

## HOLOZÄNER KLIMAWANDEL IM BECKEN DER LAGUNA DE GALLOCANTA (IBERISCHES RANDGEBIRGE)

Die Rekonstruktion vorzeitlicher geomorphologischer Prozeßgefüge mit Hilfe der statistischen Analyse mineralogischer und geochemischer Indikatoren limnischer Sedimente

Mit 7 Abbildungen und 5 Tabellen

BRIGITTA SCHÜTT und ROLAND BAUMHAUER

*Summary:* Holocene climatic change in the basin of Laguna de Gallocanta (Iberian Chain) by investigation of mineralogical and geochemical characters from lacustrine sediments

Core-based paleoenvironmental investigations have been almost dominated by micro-paleontological, mostly pollen-based, studies. Inorganic features of lake sediments were predominantly studied with mineralogical analyses to identify lake typology (depth of water column, lake phase, salinity). In this investigation, geochemical features of lacustrine sediments were investigated to supplement mineralogical information by studying the indicators of weathering and soil forming processes and reconstruction of the overall geomorphological system.

A 95 cm core profile of lacustrine sediments from the isolated lake basin of the Laguna de Gallocanta, central Iberian Chain, was the subject of mineralogical and geochemical investigation. The environmental and depositional changes are confirmed by: varying concentrations of  $\text{SiO}_2$ , CaO,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -MnO-ratio,  $\Sigma\text{CaO,MgO-SiO}_2$ -ratio, statistical relationship of silica and phosphate content to metallic oxide content, and the Mg-Ca-ratio of protodolomites, compared with the position of the diffraction angle of the dolomite's major diffraction peak.

The deposition of the underlying strata (section 1) occurred under sub-arid conditions. The environment changed to sub-humid conditions during the late Middle Ages and during the Little Ice Age when the sediments in section 2 were deposited. Increasing aridity influenced the accumulation of the most recent sediments (section 3).

*Zusammenfassung:* Die Rekonstruktion früherer Umwelten anhand limnischer Sedimente erfolgt im allgemeinen auf der Grundlage mikropaläontologischer, zumeist pollenanalytischer Untersuchungen. Bei der Analyse der anorganischen Eigenschaften limnischer Sedimente werden in der Regel lediglich die mineralogischen Eigenschaften mit dem Ziel einer Rekonstruktion des limnischen Milieus (Wasserstand, Salinität, Seephase) herangezogen. In der hier vorgestellten Untersuchung sollen die zusätzlich in die Analysen mit einbezogenen chemischen Eigenschaften der limnischen Sedimente eine Rekonstruktion der Verwitterungs- und Bodenbildungsbedingungen im Einzugsgebiet sowie des allgemeinen Abtragsverhaltens erlauben.

Gegenstand der Untersuchungen ist ein 95 cm langes Kernprofil aus dem endorheischen Becken der Laguna de Gallocanta, zentrales Iberisches Randgebirge. Wechsel der synsedimentären Umwelt- und Ablagerungsbedingungen spiegeln sich insbesondere wider in: wechselnden  $\text{SiO}_2$ -, CaO- und  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Konzentrationen, wechselnden  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -MnO-Verhältnissen, wechselnden  $\Sigma(\text{CaO,MgO})\text{-SiO}_2$ -Verhältnissen, den statistischen Beziehungen der  $\text{SiO}_2$ - bzw.  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalte im Sediment zu den Metalloxid-Konzentrationen und den Mg-Ca-Verhältnissen der Protodolomite im Verhältnis zum Beugungswinkel des Dolomit-Hauptreflexes.

Die Ablagerung der Sedimente in Kernabschnitt 1 erfolgte unter relativ trockenen Umweltbedingungen. Demgegenüber waren die Umweltbedingungen während der Ablagerung von Kernabschnitt 2, dessen Sedimente während des Spät-Mittelalters bzw. während des Pessimums der Kleinen Eiszeit abgelagert wurden, deutlich feuchter, während die Ablagerung der jüngsten Sedimente wieder unter semi- bis subariden Umweltbedingungen erfolgt.

### 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund einer Rekonstruktion der holozänen Klimaentwicklung und des damit zusammenhängenden Landschaftshaushaltes in Zentralspanien wurden im endorheischen Becken der Laguna de Gallocanta, zentrales Iberisches Randgebirge (Abb. 1), sedimentologische Untersuchungen durchgeführt. Ein methodischer Schwerpunkt lag dabei auf der Bewertung der chemischen und mineralogischen Komponenten der Beckensedimente. Das Klima des Untersuchungsgebietes ist infolge seiner Beckenlage, um-

geben von Höhenzügen mit bis zu 2200 m NN, durch ein hohes Maß an Kontinentalität geprägt. Das Nebeneinander von Gebirgsklima und kontinentalem Beckenklima bedingt zudem einen ausgeprägten Klimagradienten, der eine der Hauptursachen für die empfindlichen Reaktionen des Wasserhaushaltes der Laguna de Gallocanta auf Witterungs- und Klimaschwankungen ist. Die hierdurch initiierten Verwitterungs-, Abtragungs-, Transport- und Ablagerungsprozesse spiegeln sich in der mineralogischen und geochemischen Zusammensetzung der Beckensedimente wider. Durch einen abschließenden Vergleich

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung von Oberflächenabfluß und oberflächennahem Grundwasser im Becken der Laguna de Gallocanta (Februar 1995)

Drainage basin of the Laguna de Gallocanta: chemical composition of rivers and perched groundwater (February 1995)

Nr.	Rw.	Hw.	Wasserstand [m]	m NN	LF [µS]	Eh [mV]	pH	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
1	619400	4540600	-3,8	1010	702	20	7,5	36,3	6,2	136,9	6,51	10,6	97,6	169,6
2	619600	4540650	-1,05	1010	496	125	7,3	35,3	8,5	60,8	0,58	6,55	74,5	6,3
5	624300	4542350	A. de Santed	1010	560	185	8,3	49,3	21,7	80,6	2,18	18,5	82,5	47,8
8	630800	4536750	A. de la Cerrada	1010	513	195	7,7	22,5	9,1	32,1	1,09	8,7	67	617,5
9	632275	4536000	Fuente	1010	615	205	7,8	29,5	16	63	0,69	9,7	70,7	160
12	632750	4532250	-4,05	1015	713	205	7,9	76,7	7,2	77,5	2,07	39,7	57,1	11
13	634875	4534450	-1,82	1045	829	220	8,2	100,1	11,1	84,4	1,82	7,5	101,1	79,8
16	623800	4532250	-4,6	1015	415	180	7,8	17,6	55,2	26,8	1,98	2,45	47,5	36,5
18	617700	4537875	-5,14	1015	478	165	8,1	263	13,3	66,9	2,44	6,05	62	19,5
19	632750	4531800	-2,49	1015	618	215	8,1	52,7	43,6	77,6	1,04	18,7	70	82,2
20	615325	4539650	-20	1040	720	5	7,5	25,8	22,8	34,8	1,56	6,3	121,5	188,6
21	628850	4544750	Fuente	1015	368	185	7,9	15,9	7,7	20,5	0,93	8,15	41	167,6
222	613950	4544150	-1,69	1065	816	105	7,6	35,3	135,2	113,4	1,04	1,7	133,7	57,9
223	614075	4542850	-2	1050	632	165	7,2	16,2	48	30,6	0,79	4,7	82,7	92,2
224	623650	4535600	-1,9	1006	575	195	m.v.	22,6	54,2	47,5	5,19	3,3	49,6	29,6
225	623200	4539200	-1,65	1003	730	190	m.v.	40,3	9	106,7	0,79	14,1	65,9	24,9
300	627700	4533150	m.v.	997	m.v.	m.v.	m.v.	37,7	74,6	473	0,02	6,6	73,9	30,3
301	627530	4534020	m.v.	998	m.v.	m.v.	m.v.	29,2	30,2	76,8	1,78	7,7	74	43,4

der Ergebnisse mit den Arbeiten anderer Autoren, die unter Verwendung der – klassischen – Pollenanalyse eine Rekonstruktion des Paläoklimas für den Raum vorgenommen haben, soll die Plausibilität dieses neuen

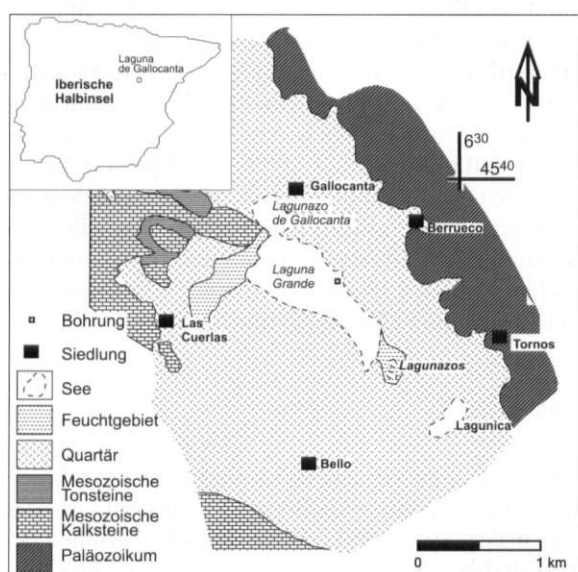


Abb. 1: Geologische Karte des Beckens der Laguna de Gallocanta (verändert nach GONZALEZ LOPEZ et al. 1983)

Geological map of the Laguna de Gallocanta basin (modified after GONZALEZ LOPEZ et al. 1983)

methodischen Ansatzes unterstrichen werden. Die besondere Eignung der endorheischen Becken für das Vorhaben ergibt sich daraus, daß in den Endseen eine Akkumulation von chemischen und klastischen Sedimenten ungestört und aus begrenzten Einzugsgebieten erfolgt. Hierdurch können komplette Zeitabschnitte lückenlos erfaßt werden.

## 2 Das Untersuchungsgebiet

Die Laguna de Gallocanta ist ein endorheisches Becken im zentralen Iberischen Randgebirge, das sich infolge von Grabenbildungsprozessen während des Tertiärs in einem Ausläufer des Calatayud-Daroca-Grabens gebildet hat (Abb. 1). Entlang der Grabenränder ist Grundgebirge aus ordovizischen und silurischen Quarziten aufgeschlossen, das während der variskischen Gebirgsbildung deformiert wurde. Im Bereich des Grabens stehen mesozoische Sedimente an, die jedoch lediglich an den Grabenschultern austreichen. Der Zentralbereich des Grabens wurde während des Jungtertiärs und Quartärs mit Sedimenten aufgefüllt (GRACIA PRIETO 1990, 278). Am Fuß der aus paläozoischen Quarziten aufgebauten Höhenrücken finden sich ausgedehnte Schwemmfächer, die seit dem Pliozän dort abgelagert wurden.

Das Klima im Bereich des Iberischen Randgebirges ist bei insgesamt stark ausgeprägter Kontinentalität im NW stärker atlantisch beeinflusst und bekommt nach SE zunehmend levantische Züge. Die jährlichen Niederschlagsmaxima liegen im Frühjahr und Herbst, während im Sommer im Schnitt weniger als 30 mm Niederschlag fallen (GARCIA DE PEDRAZA a. REIJA GARRIDO 1994). Im Einzugsgebiet der Laguna de Gallocanta wird durch die Beckenlage dieser Grad der Kontinentalität noch verstärkt. So beträgt in Tornos, am SE-Ufer der Laguna de Gallocanta, die Jahresmitteltemperatur 9.3°C (1955–1994). Die mittleren Jahresniederschläge von 440 mm verteilen sich auf durchschnittlich 52 Regen- und 7 Schneetage. Bei einer mittleren jährlichen potentiellen Evaporation von 926 mm (Daroca (1971–1994)) ist die klimatische Wasserhaushaltsbilanz insgesamt negativ.<sup>1)</sup>

Neben den oberirdischen Zuflüssen wird die Laguna de Gallocanta überwiegend von Grundwasser gespeist (MDAPA 1988, 246). Es wird davon ausgegangen, daß die liegenden tonigen Schichten des Keuper und die jurassisch-kretazischen Mergel weitgehend wasserundurchlässig sind und so zu einer Abdichtung des Seebeckens führen (DGDA 1993, 78; COMIN et al. 1983, 209). Evapotranspiration bildet den einzigen Wasserverlust aus dem Becken der Laguna de Gallocanta (GRACIA PRIETO 1993, 183; MDAPA 1988, 265). Das Milieu der Laguna de Gallocanta ist hypersalin (COMIN et al. 1983, 211). Aus den ungesättigten Zuflüssen in den See (Tab. 1) entsteht bei Lösungseinengung infolge starker Verdunstung eine von Na<sup>+</sup>-, Mg<sup>2+</sup>- und Cl<sup>-</sup>-Ionen dominierte Sole. Die SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Konzentrationen liegen unter 25 ppm. Die Gesamtkonzentrationen an gelösten Stoffen (TDS) betragen je nach Wasserstand zwischen 16 und 105 g/l (GRACIA PRIETO 1993, 195). Die Dominanz der Calcium- und Magnesium-Ionen im oberflächennahen Grundwasser weist darauf hin, daß die gelösten Stoffe im wesentlichen aus Lösungsprozessen in den anstehenden carbonatischen Gesteinen resultieren (GRACIA PRIETO 1990). Die vergleichsweise hohen Anteile der Nitrat- und Chlorid-Konzentrationen im oberflächennahen Grundwasser sind als Verschmutzungsindikatoren zu bewerten (HAMM et al. 1991).

