-61) nachgewiesen werden, daß die Behandlung mit „Bologna Coctail“ im Unterschied zur Behandlung mit PKSE und Acrylharz zu einer deutlichen Verbesserung der US-Geschwindigkeiten des Materials führte. Da nach thermischer Belastung die US-Messungen der Marmorproben auf eine völlige Gefügezerstörung hinwiesen, konnte auch nicht eine ausreichende Festigung erwartet werden. Die Konservierung konnte nicht die US-Geschwindigkeiten wieder auf Werte des bruchfrischen Marmors anheben, sie kann aber trotzdem als wirksam eingestuft werden.

5. Literaturverzeichnis

- Bilbija N., 1984. Tehnička petrografija. Svojstva i primene Kamena. Izdaje IRO „Naučna knjiga“, Beograd
- Cramer Th., 1998. Die Marmore des Telephosfrieses am Pergamonaltar. Berliner Beiträge zur Archäometrie. Band 15, Berlin
- DIN 52102. Bestimmung von Roh-, Reindichte und Porosität
- DIN 52103. Bestimmung der Wasseraufnahme
- DIN 52104. Frost-Tau-Wechsel-Versuch
- Ettl H., Schuh H. 1996. Siegestor München. Ultraschall-Laufzeitmessungen an den Marmorreliefplatten. Gutachten im Labor Dr. Ettl - Dr. Schuh. München
- Fitzner B., 1988. Untersuchung der Zusammenhänge zwischen dem Hohlraumgefüge von Natursteinen und physikalischen Verwitterungsvorgängen. Mitt. Ing. u. Hydrogeol. 29, Aachen
- Grimm W. D., 1990. Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitshefte des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege 50, München
- Hoffman K., 1987. Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- Ibach W. H., 1993. Die Acrylharz-Volltränkung, ein bewährtes Verfahren. Interacryl. Natursteinsanierung, Bern
- Kläsener R., 1997. Relaxation, Mikrorisse und Fluide. Parameter der Gesteinsfestigkeit und Bohrlochstabilität der KTB. Mitt. Ing. u. Hydrogeol. 66, Aachen
- Kleber W., 1959. Einführung in die Kristallographie. VEB Verlag Technik, Berlin
- Koblischek J. P., 1997. Festigen von Denkmälern aus morbide Marmor vor Ort. Interacryl. 4 Fachtagung. Natursteinsanierung, Bern
- Kote Dh., Shollo M., 1971. Petrologjia e shkëmbinjve magmatik dhe metamorfik. Universiteti i Tiranës. Fakulteti Gjeologji-miniera, Tiranë

- Köhler W., 1991. Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Postdam-Sanssouci. Berichte zur Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland 2. Steinschäden-Steinkonservierung, 50-54, Hannover
- Köhler W., 1988. Preservation Problems of Carrara-Marble Sculptures in Potsdam-Sanssouci („Radical Structural Destruction“ of Carrara-Marble). Proceedings VIth Intern. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torún 12, 653-662
- Mausfeld S., Hoffmann S., 1992. Der Einfluß der diagenetischen Entwicklung auf den Mineralbestand, das Gefüge und den Porenraum des Regensburger Grünsandsteins. Jahresberichte Steinerfall-Steinkonservierung, Berlin
- Neuman R., 1964. Geologie für Bauingenieure. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin München
- Poschlod K., 1990. Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluß Auf die Verwitterung. Diss. an der Fak. der Geowissenschaften L.M.U., München
- Quervain F., 1967. Technische Gesteinskunde. Verlag Birkhäuser, Basel
- Ritter H., 1992. Die Marmorplatten sind falsch dimensioniert. Stein, 1, 18-19
- Rossi-Manaresi R., Alessandrini G., Fuzzi s., Peruzzi R., 1979. Assessment of the effectiveness of some preservative for Marble and Limestone. Deterioramento e conservazione della pietra, atti del 3° congresso internazionale, 358-376
- Sattler L., 1992. Untersuchungen zur Wirkung und Dauerhaftigkeit von Sandsteinfestigungen mit Kieselsäureester. Unveröffentl. Diss. an der Fak. der Geowissenschaften L.M.U., München
- Schön J., 1983. Petrophysik-Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralien. Enke Verlag, Stuttgart
- Schuh H., 1987. Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen. Diss. an der Fak. der Geowissenschaften L.M.U., München
- Siegsmund S., Vollbrecht A., Ulemeyer K., Weis T., Sobott R., 1997. Die Anwendung der geologischen Gefügekunde für die Charakterisierung natürlicher Werksteine – Fallbeispiel Kauffunger Marmor. Int. J. f. Restoration of Buildings and Monuments 3, 269-292

- Sheremeti-Kabashi F., Snethlage R., 2000. Determination of structural anisotropy of Carrara marble with ultrasonic measurements. 9th International Congress on Deterioration of Stone, Venice
- Simon S., Snethlage R., 1996. Marble weathering in Europe Results of the EURO CARE-EUROMARBLE exposure programme 1992-1994. Euromarble Workshop 6, 1-9, München
- Snethlage R., Simon S., 1992. EUREKA Project EU 496 EURO CARE-EUROMARBLE. Proc. Of the 7th Intern. Congr. On Deterioration and Conservation of Stone, 21-27, Lisbon
- Snethlage R., Ettl H., Sattler L., 1999. Ultraschallmessungen an PMMA-getränkten Marmor-Skulpturen. Z. dt. geol. Ges. 150/2, 387-396, Stuttgart
- Trehwitt J., Tuchmann J., 1988. Amoco may replace marble on Chicago headquarters. Engineering News Record, 11-12
- Weber H., 1985. Steinkonservierung. Der Leitfaden zur Konservierung und Restaurierung von Natursteinen. Expert Verlag, Sindelfingen
- Widhalm C., Tschegg E., Eppensteiner W., 1996. Anisotropic thermal expansion causes deformation of marble cladding. J. of Performance of Constructed facilities, ASCE, 10, 5-10
- Wimmenauer W., 1985. Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine. Enke Verlag, Stuttgart
- Weiss T., Rasolofosaon P., Siegesmund S. 2001. Thermal microcracking in Carrara marble. Z. dt. geol. Ges. 152/2-4, 621-636, Stuttgart
- Zeza U., 1990. Physical-mechanical properties of quarry and building stones. Advanced workshop „Analytical methodologies for the Investigation of Damaged Stones”, VENIALE & ZEZZA ed., Pavia, 20

6. Anhangverzeichnis

	Seite
<i>Anhang 1:</i> Ultraschallmeßwerte im Carrara-Marmorwürfel P1	108
<i>Anhang 2:</i> Ultraschallmeßwerte im Carrara-Marmorwürfel P2	109
<i>Anhang 3:</i> Ultraschallmeßwerte im Carrara-Marmorwürfel P3	110
<i>Anhang 4:</i> Ultraschallmeßwerte im Carrara-Marmorwürfel P4	111
<i>Anhang 5:</i> Ultraschallmeßwerte im Carrara-Marmorwürfel P5	112
<i>Anhang 6:</i> Ultraschallmeßwerte im Carrara-Marmorwürfel P6	113
<i>Anhang 7:</i> Ultraschallmeßwerte in den Bohrkernen aus abgefallenen Grabkreuzen im Alten Südfriedhof in München (P7) und aus den Würfeln P1, P2 und P6	114
<i>Anhang 8:</i> Ultraschallmeßwerte in den Bohrkernen aus den Proben P1, P2, P6 und P7	115
<i>Anhang 9a:</i> Ultraschallmeßwerte in der Carrara-Marmorkugel P8 (XY-Ebene)	116
<i>Anhang 9b:</i> Ultraschallmeßwerte in der Carrara-Marmorkugel P8 (YZ-Ebene)	117
<i>Anhang 9c:</i> Ultraschallmeßwerte in der Carrara-Marmorkugel P8 (XZ-Ebene)	118
<i>Anhang 10a:</i> Ultraschallmeßwerte in der Laaser-Marmorkugel P9 (XY-Ebene)	119
<i>Anhang 10b:</i> Ultraschallmeßwerte in der Laaser-Marmorkugel P9 (YZ und XZ -Ebene)	120
<i>Anhang 11a:</i> Ultraschallmeßwerte in der Carrara-Marmorkugel P8 (Messungen entlang Meridianen M1-M4)	121
<i>Anhang 11b:</i> Ultraschallmeßwerte in der Carrara-Marmorkugel P8 (Messungen entlang Meridianen M5-M8)	122
<i>Anhang 12:</i> Ultraschallmeßwerte in der Laaser-Marmorkugel P9 (Messungen entlang Meridianen M1-M8)	123
<i>Anhang 13a:</i> Ultraschallmeßwerte in den orientierten Bohrkernen aus den Marmorwürfeln P1, P2 und P6 (Präerwärmung)	124
<i>Anhang 13b:</i> Ultraschallmeßwerte in den orientierten Bohrkernen aus den Marmorwürfeln P1, P2 und P6 (Posterwärmung)	125

<i>Anhang 13c:</i>	Ultraschallmeßwerte in den orientierten Bohrkernen aus den Marmorwürfeln P1, P2 und P6 (Postbehandlung)	126
<i>Anhang 14:</i>	Meßwerte der Wasseraufnahme unter Atmospheredruck der Marmorproben ..	127
<i>Anhang 15:</i>	Porositätsmeßwerte der Marmorproben vor und nach der Behandlung	128
<i>Anhang 16:</i>	Meßwerte der Wasseraufnahme unter Vakuum, Roh- und Reindichte, Sättigungsgrad und Porosität; Biegezugfestigkeitsmeßwerte; Meßwerte der Konservierungsmittelaufnahme	129
<i>Anhang 17:</i>	Veränderungsmeßwerte der Masse im Verlauf der Frost-Tau-Wechsel-Versuche der Marmorproben	130
<i>Anhang 18a:</i>	Veränderungsmeßwerte der US-Geschwindigkeit im Verlauf der Frost-Tau-Wechsel- Versuche der Marmorproben (0 – 40 FTW-Zyklen)	131
<i>Anhang 18b:</i>	Veränderungsmeßwerte der US-Geschwindigkeit im Verlauf der Frost-Tau-Wechsel- Versuche der Marmorproben (50 – 80 FTW-Zyklen)	132
<i>Anhang 18c:</i>	Veränderungsmeßwerte der US-Geschwindigkeit im Verlauf der Frost-Tau-Wechsel- Versuche der Marmorproben (90 – 100 FTW-Zyklen)	133
<i>Anhang 18d:</i>	Mittelwerte der US-Geschwindigkeiten im Verlauf der Frost-Tau-Wechsel- Versuche der Marmorproben	134
<i>Anhang 19a:</i>	Veränderungsmeßwerte der US-Geschwindigkeit im Verlauf der Frost-Tau-Wechsel- Versuche in den orientierten Bohrkernen aus den Marmorwürfeln P1, P2 und P6 (0 – 50 FTW-Zyklen)	135
<i>Anhang 19b:</i>	Veränderungsmeßwerte der US-Geschwindigkeit im Verlauf der Frost-Tau-Wechsel- Versuche in den orientierten Bohrkernen aus den Marmorwürfeln P1, P2 und P6 (75 – 100 FTW-Zyklen)	136
<i>Anhang 20:</i>	Quecksilberporosimetrischemeßwerte der Marmorproben	137
<i>Anhang 21:</i>	Quecksilberporosimetrischemeßwerte in thermisch und Frost-Tau-Wechsel-belasteten Marmorproben (P1, P2 und P7)	138
<i>Anhang 22:</i>	Quecksilberporosimetrischemeßwerte im Verlauf der Frost-Tau-Wechsel - Versuche in den Marmorproben (P1, P2, P6 und P7)	139

P R O B E P 1			
XY- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)
B3 - D5	100	26,8	3,73
D4	115	31,2	3,69
D3	142	36,0	3,94
D2	175	41,6	4,21
D1	213	48,8	4,36
E5	221	51,2	4,32
E4	207	45,6	4,54
E3	202	44,8	4,51
E2	207	44,8	4,62
E1	219	48,8	4,49
C5	215	48,0	4,48
C4	178	37,6	4,73
C3	143	33,6	4,26
C2	117	29,6	3,95
C1	104	27,4	3,80
C3 - E1	99	21,6	4,58
E2	117	26,8	4,37
E3	145	34,8	4,17
E4	179	43,6	4,11
E5	205	53,2	3,85
D1	220	55,2	3,99
D2	207	51,6	4,01
D3	202	51,2	3,95
D4	207	53,2	3,89
D5	219	54,8	4,00
B1	212	52,4	4,05
B2	177	42,4	4,17
B3	147	32,4	4,54
B4	116	24,4	4,75
B5	100	20,4	4,90
E3 - D1	99	24,0	4,13
D2	116	28,8	4,03
D3	142	32,8	4,33
D4	175	38,4	4,56
D5	213	46,4	4,59
B1	217	46,8	4,64
B2	205	44,0	4,66
B3	202	43,6	4,63
B4	207	45,6	4,54
B5	220	50,0	4,40
C1	215	50,0	4,30
C2	179	40,4	4,43
C3	145	34,4	4,22
C4	117	29,6	3,95
C5	105	26,0	4,04
D3 - B1	100	23,8	4,20
B2	113	26,4	4,28
B3	142	35,6	3,99
B4	173	45,6	3,79
B5	212	55,2	3,84
C1	224	56,8	3,94
C2	207	54,4	3,81
C3	202	51,2	3,95
C4	208	52,0	4,00
C5	222	52,0	4,27
E1	210	50,4	4,17
E2	173	41,2	4,20
E3	138	33,6	4,11
E4	108	26,4	4,09
E5	101	21,2	4,76

P R O B E P 1			
YZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)
A8 - B6	102	22,8	4,47
B7	117	27,2	4,30
B8	144	35,6	4,04
B9	179	46,0	3,89
B10	215	57,2	3,76
F1	219	59,2	3,70
F2	210	55,2	3,80
F3	201	53,2	3,78
F4	204	53,6	3,81
F5	215	57,2	3,76
E10	213	55,2	3,86
E9	176	46,0	3,83
E8	140	36,4	3,85
E7	114	27,2	4,19
E6	96	22,4	4,29
B8 - F1	99	24,4	4,06
F2	113	28,0	4,04
F3	138	34,0	4,06
F4	173	40,4	4,28
F5	211	46,4	4,55
E10	219	48,8	4,49
E9	205	47,2	4,34
E8	202	44,8	4,51
E7	207	47,2	4,39
E6	220	52,0	4,23
A6	216	51,6	4,19
A7	176	42,4	4,15
A8	140	35,6	3,93
A9	115	30,8	3,73
A10	100	26,0	3,85
F3 - E10	105	24,8	4,23
E9	116	26,8	4,33
E8	145	37,2	3,90
E7	176	44,0	4,00
E6	213	55,2	3,86
A6	222	56,4	3,94
A7	206	53,2	3,87
A8	201	54,0	3,72
A9	205	54,8	3,74
A10	218	57,6	3,78
B6	209	53,6	3,90
B7	173	42,4	4,08
B8	140	32,8	4,27
B9	112	25,6	4,38
B10	99	20,8	4,76
E8 - A6	99	24,4	4,06
A7	114	28,8	3,96
A8	141	34,4	4,10
A9	182	43,2	4,21
A10	210	49,6	4,23
B6	218	51,2	4,26
B7	205	45,2	4,54
B8	202	43,6	4,63
B9	206	44,8	4,60
B10	218	48,8	4,47
F1	215	48,0	4,48
F2	176	40,8	4,31
F3	142	34,4	4,13
F4	116	28,8	4,03
F5	99	21,6	4,58

P R O B E P 1			
XZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)
A3 - C6	106	28,4	3,73
C7	120	30,4	3,95
C8	145	39,2	3,70
C9	179	47,6	3,76
C10	215	57,2	3,76
F6	221	57,6	3,84
F7	207	54,8	3,78
F8	201	53,2	3,78
F9	205	54,8	3,74
F10	219	58,8	3,72
D10	211	58,4	3,61
D9	171	48,4	3,53
D8	139	38,8	3,58
D7	111	31,6	3,51
D6	100	31,2	3,21
C8 - F6	99	26,0	3,81
F7	119	31,2	3,81
F8	140	36,8	3,80
F9	175	45,6	3,84
F10	211	53,6	3,94
D10	220	55,2	3,99
D9	216	53,6	4,03
D8	202	51,2	3,95
D7	208	52,8	3,94
D6	223	58,4	3,82
A1	215	56,0	3,84
A2	181	52,0	3,48
A3	146	41,3	3,54
A4	117	29,6	3,95
A5	106	25,6	4,14
F8 - D10	101	28,0	3,61
D9	117	30,4	3,85
D8	145	36,8	3,94
D7	179	46,4	3,86
D6	217	55,2	3,93
A1	218	56,4	3,87
A2	208	53,6	3,88
A3	201	54,0	3,72
A4	205	54,4	3,77
A5	219	58,2	3,76
C6	212	56,0	3,79
C7	175	46,8	3,74
C8	140	36,0	3,89
C9	118	29,6	3,99
C10	100	27,2	3,68
D8 - A1	98	28,4	3,45
A2	110	32,0	3,44
A3	135	38,4	3,52
A4	170	48,0	3,54
A5	209	58,0	3,60
C6	217	58,4	3,72
C7	206	52,8	3,90
C8	202	51,2	3,95
C9	207	52,8	3,92
C10	220	56,8	3,87
F6	216	53,2	4,06
F7	177	44,8	3,95
F8	148	37,2	3,98
F9	114	31,5	3,62
F10	99	32,5	3,05

P R O B E P 2			
XY- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)
B3 - D5	102	22,8	4,47
D4	116	24,8	4,68
D3	143	31,2	4,58
D2	178	40,4	4,41
D1	217	49,2	4,41
E5	223	50,8	4,39
E4	208	48,4	4,30
E3	203	49,2	4,13
E2	209	51,6	4,05
E1	222	55,2	4,02
C5	217	54,0	4,02
C4	178	44,8	3,97
C3	143	36,8	3,89
C2	116	28,8	4,03
C1	102	22,8	4,47
C3 - E1	102	21,2	4,81
E2	116	24,0	4,83
E3	144	30,4	4,74
E4	177	38,4	4,61
E5	217	46,8	4,64
D1	221	48,0	4,60
D2	208	46,0	4,52
D3	203	47,6	4,26
D4	208	51,6	4,03
D5	223	57,6	3,87
B1	217	56,0	3,88
B2	178	46,0	3,87
B3	144	36,8	3,91
B4	116	28,0	4,14
B5	102	23,2	4,40
E3 - D1	101	25,2	4,01
D2	115	29,2	3,94
D3	144	36,4	3,96
D4	177	46,0	3,85
D5	216	57,2	3,78
B1	222	57,6	3,85
B2	208	53,2	3,91
B3	203	49,2	4,13
B4	208	48,4	4,30
B5	222	49,2	4,51
C1	217	46,4	4,68
C2	178	37,2	4,78
C3	144	30,4	4,74
C4	116	23,2	5,00
C5	102	22,0	4,64
D3 - B1	102	23,2	4,40
B2	116	25,2	4,60
B3	144	31,2	4,62
B4	178	39,6	4,49
B5	216	48,0	4,50
C1	223	49,2	4,53
C2	209	46,8	4,47
C3	203	47,6	4,26
C4	208	50,0	4,16
C5	221	54,0	4,09
E1	216	53,6	4,03
E2	178	44,8	3,97
E3	143	36,4	3,93
E4	117	30,4	3,85
E5	102	24,0	4,25

P R O B E P 2			
YZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)
A8 - B6	102	23,6	4,32
B7	117	28,0	4,18
B8	143	35,6	4,02
B9	178	45,2	3,94
B10	217	56,0	3,88
F1	222	57,6	3,85
F2	209	52,8	3,96
F3	204	50,8	4,02
F4	209	51,6	4,05
F5	223	54,4	4,10
E10	218	54,4	4,01
E9	179	44,8	4,00
E8	145	35,2	4,12
E7	117	27,6	4,24
E6	102	24,0	4,25
B8 - F1	103	26,8	3,84
F2	117	30,4	3,85
F3	144	36,4	3,96
F4	179	44,4	4,03
F5	217	52,4	4,14
E10	223	53,2	4,19
E9	208	50,4	4,13
E8	203	49,2	4,13
E7	208	50,0	4,16
E6	223	54,4	4,10
A6	216	53,2	4,06
A7	178	44,8	3,97
A8	144	35,6	4,04
A9	116	28,8	4,03
A10	102	24,0	4,25
F3 - E10	102	24,0	4,25
E9	116	28,0	4,14
E8	144	34,8	4,14
E7	178	42,8	4,16
E6	218	53,2	4,10
A6	222	54,8	4,05
A7	208	50,8	4,09
A8	204	50,8	4,02
A9	209	52,8	3,96
A10	224	56,0	4,00
B6	217	55,2	3,93
B7	178	45,2	3,94
B8	144	36,4	3,96
B9	116	30,4	3,82
B10	102	26,8	3,81
E8 - A6	103	23,6	4,36
A7	117	27,2	4,30
A8	144	35,2	4,09
A9	179	44,0	4,07
A10	217	54,4	3,99
B6	222	54,8	4,05
B7	208	50,8	4,09
B8	203	49,2	4,13
B9	209	50,0	4,18
B10	222	54,4	4,08
F1	217	53,2	4,08
F2	178	43,2	4,12
F3	143	34,2	4,18
F4	116	28,4	4,08
F5	102	24,0	4,25

P R O B E P 2			
XZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)
A3 - C6	102	22,0	4,64
C7	117	25,2	4,64
C8	144	32,8	4,39
C9	179	41,6	4,30
C10	217	50,4	4,31
F6	222	53,6	4,14
F7	210	52,4	4,01
F8	204	50,8	4,02
F9	209	52,4	3,99
F10	223	56,8	3,93
D10	218	55,6	3,92
D9	178	46,0	3,87
D8	144	37,6	3,83
D7	116	29,2	3,97
D6	102	24,0	4,25
C8 - F6	103	24,8	4,15
F7	117	31,6	3,70
F8	145	36,8	3,94
F9	178	44,8	3,97
F10	217	52,8	4,11
D10	221	53,2	4,15
D9	208	49,6	4,19
D8	203	47,6	4,26
D7	208	48,8	4,26
D6	221	52,4	4,22
A1	217	52,4	4,14
A2	178	40,8	4,36
A3	144	32,8	4,39
A4	117	24,4	4,80
A5	102	22,8	4,47
F8 - D10	102	24,0	4,25
D9	116	26,4	4,39
D8	144	34,0	4,24
D7	178	44,0	4,05
D6	217	54,4	3,99
A1	222	55,2	4,02
A2	208	52,0	4,00
A3	204	50,8	4,02
A4	209	52,2	4,00
A5	223	55,6	4,01
C6	218	53,6	4,07
C7	179	45,2	3,96
C8	145	36,8	3,94
C9	117	30,0	3,90
C10	103	26,4	3,90
D8 - A1	102	26,8	3,81
A2	116	30,0	3,87
A3	144	38,0	3,79
A4	178	44,8	3,97
A5	216	54,0	4,00
C6	222	54,8	4,05
C7	208	50,0	4,16
C8	203	47,6	4,26
C9	207	48,4	4,28
C10	222	53,6	4,14
F6	217	51,2	4,24
F7	177	41,2	4,30
F8	143	34,0	4,21
F9	117	26,2	4,47
F10	103	24,4	4,22

P R O B E P 3					
XY- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)	t (µs) '00	v (km/s)
B3 - D5	102	27,6	3,70	32,4	3,15
D4	116	30,8	3,77	34,4	3,37
D3	143	35,6	4,02	41,2	3,47
D2	178	44,4	4,01	49,6	3,59
D1	216	54,4	3,97	60,0	3,60
E5	221	56,4	3,92	62,0	3,56
E4	209	53,6	3,90	58,4	3,58
E3	202	50,4	4,01	54,4	3,71
E2	207	49,2	4,21	53,2	3,89
E1	220	52,0	4,23	54,8	4,01
C5	216	50,4	4,29	55,2	3,91
C4	178	40,4	4,41	42,8	4,16
C3	143	32,8	4,36	36,0	3,97
C2	116	27,2	4,26	29,6	3,92
C1	102	25,2	4,05	28,0	3,64
C3 - E1	102	24,8	4,11	30,0	3,40
E2	116	28,8	4,03	32,0	3,63
E3	143	34,4	4,16	38,0	3,76
E4	178	43,2	4,12	46,8	3,80
E5	216	52,0	4,15	56,8	3,80
D1	221	52,4	4,22	56,4	3,92
D2	207	47,6	4,35	50,8	4,07
D3	202	44,4	4,55	48,0	4,21
D4	207	45,2	4,58	48,8	4,24
D5	221	48,4	4,57	52,0	4,25
B1	215	48,4	4,44	53,2	4,04
B2	178	40,8	4,36	43,6	4,08
B3	143	32,8	4,36	36,0	3,97
B4	116	26,4	4,39	28,8	4,03
B5	102	24,0	4,25	26,4	3,86
E3 - D1	102	22,8	4,47	26,0	3,92
D2	116	25,2	4,60	30,4	3,82
D3	144	33,6	4,29	38,4	3,75
D4	177	42,0	4,21	45,2	3,92
D5	216	52,0	4,15	56,4	3,83
B1	220	53,2	4,14	59,6	3,69
B2	207	50,8	4,07	56,4	3,67
B3	202	49,4	4,09	54,0	3,74
B4	207	50,0	4,14	53,6	3,86
B5	221	52,8	4,19	58,4	3,78
C1	216	52,4	4,12	56,8	3,80
C2	177	42,0	4,21	47,2	3,75
C3	143	34,0	4,21	38,4	3,72
C4	116	27,0	4,30	30,8	3,77
C5	102	24,8	4,11	28,4	3,59
D3 - B1	102	24,4	4,18	30,4	3,36
B2	116	29,6	3,92	34,8	3,33
B3	143	35,6	4,02	41,6	3,44
B4	177	43,2	4,10	48,0	3,69
B5	216	51,6	4,19	56,8	3,80
C1	220	50,8	4,33	56,0	3,93
C2	207	47,2	4,39	50,0	4,14
C3	202	44,4	4,55	48,0	4,21
C4	208	45,6	4,56	49,2	4,23
C5	220	49,6	4,44	55,2	3,99
E1	216	49,2	4,39	54,8	3,94
E2	177	41,2	4,30	44,8	3,95
E3	143	32,8	4,36	37,6	3,80
E4	116	26,4	4,39	31,6	3,67
E5	102	22,4	4,55	28,4	3,59

