

# Geochemische Charakterisierung der Verwitterungsintensität der Löss-Paläoboden-Sequenz von Wels/Aschet

by

Jürgen M. Reitner<sup>1)</sup> & Franz Ottner<sup>2)</sup>

REITNER, J.M. & OTTNER, F., 2011. Geochemische Charakterisierung der Verwitterungsintensität der Löss – Paläoboden-Sequenz von Wels/Aschet. — Mitt. Komm. Quartärforsch. Österr. Akad. Wiss., 19:37–45, Wien.

## Zusammenfassung

Zur weiteren Charakterisierung der Verwitterung innerhalb des Löss-Paläoboden-Profiles von Aschet bei Wels (Oberösterreich) wurden geochemische Analysen durchgeführt. Die in der Geländebeschreibung als Boden definierten Horizonte sind anhand des „chemical index of alteration“ (CIA) klar als diejenigen Abschnitte mit der intensivsten Verwitterung ersichtlich. In Summe erbringt die geochemische Einstufung der Verwitterung ähnliche Resultate wie jene mittels der Mineralogie und Granulometrie (TERHORST et. al., dieser Band).

## Summary

Geochemical analyses were used in order to characterise the weathering degree within the loess-palaeosol-sequence of Aschet near Wels (Upper Austria). Soil horizons can be clearly identified by the “chemical index of alteration” (CIA), as well as by the ratios of  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Rb}/\text{Sr}$ . The characterisation of weathering using these geochemical data shows similar results as a companion study based on mineralogical and grain size data (TERHORST et al., this volume).

## 1. Einleitung

Geochemische Analysen von Löss-Sequenzen sind ein wichtiges Mittel um neben der Provenienz des Sediments (z.B. BUGGLE et al., 2008) den Grad der chemischen Verwitterung und damit paläoklimatische Bedingungen (z.B. SMYKATZ-KLOSS, 2003) zu charakterisieren. Die chemische Verwitterung in den zentraleuropäischen Lössgebieten ist maßgeblich durch Lösung von Karbonat, Hydrolyse von Silikaten und Umwandlung in Tonminerale wie auch Oxidation gekennzeichnet. Ohne Wechselwirkung von Oberflächen- oder Porenwasser – mit Ausnahme der Oxidation – finden diese Prozesse nicht statt und damit erfolgt keine chemische Umsetzung. Sind in einem unverfestigten Sedimentprofil, das sonst chemisch und petrographisch homogen ist, Zonen mit chemischer Umsetzung erfassbar, so sind dies Zonen höherer Wasseraktivität (SMYKATZ-KLOSS et al., 2004). Unter der Voraussetzung, dass diagenetische Mineralbildungen weitgehend ausgeschlossen werden können, sind die Zonen höherer Wasseraktivität Indikatoren für humide(re) Phasen nach der Sedimentation des Lösses (SMYKATZ-KLOSS et al., 2004).

Darauf aufbauend wurde in dem maßgeblich durch Paläoboden-Horizonte geprägten Profil Aschet (s. TERHORST et al., dieser Band) der Versuch unternommen, die Elementverteilung im Profil hinsichtlich der Unterschiede in der Verwitterungsintensität darzulegen. Andererseits zielte die Untersuchung darauf ab, die geochemischen Daten und daraus abgeleitete Verwitterungsindizes mit den mineralogischen Daten (TERHORST et al., dieser Band) und den daraus abgeleiteten Verwitterungsindizes basierend auf der Gesamtmineralogie, Tonmineralogie und Korngrößenverteilung zu vergleichen, um so die im Gelände getroffene Einstufung von Bodenhorizonten zu verfeinern.

## 2. Methodik der chemischen Analyse und der Datenanalyse

Die von B. Terhorst genommenen Proben der einzelnen Horizonte (s. Abb. 1 in TERHORST et al., dieser Band),

---

<sup>1)</sup> Mag. Dr. Jürgen M. REITNER, Geologische Bundesanstalt Neulinggasse 38, A-1030 Wien, e-mail: juergen.reitner@geologie.ac.at

<sup>2)</sup> Prof. Mag. Dr. Franz OTTNER, Institut für Angewandte Geologie, Department für Bautechnik und Naturverfahren, Universität für Bodenkultur Wien, Peter Jordan Straße 70, 1190 Wien, e-mail: franz.ottner@boku.ac.at

welche ident sind mit jenen der mineralogischen Untersuchungen (ebenda), wurden geochemisch analysiert. Die Bestimmung der Elementkonzentrationen der mittels Scheibenschwingmühle analysenfein aufbereiteten Proben erfolgte mit folgenden Analysemethoden an der Geologischen Bundesanstalt (Fachabteilung Geochemie):

Die Bestimmung der Elemente Al, As, Ba, Ca, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Rb, Si, Sr, V, Y, Zn und Zr wurde mittels einer Röntgenfluoreszenzanlage X-LAB 2000 der Fa. SPECTRO durchgeführt. Für Gesamtkohlenstoff und Gesamtschwefel kam ein C/S-Analysator Leco CS-200 zum Einsatz.  $H_2O^{110^\circ C}$  bei  $110^\circ C$  und Glühverlust bei  $1100^\circ C$  wurden gravimetrisch bestimmt. Die Berechnung