Das Becken der Laguna de Gallocanta bildet eine Hochebene in ca. 1000 m NN, die umrahmenden Höhenzüge steigen bis auf 2200 m NN an. Das Becken der Laguna de Gallocanta nimmt eine Fläche von 531.6 km<sup>2</sup> ein. Die Lagunazo de Gallocanta bildet mit einer Höhenlage von 990 m NN den tiefsten Teil des

Seebeckens. Sie wird durch die Halbinseln Pico del Hacha im Osten und Pico de los Ojos im Westen von der Laguna Grande getrennt. Der Hauptteil des Sees, die Laguna Grande (991 m NN), erstreckt sich über ca. 5 km Länge von SE nach NW und ist maximal 2 km breit. Zum südöstlichen Teil des Sees, den Lagunazos (993 m NN), wird die Laguna Grande durch die NW-SE verlaufende Halbinsel Loma de Berueco im Osten und die in gleiche Richtung verlaufende Insel Loma de Bello abgeschlossen (Abb. 1). Die Laguna Grande ist im 20. Jahrhundert fünfmal ausgetrocknet (COMIN et al. 1990, 51), zuletzt von Frühjahr 1995 bis Herbst 1996. Im SE liegt in 1000 m NN die durch eine Schwemmfächeraufschüttung von der Laguna Grande abgetrennte La Lagunica, deren Seeboden trockenengefallen und ackerbaulich inwert gesetzt wird.

### 3 Methoden

Die Bohrung erfolgte an der topographisch tiefsten Stelle des Seebeckens der Laguna Grande mittels Einsatz eines modifizierten Kullenberglothes mit hydraulischen 'Core-Catcher'. Zu der Bohrung (UTM-Zone 30T, Rw. 627 200, Hw. 4537 000) wurde eine Korrelationsbohrung mit 5 m Horizontalversatz durchgeführt, um Informationslücken durch Kernversatz auszuschießen.

Neben der routinemäßigen Untersuchung des Sedimentgefüges wurde der Gesamtchemismus des gewonnenen Bohrgutes unter Einsatz der Röntgenfluorezensanalyse (SPECTRA 2000) bestimmt. Die qualitative Zusammensetzung der mineralogischen Hauptkomponenten wurde auf der Grundlage röntgendiffraktometrischer Untersuchungen von Pulverpräparaten ermittelt (DIFFRAC AT/ D 5000). Die Quantifizierung der Calcit- und Dolomit-Gehalte erfolgte durch Kalibrierung der Intensitäten (cps) der jeweiligen Bezugslinien mit der Intensität 100 über den Gehalt anorganischen Kohlenstoffs (BEBEHANI 1987, 94). Ergänzend wurden Dünnschliffanalysen durchgeführt.

### 4 Ergebnisse

In der Laguna Grande wurde im Beckentiefsten eine insgesamt 395 cm tiefe Bohrung abgeteuft. An der Bohrstelle wird der Seeboden periodisch überflutet. Bei den erbohrten Sedimenten handelt es sich im Hangenden um eine 95 cm mächtige Lage limnischer Sedimente, die über detritischem Material abgelagert ist. Diese hangenden, limnischen Sedimente sind von hellgrauer Farbe, die in den obersten Zentimetern in eine

<sup>1)</sup> Die Daten wurden freundlicherweise vom Servicio Meteorológico Territorial, Zaragoza, zur Verfügung gestellt.

Tab. 2: Laguna Grande: Mineralogische Zusammensetzung der limnischen Sedimente

Laguna Grande: Mineralogical composition of lacustrine sediments

Tiefe [cm]	Calcit	Dolomit	Gips	Halit	Quarz	Muskovit
-7,3	++		+++	++	+++	+
-9,8	++		+++	++	+++	+
-12,1	+		+++	+	+++	+
-14,5	+		++	++	+++	+
-17,9	++		+++	++	+++	+
-19,3	++		++	+	+++	+
-21,7	++	++	++	++	+++	+
-24,2		++	++		+++	+
-26,6	+	++	+++	+	+++	+
-29,0	+	++	+++	+	+++	+
-31,4		++	+++	+	+++	+
-33,8		++	+++	+	++	++
-36,2		++	+++	+	++	+
-38,6		++	+++	+	++	+
-41,0		++	+++	+	++	+
-43,4		++	+++	+	+	+
-48,3		++	+++	+	+	+
-50,7		++	+++	+	++	+
-53,1		+++	+++	+	+++	+
-55,6		+++	++	+	+++	+
-58,0		+++	++	+	+++	+
-60,4		+++	+	+	+++	+
-62,8		++	++	+	+++	+
-65,2		++	++	+	+++	+
-70,0		++	+	+	+++	+
-72,4		++	+	+	+++	+
-74,9		++	+	+	+++	+
-77,3		++	+	+	+++	+
-79,7		++	+	+	+++	+
-82,1		+++	+	+	+++	+
-84,5		+++	+	+	+++	+
-87,0		+++		+	+++	+
-89,4		+++		+	+++	
-91,8		+++		+	+++	+
-93,0		+++		+	+++	+
-95,0		+++		+	+++	+

+++ Hauptgemengteile

+ Spuren

++ Nebengemengteile

max. counts p.sec.

Schwarzfärbung übergeht. Das Substrat ist tonig, Schichtungsmerkmale sind makroskopisch nicht erkennbar.

Der Detritus im basalen Teil des Bohrkerns setzt sich im wesentlichen aus Fein- und Mittelkies zusammen, der in eine lehmige, vereinzelt in eine sandige Matrix eingebettet ist. Lokal kommen sehr gut sortierte Kieslagen, denen eine Matrix fehlt, vor. Es handelt sich hierbei um Sedimente, die wechselweise durch fluviale

Prozesse in einem Braided-River-System bzw. durch Murabgänge abgelagert wurden. GONZALES LOPEZ et al. (1983, 86) gehen davon aus, daß es sich um Sedimente handelt, die während kalt-arider Phasen des Pleistozäns infolge torrentieller Niederschlags- und Abflußereignisse abgelagert wurden. Es wird angenommen, daß auch die Abtrennung der La Lagunica von der Laguna Grande durch Dammaufschüttung infolge eines aus NE, aus dem Bereich des Cerro del Castillo

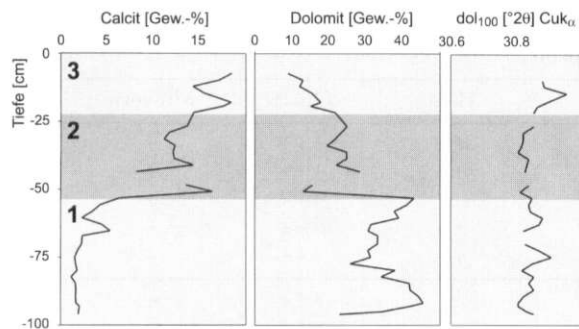


Abb. 2: Laguna Grande – limnische Sedimente: Verteilung der Calcit- und Dolomit-Gehalte im Sediment und Beugungswinkel des Dolomit-Hauptreflexes ( $dol_{100}$  [ $^{\circ}2\theta$ ]- $CuK_{\alpha}$ -Strahlung)

Laguna Grande – lacustrine sediments: Calcite and dolomite contents [weight-%] and location of the diffraction angle of dolomite's major diffraction peak ( $dol_{100}$  [ $^{\circ}2\theta$ ]- $CuK_{\alpha}$ -radiation)

und El Castillejo, kommenden Schlammstroms erfolgte.

Die hier vorgestellten Untersuchungen sollen sich auf die aufgeschlossenen limnischen Sedimente ( $\geq -95$  cm) konzentrieren. In den limnischen Sedimenten ist Quarz mineralogisches Hauptgemengteil (Tab. 2). Während die Dolomit-Anteile vom Liegenden zum Hangenden zurückgehen (Abb. 2), sind die Sedimente durch eine vom Liegenden zum Hangenden zunehmende Bedeutung von Gips gekennzeichnet. Oberhalb  $-55$  cm ist Gips neben Quarz mineralogisches Hauptgemengteil. Die Gipse kommen im wesentlichen als idiomorphe Minerale vor, die entlang von Lösungsbahnen und Hohlräumen ausgeschieden sind. Oberhalb  $-23$  cm Tiefe kommt Dolomit nur noch als Nebengemengteil vor, während der unterhalb  $-55$  cm Tiefe röntgen-diffraktometrisch nur in Spuren nachweisbare Calcit hier ebenfalls als Nebengemengteil auftritt. Weiterhin nehmen zum Hangenden die Halit-Konzentrationen zu und erreichen in den obersten 20 cm des Sedimentkörpers Nebengemengteilcharakter ( $> 10\%$ ) (Tab. 2). Die Ganglinie der Dolomit-Bezugslinie mit der Intensität 100 ( $dol_{100}$  [ $^{\circ}2\theta$ ]- $CuK_{\alpha}$ ) schwankt zwischen  $[30.804; 30.953]$   $^{\circ}2\theta$ - $CuK_{\alpha}$  und zeigt zum Hangenden hin einen positiven Trend (Abb. 2). Unterhalb  $-60$  cm Tiefe ist die mittlere Lage der Dolomit-Bezugslinie mit der Intensität 100 bei  $\mu_1 = 30.847$  [ $^{\circ}2\theta$ ]- $CuK_{\alpha}$  ( $std._1 = 0.028$ ,  $n_1 = 14$ ), verschiebt sich jedoch in den Sedimenten zwischen  $-60$  und  $-22$  cm Tiefe auf der  $^{\circ}2\theta$ -Skala nach links ( $\mu_2 = 30.830$  [ $^{\circ}2\theta$ ]- $CuK_{\alpha}$ ,  $std._2 = 0.014$ ,  $n_2 = 13$ ). In den hangenden Sedimenten verschiebt sich die mittlere Lage der Dolomit-Bezugslinie mit der Intensität 100

auf der  $^{\circ}2\theta$ - $CuK_{\alpha}$ -Skala wieder nach rechts auf  $\mu_3 = 30.882$  [ $^{\circ}2\theta$ ]- $CuK_{\alpha}$  ( $std._3 = 0.035$ ,  $n_3 = 6$ ).

Der pH-Wert der limnischen Sedimente liegt im alkalischen Bereich (Abb. 3). In Kernabschnitt 1 liegen die pH-Werte noch unter 9, steigen aber in den Kernabschnitten 2 und 3 deutlich an und schwanken hier um pH 9.5 und erreichen an der Sedimentoberfläche maximale Werte bei pH 10.1. Demgegenüber bleiben die Leitfähigkeiten der wassergesättigten Lösung in den Kernabschnitten 1 und 2 des Profils mit 5–7 mS relativ stabil und steigen erst im obersten Kernabschnitt (3) kontinuierlich bis auf 23 mS an.

