Brandenburgische Geowiss. Beitr.	Kleinmachnow	7 (2000), 1/2	S. 137–150	4 Abb., 2 Bilder, 5 Tab., 17 Lit.

Geologisch-sedimentologische Untersuchungen am Bänderschluff von Hainichen (Sachsen) – erste Ergebnisse ihrer statistischen Auswertung

F. W. Junge, A. Kühl & A. Wolf

1. Einleitung

Aufgrund ihrer weiten Verbreitung stellen die Bändertone und Bänderschluffe wichtige Sachzeugen für die Paläoklimaforschung dar. Durch ihre Genese sind diese rhythmisch geschichteten stratigraphischen Sedimente sensible Fazies- und Klimaindikatoren. In den letzten Jahren wurden sie in den verschiedenen genetischen Positionen innerhalb des quartären Lokkergebirgsstockwerkes Mittel- und Norddeutschlands (Pilger et al. 1991, Schirrmeister 1997, 1998) und insbesonders Sachsens (Junge & Böttger 1994, 1996, Junge et al. 1999) verstärkt untersucht. Hiesige Untersuchungen konzentrierten sich auf elsterglaziale Bändertone, welche im Vorland von Erzgebirge und Vogtland in großflächigen Eisstauseen zum Absatz kamen. Im Ergebnis konnten wichtige Erkenntnisse zum Paläoklima und zur Glazialdynamik für den Zeitabschnitt der Maximalausdehnung des skandinavischen Inlandeises (Hochglazial) zur Elstereiszeit in Mitteleuropa gewonnen werden.

Feinlithologische Aufnahmen, sedimentologische und geochemische Untersuchungen an Einzellagen sowie daraus abgeleitete lokale und regionale Lagenkonnektierungen des ältesten - innerhalb der Leipziger Tieflandsbucht vorkommenden - Elster-(I)-glazialen Bändertons des Dehlitz-Leipziger Vorstosses lieferten u.a. Ergebnisse (Junge 1998) zur:

- saisonalen Natur der rhythmischen Schichtung (Warven),
- räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Eisstauseen sowie
- Abschätzung von Vorstoßgeschwindigkeiten des Inlandeises in seinem Randbereich.

Derartig detaillierte Erkenntnisse fehlten bisher aus dem proglazialen Bereich der maximalen südlichen Verbreitungsgrenze des elsterglazialen Inlandeises in Sachsen.

Mit der Erweiterung vergleichbarer Untersuchungen an weiter südlich im Bereich des nördlichen Erzgebirgsrandes gelegenen Vorkommen von elsterglazialen Vorstoß-Bänderschluffen soll diese Lücke geschlossen werden. Darüber hinaus erweisen sich vergleichende Detailuntersuchungen an Vorstoß-Bändertonen anderer stratigraphischer Position: z.B. Elster-(II)-glaziale Bändertone als notwendig. Mit dieser Arbeit (Wolf 2000) werden erste Ergebnisse geologisch-sedimentologischer Detailuntersuchungen am Bänderschluff von Hainichen, der ins jüngere Elsterglazial gestellt wird, vorgestellt.

2. Geologische Situation des Hainichener Bänderschluffs

Glazilimnische Beckenschluffe und -tone in der Umgebung von Hainichen (Topographische Karte 1 : 25 000, Blatt 5044 Frankenberg) sind seit langem bekannt und waren in den sechziger Jahren Gegenstand von Erkundungsarbeiten für den Vorratsnachweis grobkeramischer Tone (Hochberger & Weihrauch 1962).

Die karbonatführenden Bänderschluffe stellen auch heute noch eine wichtige Korrekturkomponente dar für die im Liegenden der Glazialsedimente weitverbreiteten rötlich-rotbraun gefärbten Rotliegendschluffe, den Hauptrohstoff der Ziegelherstellung. Sie dienen aufgrund ihrer hohen SiO_2-Gehalte als Magerungsmittel sowie durch den feindispers verteilten Karbonatgehalt zur Verminderung der Scherbendichte.

Die Bänderschluffe werden derzeit in einer kleinen Tongrube auf dem Gelände der Ziegelei Hainichen (Wienerberger Ziegelwerke GmbH Hannover) abgebaut. Diese befindet sich ca. 600 m östlich der Bundesstraße 169 Döbeln-Chemnitz und 750 m südlich der Ortslage Crumbach westlich des Falkenauer Baches (Hochwert 51°00′5649, Rechtswert 13°10′4578). Die Basis der als Bänderschluffe ausgebildeten Stauseesedimente schwankt im Niveau zwischen 320,5 m und < 318 m über NN. In der Erkundungsphase niedergebrachte Bohrungen erreichten im zentralen Bereich der Tongrube trotz einer Teufe von 20 m nicht die Bänderschluffbasis. Dies weist auf ein sehr unruhiges Relief in der Auflagefläche der Glazialsedimente hin.

Das Hangende der Bänderschluffe wird innerhalb des Aufschlusses von einem - unter einer geringmächtigen Lößlehmdecke lagernden - bis ca. 2 m mächtigen diamiktischen Sediment eingenommen. Es ist braungelb gefärbt, durchgängig stark oxidiert, geschiebearm und matrixbetont. Seine Auflagefläche liegt bei ca. 325 m über NN. Sein Schlämmrückstand enthält neben viel Lokalmaterial (u.a. Granulit, Tonschiefer, Quarzit) auch einige wenige Geschiebe (Feuerstein, Porphyr), die zweifelsfrei nordischer Herkunft sind. Nach diesen Befunden und aufgrund des makroskopisch-texturellen Aufbaus wird dieses Hangendsediment des Bänderschluffs als Moräne und nicht als Fließerde klassifiziert.

Bei der Profilaufnahme des an der südlichen Aufschlußwand maximal 1,50 m mächtigen Bänderschluffs trat im unmittelbaren Übergangsbereich zum Rotliegenden eine Anreicherungs-

Bild 1A
Gesamtprofilausschnitt: Die Länge des Zollstocks beträgt 2 m

Bild 1
Geologische Position und Detailausschnitt des Bänderschluffs in der Ziegeleigrube von Hainichen

zone von bis zu 10 cm großen Geröllen (Feuerstein, Milchquarz) auf. An der nördlichen bis nordöstlichen Aufschlußwand lagert das Stauseesediment ebenfalls auf rotbraunem

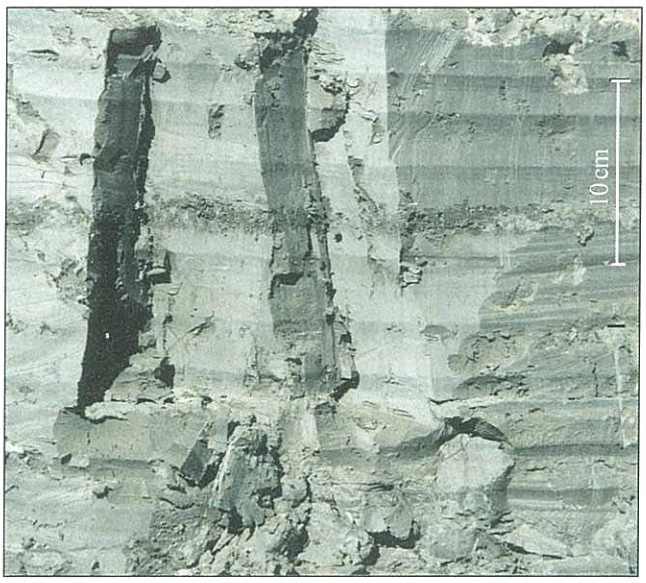


Bild 1B Detailaufnahme des Bänderschluffs

Schluff mit einer fein- bis mittelkiesigen Anreicherungszone aus Geröllen von Feuerstein (Geröllgrößen bis zu 12x7x4 cm) und Milchquarzen. Darunter folgt ein weißgrauer Schluff, der nach 10 cm allmählich in den Rotliegendkomplex übergeht. Dabei vollzieht sich eine allmähliche Kornvergröberung und ein Farbwechsel von hellgrau über hellbraun bis dunkelrotbraun.

Das Auftreten gröberklastischer, feuersteinführender Sedimente an der unmittelbaren Basis der Bänderschluffe legt den Schluß nahe, dass es sich hierbei um Ausschmelzrückstände der Moräne des ersten Elstereisvorstoßes handelt. Somit wäre der Bänderschluff von Hainichen als Stauseebildung im Zuge eines jüngeren elstereiszeitlichen Inlandeisvorstoßes fixiert: möglicherweise im Ergebnis einer Eisrandoszillation des ältesten Elster-I-glazialen Inlandeises oder Resultat des besonders im östlichen Sachsen weit nach Süden ausgedehnten zweiten elsterglazialen Inlandeisvorstoßes.

Für diese stratigraphische Zuordnung sprechen des Weiteren einige Eigenschaften im Aufbau und in der Zusammensetzung des Bänderschluffs von Hainichen:

- Nach seinem makroskopischen Erscheinungsbild erweist sich der Bänderschluff als feinwarviges Sediment in seinem liegenden Teil und als grobwarviges Sediment in seinem hangenden Teil (Bild 1). Mit einer deutlichen Mächtigkeitszunahme sowohl der Schlufflagen (Sommerlagen) als auch der Tonlagen (Winterlagen) vom Liegenden zum Hangenden zeigt er die typischen Eigenschaften eines Vorstoßbänderschluffs (Abb. 1).
- Im Vergleich zu Bändertonen anderer stratigraphischer Position und anderer Lokalitäten Mitteldeutschlands (Junge 1998) weisen die hohen mittleren Lagen- und Warvenmächtigkeiten des Hainichener Bänderschluffs (mittlere Warvenmächtigkeit 4,6 cm (n=246); min. 0,5 cm, max. 23,4 cm) eine größere Ähnlichkeit mit Daten jüngerer elsterglazialer Vorstoßbändertone auf. Wolf & Schubert (1992) stellten bei ihrer Analyse elsterglazialer Bändertone Sachsens eben-