Horizont	1	2-2	2-1	2	2a	3	4e	4d	4c	4b	4a
Gewichts-%											
SiO <sub>2</sub>	23,0	55,0	60,0	51,0	63,5	74,0	60,0	59,0	63,0	62,5	62,0
TiO <sub>2</sub>	0,27	0,62	0,80	0,58	0,79	0,83	1,00	1,06	0,90	0,88	0,86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,5	20,0	18,0	21,0	17,5	12,0	18,0	18,0	17,0	16,0	17,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9	7,6	6,4	7,9	5,7	4,0	6,6	7,0	5,5	6,3	5,5
MnO	0,03	0,14	0,13	0,12	0,14	0,18	0,12	0,09	0,12	0,13	0,11
MgO	9,50	1,80	2,00	2,00	1,40	0,90	2,60	2,80	2,00	2,10	2,30
CaO	25,0	1,00	0,90	0,95	0,70	0,55	0,90	1,00	0,60	0,70	0,75
Na <sub>2</sub> O	1,23	1,45	1,90	1,33	1,50	1,80	2,00	2,30	1,80	2,30	1,90
K <sub>2</sub> O	0,68	1,50	1,95	1,17	1,22	1,10	2,70	2,70	2,60	2,60	2,60
H <sub>2</sub> O 110° C	1,03	4,50	3,10	4,25	2,90	1,70	2,00	1,90	2,30	2,40	2,60
H <sub>2</sub> O+	1,00	5,40	4,10	5,00	3,80	2,40	3,70	3,70	3,60	3,60	3,60
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,26	0,23	0,29	0,23	0,14	0,26	0,27	0,17	0,18	0,15
CO <sub>2</sub>	31,60	0,80	0,55	4,30	0,50	0,35	0,30	0,30	0,20	0,20	0,20
SO <sub>3</sub>	0,06	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Summe	99,83	100,09	100,09	99,91	99,90	99,96	100,18	100,14	99,81	99,92	100,10

ppm	1	2-2	2-1	2	2a	3	4e	4d	4c	4b	4a
Ba	124	347	359	252	253	230	506	511	398	404	407
Co	5	8	9	7	9	8	10	9	9	8	9
Cr	88	161	170	191	135	179	131	175	157	144	170
Cs	1	4	5	4	7	7	4	5	6	4	6
Cu	23	50	40	48	38	28	41	42	33	41	35
Ni	21	76	60	70	54	40	53	54	51	58	52
Pb	8	24	25	23	22	24	23	22	24	26	26
Rb	37	107	103	91	78	62	116	114	115	118	114
Sr	169	60	69	42	50	53	114	119	72	73	73
Th	7	15	16	13	15	14	18	18	18	17	20
U	5	6	7	5	7	7	9	9	9	8	8
V	32	155	129	155	117	72	130	138	108	111	105
W	5	6	6	6	5	8	6	7	6	6	6
Y	16	38	37	23	28	31	47	51	46	50	44
Zn	37	114	101	100	78	57	92	94	87	89	85
Zr	71	146	305	108	292	364	367	376	448	406	439

Tabelle 1: Gehalte der Haupt-, Neben und Spurenelemente.

des  $H_2O+$  Wertes (ein Maß für das Kristallwasser) erfolgte aus den vorhandenen Parametern (Tabelle 1). Das angewandte  $Al_2O_3$ -( $CaO^* + Na_2O$ )- $K_2O$  Diagramm nach NESBITT & YOUNG (1984), auch A-CN-K Diagramm genannt, zeigt Verwitterung und Sortierungseffekte von Alumosilikaten und wurde erfolgreich zur Charakterisierung von Sedimenten und Verwitterungsprofilen (z.B.

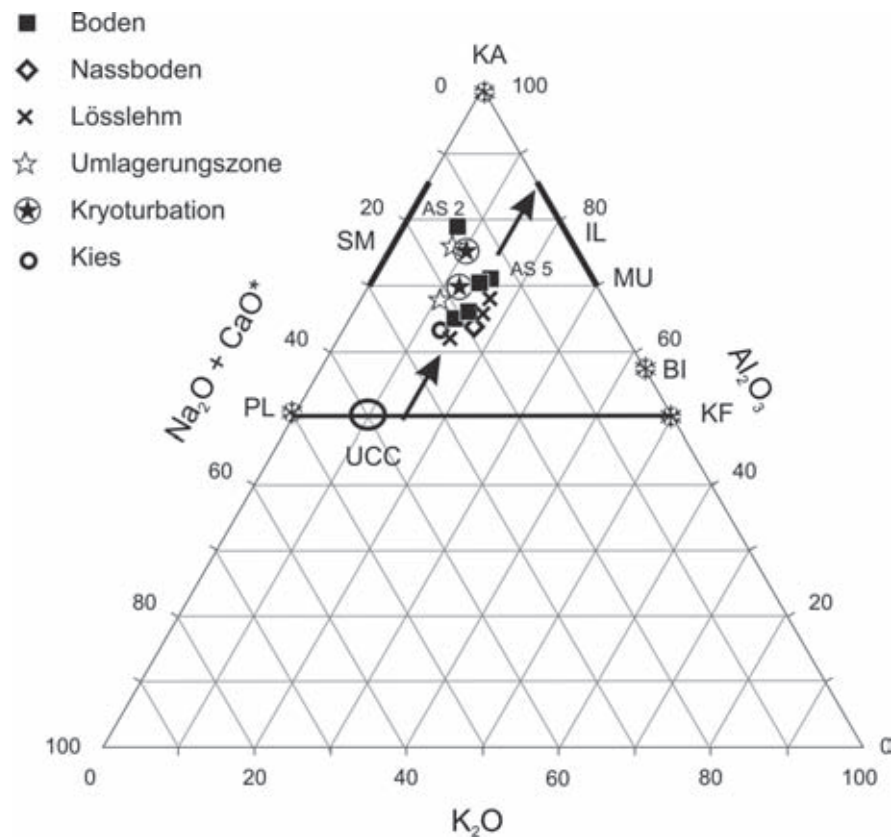
NESBITT & YOUNG, 1989) eingesetzt. Für die Berechnung der folgenden Indizes bzw. Quotienten (z.B.  $Na_2O/Al_2O_3$  etc.) wurden die proportionalen Molverhältnisse (Gewichtsprozent der Oxide – aus Tabelle 1 – dividiert durch das Molekulargewicht der Oxide) verwendet. Der „chemical index of alteration“ (CIA) nach NESBITT & YOUNG (1984) ist ein in der Paläopedologie häufig