P R O B E P 3					
YZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)	t (µs) '00	v (km/s)
A8 - B6	102	25,2	4,05	26,8	3,81
B7	116	30,4	3,82	32,0	3,63
B8	144	36,4	3,96	39,6	3,64
B9	177	44,8	3,95	47,6	3,72
B10	216	52,0	4,15	55,2	3,91
F1	220	51,6	4,26	56,8	3,87
F2	207	48,6	4,26	52,8	3,92
F3	201	47,2	4,26	51,2	3,93
F4	209	48,4	4,32	52,8	3,96
F5	221	52,4	4,22	58,4	3,78
E10	216	52,0	4,15	57,2	3,78
E9	177	44,8	3,95	49,2	3,60
E8	144	36,4	3,96	41,6	3,46
E7	116	30,4	3,82	34,4	3,37
E6	102	25,2	4,05	28,4	3,59
B8 - F1	102	26,4	3,86	29,6	3,45
F2	116	29,2	3,97	37,4	3,10
F3	143	35,6	4,02	38,8	3,69
F4	177	43,2	4,10	47,2	3,75
F5	216	52,0	4,15	55,2	3,91
E10	221	53,6	4,12	56,8	3,89
E9	207	51,2	4,04	54,4	3,81
E8	202	50,4	4,01	54,4	3,71
E7	207	52,0	3,98	57,6	3,59
E6	221	55,2	4,00	61,6	3,59
A6	216	54,8	3,94	60,4	3,58
A7	177	44,4	3,99	50,8	3,48
A8	143	36,4	3,93	39,6	3,61
A9	116	30,8	3,77	32,8	3,54
A10	102	29,1	3,51	28,4	3,59
F3 - E10	102	24,4	4,18	26,8	3,81
E9	116	27,6	4,20	30,8	3,77
E8	143	33,2	4,31	36,8	3,89
E7	177	41,6	4,25	46,8	3,78
E6	216	50,4	4,29	56,0	3,86
A6	221	51,2	4,32	56,0	3,95
A7	207	47,6	4,35	52,4	3,95
A8	201	47,2	4,26	52,0	3,87
A9	208	47,6	4,37	51,6	4,03
A10	220	52,4	4,20	55,2	3,99
B6	216	51,6	4,19	55,2	3,91
B7	177	43,6	4,06	47,6	3,72
B8	143	35,2	4,06	39,2	3,65
B9	116	29,2	3,97	32,4	3,58
B10	102	27,6	3,70	30,4	3,36
E8 - A6	102	24,8	4,11	28,4	3,59
A7	116	29,2	3,97	34,0	3,41
A8	143	36,8	3,89	42,4	3,37
A9	178	44,8	3,97	52,0	3,42
A10	216	53,2	4,06	59,6	3,62
B6	221	54,8	4,03	60,0	3,68
B7	208	52,4	3,97	56,0	3,71
B8	202	49,4	4,09	54,0	3,74
B9	208	50,4	4,13	53,6	3,88
B10	221	52,4	4,22	56,4	3,92
F1	216	51,2	4,22	55,2	3,91
F2	177	42,0	4,21	43,0	4,12
F3	144	32,8	4,39	36,4	3,96
F4	116	28,0	4,14	30,4	3,82
F5	102	23,6	4,32	26,4	3,86

P R O B E P 3					
XZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)	t (µs) '00	v (km/s)
A3 - C6	102	24,8	4,11	27,6	3,70
C7	116	30,4	3,82	35,6	3,26
C8	143	36,8	3,89	41,6	3,44
C9	177	42,2	4,19	49,6	3,57
C10	216	52,0	4,15	58,8	3,67
F6	221	53,6	4,12	59,2	3,73
F7	208	49,6	4,19	54,0	3,85
F8	201	47,2	4,26	51,2	3,93
F9	207	48,0	4,31	52,0	3,98
F10	221	49,6	4,46	53,2	4,15
D10	216	47,6	4,54	52,4	4,12
D9	178	38,4	4,64	42,8	4,16
D8	143	31,2	4,58	34,0	4,21
D7	116	25,2	4,60	28,0	4,14
D6	102	22,8	4,47	24,4	4,18
C8 - F6	102	21,6	4,72	24,4	4,18
F7	116	24,4	4,75	26,0	4,46
F8	143	28,8	4,97	31,2	4,58
F9	178	36,8	4,84	38,4	4,64
F10	216	45,6	4,74	48,0	4,50
D10	221	46,4	4,76	47,6	4,64
D9	207	44,4	4,66	47,2	4,39
D8	202	44,4	4,55	48,0	4,21
D7	207	48,8	4,24	53,2	3,89
D6	221	54,4	4,06	60,8	3,63
A1	216	54,0	4,00	60,8	3,55
A2	178	44,4	4,01	51,2	3,48
A3	143	36,8	3,89	41,6	3,44
A4	116	28,8	4,03	34,0	3,41
A5	102	23,6	4,32	26,0	3,92
F8 - D10	102	23,2	4,40	26,4	3,86
D9	116	24,0	4,83	31,6	3,67
D8	143	28,8	4,97	40,8	3,50
D7	177	38,0	4,66	50,0	3,54
D6	216	46,0	4,70	58,4	3,70
A1	220	55,2	3,99	60,8	3,62
A2	208	50,0	4,16	55,2	3,77
A3	201	47,2	4,26	52,0	3,87
A4	207	46,0	4,50	50,8	4,07
A5	221	48,0	4,60	50,4	4,38
C6	216	46,0	4,70	48,8	4,43
C7	177	38,0	4,66	38,8	4,56
C8	143	28,8	4,97	31,2	4,58
C9	116	24,0	4,83	26,4	4,39
C10	102	23,2	4,40	25,6	3,98
D8 - A1	102	23,6	4,32	26,4	3,86
A2	116	24,8	4,68	28,0	4,14
A3	144	30,0	4,80	34,0	4,24
A4	177	39,2	4,52	42,8	4,14
A5	216	47,6	4,54	52,0	4,15
C6	221	48,4	4,57	52,4	4,22
C7	207	45,6	4,54	48,8	4,24
C8	202	44,4	4,55	48,0	4,21
C9	208	46,8	4,44	51,2	4,06
C10	221	52,0	4,25	58,0	3,81
F6	216	51,2	4,22	56,4	3,83
F7	177	44,0	4,02	48,8	3,63
F8	143	36,4	3,93	40,4	3,54
F9	116	29,2	3,97	33,2	3,49
F10	102	23,2	4,40	27,6	3,70

Anhang 4

P R O B E P 4					
XY- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)	t (µs) '00	v (km/s)
B3 - D5	102	23,2	4,40	25,6	3,98
D4	116	26,4	4,39	30,0	3,87
D3	144	32,8	4,39	37,2	3,87
D2	178	39,6	4,49	46,4	3,84
D1	216	47,6	4,54	56,4	3,83
E5	222	49,6	4,48	58,4	3,80
E4	207	46,8	4,42	57,6	3,59
E3	201	46,0	4,37	53,2	3,78
E2	208	48,0	4,33	51,6	4,03
E1	222	52,8	4,20	51,6	4,30
C5	216	53,2	4,06	55,2	3,91
C4	178	43,6	4,08	54,0	3,30
C3	143	35,2	4,06	43,6	3,28
C2	115	28,0	4,11	35,2	3,27
C1	102	24,4	4,18	28,0	3,64
C3 - E1	102	24,4	4,18	26,8	3,81
E2	116	27,2	4,26	30,8	3,77
E3	143	34,0	4,21	38,0	3,76
E4	177	42,4	4,17	47,2	3,75
E5	215	51,2	4,20	56,8	3,79
D1	222	51,6	4,30	56,8	3,91
D2	208	48,0	4,33	51,2	4,06
D3	202	48,0	4,21	48,8	4,14
D4	207	50,8	4,07	48,0	4,31
D5	222	56,0	3,96	52,0	4,27
B1	216	55,2	3,91	51,6	4,19
B2	177	44,8	3,95	42,8	4,14
B3	143	35,2	4,06	36,4	3,93
B4	116	27,6	4,20	29,2	3,97
B5	102	22,8	4,47	25,6	3,98
E3 - D1	102	26,0	3,92	26,4	3,86
D2	116	27,6	4,20	29,6	3,92
D3	143	34,4	4,16	36,4	3,93
D4	178	42,0	4,24	47,2	3,77
D5	216	49,6	4,35	54,8	3,94
B1	221	51,2	4,32	54,4	4,06
B2	207	48,4	4,28	50,4	4,11
B3	201	46,0	4,37	51,2	3,93
B4	207	46,8	4,42	53,2	3,89
B5	221	50,8	4,35	60,0	3,68
C1	216	50,0	4,32	59,2	3,65
C2	178	41,2	4,32	48,8	3,65
C3	144	34,0	4,24	37,2	3,87
C4	116	27,2	4,26	31,2	3,72
C5	102	24,8	4,11	25,6	3,98
D3 - B1	102	22,0	4,59	29,6	3,41
B2	115	25,6	4,49	31,2	3,69
B3	142	32,8	4,33	37,2	3,82
B4	177	41,2	4,30	44,4	3,99
B5	216	51,2	4,22	54,0	4,00
C1	222	50,8	4,37	54,4	4,08
C2	207	48,0	4,31	51,2	4,04
C3	202	47,6	4,24	48,8	4,14
C4	207	50,8	4,07	49,6	4,17
C5	221	53,6	4,12	54,0	4,09
E1	216	52,8	4,09	52,8	4,09
E2	177	42,8	4,14	44,4	3,99
E3	143	34,0	4,21	36,8	3,89
E4	115	28,0	4,11	30,8	3,73
E5	102	22,4	4,55	27,6	3,70

P R O B E P 4					
YZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)	t (µs) '00	v (km/s)
A8 - B6	102	21,2	4,81	25,6	3,98
B7	115	23,2	4,96	31,2	3,69
B8	143	30,8	4,64	36,4	3,93
B9	177	37,2	4,76	44,0	4,02
B10	215	46,8	4,59	52,4	4,10
F1	222	48,0	4,63	54,0	4,11
F2	208	45,2	4,60	50,0	4,16
F3	201	46,4	4,33	49,2	4,09
F4	207	48,8	4,24	50,4	4,11
F5	222	56,0	3,96	56,0	3,96
E10	216	55,6	3,88	55,6	3,88
E9	178	46,0	3,87	46,8	3,80
E8	144	37,2	3,87	37,6	3,83
E7	116	29,2	3,97	31,2	3,72
E6	102	25,2	4,05	28,4	3,59
B8 - F1	102	22,0	4,64	26,0	3,92
F2	116	26,8	4,33	28,4	4,08
F3	144	34,0	4,24	33,6	4,29
F4	177	42,0	4,21	42,2	4,19
F5	216	52,8	4,09	52,8	4,09
E10	221	53,6	4,12	55,2	4,00
E9	208	49,2	4,23	51,6	4,03
E8	201	46,0	4,37	51,6	3,90
E7	207	46,0	4,50	53,2	3,89
E6	221	48,8	4,53	57,6	3,84
A6	216	48,4	4,46	55,6	3,88
A7	178	38,0	4,68	46,0	3,87
A8	144	30,8	4,68	36,8	3,91
A9	116	24,0	4,83	30,8	3,77
A10	102	20,8	4,90	22,8	4,47
F3 - E10	102	22,4	4,55	27,2	3,75
E9	116	24,4	4,75	28,8	4,03
E8	143	30,0	4,77	36,0	3,97
E7	177	37,6	4,71	44,4	3,99
E6	216	46,8	4,62	52,0	4,15
A6	221	47,2	4,68	53,2	4,15
A7	207	46,4	4,46	50,0	4,14
A8	201	46,0	4,37	47,6	4,22
A9	208	48,4	4,30	48,0	4,33
A10	221	54,0	4,09	52,4	4,22
B6	216	52,4	4,12	52,0	4,15
B7	178	43,6	4,08	42,8	4,16
B8	144	34,0	4,24	34,8	4,14
B9	116	27,2	4,26	28,4	4,08
B10	102	23,2	4,40	26,4	3,86
E8 - A6	102	23,2	4,40	26,0	3,92
A7	116	29,6	3,92	31,2	3,72
A8	144	36,8	3,91	37,6	3,83
A9	177	46,0	3,85	47,2	3,75
A10	216	55,2	3,91	55,6	3,88
B6	222	56,4	3,94	57,6	3,85
B7	208	50,0	4,16	53,6	3,88
B8	201	46,0	4,37	51,2	3,93
B9	208	44,4	4,68	52,4	3,97
B10	222	46,8	4,74	55,6	3,99
F1	216	45,2	4,78	54,0	4,00
F2	177	37,6	4,71	46,4	3,81
F3	143	30,4	4,70	36,0	3,97
F4	116	25,6	4,53	29,6	3,92
F5	102	24,0	4,25	28,8	3,54

P R O B E P 4					
XZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)	t (µs) '00	v (km/s)
A3 - C6	102	24,0	4,25	26,0	3,92
C7	116	27,6	4,20	26,8	4,33
C8	143	34,0	4,21	32,4	4,41
C9	178	42,0	4,24	40,0	4,45
C10	216	49,6	4,35	50,4	4,29
F6	221	52,4	4,22	50,4	4,38
F7	207	47,2	4,39	47,6	4,35
F8	201	46,4	4,33	49,2	4,09
F9	208	48,0	4,33	52,0	4,00
F10	222	51,2	4,34	60,4	3,68
D10	216	49,6	4,35	59,2	3,65
D9	177	42,0	4,21	50,8	3,48
D8	143	34,0	4,21	41,2	3,47
D7	116	27,6	4,20	34,0	3,41
D6	102	22,4	4,55	28,0	3,64
C8 - F6	102	26,8	3,81	26,0	3,92
F7	116	28,0	4,14	30,8	3,77
F8	144	33,2	4,34	37,2	3,87
F9	178	44,0	4,05	46,8	3,80
F10	216	52,4	4,12	56,8	3,80
D10	222	52,4	4,24	56,8	3,91
D9	208	48,8	4,26	52,0	4,00
D8	202	48,0	4,21	49,0	4,12
D7	208	50,4	4,13	48,4	4,30
D6	221	53,6	4,12	52,4	4,22
A1	216	52,4	4,12	52,4	4,12
A2	178	43,6	4,08	41,2	4,32
A3	144	34,0	4,24	33,2	4,34
A4	116	26,0	4,46	26,8	4,33
A5	102	23,6	4,32	23,6	4,32
F8 - D10	102	25,2	4,05	25,6	3,98
D9	116	26,4	4,39	26,4	4,39
D8	143	31,6	4,53	32,0	4,47
D7	177	40,0	4,43	40,0	4,43
D6	216	49,2	4,39	49,2	4,39
A1	222	49,2	4,51	50,4	4,40
A2	208	46,0	4,52	49,2	4,23
A3	201	46,0	4,37	47,6	4,22
A4	207	48,0	4,31	50,8	4,07
A5	221	50,8	4,35	58,0	3,81
C6	216	50,4	4,29	56,4	3,83
C7	177	42,8	4,14	46,8	3,78
C8	143	33,6	4,26	37,2	3,84
C9	116	28,0	4,14	30,0	3,87
C10	102	25,6	3,98	25,6	3,98
D8 - A1	102	21,2	4,81	26,4	3,86
A2	115	26,4	4,36	33,6	3,42
A3	143	33,6	4,26	40,8	3,50
A4	178	42,0	4,24	50,8	3,50
A5	216	52,8	4,09	52,8	4,09
C6	221	52,8	4,19	61,2	3,61
C7	207	49,2	4,21	54,4	3,81
C8	202	47,6	4,24	48,8	4,14
C9	207	48,0	4,31	47,6	4,35
C10	221	50,8	4,35	48,8	4,53
F6	216	50,0	4,32	48,0	4,50
F7	178	39,6	4,49	40,0	4,45
F8	143	39,6	3,61	32,8	4,36
F9	115	26,0	4,42	28,4	4,05
F10	102	22,8	4,47	26,8	3,81

Anhang 5

		P R O B E		P 5	
XY- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)	t (µs) '00	v (km/s)
B3 - D5	102	23,6	4,32	26,0	3,92
D4	116	28,0	4,14	32,8	3,54
D3	143	37,2	3,84	42,0	3,40
D2	178	48,4	3,68	57,6	3,09
D1	216	62,4	3,46	68,8	3,14
E5	221	63,2	3,50	71,2	3,10
E4	208	60,4	3,44	66,4	3,13
E3	202	61,2	3,30	66,8	3,02
E2	208	59,6	3,49	63,2	3,29
E1	222	60,8	3,65	66,0	3,36
C5	216	59,2	3,65	65,6	3,29
C4	178	47,2	3,77	51,2	3,48
C3	143	36,4	3,93	40,4	3,54
C2	116	28,4	4,08	30,8	3,77
C1	102	22,8	4,47	25,6	3,98
C3 - E1	102	28,4	3,59	33,6	3,04
E2	116	30,8	3,77	36,4	3,19
E3	143	39,2	3,65	44,8	3,19
E4	178	47,2	3,77	51,6	3,45
E5	216	54,4	3,97	58,0	3,72
D1	222	53,6	4,14	58,0	3,83
D2	208	48,4	4,30	54,0	3,85
D3	203	47,2	4,30	49,6	4,09
D4	208	48,8	4,26	50,4	4,13
D5	222	54,4	4,08	58,0	3,83
B1	216	54,4	3,97	58,0	3,72
B2	178	44,0	4,05	49,6	3,59
B3	143	36,4	3,93	40,4	3,54
B4	116	30,4	3,82	34,4	3,37
B5	102	29,2	3,49	33,6	3,04
E3 - D1	102	24,8	4,11	26,4	3,86
D2	116	29,6	3,92	31,2	3,72
D3	143	39,2	3,65	44,8	3,19
D4	178	51,6	3,45	56,8	3,13
D5	216	65,2	3,31	72,0	3,00
B1	222	66,4	3,34	74,0	3,00
B2	208	63,2	3,29	69,2	3,01
B3	202	61,2	3,30	67,2	3,01
B4	208	60,8	3,42	65,6	3,17
B5	221	63,2	3,50	67,6	3,27
C1	216	61,6	3,51	66,0	3,27
C2	178	50,8	3,50	55,6	3,20
C3	143	39,2	3,65	44,0	3,25
C4	116	27,6	4,20	31,2	3,72
C5	102	24,0	4,25	26,8	3,81
D3 - B1	102	32,0	3,19	36,8	2,77
B2	116	32,8	3,54	39,2	2,96
B3	143	37,2	3,84	40,4	3,54
B4	178	45,2	3,94	48,8	3,65
B5	216	52,4	4,12	55,6	3,88
C1	222	52,8	4,20	55,6	3,99
C2	208	48,8	4,26	52,0	4,00
C3	203	46,8	4,34	49,6	4,09
C4	208	48,0	4,33	50,8	4,09
C5	222	54,4	4,08	57,6	3,85
E1	216	54,0	4,00	58,8	3,67
E2	178	46,4	3,84	50,8	3,50
E3	143	39,2	3,65	44,0	3,25
E4	116	32,4	3,58	38,0	3,05
E5	102	29,2	3,49	32,4	3,15

		P R O B E		P 5	
YZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)	t (µs) '00	v (km/s)
A8 - B6	102	29,2	3,49	38,4	2,66
B7	116	32,4	3,58	40,8	2,84
B8	144	38,4	3,75	43,2	3,33
B9	178	49,6	3,59	54,8	3,25
B10	216	57,2	3,78	62,8	3,44
F1	221	58,8	3,76	63,2	3,50
F2	208	58,0	3,59	61,6	3,38
F3	202	56,4	3,58	60,8	3,32
F4	208	57,6	3,61	62,4	3,33
F5	221	63,6	3,47	69,2	3,19
E10	216	63,6	3,40	70,8	3,05
E9	178	52,4	3,40	58,8	3,03
E8	144	43,2	3,33	48,8	2,95
E7	116	32,4	3,58	38,0	3,05
E6	102	28,4	3,59	34,4	2,97
B8 - F1	102	26,8	3,81	32,0	3,19
F2	116	34,4	3,37	38,8	2,99
F3	143	43,6	3,28	49,2	2,91
F4	178	52,8	3,37	47,2	3,77
F5	216	64,8	3,33	71,6	3,02
E10	222	66,4	3,34	72,0	3,08
E9	208	61,6	3,38	67,2	3,10
E8	202	61,2	3,30	66,8	3,02
E7	208	59,2	3,51	64,4	3,23
E6	221	63,6	3,47	69,2	3,19
A6	216	60,4	3,58	68,4	3,16
A7	178	49,2	3,62	57,2	3,11
A8	143	38,4	3,72	44,0	3,25
A9	116	31,2	3,72	36,8	3,15
A10	102	28,4	3,59	32,0	3,19
F3 - E10	102	31,6	3,23	36,0	2,83
E9	116	32,8	3,54	38,0	3,05
E8	143	40,4	3,54	44,0	3,25
E7	178	50,4	3,53	55,2	3,22
E6	216	60,0	3,60	65,2	3,31
A6	221	60,4	3,66	66,0	3,35
A7	208	56,8	3,66	62,8	3,31
A8	202	56,2	3,59	60,4	3,34
A9	208	59,2	3,51	64,4	3,23
A10	222	63,6	3,49	73,2	3,03
B6	216	63,6	3,40	70,8	3,05
B7	178	52,8	3,37	58,4	3,05
B8	143	43,6	3,28	49,2	2,91
B9	116	35,2	3,30	39,6	2,93
B10	102	32,8	3,11	37,6	2,71
E8 - A6	102	27,6	3,70	36,4	2,80
A7	116	32,8	3,54	37,6	3,09
A8	143	43,2	3,31	49,6	2,88
A9	178	54,0	3,30	63,2	2,82
A10	216	65,6	3,29	76,8	2,81
B6	221	68,8	3,21	78,0	2,83
B7	208	63,6	3,27	70,0	2,97
B8	202	61,2	3,30	67,2	3,01
B9	208	61,6	3,38	66,4	3,13
B10	222	64,4	3,45	70,4	3,15
F1	216	63,6	3,40	69,6	3,10
F2	178	51,6	3,45	56,8	3,13
F3	143	40,4	3,54	44,0	3,25
F4	116	33,2	3,49	36,4	3,19
F5	102	29,6	3,45	32,8	3,11

		P R O B E		P 5	
XZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)	t (µs) '00	v (km/s)
A3 - C6	102	22,0	4,64	26,0	3,92
C7	116	28,4	4,08	32,4	3,58
C8	143	39,2	3,65	40,8	3,50
C9	178	48,4	3,68	51,6	3,45
C10	216	59,6	3,62	64,0	3,38
F6	221	61,6	3,59	64,8	3,41
F7	208	57,6	3,61	62,4	3,33
F8	202	56,4	3,58	60,8	3,32
F9	208	57,6	3,61	62,8	3,31
F10	221	60,0	3,68	64,4	3,43
D10	215	58,0	3,71	63,2	3,40
D9	177	46,0	3,85	51,6	3,43
D8	142	35,2	4,03	40,0	3,55
D7	115	26,4	4,36	28,8	3,99
D6	101	22,4	4,51	25,6	3,95
C8 - F6	102	28,4	3,59	32,4	3,15
F7	116	29,2	3,97	33,6	3,45
F8	143	34,0	4,21	37,6	3,80
F9	178	42,0	4,24	45,6	3,90
F10	216	50,4	4,29	52,4	4,12
D10	222	50,0	4,44	52,4	4,24
D9	207	47,6	4,35	50,0	4,14
D8	203	47,2	4,30	49,6	4,09
D7	208	50,4	4,13	54,0	3,85
D6	221	55,2	4,00	60,4	3,66
A1	216	54,4	3,97	59,6	3,62
A2	178	46,0	3,87	49,6	3,59
A3	143	39,2	3,65	41,6	3,44
A4	116	32,0	3,63	36,4	3,19
A5	102	26,0	3,92	31,6	3,23
F8 - D10	102	25,2	4,05	28,4	3,59
D9	116	29,2	3,97	33,6	3,45
D8	143	40,0	3,58	43,6	3,28
D7	178	51,2	3,48	56,8	3,13
D6	216	62,4	3,46	70,8	3,05
A1	222	64,8	3,43	72,4	3,07
A2	208	60,4	3,44	65,6	3,17
A3	202	56,2	3,59	60,4	3,34
A4	208	55,2	3,77	59,2	3,51
A5	221	56,0	3,95	62,4	3,54
C6	216	53,6	4,03	58,4	3,70
C7	178	43,6	4,08	47,6	3,74
C8	143	34,4	4,16	36,8	3,89
C9	116	28,0	4,14	30,4	3,82
C10	102	25,6	3,98	28,0	3,64
D8 - A1	102	26,0	3,92	32,4	3,15
A2	116	30,0	3,87	35,6	3,26
A3	143	34,8	4,11	39,6	3,61
A4	178	43,6	4,08	48,0	3,71
A5	216	50,8	4,25	55,6	3,88
C6	220	52,0	4,23	56,0	3,93
C7	208	47,6	4,37	50,0	4,16
C8	203	46,8	4,34	49,6	4,09
C9	207	49,6	4,17	52,0	3,98
C10	222	54,8	4,05	60,0	3,70
F6	216	54,8	3,94	60,4	3,58
F7	178	48,0	3,71	52,0	3,42
F8	143	39,6	3,61	43,2	3,31
F9	116	33,2	3,49	37,6	3,09
F10	102	28,0	3,64	31,6	3,23

P R O B E P 6			
XY- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)
B3 - D5	102	20,8	4,90
D4	116	22,8	5,09
D3	143	28,0	5,11
D2	178	34,8	5,11
D1	217	42,0	5,17
E5	223	42,0	5,31
E4	208	39,2	5,31
E3	203	38,0	5,34
E2	209	38,4	5,44
E1	222	41,2	5,39
C5	217	40,0	5,43
C4	178	32,8	5,43
C3	143	26,0	5,50
C2	116	22,0	5,27
C1	102	20,0	5,10
C3 - E1	102	20,0	5,10
E2	116	22,0	5,27
E3	144	28,0	5,14
E4	177	36,4	4,86
E5	217	44,4	4,89
D1	221	44,8	4,93
D2	208	42,8	4,86
D3	203	41,6	4,88
D4	208	41,2	5,05
D5	223	43,2	5,16
B1	217	42,0	5,17
B2	178	33,2	5,36
B3	144	26,0	5,54
B4	116	20,4	5,69
B5	102	17,6	5,80
E3 - D1	101	20,0	5,05
D2	115	22,4	5,13
D3	144	26,4	5,45
D4	177	33,6	5,27
D5	216	40,0	5,40
B1	222	41,6	5,34
B2	208	37,6	5,53
B3	203	38,0	5,34
B4	208	38,8	5,36
B5	222	42,4	5,24
C1	217	41,6	5,22
C2	178	34,8	5,11
C3	144	28,0	5,14
C4	116	23,6	4,92
C5	102	21,2	4,81
D3 - B1	102	19,2	5,31
B2	116	22,0	5,27
B3	144	28,0	5,14
B4	178	36,0	4,94
B5	216	44,0	4,91
C1	223	44,8	4,98
C2	209	42,0	4,98
C3	203	41,6	4,88
C4	207	37,8	5,48
C5	221	45,2	4,89
E1	216	42,8	5,05
E2	178	34,0	5,24
E3	143	26,4	5,42
E4	117	20,8	5,63
E5	102	18,0	5,67