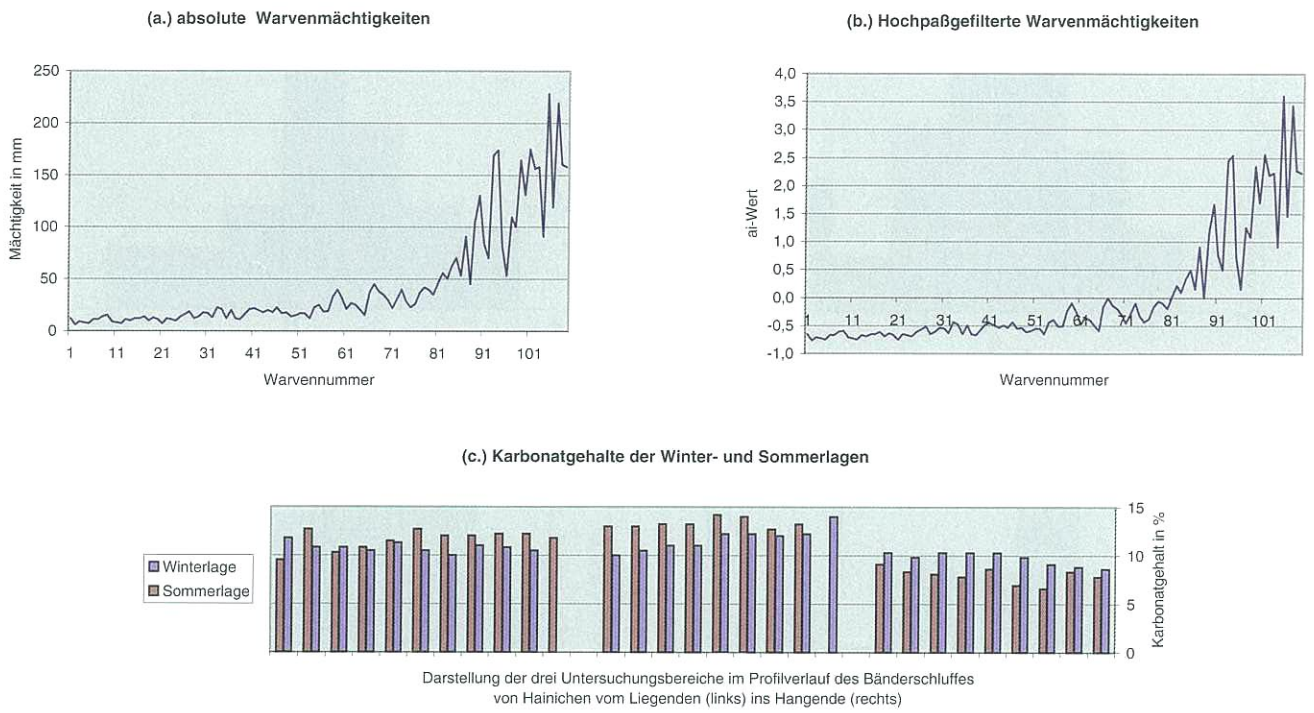


Abb. 1
Profilverlauf der (a.) absoluten und (b.) hochpaßgefilterten Warvenmächtigkeiten sowie (c.) der Karbonatgehalte in den Winter- und Sommerlagen des Bänderschluffs von Hainichen

falls bedeutend höhere Sedimentationsraten für die Stauseebildungen des zweiten Elstereisvorstoßes (Warvenstärke 10 bis 20 cm, zum Teil bis 50 cm) im Vergleich zu jenen des ersten Elstereisvorstoßes (Warvenstärke 2 bis 5 cm, selten bis 8 cm) fest.

- Die ermittelten erhöhten Karbonatgehalte der Lagen des Bänderschluffs von Hainichen gegenüber den Elster-(I)-glazialen aus der Leipziger Tieflandsbucht (JUNGE 1998) sprechen ebenfalls eher für eine jüngere elsterglaziale Stauseebildung. Das karbonatfreie Einzugsgebiet der das Erzgebirge entwässernden und zur Glazialseebildung führenden Flüsse (Zschopau, Chemnitz, Zwickauer Mulde) wäre bei der Bildung des Bänderschluffs von Hainichen im Zuge des ersten elsterglazialen Inlandeisvorstoßes durch wesentlich geringere Karbonatgehalte dokumentiert. Die trotz des weiterhin karbonatfreien fluviatilen Eintrags festgestellten erhöhten Karbonatgehalte der jüngeren elsterglazialen Stauseeablagerungen werden durch die Aufarbeitung von karbonatführenden Sedimenten des Elster-(I)-glazialen Stockwerkes erklärt.

3. Methoden

Die am Bänderschluff von Hainichen durchgeführten Untersuchungen beinhalten im Wesentlichen das schon zur Charakterisierung der Bändertone aus der Leipziger Tieflandsbucht angewendete Methodeninventar (JUNGE 1998):

- die Feldaufnahme des Bänderschluffs am Abbaustoß und
- die laborative Bestimmung der Lagenparameter: Korngröße, Glühverlust, Karbonatgehalt und sporadisch der stabilen Isotope des Karbonats.

Die Aufnahme des Bänderschluffs am Abbaustoß hatte zum Ziel

- die geologische Dokumentation seiner sedimentologischen Merkmale (u.a. Erfassung der Sedimentations- und Deformationsstrukturen sowie des Eisschollendriftmaterials),
- die Erfassung seines Hangend- und Liegendbereichs,
- die Ermittlung der Lagenmächtigkeiten (Schlufflagen bzw.Sommerlagen, Tonlagen bzw. Winterlagen) in durchgehenden Profilen.

Auf dieser Grundlage erfolgte die Entnahme von Proben aus durchgehenden Lagensequenzen für weitere Detailuntersuchungen (Korngröße, Glühverlust, Karbonatgehalt). Für Dünnschliffuntersuchungen (JUNGE & MAGNUS 1994) zur Dokumentation des mikroskopischen Aufbaus des Sediments wurde gesondert Probematerial entnommen.

Die Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung der Einzellagen wurde mittels Laser-Partikel-Sizer Analysette 22 der Fa. Fritsch durchgeführt. Die Methode erwies sich als bestens geeignet für die granulometrische Charakterisierung von Bänderschlufflagen und damit für den Vergleich zwischen den Lagen innerhalb eines Bänderschluffprofils. Es wurden die Gehalte an Ton (<2 µm), Feinschluff (2-6,3 µm), Mittelschluff (6,3-20 µm), Grobschluff (20-63 µm), Feinsand (63-200 µm), Mittelsand (200-630 µm) und Grobsand (630-2000 µmµm) ermittelt, von denen sich die fünf erstgenannten Fraktionen als wichtigste Typusmerkmale herausstellten.

Die Bestimmung des Glühverlustes erfolgte mittels Muffelofen mit geeichtem Temperaturregler. Dabei wurden neben dem Gesamtglühverlust (bis 1000 °C) die Gewichtsverluste in drei Aufheizstufen ermittelt:

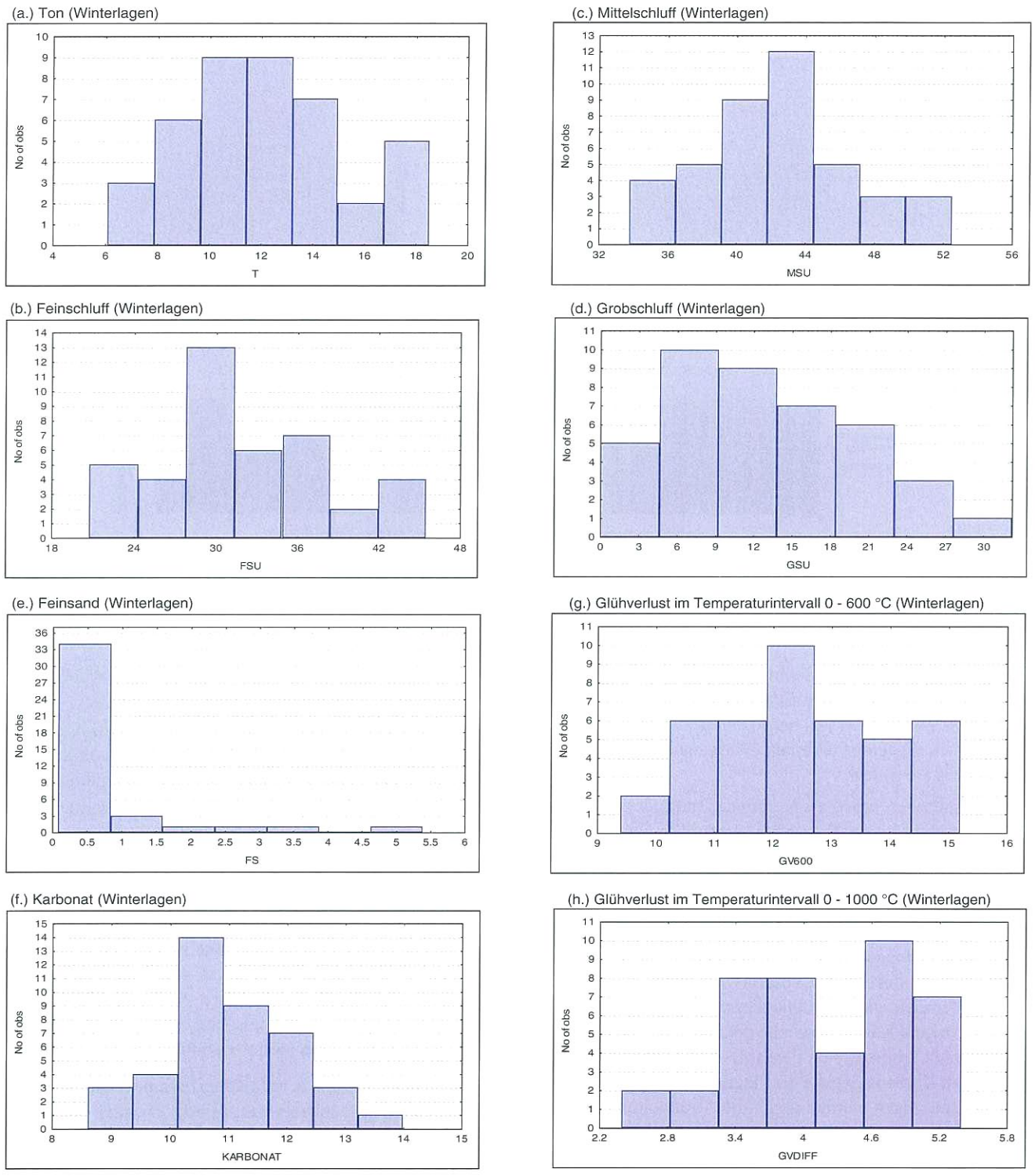


Abb. 2
Histogramme der untersuchten Merkmale (a.) Ton, (b.) Feinschluff, (c.) Mittelschluff, (d.) Grobschluff, (e.) Feinsand, (f.) Karbonat und der Glühverlust-Intervalle (g.) 0 - 600 °C und (h.) 600 - 1000 °C in den Winterlagen des Bänderschluffs von Hainichen