Horizont	5	6	7c	7b	7a	8	8a	9	10	13	16
Gewichts-%											
SiO <sub>2</sub>	60,0	65,0	59,0	60,0	62,0	68,0	64,0	68,0	61,5	68,5	62,5
TiO <sub>2</sub>	0,83	0,94	0,97	0,98	1,01	1,06	0,98	1,07	0,90	0,94	0,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,5	16,5	18,0	18,0	17,5	15,0	16,0	15,0	17,0	14,0	16,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,1	5,2	6,5	6,5	6,2	4,6	6,6	4,4	6,1	4,8	5,6
MnO	0,12	0,16	0,10	0,08	0,12	0,08	0,17	0,08	0,11	0,13	0,07
MgO	2,30	1,60	2,40	2,10	1,70	1,60	1,50	1,60	2,30	1,60	2,50
CaO	0,70	0,60	0,90	0,80	0,70	0,78	0,70	0,75	0,90	0,70	1,30
Na <sub>2</sub> O	1,50	1,90	1,90	1,60	1,90	2,20	2,00	2,40	2,10	2,60	2,40
K <sub>2</sub> O	2,40	2,10	2,20	2,10	2,00	1,90	1,90	1,90	2,40	1,90	2,20
H <sub>2</sub> O 110° C	3,00	2,20	3,00	3,00	2,40	1,60	2,10	1,60	2,50	1,60	2,20
H <sub>2</sub> O+	4,10	3,30	4,30	4,50	3,80	2,80	3,50	2,80	3,60	2,50	2,70
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	0,16	0,16	0,15	0,13	0,12	0,15	0,13	0,16	0,12	0,19
CO <sub>2</sub>	0,35	0,35	0,35	0,35	0,45	0,35	0,50	0,35	0,50	0,65	1,30
SO <sub>3</sub>	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05
Summe	100,10	100,04	99,81	100,19	99,93	100,11	100,12	100,10	100,09	100,07	99,91

ppm	5	6	7c	7b	7a	8	8a	9	10	13	16
Ba	387	378	426	404	374	362	375	363	411	363	407
Co	9	7	7	7	9	7	8	6	7	6	7
Cr	151	136	135	124	130	129	133	138	130	141	143
Cs	5	4	7	4	4	5	5	6	4	2	5
Cu	40	32	41	37	32	23	31	23	38	29	30
Ni	50	43	52	44	41	33	40	34	54	35	42
Pb	25	25	25	24	26	21	27	21	24	24	22
Rb	117	104	116	116	108	98	101	98	118	91	108
Sr	63	66	87	78	76	94	84	95	90	85	105
Th	18	18	18	18	18	19	18	18	18	18	18
U	7	8	8	7	8	8	8	8	8	8	8
V	110	100	134	128	119	103	121	96	119	84	113
W	6	6	5	6	5	6	6	6	6	5	6
Y	35	44	36	33	37	41	40	42	45	37	40
Zn	92	71	87	81	70	63	68	62	88	61	76
Zr	379	464	357	342	401	497	436	509	365	497	396

Tabelle 1: Gehalte der Haupt-, Neben und Spurenelemente (Fortsetzung).

**Abbildung 1:** A-CN-K Plot nach NESBITT & YOUNG (1984). Die in Klassen (Boden, Lösslehm, etc.) unterteilten Proben sind mit unterschiedlichen Symbolen dargestellt. Zur Orientierung sind auch folgende charakteristische Werte nach BUGGLE et al. (2008, cum lit.) abgebildet: BI – Biotit, IL – Illit, KA – Kaolinit, KF – Kalifeldspat PL – Plagioklas, MU – Muskovit, SM – Smektit und UCC – durchschnittliche Zusammensetzung der oberen kontinentalen Kruste. Die Pfeile zeigen die Richtung der Plagioklas – Verwitterung die immer parallel zur  $\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^*$  – Linie verläuft. Die Werte der meisten Proben bestehend aus Lösslehm und Boden zeigen einen Trend, der die zunehmende Plagioklasverwitterung widerspiegelt. Abweichungen davon wie der Boden AS 2 und Proben aus der basalen Umlagerungs- bzw. Verwitterungszone deuten auf ein zusätzliches Ausgangsmaterial als nur den Lösslehm für die Verwitterungsbildung hin.



verwendeter Index, welcher das Ausmaß der Umwandlung von Feldspat in Tonminerale anzeigt.

$$\text{CIA} = 100 \times \frac{[\text{Al}_2\text{O}_3]}{[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}]}$$

Das  $\text{CaO}^*$  in der Gleichung bezieht sich nur auf das Kalziumoxid in den Silikaten, d.h. in zwei Proben (Horizont 1 und 16) wurde das an Karbonate gebundene  $\text{CaO}$  herausgerechnet. Frisches Material hat Werte um  $\leq 50$ , wogegen Werte um 100 stark verwittertes Material (z.B. Kaolinit) anzeigen.

Der R-Wert nach RUXTON (1968) ist ein simpler Verwitterungsindex der aus dem Quotient von  $\text{SiO}_2$  und dem in der chemischen Verwitterung immobilen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  besteht.

Das Verhältnis  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  gilt ebenfalls als ein guter Indikator um Verwitterungsprozesse in einem Lössprofil zu dokumentieren (s. SMYKATZ-KLOSS, 2003).

Bei den Spurenelementen erwies sich das Verhältnis von Rb, welches geochemisch mit K assoziiert ist, zu Sr, welches ein gleichartiges Verhalten und ähnliche Mobilität in der chemischen Verwitterung wie Ca aufweist, am aussagekräftigsten hinsichtlich der Charakterisierung der unterschiedlichen Verwitterungsintensitäten.

