

EINFLUSS DES KATIONENAUSTAUSCHES AUF DIE HYDRATATION UND DEHYDRATATION VON TONMINERALEN

Wei Xiang & Kurt Czurda

Mit 10 Abbildungen

Zusammenfassung

Tonminerale besitzen negative Oberflächenladungen, die durch die Anlagerung von Gegenionen (Kationen) an den äußeren und inneren Oberflächen (Zwischenschichten) neutralisiert werden. Diese austauschbar gebundenen Kationen beeinflussen in unterschiedlicher Weise die Hydratation und Dehydratation der Tonminerale.

Um diese Einflüsse zu klären, wurden Untersuchungen an zwei natürlichen Tönen mit unterschiedlicher tonmineralogischer Zusammensetzung durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, daß Hydratation und Dehydratation der Tonminerale deutlich von der Tonmineralart, dem Ionenradius, der Wertigkeit und dem primären Hydratationszustand der Gegenionen abhängen.

Nicht quellfähige Tonminerale adsorbieren Wassermoleküle nur an der äußeren Oberfläche. Aus diesem Grund ist die Hydratation von Tonmineralen in der zweiwertigen Form wegen der vergleichsweise hohen Hydratationsenergie der Kationen deutlich stärker als von einwertigen Tonmineralen. Bei innerkristallin quellfähigen Tonmineralen, folgt die Hydratation bei der relativen Luftfeuchtigkeit von 45%–98% folgender Reihe: $K < Ca < Mg < Na$ -Form. Die strukturellen Veränderungen der Tonminerale spielen dabei eine wichtige Rolle. Im primären Hydratationszustand nach Lufttrocknung (die relative Luftfeuchtigkeit von 35%) entspricht die Hydratation der quellfähigen Tonminerale folgender Reihe: $K < Na < Ca < Mg$ -Form.

Abstract:

Charged negatively the clay minerals usually carry cations on their surfaces. The cations are exchangeable. The exchangeable cations have influence on the hydration and dehydration of the clay minerals in various ways.

The study of the two natural clays with different mineral composition was performed in order to clarify the effect of the exchangeable cations. The result clearly shows that the hydration and dehydration of the clay minerals depends on species of clay mineral, ion radius, valent of exchangeable cations and primary hydration state.

The non-swelling clay minerals can adsorb water molecules only on the outer surface. Because the divalent cations have higher hydration energies. The hydration state of the samples saturated with divalent cations is higher than those saturated with monovalent cations. The hydration of the intercrystalline swelling clay minerals follows the order of $K < Ca < Mg < Na$ at 45-98% RH (relative humidity). Here the structure changes of the clay minerals plays a decisive role in the hydration. At 35% RH the hydration of the clay minerals follows the order of $K < Na < Ca < Mg$.

1. Einleitung

Schon seit langem ist bekannt, daß die physikalischen und bodenmechanischen Eigenschaften der Tone von der Kationenbelegung der Tonminerale deutlich beeinflußt werden. Die Veränderungen der Hydratations- und Dehydratationsvorgänge der Tone spielen dabei eine sehr wichtige Rolle. Ziel der vorliegenden Arbeit sollte es daher sein, die Einflüsse des Kationenaustausches auf die Hydratation und Dehydratation von

Tonmineralen zu bestimmen und ihre Ursache zu untersuchen.

Der Kationenaustausch ist ein in der Natur häufig zu beobachtender Vorgang. Deshalb wurden zwei natürliche Tone (Verwitterungsprodukte des Haselgebirges und der Fleckenmergel/Bad Gomers, Oberösterreich) studiert. Das Haselgebirge enthält die Tonminerale Illit und Chlorit, es besitzt also keine quellfähigen Phasen. Die Fleckenmergel enthalten neben Illit, Chlorit und Kaolinit vor allem große Gehalte an Mixed-Layer-Mineralen

(Montmorillonit-Illit-Mixed-Layers), die innerkristallin quellfähig sind.

Die Tonproben wurden mehrere Tage lang bis zur völligen Sättigung in destilliertem Wasser gelagert. Dann wurde die Bodensubstanz in Suspension gebracht und die Fraktion mit einem Durchmesser von > 0.125 mm abgesiebt und verworfen. Zur Umwandlung in die monoionische Form wurden die Proben in der entsprechenden 1-n-Kationen-Chloridlösung gerührt, 7 Tage lang sedimentiert und die klare überstehende Lösung abdekantiert. Die Tonproben wurden mit destilliertem Wasser durch wiederholtes Zentrifugieren möglichst vollständig von Chlorid freigesprochen.

Hydratation und Dehydratation von Tonen wurden nach verschiedenen Methoden bestimmt: Wasseradsorption aus der Gasphase, Wasseraufnahme aus der flüssigen Phase nach Enslin-Neff, dynamische und isotherme thermogravimetrische Dehydratationsversuche und Röntgendiffraktometrie.

2. Einfluß der Kationenbelegung auf die Hydratation von Tonen

Die Hydratation beschreibt den Vorgang der Wasseranlagerung an einer geladenen Oberfläche. Die Bindungsstärke der Kationen an der Tonmineraloberfläche hängt von ihrer Ladung und Größe ab (JENNY, H., 1936; SCHACHTSCHABEL, P., 1940; MARTIN, H. & LAUDELLOT, H., 1963). Ladung und Größe der Kationen in freier Lösung bestimmen die Hydratation. Kleine und hochgeladene Ionen werden stark, große und niedrig geladene dagegen schwach hydratisiert (Abb. 1.), da zweiwertige Kationen eine höhere Hydratationsenergie: Ca = 1571 (kJ/Mol); Mg = 1802 (kJ/Mol), einwertige Kationen dagegen eine niedrigere Hydratationsenergie: K = 356 (kJ/Mol); Na = 419 (kJ/Mol) besitzen. Der Einfluß von austauschbaren Kationen an den äußeren und inneren Oberflächen der Tonminerale auf die Hydratation der Tone ist zudem von der Tonmineralart, der Ladungsdichte an der Tonmi-

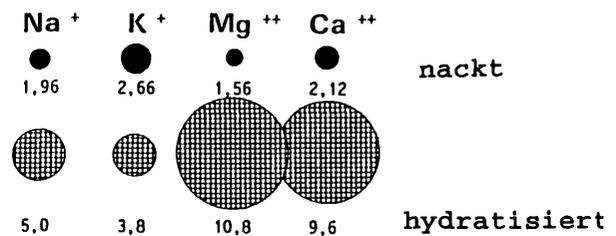


Abb. 1: Durchmesser von nackten und hydratisierten Ionen in Å (nach BUSCH, K.-F. & LUCKNER, L., 1974; SCHABABERLE, R., 1989).

neraloberfläche und dem Durchmesser der angelagerten Gegenionen abhängig.

Die Hydratation der Tonprobe wurde durch die Wasseradsorption aus der Gasphase und Wasseraufnahme aus der flüssigen Phase nach Enslin-Neff bestimmt. Die Wasseradsorption der Tonproben wurde bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 35–98 % bestimmt. Die Proben wurden 7 Tage bei konstanter relativer Luftfeuchtigkeit im geschlossenen Exsikkator gelagert und erst unmittelbar vor der Messung entnommen. Bei den Tonen des Haselgebirges ist die Adsorptionskapazität in der zweiwertigen Form deutlich größer als in der einwertigen Form (Abb. 2.). Da das Haselgebirge keine quellfähigen Tonminerale enthält und die Wassermoleküle nur an der äußeren Oberfläche adsorbiert werden, verläuft die Hydratation der Tonprobe ähnlich wie die von Kationen in freier Lösung. Mit steigender Wertigkeit nimmt die Hydratationsenergie der Kationen zu. Entsprechend ist die Wasseraufnahmefähigkeit von Tonen in der zweiwertigen Form höher als bei einwertiger Belegung.

Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 35% folgt Wasseradsorption der Tonprobe des Fleckenmergels folgender Reihe: $K < Na < Ca < Mg$, d.h. daß Kationen an der äußeren Oberfläche der Tonminerale nur teilweise, und die Kationen in den Zwischenschichträumen noch nicht hydratisiert werden. Deshalb entspricht das Hydratationsverhalten der quellfähigen Tonminerale demjenigen der nicht quellfähigen Tonminerale. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45%–98% für den Ton der Fleckenmergel wurde die größte Wasseradsorption in der

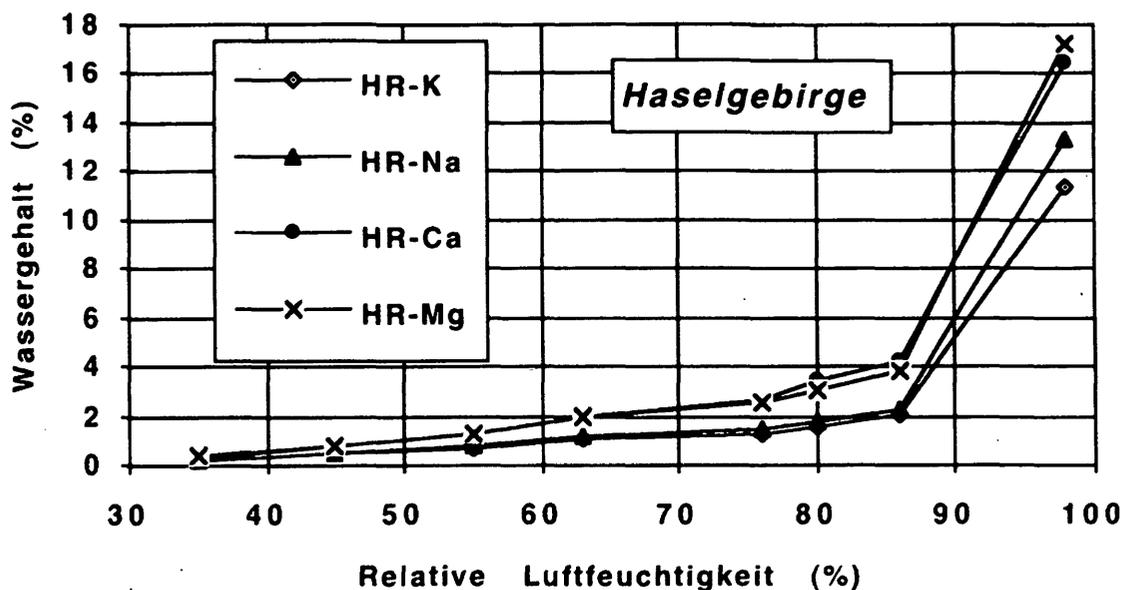


Abb. 2: Adsorptionswasser der Tonproben des Haselgebirges.

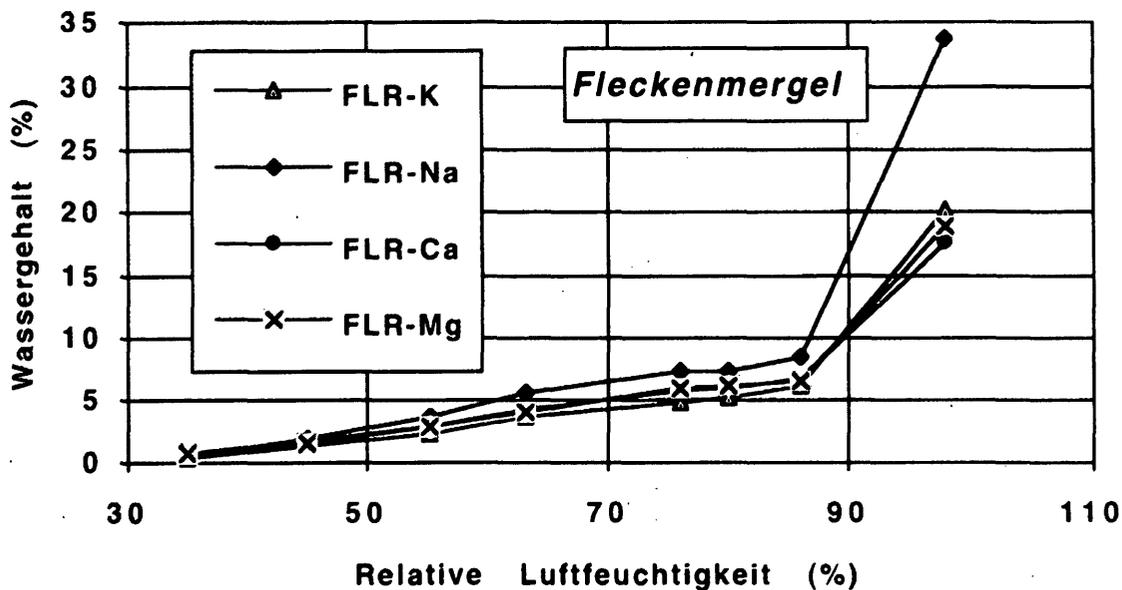


Abb. 3: Adsorptionswasser der Tonproben des Fleckenmergels.

Na-Form festgestellt (Abb. 3), da die Na-Ionen im Zwischenschichtraum der innerkristallin quellfähigen Tonminerale die stärkste innerkristalline Quellung bewirken. Für die K-Form wurde die geringste Wasseradsorption bestimmt. Dazwischen liegen die Adsorptionskapazitäten der zweiwertigen Formen.

Das Wasseraufnahmevermögen ist die von einer getrockneten Probe aufgesaugte Wassermenge, bezogen auf die Trockenmasse der Probe.

Das sogenannte Wasseraufnahmevermögen ist also der Wassergehalt (nach Enslin/Neff), der sich nach Erreichen der maximalen Wasseraufnahme einstellt. Das durch die Wasseraufnahme gebundene Wasser besteht aus Adsorptionswasser und Kapillarwasser.