Eine weiterführende stratigraphische Differenzierung der limnischen Sedimente ergibt sich aus der Analyse der Chemographen (Abb. 4). Die Differenzierung der limnischen Sedimente wird über eine Klassifikation unter Verwendung der Variablen (=Inhaltsstoffe)  $SiO_2$  [Gew.-%] und  $P_2O_5$  [Gew.-%] durchgeführt. Kieselsäure wird dem Seesystem als Detritus mit Oberflächenzuflüssen oder in aquatischer Lösung mit dem Grundwasserzufluß zugeführt, während Phosphorsäure bzw. Phosphor(V)-oxid vor allem in Biomasse gebunden ist und autochthon, infolge der Akkumulation von Phyto- und Zooplankton, angereichert wird oder dem Seesystem als organischer Detritus zugeführt wird. Die unterschiedliche Herkunft beider Inhaltsstoffe bedingt die Unabhängigkeit beider Variablen. Die Verteilung der ( $SiO_2; P_2O_5$ )-Wertepaare (Abb. 5) erlaubt eine Zweiteilung in je eine Gruppe

- mit hohen  $SiO_2$ - und niedrigen  $P_2O_5$ -Gehalten ( $n=23$ ),
- mit niedrigen  $SiO_2$ - und hohen  $P_2O_5$ -Gehalten ( $n=13$ ).

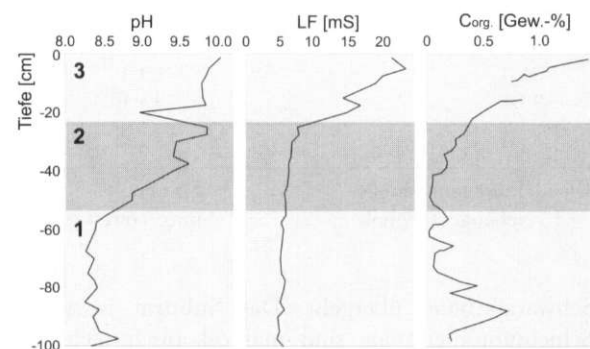


Abb. 3: Laguna Grande: pH-Wert, Leitfähigkeit des Wassersättigungsextraktes (LF [mS]) und Gehalt organischen Kohlenstoffs ( $C_{org}$  [Gew.-%]) in den limnischen Sedimenten

Laguna Grande: pH-value, electric conductivity (ec [mS]) and organic carbon content [weight-%] of lacustrine sediments

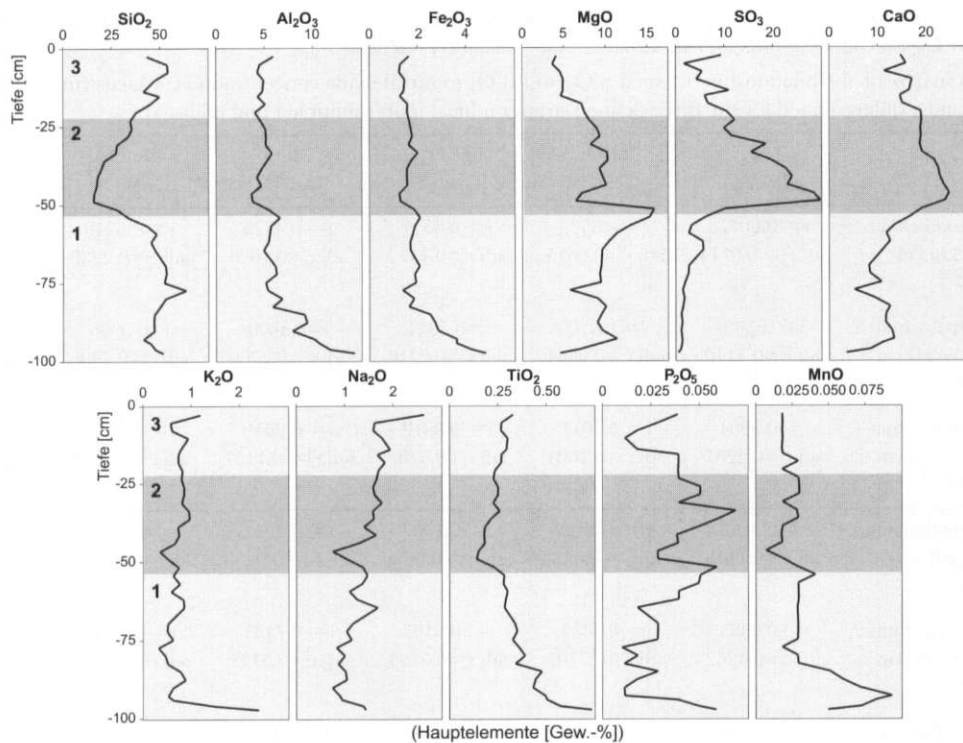


Abb. 4: Laguna Grande: Chemische Zusammensetzung der limnischen Sedimente  
Laguna Grande: Chemical composition of lacustrine sediments

Über die Diskriminanzfunktion

$$Y = -0.29500 \cdot P_2O_5 \text{ [Gew.-%]} + 0.91883 \cdot SiO_2 \text{ [Gew.-%]} \quad (Gl. 1)$$

kann in 97.2% aller Fälle eine richtige Gruppenzuordnung der (SiO<sub>2</sub>;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-Wertepaare vorgenommen werden. Die Verteilung beider Gruppen auf den Kernausschnitt der limnischen Sedimente ergibt eine stratigraphische Dreiteilung:

- 1) [-95;-56] cm: hohe SiO<sub>2</sub>- und niedrige P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte,
- 2) [-55;-24] cm: niedrige SiO<sub>2</sub>- und hohe P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte,
- 3) [-23; 0] cm: hohe SiO<sub>2</sub>- und niedrige P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte.

Diese Differenzierung kann über den Vergleich der Mittelwerte bestätigt werden. Der mittlere P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt in den Kernabschnitten 1 und 3 ist mit μ<sub>1/3</sub> = 0.0278 [Gew.-% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>] (s<sub>1/3</sub> = 0.013, n<sub>1/3</sub> = 21) niedriger als der mittlere P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt in Kernabschnitt 2 (μ<sub>2</sub> = 0.0462 [Gew.-% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>], s<sub>2</sub> = 0.012, n<sub>2</sub> = 15) (α < 0.001).

Die entsprechende Überprüfung für den C<sub>org</sub>-Gehalt [Gew.-%] der Sedimente (Abb. 3) zeigt, daß in den hangenden Sedimenten des Kernabschnittes 3 höhere C<sub>org</sub>-Gehalte für μ<sub>3</sub> = 0.8867 [Gew.-% C<sub>org</sub>] (n<sub>3</sub> = 6) er-

reicht werden als in den liegenden Sedimenten (μ<sub>1,2</sub> = 0.1438 [Gew.-% C<sub>org</sub>], n<sub>1,2</sub> = 26) (α < 0.001). Weiterhin korrelieren die C<sub>org</sub>-Gehalte in den Sedimenten von Kernabschnitt 3 positiv mit der Tiefe [cm] mit r = 0.8676 > r<sub>4,05</sub> = 0.8114, so daß sich der C<sub>org</sub>-Gehalt der limnischen Sedimente für eine Diskriminanzanalyse mit dem Ziel einer stratigraphischen Kerndifferenzierung als nicht geeignet erweist.

Bei der Analyse der Chemographen fällt zunächst der gegenläufige Verlauf der Ganglinien für den SiO<sub>2</sub>- und den CaO-Gehalt auf, der sich über den gesamten Kernausschnitt oberhalb -95 cm Tiefe anhand der Regressionsgleichung:

$$SiO_2 \text{ [Gew.-%]} = 94.158369 - 2.260642 \cdot CaO \text{ [Gew.-%]} \quad (Gl. 2)$$

n = 36, r = 0.93101, adj. r<sup>2</sup> = 0.86287

beschreiben läßt. Die Erklärung der Gesamtvarianz verbessert sich um weitere 4.9%, wenn der SiO<sub>2</sub>-Gehalt der Sedimente in Beziehung zu der Summe der die Carbonate und Sulfate bildenden Calcium- und Magnesium-Ionen (ΣCaO, MgO) gesetzt wird

$$SiO_2 \text{ [Gew.-%]} = 106.583180 - 1.1015238 \cdot \Sigma CaO, MgO \text{ [Gew.-%]} \quad (Gl. 3)$$

n = 36, r = 0.95758, adj. r<sup>2</sup> = 0.91192.

Tab. 3: Korrelationsmatrix für die Beziehung zwischen Kieselsäure- und Phosphor(V)-oxid- zu den Metalloxid-Gehalten in den limnischen Sedimenten der Laguna Grande, differenziert nach Kernabschnitten (multiple  $r$  und adj.  $r^2$ )

Correlation matrix of the relationship between  $\text{SiO}_2$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$  to metal oxide concentrations of lacustrine sediments from Laguna Grande, differentiated for the three defined stratigraphical units (multiple  $r$  and adjusted  $r^2$ )

		$\text{TiO}_2$ [Gew.-%]	$\text{Al}_2\text{O}_3$ [Gew.-%]	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ [Gew.-%]	MnO [Gew.-%]	$\text{K}_2\text{O}$ [Gew.-%]	$\text{Na}_2\text{O}$ [Gew.-%]
$\text{SiO}_2$ [Gew.-%]	Kernabschnitt 3; [-23;0] cm n=7	$r=-0.0077$ adj. $r^2=-0.0714$	$r=-0.3522$ adj. $r^2=0.0615$	$r=-0.4517$ adj. $r^2=0.1472$	$r=-0.4723$ adj. $r^2=0.1676$	$r=-0.5249$ adj. $r^2=0.2238$	$r=-0.4124$ adj. $r^2=0.1108$
	Kernabschnitt 2; [-55;-24] cm n=15	$r=0.8589$ adj. $r^2=0.7140$	$r=0.3797$ adj. $r^2=0.0664$	$r=0.5354$ adj. $r^2=0.2218$	$r=0.5800$ adj. $r^2=0.2760$	$r=0.5906$ adj. $r^2=0.2896$	$r=0.6590$ adj. $r^2=0.3828$
	Kernabschnitt 1; [-95;-56] cm n=14	$r=-0.5984$ adj. $r^2=0.2297$	$r=-0.7071$ adj. $r^2=0.4001$	$r=-0.8012$ adj. $r^2=0.5702$	$r=-0.2650$ adj. $r^2=-0.1157$	$r=-0.6645$ adj. $r^2=0.3298$	$r=-0.6872$ adj. $r^2=0.3667$
$\text{P}_2\text{O}_5$ [Gew.-%]	Kernabschnitt 3; [-23;0] cm n=7	$r=-0.4169$ adj. $r^2=0.1148$	$r=-0.1462$ adj. $r^2=-0.0485$	$r=-0.1007$ adj. $r^2=-0.0606$	$r=-0.2042$ adj. $r^2=-0.0268$	$r=0.3535$ adj. $r^2=0.06248$	$r=0.5755$ adj. $r^2=0.2834$
	Kernabschnitt 2; [-55;-24] cm n=15	$r=-0.6885$ adj. $r^2=0.4262$	$r=-0.8884$ adj. $r^2=0.7701$	$r=-0.9105$ adj. $r^2=0.8134$	$r=-0.7435$ adj. $r^2=0.5122$	$r=-0.7603$ adj. $r^2=0.5398$	$r=0.4351$ adj. $r^2=0.1156$
	Kernabschnitt 1; [-95;-56] cm n=14	$r=-0.0256$ adj. $r^2=0.1992$	$r=0.2998$ adj. $r^2=0.0922$	$r=-0.2741$ adj. $r^2=-0.1098$	$r=0.4148$ adj. $r^2=0.0065$	$r=-0.1325$ adj. $r^2=-0.1789$	$r=0.3548$ adj. $r^2=-0.0490$

Entsprechend zu diesem inversen Verlauf beider Chemographen geht der Einbruch des  $\text{SiO}_2$ -Graphen in etwa –50 cm Tiefe mit einem Anstieg der CaO- und MgO-Gehalte im Sediment einher.