- 0 bis 300 °C;
- 300 bis 600 °C und
- 600 bis 1000 °C

Die Temperaturabweichungen an den Grenzen der gewählten Intervalle betrugen ca. 5 %. Durch die Eichung und gleichartige Anwendung auf alle untersuchten Proben war die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

Der Mineralbestand der Bänderschluffe setzt sich im wesentlichen aus Quarz, Plagioklas, Orthoklas, Illit, Montmorillonit-Illit-Wechsellagerungen, Kaolinit, wenig Chlorit und aus Karbonatmineralen (Calcit, selten Dolomit, Siderit) zusammen. Die Gehalte an organischem Kohlenstoff sind sehr gering (1-2 Masse- %; Junge 1998). Auf Grund dieses Mineralbestands sind die Bänderschluffe bei Tem-

Tab. 1 Univariatstatistik der untersuchten Merkmale der Winterlagen des Bänderschluffs von Hainichen

	T	*Fsu*	*Msu*	*Gsu*	*FS*	*Karbonat-gehalt*	*Gvdiff <600 °C*	*Gvdiff >600 °C*	*Mächtigkeit*
	%	%	%	%	%	%	%	%	mm
n	41	41	41	41	41	41	41	41	41
$\bar{x}$	12,23	31,99	42,64	12,56	0,57	10,95	12,43	4,14	6,22
$\tilde{x}$	12,09	31,07	42,29	10,98	0,10	10,80	12,40	4,15	6,00
min	6,10	20,77	33,78	0,01	0,08	8,60	9,40	2,40	3,00
max	18,52	45,47	52,50	32,23	5,39	14,00	15,20	5,30	11,00
R	12,42	24,70	18,72	32,22	5,31	5,40	5,80	2,90	8,00
S	3,114	6,326	4,407	7,477	1,063	1,092	1,55	0,74	2,297
V	0,255	0,198	0,103	0,595	1,875	0,100	0,125	0,180	0,369
Schiefe	0,286	0,151	0,278	0,461	3,128	0,297	-0,046	-0,379	0,719
Kurtosis	-0,355	-0,397	0,012	-0,189	10,894	0,613	-0,700	-0,465	-0,616
Modalität	bi	poly	uni	uni	uni	uni	uni	bi	bi

Tab. 2 Univariatstatistik der untersuchten Merkmale der Sommerlagen des Bänderschluffs von Hainichen

	T	*Fsu*	*Msu*	*Gsu*	*FS*	*Karbonat-gehalt*	*Gvdiff <600 °C*	*Gvdiff >600 °C*	*Mächtigkeit*
	%	%	%	%	%	%	%	%	mm
n	40	40	40	40	40	40	40	40	40
$\bar{x}$	5,74	21,89	49,51	19,39	2,86	10,18	7,71	3,49	97,90
$\tilde{x}$	4,30	15,32	47,53	16,25	0,39	9,90	7,45	3,15	82,50
min	2,23	8,06	33,11	0,07	0,08	6,60	4,70	1,70	8,00
max	11,32	44,50	66,83	45,95	14,00	14,20	11,40	5,60	253,00
R	9,09	36,44	33,72	45,88	13,92	7,60	6,70	3,90	245,00
S	2,836	12,623	8,553	15,963	3,999	2,544	2,084	0,979	74,200
V	0,494	0,577	0,173	0,823	1,397	0,250	0,270	0,281	0,758
Schiefe	0,818	0,826	0,207	0,261	1,318	0,025	0,491	0,273	0,488
Kurtosis	-0,930	-1,035	-0,567	-1,510	0,588	-1,666	-0,966	-0,751	-1,067
Modalität	bi	bi	bi	bi	bi	bi	tri	Bi	tri

Erläuterungen: T=Ton, Fsu=Feinschluff, Msu=Mittelschluff, Gsu=Grobschluff, FS=Feinsand, n=Stichprobenumfang, $\bar{x}$ =Mittelwert, $\tilde{x}$ =Median, min=kleinster Wert der Datenreihe, max=größter Wert der Datenreihe, R=Spannweite, s=Standardabweichung, v=Variationskoeffizient

peraturerhöhung über das gesamte Temperaturintervall bis 1000 °C durch einen im Wesentlichen durch Wasserabgabe verursachten mehr oder weniger kontinuierlichen Gewichtsverlust charakterisiert. Unabhängig von dieser kontinuierlichen Wasserabgabe werden die Gewichtsverluste innerhalb der drei gewählten Temperaturintervalle infolge unterschiedlicher Reaktionen bzw. Stufen der Mineralumbildung verursacht (Rösler & Starke 1970). Trotz eines gewissen „Verschmiereffektes" kann durch die drei Aufheizstufen folgendes erfaßt werden:

- Der Gewichtsverlust im gewählten Temperaturintervall 0 bis 300 °C wird hauptsächlich durch die stufenweise Abgabe des Kristallschichtwassers des Montmorillonits bzw. der Montmorillonit-Illit-Wechsellagerungen (in der Regel zwischen 100 und 200 °C) und des Illits (bei ca. 100 °C) verursacht. Darüber hinaus wird eine kontinuierliche Wasserabgabe des Illits im gewählten Temperaturintervall festgestellt.
- Der Gewichtsverlust im Temperaturintervall 300 bis 600 °C wird im Wesentlichen durch die Hauptabgabe der Hydroxylionen des Kaolinits (in der Regel zwischen 530 und 680 °C), des Illits (in der Regel zwischen 350 und 600 °C), des Montmorillonits (in der Regel zwischen 520 und 720 °C), des Chlorits (in der Regel zwischen 500 und 550 °C) sowie der Montmorillonit-Illit-Wechsellagerungen verursacht. Weiterhin erfolgt in diesem Intervall die Oxidation der organischen Substanz.
- Der Gewichtsverlust im Temperaturintervall oberhalb 600 °C wird neben dem „Verschmiereffekt" infolge der weiteren Abgabe von Hydroxylwasser (Kaolinit, Illit, Montmorillonit, Chlorit) hauptsächlich durch die thermische Zersetzung des Karbonats (ab ca. 750 °C) bestimmt.

Exemplarisch an Lagen des Dehlitz-Leipziger Vorstoß-Bändertons aus der Leipziger Tieflandsbucht durchgeführte Differentialthermoanalysen (Analysen des Mineralogischen Labors der TU Bergakademie Freiberg; Dr. R. Kleeberg) zeigen vier Intervalle verstärkten Gewichtsverlustes an, welche die aus dem Mineralbestand ableitbaren und oben angeführten Stufen der Mineralumbildung bestätigen: a) zwischen 100 bis 110 °C; b) zwischen 300 und 350 °C; c) zwischen 480 und 550 °C sowie d) zwischen 720 bis 770 °C.

Die Bestimmung des Karbonatgehalts erfolgte bei einer Reaktionstemperatur von 25 °C mit der Karbonatbombe nach Müller & Gastner (1971).

4. Statistische Untersuchungen am Bänderschluff von Hainichen

Die statistischen Untersuchungen beinhalten in der Reihenfolge ihrer wachsenden Komplexität die univariaten statistischen Maßzahlen, Histogramme sowie bivariate, partielle und multiple Korrelationen, Faktor- bzw. Clusteranalyse der einzelnen bzw. zwischen den einzelnen Merkmalen:

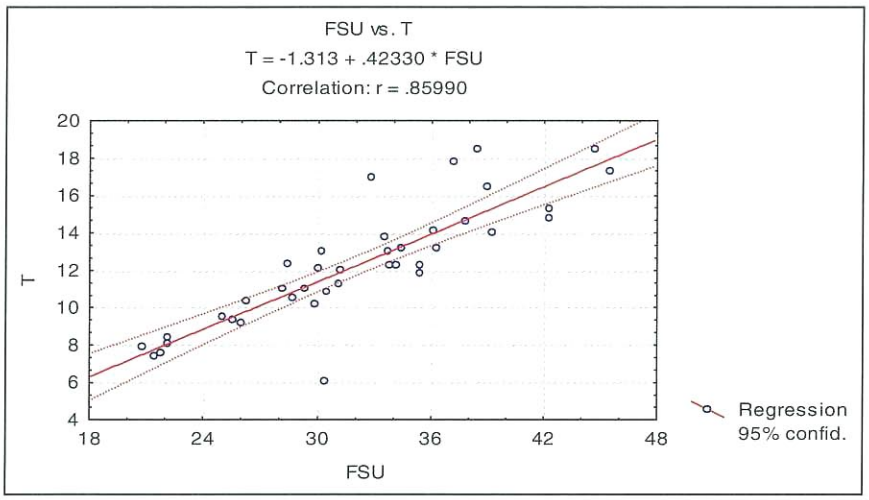
- Anteile der Kornfraktionen Ton, Feinschluff, Mittelschluff, Grobschluff, Feinsand (Angaben in Masse- %);
- Karbonatgehalte (Angaben in Masse- %);
- Glühverluste (Angaben in Masse- %), unterteilt in die Temperaturintervalle
  - Glühverlust im Bereich 0 – 600 °C und
  - Glühverlust im Bereich 600 – 1000 °C;
- Lagenmächtigkeiten (in mm).

4.1 Univariatstatistik der substanziellen Merkmale

Die immense Menge an Probenmaterial einerseits und die zeitaufwendige Methode der detaillierten Korngrößenanalyse andererseits erlaubten es nicht, alle Proben auf ihre Korngrößenanteile zu untersuchen. Es wurden deshalb nur ausgewählte Proben näher auf ihre Korngrößenzusammensetzung analysiert. Die so gewonnenen Werte für die Ton-, Schluff- und Feinsandanteile in den Proben wurden mit den dazugehörigen Karbonatgehalten und Glühverlusten der einzelnen Winter- und Sommerlagen tabellarisch zusammengefaßt, statistisch beschrieben, miteinander verglichen und genetisch interpretiert (Tab. 1 u. 2).
Im Folgenden werden ausschließlich die Winterlagen mit ihren Häufigkeitsverteilungen und statistischen Maßzahlen beschrieben.