Das Wasseraufnahmevermögen beider Tonproben wurde nach Enslin-Neff ermittelt. In der Regel werden die Proben hierfür bei 105°C getrocknet. Eine Trocknung bei diesen Temperatu-

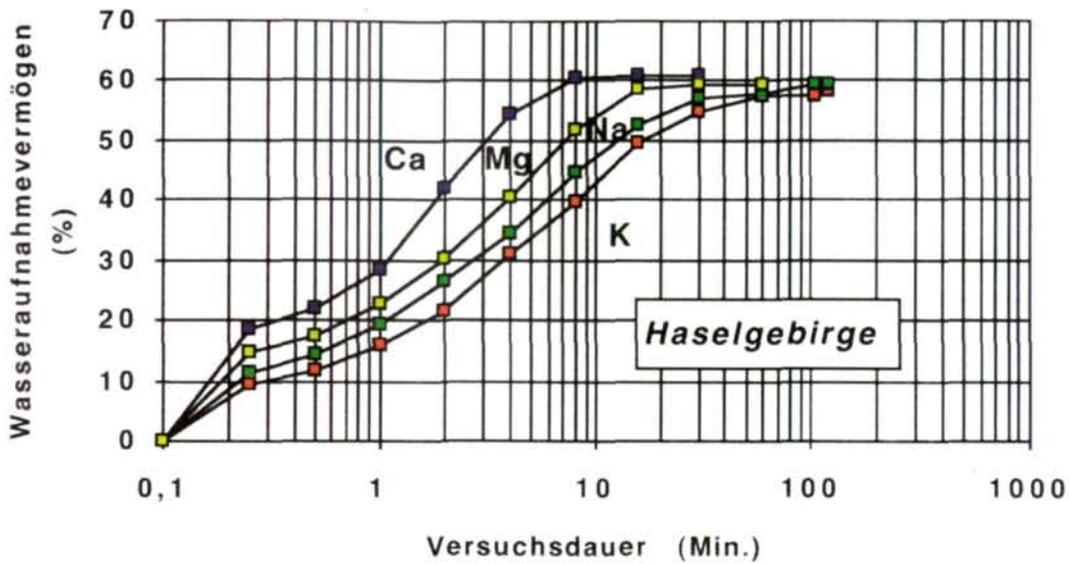


Abb. 4: Wasseraufnahmevermögen der Tonproben des Haselgebirges.

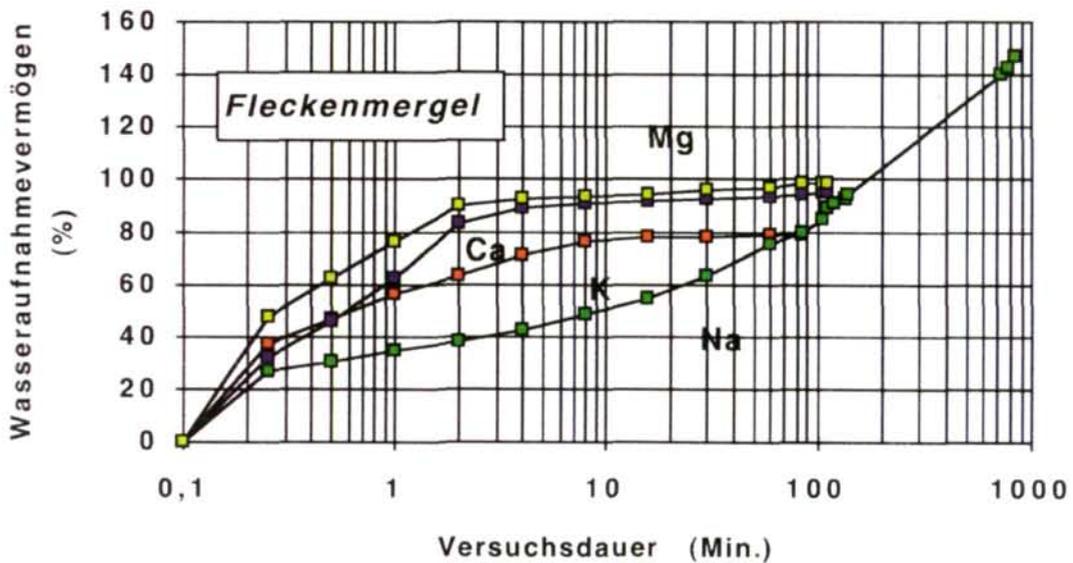


Abb. 5: Wasseraufnahmevermögen der Tone des Fleckenmergels als Funktion der Zeit.

ren führt bei quellfähigen Tonmineralen zu Veränderungen im Wasseraufnahmevermögen. Aus diesem Grund wurden die Tone aus den Fleckenmergeln nach Lufttrocknung bei Raumtemperatur gemessen. Die Probemenge betrug 1 g. Die Versuche wurden nach 24 Stunden abgebrochen.

Wie die Kurven für die Tone des Haselgebirges (Abb. 4) zeigen, ist das Wasseraufnahmevermögen in der zweiwertigen Form für nicht quell-

fähige Tonminerale größer als das in der einwertigen. Das Wasseraufnahmevermögen steigt von der K-Form mit 58,2% zur Na-Form mit 59,4%; Mg-Form mit 59,5% bis zur Ca-Form mit 61,0%.

Das Wasseraufnahmevermögen wird als Funktion der Zeit aufgezeichnet, um die Vorgänge der Wasseraufnahme zu klären. Bei den zweiwertigen Formen dauert die Wasseraufnah-

me bis zum Erreichen der maximale Werte nur 16–30 Minuten, Tone in der einwertigen Form benötigen dagegen über 2 Stunden.

Die Versuchsergebnisse der Tone des Fleckenmergels werden in Abb. 5 dargestellt. Die Wasseraufnahme der Tonprobe dauert bei der K-Form 45 Minuten, der Ca-Form 100 Minuten und der Mg-Form 105 Minuten. Die Na-Form besitzt das größte Wasseraufnahmevermögen mit 146,5%, die Wasseraufnahme dauert über 20 Stunden. Das Wasseraufnahmevermögen entspricht der folgenden Reihe: K (78,5%) < Ca (95,5 %) < Mg (99,0%) < Na (146,5%).

Da Tonminerale in der Na-Form nur schwache Bindungskräfte besitzen, können Wassermoleküle leicht in den Zwischenschichtraum eindringen. Das Wasseraufnahmevermögen der Na-Form zeigt demnach einen anderen Verlauf als das der übrigen Proben. Die Kurve steigt zuerst langsam an. Nach 120 Minuten verläuft die Kurve noch weiter bis zu dem maximalen Wassergehalt. Da beim Versuch die Tonprobe einen Kegel auf der Filterplatte des Gerätes bildet, können die Proben nur Wasser von unten nach oben ansaugen. Die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme hängt von der Durchlässigkeit der Tonprobe nach Hydratation ab.

3. Einfluß der Kationenbelegung auf die Dehydratation von Tonen

Der stufenweise ablaufende Entwässerungsvorgang an äußeren und inneren Oberflächen sowie die Abgabe von das Kristallwasser werden als Dehydratation bezeichnet.

In der Regel wird die thermogravimetrische Analyse bei Untersuchungen des Entwässerungsverhaltens von Tonmineralen verwendet. Die Analysen wurden mit Hilfe einer Differentialthermowaage (Mettler TA 3000) durchgeführt. Versuchsergebnisse dynamischer und isotherm-thermogravimetrischer Analysen werden gegenübergestellt.