P R O B E P 6			
YZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)
A8 - B6	102	17,6	5,80
B7	117	21,6	5,42
B8	144	26,8	5,37
B9	179	34,8	5,14
B10	217	43,2	5,02
F1	222	44,8	4,96
F2	209	42,8	4,88
F3	204	41,6	4,90
F4	209	42,4	4,93
F5	223	43,6	5,11
E10	217	44,8	4,84
E9	178	36,0	4,94
E8	143	27,6	5,18
E7	117	21,6	5,42
E6	102	18,4	5,54
B8 - F1	103	20,0	5,15
F2	117	22,8	5,13
F3	144	27,2	5,29
F4	179	34,4	5,20
F5	217	40,2	5,40
E10	223	42,4	5,26
E9	208	38,8	5,36
E8	203	38,0	5,34
E7	208	38,8	5,36
E6	223	41,6	5,36
A6	216	40,8	5,29
A7	178	33,6	5,30
a8	144	26,8	5,37
A9	116	22,0	5,27
A10	102	20,4	5,00
F3 - E10	102	19,2	5,31
E9	116	22,4	5,18
E8	144	28,4	5,07
E7	178	35,2	5,06
E6	218	44,4	4,91
A6	222	45,6	4,87
A7	208	42,4	4,91
A8	204	41,6	4,90
A9	209	42,0	4,98
A10	223	42,6	5,23
B6	217	43,2	5,02
B7	178	35,2	5,06
B8	144	27,2	5,29
B9	116	21,6	5,37
B10	102	18,4	5,54
E8 - A6	103	20,8	4,95
A7	117	22,8	5,13
A8	144	27,6	5,22
A9	179	33,6	5,33
A10	217	41,2	5,27
B6	222	41,6	5,34
B7	208	39,2	5,31
B8	203	38,0	5,34
B9	209	39,2	5,33
B10	222	43,6	5,09
F1	217	42,4	5,12
F2	178	34,8	5,11
F3	143	28,1	5,09
F4	116	23,1	5,02
F5	102	20,8	4,90

P R O B E P 6			
XZ- Ebene	Meßstrecke	Laufzeit	US-Geschw.
Meßrichtung	s(mm)	t (µs) '97	v (km/s)
A3 - C6	102	20,4	5,00
C7	117	22,8	5,13
C8	144	28,0	5,14
C9	178	36,8	4,84
C10	218	44,8	4,87
F6	222	45,2	4,91
F7	210	41,2	5,10
F8	204	41,6	4,90
F9	209	42,8	4,88
F10	223	46,0	4,85
D10	218	44,4	4,91
D9	178	36,4	4,89
D8	144	29,6	4,86
D7	116	23,2	5,00
D6	102	20,0	5,10
C8 - F6	103	21,2	4,86
F7	117	24,4	4,80
F8	145	30,0	4,83
F9	178	36,8	4,84
F10	217	44,4	4,89
D10	221	46,0	4,80
D9	208	43,2	4,81
D8	203	41,6	4,88
D7	208	42,0	4,95
D6	221	44,0	5,02
A1	217	43,6	4,98
A2	178	35,6	5,00
A3	144	28,0	5,14
A4	117	22,8	5,13
A5	102	20,8	4,90
F8 - D10	102	20,4	5,00
D9	116	22,8	5,09
D8	144	28,0	5,14
D7	178	35,2	5,06
D6	217	43,6	4,98
A1	222	44,0	5,05
A2	208	41,6	5,00
A3	204	41,6	4,90
A4	209	42,4	4,93
A5	223	45,2	4,93
C6	218	45,2	4,82
C7	179	37,6	4,76
C8	145	30,0	4,83
C9	117	24,4	4,80
C10	103	21,2	4,86
D8 - A1	102	21,2	4,81
A2	116	23,6	4,92
A3	144	29,6	4,86
A4	178	37,6	4,73
A5	216	44,8	4,82
C6	222	46,0	4,83
C7	208	37,8	5,50
C8	203	41,6	4,88
C9	207	37,8	5,48
C10	222	45,2	4,91
F6	217	44,0	4,93
F7	177	36,0	4,92
F8	143	28,0	5,11
F9	117	23,2	5,04
F10	103	20,8	4,95

Probe	Meßrichtung	Meßstrecke s(mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (km/s)	
P1	1A	1.....1	43,72	9,22	4,74
		2.....2	43,73	9,34	4,68
		3.....3	43,72	9,30	4,70
		4.....4	69,50	16,79	4,14
	1B	1.....1	43,56	10,40	4,19
		2.....2	43,57	10,13	4,30
		3.....3	43,55	10,25	4,25
		4.....4	69,78	13,60	5,13
	1C	1.....1	43,12	8,41	5,13
		2.....2	43,14	8,70	4,96
		3.....3	43,12	8,49	5,08
		4.....4	72,45	17,21	4,21
	1D	1.....1	43,43	8,40	5,17
		2.....2	43,42	8,51	5,10
		3.....3	43,42	8,48	5,12
		4.....4	70,76	16,42	4,31
1E	1.....1	43,15	10,63	4,06	
	2.....2	43,15	10,32	4,18	
	3.....3	43,15	10,45	4,13	
	4.....4	67,59	13,60	4,97	
1F	1.....1	44,06	8,39	5,25	
	2.....2	44,07	8,56	5,15	
	3.....3	44,06	8,64	5,10	
	4.....4	72,56	16,80	4,32	
P2	2A	1.....1	43,63	9,01	4,84
		2.....2	43,63	8,80	4,96
		3.....3	43,63	8,87	4,92
		4.....4	75,50	17,60	4,29
	2B	1.....1	43,62	10,12	4,31
		2.....2	43,63	9,61	4,54
		3.....3	43,62	9,87	4,42
		4.....4	70,12	16,42	4,27
	2C	1.....1	43,24	9,36	4,62
		2.....2	43,25	9,20	4,70
		3.....3	43,24	9,18	4,71
		4.....4	70,50	15,19	4,64
	2D	1.....1	44,07	11,21	3,93
		2.....2	44,09	10,40	4,24
		3.....3	44,08	10,70	4,12
		4.....4	68,35	16,39	4,17
2E	1.....1	43,26	10,55	4,10	
	2.....2	43,27	9,59	4,51	
	3.....3	43,25	10,01	4,32	
	4.....4	69,70	16,40	4,25	
2F	1.....1	43,64	11,39	3,83	
	2.....2	43,66	11,19	3,90	
	3.....3	43,64	11,28	3,87	
	4.....4	74,84	17,61	4,25	
P6	6A	1.....1	43,82	7,91	5,54
		2.....2	43,83	8,00	5,48
		3.....3	43,80	7,95	5,51
		4.....4	69,27	13,99	4,95
	6B	1.....1	43,44	8,26	5,26
		2.....2	43,46	8,00	5,43
		3.....3	43,45	8,18	5,31
		4.....4	71,21	12,81	5,56
	6C	1.....1	43,95	8,50	5,17
		2.....2	43,95	8,01	5,49
		3.....3	43,95	8,42	5,22
		4.....4	73,78	14,41	5,12
	6D	1.....1	43,60	8,55	5,10
		2.....2	43,62	8,40	5,19
		3.....3	43,61	8,42	5,18
		4.....4	68,72	12,99	5,29
6E	1.....1	43,62	8,42	5,18	
	2.....2	43,62	8,00	5,45	
	3.....3	43,62	8,29	5,26	
	4.....4	69,14	14,81	4,67	
6F	1.....1	43,48	7,95	5,47	
	2.....2	43,49	7,60	5,72	
	3.....3	43,48	7,86	5,53	
	4.....4	70,32	14,01	5,02	

Probe	Meßrichtung	Meßstrecke s(mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (km/s)	
P7	GK1a	1.....1	44,11	10,43	4,23
		2.....2	44,12	10,50	4,20
		3.....3	44,11	10,60	4,16
		4.....4	69,00	18,02	3,83
	GK1b	1.....1	44,08	11,63	3,79
		2.....2	44,09	11,48	3,84
		3.....3	44,08	11,54	3,82
		4.....4	69,91	17,79	3,93
	GK3	1.....1	44,00	12,94	3,40
		2.....2	44,01	12,83	3,43
		3.....3	44,00	13,25	3,32
		4.....4	42,00	13,21	3,18
	GK4a	1.....1	44,10	12,60	3,50
		2.....2	44,11	12,75	3,46
		3.....3	44,11	12,90	3,42
		4.....4	40,50	13,41	3,02
GK4b	1.....1	44,11	13,78	3,20	
	2.....2	44,12	13,29	3,32	
	3.....3	44,11	13,41	3,29	
	4.....4	40,21	14,21	2,83	
GK2a	1.....1	44,00	13,62	3,23	
	2.....2	44,08	13,28	3,32	
	3.....3	44,00	13,41	3,28	
	4.....4	27,31	8,20	3,33	
GK2b	1.....1	44,00	13,21	3,33	
	2.....2	44,00	12,90	3,41	
	3.....3	44,00	13,02	3,38	
	4.....4	36,52	9,56	3,82	
GK2c	1.....1	44,06	12,38	3,56	
	2.....2	44,02	12,58	3,50	
	3.....3	44,00	12,61	3,49	
	4.....4	65,70	17,20	3,82	
GK5a	1.....1	42,51	12,61	3,37	
	2.....2	42,52	12,92	3,29	
	3.....3	42,50	12,96	3,28	
	4.....4	50,90	13,79	3,69	
GK5b	1.....1	42,00	11,80	3,56	
	2.....2	42,04	12,12	3,47	
	3.....3	42,03	11,94	3,52	
	4.....4	50,00	13,19	3,79	
GK6a	1.....1	40,11	10,21	3,93	
	2.....2	40,13	10,40	3,86	
	3.....3	40,11	10,31	3,89	
	4.....4	20,32	4,80	4,23	
GK6b	1.....1	38,92	10,01	3,89	
	2.....2	38,98	10,15	3,84	
	3.....3	38,90	10,24	3,80	
	4.....4	18,00	4,75	3,79	
GK6c	1.....1	39,10	8,69	4,50	
	2.....2	39,13	10,22	3,83	
	3.....3	39,10	10,29	3,80	
	4.....4	28,80	7,40	3,89	
GK6d	1.....1	39,00	10,57	3,69	
	2.....2	39,06	9,81	3,98	
	3.....3	39,00	9,82	3,97	
	4.....4	38,10	9,77	3,90	

Anhang 8

P r o b e	Meßrichtung	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit - Präerwärmung		Laufzeit - Posterwärmung		Laufzeit - Postbehandlung		
			t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)	
P1	1A2	1.....1	44,50	10,40	4,28	32,01	1,39	17,38	2,56
		2.....2	44,50	11,21	3,97	29,67	1,50	16,18	2,75
		3.....3	44,50	11,99	3,71	28,71	1,55	17,80	2,50
		4.....4	70,00	18,42	3,80	50,36	1,39	39,11	1,79
	1C	1.....1	43,50	15,21	2,86	20,81	2,09	16,80	2,59
		2.....2	43,50	15,21	2,86	21,64	2,01	17,83	2,44
		3.....3	43,20	15,21	2,84	22,38	1,93	17,42	2,48
		4.....4	39,50	13,62	2,90	30,38	1,30	22,44	1,76
	1D	1.....1	43,00	15,19	2,83	27,22	1,58	17,00	2,53
		2.....2	43,30	15,19	2,85	27,06	1,60	17,18	2,52
		3.....3	43,20	15,21	2,84	27,17	1,59	17,63	2,45
		4.....4	71,00	24,23	2,93	51,82	1,37	35,32	2,01
	1F1	1.....1	44,50	12,79	3,48	26,33	1,69	14,35	3,10
		2.....2	44,50	11,18	3,98	26,18	1,70	17,94	2,48
		3.....3	44,50	11,13	4,00	26,18	1,70	17,32	2,57
		4.....4	67,50	15,20	4,44	41,67	1,62	28,24	2,39
1F2	1.....1	44,70	12,05	3,71	24,97	1,79	11,04	4,05	
	2.....2	44,60	10,42	4,28	25,93	1,72	14,25	3,13	
	3.....3	44,50	10,40	4,28	24,59	1,81	14,40	3,09	
	4.....4	69,00	16,79	4,11	43,13	1,60	29,74	2,32	
P2	2A2	1.....1	43,30	10,85	3,99	25,62	1,69	19,59	2,21
		2.....2	43,00	10,02	4,29	24,86	1,73	17,55	2,45
		3.....3	43,00	10,05	4,28	25,29	1,70	17,20	2,50
		4.....4	70,50	17,58	4,01	42,47	1,66	32,34	2,18
	2B	1.....1	43,50	12,87	3,38	23,26	1,87	15,65	2,78
		2.....2	43,50	12,15	3,58	22,66	1,92	18,20	2,39
		3.....3	43,20	12,07	3,58	24,13	1,79	14,45	2,99
		4.....4	43,00	12,80	3,36	26,38	1,63	20,38	2,11
	2C	1.....1	44,60	13,12	3,40	26,24	1,70	20,09	2,22
		2.....2	44,60	13,12	3,40	27,03	1,65	21,55	2,07
		3.....3	44,80	14,09	3,18	28,18	1,59	22,86	1,96
		4.....4	40,50	11,19	3,62	23,96	1,69	17,38	2,33
	2F2	1.....1	44,70	10,40	4,30	24,03	1,86	14,19	3,15
		2.....2	44,70	9,59	4,66	23,78	1,88	19,78	2,26
		3.....3	44,60	10,40	4,29	24,24	1,84	18,82	2,37
		4.....4	68,50	19,19	3,57	50,37	1,36	35,68	1,92
P6	6A2	1.....1	44,60	9,59	4,65	26,39	1,69	16,22	2,75
		2.....2	44,80	8,80	5,09	23,96	1,87	16,78	2,67
		3.....3	44,40	8,79	5,05	25,66	1,73	15,00	2,96
		4.....4	67,00	14,41	4,65	43,23	1,55	30,59	2,19
	6D	1.....1	44,30	9,61	4,61	21,61	2,05	12,20	3,63
		2.....2	43,30	9,60	4,51	21,65	2,00	16,40	2,64
		3.....3	43,40	9,60	4,52	22,37	1,94	12,80	3,39
		4.....4	43,50	11,98	3,63	28,06	1,55	21,97	1,98
	6F1	1.....1	44,50	9,19	4,84	21,60	2,06	18,02	2,47
		2.....2	44,50	9,19	4,84	20,79	2,14	19,96	2,23
		3.....3	44,50	9,41	4,73	19,96	2,23	19,02	2,34
		4.....4	69,00	14,41	4,79	47,92	1,44	35,57	1,94
	6F2	1.....1	44,50	8,79	5,06	20,79	2,14	20,79	2,14
		2.....2	44,50	8,79	5,06	20,41	2,18	15,78	2,82
		3.....3	44,50	9,59	4,64	20,23	2,20	15,40	2,89
		4.....4	70,00	15,18	4,61	51,85	1,35	35,71	1,96
P7	GK4a	1.....1	44,20	19,22	2,30	24,83	1,78	12,21	3,62
		2.....2	44,20	19,22	2,30	24,02	1,84	18,19	2,43
		3.....3	44,20	14,40	3,07	22,44	1,97	13,39	3,30
		4.....4	37,00	15,23	2,43	27,21	1,36	19,58	1,89
	GK5b	1.....1	44,30	10,40	4,26	30,34	1,46	19,78	2,24
		2.....2	44,30	10,40	4,26	28,77	1,54	19,43	2,28
		3.....3	44,20	14,40	3,07	29,66	1,49	20,18	2,19
		4.....4	34,50	8,80	3,92	21,56	1,60	14,81	2,33

Probe P8

XY-Ebene	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit - Präerwärmung		Laufzeit - Posterwärmung		Laufzeit - Postbehandlung	
		t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)
1.....2	20,00	4,99	4,01	24,80	0,81	11,20	1,79
3	38,00	9,45	4,02	95,20	0,40	22,00	1,73
4	56,00	14,74	3,80	129,20	0,43	28,00	2,00
5	70,00	17,24	4,06	157,20	0,45	42,00	1,67
6	83,00	20,75	4,00	165,20	0,50	48,00	1,73
7	92,00	21,70	4,24	177,20	0,52	54,40	1,69
8	98,00	24,38	4,02	189,20	0,52	59,20	1,66
9	100,00	25,00	4,00	193,20	0,52	65,20	1,53
10	98,00	23,96	4,09	189,20	0,52	60,00	1,63
11	92,00	22,33	4,12	187,20	0,49	52,00	1,77
12	83,00	19,58	4,24	169,20	0,49	50,00	1,66
13	70,00	17,24	4,06	142,86	0,49	40,80	1,72
14	56,00	14,32	3,91	117,20	0,48	33,60	1,67
15	38,00	9,45	4,02	85,20	0,45	21,60	1,76
16	20,00	4,99	4,01	31,20	0,64	11,60	1,72
5.....6	20,00	4,95	4,04	31,20	0,64	11,40	1,75
7	38,00	9,92	3,83	77,20	0,49	22,00	1,73
8	56,00	14,36	3,90	123,20	0,45	30,00	1,87
9	70,00	17,03	4,11	161,20	0,43	40,80	1,72
10	83,00	21,84	3,80	181,20	0,46	48,40	1,71
11	92,00	23,59	3,90	191,20	0,48	52,60	1,75
12	98,00	25,13	3,90	199,20	0,49	57,60	1,70
13	100,00	22,42	4,46	204,08	0,49	64,00	1,56
14	98,00	24,50	4,00	199,20	0,49	56,80	1,73
15	92,00	22,72	4,05	183,20	0,50	53,60	1,72
16	83,00	21,84	3,80	182,20	0,46	48,80	1,70
1	70,00	17,24	4,06	163,20	0,43	42,80	1,64
2	56,00	14,51	3,86	143,20	0,39	30,80	1,82
3	38,00	10,27	3,70	83,20	0,46	19,60	1,94
4	20,00	5,00	4,00	37,20	0,54	11,20	1,79
9....10	20,00	4,95	4,04	33,20	0,60	11,20	1,79
11	38,00	10,13	3,75	73,20	0,52	19,60	1,94
12	56,00	11,57	4,84	119,20	0,47	26,00	2,15
13	70,00	16,20	4,32	155,20	0,45	38,40	1,82
14	83,00	19,58	4,24	179,20	0,46	47,20	1,76
15	92,00	22,12	4,16	195,20	0,47	54,80	1,68
16	98,00	25,39	3,86	199,20	0,49	60,40	1,62
1	100,00	20,53	4,87	197,20	0,51	64,00	1,56
2	98,00	25,39	3,86	189,20	0,52	58,40	1,68
3	92,00	23,00	4,00	186,20	0,49	54,00	1,70
4	83,00	22,13	3,75	158,20	0,52	48,00	1,73
5	70,00	18,42	3,80	142,86	0,49	39,20	1,79
6	56,00	14,00	4,00	118,20	0,47	27,60	2,03
7	38,00	9,74	3,90	74,20	0,51	17,20	2,21
8	20,00	5,00	4,00	31,20	0,64	9,20	2,17
13...14	20,00	5,00	4,00	23,20	0,86	10,00	2,00
15	38,00	9,50	4,00	95,20	0,40	19,20	1,98
16	56,00	14,00	4,00	131,20	0,43	28,00	2,00
1	70,00	17,03	4,11	161,20	0,43	40,00	1,75
2	83,00	19,76	4,20	183,20	0,45	47,60	1,74
3	92,00	22,49	4,09	191,20	0,48	53,60	1,72
4	98,00	20,16	4,86	205,20	0,48	59,20	1,66
5	100,00	25,97	3,85	211,20	0,47	63,20	1,58
6	98,00	24,50	4,00	205,20	0,48	53,60	1,83
7	92,00	22,33	4,12	195,20	0,47	50,00	1,84
8	83,00	20,75	4,00	185,20	0,45	44,00	1,89
9	70,00	17,50	4,00	157,20	0,45	38,00	1,84
10	56,00	14,55	3,85	125,20	0,45	25,60	2,19
11	38,00	10,13	3,75	81,20	0,47	18,20	2,09
12	20,00	5,00	4,00	23,20	0,86	8,40	2,38

Probe P 8

YZ-Ebene	Meßstrecke	Laufzeit -		Laufzeit -		Laufzeit -	
		Präerwärmung	US-Geschw.	Posterwärmung	US-Geschw.	Postbehandlung	US-Geschw.
Meßrichtung	s (mm)	t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)
1.....2	35,50	7,89	4,50	73,20	0,48	15,60	2,28
3	50,00	11,21	4,46	101,20	0,49	21,20	2,36
4	61,00	13,26	4,60	117,20	0,52	28,40	2,15
5	70,00	15,25	4,59	140,00	0,50	33,60	2,08
6	79,00	18,00	4,39	161,20	0,49	42,80	1,85
7	86,50	19,48	4,44	162,20	0,53	44,00	1,97
8	93,50	21,90	4,27	163,20	0,57	48,80	1,92
9	100,00	24,45	4,09	169,20	0,59	53,60	1,87
10	93,50	22,10	4,23	151,20	0,62	48,80	1,92
11	86,50	21,46	4,03	143,20	0,60	38,80	2,23
12	79,00	19,60	4,03	141,20	0,56	36,80	2,15
13	70,00	17,95	3,90	133,20	0,53	32,80	2,13
14	61,00	16,05	3,80	113,20	0,54	25,80	2,36
15	50,00	12,20	4,10	103,20	0,48	20,16	2,48
16	35,50	8,22	4,32	77,20	0,46	15,20	2,34
5.....6	13,00	3,23	4,02	25,20	0,52	7,20	1,81
7	26,00	6,13	4,24	53,20	0,49	14,00	1,86
8	41,50	10,64	3,90	85,20	0,49	21,60	1,92
9	70,00	17,99	3,89	140,00	0,50	32,40	2,16
10	91,00	21,67	4,20	189,20	0,48	48,00	1,90
11	97,00	21,85	4,44	191,20	0,51	56,00	1,73
12	99,00	22,40	4,42	193,20	0,51	56,20	1,76
13	100,00	24,04	4,16	195,20	0,51	64,40	1,55
14	99,00	23,40	4,23	194,20	0,51	65,20	1,52
15	97,00	23,43	4,14	199,20	0,49	52,40	1,85
16	91,00	22,58	4,03	165,20	0,55	50,40	1,81
1	70,00	15,25	4,59	129,20	0,54	35,20	1,99
2	41,50	10,30	4,03	79,20	0,52	21,20	1,96
3	26,00	6,45	4,03	33,20	0,78	13,60	1,91
4	13,00	3,01	4,32	25,20	0,52	7,20	1,81
9....10	35,50	7,62	4,66	71,20	0,50	16,80	2,11
11	50,00	11,01	4,54	93,20	0,54	22,80	2,19
12	61,00	14,35	4,25	113,20	0,54	28,40	2,15
13	70,00	16,43	4,26	131,20	0,53	37,60	1,86
14	79,00	18,81	4,20	135,20	0,58	44,40	1,78
15	86,50	20,07	4,31	159,20	0,54	44,80	1,93
16	93,50	22,10	4,23	151,20	0,62	49,60	1,89
1	100,00	24,39	4,10	165,20	0,61	54,40	1,84
2	93,50	24,61	3,80	163,20	0,57	45,60	2,05
3	86,50	22,18	3,90	159,20	0,54	41,20	2,10
4	79,00	20,79	3,80	151,20	0,52	36,40	2,17
5	70,00	15,25	4,59	149,20	0,47	30,80	2,27
6	61,00	16,05	3,80	113,20	0,54	27,60	2,21
7	50,00	13,51	3,70	93,20	0,54	20,08	2,49
8	35,50	9,34	3,80	75,20	0,47	15,60	2,28
13...14	13,00	3,01	4,32	26,20	0,50	7,20	1,81
15	26,00	6,74	3,86	45,20	0,58	13,60	1,91
16	41,50	10,92	3,80	81,20	0,51	17,20	2,41
1	70,00	18,13	3,86	125,20	0,56	33,60	2,08
2	91,00	23,95	3,80	157,20	0,58	47,60	1,91
3	97,00	24,25	4,00	183,20	0,53	50,80	1,91
4	99,00	24,50	4,04	191,20	0,52	56,80	1,74
5	100,00	24,94	4,01	187,20	0,53	62,80	1,59
6	99,00	24,75	4,00	151,20	0,65	57,60	1,72
7	97,00	23,43	4,14	177,20	0,55	51,60	1,88
8	91,00	22,30	4,08	165,20	0,55	48,40	1,88
9	70,00	16,63	4,21	121,20	0,58	32,00	2,19
10	41,50	9,88	4,20	79,20	0,52	21,20	1,96
11	26,00	6,09	4,27	43,20	0,60	12,80	2,03
12	13,00	3,20	4,06	26,20	0,50	7,20	1,81

Probe P8

XZ-Ebene	Meßstrecke	Laufzeit -		Laufzeit -		Laufzeit -	
		Präerwärmung	US-Geschw.	Posterwärmung	US-Geschw.	Postbehandlung	US-Geschw.
Meßrichtung	s (mm)	t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)
1.....2	35,50	8,24	4,31	61,20	0,58	15,20	2,34
3	50,00	12,82	3,90	87,20	0,57	18,80	2,66
4	61,00	14,56	4,19	107,20	0,57	27,20	2,24
5	70,00	18,09	3,87	129,20	0,54	32,40	2,16
6	79,00	18,81	4,20	145,20	0,54	36,80	2,15
7	86,50	19,89	4,35	149,20	0,58	40,40	2,14
8	93,50	21,69	4,31	157,20	0,59	43,60	2,14
9	100,00	24,81	4,03	165,20	0,61	52,00	1,92
10	93,50	22,48	4,16	167,20	0,56	45,60	2,05
11	86,50	20,69	4,18	163,20	0,53	42,80	2,02
12	79,00	19,60	4,03	161,20	0,49	37,20	2,12
13	70,00	16,83	4,16	133,20	0,53	35,60	1,97
14	61,00	14,56	4,19	115,20	0,53	28,40	2,15
15	50,00	12,20	4,10	97,20	0,51	19,60	2,55
16	35,50	8,64	4,11	67,20	0,53	13,20	2,69
5.....6	13,00	2,89	4,50	26,20	0,50	7,60	1,71
7	26,00	6,05	4,30	51,20	0,51	14,40	1,81
8	41,50	9,16	4,53	85,20	0,49	24,80	1,67
9	70,00	15,22	4,60	141,20	0,50	26,80	2,61
10	91,00	20,92	4,35	173,20	0,53	46,40	1,96
11	97,00	22,51	4,31	187,20	0,52	54,00	1,80
12	99,00	22,76	4,35	197,20	0,50	58,40	1,70
13	100,00	24,63	4,06	201,20	0,50	60,00	1,67
14	99,00	23,40	4,23	205,20	0,48	55,60	1,78
15	97,00	23,21	4,18	195,20	0,50	57,60	1,68
16	91,00	22,92	3,97	183,20	0,50	46,20	1,97
1	70,00	18,42	3,80	133,20	0,53	28,40	2,46
2	41,50	10,95	3,79	79,20	0,52	22,40	1,85
3	26,00	6,42	4,05	55,20	0,47	14,00	1,86
4	13,00	3,33	3,90	25,20	0,52	7,20	1,81
9....10	35,50	8,83	4,02	65,20	0,54	15,20	2,34
11	50,00	12,63	3,96	97,20	0,51	22,40	2,23
12	61,00	14,95	4,08	113,20	0,54	30,00	2,03
13	70,00	17,59	3,98	149,20	0,47	36,80	1,90
14	79,00	20,79	3,80	151,20	0,52	40,80	1,94
15	86,50	21,36	4,05	157,20	0,55	42,00	2,06
16	93,50	23,55	3,97	158,20	0,59	48,80	1,92
1	100,00	24,45	4,09	163,20	0,61	54,40	1,84
2	93,50	23,26	4,02	171,20	0,55	48,40	1,93
3	86,50	20,31	4,26	163,20	0,53	42,80	2,02
4	79,00	18,81	4,20	164,20	0,48	37,20	2,12
5	70,00	15,56	4,50	163,20	0,43	28,00	2,50
6	61,00	14,84	4,11	135,20	0,45	27,60	2,21
7	50,00	12,44	4,02	97,20	0,51	19,60	2,55
8	35,50	8,62	4,12	75,20	0,47	14,60	2,43
13...14	13,00	3,01	4,32	25,20	0,52	7,40	1,76
15	26,00	6,48	4,01	63,20	0,41	14,40	1,81
16	41,50	10,05	4,13	97,20	0,43	22,00	1,89
1	70,00	16,67	4,20	140,00	0,50	36,84	1,90
2	91,00	21,16	4,30	183,20	0,50	45,20	2,01
3	97,00	24,07	4,03	179,20	0,54	49,60	1,96
4	99,00	23,40	4,23	203,20	0,49	53,60	1,85
5	100,00	24,63	4,06	192,20	0,52	60,40	1,66
6	99,00	24,03	4,12	190,20	0,52	54,80	1,81
7	97,00	23,89	4,06	176,20	0,55	53,60	1,81
8	91,00	22,92	3,97	154,20	0,59	49,60	1,83
9	70,00	17,95	3,90	144,20	0,49	35,60	1,97
10	41,50	10,72	3,87	91,20	0,46	17,20	2,41
11	26,00	6,88	3,78	68,20	0,38	12,00	2,17
12	13,00	3,40	3,82	24,20	0,54	7,20	1,81