4.1.1 Mengenanteile der Korngrößenfraktionen

Winterlagen des Bänderschluffs (Abb. 2):
Der Tongehalt (Abb. 2a) zeigt im Histogramm eine genäherte Normalverteilung um den Hauptpeak bei D_1 = 12 %. Der Nebenpeak D_2 = 19 % weist auf Bimodalität, schwach positive Schiefe und schwache Flachgipfligkeit der Verteilung hin. Bei einem Durchschnittsgehalt $\bar{x}$ = 12,2 % und einer Standardabweichung s = 3,1 % besitzt er einen Variationskoeffizienten v = 25 % und eine relativ große Spannweite R zwischen 6,1 – 18,5 %.



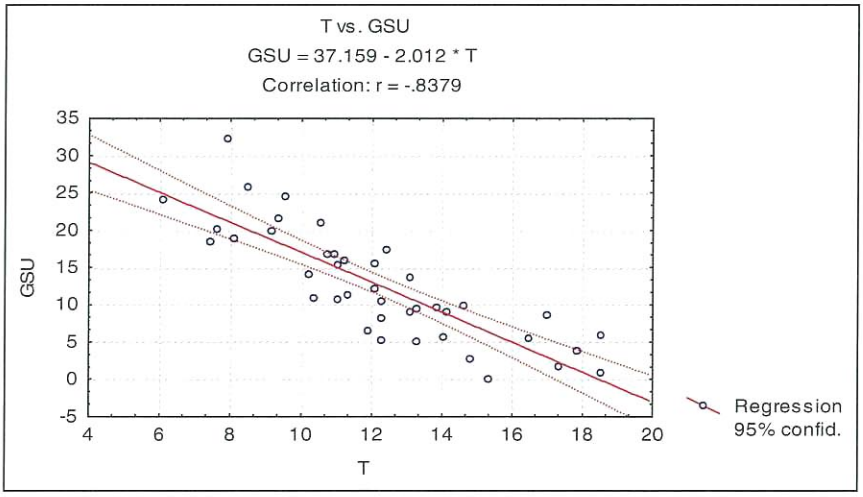


Abb. 3
Regressionsgeraden zwischen einzelnen Merkmalen der Winterlagen des Bänderschluffs von Hainichen

Der Feinschluff (Abb. 2b) ist polymodal verteilt bei geringfügig positiver Schiefe und schwacher Flachgipfligkeit. Mit $\bar{x}$ = 32 % ist sein Gehalt fast dreimal so hoch wie der des Tons, wobei die Standardabweichung s mit 6,3 % und die Spannweite R von 20,8 – 45,5 % nur doppelt so hoch sind und der Variationskoeffizient v mit 19,8 % sogar deutlich niedriger ist.

Der Mittelschluff (Abb. 2c) zeigt bei Unimodalität eine genäherte Normalverteilung mit schwach positiver Schiefe und Normalgipfligkeit. Mit einem Durchschnittsgehalt $\bar{x}$ = 42,6 % ist der Anteil des Mittelschluffs 3,5 mal so groß wie jener des Tons bei einer nur geringfügig größeren Standardabweichung s von 4,4 % und einer relativ niedrigen Spannweite R von 18,7 %. Im statistischen Vergleich weist der Mittelschluff mit v = 10,3 % den weitaus niedrigsten Variationskoeffizienten auf. Dies entspricht nur 40 % des Variationskoeffizienten beim Tongehalt.

Der ebenfalls unimodale Grobschluff (Abb. 2d) zeigt eine genäherte logarithmische Normalverteilung. Die Unimodalität beider Verteilungen weist ungeachtet des niedrigen Stichprobenumfangs von n = 41 auf relativ homogene Materialschüttungen in den Staubeckenraum hin. Der Durchschnittsgehalt des Grobschluffs von $\bar{x}$ = 12,6 % gleicht dem des Tons. Allerdings ist die Variabilität seiner

Mengenanteile entscheidend größer als jene des Tons. So beträgt die Standardabweichung s mit 7,5 % und der Variationskoeffizient v mit 59,5 % etwa das 2,4-fache. Seine Spannweite R, die von 0 – 32,2 % reicht, beträgt sogar das 2,6-fache.

Bei einem Durchschnittsgehalt $\bar{x}$ von knapp 0,6 % konzentriert sich der Feinsand (Abb. 2e) zu 85 % (35 von 41 Werten) auf die Gehaltsklasse von 0 % – 1 %. Dementsprechend ist seine unimodale Häufigkeitsverteilung extrem positiv schief und noch viel extremer steilgipflig.

4.1.2 Karbonatgehalt

Winterlagen des Bänderschluffs (Abb. 2f):
Der Karbonatgehalt weist bei ausgeprägter Unimodalität eine stark asymmetrische Verteilung mit einer deutlich positiven Schiefe sowie Steilgipfligkeit auf. Sein Durchschnittsgehalt $\bar{x}$ ist mit knapp 11 % fast so hoch wie der mittlere Tongehalt. Demgegenüber sind die Standardabweichung s mit 1,1 %, die Spannweite R von 8,6 – 14,0 % sowie der Variationskoeffizient v mit 10 % extrem niedrig.

4.1.3 Glühverlust

Die statistischen Untersuchungen am Glühverlust sollen die in Kapitel 3. angestellten Überlegungen verifizieren. Dabei beschränken sich die Autoren nur auf zwei Intervalle:

- Glühverlust im Temperaturbereich 0 – 600 °C
- Glühverlust im Temperaturbereich 600 – 1000 °C, beides wiederum differenziert nach Winter- und Sommerlagen.

Im Sinne der Übersichtlichkeit der Ergebnisse wurde das gesamte Temperaturintervall von 0 bis 600 °C erfaßt, um sowohl die Kristallwassergehalte der verschiedenen Tonminerale als auch deren Hydroxylionenanteil additiv zu ermitteln. Damit sollte eine mittelbare Aussage ausschließlich über den Gehalt sämtlicher Tonminerale getroffen werden.

4.1.3.1 Glühverlust im Temperaturintervall 0 – 600 °C

Winterlagen des Bänderschluffs (Abb. 2g):
Der Gesamtkristallwassergehalt zeigt eine genäherte unimodale Normalverteilung um einen Durchschnittswert von $\bar{x}$ = 12,4 %. Die Variabilität der Gehalte ist relativ niedrig, ausgewiesen durch eine Standardabweichung s von 1,55 %, eine Spannweite R von 9,4 – 15,2 % und einen Variationskoeffizienten v von 12,5 %. Bei einer Schiefe von quasi Null ist ihre Verteilung schwach flachgipflig. Diese Charakteristika legen es nahe anzunehmen, dass bei den Winterlagen der gesamte Kristallwassergehalt durch das Temperaturintervall von 0 – 600 °C erfaßt wird.

4.1.3.2 Glühverlust im Temperaturintervall 600 – 1000 °C

Winterlagen des Bänderschluffs (Abb. 2h):
Die Differenz der Glühverluste im Temperaturintervall 0 – 600 °C vom Gesamtglühverlust im Temperaturbereich 0 – 1000 °C beträgt für die Winterlagen im Durchschnitt $\bar{x}$ = 4,14 %. Die Variabilität ist relativ groß, ausgewiesen durch eine Standardabweichung s von 0,74 %, eine Spannweite R von 2,4 – 5,3 % und einen Variationskoeffizienten v von 17,9 %. Darüber hinaus zeigt die Verteilung eine ausgeprägte Bimodalität mit einem Hauptpeak bei D_1 = 4,75 % und einem Nebenpeak D_2 = 3,75 %. Dementsprechend läßt sich die Gesamtverteilung in eine logarithmische Normalverteilung um den Wert $\bar{x}_1$ = 4,75 % und eine Normalverteilung um den Wert $\bar{x}_2$ = 3,75 % splitten. Diese Heterogenität deutet darauf hin, dass zwei unterschiedlich stabile Karbonatphasen die Gesamtverteilung steuern.

4.1.4 Univariatstatistik der relevanten Lagenmächtigkeiten

Die statistischen Kennwerte der Lagenmächtigkeiten beziehen sich ausschließlich auf die Proben, für die Korngrößenbestimmungen durchgeführt wurden.

Winterlagen des Bänderschluffs:
Das Histogramm zeigt eine bimodale Verteilung mit einem Hauptpeak bei D_1 = 3,5 mm und einem wesentlich schwächeren Nebenpeak bei D_2 = 10,5 mm. Die durchschnittliche Mächtigkeit der Winterlagen beträgt $\bar{x}$ = 6,2 mm. Die Variabilität der einzelnen Mächtigkeiten ist relativ groß, ausgewiesen durch eine Standardabweichung s von 2,3 mm, eine Spannweite R von 3 – 11 mm und einen Variationskoeffizienten v von 36,9 %.

Sommerlagen des Bänderschluffs:
Die Mächtigkeiten der Sommerlagen lassen im Histogramm eine deutliche Trimodalität erkennen mit einem Hauptpeak bei D_1 = 25 mm und zwei Nebenpeaks bei D_2 = 160 mm sowie D_3 = 240 mm. Hieraus wird geschlossen, dass die Materialschüttungen diskontinuierlich waren. Daraus auf besondere Sedimentationsereignisse zu schließen, wäre aufgrund des niedrigen Stichprobenumfangs von n = 40 zu früh.

Eine Ursache könnte darin zu suchen sein, dass die Konfiguration des Stausees am Erzgebirgskamm sehr unregelmäßig gewesen ist, beispielsweise durch Quertäler parallel zum Streichen des Erzgebirgskamms.

4.1.5 Erster zusammenfassender Vergleich zwischen Winter- und Sommerlagen

Ein erster Vergleich der statistischen Maßzahlen und Häufigkeitsverteilungen der Merkmale zwischen den Sommer- und Winterlagen ergibt Folgendes:

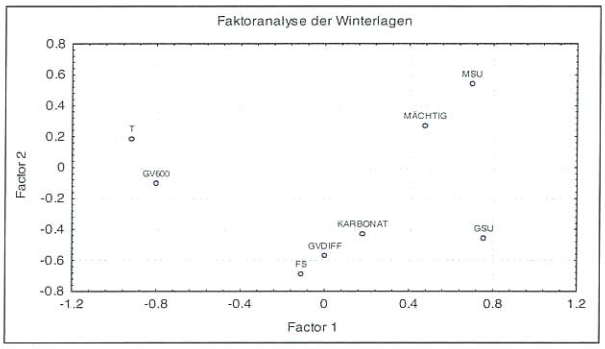
- Große Unterschiede existieren bei den Ton- und Feinschluffgehalten hinsichtlich Durchschnittsgehalt und Variabilität. Heterogenitäten aufgrund stärkerer Wechsel im Materialeintrag existieren in beiden Lagentypen, belegt durch die bivariaten Verteilungen.
- Bei gleichermaßen signifikanten Unterschieden hinsichtlich Durchschnittsgehalt und Variabilität unterscheiden sich die Mittel- und Grobschluff- sowie Feinsandfraktionen der Sommerlagen zusätzlich in ihren Häufigkeitsverteilungen. Diese sind gegenüber den generell univariat verteilten Merkmalen der Winterlagen in den Sommerlagen alle bivariat. Gleiches gilt für den Karbonatgehalt, den Glühverlust im Temperaturintervall 0 – 600 °C und die Lagenmächtigkeit.