### 3. Resultate

Die Analysenergebnisse sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Verteilung der wichtigsten Oxide ist einerseits als A-CN-

K Ternär-Plot (Abb. 1) nach NESBITT & YOUNG (1984) bzw. auch horizontbezogen (vom Hangend ins Liegende) dargestellt (Abb. 2).

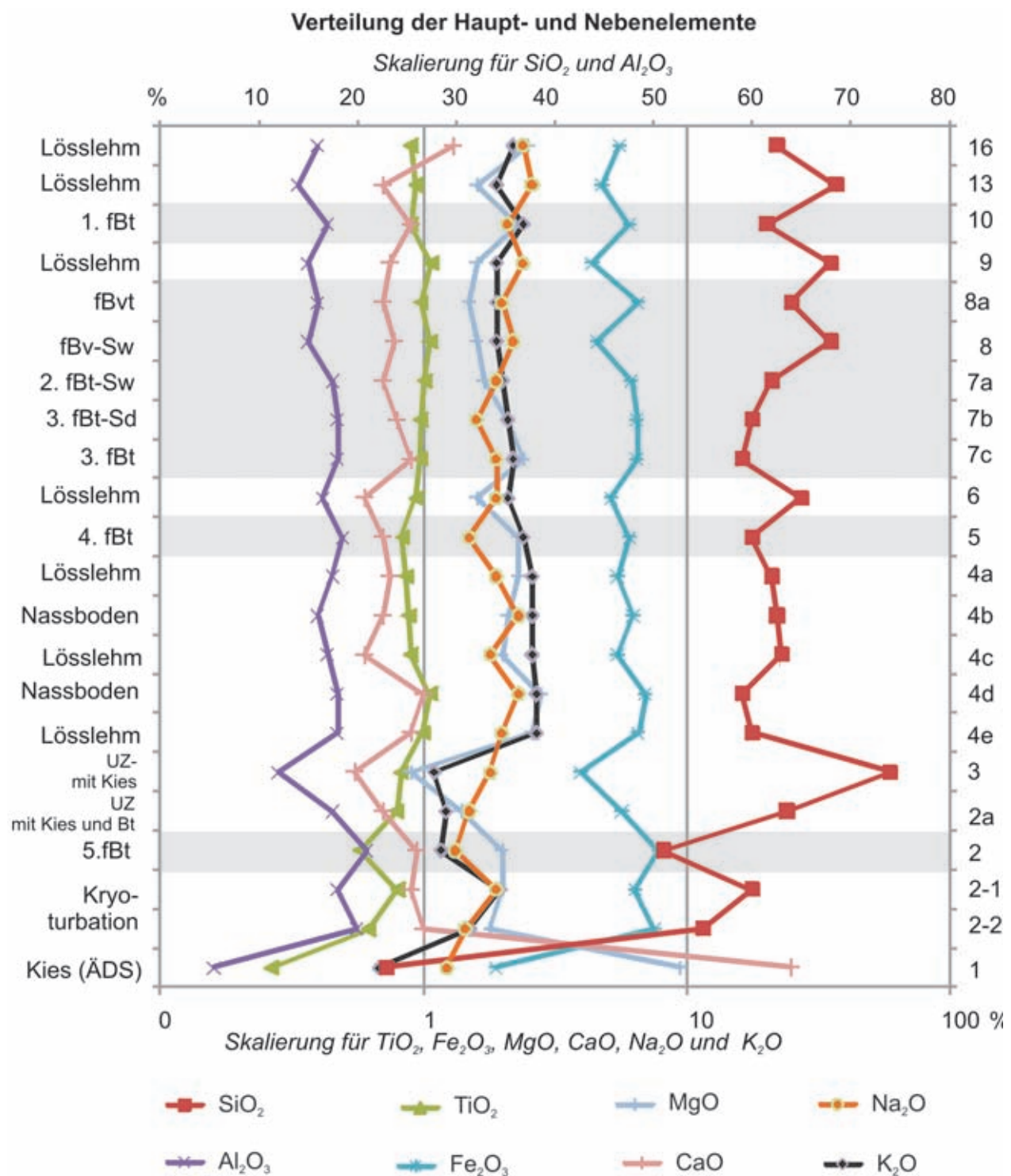
### 4. Interpretation

Die Interpretation der geochemischen Daten erfolgt anhand der Horizonte aus der paläopedologischen Geländeaufnahme (s. Abb. 1 in TERHORST et al., dieser Band). Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass das äolische Ausgangsmaterial im Großen und Ganzen vor der Verwitterung geochemisch-mineralogisch gleichartig war. Dafür spricht die geologische Situation des Ablagerungsgebietes, das unmittelbar an die Auswehungsgebiete, d.h. den fluviatilen Ablagerungen der Traun angrenzt (vgl. VAN HUSEN & REITNER, dieser Band). Von dieser Annahme sind nur die untersten Horizonte (Horizonte AS 2-2, AS 2-1, AS 2, AS 2a, AS 3) ausgenommen, deren Ausgangsmaterial für die Verwitterung zumindest zu einem großen Teil aus den kiesigen Sedimenten der Älteren Deckenschotter (Horizont AS 1) bestanden hat (s. TERHORST et al., dieser Band).

Im Folgenden erfolgt die Interpretation im Konnex mit den vorhandenen granulometrischen mineralogischen und paläomagnetischen Daten (TERHORST et al., SCHOLGER & TERHORST, dieser Band).

