

INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE  
DER  
FREIDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG

Lehrstuhl für Physische Geographie  
Prof. Dr. Achim Bräuning

Die Böden im Ostpamir Tadschikistans –  
Charakteristik und Einfluss unterschiedlicher  
Beweidungsintensitäten

Diplomarbeit

vorgelegt von

Carolin Bimüller

mit 157 Seiten, 79 Abbildungen, 45 Tabellen, 29 Anlagen  
und einer Daten-CD

Erstgutachter: PD Dr. Cyrus Samimi

Zweitgutachter: Prof. Dr. Rupert Bäumler

Erlangen Dezember 2009

# Die Böden im Ostpamir Tadschikistans - Charakteristik und Einfluss unterschiedlicher Beweidungsintensitäten



Carolin Bimüller

Diplomarbeit

*Den Kindern des Pamir*



Foto: Tobias Kraudzun

## Abstract

This study focuses on the impact of grazing yaks, sheep and goats on soils under changing land use patterns of pastoralists due to transformation processes in the Eastern Pamirs of Tajikistan. The research showed that soil properties depending on a change in grazing intensity within the ecosystems of deserts, steppes and the alpine belt. The field work for the study was carried out during the grazing season of 2008. Subsequently, the soil parameters electrical conductivity, pH, grain size, organic carbon, nitrogen, humus, C/N-ratio, phosphorus as well as the cation exchange capacity (Na, K, Ca and Mg) were measured in the laboratory. Furthermore, the isotope concentrations of  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  and alkane structures were analysed. Data mining was done using multivariate statistical methods. With the aid of a cluster analysis, 125 samples were classified into six soil types depending on the WRB systematic: Leptosols, Chernozems, Kastanozems, Arenosols, Cambisols and Regosols. Finally, a link between vegetation and soils was presented using a Detrended Correspondence Analysis (DCA) as an indirect ordination method. Controlling ecological factors traced through the biosphere and pedosphere respectively in an interactive way. Grazing could therefore be examined as only one of a multitude of ecological factors. The results showed that the penetrometer resistance and the bulk density were related to the management of the soils. The major findings indicated significantly low correlations between grazing intensity and a fine grain size, a higher  $C_{\text{org}}$  and  $N_{\text{tot}}$  content and C/N-ratio as well as humus quality. Hence, the study area could be described as a sink under current land use. All soil samples had a base saturation of 100 %. The cation exchange capacity (CEC) showed low to middle correlations for grazing intensity (Na, K, Ca und Mg). The soils of the Eastern Pamirs could be described as P-poor. Their content tended to increase with grazing. The results of the isotopic analysis as well showed no correlation between land use and  $^{13}\text{C}$ -concentration. Whereas the  $^{15}\text{N}$ -values were strongly related to the influence of grazing since it feeds the nitrogen cycle. The examination of the alkanes lacked correlation concerning land use or vegetation units. Based on the existing literature, some objections may occur in accordance with these results. This could be contributed to the fact that local people were forced to collect the excrements for fuel since alternatives are absent. Consequently this altered the nutrient supply (C, N, P). The results of this study indicate that pastoralism is a well adopted land use method in the Eastern Pamirs, however; considering the special conditions of the region, further research should focus on land use altering material cycles and possible carbon sinks regarding climate change. These results may function as a first step in this direction.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Auswirkungen der Beweidung auf die Pedosphäre des Ostpamir unter den veränderten Rahmenbedingungen der nomadischen Viehhaltung (Yaks, Ziegen und Schafe) im Zuge des Transformationsprozesses und den sich daraus ergebenden Belastungen für die Weideökosysteme. Hierzu wurden zum einen während der Weidesaison 2008 die Bodeneigenschaften in Abhängigkeit von der Weideintensität in den Wüsten- und Steppenökosystemen sowie der alpinen Stufe im Gelände ermittelt. Zum anderen wurden im Labor die Parameter elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Körnung, organischer Kohlenstoff, Stickstoff, Humus, das sich ergebende C/N-Verhältnis, Phosphor sowie die Kationenaustauschkapazität (Na, K, Ca und Mg) bestimmt. Desweiteren wurden Analysen der Isotopenkonzentrationen  $^{13}\text{C}$  und  $^{15}\text{N}$  und eine genauere Betrachtung der Alkanmuster durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse und anschließende Interpretation erfolgte mittels multivariater statistischer Methoden. Mithilfe der Clusteranalyse konnten 125 der untersuchten Flächen im Ostpamir in ihren heterogenen Eigenschaften zusammengefasst und nach dem Bestimmungsschlüssel der WRB sechs verschiedenen Bodentypen zugewiesen werden: Leptosole, Chernozeme, Kastanozeme, Arenosole, Cambisole und Regosole. Ein Zusammenhang aus Vegetation und Böden konnte mittels einer Ordination dargestellt werden, wobei sich steuernde Faktoren jeweils wechselseitig in der Bio- bzw. der Pedosphäre durchsetzten. Die Beweidung spiegelt dabei nur eine einzelne Größe in der Gesamtkomposition aller Umweltfaktoren wider. Es konnte festgestellt werden, dass Dichtemessungen mithilfe ungestörter Stechzylinderproben im Gegensatz zu Penetrometermessungen keine Verdichtung mit zunehmender Beweidung aufzeigten. Intensiver beweidete Flächen wurden vorrangig auf feinen Bodenarten gefunden. Eine geringe, aber dennoch signifikante positive Korrelation konnte mit den Parametern organischer Kohlenstoff ( $\text{C}_{\text{org}}$ ), Stickstoff ( $\text{N}_{\text{tot}}$ ), Humus und C/N-Verhältnis diagnostiziert werden. Daraus folgt, dass im Untersuchungsgebiet beweidete Flächen eine Senkenfunktion für organische Bodensubstanz darstellen. Alle untersuchten Böden besaßen eine Basensättigung von 100 %; ihre Kationenaustauschkapazität (KAK) zeigte geringe bis mittlere signifikante Korrelationen mit der Beweidungsintensität (Na, K, Ca und Mg). Die Böden des Ostpamir sind generell P-arm, die Gehalte steigen jedoch tendenziell mit der Beweidung an. Die  $^{13}\text{C}$ -Konzentrationen korrelieren nicht signifikant mit der Beweidungsintensität, während mithilfe der  $^{15}\text{N}$ -Konzentrationen sowohl in Boden- als auch Pflanzenproben ein signifikanter Zusammenhang mit der Beweidung und damit eine Öffnung des Stickstoffkreislaufes bestätigt werden konnte. Die ermittelten Alkanmuster hängen weder mit der Beweidungsintensität noch mit den Vegetationseinheiten signifikant zusammen. Teilweise stehen die gefundenen Ergebnisse divergent zur Literatur. Im Untersuchungsgebiet des Ostpamir konnte eine Sondersituation hinsichtlich der Nährstoffversorgung bezüglich

Stickstoff und Phosphor, aber auch in Bezug auf den organischen Kohlenstoff beobachtet werden. Die Bevölkerung nutzt die Viehexkrementen als Brennstoff aus Mangel an Alternativen und entzieht damit dem Boden die sonst rückgeführten Nährstoffe aus dem Kreislauf. Im Fokus weiterführender Arbeiten wird, gerade im Hinblick auf den Klimawandel und die derzeit gerne diskutierte Kohlenstoffsequestrierung durch Böden, eine genauere Untersuchung der Stoffkreisläufe stehen. Hierfür stellt die Arbeit einen ersten Ansatz und zeigt zugleich, dass die mobile Viehwirtschaft im Untersuchungsgebiet eine gut angepasste Landnutzungsmethode ist.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage des Pamirgebirges in Zentralasien.....	6
Abb. 2: Das Pamir-Hochland.....	7
Abb. 3: GBAO.....	8
Abb. 4: Klimadiagramm Murghab.....	13
Abb. 5: Niederschlagsmodell für den Tadschikischen Pamir.....	14
Abb. 6: Die vier geologischen Zonen des Pamir.....	17
Abb. 7: Geologie des Pamir.....	18
Abb. 8: Topographie des Pamir.....	20
Abb. 9: Thufure.....	23
Abb. 10: Böden des Pamir.....	24
Abb. 11: Geobotanisches West-Ost-Profil durch den Pamir.....	26
Abb. 12: Weidenutzung im Ostpamir während der Sowjetzeit.....	28
Abb. 13: Kleinhornvieh.....	31
Abb. 14: Yaks.....	33
Abb. 15: Pshart Gumbez Kol.....	34
Abb. 16: Madian Gumbez Kol.....	35
Abb. 17: Bash Gumbez.....	36
Abb. 18: GC-Chromatogramm für Hexan.....	49
Abb. 19: Aufbau eines Boxplots.....	50
Abb. 20: Darstellung der Quartile im Boxplot.....	51
Abb. 21: Histogramme der Beweidungsintensitäten.....	61
Abb. 22: Thermoisoplethendiagramme.....	64
Abb. 23: Lagerungsdichte mittels Stechzylindern.....	65
Abb. 24: Penetrometermessungen.....	66
Abb. 25: Nach Tälern getrennter Gesamtwassergehalt.....	68
Abb. 26: Wassergehalte bei 40 °C.....	69
Abb. 27: Wasserspannungskurven für die 4 dominierenden Bodenarten.....	70
Abb. 28: Skelettgehalt.....	71
Abb. 29: Bodentextur.....	73
Abb. 30: Bodenacidität.....	74
Abb. 31: Leitfähigkeit.....	76
Abb. 32: Kalkgehalt.....	77
Abb. 33: Organischer Kohlenstoffgehalt.....	78
Abb. 34: Humusgehalt.....	79
Abb. 35: Stickstoffkonzentration.....	80
Abb. 36: C/N-Verhältnis.....	82
Abb. 37: C/N-Verhältnis für die Ah-Horizonte.....	82
Abb. 38: KAK.....	84
Abb. 39: Natrium-Konzentration.....	85
Abb. 40: Kalium-Konzentration.....	86
Abb. 41: Calcium-Konzentration.....	87
Abb. 42: Magnesium-Konzentration.....	88
Abb. 43: Phosphor-Konzentration.....	89
Abb. 44: <sup>13</sup> C der Pflanzenproben.....	90
Abb. 45: <sup>13</sup> C der entcarbonatisierten Bodenproben.....	92
Abb. 46: <sup>15</sup> N der Pflanzenproben.....	93