5. Korrelations- und Regressionsanalyse der Winterlagen

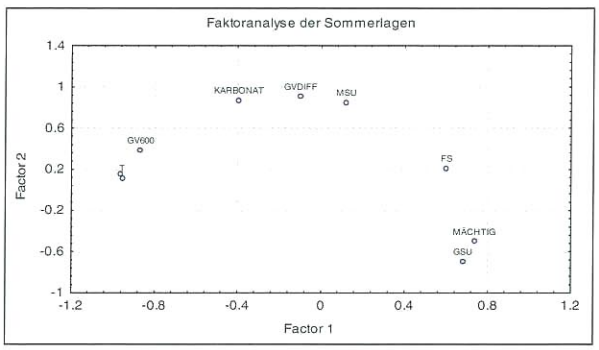
5.1 Bivariate Korrelationen

In einem nächsten Schritt wurde versucht, die kausalen Zusammenhänge sämtlicher analysierter Substanzparameter mit Hilfe einfacher bivariater Korrelationen zu erfassen und zu

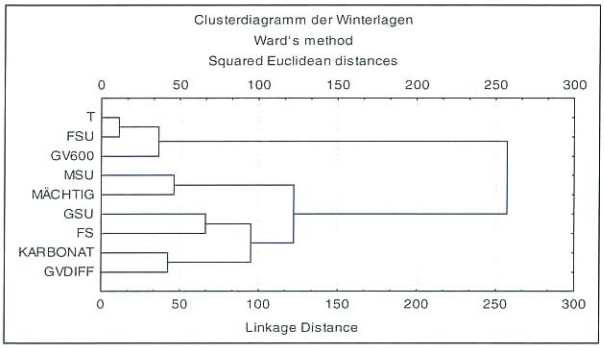
(a.) Ergebnisse der Faktoranalyse (Winterlagen):



(c.) Ergebnisse der Faktoranalyse (Sommerlagen):



(b.) Ergebnisse der Clusteranalyse (Winterlagen):



(d.) Ergebnisse der Clusteranalyse (Sommerlagen):

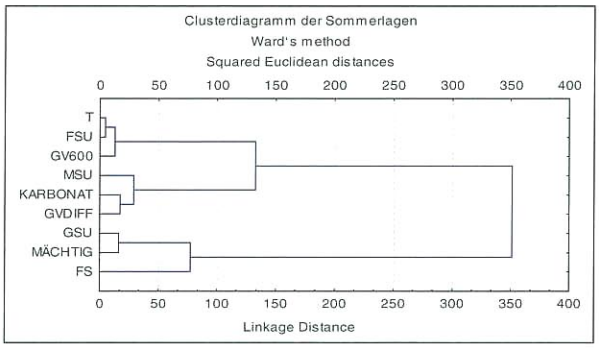


Abb. 4 Ergebnisse der Faktoranalyse und der Clusteranalyse der untersuchten Merkmale der Winterlagen des Bänderschluffs von Hainichen

interpretieren (Tab. 3). Hierbei war zu beachten, dass es sich bei den granulometrischen Klassen Ton, Fein-, Mittel-, Grobschluff und Feinsand um konditionierte Daten handelt. Das bedeutet, dass diese Werte auf 100 % Gesamtsubstanz bezogen sind. Das hat die außerordentlich unangenehme Konsequenz, dass in einem derartig geschlossenen System die positiven Korrelationen abgeschwächt und die negativen Korrelationen verstärkt sein können. Dem kann dadurch begegnet werden, dass den linearen Einfachkorrelationen partielle Korrelationsrechnungen nachgeschaltet werden.
Diese vorangestellten Einschränkungen gelten allerdings nicht für die Merkmale Karbonatgehalt und Glühverlust in den Temperaturbereichen 0 – 600 °C bzw. 600 – 1000 °C sowie Lagenmächtigkeit.

5.1.1 Granulometrische Kennwerte

Aufgrund ihrer hochsignifikanten bzw. signifikanten Korrelationskoeffizienten (Tab. 3) können die granulometrischen Kennwerte in drei Gruppen unterteilt werden:

- Ton plus Feinschluff,
- Mittelschluff plus Grobschluff,
- Feinsand

Interpretation (Tab. 3):

- Ton und Feinschluff gehören genetisch eng zusammen. Sie sind im Ergebnis eines ähnlich großen Energiepotentials gemeinsam in das Sediment eingetragen wurden. Demgegenüber stellen die gröberen Kornfraktionen Mittel- und Grobschluff konkurrierende Korngrößenklassen dar, die gemeinsam ein deutlich höheres Energieniveau des Sedimenteintrages widerspiegeln.
- Wesentlich ist, dass die Reziprozität von Gsu / T bzw. Gsu / Fsu (-0,838; -0,884) entscheidend größer ist als jene von Msu / T bzw. Msu / Fsu (-0,502; -0,522). Das heißt, die negativen Korrelationskoeffizienten wachsen mit zunehmender Kornvergröberung vom Ton über Mittelschluff zum Grobschluff bzw. vom Feinschluff über Mittelschluff zum Grobschluff entscheidend an.
- Die Insignifikanz von Ton und Feinschluff zum Feinsand sowie zu den Glühverlusten im Temperaturintervall 600 – 1000 °C beruht auf den extrem niedrigen Gehalten beider (Tab. 1).
- Zwischen Ton und den Glühverlusten im Temperaturintervall 0 – 600 °C besteht mit 0,650 ein hoher positiver, zwischen Feinschluff und diesen Glühverlusten ein etwas schwächerer aber immer noch hoher positiver Zusammenhang (0,598). Damit wird der hohe Gehalt an Tonmineralen im Ton, etwas abgeschwächt im Feinschluff, mittelbar nachgewiesen, da durch den Glühverlust im Temperaturintervall 0 – 600 °C der gesamte Gehalt an Kristallwasser und Hydroxylionen enthalten ist.
- Die generell niedrigen Mächtigkeiten der Winterlagen bilden sich naturgemäß in den beiden feinsten Kornfraktionen Ton und Feinschluff ab, wobei der Einfluss des Feinschluffs schon allein durch seine höheren Anteile von deutlich geringerer Bedeutung für die niedrigen Mächtigkeiten ist.

Die Bedeutung der hochsignifikanten inversen Korrelation von Mittelschluff und Grobschluff wurden schon beschrieben und interpretiert. Darüber hinaus wird festgestellt:

- Zwischen Mittelschluff und Grobschluff gibt es nur eine insignifikante, schwach positive Korrelation (0,118). Der Grund dafür wird in den extrem unterschiedlichen Anteilen

	T	*Fsu*	*Msu*	*Gsu*	*FS*	*Karbonat-gehalt*	*Gvdiff <600 °C*	*Gvdiff >600 °C*	*Mächtig-keit*
T	-	**0,860**	**-0,502**	**-0,838**	-0,050	-0,140	**0,650**	-0,001	**-0,325**
Fsu	**0,860**	-	**-0,522**	**-0,884**	-0,061	-0,102	**0,598**	0,034	-0,273
Msu	**-0,502**	**-0,522**	-	0,118	**-0,406**	0,040	**-0,645**	-0,136	**0,424**
Gsu	**-0,838**	**-0,884**	0,118	-	0,171	0,129	**-0,412**	0,024	0,123
FS	-0,050	-0,061	**-0,406**	0,171	-	-0,058	0,147	0,164	-0,088
Karbonatgeh.	-0,140	-0,102	0,040	0,129	-0,058	-	-0,214	**0,469**	-0,008
GV< 600°C	**0,650**	**0,598**	**-0,645**	**-0,412**	0,147	-0,214	-	-0,092	**-0,359**
GV> 600 °C	-0,001	0,034	-0,136	0,024	0,164	**0,469**	-0,092	-	0,067
Mächtigkeit	**-0,325**	-0,273	**0,424**	0,123	-0,088	-0,008	**-0,359**	0,067	-

Tab. 3 Bivariate Korrelationskoeffizienten zwischen den untersuchten Merkmalen der Winterlagen des Bänderschluffs von Hainichen

vom Mittelschluff gegenüber dem Grobschluff gesehen. Das Verhältnis der durchschnittlichen Gehalte in den Winterlagen beträgt 3,85 : 1.

- Zwischen Mittelschluff und Feinsand existiert eine signifikante negative Korrelation (-0,406), zwischen Grobschluff und Feinsand eine insignifikante, schwach positive (0,171).
- Zum Karbonatgehalt und seinem Glühverlustäquivalent im Temperaturintervall 600 bis 1000 °C bestehen im Prinzip keine Zusammenhänge. Demgegenüber gibt es hochsignifikante inverse Korrelationen zum Glühverlust im Temperaturintervall 0 bis 600 °C mit –0,645 für den Mittelschluff bzw. –0,412 für den Grobschluff.
- Von besonderer Bedeutung ist die signifikante positive Korrelation zwischen dem Mittelschluff und der Lagenmächtigkeit (0,424), mit 0,123 ebenfalls positiv aber insignifikant die Zusammenhänge von Grobschluff und Mächtigkeit.

Interpretation (Tab. 3):

- Mittel- und Grobschluff repräsentieren (aufgrund des größeren Korndurchmessers gegenüber Ton und Feinschluff) den höheren Energieeintrag in das Sediment. Tonminerale sind in beiden Fraktionen nicht oder nur geringfügig enthalten, was sich in dem Glühverlust des Temperaturbereiches 0 – 600 °C widerspiegelt.
- Die Mächtigkeiten der Winterlagen sind hauptsächlich an den Mittelschluff gebunden (infolge seines durchschnittlichen Anteils von 42,6 Masse- %) und nachrangig an den Grobschluff, nicht jedoch an die beiden feineren Kornfraktionen.