Abgesehen von dem liegendsten Anteil, den Kiesen der Älteren Deckenschotter (Horizont AS 1) und sehr

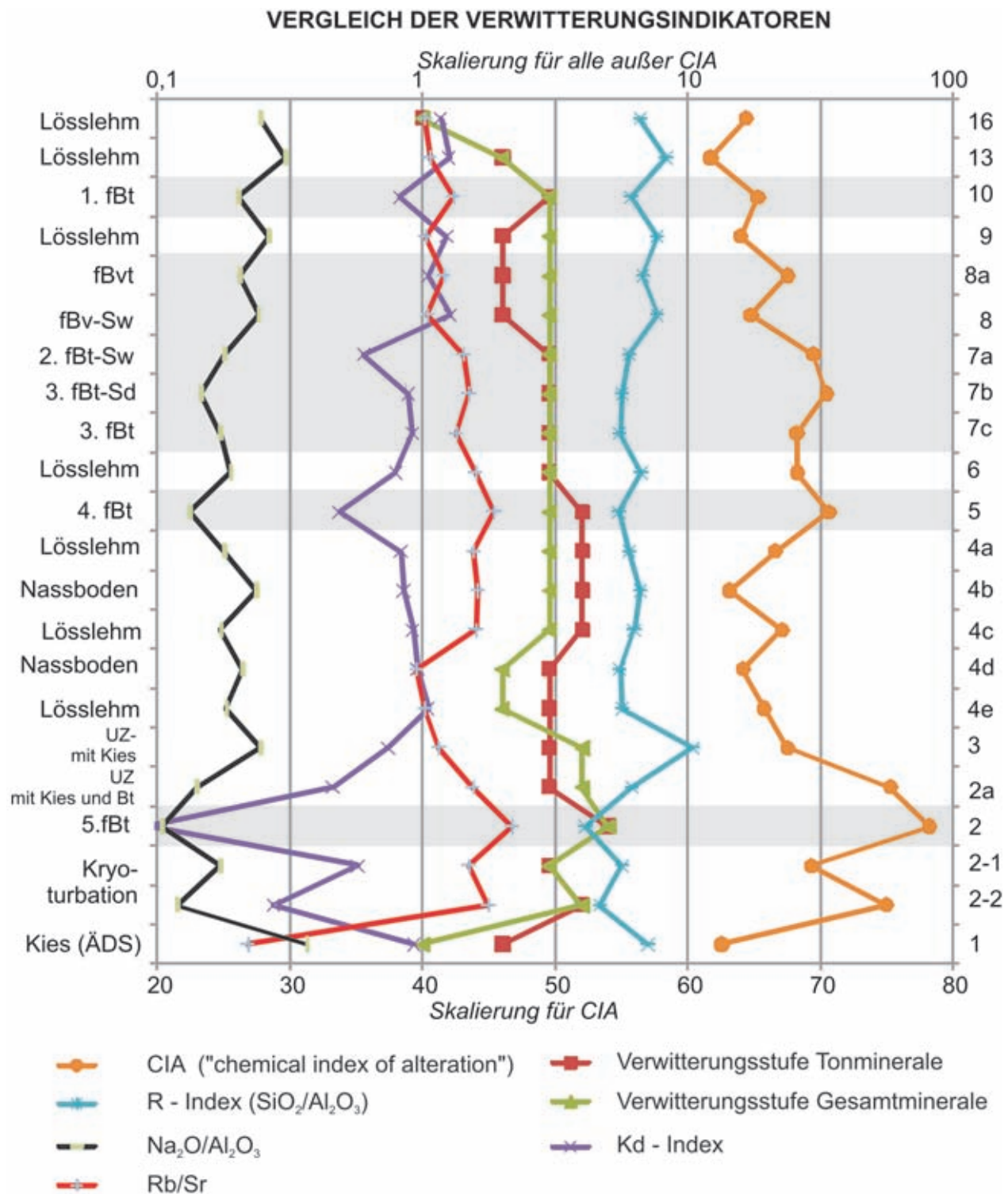




**Abbildung 2:** Änderung der Gehalte an Haupt- und Nebenelementen in Abhängigkeit von den Lösslehm- bzw. Bodenhorizonten.

geringen Gehalten von Dolomit in Horizont AS 16 (Lösslehm) ist das Profil karbonatfrei. Die überwiegend minimalen  $\text{CO}_2$ -Gehalte ( $< 1\%$ , s. Tab. 1) resultieren im Vergleich mit der Mineralogie aus der im Sediment vorhanden organischen Substanz. Die karbonatfreie Probe aus Horizont AS 2 aus dem fünften fossilen Bt-Horizont einer Parabraunerde (5. fBt), weist einen überraschend hohen  $\text{CO}_2$ -Wert von 4,2 % auf, der ebenfalls nur aus

der Zerlegung der Organik im Paläoboden stammen kann. Das häufigste Oxid ist  $\text{SiO}_2$ , das dominant im Quarz und in Feldspäten aber auch in weniger verwitterungsresistenten Silikaten vorkommt, weist im Profil (Abb. 2) eine Abnahme der Gehalte immer dort auf, wo Paläoboden-Horizonte auftreten (Horizont AS 10 = 1.fBt, AS 8a = fossiler Bvt, AS 7c = 3.fBt, AS 5 = 4.fBt und AS 2 = 5.fBt).



**Abbildung 3:** Verlauf der geochemischen, mineralogischen und granulometrischen Verwitterungsindikatoren in Abhängigkeit von den Lösslehm- bzw. Bodenhorizonten.

Demgegenüber zeigt das in der chemischen Verwitterung immobile  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , welches überwiegend in den Feldspäten und Schichtsilikaten (inkl. Tonmineralen) vertreten ist, einen gegenläufigen Trend mit relativen Maxima (gegenüber dem jeweils Liegenden) genau in den Paläoböden. Eisen ( $\text{Fe}$ , hier als  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  angegeben) tritt einerseits in Mineralen von klastischen Sedimenten (Biotit, Amphi-

bohlen, Pyroxen, Magnetit und dgl.), andererseits aber auch in typischen Mineralphasen der Bodenbildung wie Hämatit (teilweise auch detritär vorhanden), Lepidokrokit und Goethit auf. Im Profil (Abb. 2) zeigt Eisen einen ähnlichen Trend wie Aluminium. Allerdings treten die Paläoböden nicht so deutlich in Erscheinung wie bei den Suszeptibilitätsmessungen (s. Abb. 2 in SCHOLGER &