Die Beziehung zwischen den verschiedenen Metalloxid-Gehalten ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MnO,  $\text{K}_2\text{O}$  [Gew.-%]) unterliegt in den limnischen Sedimenten einer starken Linearität und ist in allen Fällen positiv korreliert ( $\alpha < 0.001$ ). Eine Differenzierung der statistischen Beziehung der Metalloxid-Gehalte nach der Zuordnung zu den drei Kernabschnitten ergibt, daß  $\text{TiO}_2$ -,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalte in allen drei Kernabschnitten hochsignifikant miteinander korreliert sind ( $\alpha < 0.001$ ), während die gleiche Überprüfung für die  $\text{K}_2\text{O}$ -,  $\text{Na}_2\text{O}$ - und MnO-Gehalte schwache bis fehlende Beziehungen zu den  $\text{TiO}_2$ -,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalten ergibt ( $\alpha > 0.05$ ). Zusätzlich werden in Tabelle 3 die statistischen Beziehungen der  $\text{SiO}_2$ - bzw.  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalte zu den Metalloxid-Gehalten für die einzelnen Kernabschnitte überprüft und bestätigen ebenfalls die vorgewommene stratigraphische Differenzierung:

Die  $\text{P}_2\text{O}_5$ - und Metalloxid-Gehalte in den Kernabschnitt 2 zugeordneten Proben sind negativ korreliert ( $\alpha < 0.01$ ), während die entsprechenden Beziehungen zwischen  $\text{SiO}_2$ - und Metalloxid-Gehalten einem positi-

ven Trend unterliegen ( $\alpha < 0.01$ ). Für die den Kernabschnitt 1 und 3 zugeordneten Proben ist ein solcher Zusammenhang nicht nachweisbar ( $\alpha > 0.05$ ). Darüber hinaus zeigt die Überprüfung der mittleren Metalloxid-Konzentrationen im Sediment ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  [Gew.-%]), daß die Sedimente in Kernabschnitt 1 in allen Fällen höhere Werte aufweisen ( $\alpha < 0.01$ ) als die Sedimente in Kernabschnitt 2. Demgegenüber ist der Unterschied zu den Sedimenten in Kernabschnitt 3 weniger ausgeprägt, hier sind lediglich die  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - und  $\text{TiO}_2$ -Gehalte höher als in Kernabschnitt 2 ( $\alpha < 0.05$ ). Ergänzend zu der Darstellung der Chemographen (Abb. 4) wurden für die drei definierten Kernabschnitte die  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -MnO-Verhältnisse berechnet. In Kernabschnitt 2 ist das mittlere  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -MnO-Verhältnis mit  $\mu_2=60.067$  (std. $_2=8.415$ ,  $n_2=15$ ) höher als in den liegenden Sedimenten des Kernabschnitts 1 ( $\mu_1=51.630$ , std. $=6.959$ ,  $n=14$ ) und den hangenden Sedimenten des Kernabschnitts 3 ( $\mu_3=57.976$ , std. $_3=6.166$ ,  $n_3=7$ ) ( $\alpha < 0.05$ ).

Weiterhin unterliegen die Natriumoxid-Gehalte im Sediment zum Hangenden einem positiven Trend:

$$\text{Na}_2\text{O} [\text{Gew.-%}] = 2.00591 + 0.01268 \cdot \text{Tiefe} [\text{cm}] \quad (\text{Gl. 4})$$

$$n=36, r=0.83018, \text{adj. } r^2=0.68159.$$

Tab. 4: Zusammenfassende Übersicht über die mineralogischen und geochemischen Eigenschaften der limnischen Sedimente der Laguna Grande, differenziert nach Kernabschnitten (Abkürzungen:  $M_x^+O_x$  für Metalloxide)

Summary of mineralogical and chemical characters of lacustrine sediments from Laguna Grande, subdivided by core sections 1–3 (abbreviation:  $M_x^+O_x$  for metal oxide)

Mineralogie		Geochemie	Tiefe	Kernabschnitt
Hauptgemengteil:	Gips, Quarz	$\mu_{P_2O_5}=0.029$ [Gew.-%] $\mu_{SiO_2}=52.641$ Gew.-%	0 cm	3
Nebengemengteil:	Calcit, Halit	$P_2O_5=f\{M_x^+O_x\}$ (+/-); $\alpha>0.05$		
Spurengemengteil:	Dolomit	$SiO_2=f\{M_x^+O_x\}$ (+/-); $\alpha>0.05$		
dol100=	$30.880 \text{ } ^\circ 2\theta \text{ Cuk}_\alpha$	$Fe_2O_3:MnO$ -Verhältnis =57.976 $\Sigma(CaO,MgO):SiO_2$ -Verhältnis $\leq 1$	-23 cm	
Hauptgemengteil:	Gips	$\mu_{P_2O_5}=0.047$ Gew.-% $\mu_{SiO_2}=32.457$ Gew.-%	-24 cm	2
Nebengemengteil:	Quarz, Dolomit	$P_2O_5=f\{M_x^+O_x\}$ (-); $\alpha<0.01$		
Spurengemengteil:	Halit	$SiO_2=f\{M_x^+O_x\}$ (+); $\alpha<0.01$		
dol100=	$30.83 \text{ } ^\circ 2\theta \text{ Cuk}_\alpha$	$Fe_2O_3:MnO$ -Verhältnis =60.067 $\Sigma(CaO,MgO):SiO_2$ -Verhältnis $>1$	-55 cm	
Hauptgemengteil:	Quarz, Dolomit	$\mu_{P_2O_5}=0.024$ Gew.-% $\mu_{SiO_2}=54.313$ Gew.-%	-56 cm	1
Nebengemengteil:	–	$P_2O_5=f\{M_x^+O_x\}$ (+/-); $\alpha>0.05$		
Spurengemengteil:	Gips, Halit	$SiO_2=f\{M_x^+O_x\}$ (+/-); $\alpha<>0.05$		
dol100=	$30.847 \text{ } ^\circ 2\theta \text{ Cuk}_\alpha$	$Fe_2O_3:MnO$ -Verhältnis =51.630 $\Sigma(CaO,MgO):SiO_2$ -Verhältnis $\leq 1$	-95 cm	

In Tabelle 4 sind die mineralogischen und geochemischen Eigenschaften der für die Sedimente der Laguna Grande ausgegliederten Kernabschnitte zusammenfassend dargestellt.

## 5 Diskussion

### 5.1 Wasserhaushalt

Die Laguna Grande ist ein ephemerer See, dessen rezente Sedimentationsbedingungen durch den Wasserhaushalt im Becken der Laguna de Gallocanta gesteuert werden. Die Analyse des aktuellen Wasserhaushalts der Laguna de Gallocanta zeigt, daß die wesentlichen Komponenten der Wasserversorgung die Zuflüsse aus dem oberflächennahen Grundwasser und die Oberflächenabflüsse sind. Ergiebigkeit und Frequenz der Starkregenereignisse mit Oberflächenabfluß sind für die verschiedenen Seephase verantwortlich. Treten während mehrerer aufeinanderfolgender Jahre keine Starkregen mit Oberflächenabfluß auf, trocknet die Laguna de Gallocanta aus, treten vermehrt Starkregen mit daran geknüpften Oberflächenabflüssen auf, beginnt sie sich zu füllen (KUHN et al. 1997). Die Grundwasserspeisung erfolgt im wesentlichen aus den mesozoischen Klüftgrundwasserleitern im Westen des Einzugsgebietes, während die im Osten und Süden des Einzugsgebietes anstehenden paläozoischen Quarzite

keine Aquifereigenschaften haben. Weiterhin kommt den ausgedehnten quartären Schotterablagerungen im Fußbereich der aus paläozoischen Quarziten aufgebauten Höhenzüge eine wichtige Rolle als Grundwasserspeicher zu (IGME 1983). Die Oberflächenabfluß-Speisung erfolgt aus diesem Bereich periodisch, während die im Westen anstehenden mesozoischen Kalksteine von arheischen, episodisch abgehenden Barrancos entwässert werden.

Die Dünnschliffanalyse zeigt, daß sich die Prozesse der Remobilisierung durch die Bewegungen des Wasserkörpers auf die obersten 10 cm des Sedimentkörpers beschränken (SMOOT a. LOWENSTEIN 1991, 210). Infolge der Umlagerungsprozesse kommen v. a. die in ungestörten Bereichen idiomorph und hypidiomorph ausgebildeten Gipse als Klastite mit abgerundeten Kanten vor. Demnach erfolgt die Gipsausfällung vorwiegend sekundär bei Seeaustrocknung, vielfach entlang von Rissen und Lösungsbahnen, und ist durch die Remobilisierungsprozesse leicht verschleppt.

### 5.2 Organischer Kohlenstoff vs. Phosphor

Die in den drei Kernausschnitten stark variierenden  $P_2O_5$ -Gehalte deuten auf einen wiederholten Wechsel des Seetypus in der Laguna Grande hin. Phosphor-Akkumulation findet überwiegend infolge von Biomassenproduktion statt, entweder autochthon im limni-



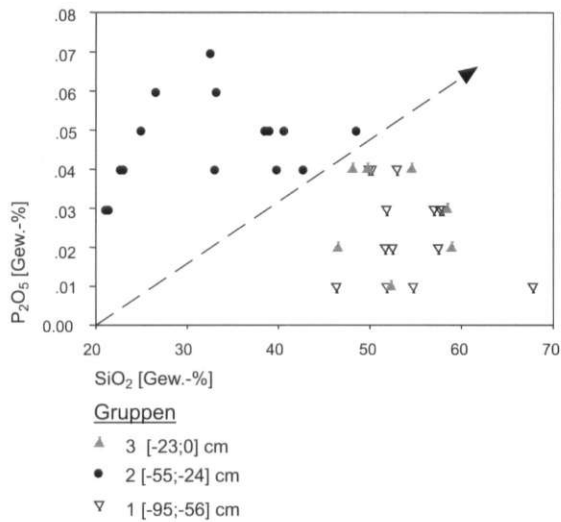


Abb. 5: Laguna Grande: Scatter-Plot zur Verteilung der  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalte in den limnischen Sedimenten

Laguna Grande: Scatter-plot of lacustrine sediment's  $\text{SiO}_2$ - and  $\text{P}_2\text{O}_5$ -content

schen Ökosystem (BIRCH et al. 1980) oder allochthon durch Zufuhr von Bestandsabfällen aus dem Einzugsgebiet. Eine Anreicherung von  $\text{P}_2\text{O}_5$  aus der Zufuhr von anorganischem Detritus aus dem anstehenden Gestein des Einzugsgebietes kann aufgrund der niedrigen  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalte in den paläozoischen Quarziten ( $\mu = 0.014$  [Gew.-%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ],  $n=7$ ) und mesozoischen Kalken ( $\mu = 0.011$  [Gew.-%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ],  $n=18$ ) ausgeschlossen werden. Phosphor kann in reduzierendem Milieu bei relativ hohen Temperaturen Verbindungen mit verschiedenen Metallen eingehen und bildet relativ schwerlösliche Phosphide (EMSLEY a. HALL 1976, 22; ECKERT et al. 1997, 408), oder führt bei der Reaktion mit Calcit zur Neubildung von Apatit (STUMM a. LECKIE 1971). Demgegenüber werden Phosphate unter oxidierenden Bedingungen nahezu vollständig zersetzt (HADAS a. PINKAS 1997, 678). In den Sedimenten eines ephemeren Sees fehlt deshalb Phosphor weitgehend. Die erhöhten Phosphor-Gehalte in Kernabschnitt 2 deuten dementsprechend auf einen perennierenden See während der Sedimentation hin. Die Remobilisierung von Phosphor ist dabei grundsätzlich zu berücksichtigen, jedoch bestehen gegensätzliche Ansichten, ob es bei zunehmender Salinität der wässrigen Lösung zu einer verlangsamt (ATKINSON 1987, 345) oder beschleunigten (CLAVERO et al. 1990, 96) Remobilisierung von gelöstem Phosphor aus dem Seesediment kommt. Bei der Bewertung der erhöhten Phosphor(V)-oxid-Gehalte in den jüngsten Sedimenten ( $\geq -23$  cm) ist auch die sehr hohe aktuelle Phosphorzufuhr durch Düngemiteleintrag (HAMM et al. 1991) und durch die

Exkrementen der im Einzugsgebiet der Laguna de Gallocanta seit etwa Mitte der 70er Jahre überwinterten Kraniche zu berücksichtigen, so daß in diesem Fall keine Ableitungen auf das Sedimentationsmilieu möglich sind.