Der Feinsand weist aufgrund seines minimalen Anteils von durchschnittlich 0,6 Masse- % ausschließlich zum Mittelschluff eine signifikante und dazu inverse Korrelation (-0,406) auf. Darüber hinaus existieren zum Grobschluff und den beiden Glühverlustintervallen insignifikante, schwach positive Korrelationen.

Interpretation (Tab. 3):

- Der Feinsand scheint gegenüber dem Mittelschluff einem deutlich höheren Energieniveau anzugehören. Genetisch könnte Grobschluff und Feinsand sogar besser zusammenhängen als Grobschluff und Mittelschluff.

5.1.2 Karbonatgehalt sowie Glühverlust im Temperaturintervall 600 – 1000 °C

Interpretation Karbonatgehalte (Tab. 3):

- Der signifikante bivariate positive Zusammenhang zwischen dem Karbonatgehalt und dem Glühverlust im Intervall 600 – 1000 °C verifiziert die bereits analysierten Ergebnisse. Des Weiteren scheint das Karbonat nicht in der Ton- und Feinschluff-Fraktion, sondern im Grobschluff angereichert zu sein.

Interpretation Gühverlust (Tab.3):

- Der im Glühverlust des Temperaturintervalls 0 – 600 °C ausgewiesene Kristallwassergehalt stammt aus den Tonmineralen und ist fast ausschließlich in den Kornfraktionen Ton und abgeschwächt im Feinschluff konzentriert. Er fehlt in den Fraktionen Mittel- und Grobschluff. Darüber hinaus konkurriert der Kristallwassergehalt mit dem Karbonatgehalt und ist als Tongehaltsindikator mit den geringen Mächtigkeiten der Winterlagen assoziiert.

5.1.3 Lagenmächtigkeit

Interpretation Lagenmächtigkeit (Tab. 3):

- Die Mächtigkeit wird bestimmt durch den mengenmäßig dominierenden Mittelschluff, während sich am stärksten Ton und danach die Feinschluffgehalte reduzierend auf die Mächtigkeit der Winterlagen auswirken.

5.2 Partielle Korrelationen

Wie einleitend gesagt, wird mit den partiellen Korrelationen Folgendes bezweckt: Überprüfen der Einfachkorrelation auf Abschwächung bis zur Scheinkorrelation bzw. Bestätigung oder Verstärkung der einfachen Merkmalszusammenhänge durch Einbeziehung des Einflusses eines dritten Merkmals. Um die Übersicht zu behalten und die Anzahl der Kombinationen so klein wie möglich zu halten, wurden alle neun Merkmale jeweils in Merkmalstripeln assoziiert. Das ergibt eine Anzahl von 252 Kombinationen nach der Formel:

$$C_n^k = \frac{k * n!}{(n-k)!*k!}$$

Die außerordentlich umfangreichen Vergleiche zwischen den einfachen und partiellen Korrelationen sowie Quervergleiche zwischen den jeweiligen Dreierkombinationen der Merkmale

würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Diese werden zusammen mit analogen Untersuchungen der Bändertone Penig und Chemnitz Gegenstand einer Monographie sein. Hinsichtlich der Methodik der Auswertung sei hier auf die Monographien von Kühl et al. (1996) und Kühl & Gehne (2000) verwiesen.

Ein weiteres Ziel der partiellen Korrelationen bestand darin, Entscheidungsansätze für die Bestimmung möglichst vieler Kennwerte aus einem einzigen bekannten Kennwert zu berechnen, um Vorschläge für die Reduzierung des immensen analytischen Aufwandes zu erreichen und überflüssige Informationen zu vermeiden.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse vorgestellt, welche für die Winterlagen des Bänderschluffs von Hainichen gewonnen werden konnten:

- Als Modellkennwert wurden die beiden mengenmäßig dominierenden Kornfraktionen Mittelschluff mit einem Durchschnittsgehalt $\bar{x} = 42{,}6$ % und Feinschluff mit $\bar{x} = 32{,}0$ % ausgewählt, die abgesehen vom Grobschluff auch die größten Standardabweichungen und Spannweiten aufweisen (Tab. 1).
- Die beiden entwickelten Entscheidungsbäume mit dem Modellkennwert Mittelschluff (Merkmal c) und alternativ Feinschluff (Merkmal b) sind das Resultat des Vergleichs der einfachen Korrelationskoeffizienten mit allen Dreierkombinationen der übrigen Merkmale sowie des Quervergleichs der partiellen Korrelationskoeffizienten untereinander.
- Die Entscheidungsbäume für den Ansatz der Regressionsfunktionen werden wie folgt bewertet:
- Mit Ausnahme des Karbonatgehalts und des Glühverlusts im Temperaturintervall 600 – 1000 °C können alle übrigen sechs Merkmale schrittweise in drei bzw. vier Entscheidungsebenen aus dem Mittelschluff berechnet werden.
- Der Karbonatgehalt muß immer entweder direkt bestimmt oder aus dem Glühverlust im Intervall 600 – 1000 °C berechnet werden.
- Entscheidungsebenen für den Modellkennwert Mittelschluff:

Ebene 1: Mächtigkeit und Glühverlust im Intervall 0 – 600 °C
Ebene 2: Tongehalt aus dem Glühverlust im Intervall 0 – 600 °C
Ebene 3: Fein- und Grobschluff aus dem Tongehalt
Ebene 4: Grobschluff mit numerischer Verbesserung sowie Feinsand aus dem Fein- und Mittelschluff

- Entscheidungsebenen für den Modellkennwert Feinschluff:

Ebene 1: Ton- und Grobschluffgehalt sowie Glühverlust im Temperaturintervall 0 – 600 °C
Ebene 2: Mittelschluff aus Fein- und Grobschluff
Ebene 3: Mächtigkeit aus Mittelschluff; Feinsand aus Fein- und Mittelschluff

5.3 Einfache und multiple Regressionsanalyse

Auf der Grundlage der Entscheidungsbäume für die Modellkennwerte Mittelschluff und alternativ Feinschluff wurden ausgewählte lineare einfache Regressionsfunktionen sowie multiple Regressionsfunktionen berechnet. Die Auswahlkriterien wurden festgelegt durch:

- Niveau der Entscheidungsebene
- Höhe und Charakter des einfachen bzw. multiplen Korrelationskoeffizienten (positiv oder negativ) und
- Formulierung der Regressionsansätze für ein möglichst breites Spektrum der neun Merkmale.

Das Ergebnis wurde in Tabelle 4 mit den Regressionsfunktionen für die Winterlagen des Bändertons fixiert. Darüberhinaus wurden in der Abbildung 3 repräsentative und charakteristische Regressionsfunktionen dargestellt:

- vier lineare Einfachregressionen mit der jeweils dazugehörigen Punktwolke der Wertepaare (Scatterplot) und Vertrauensband im 5 %-Konfidenzintervall, welches durch die Hyperbeläste oberhalb und unterhalb der Regressionsfunktion festgelegt ist.

Beschreibung und Interpretation der Regressionsgeraden (Abb. 3):

- Feinschluff gegen Ton: Die Neigung der progressiv ansteigenden Regressionsgeraden (Optimum 45°), die relativ große Dichte der Punktwolke und das enge Vertrauensband um die Regressionsgerade belegen überzeugend den engen kausalen Zusammenhang zwischen Ton und Feinschluff. Eine zusätzliche Bestätigung ist der hohe Korrelationskoeffizient von 0,860.

Tab. 4 Regressionsfunktionen zwischen den untersuchten Merkmalen der Winterlagen des Bänderschluffs von Hainichen

	T	*Fsu*	*Msu*	*Gsu*	*FS*	*Karbonat-gehalt*	*Gvdiff <600 °C*	*Gvdiff >600 °C*	*Mächtig-keit*
T	-	**0,860**	**-0,502**	**-0,838**	-0,050	-0,140	**0,650**	-0,001	**-0,325**
Fsu	**0,860**	-	**-0,522**	**-0,884**	-0,061	-0,102	**0,598**	0,034	-0,273
Msu	**-0,502**	**-0,522**	-	0,118	**-0,406**	0,040	**-0,645**	-0,136	**0,424**
Gsu	**-0,838**	**-0,884**	0,118	-	0,171	0,129	**-0,412**	0,024	0,123
FS	-0,050	-0,061	**-0,406**	0,171	-	-0,058	0,147	0,164	-0,088
Karbonatgeh.	-0,140	-0,102	0,040	0,129	-0,058	-	-0,214	**0,469**	-0,008
GV< 600°C	**0,650**	**0,598**	**-0,645**	**-0,412**	0,147	-0,214	-	-0,092	**-0,359**
GV> 600 °C	-0,001	0,034	-0,136	0,024	0,164	**0,469**	-0,092	-	0,067
Mächtigkeit	**-0,325**	-0,273	**0,424**	0,123	-0,088	-0,008	**-0,359**	0,067	-

Erläuterungen: Signifikante Korrelationen für $p < 0{,}05$ sind fett markiert, weitere Angaben siehe Tabelle 1

- Ton gegen Grobschluff: Die linearen einfachen Regressionsbeziehungen zwischen Ton und Grobschluff sind ähnlich eng wie zwischen Ton und Feinschluff, belegt durch das Streudiagramm und das Vertrauensband um die Regressionsgerade. Allerdings sind diese Beziehungen invers, d.h. die Regressionsgerade fällt degressiv ab. Bei Ton und Grobschluff handelt es sich also um zwei in ihren Mengenanteilen konkurrierende Korngrößenfraktionen im Ergebnis des signifikant unterschiedlichen Energieeintrages während der Sedimentation in den Winterperioden.