TERHORST, dieser Band). Dieser Unterschied lässt sich dahingehend interpretieren, dass der wahrscheinliche Hauptträger der Eisenoxide, Goethit, in den Suszeptibilitätsmessungen im Vergleich zu insbesondere Magnetit und Hämatit aufgrund seiner Eigenschaften unterrepräsentiert ist. Das überwiegt in unverwitterten klastischen Sedimenten in Albit-reichen Plagioklasen aber auch in manchen Amphibolen wie Hornblenden vorkommende Natrium gilt in der chemischen Verwitterung als das mobilste Metall. Dementsprechend zeichnen die relativen Minima (s. Abb. 3) sehr schön die Bodenhorizonte (Horizont AS 10 = 1.fBt, AS 8a = fossiler Bvt, AS 7b = 3.fBt-Sd, AS 5 = 4.fBt und AS 2 = 5.fBt) nach.

Demgegenüber zeigt das in der Verwitterung nur mäßig mobile Kalium, welches im mäßig verwitterungsbeständigen Muskovit aber auch im chemisch relativ resistenten Kalifeldspat in bedeutenden Anteilen vorhanden ist, weniger markante Variationen. Von den Bodenbildungen tritt hier nur der Horizont AS 10 (1. fBt) mit einem relativen Maximum hervor. Demgegenüber ist ein klares Minimum im 5. fBt (Horizont 2) und den darüber liegenden Umlagerungszonen (Horizont AS 2a und AS 3) zu erkennen. Dieses lässt sich hier gut mit dem Fehlen von Glimmer (Muskovit) erklären, welcher im darüber liegenden Lösslehm-Paläoboden-Paket durchgehend vertreten ist. Zudem korreliert das K-Defizit im 5. fBt-Boden sehr gut mit der stärksten Verwitterungsstufe der Tonmineralogie (TERHORST et al., dieser Band), in der Illit weitgehend umgewandelt ist.

Magnesium ist abgesehen von Dolomit, der nur im höchsten und tiefsten analysierten Horizont vorhanden ist, nur in Amphibolen und als Zwischenschicht-Kation der Tonminerale (insbesondere Vermikulit) im Profil vertreten. Die Verteilung von Mg zeigt keine Korrelation mit den Paläoböden.

Die höchsten Kalzium Werte sind einerseits im Kies der ÄDS (AS 1) und im obersten analysierten schwach Dolomit-führenden Lösslehm (AS 13) zu finden. Im restlichen karbonatfreien Profil dürften Ca-führende Silikate wie Plagioklas und Amphibol sowie auch die Zwischenschichtkationen von Tonminerale die Träger dieses Elementes sein. Die Schwankungen der Gehalte lassen keinen eindeutigen Trend erkennen. Eine bessere Charakterisierung der Verwitterungsintensität lässt sich über die Relation mobiler Elemente wie z.B. Ca, Na, K gegenüber verwitterungsimmobilen Elementen wie z. B. Al gewinnen.

Das A-CN-K-Diagramm zeigt einerseits, dass der überwiegende Teil der Proben auf einer Verwitterungslinie (der Plagioklasverwitterung, vgl. NESBITT & YOUNG, 1984, 1989) liegt, womit die ursprüngliche Annahme bestätigt ist, dass für den Großteil des Profils von einem im großen und ganzen gleichartigen Ausgangsmaterial auszugehen ist. Abweichungen davon sind bei den Horizonten ersichtlich, deren Ausgangsmaterial zu einem großen Teil aus dem Kies des Älteren Deckenschotter bestand wie z.B. beim AS 2 (5. fBt) und auch bei den im unteren Profilabschnitt vorhandenen Umlagerungs- und Kryoturbationshorizonten. Auch in dieser Darstellung

ist der AS 2 (5. fBt) als der am intensivsten verwitterte Bodenhorizont ersichtlich.

Die im Methodik-Kapitel vorgestellten geochemischen Quotienten und Indizes wurden den aus der Gesamt- bzw. Tonmineralogie ermittelten Indizes, die mit den Klassen von 1 bis 5 die zunehmende Verwitterungsintensität charakterisieren, gegenübergestellt (s. Tab. 2). Zum Vergleich wurde auch der Kd-Wert (Quotient von Grob- und Mittelschluff zu Feinschluff und Tongehalt) nach PECSI & RICHTER (1996) herangezogen (s. TERHORST et al., dieser Band). Der Verwitterungsindex Kd weist bei stärker verwitterten Horizonten geringere Werte auf.

**CIA-Index:** Dieser weist alle Paläoböden als relative Maxima (im Vergleich zum jeweils Liegenden und damit zum Ausgangsmaterial) aus (Abb.3). Der CIA-Wert und damit die Verwitterungsintensität nimmt vom 1. fBt (AS 10) zum Horizont AS 8a (fossiler Bvt) zu. Eine weitere Intensivierung der Verwitterung mit deutlich höheren CIA-Werte ist zwischen Horizonten AS 7a (2. fBt-Sd) bis hinab zum 4. fBt-Sd5 (AS 5) ersichtlich, wobei der 3. fBt-Sd (AS 7b) und der 4. fBt (AS 10) als Maxima deutlich hervortreten. Weiters ist zu betonen, dass die Verwitterungsmaxima des CIA-Index in ihrer Position und relativen Stärke mit jenen des Kd-Index (in niedrigeren Werten abgebildet) eine große Ähnlichkeit aufweisen.

**R-Wert:** Hier treten insbesondere der 1. fossile Bt sowie der 4. fBt und der 5. fBt prominent mit jeweils einem relativen Minimum hervor (Abb. 3). Der Bodenkomplex mit 2. fBt und 3. fBt ist aufgrund dieses Index nicht in sich gliederbar.