Abb. 47: $^{15}\text{N}$ der entcarbonatisierten Bodenproben .....	94
Abb. 48: C/N-Verhältnis der Pflanzen .....	95
Abb. 49: C/N-Verhältnis der Bodenproben .....	95
Abb. 50: Relative Zusammensetzung der Alkane C27, C29 und C31 .....	97
Abb. 51: OEP .....	100
Abb. 52: links: Pflanzenprobe 1; rechts: Bodenprobe 1 .....	100
Abb. 53: links: Pflanzenprobe 28; rechts: Bodenprobe 28 .....	101
Abb. 54: oben: Pflanzenprobe 154; unten: Bodenprobe 154 .....	101
Abb. 55: links: Pflanzenprobe 21; rechts: Bodenprobe 21 .....	102
Abb. 56: links: Pflanzenprobe 47; rechts: Bodenprobe 47 .....	102
Abb. 57: links: Pflanzenprobe 52; rechts: Bodenprobe 52 .....	102
Abb. 58: links: Pflanzenprobe 40; rechts: Bodenprobe 40 .....	103
Abb. 59: links: Pflanzenprobe 155; rechts: Bodenprobe 155 .....	103
Abb. 60: links: Pflanzenprobe 12; rechts: Bodenprobe 12 .....	104
Abb. 61: links: Pflanzenprobe 400; rechts: Bodenprobe 400 .....	104
Abb. 62: links: Pflanzenprobe 23; rechts: Bodenprobe 23 .....	105
Abb. 63: Eigenwerte der ersten sechs Hauptkomponenten .....	105
Abb. 64: Ordinationsdiagramm der Bodenlaborparameter unter Verwendung einer PCA ..	107
Abb. 65: Clusteranalyse der Bodenvariablen .....	109
Abb. 66: Arenosol .....	110
Abb. 67: Leptosol auf Carbonatgestein .....	111
Abb. 68: Leptosol auf Schiefer .....	111
Abb. 69: Regosol .....	112
Abb. 70: Chernozem .....	113
Abb. 71: Kastanozem .....	114
Abb. 72: Cambisol .....	115
Abb. 73: DCA mit geplotteten Umweltvariablen .....	117
Abb. 74: DCA mit geplotteten Vegetationseinheiten .....	119
Abb. 75: Viehgangeln nahe Murghab .....	122
Abb. 76: Versalzung .....	127
Abb. 77: Gesammelte Exkrememente .....	131
Abb. 78: Nutzung von Zwergsträuchern als Brennmaterial .....	137
Abb. 79: Geöffneter Stickstoffkreislauf .....	141



## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Höhenstufung nach WALTER & BRECKLE.....	25
Tab. 2: Einstufung der Durchwurzelungsintensität .....	41
Tab. 3: Durchschnittliche wichtige relative Häufigkeiten stabiler Kohlenstoff- und Stickstoffisotope.....	47
Tab. 4: Verbale Beschreibung der Größe des Korrelationskoeffizienten .....	52
Tab. 5: Korrelation der Beweidungsintensität mit dem Julianischen Datum.....	60
Tab. 6: Stichprobenumfänge der Täler und Lagemaße der Beweidungsintensität.....	60
Tab. 7: Normalverteilungstest der Beweidungsintensität.....	62
Tab. 8: Durchwurzelungstiefe .....	63
Tab. 9: Durchwurzelungsintensität .....	63
Tab. 10: Trittsintensität für .....	66
Tab. 11: Korrelationskoeffizienten der Dichtebestimmung.....	66
Tab. 12: p-Werte des Korrelationstests der Dichtebestimmung .....	67
Tab. 13: Einteilung der Bodenskelettanteile .....	72
Tab. 14: Korrelation der Bodentextur mit der Beweidung .....	72
Tab. 15: Einstufung der Bodenreaktion .....	74
Tab. 16: Korrelation des pH-Wertes mit der Beweidung.....	75
Tab. 17: Versalzungsgrad .....	76
Tab. 18: Korrelation der Leitfähigkeit mit der Beweidung.....	77
Tab. 19: Korrelation des organischen Kohlenstoffgehaltes mit der Beweidung .....	78
Tab. 20: Beschreibung der Humusgehalte .....	79
Tab. 21: Korrelation des Humusgehaltes mit der Beweidung .....	80
Tab. 22: Korrelation des Stickstoffgehaltes mit der Beweidung.....	81
Tab. 23: Korrelation des C/N-Verhältnisses mit der Beweidung .....	81
Tab. 24: Beurteilung der Humusqualität aus dem C/N-Verhältnis .....	81
Tab. 25: Korrelationen der Ah-Proben mit der Beweidung .....	83
Tab. 26: Signifikanzniveaus für die Korrelationstests der Ah-Proben mit der Beweidung.....	83
Tab. 27: Korrelation der KAK mit der Beweidung .....	83
Tab. 28: Korrelationstest KAK.....	85
Tab. 29: Beurteilung des wasserlöslichen, pflanzenverfügbaren P-Gehaltes.....	89
Tab. 30: Korrelation de Phosphorgehaltes mit der Beweidung.....	89
Tab. 31: U-Test für die $\delta^{13}\text{C}$ -Konzentrationen in den Pflanzenproben .....	91
Tab. 32: U-Test für die $\delta^{13}\text{C}$ -Konzentrationen in den Bodenproben .....	91
Tab. 33: U-Test für die $\delta^{15}\text{N}$ -Konzentrationen in den Pflanzenproben.....	92
Tab. 34: U-Test für die $\delta^{15}\text{N}$ -Konzentrationen in den Bodenproben .....	94
Tab. 35: U-Test für die Alkanmuster der Pflanzenproben .....	97
Tab. 36: U-Test für die Alkanmuster der Bodenproben.....	98
Tab. 37: H-Test für die Alkanmuster der Pflanzenproben .....	98
Tab. 38: H-Test für die Alkanmuster der Bodenproben.....	98
Tab. 39: OEP .....	99
Tab. 40: Zusammenfassung der extrahierten Hauptkomponenten .....	106
Tab. 41: Ladungen der Komponenten.....	106
Tab. 42: Eigenwerte der DCA .....	117
Tab. 43: Species Scores .....	118
Tab. 45: Ladungen für die geplotteten Umweltvariablen.....	118

## Appendixverzeichnis

App. 1: R-Skripte .....	i
App. 2: Lagemaße Lagerungsdichte .....	ii
App. 3: Wassergehalt.....	iii
App. 4: Lagemaße Wassergehalte bei 40 °C.....	iv
App. 5: Lagemaße Skelettgehalte .....	iv
App. 6: Bodenart Bash Gumbez.....	iv
App. 7: Korngrößen der a-Horizonte (links) und b-Horizonte (rechts) .....	v
App. 8: Lagemaße Bodenacidität .....	v
App. 9: Lagemaße Leitfähigkeit .....	v
App. 10: Lagemaße Kalkgehalt .....	vi
App. 11: Lagemaße organischer Kohlenstoff .....	vi
App. 12: Verteilung des organischen Kohlenstoffgehaltes .....	vi
App. 13: Lagemaße Humusgehalt .....	vii
App. 14: Lagemaße Stickstoffgehalt.....	vii
App. 15: Lagemaße C/N-Verhältnis .....	vii
App. 16: Lagemaße C/N-Verhältnis der Ah-Horizonte .....	viii
App. 17: KAK für die Täler Pshart Gumbez Kol, Madian Gumbez Kol und Bash Gumbez .....	viii
App. 18: Lagemaße Natrium-Konzentration .....	viii
App. 19: Lagemaße Kalium-Konzentration .....	ix
App. 20: Lagemaße Calcium-Konzentration.....	ix
App. 21: Lagemaße Magnesium-Konzentration .....	ix
App. 22: Lagemaße Phosphor-Konzentration .....	x
App. 23: <sup>13</sup> C-Isotopenwerte für Pflanzen- und Bodenproben .....	x
App. 24: <sup>15</sup> N-Isotopenwerte für Pflanzen- und Bodenproben .....	x
App. 25: Auswertung der Alkanmuster mit Wiederfindungsstandard C36 .....	xi
App. 26: Korrelationstest für die Alkanmuster der Pflanzenproben .....	xi
App. 27: Korrelationstest für die Alkanmuster der Bodenproben .....	xii
App. 28: Datenmatrix der PCA und Clusteranalyse.....	xiii
App. 29: Umweltvariablen der DCA .....	xvi

## Abkürzungen

ACTED	Agency for Technical Cooperation and Development, Nichtregierungsorganisation
ASSR	Autonome Sozialistische Sowjetrepublik
BayCEER	Bayreuth Center for Environmental Research
DCA	Detrended Correspondence Analysis, Trendbereinigte Korrespondenzanalyse
GBAO	Gorno Badakhshanskaja Avtonomnaja Oblast, Provinz Gorno Badakhshan, Berg-Badachshan
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, weltweit tätiges Unternehmen der Internationalen Zusammenarbeit für nachhaltige Entwicklung
KAK	Kationenaustauschkapazität
OEP	odd-over-even predominance
PCA	Principal Component Analysis, Hauptkomponentenanalyse
SSR	Sozialistische Sowjetrepublik, eine Unionsrepublik innerhalb der Sowjetunion
Std.-Abw.	Standardabweichung
WRB	World Reference Base for Soil Resources

## Inhalt

Abstract .....	I
Zusammenfassung.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis .....	VI
Appendixverzeichnis .....	VII
Abkürzungen .....	VIII
Inhalt.....	IX
1 Vorwort.....	1
2 Forschungen auf dem Pamir.....	3
2.1 Zielsetzung.....	3
2.2 Hypothesen.....	4
3 Untersuchungsgebiet .....	6
3.1 Lage des Untersuchungsgebietes .....	6
3.2 Soziokultureller Hintergrund .....	8
3.3 Klima .....	12
3.4 Geologie .....	15
3.5 Geomorphologie.....	19
3.6 Boden .....	21
3.7 Vegetation .....	24
3.8 Nutzung: Traditioneller Pastoralismus im Hochgebirge.....	27
3.8.1 Kleinvieh.....	30
3.8.2 Großvieh.....	32
3.9 Beispiebtäler .....	34
3.9.1 Pshart Gumbez Kol.....	34
3.9.2 Madian Gumbez Kol.....	35
3.9.3 Bash Gumbez .....	36
4 Methodik .....	37
4.1 Feldarbeit.....	37
4.1.1 Probenentnahmetechnik .....	37
4.1.2 Aufnahmesituation .....	38
4.1.3 Bodenfarbe.....	39
4.1.4 Bodentemperatur .....	39
4.1.5 Lagerungsdichte .....	39