Probe P9

XY-Ebene	Meßstrecke	Laufzeit -		Laufzeit -		Laufzeit -	
		Präerwärmung	US-Geschw.	Posterwärmung	US-Geschw.	Postbehandlung	US-Geschw.
Meßrichtung	s (mm)	t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)
1.....2	10,0	3,1	3,24	15,2	0,66	7,2	1,39
3	19,0	5,7	3,31	32,8	0,58	15,2	1,25
4	28,0	7,8	3,59	49,6	0,56	23,0	1,22
5	35,0	9,7	3,60	65,6	0,53	29,6	1,18
6	41,5	11,1	3,74	78,4	0,53	34,2	1,21
7	46,0	12,9	3,56	82,4	0,56	35,8	1,28
8	49,0	13,6	3,60	77,6	0,63	36,2	1,35
9	50,0	15,2	3,30	75,2	0,66	38,6	1,30
10	49,0	11,9	4,12	55,2	0,89	37,2	1,32
11	46,0	11,0	4,18	48,0	0,96	38,4	1,20
12	41,5	12,2	3,40	50,4	0,82	36,8	1,13
13	35,0	10,3	3,39	53,6	0,65	28,2	1,24
14	28,0	8,5	3,30	42,4	0,66	22,6	1,24
15	19,0	5,3	3,58	27,2	0,70	17,2	1,10
16	10,0	2,9	3,39	15,2	0,66	7,2	1,39
5.....6	10,0	3,0	3,30	16,8	0,60	7,8	1,28
7	19,0	5,3	3,58	23,0	0,83	18,0	1,06
8	28,0	8,5	3,29	41,6	0,67	20,2	1,39
9	35,0	10,6	3,31	52,0	0,67	22,8	1,54
10	41,5	12,0	3,45	65,6	0,63	26,0	1,60
11	46,0	13,2	3,49	70,4	0,65	31,0	1,48
12	49,0	15,3	3,21	68,0	0,72	33,0	1,48
13	50,0	15,3	3,27	73,6	0,68	34,0	1,47
14	49,0	14,5	3,38	78,4	0,63	33,8	1,45
15	46,0	13,3	3,45	77,6	0,59	33,2	1,39
16	41,5	12,6	3,30	70,4	0,59	32,2	1,29
1	35,0	10,5	3,34	57,6	0,61	30,2	1,16
2	28,0	8,5	3,29	45,6	0,61	28,0	1,00
3	19,0	5,6	3,42	26,4	0,72	17,8	1,07
4	10,0	3,1	3,21	15,2	0,66	7,6	1,32
9....10	10,0	3,0	3,38	14,4	0,69	7,8	1,28
11	19,0	5,5	3,45	30,4	0,63	19,2	0,99
12	28,0	8,7	3,21	34,4	0,81	24,8	1,13
13	35,0	10,9	3,21	37,6	0,93	28,6	1,22
14	41,5	11,3	3,68	42,4	0,98	32,6	1,27
15	46,0	12,5	3,68	50,4	0,91	36,0	1,28
16	49,0	13,0	3,78	56,8	0,86	36,8	1,33
1	50,0	13,4	3,72	63,2	0,79	37,4	1,34
2	49,0	13,3	3,68	68,8	0,71	36,2	1,35
3	46,0	13,1	3,52	60,0	0,77	35,2	1,31
4	41,5	11,9	3,50	56,0	0,74	28,8	1,44
5	35,0	9,7	3,62	51,2	0,68	24,6	1,42
6	28,0	8,1	3,45	44,0	0,64	21,8	1,28
7	19,0	5,8	3,30	29,6	0,64	18,6	1,02
8	10,0	2,9	3,40	14,4	0,69	7,6	1,32
13...14	10,0	3,0	3,30	8,8	1,14	7,6	1,32
15	19,0	5,6	3,38	27,2	0,70	21,6	0,88
16	28,0	8,6	3,27	41,6	0,67	25,8	1,09
1	35,0	10,9	3,21	53,6	0,65	30,8	1,14
2	41,5	12,2	3,40	65,6	0,63	33,4	1,24
3	46,0	13,6	3,38	71,2	0,65	36,2	1,27
4	49,0	15,0	3,27	72,0	0,68	36,0	1,36
5	50,0	15,2	3,30	71,2	0,70	34,0	1,47
6	49,0	14,2	3,45	64,0	0,77	32,8	1,49
7	46,0	13,2	3,49	56,8	0,81	30,0	1,53
8	41,5	11,6	3,58	44,8	0,93	28,2	1,47
9	35,0	10,5	3,34	37,6	0,93	29,0	1,21
10	28,0	8,5	3,29	28,0	1,00	25,8	1,09
11	19,0	5,9	3,21	20,0	0,95	19,8	0,96
12	10,0	3,1	3,27	14,4	0,69	7,8	1,28

Anhang 10b

Probe P9

YZ-Ebene	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit -		Laufzeit -		Laufzeit -	
		Präerwärmung t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Posterwärmung t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Postbehandlung t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)
1.....2	20,5	6,0	3,42	25,6	0,80	14,1	1,45
3	25,0	7,2	3,45	24,6	1,02	22,6	1,11
4	30,0	8,6	3,48	26,6	1,13	24,0	1,25
5	35,0	9,9	3,52	37,6	0,93	25,4	1,38
6	38,5	10,5	3,66	41,6	0,93	26,0	1,48
7	42,0	12,2	3,44	48,8	0,86	24,0	1,75
8	38,5	10,8	3,56	44,8	0,86	22,2	1,73
9	35,0	9,3	3,78	44,0	0,80	21,2	1,65
10	30,0	8,2	3,65	36,0	0,83	19,6	1,53
11	25,0	7,3	3,41	36,8	0,68	17,2	1,45
12	20,5	6,1	3,38	25,6	0,80	14,1	1,45
4.....5	9,0	2,6	3,42	11,2	0,80	6,8	1,32
6	18,0	5,3	3,40	21,6	0,83	15,8	1,14
7	35,0	9,9	3,55	33,6	1,04	21,8	1,61
8	46,5	11,3	4,10	56,0	0,83	30,6	1,52
9	49,0	11,8	4,15	65,6	0,75	32,4	1,51
10	50,0	15,2	3,30	64,0	0,78	33,4	1,50
11	49,0	15,1	3,25	71,2	0,69	35,6	1,38
12	46,5	14,2	3,28	58,1	0,80	32,1	1,45
1	30,0	9,1	3,29	51,2	0,59	20,4	1,47
2	18,0	5,5	3,26	20,0	0,90	12,4	1,45
3	9,0	2,8	3,18	10,0	0,90	6,2	1,45
7.....8	20,5	6,1	3,36	24,4	0,84	16,0	1,28
9	29,0	8,9	3,27	42,4	0,68	20,6	1,41
10	35,0	10,2	3,42	49,4	0,71	24,2	1,45
11	41,5	12,6	3,29	64,4	0,64	26,2	1,58
12	45,5	14,5	3,14	56,9	0,80	30,3	1,50
1	42,0	12,7	3,30	52,0	0,81	24,2	1,74
2	45,5	14,3	3,19	50,6	0,90	30,3	1,50
3	41,5	11,7	3,54	41,4	1,00	31,4	1,32
4	35,0	9,6	3,65	33,4	1,05	28,0	1,25
5	29,0	7,7	3,78	29,4	0,99	21,8	1,33
6	20,5	5,3	3,85	23,4	0,88	15,8	1,30
10...9	9,0	2,7	3,33	8,0	1,13	5,2	1,73
8	18,0	5,3	3,42	24,0	0,75	16,4	1,10
7	35,0	11,0	3,18	47,2	0,74	38,2	0,92
6	46,5	14,6	3,19	57,6	0,81	38,4	1,21
5	49,0	13,6	3,59	64,0	0,77	36,2	1,35
4	50,0	13,7	3,65	66,4	0,75	33,6	1,49
3	49,0	13,0	3,78	72,0	0,68	35,0	1,40
2	46,5	13,0	3,59	58,1	0,80	32,1	1,45
1	30,0	8,1	3,69	33,6	0,89	18,2	1,65
12	18,0	5,6	3,20	25,7	0,70	12,0	1,50
11	9,0	2,8	3,19	10,0	0,90	6,0	1,50

Probe P9

XZ-Ebene	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit -		Laufzeit -		Laufzeit -	
		Präerwärmung t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Posterwärmung t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Postbehandlung t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)
1.....2	20,50	6,29	3,26	25,63	0,80	11,52	1,78
3	25,00	7,69	3,25	31,40	0,80	14,20	1,76
4	30,00	9,04	3,32	36,80	0,82	17,00	1,76
5	35,00	11,11	3,15	43,20	0,81	19,40	1,80
6	38,50	11,32	3,40	48,00	0,80	22,00	1,75
7	42,00	12,28	3,42	51,20	0,82	25,20	1,67
8	38,50	11,16	3,45	52,00	0,74	25,80	1,49
9	35,00	10,42	3,36	47,20	0,74	25,00	1,40
10	30,00	9,09	3,30	41,60	0,72	22,00	1,36
11	25,00	7,72	3,24	38,40	0,65	17,20	1,45
12	20,50	6,25	3,28	22,78	0,90	13,95	1,47
4.....5	9,00	2,86	3,15	16,60	0,54	8,80	1,02
6	18,00	5,66	3,18	26,40	0,68	14,20	1,27
7	35,00	10,94	3,20	50,40	0,69	18,80	1,86
8	46,50	14,44	3,22	72,80	0,64	31,60	1,47
9	49,00	11,92	4,11	72,00	0,68	32,20	1,52
10	50,00	11,90	4,20	74,40	0,67	33,60	1,49
11	49,00	11,40	4,30	75,20	0,65	36,20	1,35
12	46,50	12,17	3,82	58,13	0,80	32,07	1,45
1	30,00	9,04	3,32	50,40	0,60	25,60	1,17
2	18,00	5,70	3,16	20,00	0,90	12,68	1,42
3	9,00	2,82	3,19	11,25	0,80	6,12	1,47
7.....8	20,50	6,03	3,40	23,20	0,88	16,20	1,27
9	29,00	8,41	3,45	40,80	0,71	19,60	1,48
10	35,00	9,16	3,82	52,00	0,67	24,60	1,42
11	41,50	11,66	3,56	63,40	0,65	28,00	1,48
12	45,50	12,36	3,68	56,88	0,80	31,38	1,45
1	42,00	12,17	3,45	52,00	0,81	23,80	1,76
2	45,50	13,00	3,50	50,56	0,90	27,08	1,68
3	41,50	12,21	3,40	39,20	1,06	25,60	1,62
4	35,00	10,45	3,35	33,60	1,04	23,80	1,47
5	29,00	9,06	3,20	31,20	0,93	19,60	1,48
6	20,50	6,45	3,18	21,60	0,95	16,80	1,22
10...9	9,00	2,78	3,24	18,40	0,49	10,20	0,88
8	18,00	4,93	3,65	25,60	0,70	14,40	1,25
7	35,00	10,54	3,32	36,00	0,97	21,80	1,61
6	46,50	13,72	3,39	59,20	0,79	30,80	1,51
5	49,00	11,72	4,18	72,80	0,67	32,60	1,50
4	50,00	12,20	4,10	77,60	0,64	33,40	1,50
3	49,00	11,61	4,22	76,80	0,64	33,80	1,45
2	46,50	14,44	3,22	58,13	0,80	31,00	1,50
1	30,00	8,96	3,35	40,80	0,74	19,60	1,53
12	18,00	5,49	3,28	22,50	0,80	12,00	1,50
11	9,00	2,82	3,19	10,00	0,90	6,00	1,50

P r o b e P		Laufzeit -		Laufzeit -		Laufzeit -	
Meridiane - Meßrichtung	Meßstrecke s (mm)	Präerwärmung t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Posterwärmung t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Postbehandlung t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)
M1 (1-15')	100,00	22,40	4,46	114,00	0,88	53,60	1,87
M1 (2-14')	100,00	22,60	4,42	115,00	0,87	54,80	1,82
M1 (3-13')	100,00	22,80	4,39	115,00	0,87	53,20	1,88
M1 (4-12')	100,00	22,80	4,39	119,00	0,84	52,80	1,89
M1 (5-11')	100,00	23,20	4,31	123,00	0,81	55,60	1,80
M1 (6-10')	100,00	23,40	4,27	128,00	0,78	58,80	1,70
M1 (7- 9')	100,00	23,60	4,24	132,00	0,76	58,00	1,72
M1 (8- 8')	100,00	23,00	4,35	136,00	0,74	54,40	1,84
M1 (1'-15)	100,00	23,60	4,24	139,00	0,72	53,60	1,87
M1 (2'-14)	100,00	23,80	4,20	138,00	0,72	54,00	1,85
M1 (3'-13)	100,00	24,00	4,17	140,00	0,71	54,40	1,84
M1 (4'-12)	100,00	23,40	4,27	140,00	0,71	54,80	1,82
M1 (5'-11)	100,00	23,60	4,24	140,00	0,71	55,60	1,80
M1 (6'-10)	100,00	23,60	4,24	137,00	0,73	54,80	1,82
M1 (7'- 9)	100,00	23,00	4,35	136,00	0,74	55,60	1,80
M1 (8'- 8)	100,00	22,80	4,39	133,00	0,75	56,80	1,76
M2 (1-15')	100,00	21,60	4,63	120,00	0,83	54,00	1,85
M2 (2-14')	100,00	21,60	4,63	119,00	0,84	54,00	1,85
M2 (3-13')	100,00	21,40	4,67	122,00	0,82	53,20	1,88
M2 (4-12')	100,00	21,60	4,63	128,00	0,78	56,40	1,77
M2 (5-11')	100,00	22,00	4,55	132,00	0,76	52,40	1,91
M2 (6-10')	100,00	21,60	4,63	133,00	0,75	52,00	1,92
M2 (7- 9')	100,00	22,00	4,55	138,00	0,72	52,40	1,91
M2 (8- 8')	100,00	23,00	4,35	140,00	0,71	54,40	1,84
M2 (1'-15)	100,00	23,80	4,20	132,00	0,76	54,40	1,84
M2 (2'-14)	100,00	24,40	4,10	134,00	0,75	54,00	1,85
M2 (3'-13)	100,00	24,60	4,07	138,00	0,72	53,60	1,87
M2 (4'-12)	100,00	24,20	4,13	138,00	0,72	54,00	1,85
M2 (5'-11)	100,00	21,60	4,63	138,00	0,72	54,40	1,84
M2 (6'-10)	100,00	21,40	4,67	140,00	0,71	56,00	1,79
M2 (7'- 9)	100,00	22,60	4,42	139,00	0,72	56,80	1,76
M2 (8'- 8)	100,00	22,80	4,39	137,00	0,73	55,60	1,80
M3 (1-15')	100,00	21,40	4,67	124,00	0,81	52,00	1,92
M3 (2-14')	100,00	21,40	4,67	128,00	0,78	54,40	1,84
M3 (3-13')	100,00	21,40	4,67	132,00	0,76	52,40	1,91
M3 (4-12')	100,00	21,20	4,72	134,00	0,75	51,60	1,94
M3 (5-11')	100,00	21,20	4,72	135,00	0,74	53,60	1,87
M3 (6-10')	100,00	21,80	4,59	139,00	0,72	54,80	1,82
M3 (7- 9')	100,00	22,00	4,55	141,00	0,71	54,40	1,84
M3 (8- 8')	100,00	23,00	4,35	143,00	0,70	54,80	1,82
M3 (1'-15)	100,00	21,20	4,72	129,00	0,78	54,40	1,84
M3 (2'-14)	100,00	21,40	4,67	134,00	0,75	56,40	1,77
M3 (3'-13)	100,00	21,00	4,76	136,00	0,74	55,60	1,80
M3 (4'-12)	100,00	21,40	4,67	140,00	0,71	54,80	1,82
M3 (5'-11)	100,00	21,20	4,72	140,00	0,71	53,60	1,87
M3 (6'-10)	100,00	22,60	4,42	140,00	0,71	54,00	1,85
M3 (7'- 9)	100,00	22,60	4,42	142,00	0,70	55,80	1,79
M3 (8'- 8)	100,00	23,20	4,31	138,00	0,72	54,80	1,82
M4 (1-15')	100,00	21,60	4,63	129,00	0,78	53,20	1,88
M4 (2-14')	100,00	21,40	4,67	136,00	0,74	52,40	1,91
M4 (3-13')	100,00	21,40	4,67	138,00	0,72	52,00	1,92
M4 (4-12')	100,00	21,40	4,67	139,00	0,72	54,80	1,82
M4 (5-11')	100,00	21,40	4,67	142,00	0,70	53,20	1,88
M4 (6-10')	100,00	21,60	4,63	145,00	0,69	54,40	1,84
M4 (7- 9')	100,00	21,60	4,63	148,00	0,68	54,80	1,82
M4 (8- 8')	100,00	22,80	4,39	144,00	0,69	52,40	1,91
M4 (1'-15)	100,00	23,80	4,20	124,00	0,81	55,60	1,80
M4 (2'-14)	100,00	23,60	4,24	125,00	0,80	54,80	1,82
M4 (3'-13)	100,00	24,20	4,13	131,00	0,76	58,40	1,71
M4 (4'-12)	100,00	23,60	4,24	133,00	0,75	55,60	1,80
M4 (5'-11)	100,00	23,80	4,20	137,00	0,73	54,40	1,84
M4 (6'-10)	100,00	23,20	4,31	140,00	0,71	56,40	1,77
M4 (7'- 9)	100,00	23,40	4,27	140,00	0,71	54,40	1,84
M4 (8'- 8)	100,00	23,00	4,35	143,00	0,70	56,00	1,79

Anhang 11b

P r o b e P 8		Laufzeit -		Laufzeit -		Laufzeit -	
Meridianen -	Meßstrecke	Präerwärmung	US-Geschw.	Posterwärmung	US-Geschw.	Postbehandlung	US-Geschw.
Meßrichtung	s (mm)	t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)	t (µs)	v (Km/s)
M5 (1-15')	100,00	21,80	4,59	135,00	0,74	54,40	1,84
M5 (2-14')	100,00	21,40	4,67	139,00	0,72	51,60	1,94
M5 (3-13')	100,00	21,60	4,63	145,00	0,69	53,60	1,87
M5 (4-12')	100,00	22,40	4,46	146,00	0,68	54,40	1,84
M5 (5-11')	100,00	23,00	4,35	150,00	0,67	54,80	1,82
M5 (6-10')	100,00	23,40	4,27	149,00	0,67	53,60	1,87
M5 (7- 9')	100,00	23,80	4,20	145,00	0,69	52,40	1,91
M5 (8- 8')	100,00	24,20	4,13	143,00	0,70	54,40	1,84
M5 (1'-15)	100,00	23,20	4,31	116,00	0,86	54,80	1,82
M5 (2'-14)	100,00	23,60	4,24	120,00	0,83	54,40	1,84
M5 (3'-13)	100,00	23,40	4,27	122,00	0,82	55,20	1,81
M5 (4'-12)	100,00	24,00	4,17	127,00	0,79	57,60	1,74
M5 (5'-11)	100,00	23,80	4,20	130,00	0,77	54,40	1,84
M5 (6'-10)	100,00	23,60	4,24	135,00	0,74	54,80	1,82
M5 (7'- 9)	100,00	23,40	4,27	139,00	0,72	55,60	1,80
M5 (8'- 8)	100,00	24,00	4,17	140,00	0,71	55,20	1,81
M6 (1-15')	100,00	23,20	4,31	138,00	0,72	53,60	1,87
M6 (2-14')	100,00	22,80	4,39	143,00	0,70	54,00	1,85
M6 (3-13')	100,00	23,00	4,35	147,00	0,68	53,60	1,87
M6 (4-12')	100,00	22,60	4,42	149,00	0,67	52,80	1,89
M6 (5-11')	100,00	23,60	4,24	148,00	0,68	54,80	1,82
M6 (6-10')	100,00	23,80	4,20	147,00	0,68	54,40	1,84
M6 (7- 9')	100,00	24,00	4,17	144,00	0,69	52,80	1,89
M6 (8- 8')	100,00	23,80	4,20	140,00	0,71	52,00	1,92
M6 (1'-15)	100,00	23,20	4,31	113,00	0,88	55,20	1,81
M6 (2'-14)	100,00	23,40	4,27	113,00	0,88	56,80	1,76
M6 (3'-13)	100,00	23,60	4,24	119,00	0,84	54,40	1,84
M6 (4'-12)	100,00	23,80	4,20	120,00	0,83	58,00	1,72
M6 (5'-11)	100,00	23,60	4,24	129,00	0,78	54,80	1,82
M6 (6'-10)	100,00	23,80	4,20	132,00	0,76	55,60	1,80
M6 (7'- 9)	100,00	24,00	4,17	136,00	0,74	54,80	1,82
M6 (8'- 8)	100,00	23,80	4,20	139,00	0,72	55,60	1,80
M7 (1-15')	100,00	23,40	4,27	139,00	0,72	54,40	1,84
M7 (2-14')	100,00	23,80	4,20	144,00	0,69	53,60	1,87
M7 (3-13')	100,00	24,40	4,10	150,00	0,67	54,80	1,82
M3 (4-12')	100,00	23,60	4,24	148,00	0,68	51,60	1,94
M7 (5-11')	100,00	23,20	4,31	145,00	0,69	52,40	1,91
M7 (6-10')	100,00	23,80	4,20	143,00	0,70	52,40	1,91
M7 (7- 9')	100,00	24,00	4,17	138,00	0,72	53,60	1,87
M7 (8- 8')	100,00	23,80	4,20	134,00	0,75	53,20	1,88
M7 (1'-15)	100,00	22,80	4,39	110,00	0,91	52,40	1,91
M7 (2'-14)	100,00	23,00	4,35	109,00	0,92	54,40	1,84
M7 (3'-13)	100,00	23,20	4,31	113,00	0,88	54,80	1,82
M7 (4'-12)	100,00	23,20	4,31	117,00	0,85	56,00	1,79
M7 (5'-11)	100,00	23,40	4,27	122,00	0,82	58,40	1,71
M7 (6'-10)	100,00	24,80	4,03	128,00	0,78	57,20	1,75
M7 (7'- 9)	100,00	23,80	4,20	131,00	0,76	55,60	1,80
M7 (8'- 8)	100,00	24,00	4,17	134,00	0,75	56,40	1,77
M8 (1-15')	100,00	23,80	4,20	139,00	0,72	52,00	1,92
M8 (2-14')	100,00	24,00	4,17	140,00	0,71	54,40	1,84
M8 (3-13')	100,00	24,20	4,13	144,00	0,69	51,60	1,94
M8 (4-12')	100,00	24,40	4,10	143,00	0,70	52,40	1,91
M8 (5-11')	100,00	23,60	4,24	139,00	0,72	53,60	1,87
M8 (6-10')	100,00	23,40	4,27	137,00	0,73	54,80	1,82
M8 (7- 9')	100,00	24,00	4,17	134,00	0,75	54,00	1,85
M8 (8- 8')	100,00	23,60	4,24	132,00	0,76	55,20	1,81
M8 (1'-15)	100,00	21,40	4,67	111,00	0,90	54,00	1,85
M8 (2'-14)	100,00	21,80	4,59	111,00	0,90	54,60	1,83
M8 (3'-13)	100,00	21,60	4,63	112,00	0,89	57,20	1,75
M8 (4'-12)	100,00	22,80	4,39	115,00	0,87	57,60	1,74
M8 (5'-11)	100,00	23,00	4,35	120,00	0,83	58,80	1,70
M8 (6'-10)	100,00	23,20	4,31	124,00	0,81	58,00	1,72
M8 (7'- 9)	100,00	23,40	4,27	128,00	0,78	58,00	1,72
M8 (8'- 8)	100,00	23,00	4,35	132,00	0,76	56,40	1,77