Die fehlenden statistischen Beziehungen zwischen den beiden aus der Biomassenproduktion hervorgehenden Stoffen  $\text{C}_{\text{org}}$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$  sind auf die für beide Komponenten unterschiedlichen Abbauprozesse zurückzuführen. Die Gehalte organischen Kohlenstoffs im Sediment sind mit  $\mu_{\text{C}_{\text{org}}} = 0.1966$  [Gew.-%] ( $n=32$ ) sehr niedrig, was auf frühdiagenetische Abbauprozesse organischer Substanz zurückzuführen ist (MEYERS a. ISHIWATARI 1993, 189), die sowohl im aeroben als auch in anaeroben limnischen Milieu erfolgen und zur vollständigen Aufzehrung des organischen Kohlenstoffs führen können (EVANS a. KIRKLAND 1988, 273). Hier von werden die leicht wasserlöslichen Komponenten wie Chlorophyll und Karotinoide stärker betroffen als die schwerer löslichen Bestandteile höherer Pflanzen (Zellulose, Chitin, Lignin) (VALLENTYNE 1962, 430). Licht, hohe Temperaturen und Sauerstoffzufuhr beschleunigen die Abbauprozesse organischer Substanz (VALLENTYNE 1962, 429), so daß in ephemeren Seen der organische Kohlenstoff im oberflächennahen Sediment verstärkt abgebaut werden kann. Die in salinen Milieus hohe Primärproduktion (EVANS a. KIRKLAND 1988, 259) bewirkt somit nicht konsequenterweise einen Anstieg der Gehalte organischen Kohlenstoffs im Sediment. Die oberhalb  $-22$  cm mit abnehmender Tiefe kontinuierlich bis auf  $1.33$  [Gew.-%] ansteigenden  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte bestätigen diese Annahme eines frühdiagenetischen Abbaus organischen Kohlenstoffs (MEYERS a. ISHIWATARI 1993, 189).

### 5.3 $\Sigma(\text{CaO}, \text{MgO})$ - $\text{SiO}_2$ -Verhältnis

Ein weiteres Kriterium zur Einschätzung der Wasserhaushaltsbilanz im Becken der Laguna Grande ist das Verhältnis der Kieselsäure-Gehalte der Sedimente zu den Gehalten an Carbonaten bzw. Sulfaten (Abb. 4, Abb. 6). Die Laguna Grande liegt unmittelbar am Fuß eines Ausläufers des Iberischen Randgebirges, aufgebaut aus paläozoischen Quarziten (hydraulischer Gradient,  $2.8$ – $3.2^\circ$ ). Weite Bereiche der Laguna Grande, v. a. im östlichen und südöstlichen Uferbereich, werden von quartären, fein- bis grobklastischen Sedimenten umsäumt (Abb. 1). Hieraus ergibt sich, daß an silikatischen Mineralen reiches Lockermaterial in unmittelbarer Nähe des Sees ubiquitär vorkommt und zur Ablagerung vielfach nur eine Umlagerung über kurze Distanz erforderlich ist – Prozesse, die unter beinahe allen Klimabedingungen stattfinden können.

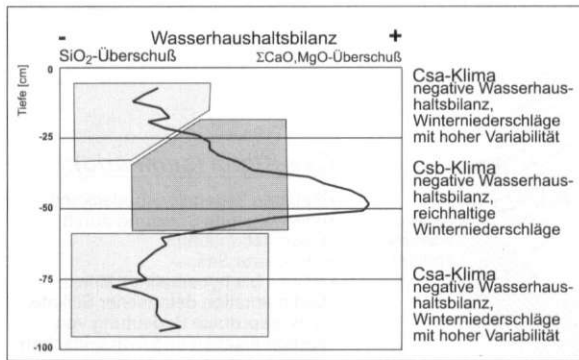


Abb. 6: Laguna Grande – limnische Sedimente: Modellierung des Wasserhaushaltes ( $\Sigma(\text{CaO}, \text{MgO})\text{-SiO}_2$ -Verhältnis für carbonatisch gebundenes Calcium und Magnesium)

Laguna Grande – lacustrine sediments: modelling of water budget ( $\Sigma(\text{CaO}, \text{MgO})\text{-SiO}_2$ -ratio for carbonate bounded calcium and magnesium)

Die carbonat- und sulfathaltigen Ausgangsgesteine finden sich demgegenüber im südwestlichen Einzugsgebiet der Laguna Grande, mit horizontalen Distanzen von bis zu 10 km Entfernung. Sulfathaltige Sedimente stehen weiterhin im Liegenden der quartären Beckenfüllungen in den das Becken der Laguna de Gallocanta abdichtenden Keupertonen und ihren tertiären Verwitterungs- und Umlagerungsprodukten an (COMIN et al. 1983, 209). Das hydraulische Gefälle aus diesem südwestlichen und westlichen Bereich des Einzugsgebietes beträgt bei einem Höhenunterschied von ca. 100 m nicht mehr als etwa 1.2–1.5° (Abb. 7), so daß trotz der hohen hydraulischen Leitfähigkeit in den Klüften der anstehenden jurassischen und kretazischen Kalke die Fließgeschwindigkeiten nur gering sind. Die Ablagerung erhöhter Konzentrationen carbonatischer und sulfatischer Sedimente in der Laguna Grande setzt mithin entsprechende Lösungs- und Transportprozesse im Einzugsgebiet voraus, die unter den gegenwärtigen Wasserhaushaltsbedingungen (Csa-Klima nach Köppen) nicht gegeben sind (TRUDGILL, LAIDLAW a. SMART 1980; TRUDGILL, LAIDLAW a. WALKER 1980). Geringe Grundwasserneubildungsraten bei negativer Wasserhaushaltsbilanz (KUHN et al. 1997; ECHEVERRÍA a. LONGARES 1996) führen zwar im Seebecken zu einer Lösungsanreicherung, jedoch bleibt der Eintrag von quarzitischem Detritus infolge torrentieller Abflüsse aus den aus paläozoischem Gestein aufgebauten Höhenzügen dominierend (Abb. 7). Die  $\Sigma(\text{CaO}, \text{MgO})\text{-SiO}_2$ -Verhältnisse in den aufgeschlossenen Sedimenten lassen auf derartige Umweltbedingungen sowohl während der Sedimentation von Kernabschnitt 1 als auch von Kernabschnitt 3 rückschließen (Abb. 6). Rezent wird dieser subaerische Materialeintrag in die Laguna

Grande durch die intensive landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet verstärkt (DUNNE et al. 1991; KRUMMSDORF a. BEER 1965; SAUNDERS a. YOUNG 1983).

Der in der Tiefe von –55 bis –24 cm beobachtete Anstieg der Calcium-, Magnesium- und Schwefelverbindungen im Sediment (Abb. 4) wird umgekehrt mit einer Phase ausgeglichener Wasserhaushalts-Bedingungen gleichgesetzt. Mit abnehmender Häufigkeit torrentieller Abflüsse – und damit verminderten Eintrags detritischer Quarze aus den umgebenden paläozoischen Höhenzügen – und regelmäßigerer Zuflüsse aus dem durch Kalksteinvorkommen geprägten westlichen Teil des Einzugsgebietes, nimmt der Anteil carbonatischer Ablagerungen in der Laguna Grande zu (Kernabschnitt 2).

#### 5.4 Statistische Beziehungen zwischen den Oxid-Gehalten

Semi-humide Klimabedingungen und eine ausgeglichene Wasserhaushaltsbilanz führen im Vergleich zu semi-ariden Klimabedingungen zu zunehmenden chemischen Verwitterungsraten und zu einer Intensivierung bodenbildender Prozesse (CHESWORTH 1992; KRAUSKOPF 1967). Der Eintrag gelösten Eisens, Aluminiums, Kaliums und Titans infolge chemischer Verwitterung wird zunehmen, jedoch werden diese Beträge stets von untergeordneter Bedeutung bleiben. Auch während semi-humider oder humider Phasen wird der Eintrag von Metalloxiden im wesentlichen durch die Zufuhr von Detritus gesteuert (REID et al. 1981). Im Becken der Laguna de Gallocanta führt jedoch die in feuchteren Phasen gleichzeitig verstärkte Ausfällung von Carbonaten (s. o.) insgesamt zu einer Konzentrationsabnahme der Metalloxid-Gehalte (Kernabschnitt 2) im Vergleich zu den liegenden und hangenden Sedimenten (Kernabschnitte 1 und 3) (Tab. 4).

Die engen statistischen Beziehungen zwischen Kieselsäure- und Metalloxid-Gehalten in den Sedimenten von Kernabschnitt 2 betonen die Bedeutung von Verwitterungs- und Bodenbildungsprozessen als Bestandteil des geomorphologischen Prozeßgefüges. Darüber hinaus deutet der positive Trend dieser Beziehungen auf die überwiegende Herkunft der in den limnischen Sedimenten abgelagerten Metalloxide aus der Verwitterung und Abtragung der paläozoischen Quarzite und der quartären, quarzitreichen Schwemmfächerablagerungen hin. Infolge chemischer Verwitterung kommt es zu einer vertikalen chemischen Differenzierung der Bodenprofile, ein Effekt, der um so ausgeprägter wird, je intensiver die chemische Verwitterung ist (KRAUSKOPF 1967, 81). Erhöhte Raten chemischer Verwitterung und niedrige Abtragungsraten infolge erhöhter

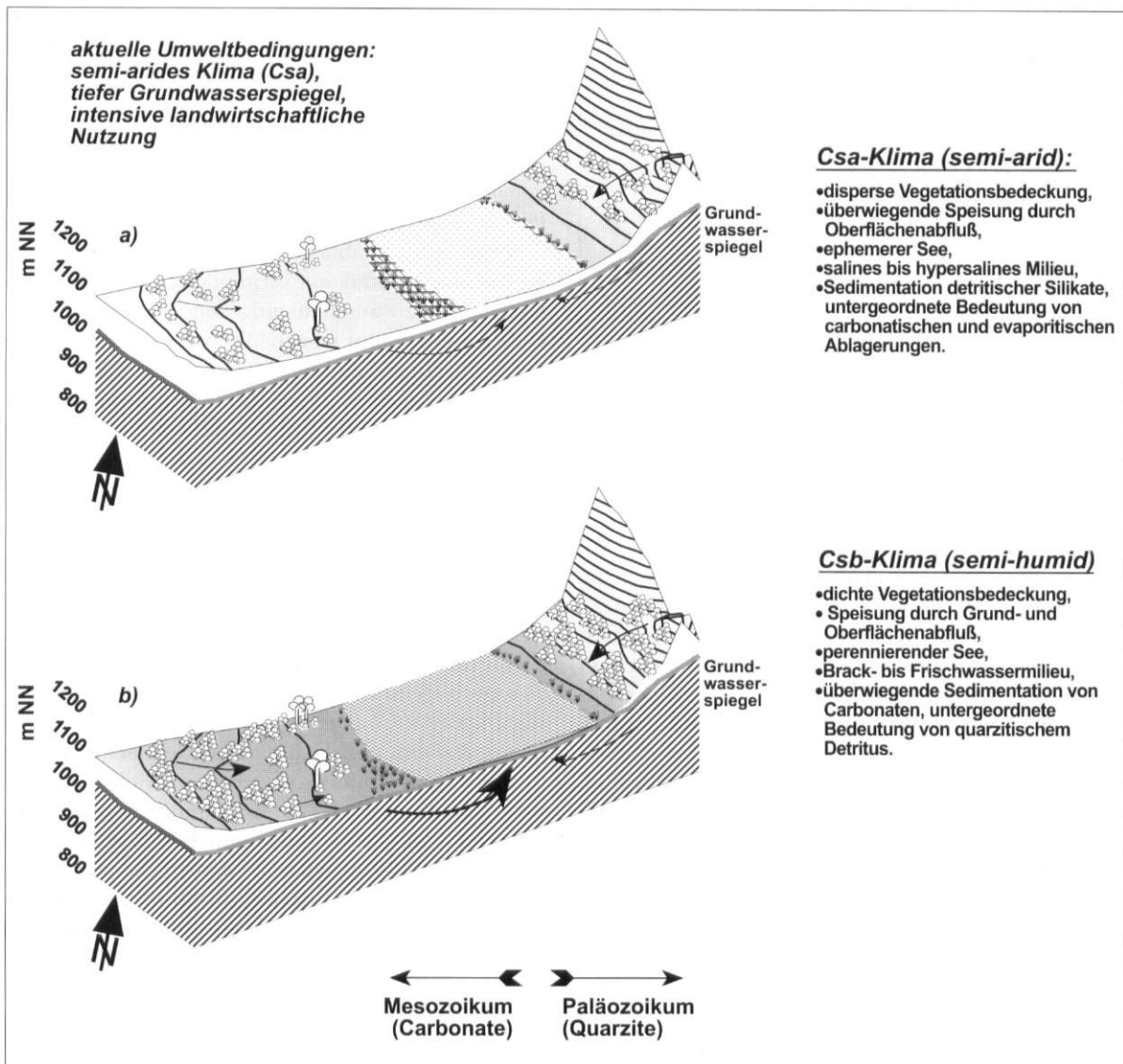


Abb. 7: Rekonstruktion des Klimaeinflusses auf die Umwelt- und Ablagerungsbedingungen im Becken der Laguna de Gallo-canta: (a) semi-arides Klima (Csa nach Koeppen) und (b) semi-humides Klima (Csb nach Koeppen)