4.1.6	Wassergehalt.....	40
4.1.7	Hauptwurzelraum .....	40
4.1.8	Beweidungsintensität .....	41
4.2	Laboranalysen.....	42
4.2.1	Korngrößenanalyse .....	42
4.2.2	pH-Wert.....	43
4.2.3	Elektrische Leitfähigkeit .....	43
4.2.4	C/N-Verhältnis.....	43
4.2.5	Kationenaustauschkapazität nach Trüby und Aldinger .....	44
4.2.6	Phosphor .....	46
4.2.7	Stabilisotopenanalytik.....	46
4.2.8	Alkananalyse .....	48
4.3	Statistische Auswertungen .....	50
4.3.1	Deskriptive Statistik und explorative Datenanalyse .....	50
4.3.1.1	Uni- und bivariate statistische Methoden .....	50
4.3.1.1.1	Boxplots .....	50
4.3.1.1.2	Korrelationsanalyse .....	51
4.3.1.2	Multivariate statistische Methoden .....	52
4.3.1.2.1	Clusteranalyse.....	52
4.3.1.2.2	Ordination .....	54
4.3.1.2.2.1	Hauptkomponentenanalyse (PCA) .....	54
4.3.1.2.2.2	Detrended Correspondence Analysis (DCA) .....	56
4.3.1.2.3	Multivariate Analyse ordinal skalierten Daten.....	57
4.3.2	Schließende Statistik .....	58
4.3.2.1	Test auf Normalverteilung .....	58
4.3.2.2	U-Test.....	58
4.3.2.3	H-Test.....	59
5	Ergebnisse.....	60
5.1	Beweidungsintensität .....	60
5.2	Physikalische Eigenschaften .....	62
5.2.1	Bodenfarbe.....	62
5.2.2	Wurzelhorizont .....	63
5.2.3	Bodenwärmehaushalt.....	63
5.2.4	Dichte .....	65
5.2.5	Wassergehalt.....	67
5.2.6	Skelettgehalt .....	71
5.2.7	Korngrößen .....	72

5.3	Chemische Eigenschaften.....	73
5.3.1	Bodenacidität.....	73
5.3.2	Leitfähigkeit.....	75
5.3.3	Kalkgehalt.....	77
5.3.4	Organischer Kohlenstoffgehalt .....	78
5.3.5	Humusgehalt .....	79
5.3.6	Stickstoff.....	80
5.3.7	C/N-Verhältnis.....	81
5.3.8	Kationenaustauschkapazität.....	83
5.3.8.1	Natrium .....	85
5.3.8.2	Kalium .....	86
5.3.8.3	Calcium.....	86
5.3.8.4	Magnesium .....	87
5.3.9	Phosphor .....	88
5.3.10	Stabile Isotope .....	90
5.3.10.1	Kohlenstoff.....	90
5.3.10.2	Stickstoff .....	92
5.3.11	Alkane.....	96
5.4	Hauptkomponentenanalyse .....	105
5.5	Clusteranalyse .....	107
5.6	Charakteristische Leitprofile.....	110
5.6.1	Arenosole .....	110
5.6.2	Leptosole.....	110
5.6.3	Regosole.....	112
5.6.4	Chernozeme .....	113
5.6.5	Kastanozeme.....	114
5.6.6	Cambisole.....	115
5.7	Ordination.....	115
6	Diskussion .....	120
6.1	Physikalische Eigenschaften .....	120
6.1.1	Hauptwurzelraum .....	120
6.1.2	Bodenwärmehaushalt.....	120
6.1.3	Lagerungsdichte .....	121
6.1.4	Wasserhaushalt.....	122
6.1.5	Korngröße .....	123
6.2	Chemische Eigenschaften.....	125
6.2.1	Bodenacidität .....	125

6.2.2	Versalzung.....	126
6.2.3	Kohlenstoff.....	128
6.2.4	Nährstoffhaushalt .....	130
6.2.4.1	Stickstoff .....	131
6.2.4.2	Natrium .....	132
6.2.4.3	Kalium .....	133
6.2.4.4	Calcium.....	133
6.2.4.5	Magnesium .....	133
6.2.4.6	Phosphor.....	134
6.2.5	C/N-Verhältnis.....	135
6.2.6	C/N-Verhältnis und das Tereskenproblem .....	137
6.2.7	Stabile Isotope .....	138
6.2.7.1	Kohlenstoff.....	138
6.2.7.2	Stickstoff .....	139
6.2.8	Alkane.....	141
6.3	Charakteristische Leitprofile.....	142
6.3.1	Bodenentwicklung .....	142
6.3.2	Bodentypen.....	143
7	Synthese .....	144
8	Literaturverzeichnis .....	146
9	Nachwort .....	155
	Wahrheitsgemäße Erklärung.....	157
	Appendix.....	i

## 1 Vorwort

Ein Sommer auf dem Pamir – Forschungen auf dem Dach der Welt im Jahr der Ratte

„Zwölf Tage lang führt der Weg über eine Hochebene, die Pamer genannt wird. Da man während der ganzen Zeit auf keine menschliche Ansiedlung trifft, muß man sich zuvor mit allem nötigen versorgen“ (Polo 1983: 84). Diesen Rat befolgten wir durch Hamsterkäufe auf dem Osh-Bazar in Kirgistan.

Eine lange Fahrt hoch auf das Dach der Welt stand uns bevor: „Eine Kurve, noch eine – und in der Ferne zeigt sich uns die weiße Wand des Transalai. Ein 200 Kilometer langes Gebirge öffnet sich in seiner ganzen Länge und beeindruckt durch sein grandioses Bild, sein gleißendes Weiß und seine Maßstäbe (...) die Nordwand des Pamir“ (AGACHANJANZ 2002: 165). – Zum ersten Mal bleibt mir der Atem weg: Wir befinden uns in Sary Tash auf 3170 m ü. NN im weiten Alaital. Vor uns die majestätische Transalaikette mit ihren weißen Gipfeln.

„Dann folgt der Kysylartpaß (...) Abfahrt hinunter ins graue, leblose Tal des Todes. Das ist schon der Pamir. (...) Weiter steigt die Straße zum höchsten Autostraßenpaß der ehemaligen Sowjetunion, dem Akbaitalpaß – 4655 Meter hoch. (...) Hinter uns liegen 400 Kilometer und fünf Pässe“ (AGACHANJANZ 2002: 165).

„Hatte dieses eisige Hochland nirgends ein Ende? Da wurden wir eines Tages aufs freudigste überrascht, als wir in der Ferne eine kleine Festung auftauchen sahen – Pamirskiy Post, die letzte russische Station auf diesem weltverlorenen Gebiet“ (HEDIN 1912: 18). In der Tat waren wir froh, als wir am 6. Juli nach 13 Stunden Fahrt in Pamirskiy Post, dem heutigen Murghab „auf dem Dach der Welt, 3610 m über dem Meere, fern vom Weltgetriebe, im Herzen Asiens,“ (HEDIN 1912: 19) ankamen.

Schon Marco Polo beschrieb den Pamir 1272 als „einen Punkt, wo man glauben könnte, daß die Gipfel ringsum das Land zum höchsten der Welt machen“ (Polo 1983: 84). Weiter beschreibt er die Quellrasen: „Diese Weide ist so vorzüglich, daß sie innerhalb von zehn Tagen das magerste Vieh fett macht. (...) So hoch sind hier die Berge, daß man keine Vögel in der Nähe der Gipfel sieht, und es wurde sogar behauptet, daß Feuer, die man anzündet, wegen der Schärfe der Luft nicht so kräftig bei der Zubereitung der Speisen wirken“ (Polo 1983: 84). Tatsächlich kocht Wasser bei dem niedrigen Luftdruck auf dem Pamir in dieser Höhe schon bei 86 °C.

Wir gewöhnen uns vergleichsweise schnell an die Höhe unseres Arbeitsgebietes. Die malerische Gesamtkomposition und die verschiedenen Farben werden uns die nächsten Wochen immer wieder traumhafte Landschaftsausblicke gewähren.



In meinen Emails an Familie und Freunde beschreibe ich Murghab als „Grawitko-Town - siffig, stinkig, ranzig...aber gerade deswegen irgendwie kultig mit einem speziellen Flair.“ Die Situation und oftmals harten Bedingungen auf den Jailoos: „Die Leute sind so gastfreundlich, das glaubt man als Mitteleuropäer gar nicht. Immer wird man in die Jurte zum Tee eingeladen. Das ist dann eine ganz andere Welt. Meist gibt es auch etwas zu essen: Brot mit frischen Milchprodukten vom Yak.“

Während der Geländearbeiten auf dem Dach der Welt eignete ich mir selbstständig die praktische wissenschaftliche Vorgehensweise im Feld an. Ich lernte mit der Sense Heu zu machen und Yaks zu melken - zumindest habe ich es versucht.

Später werde ich in mein Tagebuch schreiben: „Ich hätte mir nicht vorstellen können, dass die Leute echt so einfach von kaum etwas leben, dass sie an den Yeti glauben und dass Yaks schnarchen.“

In meinen Gedanken liegen nun alle diese Bilder aus dem Pamir als eine ruhige sonnenhelle Idylle in meiner Erinnerung, trotz der reichen und oft anstrengenden Arbeit, die damit verbunden war und die noch folgen sollte...



Foto: Tobias Kraudzun

## 2 Forschungen auf dem Pamir

**M**arco Polo besuchte den Pamir im 13. Jahrhundert. Zu Sowjetzeiten wurde die Erforschung anhand von wissenschaftlich und politisch motivierten Expeditionen weitergeführt, um mit diesem Wissen unter anderem auch die Produktivität der Hochweiden zu verbessern. Die Grenzregion zur gegenüberstehenden Großmacht England wurde stark subventioniert. Die erste internationale Expedition in die Region war die des deutschen und österreichischen Alpenvereins 1913, geleitet von W. R. Rickmers, sowie die deutsch-russische komplexe Alai-Pamir-Expedition im Jahre 1928. 1936 wurde die Pamir Biologische Station in 3860 m ü. NN errichtet. In den 1960ern und 1970er machte O. E. Agakhanjanz wichtige Studien auf den Hochweiden des Pamir. In jüngerer Vergangenheit war die Zugänglichkeit der zentralasiatischen Gebirge für die internationale Wissenschaft kaum möglich und ist erst seit den 1990er Jahren wieder durchführbar (AKNAZAROV, O. A. 2003, HAUSER 2003). Seit 2007 fördert die Volkswagen Stiftung das interdisziplinäre Forschungsprojekt *Transformation Processes in the Eastern Pamirs of Tajikistan. Changing Land Use Practices, Possible Ecological Degradation and Sustainable Development*. In dieses Projekt ist auch die vorliegende Arbeit integriert.

Die größte Herausforderung an das Ökosystem des Pamir ist eine Balance aus Schutz des fragilen Lebensraumes und einer Sicherung der Lebensgrundlage für die lokale Bevölkerung (HERGARTEN 2003). Eine Rückbesinnung auf alte Traditionsmuster der Weidenutzung kombiniert mit einer Einschätzung der verschiedenen Potentiale der Weidekapazitäten ist demnach angebracht.