Bei der dynamisch-gravimetrischen Thermoanalyse wird die Gewichtsänderung der Tonpro-

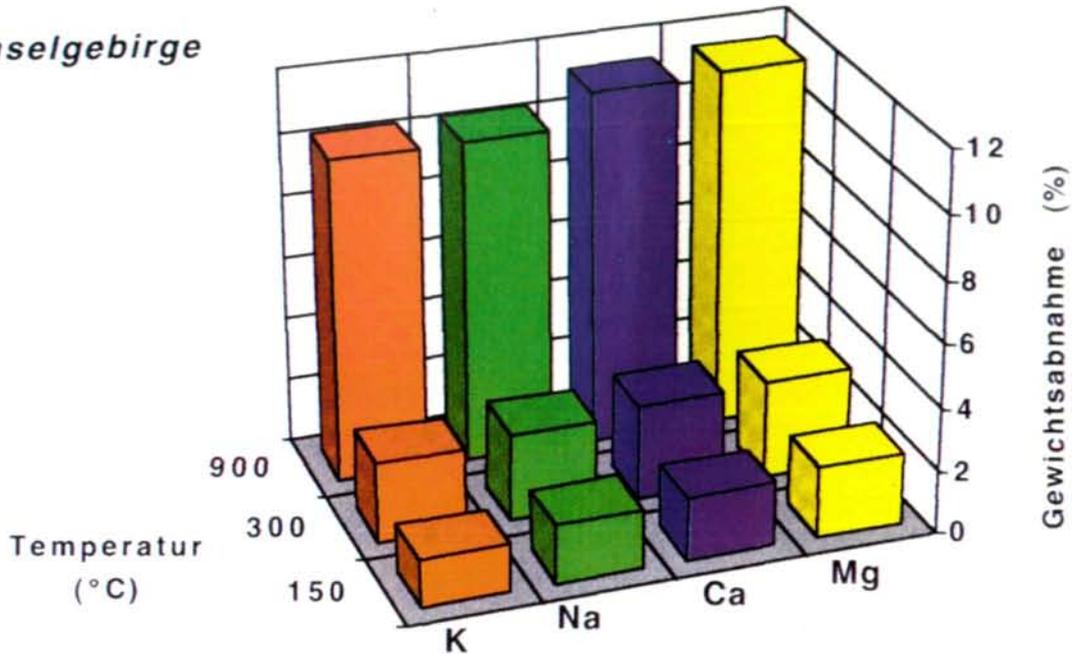
be bei steigenden Temperaturen gemessen. Es wurden etwa 30 mg Probenmaterial nach Lufttrocknung mit 10°C/min von 30°C bis auf 900°C aufgeheizt. Die Ergebnisse der dynamischen Entwässerungskurven zeigen, daß zwischen 30°C und 300°C zunächst das an den äußeren und inneren Oberflächen befindliche Wasser entfernt wird.

Die Gewichtsabnahme bei der Entwässerung der zweiwertigen Formen der beiden Tonproben ist größer als die der einwertigen Formen (Abb. 6). Bei einer Temperatur von 150 °C folgt die Gewichtsabnahme der Tonprobe des Haselgebirges folgender Reihe: K-Form (1,52%) < Na-Form (1,89%) < Ca-Form (2,02%) < Mg-Form (2,26%). Bei einer Temperatur von 300°C entspricht die Gewichtsabnahme der folgenden Reihe: K-Form (2,53 %) < Na-Form (2,78 %) < Ca-Form (3,03%) < Mg-Form (3,11%).

Die Gewichtsabnahme der Tonproben des Fleckenmergels mit quellfähigen Tonmineralen steigt bei einer Temperatur von 150°C von der K-Form mit 4,05%, Na-Form mit 5,68% und Mg-Form mit 6,72% bis zur Ca-Form mit 7,03%. Bei 300°C folgt die Gewichtsabnahme folgender Reihe: K-Form (5,64%) < Na-Form (7,47%) < Ca-Form (9,10%) < Mg-Form (9,27%). Die Ergebnisse haben gezeigt, daß Ionenradius und Wertigkeit der eingelagerten Kationen die Menge des eingelagerten Wassers bestimmen. Es sei darauf hingewiesen, daß dieses Entwässerungsverhalten nur bei einem bestimmten primären Hydratationszustand (Lufttrocknung) auftritt. In diesem Fall werden nicht genügend Wassermoleküle durch die Kationen im Zwischenschichtraum adsorbiert, deshalb spielt der Anteil quellfähiger Minerale keine Rolle.

Bei der isotherm-thermogravimetrischen Analyse wird die Gewichtsabnahme einer Probe stufenweise bei konstanter Temperatur gemessen. Jede Temperaturstufe wird bis zur Gewichtskonstanz beibehalten. Danach wird die Temperatur bis zur nächsten Stufe erhöht. Die Tone der Na-Form und Ca-Form des Fleckenmergels (nach Lufttrocknung) wurden in 6 Stufen (30°C, 50°C, 80°C, 105°C, 300°C, 550°C) getestet.

Haselgebirge



Fleckenmergel

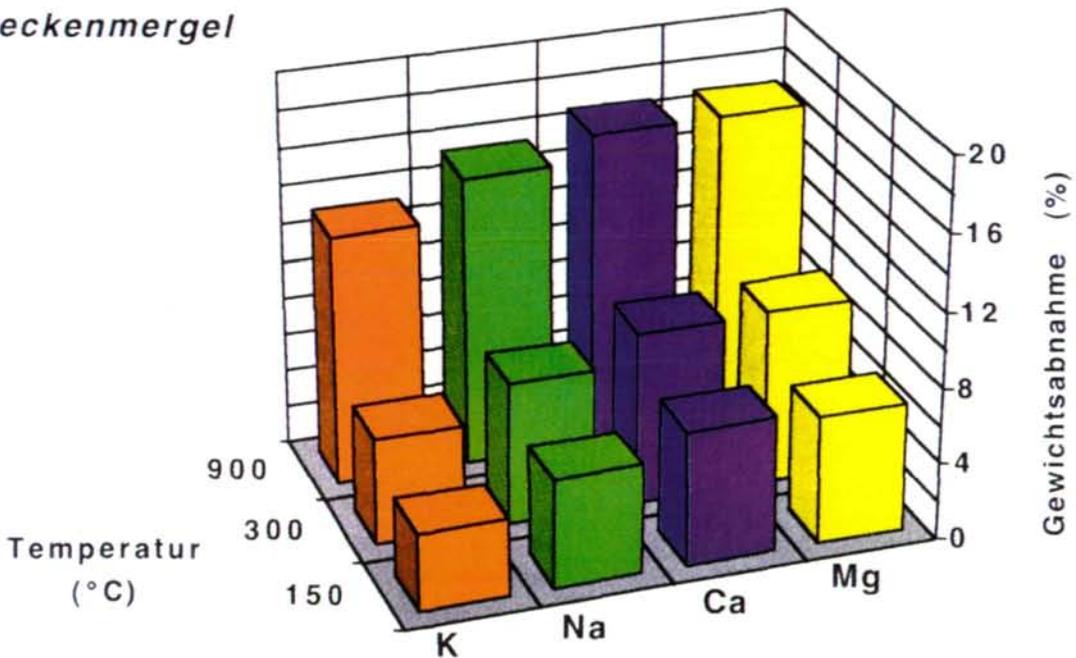


Abb. 6: Die Ergebnisse der dynamisch-thermogravimetrischen Analyse

In Abb. 7 ist die Gewichtsabnahme der Tonproben des Fleckenmergels nach der isotherm-thermogravimetrischen Analyse dargestellt. Man kann aus den Ergebnissen ersehen, daß die Gewichtsabnahme der Ca-Form größer ist als die der Na-Form. Das Verhältnis zwischen den einwertigen und zweiwertigen Formen gleicht dem der dynamisch-thermogravi-

metrischen Analyse. Obwohl die Na-Form des Fleckenmergels das größte Wasseraufnahmevermögen besitzt, ist das Adsorptionswasser der Na-Form mit primärem Hydratationszustand nach Lufttrocknung niedriger als die der Ca-Form. Das bedeutet, daß das Dehydratationsverhalten der Tone vom primären Hydratationszustand abhängt.