Reconstruction of climatic influence on environmental and depositional conditions in the basin of the Laguna de Gallo-canta: (a) sub-arid (Csa after Koeppen) and (b) sub-humid (Csb after Koeppen) climatic conditions

Vegetationsdichte führen deshalb zur Ablagerung limnischer Sedimente, deren chemische Eigenschaften mit den Bodenbildungsbedingungen im Einzugsgebiet korrespondieren: Mit zunehmender Verwitterungs- und Bodenbildungsintensität kommt es zu einer zunehmenden (chemischen) Profildifferenzierung, die sich infolge sukzessiver Abtragung in den korrelierten Sedimenten in einer engen statistischen Beziehung zwischen den (boden-)chemischen Parametern äußert. Im Gegensatz hierzu bedeuten unter semi-ariden Klimabedingungen

eingeschränkte Verwitterungs- und Bodenbildungsprozesse ein geringeres Maß vertikaler (chemischer) Profildifferenzierung (CHESWORTH 1992; KRAUSKOPF 1967), einhergehend mit hohen Abtragsraten (DUNNE et al. 1991, 2273). Die unter solchen semi-ariden Umweltbedingungen im Seebecken der Laguna Grande abgelagerten Sedimente haben aus diesem Grunde ‚zufällige‘ chemische Eigenschaften; statistische Beziehungen zwischen den einzelnen chemischen Parametern können auftreten, sind jedoch zufällig und können nicht

Tab. 5: Zusammenfassende Übersicht über die Rekonstruktion des holozänen Landschaftshaushaltes im Einzugsgebiet der Laguna Grande anhand mineralogischer und geochemischer Eigenschaften der limnischen Sedimente

Summary of reconstruction of environmental conditions during deposition of lacustrine sediments from Laguna Grande (subdivided by core sections 1–3)

Limnisches Milieu	Umweltbedingungen im Einzugsgebiet	Tiefe	Kernabschnitt
ephemerer See mit salinem bis hypersalinem Milieu	niedrige Raten chemischer Verwitterung und Bodenbildung, hohe Erosionsraten, Bodendegradation	0 cm	3
		–23 cm	
perennierender See mit brackischem Milieu, kurze Phasen mit einem Frischwassermilieu sind möglich	Grundwassererneuerung, ausgedehnte Feuchtgebiete, eingeschränkte Erosion, intensive chemische Verwitterung und hohe Bodenbildungsraten	–24 cm	2
		–55 cm	
periodischer See mit salinem Milieu, regelmäßig austrocknend	niedrige Raten chemischer Verwitterung und Bodenbildung, hohe Erosionsraten,	–56 cm	1
		–95 cm	

vorausgesagt werden. Ein solcher Zusammenhang ist an den in Qualität und Trend wechselnden statistischen Beziehungen zwischen Kieselsäure- und Metalloxid-Gehalten in Kernabschnitt 1, und den insgesamt nur schwachen statistischen Beziehungen zwischen Kieselsäure- und Metalloxid-Gehalten in Kernabschnitt 3 zu beobachten (Tab. 3).

Die chemische Verwitterung erfolgt in Abhängigkeit vom Ionenpotential entsprechend den Gesetzen der lytrophen Reihe (BOHN et al. 1985). Die für die  $\text{Na}_2\text{O}$ -Gehalte insgesamt nur schwachen statistischen Beziehungen zu den  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalten (Tab. 3) sind ebenfalls wie die schlechten statistischen Beziehungen zu den anderen Metalloxiden auf das geringe Ionenpotential und die daraus resultierende hohe Mobilisierbarkeit des Natrium-Ions zurückzuführen (HEIM 1990, 99). Entsprechend werden auch die statistischen Beziehungen zwischen den verschiedenen Metalloxid-Gehalten äquivalent zu ihrem Ionenpotential beeinflusst (MASON 1966). Je höher die Mobilisierbarkeit bzw. Eintauschbarkeit eines Stoffes ist, desto schlechter sind seine statistischen Beziehungen zu stabileren Inhaltsstoffen (vgl. Tab. 3). Phyllosilikate sind im Sediment der Laguna Grande nur in Spuren nachweisbar. Ein Einfluß der Phyllosilikate insbesondere auf schwankende  $\text{K}_2\text{O}$ - und  $\text{Na}_2\text{O}$ -Gehalte durch Einbindung der Ionen ins Kristallgitter oder Ionenabsorption ist deshalb weitgehend auszuschließen.

### 5.5 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{MnO}$ -Verhältnis

Diese Differenzierung wechselnder Wasserhaushalts- und Verwitterungsbedingungen kann auch anhand der als Standardverfahren in die Literatur eingegangenen Analyse des  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{MnO}$ -Verhältnisses bestätigt werden (MACKERETH 1966). Schwankende  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{MnO}$ -Verhältnisse entlang des Kernprofils resultieren aus dem schwankenden Einfluß von oberflächennahem Grundwasser auf die Verwitterungs- und Bodenbildungsbedingungen.

Manganoxid ist auch unter reduzierenden Bedingungen vergleichsweise immobil; die Berechnung des  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{MnO}$ -Verhältnisses entspricht mithin einer Standardisierung der Eisengehalte im Sediment. Eisen ist im oxidierenden Milieu nahezu immobil (KRAUSKOPF 1967; MATHES a. PEKDEGER 1980). Erst unter den reduzierenden Bedingungen hydromorpher Böden (MOORE 1973, 164) und in Gegenwart metallorganischer Komplexbildner (SCHULZ 1970, 190) nehmen die Mobilisationsraten von Eisen zu, was in den korrelierten Seesedimenten eine Zunahme der  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{MnO}$ -Verhältnisse bewirkt. Die erhöhten  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{MnO}$ -Verhältnisse in Kernabschnitt 2 (Tab. 4) deuten auf eine erhöhte Eisenmobilisation hin und stehen in direkter Beziehung zu der Verbreitung hydromorpher Böden im Einzugsgebiet. Geländebefunde zeigen, daß sich während stärker durch Humidität geprägter Phasen

ausgedehnte Feuchtgebiete an die Seeufer anschlossen. Unter diesen Bedingungen konnten in erhöhtem Umfang Eisenverbindungen mobilisiert werden (MOORE 1973, 164), die in den korrelaten Sedimenten zu einem Anstieg der  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -MnO-Verhältnisse führten. Mit zunehmender Trockenheit kommt es zu einer Absenkung der Grundwasserspiegel und damit zum Austrocknen der Feuchtgebiete. Unter den nun vorherrschenden oxidierenden Verwitterungsbedingungen sind die Eisenverbindungen im Boden nahezu immobil (KRAUSKOPF 1967; MATHES a. PEKDEGER 1980), was eine Abnahme der  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -MnO-Verhältnisse in den korrelaten Sedimenten bewirkt. Aus den niedrigen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -MnO-Verhältnissen in den Kernabschnitten 1 und 3 läßt sich deshalb ableiten, daß die klimatischen Bedingungen während der Ablagerung der Sedimente stärker durch Trockenheit geprägt waren als während der Sedimentation von Kernabschnitt 2.

#### 5.6 Eigenschaften der Carbonate

Die primäre Ausfällung von Dolomiten ist äußerst selten und setzt ein Mg-Ca-Verhältnis des limnischen Milieus von 7–12 voraus (MÜLLER et al. 1972). Die Kornmorphologie weist auf den subaerischen Eintrag der Quarze hin, während für die Carbonate infolge von Diagenese und postsedimentären Lösungsvorgängen nur in seltenen Fällen eine Identifizierung als Klastit möglich ist. Die inverse Beziehung zwischen Dolomit- und Calcitgehalten deutet auf den Ursprung der Dolomite aus der frühdiagenetischen Dolomitierung hin (Abb. 2). Die für die frühdiagenetische Dolomitierung erforderlichen magnesiumreichen Lösungen stehen mit dem Grundwasser zur Verfügung (vgl. Tab. 1) (FOLK a. LANDES 1975). Der starke Rückgang der Dolomit-Gehalte oberhalb –50 cm Tiefe steht weiterhin in direktem Zusammenhang mit den in diesem Kernabschnitt zunehmenden Gipsausscheidungen (SONNENFELD 1984).

Über diese quantitative Bestimmung der Carbonatanteile hinaus wurde eine Charakterisierung der Carbonatmischkristalle durch Bestimmung der d-Werte der Basisreflexe vorgenommen. Für stöchiometrische Dolomite mit einem Gitternetzabstand von 2.8879 [Å] liegt der Beugungswinkel des Dolomit-Hauptreflexes bei  $30.94^\circ 2\theta \text{ Cuk}_\alpha$  (CHEN 1977, 30). Je mehr Calcium im Verhältnis zu Magnesium in die Dolomite eingebaut ist, um so mehr vergrößert sich der Gitterabstand und um so weiter verschiebt sich die Lage des Dolomit-Hauptreflexes hin zu kleineren Werten auf der  $^\circ 2\theta$ - $\text{Cuk}_\alpha$ -Skala. Die Beziehung zwischen den Gitterabständen der Dolomite [Å] und der Lage der Dolomit-Hauptreflexe ( $\text{dol}_{100} [^\circ 2\theta] \text{ Cuk}_\alpha$ ) verhält sich

gesetzmäßig entsprechend der Bragg'schen Gleichung (LANGBEIN et al. 1991, 29). Aus der Lage der Dolomit-Hauptreflexe ( $\text{dol}_{100} [^\circ 2\theta] \text{ Cuk}_\alpha$ ) kann deshalb auf die Mg-Ca-Verhältnisse der Protodolomite geschlossen werden, die wiederum Hinweise auf die Salinitätsverhältnisse während der frühdiagenetischen Dolomitierung geben (MORROW 1982, 102).

Auf vergleichsweise trockene Klima- bzw. Wasserhaushaltsbedingungen läßt deshalb die Lage der Dolomit-Bezugslinie mit der Intensität 100 ( $\text{dol}_{100}$ ) unterhalb –60 cm Tiefe bei  $\mu_1 = 30.847^\circ 2\theta \text{ Cuk}_\alpha$  schließen. Auf ähnliche Umweltbedingungen weist in den obersten 23 cm des Sedimentkörpers (Kernabschnitt 3) die mittlere Lage der Dolomit-Bezugslinie bei  $30.85$ – $30.90^\circ 2\theta \text{ Cuk}_\alpha$  (MORROW 1982, 102). Demgegenüber deutet in Kernabschnitt 2 ([–56;–24] cm Tiefe) die mittlere Lage der Dolomit-Bezugslinien mit der Intensität 100 bei  $\mu_2 = 30.83^\circ 2\theta \text{ Cuk}_\alpha$  deutlich auf niedrigere Mg-Ca-Verhältnisse in den Dolomiten hin, d. h. auf syn- und postsedimentär vergleichsweise humide Bedingungen mit einem Brackwasser- oder Frischwassermilieu (VAN DER BORCH 1976; VAN DER BORCH a. LOCK 1979).

#### 5.7 Evaporite

Der markante Gang der Schwefeltrioxid-Gehalte im Sediment (Abb. 4) korrespondiert mit den Gipsausfällungen (Tab. 2). Die einzigen sulfathaltigen Ausgangsgesteine im Becken der Laguna de Gallocanta sind die im Liegenden der Laguna de Gallocanta anstehenden Keupertone (DGDA 1993, 78; COMIN et al. 1983, 209), die im Zentralbereich des Grabens unter bis zu 65 m mächtigen tertiären Deckschichten erhalten sind (GRACIA PRIETO 1993, 183). Da schwefelhaltige Sedimente im Einzugsgebiet der Laguna de Gallocanta nicht austreichen, kommen als Quelle für die erhöhten Sulfatausscheidungen in den Kernabschnitten 2 und 3 ausschließlich aquatische Lösungen in Betracht, die infolge Lösung der liegenden Keupertone durch erhöhte  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentrationen charakterisiert sind.