### 2.1 Zielsetzung

Hintergrund des von der Volkswagen-Stiftung finanzierten Projektes sind die veränderten Landnutzungen im tadschikischen Ostpamir im Rahmen des Transformationsprozesses. Der Zerfall der UdSSR und die Unabhängigkeit Tadschikistans schufen neue politische und sozio-ökonomische Voraussetzungen für die einst von den Versorgungsstrukturen abhängige Region. Als einzige Ressource stehen der Region die natürlichen Hochweiden für eine mobile Viehwirtschaft zur Verfügung. Der Weideeinfluss wilder und domestizierter Tiere auf die Vegetation durch Fraß und Tritt, Verdauungsvorgänge und Fortbewegung verändert das Landschaftsbild nachhaltig; allerdings wird eine moderate Weideintensität auch als stimulativ und vorteilhaft für Weideökosysteme angesehen (GYAMTSHO 2002). Die signifikante Zunahme der Viehbestände sowie eine veränderte Nutzung führten zu einem erhöhten Druck auf die natürlichen Weidressourcen. Die standortkundliche Untersuchung soll zeigen, ob die raum-zeitliche Varianz der Umweltfaktoren einen größeren Einfluss auf die Bodeneigenschaften hat, oder eher der Beweidungseinfluss, abgestuft nach verschiedenen Intensitäten, den Boden maßgeblich bestimmt.

Ziel des Projektes ist es wissenschaftliche Grundlagen, einer auf den natürlichen Ressourcen basierenden Nutzung, herauszuarbeiten. Eine differenzierte Kenntnis über die Abhängigkeit der Naturräume von Nutzungsmustern und -intensität bzw. von natürlichen Umwelteinflüssen bildet die Grundlage für einen ressourcenschonenden Umgang mit den Weiden des Ostpamir und eine Verhinderung von Degradation und Desertifikation. Wenn die Folgewirkungen der Beweidung auf physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften besser verstanden werden, kann die Desertifikation nachhaltig verhindert bzw. gezielt Sanierungsmaßnahmen eingesetzt werden.

Die Arbeit gliedert sich in drei Teile: Feldarbeit mit Entnahme der Bodenproben im Untersuchungsgebiet, Laborarbeiten zur Bestimmung der Boden- und einiger weniger Pflanzenparameter an der Universität Erlangen-Nürnberg und der Universität Bayreuth, sowie die statistische Auswertung der erhobenen Daten.

## 2.2 Hypothesen

Viele Studien zeigten in der Vergangenheit, dass Beweidung eine tiefgreifende Veränderung auf die Bodeneigenschaften wie Porosität, Chemie, Mikrobiologie, Nährstoffkreisläufe, Produktivität und Erosionsraten hat. So werden die Bodendichte, die Erosion und die kurzfristige Verfügbarkeit von Nährstoffen erhöht, die langfristige Nährstoffverfügbarkeit und die organische Substanz werden dagegen erniedrigt (ROBERSON 1996, STUMPP ET AL. 2005). In einer globalen Review zu Beweidungsstudien konnte herausgestellt werden, dass Beweidung generell einen neutralen oder aber negativen Einfluss auf die Pflanzenproduktivität hat (BIONDINI & MANSKE 1996). Allerdings wird in ariden Regionen die Degradation auch oftmals übertrieben dargestellt und mit klimatischer Variabilität vermischt (STUMPP ET AL. 2005).

Für Wüsten- und Halbwüstenökosysteme ist aus anderen Studien bekannt, dass die raum- zeitliche Varianz von Umweltfaktoren einen weitaus dominanteren Einfluss auf die Ökosystemdynamik besitzt als der anthropogene Beweidungseinfluss. In den Naturräumen der Gebirgssteppe und des alpinen Gürtels scheint es jedoch umgekehrt zu sein (ZEMMRICH 2003; SCHICKHOFF & ZEMMRICH 2003).

Um Einflüsse der Beweidung auf die Pedosphäre der Weidegründe im Ostpamir charakterisieren zu können, sollen die Bodeneigenschaften nach Dichte, Wassergehalt, Körnung, pH-Wert, Leitfähigkeit, Nährstoffverfügbarkeit (N, P, Ca, Mg, Na, K), organischem Kohlenstoffgehalt bzw. Humusgehalt und dem daraus resultierenden C/N Verhältnis näher eingeschätzt werden.

In den Studien von AYUBA (2001) führte Überweidung zu verringerten Stickstoffwerten, einer erniedrigten Kationenaustauschkapazität und austauschbarem Calcium und Magnesium. Der Boden wurde mit Phosphor und organischem Kohlenstoff angereichert.

Anzunehmen ist desweiteren, dass mit zunehmender Beweidung infolge der Trittschäden die Bodenverdichtung steigt und ein Nährstoffentzug erfolgt. Anhand von ausgewählten Proben wird deshalb der pflanzenverfügbare Phosphor bestimmt und in Relation zur Beweidung gesetzt. Erwartungsgemäß sollte sich das C/N-Verhältnis mit intensiverer Weidenutzung verengen, da der pedogene organische Kohlenstoff, aber auch der Stickstoff durch starke Beweidung abnehmen (BLANK ET AL. 2008; BIONDINI & MANSKE 1996; STEFFENS ET AL. 2009; SU ET AL. 2005). Besonders ausgeprägt sollte sich diese Hypothese in den obersten Bodenzentimetern, namentlich den mit „Ah“ bezeichneten Bodenproben manifestieren, während sich in die Tiefe eine Abnahme des C/N-Verhältnisses innerhalb des Profils aufgrund von Mineralisationsvorgängen zeigen sollte. Allerdings gibt es in der Literatur auch andere Erfahrungen: ROBERSON (1996) konnte eine Zunahme des Stickstoffs auf überweideten Flächen diagnostizieren.

Darüber hinaus soll ein kleinerer Probensatz anhand von Isotopenuntersuchungen und Alkananalysen zeigen, ob es einen statistisch signifikanten Zusammenhang zur Beweidungsintensität bzw. zu den Vegetationseinheiten gibt. Die Isotopenanalyse könnte hilfreich sein, eine mögliche CO<sub>2</sub>-Senke im Boden durch Anreicherung organischer Substanz zu identifizieren. Diese könnte eine Quellfunktion erhalten, wenn der Pedosphäre in Folge von Nutzungsänderungen und Veränderungen der Vegetationszusammensetzung weniger organische Substanz zugeführt wird. Durch ein besseres Klimamanagement hoffen Klimaschützer dabei zusätzlich auf den Effekt der Kohlenstoffsinke. Deshalb ist es sinnvoll die Veränderungen der Bodenchemie durch den Störfaktor der Schafe, Ziegen und Yaks zu erörtern. Wie im IPCC WG 1 herausgestellt wird, ist die durch Landnutzung freigesetzte Menge an Kohlenstoff mit den größten Unsicherheiten belastet (DENMAN & BRASSEUR 2007). Des Weiteren ist zu erwarten, dass sich der Boden bei starker Beweidung mit <sup>15</sup>N anreichert. Durch die Analyse der Alkanmuster soll die Abhängigkeit von Umweltfaktoren überprüft werden.

Mithilfe von multivariaten statistischen Methoden soll ermittelt werden, ob sich die Beweidungsintensitäten in der Pedosphäre widerspiegeln oder deren Eigenschaften vielmehr von abiotischen Faktoren abhängig sind. Eine weitere Differenzierung soll nach Vegetationseinheiten erfolgen.

### 3 Untersuchungsgebiet

#### 3.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Der Pamir umfasst 45 % der Landesfläche Tadschikistans, die 143.100 km<sup>2</sup> beträgt. Er ist geologisch, geographisch und biogeographisch seit Jahrtausenden ein wichtiger Übergangsraum mit geostrategischer Bedeutung als Durchgangs- und Rückzugsgebiet verschiedener Völker (BRECKLE 2003; HITZ 1995).

Politisch erstreckt sich das Dach der Welt über die Länder Afghanistan, China, Kirgistan, Pakistan und Tadschikistan. Das Herzstück befindet sich allerdings in Tadschikistan (Abb. 1). Der Ostpamir Tadschikistans wird durch seine isolierte Hochgebirgslage charakterisiert. Die Region grenzt im Norden an Kirgistan, im Osten an China, im Süden und Westen an Afghanistan. Der Pamir wird geomorphologisch, im Norden vom Alai Tal in Kirgistan (Abb. 2), im Osten von der Sarykol Range in China, im Süden vom Wakhan Korridor in Afghanistan und im Westen von den nach Südwesten in den Pjandsh entwässernden Tälern, begrenzt. (BERG 1959; BREU & HURNI 2003a; HURNI ET AL. 2004).

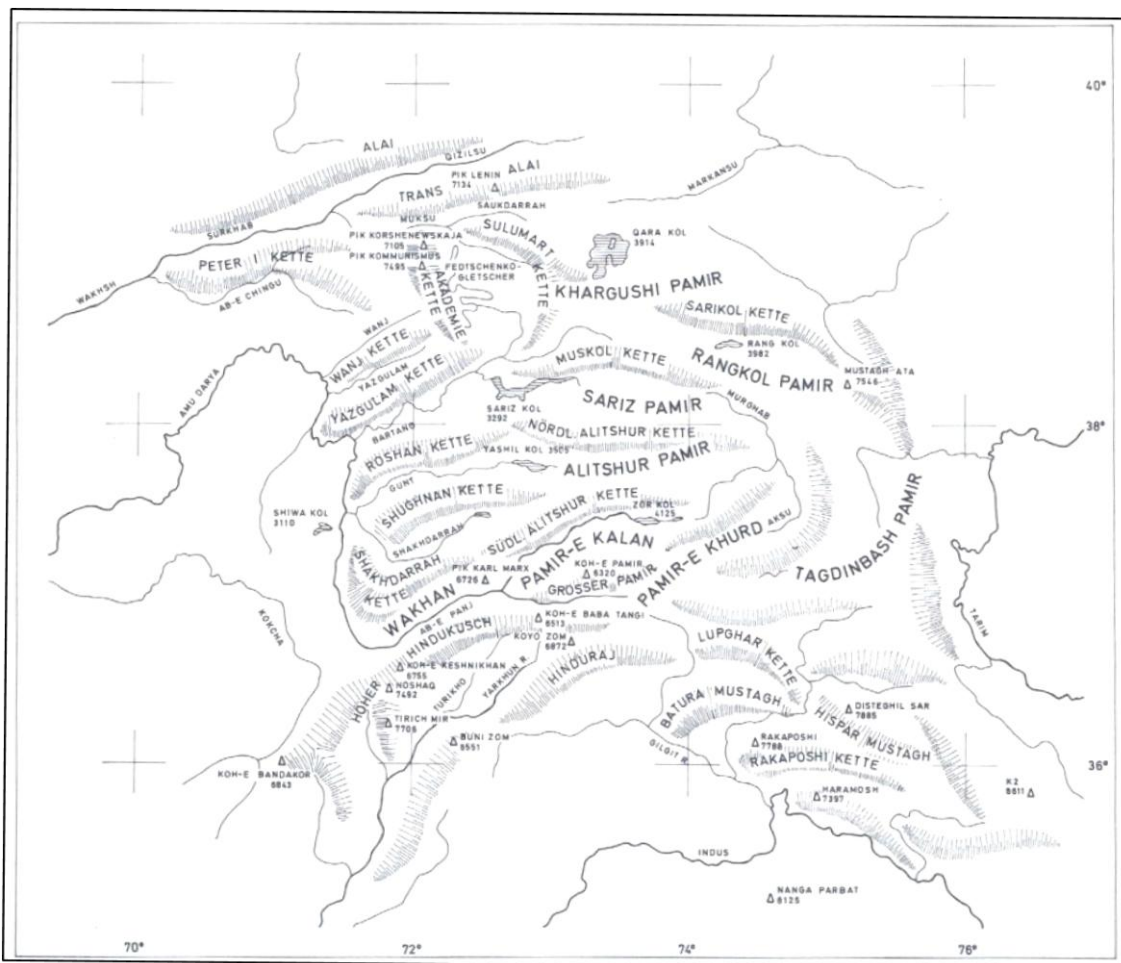


**Abb. 1:** Lage des Pamirgebirges in Zentralasien

Quelle: HURNI ET AL. 2004: 60

Das Gebiet südlich des Transalai lässt sich nach Morphologie und Bevölkerung in zwei Teile gliedern, deren Grenze etwa bei 72° 45' E liegt. Der westliche Teil des Gebirges er-