6. Faktor- und Clusteranalyse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden einerseits wichtige Zusammenhänge zwischen den fünf granulometrischen, den drei geochemischen Merkmalen und dem geometrischen Mächtigkeitskennwert aufgezeigt, andererseits auf Probleme, Unschärfen und Verschmiereffekte bei den Kausalzusammenhängen zwischen diesen Merkmalen hingewiesen. Deswegen wird im Folgenden versucht, mit zwei weiteren, statistisch komplexen Methoden – der Faktor- und Clusteranalyse – die vielschichtigen Merkmalszusammenhänge zu überprüfen und nach Möglichkeit übergeordnete Einflußgrößen herauszufiltern. Hinsichtlich der mathematisch aufwendigen Prozeduren (Matrizen- und Vektorenoperationen) sowie vielfältigen Denkansätzen und Interpretationsmöglichkeiten in der Faziesanalyse sei hier auf die Monographie von KÜHL et al. (1996) hingewiesen.
Zunächst wurden beide Methoden auf die Originaldaten angewandt. In einem zweiten Schritt wurden dem gegenüber gestellt die Ergebnisse beider Analysen auf der Grundlage standardnormierter Primärdaten. Hierzu mussten sämtliche Einzelwerte des jeweiligen Merkmals auf ihren Mittelwert und ihre Standardabweichung normiert werden. Bei dieser Prozedur wurde folgender Algorithmus angewendet:

$$a_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

D.h. von jedem Einzelwert wurde der Mittelwert der gesamten Stichprobe abgezogen und diese Differenz durch die Standardabweichung derselben dividiert. Der Mittelwert wird durch diesen Algorithmus gleich Null, die Standardbweichung gleich Eins gesetzt. Damit wird erreicht, dass die extrem unterschiedlichen Mittelwerte und Standardabweichungen für die einzelnen Merkmale vergleichbar gemacht werden, ohne dass ein Informationsverlust eintritt. Das Resultat dieses Vergleichs sei gleich vorangestellt:

Die Ergebnisse sowohl der Faktoranalyse (Hauptkomponentenanalyse) als auch der Clusteranalyse (nach der WARD-Methode) mit den Originaldaten zeigten zum Teil verfälschte Merkmalsbeziehungen. Demgegenüber brachten beide Methoden mit den standardisierten Daten ausgezeichnete Ergebnisse, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Winterlagen des Bänderschluffs (Abb. 4a und 4b):

Als erster Schritt wurde die Hauptkomponentenanalyse (principal component analysis) für die standardisierten Daten der Winterlagen angewendet. Bei dieser Methode erfolgt eine Extraktion möglichst weniger Faktoren für eine Vielzahl von Merkmalen, wobei bewußt auf eine schlecht interpretierbare Restvarianz über die extrahierten Hauptkomponenten hinaus verzichtet wird: Ziel war also eine Verdichtung von Information auf wenige übergeordnete Komponenten.
Bei den Winterlagen konnten zwei Hauptkomponenten extrahiert werden, welche gemeinsam 53,0 % der Gesamtvarianz aller neun Merkmale erfassen (Tab. 5).

Tab. 5 Faktorladungen der einzelnen Merkmale bei der Hauptkomponentenanalyse für die Winterlagen des Bänderschluffs von Hainichen

	Winterlagen	
	Faktor 1	**Faktor 2**
Varianz	*36,6 %*	*16,4 %*
Ton	-0,921	0,186
Feinschluff	-0,913	0,187
Mittelschluff	0,698	0,542
Grobschluff	0,756	-0,457
Feinsand	-0,110	-0,687
Karbongehalt	0,181	-0,427
GVDiff<600 °C	0,806	-0,101
GVDiff>600 °C	0,002	-0,571
Mächtigkeit	0,475	0,270

Im Faktor 1 mit 36,6 % der Gesamtvarianz tritt hochladend positiv der Grobschluff auf, etwas schwächer der Mittelschluff und noch schwächer die Mächtigkeit. Dem stehen hochladend negativ gegenüber: Ton, Feinschluff und der Glühverlust im Temperaturintervall 0 – 600 °C.
Im Faktor 2 mit 16,4 % der Gesamtvarianz weisen die höchsten positiven Ladungen der Mittelschluff, etwas abgeschwächt die Mächtigkeit auf. Die höchsten negativen Ladungen zeigen dem gegenüber Feinsand, Grobschluff, der Glühverlust im Temperaturintervall 600 – 1000 °C sowie der Karbonatgehalt.

Verknüpft man beide Faktoren in einem Koordinatensystem, wird die Position der einzelnen Merkmale durch die Faktorladungen beider Faktoren fixiert (Abb. 4a):

- Ton und Feinschluff korrespondieren so eng miteinander, dass beide Merkmale im Diagramm übereinanderliegen, so dass der Ton für beide Merkmale steht. Dazu gesellt sich mit der geringsten Distanz der Tonmineralgehalt (Glühverlust im Temperaturintervall 0 – 600 °C).
- Ähnlich eng beieinander liegen Karbonatgehalt und Glühverlust im Temperaturintervall 600 bis 1000 °C. Benachbart zu beiden ist der Feinsand, in welchem das Karbonat konzentriert zu sein scheint. Die relativ geringe Distanz zwischen Karbonat und Grobschluff deutet an, dass auch hier Karbonat angereichert sein kann.
- Die deutliche Nähe zwischen Mittelschluff und Lagenmächtigkeit weist darauf hin, dass letztere primär durch den hohen Mengenanteil des Mittelschluffs diktiert wird.
- Die beiden Faktoren selbst werden wie folgt interpretiert: Faktor 1 als relativer Hochenergiebereich mit hochladendem Grob- und Mittelschluff bzw. Lagenmächtigkeit, Faktor 2 als Niedrigenergiebereich mit hohen Ton-, Feinschluff- bzw. Tonmineralgehalten.

Mit der Anwendung der Clusteranalyse wurde das Ziel verfolgt, eine inhomogene Gesamtheit von Variablen in homogene Teilmengen (Cluster = Gruppen) zu untergliedern. Dabei sollten sich die Elemente einer Gruppe möglichst ähnlich sein, während zwischen den Gruppen kaum oder weniger Ähnlichkeiten bestehen. Bei der angewendeten WARD-Methode erfolgt die Gruppierung unter der Maßgabe, dass sich durch die Zusammenfassung zweier Gruppen ein vorgegebenes Heterogenitätsmaß (Innergruppenstreuung) möglichst wenig vergrößert. Die Gruppenunterschiede werden mit Hilfe der quadrierten euklidischen Distanz bestimmt und in einem Baumdiagramm (Dendrogramm) anschaulich dargestellt. In dem Diagramm werden die Fusionierungs- gleich Gruppenbildungsniveaus mit einer horizontalen Distanzachse verbunden.

Das Dendrogramm der Winterlagen bestätigt in überzeugender Weise die bereits in der Hauptkomponentenanalyse gewonnenen Kenntnisse (Abb. 4b):

- Zuerst fusionieren Ton und Feinschluff. Später schließt sich der Tonmineralgehalt (Glühverlust im Temperaturintervall 0 – 600 °C) an dieses Cluster an.
- Karbonatgehalt und Glühverlust im Temperaturintervall 600 – 1000 °C bilden das nächste Fusionsniveau, gefolgt von Mittelschluff und Mächtigkeit bzw. Grobschluff plus Feinsand.

Die weiteren Verknüpfungen auf höherem Fusionsniveau können dem Dendrogramm entnommen werden.
Die Ergebnisse der Hauptkomponenten- bzw. Clusteranalyse für den Bänderschluff von Hainichen zeigen, dass die Sedimentation im Stauseebecken von zwei übergeordneten Faktoren gesteuert wird:

1. durch ein energetisches Niedrigniveau, in welchem die Kornfraktion Ton und Feinschluff sowohl in den Winter- als auch Sommerlagen konzentriert sind. Dieser Faktor spiegelt den geringenergetischen Sedimenteintrag aus der Suspensionsfracht des Wasserkörpers, vor allem während der Winterperioden, wider.
2. ein relatives Hochenergieniveau, in dem die gröberen Kornfraktionen zum Absatz kamen. Dieser Faktor charakterisiert den vor allem während der Sommerperioden wirksamen hochenergetischen, impulsartigen Sedimenteintrag in das Stauseebecken (Trübeströme).

7. Weiterführende Arbeiten

Mit dem Ziel, die komplexen Zusammenhänge zwischen den granulometrischen und substanziellen Kennwerten zu verifizieren, werden die partiellen und multiplen Korrelationsrechnungen der Winterlagen noch ausgewertet und auf die Sommerlagen des Bändertons ausgeweitet. Gleichermaßen werden die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse auf die einzelnen Objekte (Proben) erweitert und die Resultate der Clusteranalyse mit Hilfe der Diskriminanzanalyse bewertet.
Hauptgegenstand der weiterführenden Untersuchungen wird die Warvenkonnektierung sein: zunächst im lokalen Bereich von Hainichen und später im Rahmen einer regionalen Verknüpfung mit den Bändertonen der Leipziger Tieflandsbucht. An erfolgsträchtigen Methoden werden dabei angewandt:

- die Warvenkonnektierung nach de Geer (1912),
- die Warvenkonnektierung mit hochpaßgefilterten Originaldaten nach Kühl (1991) und
- die Analyse kurzer Zeitreihen im Zeit- und Frequenzbereich.

Dabei sollen neben den Mächtigkeiten der Sommer- und Winterlagen auch erstmals substanzielle Warvendaten verwendet werden. Für die Extraktion von Trends, Rhythmen und Zyklen in den Datenreihen sollen dabei angewendet werden: Auto- und Kreuzkorrelation, FOURIER-Transformation im Zeit- und Frequenzbereich sowie vorzugsweise Gleitkorrelation mit dem Ziel einer optimalen Einpassung kürzerer, unvollständiger Sequenzen in längere, vollständige Datenreihen. Im Ergebnis soll ein Modell für die Kinematik des Eisstauprozesses erarbeitet werden.

Zusammenfassung

Am unmittelbaren Nordrand des Erzgebirges wurde in der Tongrube Hainichen ein Bänderschluff aufgeschlossen, von welchem die obersten 120 Warven erfaßt werden konnten. Diese weisen zwei Besonderheiten auf:

1. eine exponentielle Zunahme der Warvenmächtigkeiten vom Liegenden zum Hangenden,
2. erhöhte absolute Karbonatgehalte und Lagenmächtigkeiten.