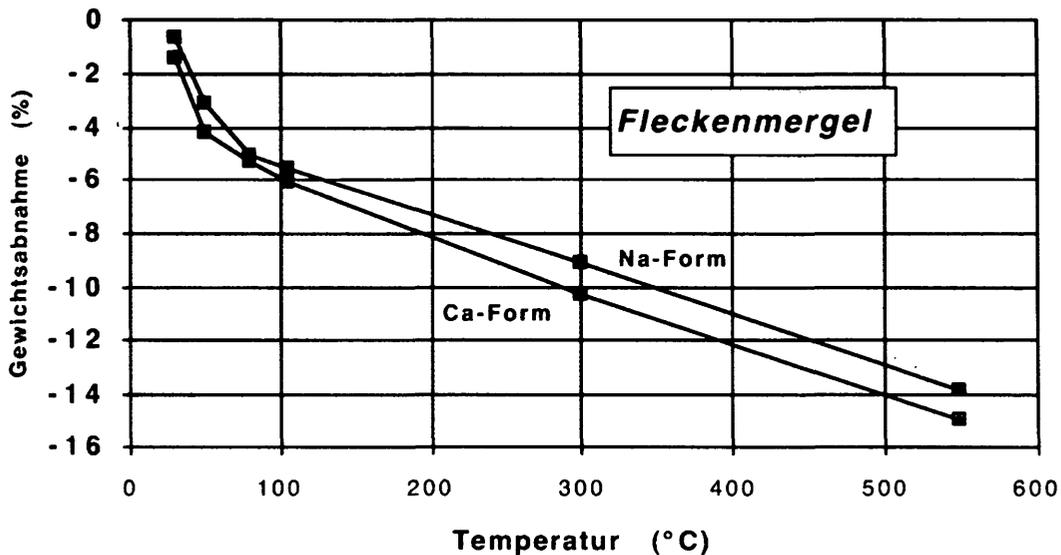


Abb. 7: Gewichtsabnahme der Probe des Fleckenmergels bei isotherm-thermogravimetrischen Dehydrationsversuchen.

Um den Einfluß des primären Hydratationszustandes auf die Dehydratation zu erkennen, wurden beide Tonproben, nach Lagerung bei einer höheren relativen Luftfeuchtigkeit von 86%, durch isotherm-thermogravimetrische Analysen studiert. Die Ergebnisse werden in Abb. 8 dargestellt. Bei Temperaturen von 200°C, 300°C und 500°C ist die Gewichtsabnahme der zweiwertigen Formen der Tonproben des Haselgebirges deutlich größer als die der einwertigen Formen. Bei 200°C betragen die Gewichtsabnahmen der zweiwertigen Formen 4,87%–5,64%, die der einwertigen nur 3,27–3,70%. Bei 300°C steigt die Gewichtsabnahme aller Formen mit ähnlichen Werten von 0,54–0,69%. Das heißt, daß die Gewichtsabnahme der einwertigen Formen des Haselgebirges niedriger ist als die der zweiwertigen Formen. Das Ergebnis entspricht dem luftgetrockneter Proben. In dieser Hinsicht hat der primäre Hydratationszustand der nicht quellfähigen Tonminerale keinen größeren Einfluß auf die Entwässerungsvorgänge.

Im Gegensatz zu den nicht quellfähigen Tonmineralen spielt der primäre Hydratationszustand der quellfähigen Tonminerale bei der Dehydratation eine wichtige Rolle. Bei 200°C wurde die größte Gewichtsabnahme (12,3%) für die Tone der Fleckenmergel in der Na-Form gemessen. Die Gewichtsabnahme der Tonproben

folgt der Reihe: K (9,25%) < Mg (11,69%) < Ca (12,25%) < Na. Bei Lufttrocknung ist die Gewichtsabnahme der Na-Form jedoch kleiner als die der zweiwertigen Formen. Es ist somit davon auszugehen, daß die Dehydratation der quellfähigen Tonminerale nicht nur von der Größe und Wertigkeit der austauschbaren Kationen, sondern auch vom primären Hydratationszustand abhängt.

Bei 300°C entspricht die Gewichtsabnahme der Tonprobe des Fleckenmergels folgender Reihe: K-Form (0,80%) < Na-Form (0,87%) < Ca-Form (1,10%) < Mg-Form (1,61%). Es hat sich gezeigt, daß das gebundene Adsorptionswasser aufgrund der hohen Hydratationsenergie und elektrostatischen Anziehung der zweiwertigen Kationen schwierig von der Oberfläche der Tonminerale zu entfernen ist.

4. Strukturelle Veränderungen der quellfähigen Tonminerale bei der Hydratation und Dehydratation

Durch zahlreiche röntgendiffraktometrische Aufnahmen von Tonproben des Fleckenmergels wurden strukturelle Veränderungen der quellfähigen Tonminerale bei der Hydratation und

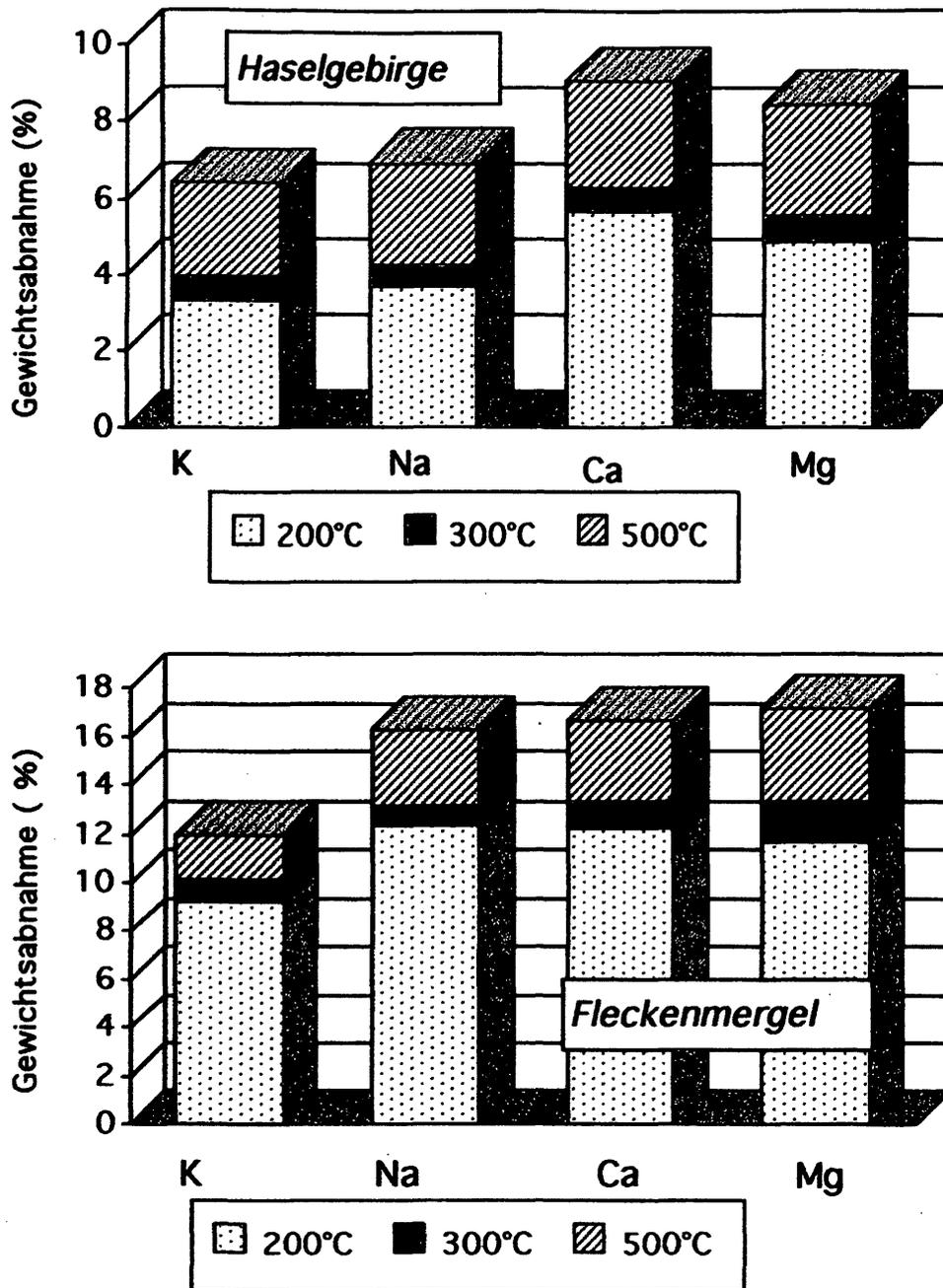


Abb. 8: Gewichtsabnahme bei isotherm-thermogravimetrischen Versuchen.