hält seinen Charakter durch tiefe steilwandige Erosionstäler, in denen Pamiri (Tadschiken) Ackerbau betreiben. Der östliche Teil zeichnet sich durch breite glaziale Täler und weite glazial geformte Hochebenen, die „Pamire“ aus. Zwischen den umliegenden abgerundeten Gipfeln mit Höhen von 5000 m bis 7500 m ähneln die auf 3000 bis 4000 m ü. NN gelegenen alluvial verfüllten Talböden der Hochplateaus einer Mondlandschaft. Es werden sechs Pamire unterschieden (Abb. 2). Der Name für die Hochebenen wurde sowohl auf die jeweils angrenzende Gebirgskette als auch auf das ganze Gebirgssystem übertragen und stammt von den altpersischen Begriffen *pa* (=Berg) und *mira* (=weite Fläche, Plateau, Ausdehnung) (SENARCLENS DE GRANCY 1978). Die höchste Erhebung Tadschikistans ist der Pik Ismoil Somoni (früher Pik Kommunismus, Pik Stalin) mit 7495 m in der Kette der Akademie der Wissenschaften (BERG 1959). Für die Region wird oft der Begriff Badakhshan verwendet, der auch im Namen der autonomen Provinz Gorno Badakhshan (GBAO), also Berg-Badakhshan, enthalten ist (Abb. 3). Allerdings zählen zu Badakhshan noch Teile im Nachbarland Afghanistan (AGAKHANJANZ & BRECKLE 2004; GUNDLACH 1934).



**Abb. 2:** Das Pamir-Hochland mit seinen zahlreichen Gebirgsketten und eingebettet liegenden Hochtälern, den Pamiren  
Quelle: GRANCY DE SENARCLENS 1978: 10

Die Höhenlage mit dem barometrisch niedrigen Druck und das harsche Klima veranlassten BELKIN (1992) dazu, dem Rayon Murghab den mittleren BISCAR (Bioclimatic Index of Severity of Climatological Regime) Wert von 3 zuzuweisen, wobei 10 der günstigste und 1 der unkomfortabelste Wert ist.

Das Untersuchungsgebiet des Projektes umfasst den kompletten Ostpamir. Die Untersuchungen für die vorliegende Teilstudie konzentrieren sich vor allem auf den Süden, insbesondere auf drei Beispieltäler, die in 3.9 näher beschrieben werden. Alle aufgenommenen Untersuchungsflächen sind in Abb. 7 und Abb. 10 als Punkte eingetragen.



Abb. 3: GBAO

Quelle: KREUTZMANN 2002: 32

### 3.2 Soziokultureller Hintergrund

Die Besiedlungsgeschichte im Pamir geht auf ein Alter von über 20.000 Jahren zurück. Aus der Steinzeit sind 50 Siedlungen bekannt, die anhand von Höhlenmalerei und Petroglyphen identifiziert werden konnten. Auch bronzezeitliche Funde zeugen schon von Rind- und Kleinvieh sowie von Pferden (LEILIBEKOW 2003).

Die kirgisische Besiedlung von Norden und Westen her geht auf den Anfang des 19. Jahrhunderts zurück. Allerdings sollte nach DOMEISEN (2003) nicht von einer durchgängigen Besiedlung gesprochen werden, sondern eher von einer saisonalen Nutzung

der Hochweiden durch die aus tieferen Regionen im Alai Tal oder aus China stammenden Viehhirten. Der Gedankengang bei KRAUDZUN (2005) zur Herkunft der kirgisischen Ethnie stützt sich auf eine Vermischung aus Ackerbauern und Viehzüchtern europäischer und mongolischer Stämme mit nachfolgender Turkisierung im 10. Jahrhundert bzw. einem Assimilierungsprozess nomadischer Gruppen im 15. Jahrhundert. Die aufgrund ihrer nomadischen Wirtschaftsweise mobil lebenden Kirgisen entzogen sich bis Ende des 19. Jahrhunderts jeglichen administrativen Zugriffen in diesem peripheren, unkontrollierbaren Hochgebirgsraum.

Eine wichtige geopolitische Rolle spielt der Pamir als Grenz- und Transitgebiet zwischen Teilen der ehemaligen Seidenstraße, die unmittelbar nördlich im Alai-Tal verläuft (LENTZ 2003). Dies machten sich die Kirgisen nicht zuletzt durch Raubüberfälle der Handelskarawanen zu nutze. Die gesellschaftliche Organisationsstruktur der Kirgisen war über Jahrhunderte vor der aufgetroffenen sowjetischen Staatsbildung ein loser Verbund von ökonomisch und politisch unabhängigen Stämmen. Die pastorale Mobilität der kirgisischen Bevölkerungsmehrheit im Pamir beschränkte sich auf eine vertikale Transhumanz mit Yak- und Schafherden, die im jahreszeitlichen Rhythmus verschiedene Hochweiden in unterschiedlichen Höhenlagen aufsucht (KRAUDZUN 2005). Traditionell wurden in der kirgisischen Gesellschaft die von den Ältesten geregelten Weiderechte als Landnutzungsrechte verstanden und nicht als Besitz. Die Grenzen zwischen den Weiden waren fließend und die sehr lockeren Rechte wurden oft nach dem Prinzip, wer auf den *Jailoos* zuerst seine Jurte aufschlug, dem gehörte die Sommerweide, gehandhabt (DOMEISEN 2003). 1891 wurde die russische Garnisonsstation Shah Jan (3640 m ü. NN) als dauerhafte Siedlung im Ostpamir gegründet, die 1893 in Pamirskiy Post umbenannt wurde, und im Zuge des Sozialismus ihren Namen zum heutigen *Murghab Centre* abermals wechselte. 1895 wurden die Grenzen zwischen den chinesischen, englischen und russischen Einflussgebieten durch eine gemeinsame britisch-russische Grenzkommission ohne Rücksicht auf alte Herrschaftsgebiete, Austauschbeziehungen oder Nutzungssysteme festgelegt. Die Sowjetisierung löste schließlich die Russifizierung ab (HITZ 1995). Die gesamte Pamir-Region der sowjetischen Einflussphäre wurde als Siedlungsgebiet der unter dem Begriff „Bergtadschiken“ subsumierten Pamirgruppen als „Berg-Badachschaner Autonomes Gebiet“ administrativ zusammengefasst und 1925 der Tadschikischen ASSR hinzugefügt, obwohl schon damals der Ostpamir ausschließlich von Kirgisen bewirtschaftet wurde (KRAUDZUN 2005). 1929 erfolgte eine Umwandlung von der 1924 an die Usbekische SSR angegliederten Autonomen Tadschikischen ASSR in eine eigenständige Sowjetrepublik (HITZ 1995). Seit der hermetischen Abschottung der sowjetischen Außengrenzen um 1930 kamen die grenzüberschreitenden Wanderungs- und Austauschprozesse komplett zum Erliegen (KREUTZMANN 2002).



Während beim ersten Zensus 1894 für den *District Murghab* noch 1.055 Menschen, 20.580 Schafe, 1.703 Yaks, 280 Pferde und 383 Kamele gezählt wurden, leben heute in der 40.000 km<sup>2</sup> umfassenden Region, vergleichbar mit der Größe der Schweiz, 16.000 Menschen (LUDI 2003a). Damit ist die Bevölkerungsdichte im Ostpamir (0,4 Personen pro km<sup>2</sup>) noch niedriger als in ganz GBAO (3,5 Personen pro km<sup>2</sup>) mit einer Gesamtbevölkerung von 220.000 Menschen und einer Fläche von 63.700 km<sup>2</sup>. Die 1894 ermittelten Viehzahlen entsprechen einer Herdengröße pro Einwohner von 20 Schafen, 1,6 Yaks, 0,3 Pferden und 0,4 Kamelen (LUDI 2003a). Nach DOMEISEN (2003), der seine Daten von *Agroprom Murghab* bezieht, entsprachen die Vergleichswerte 2001 nur noch 2,5 Schafen und 0,9 Yaks. Auf Schafeinheiten bezogen macht das einen Rückgang von 30 auf 7 Schafeinheiten pro Einwohner.

Administrativ gliedert sich GBAO in sieben Rayons (Abb. 3), von denen der *Rayon Murghab* mit 63.700 km<sup>2</sup> den Ostpamir umfasst (BREU & HURNI 2003a). Dieser unterteilt sich administrativ nochmal in sechs Jemoats, wobei dem *Jemoat Murghab* eine zentrale Sonderrolle zukommt. Auf ihn entfallen trotz vergleichsweise engen Raumes 6.700 Personen kirgisischer und tadschikischer Ethnien (DOMEISEN 2003). Der Bevölkerungsanstieg ist auf die demographischen Effekte sozioökonomischer Veränderungen der Sowjets zurückzuführen, die die Weidewirtschaft intensivierten. Neben der militärischen Sicherung der Südgrenze trieb Russland die politische Integration Zentralasiens in den 1920er Jahren aktiv voran. Um das kaum besiedelte Gebiet für strategische Funktionen gezielt zu fördern, erhielt es 1932 in seiner heutigen Gestalt innerhalb Tadschikistans als *Gorno Badakhshan* beschränkte Autonomie (HURNI ET AL. 2004). Das Verwaltungsgebiet *Gorno-Badakhskaja Avonomnaja Oblast* umfasst heute etwas mehr als 44 % der Landesfläche Tadschikistans (KREUTZMANN 2002). Die Unkontrollierbarkeit des peripheren Raumes in Kombination mit der vagen Präsenz einer mobilen Ökonomie machte die mobilen Pastoralisten schwer beherrschbar (KRAUDZUN 2005). Die Kollektivierung passte die halbnomadische kirgisische Wirtschaftsweise den Erfordernissen der sowjetischen Ökonomie an, indem von 1933 bis in die 1940er Jahre die privaten Viehbestände zunächst kollektiviert und in Kolchosen gemeinschaftlich bewirtschaftet wurden (HITZ 1995). Im Rayon Murghab entstanden fünf Kolchosen, die in den 1970er Jahren in Sowchosen umgewandelt wurden. Das traditionelle Wissen der Weidewirtschaft wurde in den spezialisierten Berufsgruppen der Kolchosen und Sowchosen separiert und blieb nur bei den professionellen Viehhirten konzentriert. Viele Prinzipien nachhaltigen Wirtschaftens unterlagen dem Kollektivierungsprozess, der allerdings andererseits auch wissenschaftliche Produktionsbetreuung und neue Arbeitsmethoden schuf. Während der sowjetischen Periode herrschte ein ausgeklügeltes System der Weidewirtschaft, bei dem vier Weiden pro Jahr aufgesucht wurden und auch abgelegene Weiden dank eines Transportsystems miteinbezogen waren. So konnten die Viehzahlen der 1970er Jahre