**Betrachtet man das  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  Verhältnis,** so zeichnen sich hier die Bodenhorizonte mit niedrigeren Werten ab. Nimmt man diese Quotienten als Hinweise auf die Verwitterungsintensität, so nimmt diese von 1.fBt (10) und Horizont AS 8 zu 3. fBt (AS 7c) und zu 4.fBt (AS 5) zu. Den niedrigsten Wert und damit die stärkste Verwitterung wird hier im 5. fBt (AS 2) angezeigt.

**Das Rb/Sr-Verhältnis** bildet die Bodenhorizonte mit relativen Maxima ab (Abb. 3). Das heißt, in diesen Horizonten wurde das in der chemischen Verwitterung mobilere Sr gegenüber dem Rb verringert. Diese relativen Maxima sind im Folgenden nach der Höhe des Wertes und damit der Intensität der Verwitterung aufgereiht: Fossiler Bvt (AS 8a), der 1. fBt (AS 10), der Bodenkomplex 7c-7a (3. fBt bis 2. fBt) mit einem Maximum im 3. fBt-Sd, der 4. fBt (AS 5) und der 5. fBt. Die Verteilung der Rb/Sr-Kurve mit den Horizonten zeigt damit eine frappierende Ähnlichkeit mit jener der Tonmineralogie-Verwitterungsklassen.

Betrachtet man den Bodenkomplex vom fBvt (AS 8a) bis zum 3. fBt (AS 7c) so treten beim CIA-Index, Na/Al- und Rb/Sr-Verhältnis immer 2 relative Maxima mit erhöhter Verwitterungsintensität hervor. Dies sind der 3. fBt (AS 7b), der sich vom darüberliegenden 2. fBt zwar nicht stark aber immer klar erkennbar abhebt, und der fBv (AS 8a). Folgt man diesem Verlauf, so könnten hier aus einer Kombination von Geochemie und Geländeansprache das Resultat von drei anstatt von zwei Verwitterungsphasen



Horizonte	R-Index	CIA-Index	Na <sub>2</sub> O/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rb/ Sr	Kd- Index	Verw.-Int. Gesamtmin.	Verw.-Int. Tonmin.
AS 1	7,1	62,6	0,37	0,22	0,93	1	2
AS 2-2	4,7	75,0	0,12	1,77	0,28	4	4
AS 2-1	5,7	69,3	0,17	1,50	0,57	3	3
AS 2	4,1	78,2	0,10	2,18	0,09	5	5
AS 2a	6,2	75,3	0,14	1,55	0,46	4	3
AS 3	10,5	67,5	0,25	1,16	0,74	4	3
AS 4e	5,7	65,8	0,18	1,02	1,05	2	3
AS 4d	5,6	64,2	0,21	0,95	0,96	2	3
AS 4c	6,3	67,1	0,17	1,59	0,92	3	4
AS 4b	6,6	63,2	0,24	1,61	0,85	3	4
AS 4a	6,0	66,6	0,18	1,56	0,83	3	4
AS 5	5,5	70,6	0,13	1,86	0,49	3	4
AS 6	6,7	68,3	0,19	1,58	0,80	3	3
AS 7c	5,6	68,2	0,17	1,34	0,92	3	3
AS 7b	5,7	70,5	0,15	1,50	0,88	3	3
AS 7a	6,0	69,5	0,18	1,43	0,60	3	3
AS 8	7,7	64,8	0,24	1,05	1,28	3	2
AS 8a	6,8	67,5	0,21	1,20	1,05	3	2
AS 9	7,7	64,0	0,26	1,03	1,24	3	2
AS 10	6,1	65,3	0,20	1,31	0,82	3	3
AS 13	8,3	61,7	0,31	1,07	1,26	2	2
AS 16	6,6	64,4	0,25	1,02	1,17	1	1

**Tabelle 2:** Werte für den R-Index (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), den CIA-Index, Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- und Rb/Sr-Quotient. Die Werte für Kd-Index sowie Verwitterungsintensität Gesamtmineralogie als auch Verwitterungsintensität Tonmineralogie stammen aus TERHORST et al. (dieser Band).

(vgl. TERHORST et al.) vorliegen. Auf eine erste, sehr intensive Verwitterungsphase (3. fBt), folgte eine unwesentlich schwächere (2. fBt), die wieder frisches Material aufgearbeitet hat. Die schwächste Verwitterungsintensität entwickelte sich letztlich am Top des Bodenkomplexes fBt (AS 8a).

Der Lösslehm-Abschnitt (AS 4a, 4c, 4e) unterhalb des intensiv verwitterten 4. fBt-Paläobodens (AS 5) zeigt zwar beim CIA-Wert Schwankungen, bestätigt aber generell den schon in den Kd-Werten und mineralogischen Indizes ersichtlichen Trend zu einer geringeren Verwitterung gegen die Tiefe hin. Dies ist auch in der Tiefenverteilung des Rb/Sr-Verhältnis ersichtlich, wo der unterste Lösslehm-Horizont AS 4e die geringste Verwitterung in diesem Lösslehm-Abschnitt aufweist. Interessanterweise zeigen die dazwischengeschalteten Naßbodenhorizonte (AS 4b und 4d) beim CIA wie auch beim Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Verhältnis eine geringere Verwitterung als die Lösslehme an.

## 5. Schlussfolgerungen

Die geochemischen Analysen bestätigen eindeutig die in der bodenkundlichen Ansprache als Paläoboden klassifizierten Horizonte als jene mit der größten Verwitterungsintensität. Diese Paläoböden zeigen bei den Haupt- und Nebenelementen gegenüber dem Horizont im Liegenden und damit dem Ausgangsmaterial höhere Werte an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und geringere Werte an Si und Na. Diese Trends entsprechen in Grundzügen der chemischen Mobilität/Immobilität der jeweiligen Elemente in der chemischen Verwitterung.