Die Schwefelanreicherungen oberhalb –55 cm Tiefe lassen sich sowohl über syndesimentäre als auch über postsedimentäre Prozesse erklären; eine Verzahnung beider Prozeßgefüge ist anzunehmen:

- die Gipsausscheidungen an der Basis von Kernabschnitt 2 sind syndesimentär und deuten auf eine verstärkte Grundwasserzirkulation hin,
- die Gipsausscheidungen in Kernabschnitt 2 sind postsedimentär, entstanden durch aszendierende Grund- bzw. Porenwasser bei Trockenfallen des Sees und entsprechen damit Gypserete-Bildungen (zeitgleich zur Sedimentation von Kernabschnitt 3).

In den obersten 10 cm des Sedimentkörpers unterliegt die organische Substanz mikrobiellem Zersetz im, zur Zeit der Bohrung wassergesättigten, anaeroben Milieu (DEAN a. FOUCH 1983, 100). Die in den obersten zehn Zentimetern des Sedimentkörpers abrupt von Werten  $< 1$  Gew.-% bis auf nahezu 10 Gew.-% ansteigenden  $\text{SO}_3$ -Gehalte sind deshalb auf organische Schwefelverbindungen zurückzuführen, die jedoch mit fortschreitender Sedimentationsdauer mikrobiell zersetzt werden.

Im Becken der Laguna Grande kommt es infolge der topographischen Lage im Bereich des Tiefsten des Beckens der Laguna de Gallocanta zu einem lateralen Zufluß chloridhaltiger aquatischer Lösungen (ADAMS a. RHODES 1960). Die in den limnischen Sedimenten vom Liegenden zum Hangenden ansteigenden Halit-Gehalte entsprechen den gleichzeitig mit abnehmender Tiefe kontinuierlich zunehmenden Natrium-Gehalten im Sediment (Gl. 4) und weisen scheinbar auf zur Gegenwart zunehmend trockenere Wasserhaushaltsbedingungen mit einhergehender Anreicherung von Natrium-Ionen hin (WARREN 1989, 97; SONNENFELD 1984, 154). Bei Seeaustrocknung oberflächlich ausgeschiedene Halite werden bei Überflutung in der Regel gelöst und bei erneuter Seeaustrocknung wieder oberflächennah ausgeschieden (SPENCER et al. 1985). Eine vom Liegenden zum Hangenden sukzessive Zunahme der Halit-Gehalte ist mithin als ein in Seesystemen semi-arider Klimate von kurzfristigen Schwankungen des Klimas unbeeinflusster Prozeß zu betrachten.

## 6 Schlußfolgerungen

In den vorangestellten Ausführungen wurden die sedimentologischen Kenndaten einer Kernbohrung in der Laguna Grande vor dem Hintergrund einer Rekonstruktion von Paläoumwelten vorgestellt und diskutiert. Allen hier diskutierten mineralogischen und geochemischen Sedimenteigenschaften ist gemeinsam, daß sie keine quantitativen Rückschlüsse auf vorzeitliche, synsedimentäre Umweltbedingungen (z. B. P-ET-Verhältnis, Salinität, Verwitterungsraten etc.) zulassen. Die einzelnen Indikatoren lassen aufgrund der Komplexität der Faktoren, die auf sie Einfluß nehmen, oftmals nur grobe Schlüsse auf das Paläomilieu zu. Durch den Vergleich und die Verknüpfung der Aussagen verschiedener Paläoumweltindikatoren kann jedoch ein vielschichtiges Bild der synsedimentären Paläoumwelten erstellt werden.

Bei der Auswahl des geeigneten Bohrpunktes wurde davon ausgegangen, daß im Beckentiefsten aufgrund

der hier langandauernden Wasserbedeckung die limnischen Sequenzen am vollständigsten sind. Vergleichende Untersuchungen in anderen Seebecken haben ergeben, daß innerhalb von Transekten die Sedimenteigenschaften nur graduell von denen im Beckenzentrum abweichen. Die Sedimentanalyse ergibt, daß die insgesamt 95 cm mächtigen limnischen Ablagerungen in der Laguna Grande drei Hauptsedimentationsphasen zuzuordnen ist: Die Sedimente in  $[-95; -56]$  cm (Kernabschnitt 1) wurden während eines wechselfeuchten Klimas mit negativer jährlicher Wasserhaushaltsbilanz in einem salinen, ephemeren bis periodischen See abgelagert (Csa-Klima nach Koeppen). Während der Ablagerung der Sedimente in  $[-55; -24]$  cm (Kernabschnitt 2) herrschten wesentlich ausgeglichene Wasserhaushaltsbedingungen, unter denen sich in der Laguna Grande ein perennierender See mit Brack- bzw. Frischwassermilieu entwickeln konnte (Csb-Klima nach Koeppen). Subrezent wird das Klima zunehmend durch eine hohe Niederschlagsvariabilität bei gleichzeitig hohen Evapotranspirationsraten geprägt, so daß die jährliche Wasserhaushaltsbilanz negativ ist und das Klima einen semi-ariden Charakter annimmt (Kernabschnitt 3). Die Laguna Grande hat sich subrezent zu einem ephemeren See mit salinem bis hypersalinem Milieu entwickelt (Tab. 5).

Verschiedene sedimentologische Indikatoren weisen auf diesen Wechsel hin. Niedrige Phosphor-Gehalte in den liegenden (Kernabschnitt 1;  $[-95; -56]$  cm) und hangenden Sedimenten (Kernabschnitt 3;  $[-23; 0]$  cm) deuten auf einen regelmäßig trockenfallenden See mit hohen Abbauraten organischer Substanz hin. Unter den ausgeglicheneren Wasserhaushaltsbedingungen während der Ablagerung der Sedimente in Kernabschnitt 2 konnte demgegenüber in einem perennierenden See Phosphor in brackischem Milieu konserviert werden. Gleichzeitig bewirken die wechselnden Wasserhaushaltsbedingungen Veränderungen im geomorphologischen Prozeßgefüge: Während Phasen negativer Wasserhaushaltsbilanz dominiert der Eintrag quarzitischer Sedimente aus den im NE in unmittelbarer Nachbarschaft zu Laguna Grande gelegenen Ausläufern der aus paläozoischen Quarziten aufgebauten Sierra de Santa Cruz mit ihren vorgelagerten Glacis (IGME 1983, 48). Es wird überwiegend Detritus aus wenig verwittertem Ausgangsmaterial eingetragen, so daß die Konzentrationsverteilung der chemischen Hauptkomponenten zufällig ist und keiner statistisch signifikanten Beziehung unterliegt. Gleichzeitig ist der Eintrag calcium- und magnesiumhaltiger Wässer und detritischer Carbonate aus dem weiter entfernten südwestlichen Einzugsgebiet eingeschränkt (Abb. 7). Demgegenüber steht in Phasen positiver Wasserhaushalts-

bilanz ein verstärkt subterranean Eintrag lösungshaltiger Wässer aus den mesozoischen Kalken im südwestlichen Einzugsgebiet, während gleichzeitig die Bedeutung der subaerischen Prozesse bei zunehmender Vegetationsbedeckung abnimmt (Kernabschnitt 2; Sedimente in  $[-55;-24]$  cm). Chemische Verwitterung und Bodenbildung beeinflussen die Freisetzung von Kieselsäure und Metalloxiden, es kommt zu einer chemischen Substratdifferenzierung im Pedon (KRAUSKOPF 1967) entsprechend der von Ionendurchmesser und Ladung beeinflussten potentiellen Mobilisierbarkeit (MASON 1966). Die positiv korrelierten Beziehungen zwischen Kieselsäure- und Metalloxid-Gehalten und die negativ korrelierten Beziehungen zwischen Calciumoxid- und Metalloxid-Gehalten deuten auf die überwiegende Herkunft der Metalloxide aus bodenbildenden Prozessen auf den silikatischen Ausgangsgesteinen östlich und nordöstlich der Bohrstelle hin.

Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich, daß in Phasen verstärkter Aridität – wie unter dem gegenwärtigen Csa-Klima (nach Köppen) – die unregelmäßig eintretenden Niederschläge einen subterranean Zufluß aus den carbonatreichen Ausgangsgesteinen im Süden und Westen des Einzugsgebiets der Laguna de Gallocanta nur eingeschränkt ermöglichen (Abb. 6). Durch subaerische Prozesse wird überwiegend Detritus in das Seebecken eingetragen, der v. a. aus den im unmittelbaren Seerandbereich anstehenden paläozoischen Quarziten und quartären Kiesen und Sanden stammt (Kernabschnitte 1 und 3). Demgegenüber steht in Phasen positiver Wasserhaushaltsbilanz ein durch eine dichte Vegetationsbedeckung stabilisiertes Solum und damit verminderter Austrag durch subaerische Prozesse bei gleichzeitig erhöhtem Lösungseintrag mit zunehmenden subterranean Zuflüssen (DUNNE et al. 1991). Aus Wasserhaushaltsmodellierungen für das Becken der Laguna de Gallocanta geht hervor, daß solche Voraussetzungen bereits bei Klimabedingungen erreicht werden, die dem eines Csb-Klimas (nach Köppen) entsprechen und durch geringfügig höhere Jahresniederschlagssummen als rezent, aber regelmäßig eintretende Niederschläge gekennzeichnet sind (KUHN et al. 1997).

Carbonat- und Kieselsäure-Gehalt der Sedimente stellen mithin ein Kontinuum dar, an dem die Wasserhaushaltsbilanz des Systems der Laguna Grande gemessen werden kann. Das Verhältnis dieser Parameter wird als Maß zur Kennzeichnung der Phasen variierender Wasserhaushaltsbilanz herangezogen (Abb. 6). Die während vorherrschenden Csb-Klimas erfolgten Ablagerungen sind durch Werte für das  $\Sigma(\text{CaO}, \text{MgO})/\text{SiO}_2$ -Verhältnis von  $> 1$  gekennzeichnet (für ausschließlich carbonatisch gebundenes Ca und Mg), während für

semi-aride Klimabedingungen zur Zeit der Sedimentation dieser Indexwert unter 1 sinkt (Abb. 6, Tab. 4).

Von DAVIS (1994) wurden für die Sedimente der Laguna Grande mikropaläontologische und palynologische Untersuchungen durchgeführt, die die Dreigliederung der Seenentwicklung der Laguna Grande bestätigen. Für die basalen limnischen Sedimente beschreibt DAVIS (1994, 226) einen periodischen See mit hypersalinem Milieu, dessen Einzugsgebiet von einer Grassteppe mit dispersen Baum- und Strauchbeständen (*Pinus*, *Quercus Ilex*, *Juniperus*) bedeckt ist. Auf die Trockenphase folgend entwickelte sich die Laguna Grande zu einem perennierenden See mit brackischem Milieu. Die Vegetationsbedeckung im Einzugsgebiet gerät zunehmend unter anthropogenen Einfluß (DAVIS 1994, 228). Die jüngsten Sedimente der Laguna Grande sieht DAVIS (1994, 229) in einem semi-permanentem See mit hypersalinem Milieu abgelagert, die subrezente Vegetationsbedeckung beschreibt er anhand der palynologischen Untersuchungen als Grassteppe mit dispersem Baum- und Strauchbestand, wobei *Pinus* und *Olea* unter den Baumpollen dominieren.

Untersuchungen historischer Quellen ergeben, daß die Laguna de Gallocanta bereits während der Antike ein Milieu hatte, das die Salzgewinnung ermöglichte; Ruinen römischer Gebäude im unmittelbaren Seeuferbereich deuten auf einen während der Antike niedrigen Wasserstand der Laguna de Gallocanta hin (GRACIA PRIETO 1990, 283). Auch Untersuchungen von Kolluvien im benachbarten Ebrobecken bestätigen, daß im Iberischen Randgebirge während des sog. 'römischen Klimaoptimums' semi-aride Klimaverhältnisse herrschten (GUTIÉRREZ ELORZA a. PEÑA MONNÉ 1989). Weiterhin geht aus der Studie von GRACIA PRIETO (1990, 227) hervor, daß für die Laguna de Gallocanta die hohe Salinität des limnischen Milieus und das Austrocknen des Seebeckens bereits mit beginnender Neuzeit bekannt waren. Den Beginn der Feuchtphase, während der die Sedimente korrespondierend zu Kernabschnitt 2 abgelagert wurden, setzt DAVIS (1994, 226) anhand von  $^{14}\text{C}$ -Datierungen bei ca. 1500 n. Chr. an. In einer Vergleichsstudie von BURJACHS CASAS et al. (1996, 26) wird diese subrezente Feuchtphase mit Hilfe einer  $^{210}\text{Pb}$ -Datierung auf 1842 festgelegt.