Die Zunahme der Mächtigkeiten sowohl der Winter- als auch der Sommerlagen charakterisiert einen typischen Vorstoßbänderschluff; seine geologische Position, die erhöhten Karbonatgehalte und Lagenmächtigkeiten lassen auf ein Stauseesediment im Ergebnis eines jüngeren elsterkaltzeitlichen Inlandeisvorstoßes (Elster-(I)-Eisrandoszillation oder Elster-(II)-Inlandeisvorstoß) schließen.
Korrelations- und Regressionsberechnungen zeigen, dass der Glühverlust im Temperaturintervall 0 – 600 °C den Kristallwasser- und Hydroxylionengehalt und damit mehr oder weniger vollständig den Tonmineralgehalt der einzelnen Lagen widerspiegelt. Der Tonmineralgehalt korrespondiert wiederum hervorragend mit den kleinsten Kornfraktionen Ton und Feinschluff.
Der Glühverlust im Temperaturintervall 600 – 1000 °C wird verursacht durch die thermische Zersetzung der Karbonate, vorzugsweise Calcit. Er ist in hohem Maße mit den absoluten Karbonatgehalten assoziiert. Sie konzentrieren sich in den Winterlagen vorzugsweise in der Grobschluff- und Feinsandfraktion, wohingegen das Karbonat in den Sommerlagen eindeutig im Mittelschluffanteil angereichert ist.
Die Mächtigkeit der einzelnen Winterlagen wird von deren Mittelschluffgehalt bestimmt, welcher im Durchschnitt über 42 % aller Mengenanteile der Kornfraktionen ausmacht. Demgegenüber wird die Mächtigkeit in den Sommerlagen primär vom Mengenanteil des Grobschluffs, sekundär durch den des Feinsands beeinflußt. Die Besonderheit dieses Sachverhalts liegt darin, dass in den Sommerlagen die Mengenanteile von Grobschluff und Feinsand an der Gesamtmenge aller Kornfraktionen zusammen nur etwas über 20 % betragen. Man kann schlußfolgern, dass die Mächtigkeit der Winterlagen primär vom Mengenanteil bestimmt wird, in den Sommerlagen hingegen primär durch das Volumen der Kornfraktionen und nur sekundär durch deren Mengenanteil.

Faktor- und Clusteranalyse zeigen, dass die Sedimentation im glazialen Staubecken durch zwei übergeordnete Faktoren gesteuert wird:

1. durch ein energetisches Niedrigniveau, in welchem die Fraktionen Ton und Feinschluff sowie die Tonminerale (Glühverlust im Temperaturintervall 0 – 600 °C) sowohl in den Winter- als auch Sommerlagen konzentriert sind. Dieser Faktor reflektiert den geringenergetischen Sedimenteintrag aus der Suspensionsfracht des Wasserkörpers, vor allem während der Winterperioden.
2. ein relatives Hochenergieniveau, welches in den Winterlagen primär Mittelschluffgehalt und Lagenmächtigkeit, sekundär Grobschluff und Karbonatgehalt vereinigt. Demgegenüber hat sich das Hochenergieniveau der Sommerlagen deutlich erhöht: Hier gehen Grobschluff- und Feinsandgehalt mit der Lagenmächtigkeit einher. Dieser Faktor widerspiegelt den vor allem während der Sommerperioden wirksamen hochenergetischen, impulsartigen Sedimenteintrag in das Stauseebecken.

Summary

In the Hainichen clay pit situated not far away from the northern border of the Ore Mountain a varved silt is outcroped and its uppermost 120 varves could be studied. These varves are characterized by

1. an exponential increase of the varve thickness from bottom to the top,
2. enhanced absolute carbonate contents and layer thicknesses.

The increase of thicknesses of the winter as well as of the summer layers are typical marks of a varved clay formed by advancing ice sheet. Its geological position and the enhanced carbonate contents and layer thicknesses of the varved silt point at its formation in consequence of a younger Elsterian glacial ice sheet advance (ice rim oscillation of Elster-(I)-ice sheet or formed by the Elster-(II)- ice sheet).

Results of correlation and regression analysis show that the loss of ignition (LOI) the temperature interval 0 – 600 °C reflects the crystallization water and hydroxyl ion content and therefore corresponds more or less with the bulk clay mineral content of the single layers. Moreover the bulk clay mineral content is associated with the smallest grain size fractions clay and fine silt in high degree.

The LOI of the temperature interval 600 – 1000 °C is caused by thermic decay of carbonates, particularly of calcite. It is associated with the absolute bulk carbonate contents. In the winter layers they are concentrated in the coarse silt and fine sand grain size fractions, in contrast to the summer layers which show a clear enrichment of carbonate in the medium-grained silt fraction.
The thickness of the single winter layers is caused by its medium-grained silt content which occupied in mean more than 42 percent of all quantity parts of grain size fractions. In contrast to, the thickness of summer layers is influenced primary by the quantity part of coarse silt fraction and secondary by the quantity part of fine sand fraction. Thereby the peculiarity consists in the observation that of all grain size fractions in the summer layers the quantity parts of coarse silt and fine sand amount a little more than 20 percent. Therefore it can be concluded that the thickness of winter layers is caused primary by quantity part, in contrast to, the thickness of summer layers is caused primary by the volume of grain size fractions and secundary by its quantity parts.
Factor and Cluster analysis show the sedimentation in glacial ice-dammed lake basin is controlled by two superordinate factors:

1. a low-energy level which includes in the winter layers as well as in the summer layers the grain size fractions clay and fine silt and the clay minerals (represented by ignition loss of temperature intervall 0 – 600 °C). This factor reflects the low-energy sedimentation process of the suspension load from the glacial lake water body during the winter periods, particularly.
2. a relative high-energy level which in the winter layers includes primary the medium-grained silt content and the layer thickness, secondary the coarse silt and carbonate contents. In contrast to, the high-energy level of the summer layers is increased: On this, coarse silt and fine sand contents increase with the layer thickness. This factor reflects the high-energy impulsive sediment input in the glacial lake basin during the summer periods, particularly.

Danksagung

Wir danken den Betriebstechnologen Herrn Dipl.-Ing. Müller und Herrn Leutert der Wienerberger Ziegelwerke GmbH Hannover für ihre materielle und körperliche Unterstützung bei der Freilegung der Bänderschluffprofile in der Tongrube der Ziegelei Hainichen.Danksagung
Wir danken den Betriebstechnologen Herrn Dipl.-Ing. Müller und Herrn Leutert der Wienerberger Ziegelwerke GmbH Hannover für ihre materielle und körperliche Unterstützung bei der Freilegung der Bänderschluffprofile in der Tongrube der Ziegelei Hainichen.

Literatur

De Geer, G. (1912): A Geochronology of the last 12 000 years. – Compte rendu 11 Congr. Geol. Intern., Stockholm 1910, S. 241-253

Hochberger, H. & F. Weihrauch (1962): Ergebnisbericht und Vorratsberechnung über alle im Jahre 1960 bis 1961 durchgeführten geologischen Erkundungsbohrungen auf Ziegelrohstoffe in Hainichen. – Erkundungsbericht, GFE Freiberg 39 S., 16 Anl., (unveröff.)

Junge, F. W. (1998): Die Bändertone Mitteldeutschlands und angrenzender Gebiete – Ein regionaler Beitrag zur quartären Stausee-Entwicklung im Randbereich des elsterglazialen skandinavischen Inlandeises. – Altenbg. nat. wiss. Forsch. 9, S. 3-210, Altenburg

Junge, F. W., Böttger T. & Chr. Siegert (1999): Die Stauseesedimente des Bruckdorfer Horizontes: Ergebnis der Eisrandoszillation des saaleglazialen skandinavischen Inlandeises in Mitteldeutschland. – Mauritiana 17, 2, S. 257-276, Altenburg

Junge, F. W. & T. Böttger (1996): Komplexe Untersuchungen zur quartären Eisstausee-Entwicklung in Mitteldeutschland. – Isotopenpraxis Environ. Health Stud. Vol. 32, 4, S. 363-386, Reading

Junge, F. W. & T. Böttger (1994): Isotope geochemical studies on carbonates of Quaternary glacio-lacustrine lake sediments as indicators of paleoenvironment. – Isotopenpraxis Environ. Health Stud. 30, 1, S. 9-21, Reading

Junge, F. W. & M. Magnus (1994): Dünnschliffherstellung an gewarvten tonigen Sedimenten am Beispiel der Bändertone aus der Leipziger Tieflandsbucht. – Der Präparator 40, 1, S. 33-41, Bochum

Kühl, A. (1991): Statistisch gestützte Stratifizierung monotoner Karbonatfolgen. – Die Geowissenschaften 9, 3, S. 79-86, Weinheim

Kühl, A., Schreiber A. & E. Scheffler (1996): Faziesanalyse mit multivariatstatistischen und geostatistischen Methoden am Beispiel des dunklen Knotenkalkes von Wildenfels. – Freib. Forsch. H. C462, 211 S., Freiberg/Sa.

Kühl, A. & H. Gehne (2000): Rechnergestütztes Qualitätsmodelling von Rohstoffkörpern der Elbkieswanne. – Freib. Forsch. H. C479, 131 S., Freiberg/Sa.

Müller, G. & M. Gastner (1971): The „Karbonat bomb" – a simple device for the determination of the carbonate content in sediments, soils and other material. – N. Jb. Min. 10, S. 446-469, Stuttgart

Pilger, A., Mocha P., Petzold B. & A. Rösler (1991): Die nordischen Gletscher am nordwestlichen Harzrand und ihre Stauseen. – Clausthaler Geol. Abh. 48, 159 S., Köln

Rösler, H. J. & R Starke (1970): Einführung in die Tonmineralogie. – 2./3. Lehrbrief, 144 S., Bergakademie Freiberg

Schirrmeister, L. (1998): Die Staubeckenschluffe/-tone im Bereich der Pommerschen Eisrandlage – Zeit- und Milieumarken der jungquartären Entwicklung Brandenburgs (stoffliche Zusammensetzung, Gefüge, Alter). – Abschlußbericht zum DFG Projekt Ni 343/2 (Projektleiter B. Nitz), Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, 118 S. u. Anlagenband

Schirrmeister, L. (1997): Sedimentstrukturen und Deformationen in Eisstauseeablagerungen NE-Brandenburgs und ihre fazielle Deutung. – In: B. Nitz & A. Nass (Hrsg.): „Beiträge zu ausgewählten Fragen des Quartärs in Ost- und Mitteleuropa". – Berliner Geograph. Arbeiten 84, S. 113-146, Berlin

Wolf, A. (2000): Sedimentologisch-geochemische Untersuchungen an elsterglazialen Bändertonen am nördlichen Erzgebirgsrand. – Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie (unveröff.)

Wolf, L. & G. Schubert (1992): Die spättertiären bis elstereiszeitlichen Terrassen der Elbe und ihrer Nebenflüsse und die Gliederung der Elster-Kaltzeit in Sachsen. – Geoprofil 4, S. 1-43, Freiberg

Anschrift der Autoren:

PD Dr. habil. Frank W. Junge
Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Institut für Geophysik und Geologie, Arbeitsgruppe „Paläoklimatologie"
Talstraße 35
D-04103 Leipzig

PD Dr. habil. Anselm Kühl
Dipl.-Geoln. Anja Wolf
Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Institut für Geologie, Gustav-Zeuner-Straße 12, D-09599 Freiberg