P R O B E P 9		Laufzeit -		Laufzeit -		Laufzeit -	
Meridianen - Meßrichtung	Meßstrecke s (mm)	Präerwärmung t (µs)	US-Geschwindigkeit v (Km/s)	Posterwärmung t (µs)	US-Geschwindigkeit v (Km/s)	Postbehandlung t (µs)	US-Geschwindigkeit v (Km/s)
M1 (1- 5')	50	15,38	3,25	48,00	1,04	nicht meßbar	-
M1 (2- 4')	50	15,06	3,32	46,40	1,08	32,00	1,56
M1 (3- 3')	50	14,71	3,40	44,90	1,11	36,20	1,38
M1 (1'- 5)	50	12,11	4,13	40,80	1,23	nicht meßbar	-
M1 (2'- 4)	50	15,77	3,17	42,40	1,18	36,00	1,39
M1 (3'- 3)	50	15,43	3,24	43,20	1,16	36,60	1,37
M2 (1- 5')	50	12,41	4,03	47,20	1,06	nicht meßbar	-
M2 (2- 4')	50	16,13	3,10	45,60	1,10	36,80	1,36
M2 (3- 3')	50	15,43	3,24	45,60	1,10	36,20	1,38
M2 (1'- 5)	50	11,19	4,47	40,80	1,23	nicht meßbar	-
M2 (2'- 4)	50	16,13	3,10	43,20	1,16	35,80	1,40
M2 (3'- 3)	50	16,13	3,10	44,80	1,12	36,60	1,37
M3 (1- 5')	50	13,59	3,68	48,00	1,04	nicht meßbar	-
M3 (2- 4')	50	16,13	3,10	47,20	1,06	36,80	1,36
M3 (3- 3')	50	15,43	3,24	45,60	1,10	36,20	1,38
M3 (1'- 5)	50	11,42	4,38	40,80	1,23	nicht meßbar	-
M3 (2'- 4)	50	15,77	3,17	44,00	1,14	33,60	1,49
M3 (3'- 3)	50	16,13	3,10	45,60	1,10	36,40	1,37
M4 (1- 5')	50	11,79	4,24	48,00	1,04	nicht meßbar	-
M4 (2- 4')	50	16,50	3,03	47,20	1,06	35,60	1,40
M4 (3- 3')	50	16,50	3,03	46,40	1,08	33,20	1,51
M4 (1'- 5)	50	11,19	4,47	44,80	1,12	nicht meßbar	-
M4 (2'- 4)	50	16,13	3,10	46,40	1,08	31,60	1,58
M4 (3'- 3)	50	16,13	3,10	47,20	1,06	33,20	1,51
M5 (1- 5')	50	12,14	4,12	45,60	1,10	nicht meßbar	-
M5 (2- 4')	50	16,13	3,10	47,20	1,06	32,40	1,54
M5 (3- 3')	50	15,77	3,17	48,80	1,02	32,60	1,53
M5 (1'- 5)	50	11,42	4,38	48,00	1,04	nicht meßbar	-
M5 (2'- 4)	50	16,13	3,10	48,00	1,04	31,40	1,59
M5 (3'- 3)	50	16,50	3,03	48,80	1,02	32,40	1,54
M6 (1- 5')	50	11,55	4,33	45,60	1,10	nicht meßbar	-
M6 (2- 4')	50	15,77	3,17	48,00	1,04	33,00	1,52
M6 (3- 3')	50	15,77	3,17	48,00	1,04	32,20	1,55
M6 (1'- 5)	50	13,19	3,79	47,20	1,06	nicht meßbar	-
M6 (2'- 4)	50	15,77	3,17	48,00	1,04	31,40	1,59
M6 (3'- 3)	50	16,13	3,10	47,00	1,06	33,20	1,51
M7 (1- 5')	50	11,19	4,47	44,00	1,14	nicht meßbar	-
M7 (2- 4')	50	15,43	3,24	45,60	1,10	35,40	1,41
M7 (3- 3')	50	15,77	3,17	47,20	1,06	32,40	1,54
M7 (1'- 5)	50	16,13	3,10	48,00	1,04	nicht meßbar	-
M7 (2'- 4)	50	16,13	3,10	47,20	1,06	33,00	1,52
M7 (3'- 3)	50	15,77	3,17	46,40	1,08	33,40	1,50
M8 (1- 5')	50	12,59	3,97	43,20	1,16	nicht meßbar	-
M8 (2- 4')	50	15,43	3,24	43,20	1,16	35,40	1,41
M8 (3- 3')	50	16,13	3,10	45,60	1,10	33,20	1,51
M8 (1'- 5)	50	14,01	3,57	48,00	1,04	nicht meßbar	-
M8 (2'- 4)	50	14,75	3,39	47,20	1,06	34,00	1,47
M8 (3'- 3)	50	15,11	3,31	47,20	1,06	34,80	1,44

Probe	Meßrichtung (°)	P R Ä E R W Ä R M U N G									Mittelwert US-Geschw.
		EBENE 1			EBENE 2			EBENE 3			
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	
1A2	0°	35,00	10,00	3,50	35,00	10,42	3,36	35,00	10,20	3,43	3,43
	30°	39,00	12,00	3,25	39,00	11,57	3,37	39,00	10,21	3,82	3,48
	60°	53,50	13,21	4,05	45,20	11,99	3,77	45,20	12,42	3,64	3,82
	90°	44,50	10,00	4,45	38,50	8,59	4,48	38,50	8,81	4,37	4,43
	120°	50,00	11,99	4,17	43,00	11,20	3,84	43,00	10,41	4,13	4,05
	150°	41,70	12,02	3,47	41,70	11,78	3,54	41,70	11,62	3,59	3,53
	180°	35,00	9,80	3,57	35,00	11,59	3,02	35,00	10,00	3,50	3,36
1F1	0°	35,00	10,00	3,50	35,00	10,42	3,36	35,00	10,00	3,50	3,45
	30°	39,00	10,80	3,61	39,00	11,21	3,48	39,00	10,40	3,75	3,61
	60°	53,00	11,60	4,57	46,00	10,41	4,42	46,00	10,80	4,26	4,42
	90°	44,20	9,59	4,61	38,50	8,00	4,81	38,50	8,41	4,58	4,67
	120°	49,50	11,59	4,27	43,00	10,00	4,30	43,00	9,60	4,48	4,35
	150°	40,00	11,20	3,57	40,00	11,20	3,57	40,00	10,61	3,77	3,64
	180°	35,00	10,00	3,50	35,00	10,42	3,36	35,00	10,42	3,36	3,41
1F2	0°	38,00	10,22	3,72	38,00	10,41	3,65	38,00	10,00	3,80	3,72
	30°	43,00	10,80	3,98	43,00	10,41	4,13	43,00	11,59	3,71	3,94
	60°	53,00	11,99	4,42	46,00	10,72	4,29	46,00	10,82	4,25	4,32
	90°	44,20	9,21	4,80	38,50	8,39	4,59	38,50	8,00	4,81	4,73
	120°	49,50	11,59	4,27	43,00	10,00	4,30	43,00	10,41	4,13	4,23
	150°	42,00	10,82	3,88	42,00	10,82	3,88	42,00	11,20	3,75	3,88
	180°	35,00	10,42	3,36	35,00	10,00	3,50	35,00	10,42	3,36	3,41
2A2	0°	35,00	9,41	3,72	35,00	9,80	3,57	35,00	9,62	3,64	3,64
	30°	38,50	9,60	4,01	38,50	10,00	3,85	38,50	9,60	4,01	3,96
	60°	55,50	12,61	4,40	47,50	10,82	4,39	47,50	11,00	4,32	4,37
	90°	44,50	9,61	4,63	44,50	9,85	4,52	44,50	9,37	4,75	4,63
	120°	48,00	11,62	4,13	48,00	11,01	4,36	48,00	10,81	4,44	4,31
	150°	44,00	11,22	3,92	44,00	10,81	4,07	44,00	11,22	3,92	3,97
	180°	35,00	10,00	3,50	35,00	9,62	3,64	35,00	10,00	3,50	3,55
2F2	0°	34,00	10,79	3,15	34,00	10,40	3,27	34,00	11,60	2,93	3,12
	30°	38,50	11,19	3,44	38,50	10,00	3,85	38,50	10,81	3,56	3,62
	60°	55,50	13,60	4,08	47,50	11,82	4,02	47,50	12,03	3,95	4,02
	90°	44,50	10,00	4,45	38,00	9,20	4,13	38,00	9,41	4,04	4,21
	120°	48,00	12,00	4,00	41,20	10,62	3,88	41,20	10,81	3,81	3,90
	150°	44,00	12,83	3,43	44,00	12,22	3,60	44,00	12,15	3,62	3,55
	180°	35,00	10,42	3,36	35,00	10,00	3,50	35,00	10,80	3,24	3,37
6A2	0°	33,50	8,00	4,19	33,50	8,40	3,99	33,50	8,19	4,09	4,09
	30°	36,50	8,00	4,56	36,50	8,41	4,34	36,50	8,20	4,45	4,45
	60°	54,00	11,20	4,82	48,50	10,41	4,66	48,50	10,21	4,75	4,74
	90°	45,00	8,81	5,11	38,50	8,00	4,81	38,50	7,81	4,93	4,95
	120°	48,00	9,60	5,00	41,00	8,61	4,76	41,00	8,58	4,78	4,85
	150°	42,00	8,81	4,77	42,00	9,01	4,66	42,00	9,21	4,56	4,66
	180°	32,50	8,21	3,96	32,50	8,40	3,87	32,50	8,00	4,06	3,96
6F1	0°	35,00	9,21	3,80	35,00	9,21	3,80	35,00	9,62	3,64	3,75
	30°	37,50	9,59	3,91	37,20	9,82	3,79	37,20	9,61	3,87	3,86
	60°	54,00	13,17	4,10	49,00	12,01	4,08	49,00	12,41	3,95	4,04
	90°	44,60	9,61	4,64	38,50	8,81	4,37	38,50	9,21	4,18	4,40
	120°	47,50	10,39	4,57	41,00	10,00	4,10	41,00	9,60	4,27	4,31
	150°	44,50	10,40	4,28	44,50	10,00	4,45	44,50	10,80	4,12	4,28
	180°	35,00	9,62	3,64	35,00	9,41	3,72	35,00	9,21	3,80	3,72
6F2	0°	35,00	9,62	3,64	35,00	9,21	3,80	35,00	9,41	3,72	3,72
	30°	38,00	9,79	3,88	38,00	9,79	3,88	38,00	9,60	3,96	3,91
	60°	56,20	12,01	4,68	49,00	11,81	4,15	49,00	12,01	4,08	4,30
	90°	44,60	8,80	5,07	38,50	8,81	4,37	38,50	8,41	4,58	4,67
	120°	47,50	10,19	4,66	41,00	10,20	4,02	41,00	10,00	4,10	4,26
	150°	45,40	10,81	4,20	45,40	11,41	3,98	45,40	11,21	4,05	4,07
	180°	35,00	8,79	3,98	35,00	9,41	3,72	35,00	9,62	3,64	3,78

Probe	Meßrichtung (°)	P O S T E R W Ä R M U N G									
		EBENE 1			EBENE 2			EBENE 3			Mittelwert
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	US-Geschw. v (Km/s)
1A2	0°	35,00	24,82	1,41	35,00	24,31	1,44	35,00	23,33	1,50	1,45
	30°	39,00	27,86	1,40	39,00	27,86	1,40	39,00	27,66	1,41	1,40
	60°	53,50	33,65	1,59	45,20	32,99	1,37	45,20	33,24	1,36	1,44
	90°	44,50	22,25	2,00	38,50	21,88	1,76	38,50	21,63	1,78	1,85
	120°	50,00	29,59	1,69	43,00	28,29	1,52	43,00	26,88	1,60	1,60
	150°	41,70	30,44	1,37	41,70	31,35	1,33	41,70	30,89	1,35	1,35
	180°	35,00	24,65	1,42	35,00	25,18	1,39	35,00	24,82	1,41	1,41
1F1	0°	35,00	22,88	1,53	35,00	20,71	1,69	35,00	20,83	1,68	1,63
	30°	39,00	30,47	1,28	39,00	30,71	1,27	39,00	30,95	1,26	1,27
	60°	53,00	27,32	1,94	46,00	26,74	1,72	46,00	27,06	1,70	1,79
	90°	44,20	21,56	2,05	38,50	21,04	1,83	38,50	21,51	1,79	1,89
	120°	49,50	25,92	1,91	43,00	24,71	1,74	43,00	25,29	1,70	1,78
	150°	40,00	23,67	1,69	40,00	23,95	1,67	40,00	24,24	1,65	1,67
	180°	35,00	22,73	1,54	35,00	20,96	1,67	35,00	20,83	1,68	1,63
1F2	0°	38,00	22,22	1,71	38,00	22,49	1,69	38,00	22,62	1,68	1,69
	30°	43,00	24,02	1,79	43,00	24,02	1,79	43,00	23,24	1,85	1,81
	60°	53,00	26,50	2,00	46,00	24,86	1,85	46,00	24,08	1,91	1,92
	90°	44,20	19,22	2,30	38,50	17,66	2,18	38,50	16,81	2,29	2,26
	120°	49,50	26,47	1,87	43,00	23,24	1,85	43,00	23,12	1,86	1,86
	150°	42,00	25,61	1,64	42,00	26,42	1,59	42,00	25,93	1,62	1,62
	180°	35,00	22,01	1,59	35,00	22,29	1,57	35,00	22,44	1,56	1,57
2A2	0°	35,00	22,44	1,56	35,00	21,60	1,62	35,00	22,15	1,58	1,59
	30°	38,50	22,51	1,71	38,50	22,00	1,75	38,50	22,65	1,70	1,72
	60°	55,50	25,11	2,21	47,50	25,00	1,90	47,50	24,87	1,91	2,01
	90°	44,50	20,05	2,22	44,50	23,06	1,93	44,50	22,70	1,96	2,04
	120°	48,00	27,27	1,76	48,00	27,91	1,72	48,00	27,75	1,73	1,74
	150°	44,00	27,50	1,60	44,00	26,83	1,64	44,00	27,33	1,61	1,62
	180°	35,00	22,15	1,58	35,00	21,88	1,60	35,00	22,01	1,59	1,59
2F2	0°	34,00	26,36	1,29	34,00	27,20	1,25	34,00	25,95	1,31	1,28
	30°	38,50	28,95	1,33	38,50	28,10	1,37	38,50	28,73	1,34	1,35
	60°	55,50	33,64	1,65	47,50	28,79	1,65	47,50	29,69	1,60	1,63
	90°	44,50	25,72	1,73	38,00	22,22	1,71	38,00	22,49	1,69	1,71
	120°	48,00	31,37	1,53	41,20	28,03	1,47	41,20	27,47	1,50	1,50
	150°	44,00	32,12	1,37	44,00	32,84	1,34	44,00	32,59	1,35	1,35
	180°	35,00	28,93	1,21	35,00	30,43	1,15	35,00	25,74	1,36	1,24
6A2	0°	33,50	24,10	1,39	33,50	23,93	1,40	33,50	23,59	1,42	1,40
	30°	36,50	23,55	1,55	36,50	23,86	1,53	36,50	23,70	1,54	1,54
	60°	54,00	26,47	2,04	48,50	26,08	1,86	48,50	25,66	1,89	1,93
	90°	45,00	20,36	2,21	38,50	19,64	1,96	38,50	19,25	2,00	2,06
	120°	48,00	26,37	1,82	41,00	25,31	1,62	41,00	24,85	1,65	1,70
	150°	42,00	27,27	1,54	42,00	26,92	1,56	42,00	26,75	1,57	1,56
	180°	32,50	23,90	1,36	32,50	24,25	1,34	32,50	24,62	1,32	1,34
6F1	0°	35,00	24,82	1,41	35,00	24,65	1,42	35,00	24,48	1,43	1,42
	30°	37,50	26,41	1,42	37,20	26,96	1,38	37,20	26,20	1,42	1,41
	60°	54,00	37,50	1,44	49,00	37,40	1,31	49,00	37,69	1,30	1,35
	90°	44,60	28,77	1,55	38,50	30,31	1,27	38,50	30,08	1,28	1,37
	120°	47,50	32,76	1,45	41,00	27,33	1,50	41,00	31,30	1,31	1,42
	150°	44,50	31,34	1,42	44,50	30,69	1,45	44,50	30,90	1,44	1,44
	180°	35,00	24,65	1,42	35,00	24,31	1,44	35,00	24,82	1,41	1,42
6F2	0°	35,00	29,66	1,18	35,00	30,17	1,16	35,00	30,43	1,15	1,16
	30°	38,00	32,20	1,18	38,00	26,57	1,43	38,00	34,23	1,11	1,24
	60°	56,20	38,76	1,45	49,00	30,43	1,61	49,00	39,20	1,25	1,44
	90°	44,60	27,36	1,63	38,50	20,26	1,90	38,50	28,10	1,37	1,63
	120°	47,50	29,32	1,62	41,00	20,60	1,99	41,00	30,37	1,35	1,65
	150°	45,40	35,47	1,28	45,40	25,65	1,77	45,40	35,19	1,29	1,45
	180°	35,00	31,25	1,12	35,00	30,43	1,15	35,00	29,91	1,17	1,15

Probe	Meßrichtung (°)	P O S T B E H A N D L U N G									
		EBENE 1			EBENE 2			EBENE 3			Mittelwert
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	US-Geschw. v (Km/s)
1A2	0°	35,00	22,40	1,56	35,00	23,20	1,51	35,00	22,60	1,55	1,54
	30°	39,00	25,00	1,56	39,00	25,80	1,51	39,00	24,60	1,59	1,55
	60°	53,50	28,40	1,88	45,20	26,20	1,73	45,20	22,80	1,98	1,86
	90°	44,50	19,40	2,29	38,50	18,60	2,07	38,50	16,80	2,29	2,22
	120°	50,00	22,60	2,21	43,00	20,80	2,07	43,00	20,20	2,13	2,14
	150°	41,70	25,80	1,62	41,70	25,40	1,64	41,70	26,00	1,60	1,62
	180°	35,00	25,20	1,39	35,00	24,00	1,46	35,00	25,40	1,38	1,41
1F1	0°	35,00	22,60	1,55	35,00	22,80	1,54	35,00	22,40	1,56	1,55
	30°	39,00	25,60	1,52	39,00	26,80	1,46	39,00	26,00	1,50	1,49
	60°	53,00	20,00	2,65	46,00	22,80	2,02	46,00	20,80	2,21	2,29
	90°	44,20	19,60	2,26	38,50	17,60	2,19	38,50	19,20	2,01	2,15
	120°	49,50	24,40	2,03	43,00	21,80	1,97	43,00	23,80	1,81	1,94
	150°	40,00	19,60	2,04	40,00	17,80	2,25	40,00	19,00	2,11	2,13
	180°	35,00	18,20	1,92	35,00	17,80	1,97	35,00	18,00	1,94	1,94
1F2	0°	38,00	16,40	2,32	38,00	16,60	2,29	38,00	16,20	2,35	2,32
	30°	43,00	19,20	2,24	43,00	19,40	2,22	43,00	17,80	2,42	2,29
	60°	53,00	21,00	2,52	46,00	17,80	2,58	46,00	16,80	2,74	2,62
	90°	44,20	15,40	2,87	38,50	12,80	3,01	38,50	13,80	2,79	2,89
	120°	49,50	19,00	2,61	43,00	16,80	2,56	43,00	16,20	2,65	2,61
	150°	42,00	20,40	2,06	42,00	19,60	2,14	42,00	19,00	2,21	2,14
	180°	35,00	17,60	1,99	35,00	16,80	2,08	35,00	16,40	2,13	2,07
2A2	0°	35,00	18,60	1,88	35,00	17,40	2,01	35,00	17,00	2,06	1,98
	30°	38,50	16,60	2,32	38,50	17,60	2,19	38,50	17,80	2,16	2,22
	60°	55,50	22,52	2,46	47,50	19,40	2,45	47,50	19,60	2,42	2,45
	90°	44,50	17,40	2,56	44,50	16,00	2,41	44,50	14,80	2,60	2,52
	120°	48,00	19,80	2,42	48,00	22,00	2,18	48,00	17,20	2,79	2,47
	150°	44,00	22,80	1,93	44,00	24,20	1,82	44,00	23,20	1,90	1,88
	180°	35,00	19,60	1,79	35,00	17,80	1,97	35,00	19,60	1,79	1,85
2F2	0°	34,00	19,60	1,73	34,00	19,20	1,77	34,00	19,00	1,79	1,77
	30°	38,50	22,20	1,73	38,50	22,00	1,75	38,50	21,40	1,80	1,76
	60°	55,50	25,60	2,17	47,50	22,00	2,16	47,50	23,20	2,05	2,12
	90°	44,50	19,80	2,25	38,00	17,80	2,13	38,00	18,20	2,09	2,16
	120°	48,00	24,00	2,00	41,20	19,40	2,12	41,20	21,60	1,91	2,01
	150°	44,00	26,20	1,68	44,00	25,00	1,76	44,00	26,00	1,69	1,71
	180°	35,00	21,20	1,65	35,00	22,40	1,56	35,00	22,00	1,59	1,60
6A2	0°	33,50	17,60	1,90	33,50	19,00	1,76	33,50	16,60	2,02	1,89
	30°	36,50	17,80	2,05	36,50	19,20	1,90	36,50	17,00	2,15	2,03
	60°	54,00	21,80	2,48	48,50	21,60	2,25	48,50	20,20	2,40	2,37
	90°	45,00	18,00	2,50	38,50	17,80	2,16	38,50	16,00	2,41	2,36
	120°	48,00	19,60	2,45	41,00	19,40	2,11	41,00	18,80	2,18	2,25
	150°	42,00	22,00	1,91	42,00	22,20	1,89	42,00	21,80	1,93	1,91
	180°	32,50	18,80	1,73	32,50	19,40	1,68	32,50	19,20	1,69	1,70
6F1	0°	35,00	21,40	1,64	35,00	22,40	1,56	35,00	21,80	1,61	1,60
	30°	37,50	23,00	1,63	37,20	22,40	1,66	37,20	23,40	1,59	1,63
	60°	54,00	31,00	1,74	49,00	28,20	1,74	49,00	28,60	1,71	1,73
	90°	44,60	22,40	1,99	38,50	19,40	1,98	38,50	22,20	1,73	1,90
	120°	47,50	22,60	2,10	41,00	19,40	2,11	41,00	22,40	1,83	2,02
	150°	44,50	24,00	1,85	44,50	22,20	2,00	44,50	22,20	2,00	1,95
	180°	35,00	22,40	1,56	35,00	21,40	1,64	35,00	21,40	1,64	1,61
6F2	0°	35,00	21,40	1,64	35,00	24,20	1,45	35,00	23,80	1,47	1,52
	30°	38,00	24,80	1,53	38,00	19,40	1,96	38,00	19,80	1,92	1,80
	60°	56,20	25,80	2,18	49,00	19,60	2,50	49,00	26,80	1,83	2,17
	90°	44,60	17,60	2,53	38,50	14,20	2,71	38,50	21,80	1,77	2,34
	120°	47,50	19,60	2,42	41,00	17,20	2,38	41,00	22,40	1,83	2,21
	150°	45,40	26,40	1,72	45,40	22,40	2,03	45,40	25,60	1,77	1,84
	180°	35,00	23,20	1,51	35,00	24,20	1,45	35,00	23,60	1,48	1,48

Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew. %)						
Z e i t	P r o b e					
	1A	1B	1C	1D	1E	1F
nach 1 Tag	0,13	0,21	0,12	0,19	0,22	0,14
nach 5 Tagen	0,16	0,26	0,15	0,21	0,27	0,21
nach 7 Tagen	0,19	0,28	0,19	0,22	0,29	0,23
nach 11 Tagen	0,21	0,29	0,22	0,25	0,30	0,25
nach 13 Tagen	0,21	0,32	0,22	0,25	0,30	0,26
nach 14 Tagen	0,21	0,32	0,22	0,25	0,30	0,26
nach 15 Tagen	0,21	0,32	0,22	0,25	0,30	0,26
nach 16 Tagen	0,21	0,32	0,22	0,25	0,30	0,26

Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew. %)						
Z e i t	P r o b e					
	2A	2B	2C	2D	2E	2F
nach 1 Tag	0,17	0,18	0,15	0,28	0,29	0,19
nach 5 Tagen	0,19	0,22	0,19	0,3	0,33	0,21
nach 7 Tagen	0,21	0,24	0,25	0,32	0,39	0,26
nach 11 Tagen	0,24	0,26	0,25	0,32	0,4	0,27
nach 13 Tagen	0,26	0,28	0,25	0,32	0,41	0,27
nach 14 Tagen	0,26	0,28	0,25	0,32	0,41	0,27
nach 15 Tagen	0,26	0,28	0,25	0,32	0,41	0,27
nach 16 Tagen	0,26	0,28	0,25	0,32	0,41	0,27

Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew. %)						
Z e i t	P r o b e					
	6A	6B	6C	6D	6E	6F
nach 1 Tag	0,14	0,17	0,16	0,12	0,21	0,15
nach 5 Tagen	0,19	0,23	0,20	0,16	0,23	0,21
nach 7 Tagen	0,20	0,24	0,21	0,18	0,24	0,22
nach 11 Tagen	0,21	0,24	0,23	0,19	0,25	0,23
nach 13 Tagen	0,23	0,25	0,24	0,19	0,25	0,23
nach 14 Tagen	0,23	0,25	0,24	0,19	0,25	0,23
nach 15 Tagen	0,23	0,25	0,24	0,19	0,25	0,23
nach 16 Tagen	0,23	0,25	0,24	0,19	0,25	0,23

Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew. %)														
Z e i t	P r o b e													
	GK1a	GK1b	GK2a	GK2b	GK2c	GK3	GK4a	GK4b	GK5a	GK5b	GK6a	GK6b	GK6c	GK6d
nach 1 Tag	0,17	0,16	0,51	0,31	0,24	0,41	0,39	0,40	0,29	0,30	0,81	0,34	0,55	0,97
nach 4 Tagen	0,24	0,20	0,55	0,36	0,27	0,45	0,45	0,42	0,32	0,33	0,87	0,39	0,59	1,10
nach 7 Tagen	0,25	0,23	0,58	0,37	0,28	0,47	0,47	0,44	0,36	0,35	0,90	0,44	0,62	1,12
nach 8 Tagen	0,26	0,25	0,59	0,39	0,30	0,48	0,48	0,45	0,39	0,37	0,92	0,47	0,65	1,14
nach 12 Tagen	0,27	0,26	0,60	0,42	0,31	0,52	0,50	0,45	0,40	0,38	0,93	0,49	0,67	1,15
nach 13 Tagen	0,28	0,26	0,60	0,42	0,31	0,52	0,50	0,45	0,40	0,39	0,94	0,49	0,68	1,16
nach 14 Tagen	0,28	0,26	0,60	0,42	0,31	0,52	0,50	0,45	0,40	0,39	0,94	0,49	0,68	1,16
nach 15 Tagen	0,28	0,26	0,60	0,42	0,31	0,52	0,50	0,45	0,40	0,39	0,94	0,49	0,68	1,16
nach 16 Tagen	0,28	0,26	0,60	0,42	0,31	0,52	0,50	0,45	0,40	0,39	0,94	0,49	0,68	1,16

P R Ä E R W Ä R M U N G				
P r o b e	Wasseraufnahme unter Vakuum	Rohdichte	Reindichte	Porosität
	Gew %	g/cm ³	g/cm ³	Vol %
1A2	0,28	2,70	2,72	0,74
1C	0,27	2,70	2,72	0,74
1D	0,30	2,69	2,72	0,82
1F1	0,31	2,69	2,72	0,80
1F2	0,30	2,69	2,72	0,82
2A2	0,31	2,70	2,72	0,84
2B	0,36	2,69	2,72	0,96
2C	0,30	2,69	2,72	0,81
2F2	0,32	2,70	2,71	0,87
6A2	0,26	2,70	2,72	0,74
6D	0,26	2,70	2,72	0,71
6F1	0,28	2,69	2,72	0,76
6F2	0,29	2,70	2,72	0,74
GK4a	0,55	2,67	2,71	1,48
GK5b	0,43	2,68	2,72	1,14
P8	0,15	2,70	2,70	0,39
P9	0,24	2,67	2,67	0,64

P O S T E R W Ä R M U N G				
P r o b e	Wasseraufnahme unter Vakuum	Rohdichte	Reindichte	Porosität
	Gew %	g/cm ³	g/cm ³	Vol %
1A2	0,85	2,65	2,71	2,25
1C	0,98	2,63	2,71	2,60
1D	1,01	2,64	2,71	2,67
1F1	0,94	2,64	2,71	2,50
1F2	0,69	2,66	2,71	1,84
2A2	0,72	2,66	2,71	1,91
2B	0,82	2,65	2,70	2,17
2C	1,02	2,63	2,70	2,69
2F2	1,02	2,63	2,71	2,70
6A2	0,75	2,66	2,71	2,00
6D	0,84	2,65	2,71	2,24
6F1	0,84	2,65	2,71	2,23
6F2	0,98	2,64	2,71	2,58
GK4a	0,84	2,65	2,71	2,23
GK5b	0,92	2,64	2,71	2,44
P8	1,11	2,64	2,72	2,92
P9	1,13	2,60	2,68	2,94