Betrachtet man den chemical index of alteration (CIA), den R-Wert (Verhältnis (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), das Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Verhältnis und das Rb/Sr-Verhältnis, so treten dabei vom Hangenden gegen das Liegende der 1. fBt (Horizont AS 10), der fBvt (AS 8a), der 3. Bt-Sd (AS 7b) der 4. fBt (AS 5) und der 5. fBt (Horizont 2) deutlich hervor. Die stärkste Verwitterung ist anhand von CIA sowie Rb/



Sr- und  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnis im untersten Paläoboden dem 5. fBt (Horizont 2), welcher sicherlich auch zu einem Großteil aus der Verwitterung der Deckenschotter herrührt, ersichtlich. Dieser Befund stimmt mit den aus der Mineralogie und Granulometrie gewonnenen Verwitterungsklassen bzw. -index (Verwitterungsstufen der Gesamtmineralogie bzw. der Tonmineralogie und Kd-Wert; Terhorst et al. dieser Band) gut überein.

Innerhalb der nur aus äolischen Sedimenten aufgebauten Abfolge weist der 4. fBt (AS 5) – basierend auf den zuvor erwähnten Parametern – die stärkste Verwitterung auf. Innerhalb des Pedokomplexes 3. fBt bis fBv weist der 3. fBt-Sd-Horizont (AS 7b) die stärkste Verwitterung mit  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnissen und CIA-Werten ähnlich denen des 4. fBt (AS 5) auf. Der 2. fBt ist nach den geochemischen Werten geringer ausgeprägt, aber stärker verwittert als der fBvt (AS 8a). Gemäß der CIA-Werte zeigt der 1. fBt (AS 10) die geringste Verwitterung an, wogegen die  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Werte denen des 1. fBv gleichen. Rb/Sr sowie der R-Wert weisen sogar auf eine merklich höhere Verwitterung als der fBvt (AS 8a) hin.

In Summe korrelieren die geochemischen Indizes sehr gut mit den aus den mineralogischen Analysen gewonnenen Verwitterungsindizes (TERHORST et al., dieser Band). Beide unterschiedlich gewonnenen Indizes sind grundsätzlich eine gute Kontrolle bzw. Bestätigung der paläopedologischen Geländeaufnahmen hinsichtlich der Pedogenese und der Verwitterungsintensität. Aufgrund der wesentlich größeren Vielfalt der berücksichtigten Parameter ist eine genauere Feinauflösung des Profils als Erweiterung des Geländebefundes zu erreichen. Eine fachgerechte Geländeansprache kann durch ein gezieltes mineralogisch/geochemisches Analysenprogramm verfeinert werden und so eine optimale paläoklimatische Rekonstruktion ermöglichen.

## 6. Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Dr. Peter Klein (im Ruhestand, ehemals Fachabteilung Geochemie, Geologische Bundesanstalt), der die Analysen in seiner Abteilung durchführen ließ. Sein Nachfolger Dr. Gerhard Hobiger stand für Rückfragen zur Analytik hilfreich zur Seite.

## 7. Literatur

BUGGLE, B., GLASER, B., ZÖLLER, L., HAMBACH, U., MARKOVIC, S., GLASER, I. & GERASIMENKO, N.,

2008. Geochemical characterization and origin of Southeastern and Eastern European loesses (Serbia, Romania, Ukraine). — *Quaternary Science Reviews*, 27:1058–1075.

HUSEN, D. van & REITNER, J.M., dieser Band. Klimagesteuerte Terrassen- und Lössbildung auf der Traun-Enns-Platte und ihre zeitliche Stellung. — *Mitt. Komm. Quartärforsch. Österr. Akad. Wiss.*, 19:1–11, Wien.

NESBITT, H.W. & YOUNG, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. — *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48:1523–1534.

NESBITT, H.W. & YOUNG, G.M., 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. — *Journal of Geology*, 97:129–147.

PÉCSI, M. & RICHTER, G., 1996. Löss Herkunft – Gliederung – Landschaften. — *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge, Supplementband 98*, Gebrüder Bornträger, 391 S., Berlin Stuttgart.

RUXTON, B.P., 1968. Measures of the degree of chemical weathering of rocks. — *Journal of Geology*, 76:518–527.

SMYKATZ-KLOSS, B., 2003. Die Lössvorkommen des Pleiser Hügellandes bei Bonn und von Neustadt/Wied sowie der Picardie: Mineralogisch-geochemische und geomorphologische Charakterisierung, Verwitterungs-Beeinflussung und Herkunft der Löss. URL: [http://hss.ulb.unibonn.de/diss\\_online/math\\_nat\\_fak/2003/smykatz-kloss\\_bettinaS](http://hss.ulb.unibonn.de/diss_online/math_nat_fak/2003/smykatz-kloss_bettinaS), URN: /urn:nbn:de:hbz:5n-03082S.

SMYKATZ-KLOSS, W., SMYKATZ-KLOSS, B., NAGUIB, N. & ZÖLLER, L., 2004. The reconstruction of palaeoclimatological changes from mineralogical and geochemical compositions of loess and alluvial loess profiles. — [in:] SMYKATZ-KLOSS, W., FELIX-HENNINGSSEN, P. (Eds.). *Palaeoecology of Quaternary Drylands*. — *Lecture Notes in Earth Sciences*, 102, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 101–118.

SCHOLGER R. & TERHORST, B., dieser Band. Paläomagnetische Untersuchungen der pleistozänen Löss-/Paläobodensequenz im Profil Wels-Aschet. — *Mitt. Komm. Quartärforsch. Österr. Akad. Wiss.*, 19:47–61, Wien.

TERHORST, B., OTTNER, F. & HOLAWA, F., dieser Band. Pedostratigraphische, sedimentologische, mineralogische und statistische Untersuchungen an den Deckschichten des Profils Wels/Aschet (Oberösterreich). — *Mitt. Komm. Quartärforsch. Österr. Akad. Wiss.*, 19:13–35, Wien.