Dehydratation beobachtet. Die Veränderungen der Basisabstände der Mixed-Layer-Minerale der Fleckenmergel sind deutlich abhängig vom Wassergehalt.

In den vorliegenden Untersuchungen wurden die Pulverproben von beiden Tönen zunächst nach DIN 18 121 (Wassergehaltsbestimmung durch Ofentrocknung) bei 105°C getrocknet. Unter diesen Bedingungen sind die Tone annähernd was-

serfrei. Danach wurden die Pulverpräparate geröntgt (Abb. 9). Die d(001)-Reflexe der in zweiwertigen Formen vorliegenden Mixed-Layer-Minerale liegen bei ca. 14 Å. Das weist aus, daß noch zwei Wasserschichten durch die Kationen im Zwischenraum gebunden sind. Die d(001)-Reflexe der einwertigen Formen der Mixed-Layer-Minerale befinden sich dagegen zwischen 10–11 Å, sodaß sich kaum Adsorp-

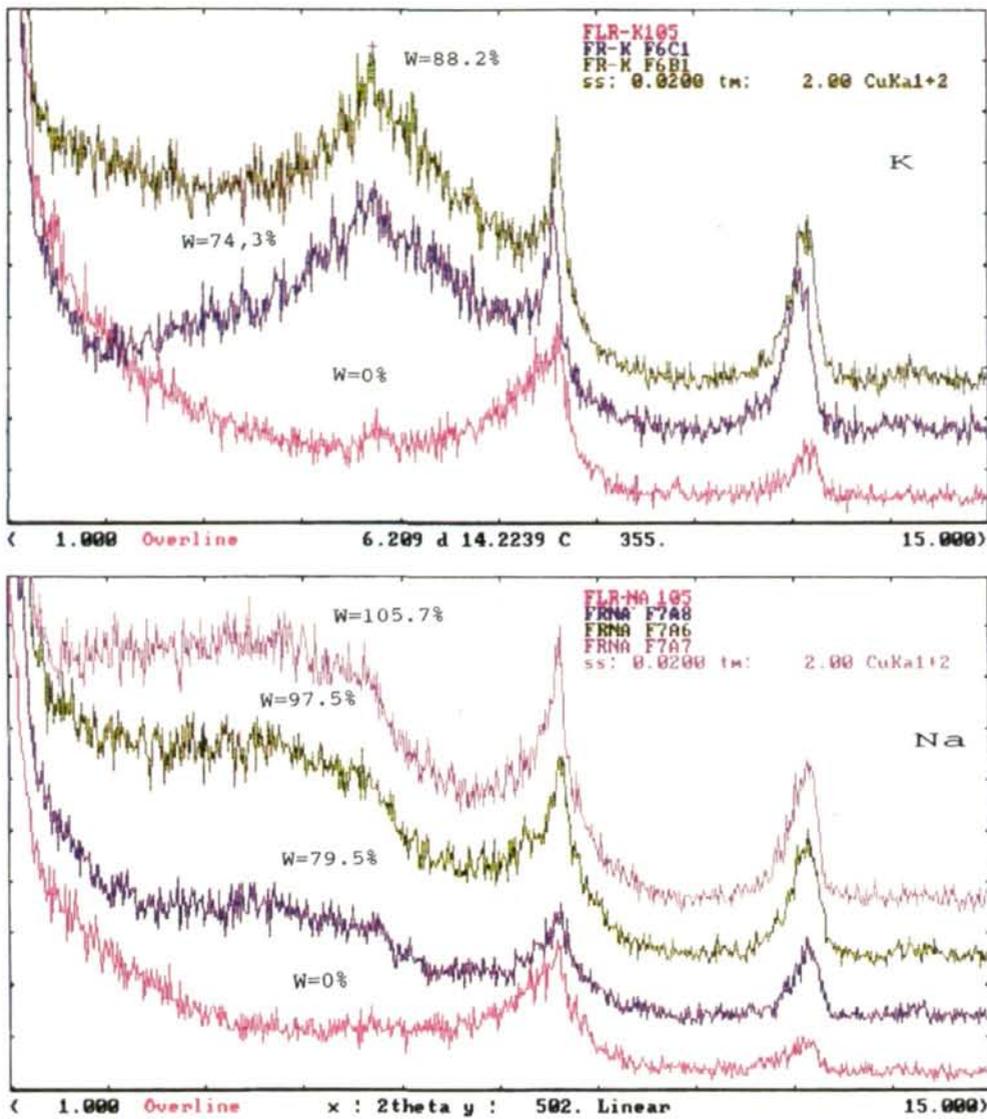


Abb. 9a: Veränderung der Basisabstände der Mixed-Layer-Minerale mit K⁺ - bzw. Na⁺ -Belegung bei unterschiedlichen Wassergehalten.

tionswasser in den Zwischenschichträumen befindet.

Um die strukturellen Veränderungen der quellfähigen Tonminerale während der Hydratation zu beobachten, wurden Tonpasten zunächst mit einem bei der Fließgrenze liegenden Wassergehalt (88,2–105,7%) geröntgt (Abb. 9). Der d(001)-Reflex der zweiwertigen Formen der Mixed-Layer-Minerale liegt bei ca. 19 Å. Der d(001)-Reflex der K-Form erreicht nur 14 Å. Der Basisabstand der Na-Form hingegen überschreitet 20 Å. Die Basisabstände der Mixed-Layer-Minerale entsprechen folgender Reihe: K < Ca < Mg < Na und folgen somit den Ergebnis-

sen der Wasseradsorption und des Wasseraufnahmevermögens. Bei höheren Wassergehalten können sich die Tonminerale vollständig hydratisieren. Die verschiedenen Kationen im Zwischenraum bauen zwei bis vier oder mehr Wasserschichten auf. Die zweiwertigen Kationen umgeben sich mit bis zu vier Wasserschichten und bleiben in Mittelposition zwischen den Schichten. Durch die elektrostatischen Anziehungskräfte der zweiwertigen Kationen wird eine Aufweitung des Zwischenschichtraums über 10 Å verhindert. Die entsprechenden Basisabstände gehen nicht über 19,2–19,3 Å hinaus. Das Na-Ion wandert aus der symmetrischen