Somit läßt sich an dieser Stelle zusammenfassen, daß das semi-aride Klima (Csa nach Köppen), das die rezenten Umweltbedingungen im Becken der Laguna de Gallocanta prägt, keine junge Entwicklung ist. Bereits während der älteren Eisenzeit bzw. Antike und bis ins Mittelalter hinein anhaltend, entsprachen die Klima- und Umweltbedingungen im Becken der Laguna de Gallocanta etwa den heutigen Konditionen.

Zum Ende des Mittelalters und während des Klimapessimums der ‚Kleinen Eiszeit‘ herrschten jedoch vorübergehend deutlich humidere Klima- und Umweltbedingungen (Csb-Klima nach Koeppen) als rezent.

#### Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen eines Projektes zur Gewinnung von Proxy-Daten zur holozänen Klimarekonstruktion in Nord- und Zentralspanien durchgeführt, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) von September 1994 bis Mai 1996 gefördert wurde.

#### Literatur

- ADAMS, J. E. a. RHODES, M. G. (1960): Dolomitization by seepage refluxion. In: American Assoc. Petroleum Geol. Bull. 44/12, 1912–1920.
- ATKINSON, M. J. (1987): Low phosphorous sediments in a hypersaline marine bay. In: Estuar. coast. Shelf. Sci. 24, 335–347.
- BEBEHANI, A.-R. (1987): Sedimentations- und Klimageschichte des Spät- und Postglazials im Bereich der nördlichen Kalkalpen (Salzkammergutseen, Österreich). In: Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie 34.
- BIRCH, P. B., BARNES, R. S. a. SPYRIDAKIS, D. E. (1980): Recent sedimentation and its relationship with primary productivity in four western Washington lakes. In: Limnol. Oceanogr. 25, 240–247.
- BOHN, H. L., MCNEAL, B. L. a. O'CONNOR, G. A. (1985): Soil chemistry. New York.
- BORCH, C. C. VAN DER (1976): Stratigraphy and formation of Holocene dolomitic carbonate deposits of the Coorong area, South Australia. In: Jour. Sed. Petrology 46, 952–966.
- BORCH, C. C. VAN DER a. LOCK, D. E. (1979): Geological significance of Coorong dolomites. In: Sedimentology 26, 813–824.
- BURJACHS CASAS, F., RODO, X. a. COMIN, F. A. (1996): Gallocanta: Ejemplo de secuencia palinológica en una laguna efimera. In: Estudios Palinológicos (XI Simposio de Palinología), A.P.L.E., 25–29.
- CHEN, P.-X. (1977): Table of key-lines in X-ray powder diffraction patterns of minerals in clays and associated rocks. In: Geological Survey Occasional Paper 21. Bloomington.
- CHESWORTH, W. (1992): Weathering systems. In: MARTINI, I. P. a. CHESWORTH, W. (Hg.): Weathering, soils and palaeosoils. Amsterdam, 19–40.
- CLAVERO, V., FERNÁNDEZ, J. A. a. NIELL, F. X. (1990): Influence of salinity on the concentration and rate of interchange of dissolved phosphate between water and sediment in Fuente Piedra lagoon (S. Spain). In: Hydrobiologia 197, 91–97.
- COMIN, F. A., ALONSO, M., LOPEZ, P. a. COMELLES, M. (1983): Limnology of Gallocanta Lake, Aragon, north-eastern Spain. In: Hydrobiologia 105, 207–221.
- COMIN, F. A., JULIA, R., COMIN, M. P. a. PLANA, F. (1990): Hydrogeochemistry of Lake Gallocanta. In: Hydrobiologia 197, 51–66.
- CURTIS, C. D. (1976): Chemistry of rock weathering: fundamental reactions and controls. In: DERBYSHIRE, E. (Hg.): Geomorphology and climate. London, 25–57.
- DAVIS, B. A. S. (1994): Paleolimnology and Holocene environmental change from endoreic lakes in the Ebro basin, north-east Spain. Ph.D. Thesis, Newcastle Upon Tyne, U.K.
- DEAN, W. E. a. FOUCH, T. D. (1983): Lacustrine environment. In: SCHOLLE, P., BEBOUT, D. G. a. MOORE, C. H. (Hg.): Carbonate depositional environments. In: AAPG, 97–130. Tulsa.
- DGDA (Diputación General de Aragón) (Hg.) (1993): Inventario y Control Piezométrico del Sistema Acuífero de la Laguna de Gallocanta. Zaragoza.
- DUNNE, T., ZHANG, W. a. AUBRY, B. (1991): Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. In: Water Resources Research 27, 2271–2285.
- ECHEVERRÍA, M. T. a. LONGARES, L. A. (1996): Consecuencias medioambientales de las transformaciones de espacios endorreicos en España – El ejemplo de la Laguna de Gallocanta (Zaragoza y Teruel, España). In: APT-Berichte 7, 67–78.
- ECKERT, W., NISHIRI, A. a. PARPAROVA, R. (1997): Factors regulating the flux of phosphate at the sediment – water interface of a subtropical calcareous lake: a simulation study with intact sediment cores. In: Water, Air and Soil Pollution 99, 401–409.
- EMSLEY, J. a. HALL, D. (1976): The chemistry of phosphorous. London.
- EVANS, R. a. KIRKLAND, D. W. (1988): Evaporite environments as a source of petroleum. In: SCHREIBER, B. C. (Hg.): Evaporites and hydrocarbons. New York, 256–299.
- FOLK, R. L. a. LANDES, L. S. (1975): Mg/Ca ratio and salinity: Two controls over crystallization of dolomite. In: Bull. Am. Assoc. Pet. Geol. 59(1), 60–68.
- GARCIA DE PEDRAZA, L. a. REIJA GARRIDO, A. (1994): Tiempo y Clima en España – Meteorología de las Autonomas. Madrid.
- GONZALEZ LOPEZ, J. M., GONZALEZ MARTINEZ, J., FERNANDEZ-NIETO, C. a. PARDO TIRAPU, G. (1983): Sedimentación Carbonatada en la Laguna de Gallocanta (Provincias de Zaragoza y Teruel). In: Boletín Sociedad Española de Mineralogía, 81–88.
- GRACIA PRIETO, F. J. (1990): Evolución Morfológica Reciente de la Laguna De Gallocanta (Cordillera Ibérica Central). In: Sociedad Española de Geomorfología: 1 Reunión Nacional de Geomorfología/ 17–20 Septiembre, Tomo 1, 277–289.
- (1993): Evolución cuaternaria del río Jiloca (Cordillera Ibérica Central). In: FUMANAL, M. P. a. BERNABEU, J. (Hg.): Estudios sobre Cuaternario – medios sedimentarios, cambios ambientales, hábitat humano. Asociación Española



- para el Estudio del Cuaternario, Universitat de Valencia, 43–51.
- GRACIA PRIETO, F. J. a. SANTOS GARCIA, J. A. (1992): Caracterización sedimentológica y modelo deposicional costero de una terraza lacustre Pleistocena en la Laguna de Gallocanta (Cordillera Ibérica, Provincia de Zaragoza). In: III. Congreso Geológico de España y VIII. Congreso Latinoamericano de Geología, Tomo 1, 98–107. Salamanca.
- GUTIÉRREZ ELORZA, M. a. PEÑA, J. L. (1989): Upper holocene climatic change and geomorphological processes on slopes and infilled valleys from archaeological dating (NE-Spain). In: Landscape-Ecological Impact of Climatic Change.
- HADAS, O. a. PINKAS, R. (1997): Arylsulfatase and alkaline phosphatase (APASE) activity in sediments of Lake Kinneret, Israel. In: Water, Air and Soil Pollution 99, 671–679.
- HAMM, A., GLEISBERG, D., HEGEMANN, W., KRAUTH, K. H., METZNER, G., SARFERT, F. u. SCHLEYPEN, P. (1991): Stickstoff- und Phosphoreintrag aus punktförmigen Quellen. In: HAMM, A. (Hg.): Studie über Wirkung und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern. St. Augustin, 765–805.
- HEIM, D. (1991): Tone und Tonminerale. Stuttgart.
- IGME (Hg.) (1983): Calamocha. Mapa geológico de España, Escala 1:50.000, 491.
- KRAUSKOPF, K. B. (1967): Introduction to Geochemistry. Tokyo.
- KRUMMSDORF, A. u. BEER, W.-D. (1962): Möglichkeiten der morphologisch-soziologischen Erosionsansprache. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Karl-Marx-Universität Leipzig, 11/11965, Math.-Naturwiss. Reihe 2, 315–324.
- KUHN, N. J., SCHÜTT, B. u. BAUMHAUER, R. (1997): Der rezente und subrezente Wasserhaushalt der Laguna de Gallocanta/Iberisches Randgebirge (Spanien). In: Geökodynamik 18, 109–131.
- LANGBEIN, R., PETER, H. u. SCHWAHN, H.-J. (1981): Karbonat- und Sulfatgesteine. Leipzig.
- MACKERETH, F. J. H. (1966): Some chemical observations on post-glacial lake sediments. In: Phil. Trans. R. Soc. B. 250, 165–213.
- MASON, B. (1966): Principles of geochemistry. New York.
- MATHESS, G. u. PEKDEGER, A. (1980): Chemisch-biochemische Umsetzung bei der Grundwasserneubildung. In: Gas- u. Wasserfach 121, 214–219.
- MDAPA (Ministerio de Agriculture, Pesca y Alimentacion) (Hg.) (1988): Estudios de los Recursos Hidricos de la Laguna de Gallocanta y Acciones para su Conservación. Madrid.
- MEYERS, P. A. a. ISHIWATARI, R. (1993): The early diagenesis of organic matter in lacustrine sediments. In: ENGEL, M. H. a. MACKO, S. A. (Hg.): Organic geochemistry – Principles and applications. New York, 185–209.
- MOORE, T. R. (1973): The distribution of iron, manganese and aluminium in some soils from north-east Scotland. In: Journal of Soil Sciences 24, 162–171.
- MORROW, D. W. (1982): Diagenesis 2. Dolomite – Part 2: Dolomitization models and ancient dolostones. In: Geoscience Canada 9, 95–107.
- MÜLLER, G., IRION, G. a. FÖRSTNER, U. (1972): Formation and diagenesis of inorganic Ca-Mg carbonates in the lacustrine environment. In: Naturwissenschaften 59, 158–164.
- REID, J. M., MACLEOD, D. A. a. CRESSER, M. S. (1981): Factors affecting the chemistry of precipitation and river water in an upland catchment in North-East Scotland. In: Journal of Hydrology 50, 129–145.
- SAUNDERS, J. a. YOUNG, A. (1983): Rates of surface processes on slopes, slope retreat and denudation. In: ESPL 8, 473–501.
- SCHULZ, H. D. (1970): Chemische Vorgänge beim Übergang vom Sickerwasser zum Grundwasser. In: Geol. Mitt. 10, 151–204.
- SMOOT, J. P. a. LOWENSTEIN, T. K. (1991): Depositional environments of non-marine evaporites. In: MELVIN, J. L. (Hg.): Evaporites, petroleum and mineral resources. Amsterdam, 189–347.
- SONNENFELD, P. (1984): Brines and evaporites. Orlando.
- SPENCER, R. J., EUGSTER, H. P., JONES, B. F. a. RETTIG, S. L. (1985): Geochemistry of Great Salt Lake, Utah, I: Hydrochemistry since 1850. In: Geochim. Cosmochim. Acta 49, 727–737.
- STUMM, W. a. LECKIE, J. O. (1971): Phosphate exchange with sediments: its role in the productivity of surface waters. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Water Pollution Research Conference, 214–228.
- TRUDGILL, S. T., LAIDLAW, J. M. S. a. SMART, P. L. (1980): Soil water residence time and solute uptake in a dolomite bedrock – preliminary results. In: ESPL 5, 91–100.
- TRUDGILL, S. T., LAIDLAW, J. M. S. a. WALKER, P. J. C. (1980): Chemical erosion in soils in relation to soil water residence time. In: DE BOODT, M. a. GABRIELS, D. (Hg.): Assessment of Erosion. London, 361–368.
- VALLENTYNE, J. R. (1962): Solubility and the decomposition of organic matter in nature. In: Arch. Hydrobiol. 58, 423–434.
- WARREN, J. K. (1989): Evaporite Sedimentology. Englewood Cliffs.