P O S T B E H A N D L U N G				
P r o b e	Wasseraufnahme unter Vakuum	Rohdichte	Reindichte	Porosität
	Gew %	g/cm ³	g/cm ³	Vol %
1A2	0,68	2,66	2,71	1,81
1C	0,91	2,64	2,71	2,40
1D	0,90	2,65	2,71	2,38
1F1	0,89	2,65	2,71	2,36
1F2	0,56	2,67	2,71	1,51
2A2	0,55	2,67	2,71	1,46
2B	0,70	2,66	2,71	1,87
2C	0,75	2,59	2,64	1,95
2F2	0,92	2,61	2,67	2,39
6A2	0,60	2,67	2,71	1,60
6D	0,75	2,66	2,71	1,87
6F1	0,76	2,66	2,71	2,02
6F2	0,93	2,64	2,71	2,46
GK4a	0,69	2,66	2,71	1,85
GK5b	0,75	2,66	2,71	1,99
P8	0,72	2,65	2,70	1,92
P9	0,67	2,64	2,69	1,78

Probe	Wasseraufnahme		S-Wert (...)	Rohdichte g/cm3	Reindichte g/cm3	Porosität Vol %
	Atmosphärendruck	Wakuum				
	Gew %	Gew %				
1A	0,21	0,26	0,81	2,70	2,72	0,70
1B	0,32	0,35	0,91	2,69	2,72	0,95
1C	0,22	0,27	0,80	2,70	2,72	0,74
1D	0,25	0,30	0,82	2,69	2,72	0,82
1E	0,30	0,35	0,86	2,69	2,71	0,94
1F	0,26	0,30	0,88	2,69	2,72	0,80
2A	0,26	0,31	0,85	2,70	2,72	0,83
2B	0,28	0,36	0,79	2,69	2,72	0,96
2C	0,25	0,30	0,83	2,69	2,72	0,81
2D	0,32	0,37	0,87	2,69	2,72	0,99
2E	0,41	0,48	0,86	2,69	2,72	1,29
2F	0,27	0,33	0,82	2,69	2,71	0,89
6A	0,23	0,28	0,80	2,70	2,72	0,76
6B	0,25	0,30	0,82	2,70	2,72	0,81
6C	0,24	0,29	0,82	2,70	2,72	0,79
6D	0,19	0,26	0,73	2,70	2,72	0,71
6E	0,25	0,32	0,78	2,69	2,72	0,86
6F	0,23	0,29	0,81	2,70	2,72	0,77
GK1a	0,28	0,34	0,83	2,69	2,72	0,91
GK1b	0,26	0,31	0,85	2,69	2,72	0,83
GK2a	0,60	0,67	0,90	2,66	2,71	1,77
GK2b	0,42	0,44	0,95	2,68	2,71	1,18
GK2c	0,31	0,35	0,87	2,69	2,71	0,95
GK3	0,52	0,58	0,89	2,67	2,72	1,56
GK4a	0,50	0,55	0,91	2,67	2,71	1,48
GK4b	0,45	0,51	0,89	2,68	2,71	1,36
GK5a	0,40	0,46	0,88	2,68	2,71	1,22
GK5b	0,39	0,43	0,92	2,68	2,72	1,14
GK6a	0,94	1,11	0,84	2,62	2,70	2,93
GK6b	0,49	0,58	0,85	2,65	2,69	1,54
GK6c	0,68	0,77	0,89	2,63	2,68	2,02
GK6d	1,16	1,26	0,92	2,62	2,71	3,29

Probe	Biaxiale BZF N/mm2	E - Modul KN/mm2
1B - Oberfläche	6,94	10,60
1C - Oberfläche	4,11	10,20
1C - Kern	5,74	7,20
1D - Kern	3,57	8,00
1F - Oberfläche	7,17	8,80
2B - Kern	5,33	14,20
2C - Oberfläche	6,23	13,50
2D - Kern	4,13	6,80
2D - Oberfläche	5,45	7,10
2F - Kern	7,78	10,10
2F - Oberfläche	8,38	11,50
6B - Kern	7,18	12,80
6B - Oberfläche	7,94	13,80
6C - Oberfläche	7,90	10,40
6C - Kern	7,90	16,50
6D - Kern	8,40	10,10
6D - Oberfläche	10,22	22,00
GK1a - Oberfläche	8,76	12,10
GK3 - Kern	7,53	22,80
GK5a - Kern	8,17	6,50
GK5b - Oberfläche	7,05	9,90

Konservierungs- mittel	Probe	Gewicht vor	Gewicht nach	Mittelaufnahme	Mittelaufnahme	Gewicht nach	Mittelaufnahme	Mittelaufnahme
		Tränkung	Tränkung	(flüssig)	(flüssig)	Aushärte	(fest)	(fest)
		gr	gr	gr	%	gr	gr	%
Acrylharz	1C	158,03	159,37	1,34	0,848	158,04	0,01	0,006
	1D	278,22	280,53	2,31	0,830	278,26	0,04	0,013
	1F1	282,28	284,63	2,35	0,833	282,29	0,01	0,004
	2B	174,81	176,06	1,25	0,715	174,84	0,03	0,017
	6F1	292,13	294,35	2,22	0,760	292,17	0,04	0,014
Polykieselsäure- ester	1A2	298,26	300,74	2,48	0,831	298,62	0,36	0,121
	2A2	295,30	297,44	2,14	0,725	295,62	0,32	0,108
	2C	162,56	164,02	1,46	0,898	162,70	0,14	0,086
	6A2	279,51	281,69	2,18	0,780	279,84	0,33	0,118
	GK5b	143,55	144,89	1,34	0,933	143,73	0,18	0,125
P9	160,73	162,33	1,60	0,995	161,11	0,38	0,236	
"Bologna Coctail"	1F2	291,70	293,98	2,28	0,782	291,87	0,17	0,058
	2F2	291,35	294,66	3,31	1,136	291,45	0,10	0,034
	6D	175,41	177,12	1,71	0,975	175,47	0,06	0,034
	6F2	298,82	302,15	3,33	1,114	298,86	0,04	0,013
	GK4a	160,58	162,13	1,55	0,965	160,73	0,15	0,093
	P8	1.430,33	1.444,20	13,87	0,970	1.431,51	1,18	0,082

Probe	Trockkengewicht (gr)	Frost-Tauch-Wechsel-Zyklen											Trockkengewicht nach 100 FTW (gr)
		Naßgewicht for FTW (gr)	Naßgewicht nach 10 FTW (gr)	Naßgewicht nach 20 FTW (gr)	Naßgewicht nach 30 FTW (gr)	Naßgewicht nach 40 FTW (gr)	Naßgewicht nach 50 FTW (gr)	Naßgewicht nach 60 FTW (gr)	Naßgewicht nach 70 FTW (gr)	Naßgewicht nach 80 FTW (gr)	Naßgewicht nach 90 FTW (gr)	Naßgewicht nach 100 FTW (gr)	
		1A1	284,649	285,434	285,253	285,160	285,053	285,052	285,048	285,030	285,008	284,915	
1B1	301,107	301,792	301,711	301,590	301,587	301,581	301,567	301,550	301,519	301,437	301,416	301,397	300,714
1C1	302,188	302,880	302,730	302,588	302,586	302,571	302,549	302,529	302,489	302,473	302,441	302,434	301,839
1D1	293,002	293,917	293,554	293,404	293,401	293,396	293,386	293,370	293,343	293,320	293,309	293,286	292,628
1E1	296,294	296,996	296,745	296,596	296,587	296,581	296,552	296,537	296,505	296,483	296,476	296,442	295,913
2A1	296,667	297,616	297,340	297,289	297,279	297,208	297,199	297,190	297,183	297,098	297,082	297,033	296,303
2B1	292,497	293,411	293,078	293,020	293,017	293,005	292,971	292,958	292,935	292,924	292,912	292,850	292,221
2C1	294,258	295,205	294,843	294,750	294,744	294,743	294,721	294,701	294,678	294,675	294,663	294,660	293,918
2D1	274,194	275,314	274,867	274,816	274,808	274,802	274,795	274,788	274,771	274,718	274,710	274,689	273,868
2E1	287,706	288,901	288,347	288,275	288,268	288,247	288,217	288,202	288,187	288,160	288,153	288,149	287,364
6A1	265,515	266,150	265,987	265,902	265,895	265,891	265,888	265,820	265,790	265,765	265,736	265,721	265,173
6B1	299,421	300,138	299,922	299,813	299,808	299,794	299,774	299,751	299,718	299,702	299,692	299,689	299,110
6C1	279,293	280,065	279,710	279,625	279,621	279,599	279,580	279,561	279,541	279,513	279,508	279,504	278,999
6D1	295,749	296,600	296,265	296,201	296,197	296,183	296,152	296,136	296,112	296,073	296,045	296,032	295,428
6E1	284,457	285,292	284,980	284,899	284,897	284,877	284,840	284,818	284,795	284,793	284,785	284,782	283,996
GK1b	283,559	284,439	284,260	284,135	284,128	284,073	284,039	284,028	284,003	283,998	283,980	283,945	283,236
GK2c	189,481	190,198	189,989	189,889	189,883	189,879	189,868	189,845	189,824	189,799	189,780	189,730	189,246
GK4b	165,557	166,656	166,232	166,081	166,061	166,035	166,009	165,999	165,957	165,950	165,878	165,755	164,904

Probe	Trockkengewicht (%)	Frost-Tauch-Wechsel-Zyklen											Trockkengewicht nach 100 FTW (%)
		Naßgewicht for FTW (%)	Naßgewicht nach 10 FTW (%)	Naßgewicht nach 20 FTW (%)	Naßgewicht nach 30 FTW (%)	Naßgewicht nach 40 FTW (%)	Naßgewicht nach 50 FTW (%)	Naßgewicht nach 60 FTW (%)	Naßgewicht nach 70 FTW (%)	Naßgewicht nach 80 FTW (%)	Naßgewicht nach 90 FTW (%)	Naßgewicht nach 100 FTW (%)	
		1A1	100	100,2758	100,2122	100,1795	100,1419	100,1416	100,1402	100,1338	100,1261	100,0934	
1B1	100	100,2275	100,2006	100,1604	100,1594	100,1576	100,1527	100,1470	100,1369	100,1096	100,1025	100,0963	99,8696
1C1	100	100,2290	100,1794	100,1324	100,1317	100,1268	100,1196	100,1129	100,0996	100,0941	100,0838	100,0814	99,8846
1D1	100	100,3123	100,1884	100,1372	100,1362	100,1346	100,1311	100,1256	100,1162	100,1086	100,1047	100,0971	99,8725
1E1	100	100,2369	100,1522	100,1019	100,0989	100,0970	100,0872	100,0822	100,0713	100,0638	100,0615	100,0500	99,8715
2A1	100	100,3199	100,2269	100,2097	100,2063	100,1824	100,1793	100,1763	100,1739	100,1453	100,1399	100,1234	99,8773
2B1	100	100,3125	100,1986	100,1788	100,1778	100,1736	100,1622	100,1576	100,1497	100,1459	100,1418	100,1206	99,9056
2C1	100	100,3218	100,1988	100,1672	100,1652	100,1647	100,1573	100,1504	100,1427	100,1418	100,1376	100,1366	99,8845
2D1	100	100,4085	100,2454	100,2268	100,2239	100,2218	100,2191	100,2167	100,2104	100,1910	100,1882	100,1804	99,8812
2E1	100	100,4154	100,2228	100,1978	100,1953	100,1880	100,1775	100,1723	100,1672	100,1577	100,1553	100,1539	99,8810
6A1	100	100,2392	100,1778	100,1458	100,1431	100,1416	100,1405	100,1149	100,1036	100,0942	100,0832	100,0776	99,8712
6B1	100	100,2395	100,1673	100,1309	100,1292	100,1245	100,1178	100,1101	100,0992	100,0940	100,0904	100,0894	99,8961
6C1	100	100,2764	100,1493	100,1189	100,1174	100,1095	100,1028	100,0958	100,0889	100,0787	100,0771	100,0755	99,8947
6D1	100	100,2877	100,1745	100,1528	100,1515	100,1468	100,1362	100,1310	100,1229	100,1096	100,0999	100,0956	99,8914
6E1	100	100,2935	100,1839	100,1554	100,1547	100,1476	100,1347	100,1269	100,1187	100,1182	100,1154	100,1144	99,8379
GK1b	100	100,3103	100,2472	100,2031	100,2007	100,1814	100,1691	100,1653	100,1566	100,1549	100,1485	100,1362	99,8860
GK2c	100	100,3784	100,2681	100,2153	100,2122	100,2103	100,2040	100,1921	100,1810	100,1677	100,1579	100,1312	99,8761
GK4b	100	100,6638	100,4077	100,3165	100,3044	100,2884	100,2732	100,2667	100,2419	100,2373	100,1940	100,1196	99,6057

Probe	Meßrichtung	Meßstrecke mm	Trockenzustand		Naßzustand		Frost-Tauch-Wechsel-Zyklen															
			Laufzeit	US-Geschw	Laufzeit	US-Geschw	nach 10 FTW		nach 20 FTW		nach 30 FTW		nach 40 FTW									
			t (µs)	v (km/s)	t (µs)	v (km/s)	Laufzeit	US-Geschw	Laufzeit	US-Geschw	Laufzeit	US-Geschw	Laufzeit	US-Geschw								
1A1	1.....1	44,5	11,20	3,97	7,20	6,18	8,40	4,84	9,40	4,73	9,40	4,73	9,50	4,68								
	2.....2	44,6	11,20	3,98	8,40	5,31	8,60	4,85	9,20	4,85	9,20	4,85	9,40	4,74								
	3.....3	44,5	11,20	3,97	8,00	5,56	8,40	5,06	9,20	4,84	9,60	4,64	9,60	4,64								
	4.....4	68,1	18,40	3,70	14,80	4,60	15,20	4,42	15,40	4,42	15,40	4,42	15,40	4,42								
1B1	1.....1	44,5	11,20	3,97	7,20	6,18	8,40	4,12	10,80	4,12	10,80	4,12	10,80	4,12								
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	9,60	3,90	11,40	3,90	11,40	3,90	11,40	3,90								
	3.....3	44,6	11,20	3,98	7,60	5,87	8,40	4,21	10,60	4,21	10,80	4,13	10,80	4,13								
	4.....4	72,1	16,00	4,51	12,80	5,63	14,00	4,74	15,60	4,62	14,40	4,52	15,95	4,52								
1C1	1.....1	44,6	9,60	4,65	6,80	6,56	7,60	5,44	8,20	5,44	8,40	5,31	8,60	5,19								
	2.....2	44,6	9,60	3,97	7,60	5,87	8,00	5,58	8,60	5,19	9,60	4,65	9,60	4,65								
	3.....3	44,6	9,60	4,65	7,20	6,19	7,60	5,07	9,00	4,96	9,60	4,65	9,60	4,65								
	4.....4	72,0	18,40	3,91	14,40	5,00	14,80	4,74	15,40	4,68	15,20	4,13	17,42	4,13								
1D1	1.....1	44,5	9,20	4,84	6,40	6,95	7,60	5,43	8,40	5,30	8,80	5,06	9,00	4,94								
	2.....2	44,5	9,40	4,73	7,20	6,18	8,00	5,30	8,40	5,30	8,40	5,30	8,40	5,30								
	3.....3	44,7	9,60	4,66	7,20	6,21	7,80	5,59	8,00	5,59	8,20	5,45	8,20	5,45								
	4.....4	70,1	17,60	3,98	14,00	5,01	15,20	4,49	15,80	4,44	14,40	4,26	16,46	4,26								
1E1	1.....1	44,5	11,20	3,97	6,80	6,54	7,60	5,43	8,20	5,43	8,40	5,30	8,40	5,30								
	2.....2	44,5	10,40	4,28	8,00	5,56	8,00	5,56	8,40	5,30	8,80	5,06	8,80	5,06								
	3.....3	44,5	11,20	3,97	7,60	5,86	7,60	5,43	8,60	5,17	8,80	5,06	8,80	5,06								
	4.....4	70,9	14,40	4,92	12,00	5,91	12,00	5,81	12,40	5,72	12,60	5,02	14,36	4,94								
2A1	1.....1	44,5	11,20	3,97	8,00	5,56	8,60	5,06	9,00	4,94	9,20	4,84	9,40	4,73								
	2.....2	44,6	10,40	4,29	8,40	5,31	9,00	4,85	9,40	4,74	9,60	4,65	9,60	4,65								
	3.....3	44,7	10,40	4,30	8,20	5,45	8,80	4,97	9,00	4,97	9,00	4,97	9,00	4,97								
	4.....4	70,7	16,80	4,21	12,80	5,52	14,20	4,98	14,80	4,78	14,60	4,67	15,97	4,43								
2B1	1.....1	44,5	10,40	4,28	7,20	6,18	8,00	5,30	8,80	5,06	9,60	4,64	9,80	4,54								
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	8,80	4,73	10,00	4,45	11,20	3,97	11,20	3,97								
	3.....3	44,6	12,00	3,72	7,60	5,87	8,40	4,96	9,80	4,55	10,20	4,37	10,40	4,29								
	4.....4	69,9	16,80	4,16	12,80	5,46	14,80	4,72	15,00	4,66	15,20	4,14	16,87	4,14								
2C1	1.....1	44,5	10,40	4,28	7,20	6,18	8,00	4,84	9,20	4,84	9,40	4,73	9,40	4,73								
	2.....2	44,5	9,60	4,64	7,20	6,18	8,40	5,06	9,00	4,94	9,60	4,64	9,60	4,64								
	3.....3	44,5	9,60	4,64	7,20	6,18	8,40	5,17	9,40	4,73	9,60	4,64	9,80	4,54								
	4.....4	70,2	15,20	4,62	12,00	5,85	14,40	4,74	15,20	4,62	13,20	4,41	15,93	4,41								
2D1	1.....1	44,5	11,20	3,97	7,60	5,86	8,00	4,94	9,80	4,54	11,20	3,97	11,20	3,97								
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	8,80	5,06	10,80	4,12	12,00	3,71	12,00	3,71								
	3.....3	44,5	12,00	3,71	7,20	6,18	8,00	4,73	9,80	4,54	10,80	4,12	10,80	4,12								
	4.....4	65,8	16,80	3,92	12,80	5,14	12,80	4,91	13,80	4,77	14,80	3,76	17,50	3,76								
2E1	1.....1	44,7	11,20	3,99	7,20	6,21	8,40	4,86	9,60	4,66	10,40	4,30	10,40	4,30								
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	10,00	4,28	10,80	4,12	11,40	3,90	11,40	3,90								
	3.....3	44,6	10,40	4,29	7,20	6,19	7,60	4,65	10,00	4,46	10,40	4,29	10,40	4,29								
	4.....4	68,9	16,00	4,31	12,40	5,56	14,40	4,66	15,00	4,59	14,80	4,19	16,44	4,19								
6A1	1.....1	44,5	9,60	4,64	6,80	6,54	7,20	5,06	8,80	5,06	8,80	5,06	9,00	4,94								
	2.....2	44,4	9,60	4,63	7,20	6,17	8,40	4,63	9,60	4,63	9,80	4,53	9,80	4,53								
	3.....3	44,6	9,60	4,65	7,00	6,37	7,20	5,07	9,00	4,96	9,40	4,74	9,60	4,65								
	4.....4	63,4	14,40	4,40	12,00	5,28	12,80	4,53	14,20	4,46	14,40	4,40	14,40	4,40								
6B1	1.....1	44,5	9,60	4,64	7,20	6,18	7,60	5,43	8,40	5,30	8,60	5,17	9,20	4,84								
	2.....2	44,5	10,40	4,28	7,60	5,86	8,00	4,84	9,20	4,84	9,20	4,84	9,40	4,73								
	3.....3	44,7	10,40	4,30	7,60	5,88	7,60	4,76	9,40	4,76	9,40	4,76	9,40	4,76								
	4.....4	72,2	15,20	4,75	12,40	5,82	13,60	5,23	14,00	5,16	13,80	4,71	15,34	4,71								
6C1	1.....1	44,5	8,80	5,06	6,80	6,54	7,20	5,71	7,80	5,71	7,80	5,71	8,00	5,56								
	2.....2	44,5	8,80	5,06	7,20	6,18	7,60	5,56	8,00	5,56	8,20	5,43	8,60	5,17								
	3.....3	44,5	8,80	5,06	6,80	6,54	7,60	5,30	8,40	5,30	8,40	5,30	8,60	5,17								
	4.....4	66,7	14,40	4,63	12,00	5,56	12,40	4,83	14,20	4,70	12,20	4,69	14,45	4,62								
6D1	1.....1	44,5	8,80	5,06	7,20	6,18	7,80	5,56	8,00	5,56	8,20	5,43	8,20	5,43								
	2.....2	44,6	9,60	4,65	7,20	6,19	8,00	5,44	8,20	5,44	8,40	5,31	8,40	5,31								
	3.....3	44,4	8,80	5,05	7,20	6,17	8,20	5,29	8,40	5,29	8,60	5,16	8,80	5,05								
	4.....4	70,8	15,20	4,66	12,80	5,53	13,20	4,43	16,20	4,37	14,20	4,32	16,41	4,32								
6E1	1.....1	44,6	10,40	4,29	8,00	5,58	8,00	5,07	9,00	4,96	9,60	4,65	9,80	4,55								
	2.....2	44,5	9,60	4,64	7,60	5,86	8,80	4,94	10,00	4,45	11,20	3,97	11,20	3,97								
	3.....3	44,2	14,40	3,07	8,40	5,26	8,00	5,14	8,80	5,02	9,20	4,80	9,40	4,70								
	4.....4	68,1	12,80	5,32	12,00	5,68	12,40	5,01	13,80	4,93	12,80	4,77	14,51	4,69								
GK1b	1.....1	44,1	14,40	3,06	8,40	5,25	8,40	4,90	9,00	4,90	9,20	4,79	9,20	4,79								
	2.....2	44,2	13,60	3,25	8,40	5,26	8,80	4,91	9,00	4,91	9,20	4,80	9,20	4,80								
	3.....3	44,7	13,60	3,29	9,20	4,86	8,00	5,08	9,00	4,97	9,40	4,76	9,40	4,76								
	4.....4	69,5	22,40	3,10	16,00	4,34	16,20	4,24	16,80	4,14	15,00	4,13	17,04	4,08								
GK2c	1.....1	44,7	13,60	3,29	7,60	5,88	8,80	5,08	9,20	4,86	9,20	4,86	9,20	4,86								
	2.....2	44,7	13,60	3,29	7,60	5,88	9,20	4,76	9,40	4,76	9,60	4,66	9,60	4,66								
	3.....3	44,6	16,00	2,79	8,00	5,58	7,60	4,65	10,00	4,46	10,40	4,29	10,80	4,13								
	4.....4	46,4	16,80	2,76	8,80	5,27	9,60	4,73	10,20	4,55	8,80	4,54	10,46	4,43								
GK4b	1.....1	44,3	15,20																			