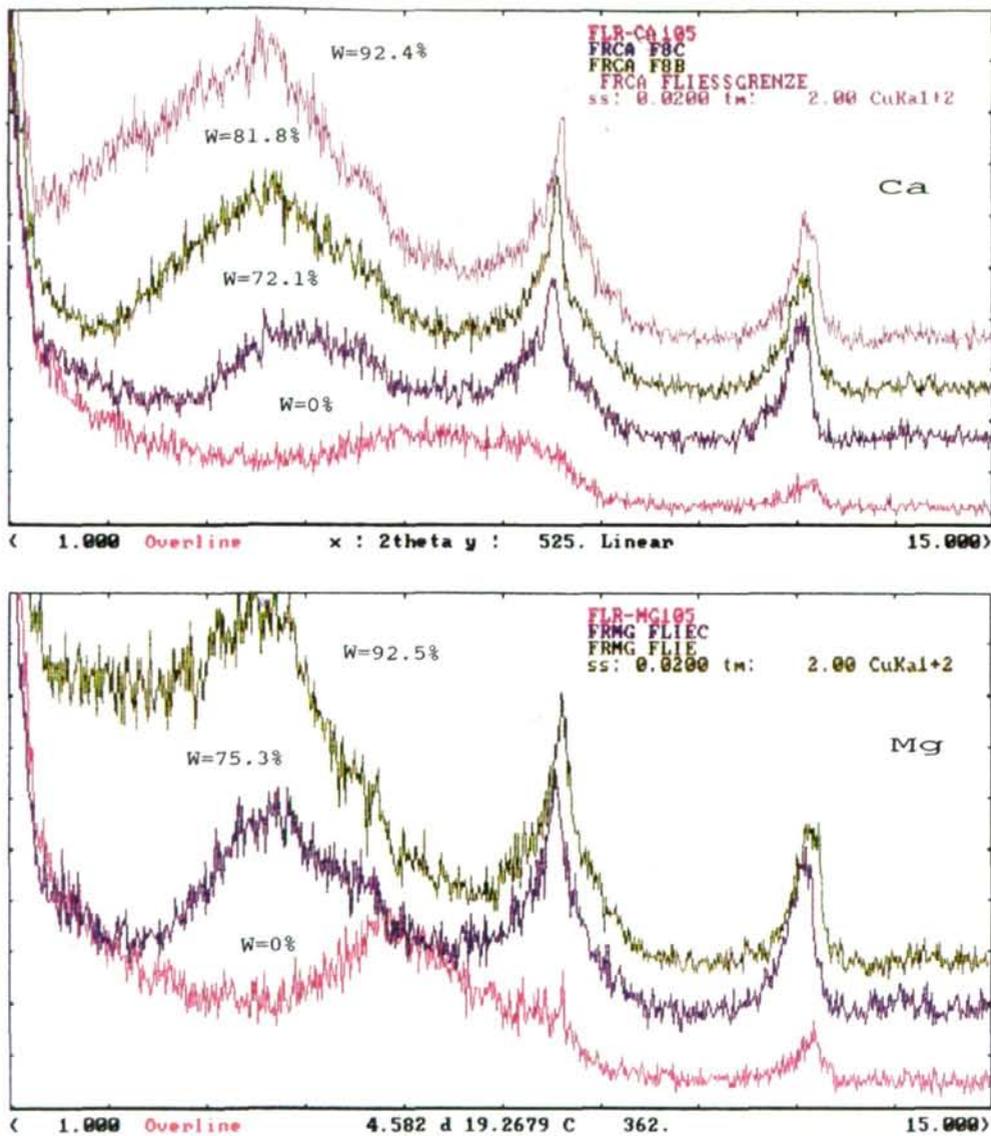


Abb. 9b: Veränderung der Basisabstände der Mixed-Layer-Mineralen mit Ca^{2+} - bzw. Mg^{2+} - Belegung bei unterschiedlichen Wassergehalten.

Mittelposition innerhalb der Zwischenschichten zu den Oberflächen einer der beiden negativ geladenen Tetraederschichten und lagert sich dort an. Dadurch entsteht eine elektrische Doppelschicht mit entsprechenden Abstoßungskräften zwischen den Elementarschichten. Wasser kann dadurch weiter in den Zwischenschichtraum bis zur vollständigen Hydratation eindringen. Der Basisreflex der Na-Form überschreitet 20 \AA . Die geringe Hydratationsenergie des K-Ions kann im Zusammenhang mit seinem für Schichtsilikate so vorteilhaften Ionenradius ($2,66 \text{ \AA}$) nur den Aufbau von zwei vollständigen Wasser-

schichten in den Zwischenschichten bewirken und damit zu einer Aufweitung bis etwa 14 \AA führen. Diese Ergebnisse können das unterschiedliche Hydratations- und Dehydratationsverhalten quellfähiger Tonminerale dokumentieren.

Zur genaueren Bestimmung der strukturellen Veränderungen der Tonminerale während der Dehydratation wurden Texturpräparate durch Aufpipettieren auf Glaträger hergestellt. Danach wurden diese Texturpräparate in 4 Stufen (20°C , 50°C , 80°C und 105°C) getrocknet und bei 300°C und 550°C gebrannt. In einem letzten