nur mittels einer gleichverteilten Nutzung aller Weideflächen erzielt werden (KRAUDZUN 2005). Neben Zuimporten von Futter und veterinären Beobachtungen, wurden die Winterweiden um die permanenten Siedlungen gedüngt und bewässert, aber während des Sommers kaum beweidet, sondern zur Heuproduktion für die Winterfutterergänzung berücksichtigt. Basierend auf der Darstellung bei KRAUDZUN (2005) wurde erst durch sowjetische Bemühungen der Yak als Nutztier, aufgrund seiner besseren physiologischen Eignung für die Hochgebirgsviehzucht, im Pamir etabliert. Obwohl traditionell im kirgisischen Pastoralismus vergleichsweise unpopulär, konnten die Bestände unter sowjetischer Produktionsorganisation verachtfacht werden. Das Fleisch wurde in andere Teile der Sowjetunion exportiert. Im Gegenzug erhielt die Region sowie ganz Gorno Badakhshan Unterstützung in Form von Nahrungs- und Konsumgütern, Brennstoff und Kohle um eine Energieversorgung zu gewährleisten. Eine soziale und ökonomische Grundversorgung mit Infrastruktur war somit geschaffen. Selbst eine biologische Forschungsstation wurde in dieser Zeit in Chechekty etabliert. Der Region oblag in erster Linie die Grenzsicherung; das Wirtschaftssystem des GBAO konnte nur durch massive Transferzahlungen der sowjetischen Zentralregierung aufrechterhalten werden. Der sowjetische Einfluss modifizierte die lokale Ökonomie innerhalb weniger Jahrzehnte von einem auf Subsistenz basierenden Agrarsystem zu einem arbeitsteiligen Wirtschaftsgefüge agrarindustriellen Zuschnitts mit starker Spezialisierung der Arbeitskräfte. Der Grad der Selbstversorgung rangierte während der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nur zwischen 10 und 20 %. Trotz Mechanisierung, Optimierung und Intensivierung wurde das traditionell organisierte Nutzungsrecht kaum verändert. Während das Allmende-Land als Eigentum aller früher von einzelnen Familien genutzt wurde, wurden die Nutzungsrechte nun auf Gruppen von Siedlungsbewohnern übertragen. Das übergeordnete Sicherheitsinteresse sollte die Bevölkerung an die Region mittels sozialen Investitionen binden und damit den marginalisierten Raum erhalten (KRAUDZUN 2005). Auf der Strecke blieb traditionelles Wissen über die Landnutzung.

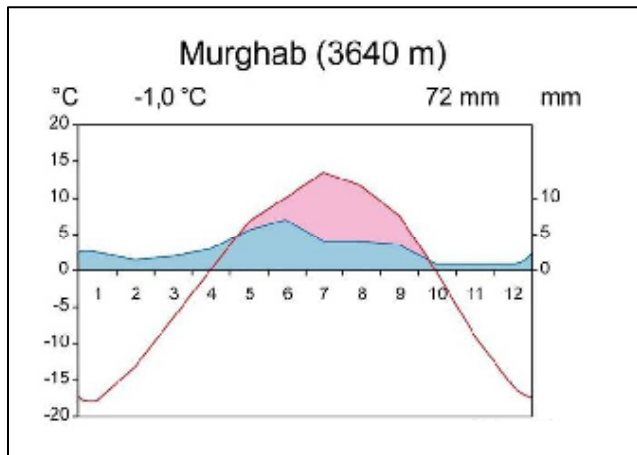
Ein Rückgang der Viehpopulation begann Ende der 1970er Jahre und setzte sich verstärkt mit dem ökonomischen und politischen Zerfall ab 1990 fort. Das Bevölkerungswachstum hingegen stieg stetig und verlangsamte sich nur durch die Unabhängigkeit Tadschikistans, als die überlebenswichtigen Zuwendungen plötzlich wegfielen. Die Situation verschärfte sich durch die Flüchtlingswellen von 30.000-50.000 Menschen aus anderen Teilen des Landes während des direkt anschließenden Bürgerkrieges und brachte die Region an den Rand einer humanitären Katastrophe, die nur durch massive Hilfslieferungen kompensiert werden konnte (KRAUDZUN 2005). Auch nach der Unabhängigkeit Tadschikistans 1991 blieb GBAO innerhalb der neuen Republik Tadschikistan autonom (DOMEISEN 2003). Die ökonomische Situation ist heute von Armut und Abhängigkeit gegenüber externer humanitärer Hilfe gekennzeichnet. Kurz vor Ende der

Sowjetunion wurden die Staatsfarmen zunächst in Genossenschaftsfarmen und nach dem totalen Zusammenbruch vollständig aufgelöst und die Anteile an ihre früheren Besitzer übertragen. Von 1995 bis 2000 verschlechterte sich die ökonomische Situation und die Zahl der Arbeitsplätze sank, so dass die Arbeitslosenzahl in der Region 20 % überstieg; Tauschhandel ersetzte die Barzahlung (BREU & HURNI 2003b). Es folgten verschiedene Strategien der lokalen Bevölkerung: Die Arbeitsmigration einiger Familienmitglieder nach Russland oder ins benachbarte Kirgistan oder aber eine Nutzungssteigerung der lokalen Ressourcen des ökologisch benachteiligten Raumes. Wie KRAUDZUN (2005) ausführt, gehört das Land heute grundsätzlich dem tadschikischen Staat, lediglich die Nutzungsrechte können vererbt werden. Zwar wurde in Tadschikistan 1999 das Vieh privatisiert, trotzdem gibt es kein formales Pachtsystem (LUDI 2003b). Die Weiden im Rayon Murghab dürfen somit von allen Bewohnern gemeinschaftlich genutzt werden. Die Regelung hierzu sowie die Vermeidung von Nutzungskonflikten wurden den Farmerverbänden übertragen. Die Privatisierung resultierte in einer Konzentration der Viehbestände auf wenige Haushalte, während der größte Teil der Bevölkerung ohne eine für die Subsistenz notwendige Grundlage zurückblieb. Durch ihr Know-how klar bevorteilt waren hierbei die spezialisierten professionellen Hirten. Weil die Absatzmärkte plötzlich wegbrachen, blieb nur der Weg in die Subsistenzwirtschaft aus Fleisch und Milchprodukten übrig. Da die Viehproduktion aber oftmals unter den Haushaltseinkommen liegt, sind viele Familien auch heute noch auf externe humanitäre Hilfe angewiesen. Dies konnten Teilstudien des Projektes für Murghab Zentrum bestätigen. Des Weiteren konnte während der Feldarbeiten vereinzelt der Einsatz bzw. immer noch latente Gebrauch von UNO-Flüchtlingszelten aus Bürgerkriegszeiten beobachtet werden.

### 3.3 Klima

In Zentralasien wechselt der Winkel der Sonneneinstrahlung zwischen minimal 25° und maximal 78°. Die Sonneneinstrahlung im Ostpamir entspricht 90 % der Solarkonstanten, was durch den geringen Bewölkungsgrad von nur 39 % aufgrund der Kontinentalität erklärt werden kann. Damit ist allerdings nicht nur die ultraviolette Einstrahlung - mit 35 % statt 6 % auf Meereshöhe - hoch, sondern auch die nächtliche Ausstrahlung fällt enorm aus. Der Luftdruck beträgt nur noch etwa 60 % verglichen mit Meeresniveau (DOMEISEN 2003). Nach AGACHANJANC (1985a) umfasst der Temperaturgradient im Pamir 0,71 K je 100 m Höhe. Die thermischen und hygrischen Verhältnisse sind in den einzelnen Teilen des Pamir aufgrund der starken Reliefgliederung sehr unterschiedlich. Das Temperaturregime ist streng kontinental. Die Hochplateaus des Ostpamir gehören zur trockenen Klimazone mit kühlen Sommern und strengen Wintern mit wenig Schnee. In der effektiven Klassifikation nach W. Köppen und R. Geiger von 1961 lassen sie sich den

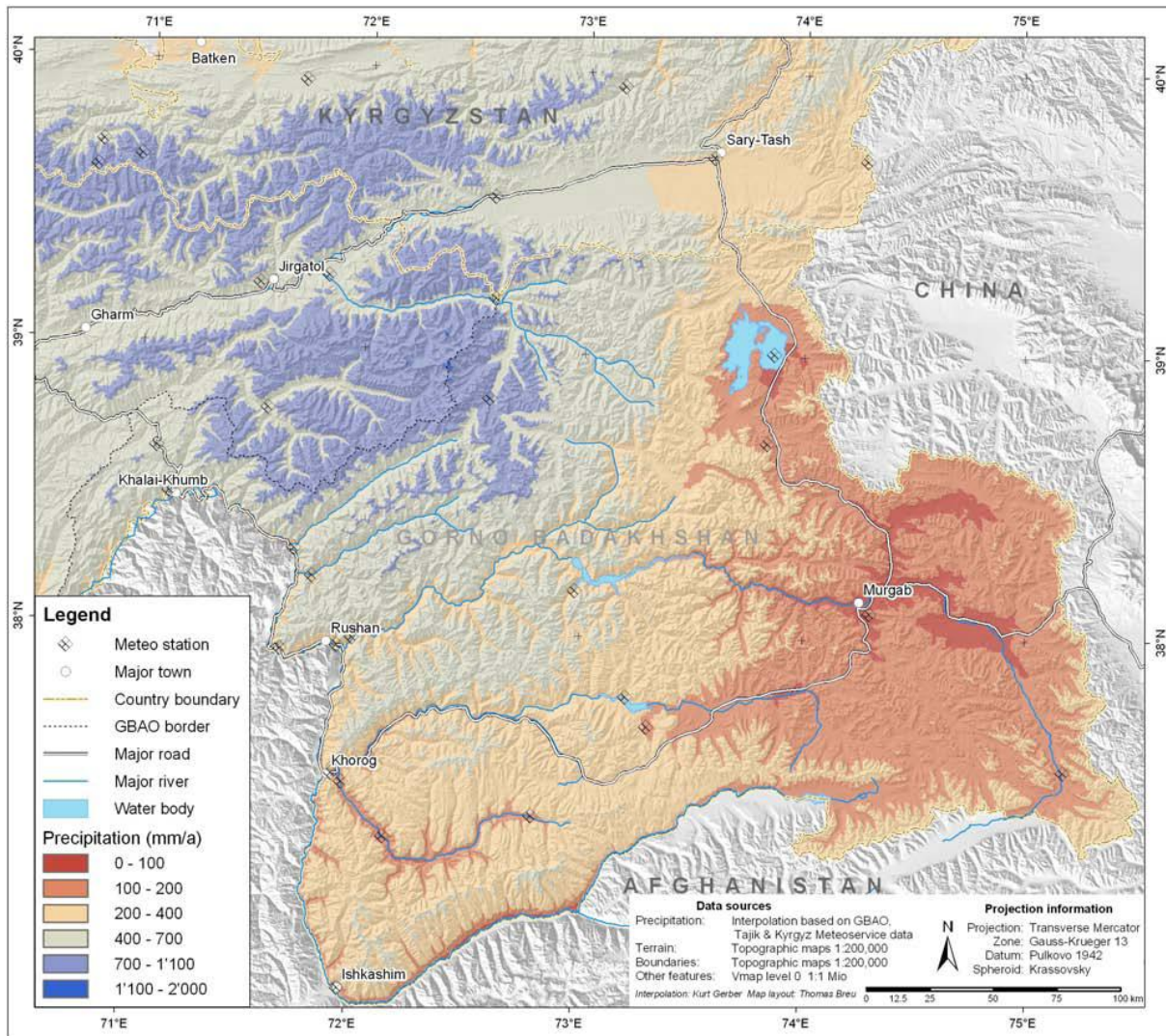
BWk-Klimaten zuordnen. Zusammen mit der hohen Strahlung und den starken Winden ergibt sich eine Hochgebirgswüste.