Probe	Meßrichtung	Meßstrecke mm	Trockenzustand		Naßzustand		Frost-Tauch-Wechsel-Zyklen							
			Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)	nach 50 FTW		nach 60 FTW		nach 70 FTW		nach 80 FTW	
							Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)
1A1	1.....1	44,5	11,20	3,97	7,20	6,18	9,60	4,64	9,85	4,52	9,80	4,54	10,40	4,28
	2.....2	44,6	11,20	3,98	8,40	5,31	9,60	4,65	9,96	4,48	10,00	4,46	10,60	4,21
	3.....3	44,5	11,20	3,97	8,00	5,56	9,80	4,54	10,11	4,40	10,00	4,45	10,20	4,36
	4.....4	68,1	18,40	3,70	14,80	4,60	15,60	4,37	15,62	4,36	15,80	4,31	16,60	4,10
1B1	1.....1	44,5	11,20	3,97	7,20	6,18	10,80	4,12	10,80	4,12	10,80	4,12	10,80	4,12
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	11,40	3,90	11,41	3,90	11,40	3,90	11,40	3,90
	3.....3	44,6	11,20	3,98	7,60	5,87	10,80	4,13	11,04	4,04	11,00	4,05	11,00	4,05
	4.....4	72,1	16,00	4,51	12,80	5,63	16,17	4,46	16,24	4,44	16,39	4,40	15,46	4,66
1C1	1.....1	44,6	9,60	4,65	6,80	6,56	8,80	5,07	8,80	5,07	8,80	5,07	8,80	5,07
	2.....2	44,6	9,60	3,97	7,60	5,87	9,60	4,65	9,59	4,65	9,60	4,65	9,80	4,55
	3.....3	44,6	9,60	4,65	7,20	6,19	9,60	4,65	9,59	4,65	9,60	4,65	9,80	4,55
	4.....4	72,0	18,40	3,91	14,40	5,00	17,64	4,08	17,87	4,03	17,87	4,03	17,54	4,11
1D1	1.....1	44,5	9,20	4,84	6,40	6,95	9,20	4,84	9,19	4,84	9,20	4,84	9,20	4,84
	2.....2	44,5	9,40	4,73	7,20	6,18	8,60	5,17	8,69	5,12	8,80	5,06	9,00	4,94
	3.....3	44,7	9,60	4,66	7,20	6,21	8,20	5,45	8,48	5,27	8,60	5,20	9,00	4,97
	4.....4	70,1	17,60	3,98	14,00	5,01	16,69	4,20	16,81	4,17	16,92	4,14	16,97	4,13
1E1	1.....1	44,5	11,20	3,97	6,80	6,54	8,60	5,17	8,73	5,10	8,80	5,06	8,80	5,06
	2.....2	44,5	10,40	4,28	8,00	5,56	8,80	5,06	8,79	5,06	8,80	5,06	8,80	5,06
	3.....3	44,5	11,20	3,97	7,60	5,86	8,80	5,06	8,79	5,06	8,80	5,06	8,80	5,06
	4.....4	70,9	14,40	4,92	12,00	5,91	14,36	4,94	14,47	4,90	14,58	4,86	15,34	4,62
2A1	1.....1	44,5	11,20	3,97	8,00	5,56	9,60	4,64	9,59	4,64	9,60	4,64	9,40	4,73
	2.....2	44,6	10,40	4,29	8,40	5,31	9,60	4,65	9,70	4,60	9,80	4,55	10,40	4,29
	3.....3	44,7	10,40	4,30	8,20	5,45	9,20	4,86	9,91	4,51	10,00	4,47	10,40	4,30
	4.....4	70,7	16,80	4,21	12,80	5,52	18,25	3,87	18,36	3,85	18,46	3,83	18,40	3,84
2B1	1.....1	44,5	10,40	4,28	7,20	6,18	9,80	4,54	9,80	4,54	9,80	4,54	9,80	4,54
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	11,20	3,97	11,21	3,97	11,20	3,97	11,20	3,97
	3.....3	44,6	12,00	3,72	7,60	5,87	10,40	4,29	10,40	4,29	10,40	4,29	10,40	4,29
	4.....4	69,9	16,80	4,16	12,80	5,46	17,09	4,09	17,48	4,00	17,31	4,04	16,93	4,13
2C1	1.....1	44,5	10,40	4,28	7,20	6,18	9,60	4,64	9,59	4,64	9,60	4,64	9,40	4,73
	2.....2	44,5	9,60	4,64	7,20	6,18	9,60	4,64	9,59	4,64	9,60	4,64	9,60	4,64
	3.....3	44,5	9,60	4,64	7,20	6,18	9,80	4,54	9,80	4,54	9,80	4,54	10,00	4,45
	4.....4	70,2	15,20	4,62	12,00	5,85	16,17	4,34	16,48	4,26	16,41	4,28	17,47	4,02
2D1	1.....1	44,5	11,20	3,97	7,60	5,86	11,20	3,97	11,21	3,97	11,20	3,97	11,40	3,90
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	12,20	3,65	12,19	3,65	12,20	3,65	11,40	3,90
	3.....3	44,5	12,00	3,71	7,20	6,18	10,80	4,12	10,80	4,12	10,80	4,12	10,60	4,20
	4.....4	65,8	16,80	3,92	12,80	5,14	17,50	3,76	17,59	3,74	17,74	3,71	18,43	3,57
2E1	1.....1	44,7	11,20	3,99	7,20	6,21	10,40	4,30	10,40	4,30	10,40	4,30	10,60	4,22
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	11,40	3,90	11,41	3,90	11,40	3,90	11,40	3,90
	3.....3	44,6	10,40	4,29	7,20	6,19	10,40	4,29	10,40	4,29	10,40	4,29	10,40	4,29
	4.....4	68,9	16,00	4,31	12,40	5,56	16,44	4,19	16,60	4,15	16,66	4,14	16,54	4,17
6A1	1.....1	44,5	9,60	4,64	6,80	6,54	9,20	4,84	9,27	4,80	9,40	4,73	9,60	4,64
	2.....2	44,4	9,60	4,63	7,20	6,17	10,00	4,44	10,00	4,44	10,00	4,44	10,00	4,44
	3.....3	44,6	9,60	4,65	7,00	6,37	9,60	4,65	9,59	4,65	9,60	4,65	9,60	4,65
	4.....4	63,4	14,40	4,40	12,00	5,28	14,60	4,34	14,71	4,31	14,80	4,28	16,20	3,91
6B1	1.....1	44,5	9,60	4,64	7,20	6,18	9,60	4,64	9,59	4,64	9,60	4,64	9,40	4,73
	2.....2	44,5	10,40	4,28	7,60	5,86	9,40	4,73	9,51	4,68	9,60	4,64	9,60	4,64
	3.....3	44,7	10,40	4,30	7,60	5,88	9,40	4,76	9,57	4,67	9,60	4,66	9,60	4,66
	4.....4	72,2	15,20	4,75	12,40	5,82	15,56	4,64	15,66	4,61	15,78	4,58	15,98	4,52
6C1	1.....1	44,5	8,80	5,06	6,80	6,54	8,20	5,43	8,36	5,32	8,40	5,30	8,40	5,30
	2.....2	44,5	8,80	5,06	7,20	6,18	9,20	4,84	9,19	4,84	9,20	4,84	9,20	4,84
	3.....3	44,5	8,80	5,06	6,80	6,54	8,80	5,06	8,79	5,06	8,80	5,06	8,80	5,06
	4.....4	66,7	14,40	4,63	12,00	5,56	14,45	4,62	14,56	4,58	14,68	4,54	15,39	4,33
6D1	1.....1	44,5	8,80	5,06	7,20	6,18	8,20	5,43	8,32	5,35	8,40	5,30	8,60	5,17
	2.....2	44,6	9,60	4,65	7,20	6,19	8,40	5,31	8,40	5,31	8,40	5,31	8,40	5,31
	3.....3	44,4	8,80	5,05	7,20	6,17	8,80	5,05	8,79	5,05	8,80	5,05	9,60	4,63
	4.....4	70,8	15,20	4,66	12,80	5,53	16,87	4,20	16,98	4,17	17,10	4,14	16,94	4,18
6E1	1.....1	44,6	10,40	4,29	8,00	5,58	10,20	4,37	10,21	4,37	10,40	4,29	10,60	4,21
	2.....2	44,5	9,60	4,64	7,60	5,86	11,40	3,90	11,24	3,96	11,20	3,97	11,20	3,97
	3.....3	44,2	14,40	4,07	8,40	5,26	9,60	4,60	9,61	4,60	9,60	4,60	9,60	4,60
	4.....4	68,1	12,80	5,32	12,00	5,68	14,51	4,69	14,58	4,67	14,73	4,62	14,70	4,63
GK1b	1.....1	44,1	14,40	3,06	8,40	5,25	9,20	4,79	9,57	4,61	9,40	4,69	9,40	4,69
	2.....2	44,2	13,60	3,25	8,40	5,26	9,40	4,70	9,40	4,70	9,40	4,70	9,40	4,70
	3.....3	44,7	13,60	3,29	9,20	4,86	9,60	4,66	9,59	4,66	9,60	4,66	9,60	4,66
	4.....4	69,5	22,40	3,10	16,00	4,34	17,04	4,08	17,25	4,03	17,27	4,03	16,83	4,13
GK2c	1.....1	44,7	13,60	3,29	7,60	5,88	9,20	4,86	9,39	4,76	9,40	4,76	9,40	4,76
	2.....2	44,7	13,60	3,29	7,60	5,88	9,60	4,66	9,59	4,66	9,60	4,66	9,80	4,56
	3.....3	44,6	16,00	2,79	8,00	5,58	11,20	3,98	11,32	3,94	11,40	3,91	11,60	3,84
	4.....4	46,4	16,80	2,76	8,80	5,27	10,70	4,34	10,84	4,28	10,93	4,25	12,64	3,67
GK4b	1.....1	44,3	15,20	2,91	8,40	5,27	12,40	3,57	12,41	3,57	12,40	3,57	12,60	3,52
	2.....2	44,3	15,20	2,91	8,80	5,03	12,20	3,63	12,31	3,60	12,40	3,57	12,40	3,57
	3.....3	44,6	14,40	3,10	8,00	5,58	9,80	4,55	9,80	4,55	9,80	4,55	9,80	4,55
	4.....4	41,0	16,80	2,44	8,40	4,88	11,58	3,54	11,78	3,48	11,82	3,47	12,14	3,38

Frost-Tauch-Wechsel-Zyklen												
Probe	Meßrichtung	Meßstrecke mm	Trockenzustand		N a ß z u s t a n d		n a c h 90 FTW		n a c h 100 FTW		Trockenzustand	
			Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw v (km/s)
1A1	1.....1	44,5	11,20	3,97	7,20	6,18	9,80	4,54	10,00	4,45	17,00	2,62
	2.....2	44,6	11,20	3,98	8,40	5,31	10,80	4,13	10,80	4,13	17,40	2,56
	3.....3	44,5	11,20	3,97	8,00	5,56	9,80	4,54	10,00	4,45	16,60	2,68
	4.....4	68,1	18,40	3,70	14,80	4,60	17,60	3,87	18,20	3,74	28,80	2,36
1B1	1.....1	44,5	11,20	3,97	7,20	6,18	10,60	4,20	10,80	4,12	15,20	2,93
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	10,80	4,12	11,20	3,97	16,00	2,78
	3.....3	44,6	11,20	3,98	7,60	5,87	10,20	4,37	9,40	4,74	16,80	2,65
	4.....4	72,1	16,00	4,51	12,80	5,63	14,13	5,10	14,39	5,01	20,26	3,56
1C1	1.....1	44,6	9,60	4,65	6,80	6,56	8,70	5,13	8,60	5,19	12,20	3,66
	2.....2	44,6	9,60	3,97	7,60	5,87	9,80	4,55	9,60	4,65	12,40	3,60
	3.....3	44,6	9,60	4,65	7,20	6,19	9,60	4,65	9,80	4,55	12,60	3,54
	4.....4	72,0	18,40	3,91	14,40	5,00	16,00	4,50	16,31	4,42	28,92	2,49
1D1	1.....1	44,5	9,20	4,84	6,40	6,95	8,90	5,00	9,60	4,64	12,60	3,53
	2.....2	44,5	9,40	4,73	7,20	6,18	9,00	4,94	8,80	5,06	12,60	3,53
	3.....3	44,7	9,60	4,66	7,20	6,21	8,60	5,20	9,20	4,86	12,40	3,60
	4.....4	70,1	17,60	3,98	14,00	5,01	16,37	4,28	16,97	4,13	27,88	2,51
1E1	1.....1	44,5	11,20	3,97	6,80	6,54	8,60	5,17	8,80	5,06	15,60	2,85
	2.....2	44,5	10,40	4,28	8,00	5,56	8,80	5,06	8,80	5,06	14,80	3,01
	3.....3	44,5	11,20	3,97	7,60	5,86	8,60	5,17	9,00	4,94	16,20	2,75
	4.....4	70,9	14,40	4,92	12,00	5,91	14,74	4,81	13,54	5,24	21,96	3,23
2A1	1.....1	44,5	11,20	3,97	8,00	5,56	9,60	4,64	10,20	4,36	16,00	2,78
	2.....2	44,6	10,40	4,29	8,40	5,31	10,40	4,29	10,60	4,21	16,20	2,75
	3.....3	44,7	10,40	4,30	8,20	5,45	10,20	4,38	9,80	4,56	16,20	2,76
	4.....4	70,7	16,80	4,21	12,80	5,52	18,40	3,84	18,80	3,76	28,00	2,53
2B1	1.....1	44,5	10,40	4,28	7,20	6,18	9,20	4,84	9,00	4,94	14,20	3,13
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	10,70	4,16	10,20	4,36	15,00	2,97
	3.....3	44,6	12,00	3,72	7,60	5,87	10,20	4,37	9,80	4,55	15,80	2,82
	4.....4	69,9	16,80	4,16	12,80	5,46	16,34	4,28	16,05	4,35	25,39	2,75
2C1	1.....1	44,5	10,40	4,28	7,20	6,18	9,20	4,84	10,00	4,45	15,20	2,93
	2.....2	44,5	9,60	4,64	7,20	6,18	9,40	4,73	9,80	4,54	14,40	3,09
	3.....3	44,5	9,60	4,64	7,20	6,18	10,00	4,45	10,00	4,45	14,60	3,05
	4.....4	70,2	15,20	4,62	12,00	5,85	16,54	4,25	14,98	4,69	23,71	2,96
2D1	1.....1	44,5	11,20	3,97	7,60	5,86	10,60	4,20	11,20	3,97	16,20	2,75
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	11,80	3,77	11,60	3,84	15,40	2,89
	3.....3	44,5	12,00	3,71	7,20	6,18	9,80	4,54	10,40	4,28	16,20	2,75
	4.....4	65,8	16,80	3,92	12,80	5,14	16,87	3,90	15,31	4,30	25,00	2,63
2E1	1.....1	44,7	11,20	3,99	7,20	6,21	9,80	4,56	10,20	4,38	15,40	2,90
	2.....2	44,5	11,20	3,97	8,40	5,30	10,40	4,28	10,60	4,20	16,20	2,75
	3.....3	44,6	10,40	4,29	7,20	6,19	10,60	4,21	10,70	4,17	16,00	2,79
	4.....4	68,9	16,00	4,31	12,40	5,56	14,80	4,66	14,51	4,75	24,95	2,76
6A1	1.....1	44,5	9,60	4,64	6,80	6,54	9,60	4,64	9,40	4,73	17,00	2,62
	2.....2	44,4	9,60	4,63	7,20	6,17	10,20	4,35	10,60	4,19	16,60	2,67
	3.....3	44,6	9,60	4,65	7,00	6,37	9,20	4,85	9,20	4,85	15,20	2,93
	4.....4	63,4	14,40	4,40	12,00	5,28	16,60	3,82	16,80	3,77	26,40	2,40
6B1	1.....1	44,5	9,60	4,64	7,20	6,18	9,00	4,94	9,20	4,84	15,80	2,82
	2.....2	44,5	10,40	4,28	7,60	5,86	9,60	4,64	9,80	4,54	15,40	2,89
	3.....3	44,7	10,40	4,30	7,60	5,88	9,60	4,66	9,40	4,76	16,40	2,73
	4.....4	72,2	15,20	4,75	12,40	5,82	15,52	4,65	14,75	4,89	19,67	3,67
6C1	1.....1	44,5	8,80	5,06	6,80	6,54	8,20	5,43	8,80	5,06	11,80	3,77
	2.....2	44,5	8,80	5,06	7,20	6,18	9,00	4,94	8,80	5,06	12,80	3,48
	3.....3	44,5	8,80	5,06	6,80	6,54	8,40	5,30	8,60	5,17	13,00	3,42
	4.....4	66,7	14,40	4,63	12,00	5,56	16,26	4,10	18,29	3,65	22,64	2,95
6D1	1.....1	44,5	8,80	5,06	7,20	6,18	8,40	5,30	8,40	5,30	12,20	3,65
	2.....2	44,6	9,60	4,65	7,20	6,19	8,60	5,19	8,80	5,07	12,60	3,54
	3.....3	44,4	8,80	5,05	7,20	6,17	9,60	4,63	9,60	4,63	12,20	3,64
	4.....4	70,8	15,20	4,66	12,80	5,53	15,99	4,43	16,62	4,26	27,91	2,54
6E1	1.....1	44,6	10,40	4,29	8,00	5,58	9,80	4,55	10,00	4,46	18,00	2,48
	2.....2	44,5	9,60	4,64	7,60	5,86	11,00	4,05	10,80	4,12	18,80	2,37
	3.....3	44,2	14,40	3,07	8,40	5,26	9,40	4,70	9,40	4,70	17,80	2,48
	4.....4	68,1	12,80	5,32	12,00	5,68	14,12	4,82	14,41	4,73	23,06	2,95
GK1b	1.....1	44,1	14,40	3,06	8,40	5,25	9,40	4,69	9,40	4,69	18,40	2,40
	2.....2	44,2	13,60	3,25	8,40	5,26	9,20	4,80	9,20	4,80	14,80	2,99
	3.....3	44,7	13,60	3,29	9,20	4,86	9,00	4,97	8,80	5,08	15,20	2,94
	4.....4	69,5	22,40	3,10	16,00	4,34	15,93	4,36	16,53	4,20	28,55	2,43
GK2c	1.....1	44,7	13,60	3,29	7,60	5,88	8,80	5,08	8,60	5,20	16,80	2,66
	2.....2	44,7	13,60	3,29	7,60	5,88	9,20	4,86	9,40	4,76	17,60	2,54
	3.....3	44,6	16,00	2,79	8,00	5,58	10,20	4,37	9,80	4,55	14,80	3,01
	4.....4	46,4	16,80	2,76	8,80	5,27	12,97	3,58	12,31	3,77	15,97	2,91
GK4b	1.....1	44,3	15,20	2,91	8,40	5,27	10,60	4,18	11,60	3,82	20,00	2,22
	2.....2	44,3	15,20	2,91	8,80	5,03	10,80	4,10	11,80	3,75	19,80	2,24
	3.....3	44,6	14,40	3,10	8,00	5,58	10,60	4,21	11,80	3,78	20,20	2,21
	4.....4	41,0	16,80	2,44	8,40	4,88	12,58	3,26	13,01	3,15	14,74	2,78

US - Geschwindigkeiten - Mittelwerte													
Frost-Tauch-Wechsel-Zyklen													
Probe	Trockenzustand	Naßzustand	nach 10 FTW	nach 20 FTW	nach 30 FTW	nach 40 FTW	nach 50 FTW	nach 60 FTW	nach 70 FTW	nach 80 FTW	nach 90 FTW	nach 100 FTW	Trockenzustand
	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.	US-Geschw.
	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)	v (km/s)
1A1	3,91	5,41	4,79	4,71	4,66	4,62	4,55	4,44	4,44	4,24	4,27	4,19	2,56
1B1	4,11	5,74	4,24	4,21	4,17	4,17	4,15	4,13	4,12	4,19	4,45	4,37	2,98
1C1	4,29	5,91	5,20	5,06	4,68	4,65	4,61	4,60	4,60	4,57	4,71	4,70	3,32
1D1	4,55	6,09	5,23	5,15	5,02	4,99	4,92	4,85	4,81	4,72	4,86	4,67	3,30
1E1	4,29	5,97	5,56	5,40	5,24	5,09	5,06	5,03	5,01	4,95	5,05	5,07	2,96
2A1	4,19	5,46	4,96	4,86	4,78	4,69	4,50	4,40	4,37	4,29	4,29	4,22	2,70
2B1	4,03	5,70	4,93	4,68	4,28	4,24	4,22	4,20	4,21	4,23	4,41	4,55	2,92
2C1	4,54	6,10	4,95	4,78	4,60	4,58	4,54	4,52	4,52	4,46	4,57	4,53	3,01
2D1	3,89	5,62	4,91	4,49	3,89	3,89	3,88	3,87	3,86	3,89	4,10	4,10	2,75
2E1	4,14	5,81	4,61	4,46	4,17	4,17	4,17	4,16	4,16	4,14	4,43	4,37	2,80
6A1	4,58	6,09	4,82	4,78	4,68	4,63	4,57	4,55	4,53	4,41	4,41	4,39	2,66
6B1	4,49	5,93	5,06	5,01	4,87	4,76	4,69	4,65	4,63	4,64	4,72	4,76	3,03
6C1	4,95	6,21	5,35	5,32	5,28	5,13	4,98	4,95	4,93	4,88	4,94	4,73	3,40
6D1	4,85	6,02	5,18	5,16	5,05	5,02	4,99	4,97	4,95	4,82	3,46	3,59	3,34
6E1	4,33	5,59	5,04	4,84	4,55	4,48	4,42	4,40	4,37	4,35	4,53	4,50	2,57
GK1b	3,18	4,93	4,78	4,73	4,62	4,61	4,56	4,50	4,52	4,23	4,71	4,69	2,69
GK2c	3,03	5,65	4,80	4,66	4,58	4,52	4,46	4,41	4,39	4,21	4,47	4,57	2,78
GK4b	2,84	5,19	4,64	4,37	3,87	3,87	3,82	3,80	3,79	3,75	3,94	3,63	2,36

Probe	Meßrichtung (°)	T R O C K E N Z U S T A N D										Mittelwert v (Km/s)
		E B E N E 1			E B E N E 2			E B E N E 3				
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)		
1A1	0°	33,00	9,24	3,57	33,00	9,79	3,37	33,00	9,59	3,44	3,46	
	30°	36,50	9,81	3,72	36,50	9,19	3,97	36,50	9,61	3,80	3,83	
	60°	53,20	12,34	4,31	45,20	10,81	4,18	45,20	12,80	3,53	4,01	
	90°	44,50	9,61	4,63	38,50	8,41	4,58	38,50	9,60	4,01	4,41	
	120°	50,00	11,60	4,31	43,00	10,41	4,13	43,00	10,41	4,13	3,86	
	150°	41,70	11,21	3,72	41,70	11,39	3,66	41,70	11,62	3,59	3,66	
	180°	35,00	10,00	3,50	35,00	10,77	3,25	35,00	10,00	3,50	3,42	
2A1	0°	35,00	9,59	3,65	35,00	10,00	3,50	35,00	9,80	3,57	3,57	
	30°	38,50	10,00	3,85	38,50	9,60	4,01	38,50	10,00	3,85	3,91	
	60°	55,50	14,02	3,96	47,50	11,20	4,24	47,50	12,03	3,95	4,05	
	90°	44,50	10,40	4,28	38,00	8,82	4,31	38,00	9,20	4,13	4,24	
	120°	48,00	12,00	4,00	41,20	9,81	4,20	41,20	10,00	4,12	4,11	
	150°	44,00	11,43	3,85	44,00	10,81	4,07	44,00	12,02	3,66	3,86	
	180°	35,00	11,59	3,02	35,00	10,00	3,50	35,00	10,80	3,24	3,26	
6A1	0°	30,00	8,80	3,41	30,00	8,22	3,65	30,00	8,40	3,57	3,54	
	30°	33,00	8,80	3,75	33,00	8,21	4,02	33,00	8,01	4,12	3,96	
	60°	48,50	10,80	4,49	48,50	11,20	4,33	48,50	10,80	4,49	4,44	
	90°	45,00	8,79	5,12	38,50	8,00	4,81	38,50	8,41	4,58	4,84	
	120°	48,00	10,00	4,80	41,00	9,40	4,36	41,00	9,21	4,45	4,54	
	150°	42,00	9,61	4,37	42,00	10,24	4,10	42,00	10,07	4,17	4,21	
	180°	32,50	8,21	3,96	32,50	8,62	3,77	32,50	8,86	3,67	3,80	

Probe	Meßrichtung (°)	N A B Z U S T A N D										Mittelwert v (Km/s)
		E B E N E 1			E B E N E 2			E B E N E 3				
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)		
1A1	0°	33,00	8,01	4,12	33,00	7,80	4,23	33,00	8,21	4,02	4,12	
	30°	36,50	8,41	4,34	36,50	8,00	4,56	36,50	9,61	3,80	4,23	
	60°	53,20	11,96	4,45	45,20	9,62	4,70	45,20	10,00	4,52	4,56	
	90°	44,50	9,61	4,63	38,50	7,68	5,01	38,50	8,41	4,58	4,74	
	120°	50,00	11,01	4,54	43,00	10,00	4,30	43,00	10,41	4,13	4,32	
	150°	41,70	8,80	4,74	41,70	9,88	4,22	41,70	10,80	3,86	4,27	
	180°	35,00	8,22	4,26	35,00	8,41	4,16	35,00	9,41	3,72	4,05	
2A1	0°	35,00	6,40	5,47	35,00	7,20	4,86	35,00	8,01	4,37	4,90	
	30°	38,50	8,00	4,81	38,50	9,60	4,01	38,50	9,21	4,18	4,33	
	60°	55,50	10,80	5,14	47,50	10,00	4,75	47,50	11,61	4,09	4,66	
	90°	44,50	8,40	5,30	38,00	8,00	4,75	38,00	8,41	4,52	4,86	
	120°	48,00	10,81	4,44	41,20	10,00	4,12	41,20	9,60	4,29	4,28	
	150°	44,00	9,21	4,78	44,00	9,21	4,78	44,00	8,40	5,24	4,93	
	180°	35,00	7,59	4,61	35,00	8,79	3,98	35,00	8,39	4,17	4,25	
6A1	0°	30,00	7,19	4,17	30,00	8,00	3,75	30,00	7,19	4,17	4,03	
	30°	33,00	7,60	4,34	33,00	8,21	4,02	33,00	8,01	4,12	4,16	
	60°	48,50	8,80	5,51	48,50	10,41	4,66	48,50	11,60	4,18	4,78	
	90°	45,00	9,59	4,69	38,50	8,79	4,38	38,50	8,00	4,81	4,63	
	120°	48,00	9,23	5,20	41,00	8,80	4,66	41,00	8,01	5,12	4,99	
	150°	42,00	8,99	4,67	42,00	10,00	4,20	42,00	9,61	4,37	4,41	
	180°	32,50	8,00	4,06	32,50	8,00	4,06	32,50	7,59	4,28	4,13	

Probe	Meßrichtung (°)	N A B Z U S T A N D N A C H 2 5 F T W - Z Y K L E N										Mittelwert v (Km/s)
		E B E N E 1			E B E N E 2			E B E N E 3				
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)		
1A1	0°	33,00	8,01	4,12	33,00	8,21	4,02	33,00	8,59	3,84	3,99	
	30°	36,50	9,61	3,80	36,50	10,20	3,58	36,50	9,61	3,80	3,73	
	60°	53,20	12,34	4,31	45,20	11,41	3,96	45,20	11,00	4,11	4,13	
	90°	44,50	9,41	4,73	38,50	8,81	4,37	38,50	8,59	4,48	4,53	
	120°	50,00	10,82	4,62	43,00	11,20	3,84	43,00	10,59	4,06	4,17	
	150°	41,70	10,80	3,86	41,70	10,97	3,80	41,70	9,79	4,26	3,97	
	180°	35,00	9,21	3,80	35,00	9,41	3,72	35,00	9,62	3,64	3,72	
2A1	0°	35,00	7,29	4,80	35,00	8,01	4,37	35,00	7,80	4,49	4,55	
	30°	38,50	8,21	4,69	38,50	10,61	3,63	38,50	10,41	3,70	4,01	
	60°	55,50	10,80	5,14	47,50	11,82	4,02	47,50	11,20	4,24	4,47	
	90°	44,50	9,19	4,84	38,00	10,00	3,80	38,00	9,79	3,88	4,17	
	120°	48,00	9,80	4,90	41,20	12,19	3,38	41,20	12,01	3,43	3,90	
	150°	44,00	10,00	4,40	44,00	12,22	3,60	44,00	12,39	3,55	3,85	
	180°	35,00	7,80	4,49	35,00	10,00	3,50	35,00	9,62	3,64	3,88	
6A1	0°	30,00	8,80	3,41	30,00	9,01	3,33	30,00	9,17	3,27	3,34	
	30°	33,00	8,40	3,93	33,00	9,88	3,34	33,00	9,40	3,51	3,59	
	60°	48,50	11,41	4,25	48,50	11,80	4,11	48,50	12,22	3,97	4,11	
	90°	45,00	10,20	4,41	38,50	9,60	4,01	38,50	9,21	4,18	4,20	
	120°	48,00	10,41	4,61	41,00	9,81	4,18	41,00	9,60	4,27	4,35	
	150°	42,00	10,40	4,04	42,00	11,20	3,75	42,00	10,85	3,87	3,89	
	180°	32,50	9,00	3,61	32,50	9,62	3,38	32,50	8,81	3,69	3,56	

Probe	Meßrichtung (°)	N A B Z U S T A N D N A C H 5 0 F T W - Z Y K L E N										Mittelwert v (Km/s)
		E B E N E 1			E B E N E 2			E B E N E 3				
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)		
1A1	0°	33,00	8,62	3,83	33,00	8,31	3,97	33,00	8,68	3,80	3,87	
	30°	36,50	9,22	3,96	36,50	10,14	3,60	36,50	10,40	3,51	3,69	
	60°	53,20	11,93	4,46	45,20	11,19	4,04	45,20	11,41	3,96	4,15	
	90°	44,50	9,61	4,63	38,50	8,59	4,48	38,50	8,81	4,37	4,49	
	120°	50,00	11,60	4,31	43,00	10,41	4,13	43,00	10,80	3,98	4,14	
	150°	41,70	11,62	3,59	41,70	11,21	3,72	41,70	10,80	3,86	3,72	
	180°	35,00	11,22	3,12	35,00	11,63	3,01	35,00	10,00	3,50	3,21	
2A1	0°	35,00	10,20	3,43	35,00	10,00	3,50	35,00	10,42	3,36	3,43	
	30°	38,50	10,81	3,56	38,50	11,00	3,50	38,50	11,42	3,37	3,48	
	60°	55,50	12,82	4,33	47,50	12,03	3,95	47,50	12,21	3,89	4,06	
	90°	44,50	9,80	4,54	38,00	9,20	4,13	38,00	9,82	3,87	4,18	
	120°	48,00	12,40	3,87	41,20	11,61	3,55	41,20	11,20	3,68	3,70	
	150°	44,00	12,79	3,44	44,00	12,39	3,55	44,00	12,19	3,61	3,53	
	180°	35,00	12,41	2,82	35,00	11,63	3,01	35,00	11,22	3,12	2,98	
6A1	0°	30,00	9,40	3,19	30,00	9,80	3,06	30,00	9,62	3,12	3,12	
	30°	33,00	9,40	3,51	33,00	9,59	3,44	33,00	9,22	3,58	3,51	
	60°	48,50	10,90	4,45	48,50	11,20	4,33	48,50	11,00	4,41	4,40	
	90°	45,00	9,80	4,59	38,50	8,59	4,48	38,50	8,21	4,69	4,59	
	120°	48,00	10,21	4,70	41,00	9,81	4,18	41,00	9,60	4,27	4,38	
	150°	42,00	10,61	3,96	42,00	11,80	3,56	42,00	11,60	3,62	3,71	
	180°	32,50	9,79	3,32	32,50	10,22	3,18	32,50	9,82	3,31	3,27	