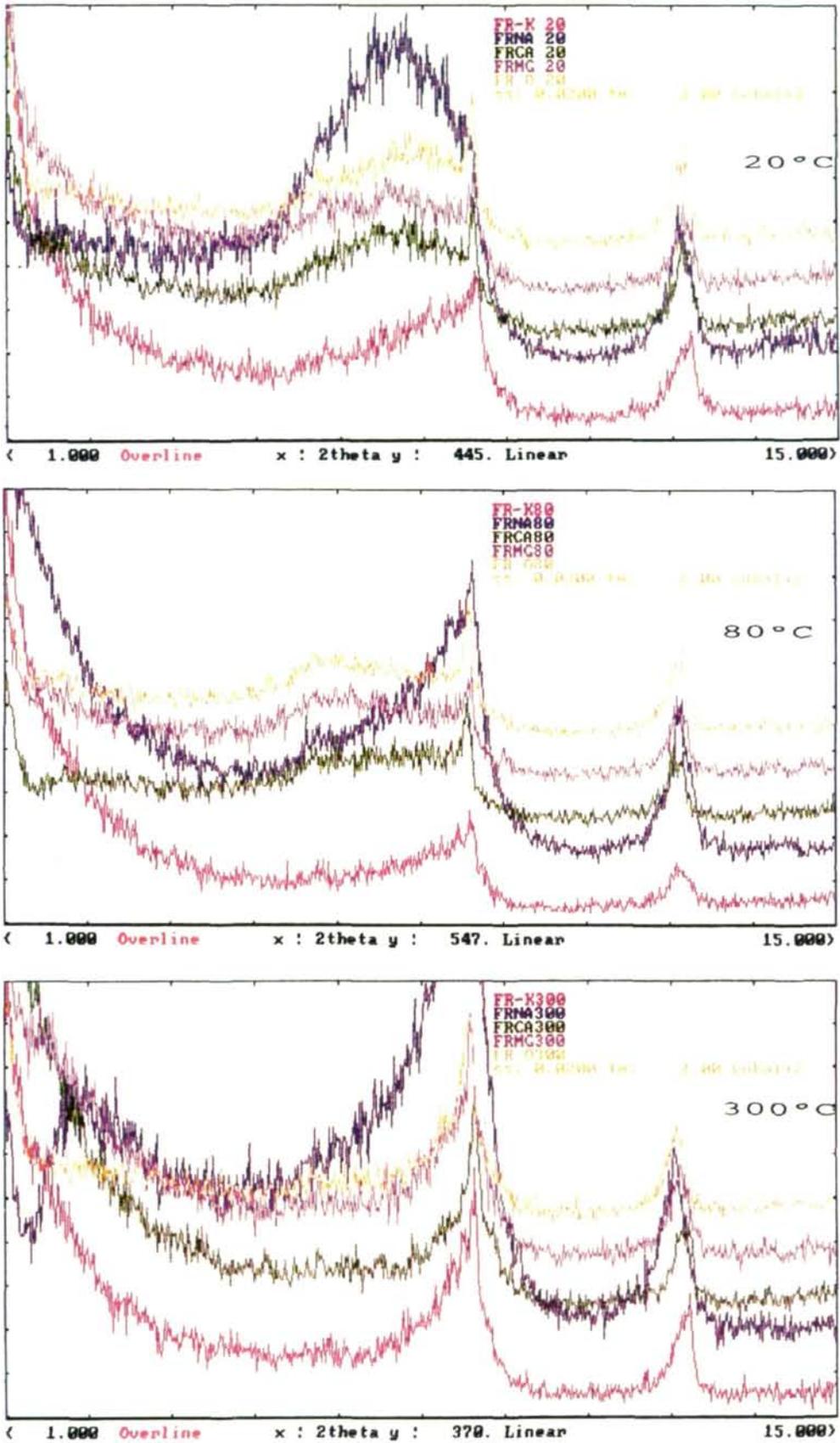


Abb. 10: Die strukturellen Veränderungen der quellfähigen Tonminerale während der Entwässerungsvorgänge.

Schritt wurden die Proben mit dem Röntgendiffraktometer im Winkelbereich von 1°–15° (2 θ) gemessen. Die röntgenographischen Untersuchungen zeigen, daß das im Zwischenschicht-raum befindliche Wasser der Probe in K-Form bereits bei Lufttrocknung mit 20°C entfernt wird. Das Wasser der Probe in Na-Form wird erst nach der Trocknung mit 80°C abgegeben. Die vollständige Dehydratation der Proben in der Ca- und Mg-Form ist erst bei einer Temperatur von 300°C möglich (Abb. 10).

Da die einwertig belegten Tonproben nur geringe Hydratationsenergien und schwache Bindungskräfte besitzen, kann gebundenes Wasser an der äußeren und inneren Oberflächen leicht abgegeben werden. Die zweiwertigen Formen können durch die elektrostatischen Anziehungskräfte der zweiwertigen Kationen gebundenes Wasser an den inneren Oberflächen festhalten, sodaß die vollständige Entwässerung nur bei den höheren Temperaturen möglich ist. Dies erklärt auch, weshalb die Gewichtsabnahme der quellfähigen Tonminerale in der zweiwertigen Form bei 300°C noch größer ist als die der einwertigen Form (Abb. 6 und Abb. 8). Diese Beobachtung konnte bei der Entwässerung von nicht quellfähigen Tonmineralen nicht gemacht werden.

5. Schlußfolgerung

Die Ergebnisse der zahlreichen Versuche haben gezeigt, daß die Hydratation und Dehydratation der nicht quellfähigen Tonminerale vom Ionenradius und der Wertigkeit der Kationen an der äußeren Oberfläche abhängt. Außer diesen Faktoren hat der primäre Hydratationszustand (besonders der Kationen im Zwischengitterraum) einen entscheidenden Einfluß auf die Hydratation und Dehydratation der quellfähigen Tonminerale. Die strukturellen Veränderungen der Tonminerale spielen dabei eine wichtige Rolle.

Der Einfluß der Kationenbelegung auf die Hydratation und Dehydratation von Tonen spiegelt sich in den Veränderungen der Plastizität

und bodenmechanischen Eigenschaften sowie im rheologischen Verhalten der Tone wider (CZURDA, K. & XIANG, W., 1993) und ist somit von großer Bedeutung in Theorie und Praxis der Geotechnik.

Literatur

- BUSCH, K.-F. & LUCKNER, L. (1974): Geohydraulik. – 422 S., Stuttgart (Enke).
- CZURDA, K. & XIANG, W. (1993): Der Einfluß der Kationenbelegung auf das Kriechverhalten von Tonen am Beispiel einer ostalpinen Großhangbewegung. – Tagungsband 9. Nat. Tagung für Ingenieurgeologie, Garmisch-Partenkirchen, (DGEG), Essen.
- DEMMEBERG, W. (1991): Über die Ermittlung des Wasseraufnahmevermögens feinkörniger Böden mit dem Gerät nach ENSLIN/NEFF. – Geotechnik **14**, 31–138.
- GRIM, R.E. (1962): Applied Clay Mineralogy. – McGraw-Hill Book Co., New York.
- HARRIS, W.G., HOLLIER, K.A., BATES, S.R., & ACREE, W.A. (1992): Dehydration of hydroxy-interlayered vermiculite as a function of time and temperature. – Clay and Clay Minerals, **40**, 3, 335–340.
- HASENPATT, R. (1988): Bodenmechanische Veränderungen reiner Tone durch Adsorption chemischer Verbindungen (Bach- und Diffusionsversuche). – Mitt. des Inst. Grundbau u. Bodenmechanik ETH Zürich, **134**, 146 S.
- HEIM, D. (1990): Tone und Tonminerale. – Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 157 S.
- JASMUND, K. & LAGALY, G. (1993): Tonminerale und Tone. – Steinkopff Verlag Darmstadt, 490 S.
- JENNY, H. (1936): J. Phys. Chim. **40**, 501.
- KAWANO, M. & TOMITA, K. (1991): X-ray powder diffraction studies on the rehydration properties of beidellite. – Clay and Clay Minerals, **39**, 1, 77–83.
- LAGALY, G. (1988): Grundzüge des rheologischen Verhaltens wässriger Tonmineraldispersionen. – Mitt. des Inst. Grundbau u. Bodenmechanik ETH Zürich, **133**, 7–22.
- MACEWAN, D. M.C. & WILSON, M. J. (1984): Interlayer and intercalation complexes of clay minerals. – In: Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification (Eds. Brindley & Brown), 197–248. Mineral. Society, London.

- MARTIN, H. & LAUDELLOT, H. (1963): Thermodynamique de l'échange des cations dans les argiles. – J. Chimie Physique, 1086.
- NEFF, K.H. (1988): Der Wasseraufnahme-Versuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte. – Bautechnik, **65**, 153–163.
- OSIPOV, V.I. & SERGEEV, E.M. (1972): Crystallochemistry of clay minerals and their properties. – IAEG Bulletin, **5**.
- ROHN, J. (1991): Geotechnische Untersuchungen an einer Großhangbewegung bei Bad Gaisern/Oberösterreich. – Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, **14**, 193 S.
- SCHABABERLE, R. (1989): Stofftransport und Gefügeänderungen beim partiellen Gefrieren von Ton-Barrieren. – Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, **7**, 214 S.
- SCHACHTSCHABEL, P. (1940): Untersuchungen über die Sorption der Tonmineralien – Kolloidbeih., **51**, 199.
- SCHAEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1982): Lehrbuch der Bodenkunde. – 11. Aufl., Stuttgart, Verlag Enke, 442 S.
- SUQUET, H., DE LA CALLE, C. & PEZERAT, H. (1975): Swelling and structural organization of saponite. – Clays Clay Miner., **23**, 1–9.

Anschrift der Verfasser:

Univ.-Prof. Dr. Wei Xiang und Univ.-Prof. DDr. Kurt Czurda, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität (TH) Karlsruhe, Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe, BRD

Manuskript eingegangen: 27. Oktober 1994