**Abb. 4: Klimadiagramm Murghab**

Quelle: verändert nach MIEHE ET AL. 2001: Beilage I

Zwischen Oktober und März liegen die Durchschnittstemperaturen unter dem Gefrierpunkt. BORISOV (1965) gibt für Murghab eine frostfreie Periode von 56 Tagen an, während WALTER & BRECKLE (1994) von nur 10-30 Tagen ausgehen. Fröste können ganzjährig auftreten. Die potentielle Verdunstung nimmt extreme Werte von über 1000 mm pro Jahr an. Trotz einer Sonnenscheindauer von 3000 Stunden, fehlen auf manchen Flächen längerfristige Temperaturen über 10 °C. Die Vegetationsperiode dauert etwa 100 Tage von Ende Mai bis Anfang September (DOMEISEN 2003). Boden und Vegetation werden im Winter oft nicht von einer isolierenden Schneeschicht geschützt. Die Sommer sind trotz hoher Einstrahlung kühl. Die mittlere jährliche Temperaturamplitude beträgt zwischen 30-35 K, die Tagesamplitude während der Vegetationsperiode ist ebenfalls etwa genauso hoch (AGAKHANYANTZ & LOPATIN 1978). Damit hängt die Länge der Vegetationsperiode konsequent mit der Höhenlage zusammen (FRANZ 1973). Das absolute Minimum liegt bei -45 °C, das absolute Maximum bei 30 °C. Die mittlere Jahrestemperatur schwankt zwischen -1 °C und -2,8 °C (Abb. 4) (WALTER & BRECKLE 1986). Von Oktober bis April steigen die Durchschnittstemperaturen nicht über den Gefrierpunkt (DOMEISEN 2003). In den Sommermonaten können die Bodenoberflächentemperaturen je nach Albedo Werte von mindestens 44,4 °C erreichen, wie unsere Messungen vor Ort ergaben. Die täglichen Temperaturschwankungen der Bodenschichten erreichen 25 bis 30 °C, im Jahrgang sogar 100 °C. Selbst in 1 m Tiefe schwanken die Temperaturen noch zwischen 13 °C und -8,5 °C. In Tiefen von 4 m ist der trockene Boden selten gefroren, weshalb Permafrost nur lokal in Tal- und Kessellagen auftritt, sofern der Boden dort genügend Feuchtigkeit enthält (BREU & HURNI 2003a; SCHNEIDER 2003; BORISOV 1965; WALTER & BRECKLE 1986).



**Abb. 5: Niederschlagsmodell für den Tadschikischen Pamir**  
**Quelle: BREU 2006: 56**

Die Jahresniederschlagssummen sind in den einzelnen Gebieten des Gebirgssystems sehr verschieden, minimieren sich jedoch im Ostpamir von SW nach NE (Abb. 5). Sie variieren zwischen 35 mm und 145 mm, wobei durchschnittlich etwa 67 mm vor allem im Sommer zwischen Mai und August während der Vegetationsperiode fallen. Sie hängen von der Exposition zu den Niederschlag bringenden Winden, der Höhenlage und der Lage innerhalb des Gebirgssystems ab. Während die Gebirgsketten des Westpamir die Hochebene gegen feuchte atlantische Luftmassen abschirmen, verhindern Hindukush und Himalaya das Vorstoßen von Luftmassen des Indik nach Norden (BREU & HURNI 2003). In den Höhen herrscht über Mittelasien ganzjährig eine Westwindströmung mit Zyklonen aus mediterranen und atlantischen Luftmassen vor (BERG 1959). So erhalten die wenigen Nord-Süd-streichenden Ketten auf ihrer Westabdachung deutlich mehr Niederschläge als auf ihrer Ostabdachung. Da die Niederschläge meist nur in geringen Mengen in Form von Graupel oder Schnee fallen und selten als Regen, werden selbst die skelettreichen Böden höchstens bis in Tiefen von 1 m durchfeuchtet (WALTER

& BRECKLE 1986) Für Murghab liegt der Befeuchtungskoeffizient nach der Formel von Mezenzev [1] bei 0,23.

$$K = \frac{Kx}{Zm} = \frac{Kx}{0,2 \sum T^{\circ} (>10^{\circ}) + 306} \quad [1]$$

Die Formel berücksichtigt die Summe der Jahresniederschläge  $Kx$  in mm und die Verdunstung  $Zm$ , die sich aus der Summe der Temperaturen über  $10^{\circ}\text{C}$  und einem gemittelten Abflusskoeffizienten ergibt. Der berechnete Wert für Murghab repräsentiert ein arides Klima ( $0,6 > x > 0,2$ ) mit der Tendenz zur extremen Aridität ( $x < 0,2$ ). Dies lässt nur eine sehr lockere Wechselbeziehung zwischen Temperatur, Boden und Vegetation und eine umso engere Beziehung zum limitierenden Faktor der Wasserverfügbarkeit zu (AGACHANJANC 1978).

AGAKHANYANTZ (1978) stellt allerdings heraus, dass die Aridität erst im Quartär mit der tektonischen Heraushebung des Pamir und der ihn umgebenden, von feuchten Monsunluftmassen abschirmenden, Gebirgsketten zunahm. Die Niederschlagssumme mit unter 300 mm ist erst seit den letzten 15.000 Jahren stabil. Verstärkt wird die Aridität durch barische Gründe der winterlichen thermischen Antizyklone.

Die Hochplateaus des Ostpamir sind starken Winden und teilweise Tornados ausgesetzt. In den Wintermonaten kommen Schneestürme hinzu. Im Frühjahr können die Talböden durch die erhöhte Wasserführung während der Schneeschmelze überflutet werden. Im Zuge der Klimaerwärmung steigt die Gefahr von Steinschlag, da der Permafrost der Hochgebirge taut und die einst gebundenen Fels- und Hochgebirgsböden beschleunigter Erosion in Form von Muren und Schlammströmen ausgesetzt werden. Diese Gefährdungen sind auch als Folge von Starkniederschlägen gegeben (BORISOV 1965; BREU & HURNI 2003a; SCHNEIDER 2003; WALTER & BRECKLE 1986).

Der Ostpamir birgt mit seinen nicht vorhersagbaren erratischen Naturereignissen ein hohes Ertragsrisiko hinsichtlich des Weideertrages. Die Witterungsverhältnisse während der Wintermonate sind besonders einflussreich, da starke späte Schneefälle und eine geschlossene Schneedecke bei bereits aufgebrauchten Heuvorräten die Viehbestände stark dezimieren. Futtermangel kann rasch in Viehverlusten resultieren (KRAUDZUN 2005). Die für die Weidenutzung wichtigen qualitativen und quantitativen Erträge nehmen laut WALTER & BRECKLE (1994) mit der Aridität ab. Der Einfluss der mittleren Jahresmitteltemperatur spielt hingegen eher eine untergeordnete Rolle, wengleich die absoluten Tiefwerte des Ostpamir die Erträge ebenso limitieren.

### 3.4 Geologie

Das Pamirgebirge zeichnet sich durch heterogene orographische Verhältnisse aus. Geologisch setzt sich in ihm der nach Süden offene alpine Bogen aus Himalaya und

Hindukush fort, mit denen es neben dem Tien Shan in tektonischer Interaktion steht. Mit den höchsten Bergketten Zentralasiens markiert das Pamirgebirge den Nordrand des Himalayas. Im Norden wird es durch das etwa 150 km lange und 7 bis 20 km breite Alaital vom Alai abgegrenzt. Die west-östlich streichenden Vorketten sind der Transalai und die Kette Peter I. Der alpine Orogenesegürtel wurde durch die Norddrift des indischen Subkontinents aus Gondwana und dessen Kollision und anschließender Subduktion mit Eurasien im Känozoikum aufgefaltet, bei der ozeanische Kruste mit Vulkaniten und Sedimenten kontinentaler Kruste verschmolzen wurde (KHAIN 1994). Hierbei wurde die Kruste um mehr als 300 km verkürzt und die Sedimentlagen um mindestens 200 km nord-nordwestlich verschoben, was eine komplizierte Falten- und Störungsstruktur mit wechselnder Vergenz zur Folge hat. Der tektonische Aufbau ist deshalb sehr komplex. Der Hebungsvorgang der Geoantiklinale um 4000-5000 m begann in der zweiten Hälfte des Pliozäns und dauert bis in die Gegenwart an. Die Hebung beinhaltete eine nordwärtige Bewegung der Überschiebungsdecken (KHAIN 1994). Die Darstellung in FRANZ (1973) nimmt an, dass die Hebung zum Großteil erst nach der letzten Maximalvereisung im Holozän stattfand. Durch den enormen Druck und die hohen Temperaturen wurden die vormaligen Sedimentgesteine metamorphisiert. Ebenso wurden spezielle Metalle und nichtmetallische Minerale geformt. Auch wenn es keinen aktiven Vulkanismus im Ostpamir gibt, tritt doch intensive seismische Aktivität in Form hydrothermaler Aktivität entlang des großen Faltenystems auf. Die Hauptstörungen verlaufen west-südwestlicher und ost-nordöstlicher Richtung. Die Hauptketten des Pamir verlaufen in Ost-West-Richtung, einige streichen aber auch Nord-Süd. Der anhaltende Prozess der Orogenese und die Denudation sind die Motoren der heutigen Reliefgenese des Pamir. Immerhin beträgt die Konvergenzrate immer noch 2 cm pro Jahr und wird von zahlreichen Erdbeben begleitet. Hierzu zählen die Beben Karatag 1907, Sarez 1911 und Khait 1949 mit Magnituden bis zu 7,4 auf der Richterskala. Sie sind besonders an Bruchzonen gebunden, wovon eine entlang der Linie Khorog-Murghab verläuft (SCHNEIDER 2003).