Probe	Meßrichtung	N A B Z U S T A N D N A C H 7 5 F T W - Z Y K L E N									
		EBENE 1			EBENE 2			EBENE 3			Mittelwert
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	US-Geschw. v (Km/s)
1A1	0°	33,00	10,00	3,30	33,00	9,82	3,36	33,00	9,62	3,43	3,36
	30°	36,50	10,00	3,65	36,50	9,61	3,80	36,50	10,00	3,65	3,70
	60°	53,20	12,34	4,31	45,20	8,40	5,38	45,20	8,76	5,16	4,95
	90°	44,50	9,19	4,84	38,50	10,21	3,77	38,50	10,41	3,70	4,10
	120°	50,00	10,80	4,63	43,00	10,00	4,30	43,00	10,21	4,21	4,38
	150°	41,70	10,80	3,86	41,70	12,23	3,41	41,70	11,88	3,51	3,59
	180°	35,00	9,62	3,64	35,00	11,01	3,18	35,00	10,20	3,43	3,42
2A1	0°	35,00	8,20	4,27	35,00	8,41	4,16	35,00	8,01	4,37	4,27
	30°	38,50	8,21	4,69	38,50	8,61	4,47	38,50	8,41	4,58	4,58
	60°	55,50	10,61	5,23	47,50	10,22	4,65	47,50	10,42	4,56	4,81
	90°	44,50	9,19	4,84	38,00	9,41	4,04	38,00	9,20	4,13	4,34
	120°	48,00	10,81	4,44	41,20	10,22	4,03	41,20	10,00	4,12	4,20
	150°	44,00	8,59	5,12	44,00	8,80	5,00	44,00	8,40	5,24	5,12
	180°	35,00	8,10	4,32	35,00	8,29	4,22	35,00	8,20	4,27	4,27
6A1	0°	30,00	9,09	3,30	30,00	8,93	3,36	30,00	8,75	3,43	3,36
	30°	33,00	9,04	3,65	33,00	8,68	3,80	33,00	9,04	3,65	3,70
	60°	48,50	11,25	4,31	48,50	9,01	5,38	48,50	9,40	5,16	4,95
	90°	45,00	9,30	4,84	38,50	10,21	3,77	38,50	10,41	3,70	4,10
	120°	48,00	10,37	4,63	41,00	9,53	4,30	41,00	9,74	4,21	4,38
	150°	42,00	10,88	3,86	42,00	12,32	3,41	42,00	11,97	3,51	3,59
	180°	32,50	8,93	3,64	32,50	10,22	3,18	32,50	9,48	3,43	3,42

Probe	Meßrichtung	N A B Z U S T A N D N A C H 1 0 0 F T W - Z Y K L E N									
		EBENE 1			EBENE 2			EBENE 3			Mittelwert
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	US-Geschw. v (Km/s)
1A1	0°	33,00	10,00	3,30	33,00	9,82	3,36	33,00	9,62	3,43	3,36
	30°	36,50	10,40	3,51	36,50	10,80	3,38	36,50	10,20	3,58	3,49
	60°	53,20	13,33	3,99	45,20	12,42	3,64	45,20	11,99	3,77	3,80
	90°	44,50	10,21	4,36	38,50	9,60	4,01	38,50	9,41	4,09	4,15
	120°	50,00	11,99	4,17	43,00	11,23	3,83	43,00	11,81	3,64	3,88
	150°	41,70	12,64	3,30	41,70	13,99	2,98	41,70	13,58	3,07	3,12
	180°	35,00	11,99	2,92	35,00	12,20	2,87	35,00	12,41	2,82	2,87
2A1	0°	35,00	12,20	2,87	35,00	12,41	2,82	35,00	11,40	3,07	2,92
	30°	38,50	12,42	3,10	38,50	13,60	2,83	38,50	13,41	2,87	2,93
	60°	55,50	14,02	3,96	47,50	12,21	3,89	47,50	12,40	3,83	3,89
	90°	44,50	11,80	3,77	38,00	10,41	3,65	38,00	10,22	3,72	3,71
	120°	48,00	15,00	3,20	41,20	13,42	3,07	41,20	14,01	2,94	3,07
	150°	44,00	11,80	3,73	44,00	11,61	3,79	44,00	11,99	3,67	3,73
	180°	35,00	11,59	3,02	35,00	11,78	2,97	35,00	11,99	2,92	2,97
6A1	0°	30,00	10,20	2,94	30,00	10,42	2,88	30,00	10,00	3,00	2,94
	30°	33,00	9,79	3,37	33,00	9,59	3,44	33,00	10,00	3,30	3,37
	60°	48,50	12,40	3,91	48,50	13,00	3,73	48,50	12,83	3,78	3,81
	90°	45,00	10,20	4,41	38,50	9,80	3,93	38,50	10,00	3,85	4,06
	120°	48,00	12,00	4,00	41,00	10,41	3,94	41,00	10,20	4,02	3,99
	150°	42,00	12,00	3,50	42,00	12,21	3,44	42,00	12,10	3,47	3,47
	180°	32,50	10,19	3,19	32,50	11,21	2,90	32,50	10,80	3,01	3,03

Probe	Meßrichtung	T R O C K E N Z U S T A N D N A C H 1 0 0 F T W - Z Y K L E N									
		EBENE 1			EBENE 2			EBENE 3			Mittelwert
		Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	Meßstrecke s (mm)	Laufzeit t (µs)	US-Geschw. v (Km/s)	US-Geschw. v (Km/s)
1A1	0°	33,00	15,00	2,20	33,00	13,98	2,36	33,00	13,75	2,40	2,32
	30°	36,50	16,01	2,28	36,50	15,40	2,37	36,50	15,21	2,40	2,35
	60°	53,20	18,54	2,87	45,20	17,80	2,54	45,20	17,59	2,57	2,66
	90°	44,50	13,61	3,27	38,50	12,22	3,15	38,50	12,42	3,10	3,17
	120°	50,00	17,01	2,94	43,00	14,83	2,90	43,00	14,98	2,87	2,90
	150°	41,70	17,59	2,37	41,70	17,82	2,34	41,70	17,59	2,37	2,36
	180°	35,00	16,83	2,08	35,00	17,59	1,99	35,00	16,59	2,11	2,06
2A1	0°	35,00	13,21	2,65	35,00	14,58	2,40	35,00	14,83	2,36	2,47
	30°	38,50	14,81	2,60	38,50	14,98	2,57	38,50	15,40	2,50	2,56
	60°	55,50	20,79	2,67	47,50	16,78	2,83	47,50	19,23	2,47	2,66
	90°	44,50	15,61	2,85	38,00	14,39	2,64	38,00	14,18	2,68	2,72
	120°	48,00	17,98	2,67	41,20	16,22	2,54	41,20	15,43	2,67	2,63
	150°	44,00	18,57	2,37	44,00	18,80	2,34	44,00	19,21	2,29	2,33
	180°	35,00	15,22	2,30	35,00	16,59	2,11	35,00	15,63	2,24	2,22
6A1	0°	30,00	14,78	2,03	30,00	14,63	2,05	30,00	14,63	2,05	2,04
	30°	33,00	15,00	2,20	33,00	14,80	2,23	33,00	14,60	2,26	2,23
	60°	48,50	18,58	2,61	48,50	21,18	2,29	48,50	19,17	2,53	2,48
	90°	45,00	14,61	3,08	38,50	12,79	3,01	38,50	13,18	2,92	3,00
	120°	48,00	15,00	3,20	41,00	14,39	2,85	41,00	14,59	2,81	2,95
	150°	42,00	17,43	2,41	42,00	17,21	2,44	42,00	17,80	2,36	2,40
	180°	32,50	15,40	2,11	32,50	15,63	2,08	32,50	15,19	2,14	2,11

Porenradius µm	P o r e n a n t e i l (%)						
	P R O B E P 7						
	GP1	GP2	D1	GK5-Oberf.	GK4-Oberf.	GK6-Kern	GK6-Oberf.
0.02	0,00	1,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0.03	5,13	3,57	0,00	1,69	0,00	0,00	0,00
0.05	12,82	8,93	0,00	3,39	1,81	0,00	1,32
0.08	10,26	10,71	0,47	6,78	5,45	2,27	2,63
0.12	7,69	12,50	0,47	11,86	7,27	4,54	6,58
0.20	5,13	8,93	0,47	8,47	12,73	6,82	9,21
0.31	2,56	7,14	0,94	8,47	10,91	11,36	10,53
0.50	5,13	5,36	2,83	6,78	10,91	9,09	7,89
0.80	5,13	3,57	4,72	8,47	9,09	9,09	6,58
1.25	5,13	3,57	14,16	6,78	3,64	6,82	6,58
2,00	2,56	3,57	16,98	3,39	3,64	2,27	3,94
3.15	5,13	3,57	16,98	3,39	5,45	4,54	5,26
5,00	5,13	3,57	8,49	5,08	3,64	6,82	5,26
8,00	2,56	3,57	6,13	3,39	3,64	4,54	3,94
12.50	5,13	3,57	5,66	3,39	3,64	4,54	3,94
20,00	2,56	3,57	4,24	3,39	3,64	4,54	3,94
31.50	5,13	3,57	4,24	3,39	3,64	4,54	3,94
50,00	5,13	3,57	4,72	3,39	3,64	6,82	3,94
80,00	2,56	1,78	3,30	3,39	3,64	4,54	3,94
125,00	2,56	1,78	2,36	3,39	3,64	4,54	3,94
200,00	2,56	1,78	2,36	1,69	1,81	2,27	2,63

Porenradius µm	P o r e n a n t e i l (%)							
	P R O B E P 1			P R O B E P 2		P R O B E P 6		
	1E-Kern	1A-Oberf.	1A-Kern	2E-Kern	2A-Oberf.	6E-Kern	6A-Oberf.	6A-Kern
0.05	0,00	2,27	2,27	1,59	1,41	0,00	0,00	1,85
0.08	3,70	2,27	2,27	1,59	1,41	2,78	11,90	5,55
0.12	11,10	11,36	9,09	7,94	7,04	8,33	11,90	12,96
0.20	11,10	15,90	15,91	12,70	9,86	8,33	7,14	9,26
0.31	11,10	11,36	11,36	14,28	14,08	8,33	4,76	9,26
0.50	7,41	6,82	6,82	9,52	11,27	8,33	4,76	7,41
0.80	7,41	4,54	4,54	7,94	9,86	8,33	4,76	7,41
1.25	7,41	4,54	4,54	6,35	7,04	5,55	2,38	5,55
2,00	3,70	2,27	2,27	3,17	4,22	2,78	2,38	3,70
3.15	3,70	2,27	4,54	3,17	2,82	5,55	2,38	3,70
5,00	3,70	4,54	4,54	4,76	4,22	5,55	4,76	3,70
8,00	3,70	2,27	4,54	3,17	2,82	5,55	4,76	3,70
12.50	3,70	2,27	4,54	3,17	2,82	5,55	4,76	3,70
20,00	3,70	4,54	4,54	4,76	2,82	5,55	4,76	3,70
31.50	3,70	4,54	4,54	4,76	2,82	5,55	4,76	3,70
50,00	3,70	6,82	4,54	3,17	4,22	5,55	7,14	3,70
80,00	3,70	4,54	4,54	3,17	2,82	2,78	7,14	3,70
125,00	3,70	4,54	2,27	3,17	4,22	2,78	4,76	3,70
200,00	3,70	2,27	2,27	1,59	4,22	2,78	4,76	3,70

Porenradius μm	Porenanteil (%)			
	Probe 1A (P1)		Probe GK1 (P7)	
	Präerwärmung	Posterwärmung	Präerwärmung	Posterwärmung
0.05	2,27	0,00	0,00	0,00
0.08	2,27	0,00	2,27	0,00
0.12	11,36	0,00	2,27	0,00
0.20	15,90	0,00	6,81	0,00
0.31	11,36	0,00	11,40	0,00
0.50	6,82	0,00	11,40	0,00
0.80	4,54	0,00	6,81	5,56
1.25	4,54	0,00	6,81	22,84
2,00	2,27	0,00	6,81	16,67
3.15	2,27	10,06	4,45	16,05
5,00	4,54	16,57	4,45	10,49
8,00	2,27	11,24	4,45	6,79
12.50	2,27	10,06	4,45	5,56
20,00	4,54	8,28	4,45	4,32
31.50	4,54	10,06	4,45	3,70
50,00	6,82	13,02	4,45	3,09
80,00	4,54	8,88	4,45	2,47
125,00	4,54	7,10	2,27	1,85
200,00	2,27	4,73	2,27	0,62

Porenradius μm	Porenanteil (%)					
	Probe 2A (P2)					
	Präerwärmung		Posterwärmung		Post - 100 FTW - Zyklen	
	senkrecht zu c-Achsen	parallel zu c-Achsen	senkrecht zu c-Achsen	parallel zu c-Achsen	senkrecht zu c-Achsen	parallel zu c-Achsen
0.05	2,22	1,27	0,00	0,00	0,00	0,00
0.08	4,44	1,27	0,00	0,00	1,47	1,20
0.12	13,33	5,06	0,99	0,38	4,41	4,82
0.20	17,78	6,33	0,99	0,76	5,88	8,43
0.31	17,78	10,13	2,97	1,14	14,71	12,05
0.50	4,44	8,86	7,92	2,65	16,18	8,43
0.80	4,44	8,86	16,83	9,85	16,18	7,23
1.25	4,44	7,59	21,78	14,77	13,24	6,02
2,00	2,22	5,06	8,91	9,47	8,82	3,61
3.15	2,22	2,53	6,93	7,20	4,41	3,61
5,00	4,44	2,53	5,94	5,30	2,94	3,61
8,00	2,22	12,66	4,95	4,17	1,47	3,61
12.50	2,22	12,66	3,96	4,17	1,47	3,61
20,00	2,22	3,80	2,97	5,30	1,47	4,82
31.50	2,22	3,80	3,96	10,61	1,47	7,23
50,00	2,22	2,53	3,96	9,85	1,47	8,43
80,00	4,44	2,53	2,97	6,44	1,47	6,02
125,00	4,44	1,27	1,98	4,55	1,47	3,61
200,00	2,22	1,27	1,98	3,41	1,47	3,61

Porenradius µm	PROBE 1B1 (P1)					PROBE 1E1 (P1)				
	nach 0 FTW	nach 25 FTW	nach 50 FTW	nach 75 FTW	nach 100 FTW	nach 0 FTW	nach 25 FTW	nach 50 FTW	nach 75 FTW	nach 100 FTW
0.05	2,27	1,89	1,82	1,49	1,67	0,00	2,00	2,04	1,96	1,92
0.08	2,27	5,66	1,82	1,49	0,00	3,70	6,00	6,12	5,88	5,77
0.12	11,36	13,21	9,09	5,97	6,67	11,10	12,00	12,24	11,76	11,54
0.20	15,90	9,43	12,73	10,45	15,00	11,10	8,00	8,16	7,84	9,62
0.31	11,36	7,55	9,09	10,45	10,00	11,10	6,00	6,12	5,88	7,69
0.50	6,82	5,66	5,45	5,97	6,67	7,41	6,00	6,12	3,92	5,77
0.80	4,54	3,77	3,64	4,48	5,00	7,41	4,00	4,08	3,92	3,85
1.25	4,54	3,77	3,64	4,48	6,67	7,41	4,00	4,08	3,92	3,85
2.00	2,27	3,77	1,82	2,99	3,33	3,70	2,00	2,04	1,96	1,92
3.15	2,27	3,77	1,82	2,99	3,33	3,70	4,00	2,04	1,96	1,92
5.00	4,54	3,77	3,64	2,99	5,00	3,70	4,00	4,08	3,92	3,85
8.00	2,27	3,77	3,64	1,49	5,00	3,70	4,00	2,04	1,96	3,85
12.50	2,27	3,77	3,64	2,99	5,00	3,70	4,00	4,08	3,92	3,85
20.00	4,54	3,77	3,64	4,48	5,00	3,70	4,00	4,08	9,80	3,85
31.50	4,54	5,66	5,45	7,46	5,00	3,70	6,00	6,12	13,73	3,85
50.00	6,82	5,66	5,45	8,96	3,33	3,70	6,00	6,12	9,80	5,77
80.00	4,54	5,66	9,09	7,46	8,33	3,70	8,00	8,16	3,92	7,69
125.00	4,54	5,66	7,27	7,46	3,33	3,70	6,00	6,12	1,96	7,69
200.00	2,27	3,77	7,27	5,97	1,67	3,70	4,00	6,12	1,96	5,77

Porenradius µm	PROBE 2B1 (P2)					PROBE 2E1 (P2)				
	nach 0 FTW	nach 25 FTW	nach 50 FTW	nach 75 FTW	nach 100 FTW	nach 0 FTW	nach 25 FTW	nach 50 FTW	nach 75 FTW	nach 100 FTW
0.05	1,41	1,89	1,85	1,64	1,92	1,59	1,85	1,89	1,61	1,61
0.08	1,41	1,89	3,70	3,28	3,85	1,59	5,56	5,66	3,23	3,23
0.12	7,04	7,55	9,26	8,20	11,54	7,94	14,81	15,09	11,29	9,68
0.20	9,86	18,87	12,96	11,48	9,62	12,70	12,96	13,21	12,90	12,90
0.31	14,08	11,32	12,96	11,48	7,69	14,28	9,26	9,43	11,29	11,29
0.50	11,27	5,66	3,70	4,92	5,77	9,52	5,56	5,66	4,84	4,84
0.80	9,86	3,77	3,70	3,28	3,85	7,94	3,70	3,77	3,23	4,84
1.25	7,04	3,77	1,85	3,28	3,85	6,35	3,70	3,77	3,23	4,84
2.00	4,22	1,89	1,85	1,64	1,92	3,17	1,85	1,89	1,61	3,23
3.15	2,82	1,89	1,85	1,64	3,85	3,17	1,85	1,89	3,23	3,23
5.00	4,22	3,77	3,70	3,28	3,85	4,76	3,70	3,77	3,23	3,23
8.00	2,82	3,77	1,85	3,28	3,85	3,17	3,70	1,89	3,23	3,23
12.50	2,82	3,77	3,70	6,56	3,85	3,17	5,56	3,77	3,23	3,23
20.00	2,82	3,77	3,70	9,84	3,85	4,76	5,56	3,77	3,23	3,23
31.50	2,82	3,77	5,56	6,56	5,77	4,76	3,70	5,66	4,84	6,45
50.00	4,22	5,66	7,41	4,92	5,77	3,17	5,56	7,55	6,45	6,45
80.00	2,82	5,66	9,26	4,92	5,77	3,17	5,56	5,66	8,06	4,84
125.00	4,22	5,66	7,41	4,92	5,77	3,17	3,70	3,77	6,45	4,84
200.00	4,22	5,66	3,70	4,92	7,69	1,59	1,85	1,89	4,84	4,84

Porenradius µm	PROBE 6B1 (P6)					PROBE 6E1 (P6)				
	nach 0 FTW	nach 25 FTW	nach 50 FTW	nach 75 FTW	nach 100 FTW	nach 0 FTW	nach 25 FTW	nach 50 FTW	nach 75 FTW	nach 100 FTW
0.05	0,00	0,00	1,82	2,00	2,22	0,00	0,00	1,82	1,89	1,67
0.08	11,90	13,95	5,45	8,00	6,67	2,78	11,54	7,27	3,77	5,00
0.12	11,90	13,95	12,73	14,00	11,11	8,33	13,46	14,55	13,21	11,67
0.20	7,14	6,98	9,09	10,00	6,67	8,33	7,69	9,09	13,21	13,33
0.31	4,76	4,65	7,27	6,00	6,67	8,33	3,85	7,27	11,32	10,00
0.50	4,76	6,98	5,45	6,00	4,44	8,33	3,85	5,45	7,55	6,67
0.80	4,76	4,65	3,64	6,00	4,44	8,33	3,85	3,64	5,66	5,00
1.25	2,38	4,65	3,64	4,00	4,44	5,55	3,85	3,64	3,77	5,00
2.00	2,38	2,33	1,82	2,00	2,22	2,78	1,92	1,82	1,89	1,67
3.15	2,38	4,65	1,82	4,00	4,44	5,55	3,85	1,82	3,77	3,33
5.00	4,76	4,65	3,64	4,00	4,44	5,55	3,85	3,64	3,77	3,33
8.00	4,76	4,65	1,82	4,00	4,44	5,55	3,85	1,82	3,77	3,33
12.50	4,76	4,65	3,64	4,00	4,44	5,55	3,85	1,82	3,77	3,33
20.00	4,76	4,65	3,64	4,00	4,44	5,55	3,85	3,64	3,77	3,33
31.50	4,76	4,65	7,27	4,00	6,67	5,55	5,77	3,64	3,77	3,33
50.00	7,14	4,65	7,27	6,00	6,67	5,55	5,77	5,45	3,77	3,33
80.00	7,14	4,65	7,27	4,00	6,67	2,78	7,69	9,09	3,77	5,00
125.00	4,76	2,33	7,27	4,00	4,44	2,78	7,69	7,27	3,77	6,67
200.00	4,76	2,33	5,45	4,00	4,44	2,78	3,85	7,27	3,77	5,00

Porenradius µm	PROBE GK4b (P7)					PROBE GK2c (P7)				
	nach 0 FTW	nach 25 FTW	nach 50 FTW	nach 75 FTW	nach 100 FTW	nach 0 FTW	nach 25 FTW	nach 50 FTW	nach 75 FTW	nach 100 FTW
0.03	0,00	1,45	1,28	0,00	0,00	0,00	1,47	0,00	0,00	2,44
0.05	1,81	2,90	2,56	2,70	1,82	3,33	2,94	1,33	1,37	4,88
0.08	5,45	4,35	3,85	4,05	2,73	3,33	2,94	2,67	1,37	7,32
0.12	7,27	8,70	7,69	6,76	5,45	10,00	7,35	5,33	4,11	9,76
0.20	12,73	8,70	6,41	6,76	6,36	13,30	8,82	8,00	13,70	7,32
0.31	10,91	8,70	7,69	10,81	9,09	13,30	11,76	12,00	10,96	4,88
0.50	10,91	7,25	6,41	9,46	8,18	6,67	7,35	10,67	6,85	4,88
0.80	9,09	5,80	6,41	8,11	8,18	6,67	7,35	6,67	5,48	4,88
1.25	3,64	7,25	5,13	6,76	8,18	6,67	5,88	5,33	4,11	4,88
2.00	3,64	4,35	2,56	4,05	5,45	3,33	2,94	2,67	2,74	2,44
3.15	5,45	5,80	2,56	4,05	6,36	3,33	2,94	4,00	2,74	2,44
5.00	3,64	4,35	3,85	4,05	5,45	3,33	4,41	2,67	2,74	4,88
8.00	3,64	2,90	3,85	2,70	4,55	3,33	2,94	2,67	2,74	2,44
12.50	3,64	2,90	3,85	2,70	4,55	3,33	2,94	2,67	2,74	4,88
20.00	3,64	4,35	5,13	2,70	4,55	3,33	2,94	4,00	2,74	4,88
31.50	3,64	5,80	7,69	4,05	4,55	3,33	4,41	4,00	6,85	7,32
50.00	3,64	5,80	7,69	4,05	4,55	3,33	4,41	5,33	6,85	7,32
80.00	3,64	4,35	6,41	4,05	3,64	3,33	5,88	6,67	8,22	4,88
125.00	3,64	2,90	5,13	5,41	3,64	3,33	5,88	6,67	6,85	4,88
200.00	1,81	1,45	3,85	6,76	2,73	3,33	4,41	6,67	6,85	2,44

Persönliche Daten

geboren am 24. Mai 1967 in Mitrovica, Kosova
verheiratet
5 - jährige Zwillinge
seit 1996 in Deutschland



Berufliche Werdegang

- Seit Januar 2003 **Trainee-Programm** bei der Firma Medius Informations- und Vermittlungsservice im Finanzbereich GmbH, München
Schwerpunkt: Anlageberatung
- 1996 - 2002 **Promotion** an der LMU in München, Fakultät für Geowissenschaften Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie
Abschluss: **Doktorprüfung im Fach Geologie**
Dissertation: »Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Carrara-Marmor und deren Einfluß auf die Verwitterung«
Schwerpunkte: Marmorverwitterung und Konservierung, Technische, Gesteinskunde, Laborversuche, Ultraschalltomographie
- 1989 - 1990 **Leiterin** der Jugendforscher im Bereich Geologie, Mitrovica
- 1986 - 1987 **Laborversuchsassistentin** für Physik
Fakultät für Bergbauwirtschaft und Metallurgie, Mitrovica

Studium

- 1985 - 1990 **Geologie** an der Universität in Prishtina, Kosova
Examendurchschnittsnote: 1,4
Abschluss: **Diplomingenieur für Geologie**
Diplomarbeit: »Prüfung und Bestimmung der Qualität vom Erz an der Blei-Zink Lagerstätte „TREPÇA“ in Stan Tërg«, Note: 1,0
Schwerpunkt: Forschungsmethoden für Mineralrohstoffe und Wirtschaftsgeologie
- 1992 - 1994 **Postdiplomstudium** an der naturwissenschaft.- mathematischen Fakultät der Universität in Zagreb, Kroatien
Fachrichtung: Petrologie und Lagerstätten des magmatischen und metamorphen Zyklus, Examendurchschnittsnote: 1,1

Berufliche Weiterbildung

Juni - September 1996	Deutschsprachkurse am Goethe-Institut in Freiburg
24 September 1996	Prüfung zum Nachweis deutscher Sprachkenntnisse (PNdS) Universität Freiburg und Goethe-Institut Freiburg

Schulausbildung

1973 - 1981	Grundschule in Mitrovica, Kosova
1981 - 1985	Gymnasium , Mitrovica, Fach Naturwissenschaft Abschluss: Abitur , Note: 1,0

Sonstige Kenntnisse

Sprachen	Deutsch: sehr gut in Wort und Schrift Englisch gut in Wort und Schrift Slowenisch: gut in Wort und Schrift Kroatisch: sehr gut in Wort und Schrift Serbisch: sehr gut in Wort und Schrift
EDV - Kenntnisse	Word, Excel, Sswin, Xact, Lotus 123, Corel Draw

Ergänzung zur Person

1996	Einreise nach Deutschland
1992 - 1996	Familiennachzug in Kamnik, Slowenien
19. März 1990	Auszeichnung: »Diplom für hervorragende Studienleistungen« erteilt von der Universität in Prishtina, Kosova

Veröffentlichungen

2. - 3. April 1998	Workshop: »Marmor als Werk- und Denkmalgestein«, Göttingen Vortrag: »Bestimmung der Orientierung von Calcitkristallen in Carrara-Marmor durch Ultraschallmessungen«
19. - 24. Juni 2000	9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice (Italy) »Determination of structural anisotropy of Carrara marble with ultrasonic measurements«
München, April 2003	