GUNDLACH (1934) zerlegte das Pamir-System in vier Zonen und benannte sie je nach Dominanz der vorherrschenden Gesteine in nördliche Sedimentzone, nördliche Kristallinzonen, südliche Sedimentzone und südliche Kristallinzonen (Abb. 6). Die verschiedenen tektonischen Zonen können auch der Karte in Abb. 7 entnommen werden. Demnach fällt das Untersuchungsgebiet in die südliche Sedimentzone bestehend aus Kalken und Schiefen und die südliche Kristallinzonen mit Gneisen und Glimmerschiefern. Wie die mittels Punkten in die Karte eingetragenen Untersuchungsflächen zeigen, entwickelte sich ein Großteil der untersuchten Böden auf carbonathaltigem Ausgangsgestein. Nur das Tal Bash Gumbes liegt eindeutig in silikathaltigem Ausgangsgestein. Daneben sind immer wieder Metamorphite, darunter

vor allem Schiefer auch in der tektonisch stark zergliederten Rushan-Pshart Zone zu finden.

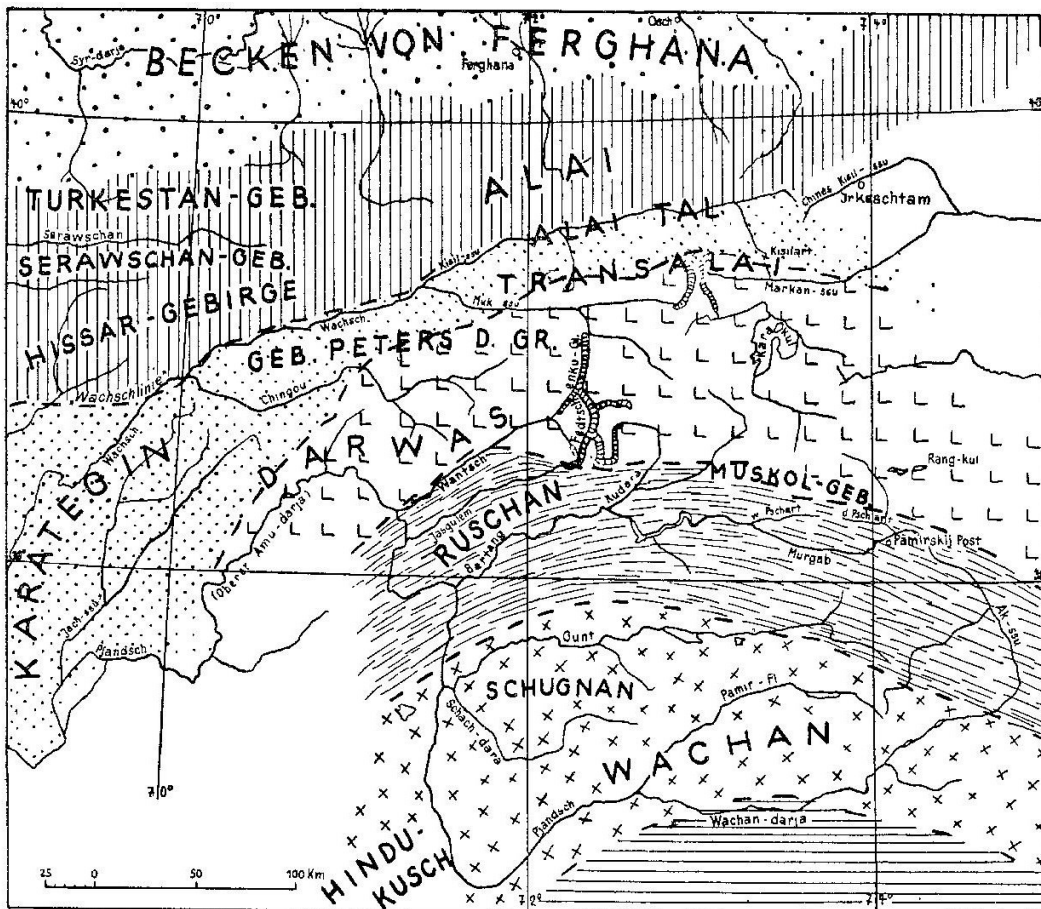


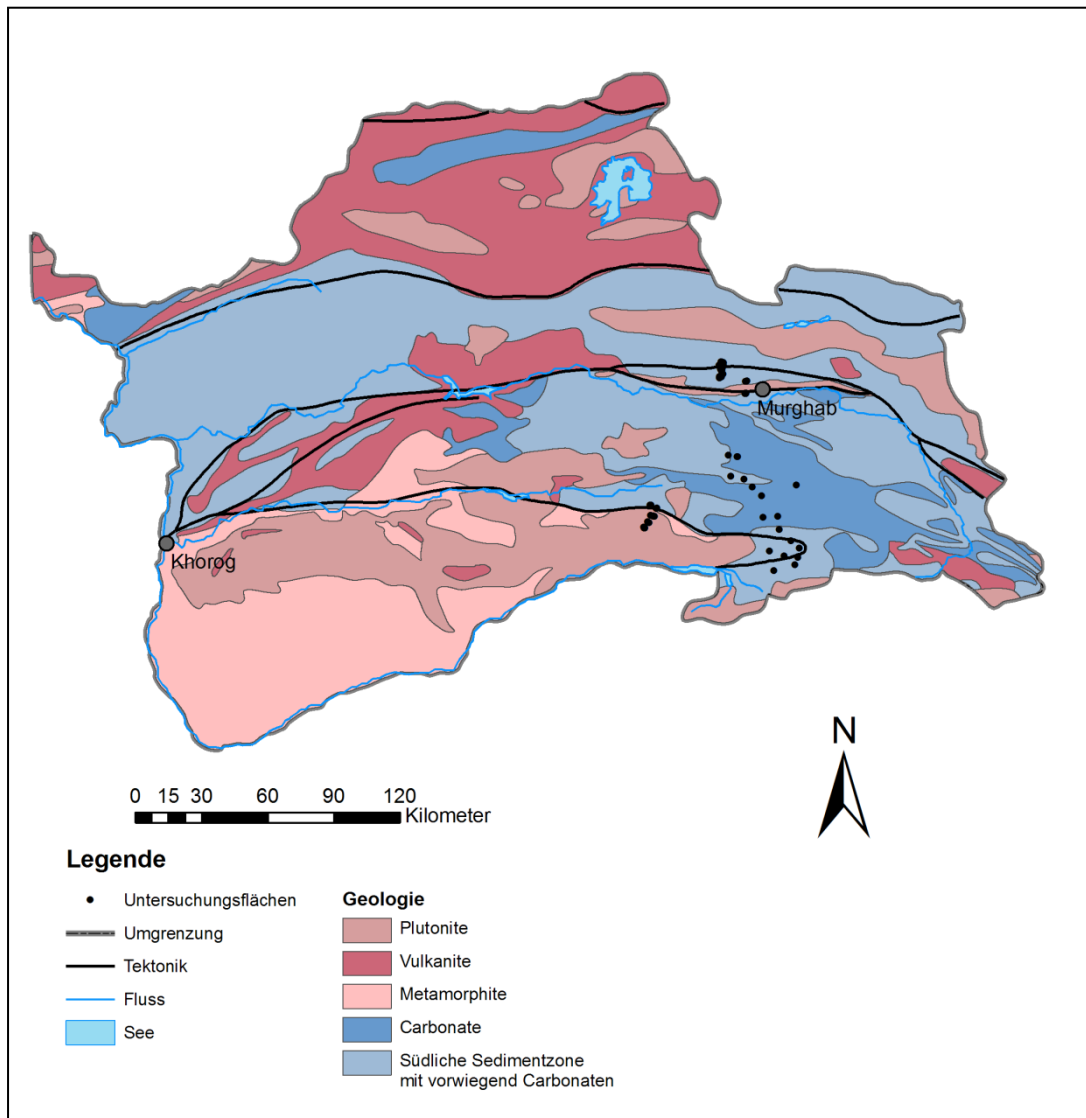
Abb. 6: Die vier geologischen Zonen des Pamir nach GUNDLACH: eng punktiert: nördliche Sedimentzone; Häkchen: nördliche Kristallizone; gestrichelt: südliche Sedimentzone; schräge Kreuzchen: südliche Kristallizone

Quelle: GUNDLACH 1934: 333

Spätere Arbeiten untergliedern den Pamir in fünf geologische Großeinheiten: Nordpamir, Zentralpamir, Rushan-Pshart Zone, Südwestpamir und Südostpamir. Für das Untersuchungsgebiet sind vor allem die Rushan-Pshart Zone, der Südwestpamir und der Südostpamir bedeutend. Die Rushan-Pshart Zone besitzt eine komplexe tektonische Struktur zwischen Zentral- und Südostpamir, wenngleich sie in ihrer maximalen Ausdehnung höchstens 20 km erreicht (KHAIN 1994). Sie ist im Nordteil aus terrestrischen Paläozoischen Sedimenten aufgebaut, südlich daran schließt sich eine Übergangszone mariner mesozoischer Sedimente an, bis sie im Süden mit ophiolitischen Serien endet. Sie beinhaltet ein schmales mesozoisches Meeresbecken. Die Gesamtsequenz der Rushan-Pshart-Zone kann als Kontinentalabhang eines Rift-Basins ozeanischer Kruste interpretiert werden, die im späten Paläozoikum die Kontinentalblöcke des Zentral- und Südpamir trennte (KHAIN 1994). Die Lithologie des Südwestpamir besteht aus präkambrischen Metamorphiten mit verschiedenen Gneisen und jurassisch-miozänen



Granitkomplexen. Die ältesten terrestrischen Serien des Südostpamir stammen aus dem Karbon und Perm, gefolgt von triassischen und jurassischen Formationen. Die jüngste Formation wird von roten kontinentalen Klastika gebildet, die im Süden Vulkanite beinhalten (BREU & HURNI 2003a; SCHNEIDER 2003; AGAKHANJANZ & BRECKLE 2004; FRANZ 1973). Unabhängig von der tektonischen Zone sind die jüngsten Intrusiva im Ostpamir Syenite und Gabbros, die aus dem Miozän stammen und somit 21-15 Millionen Jahre alt sind (KHAIN 1994).



**Abb. 7: Geologie des Pamir**

Quelle: verändert nach NEDZVEDSKY 1968: 19

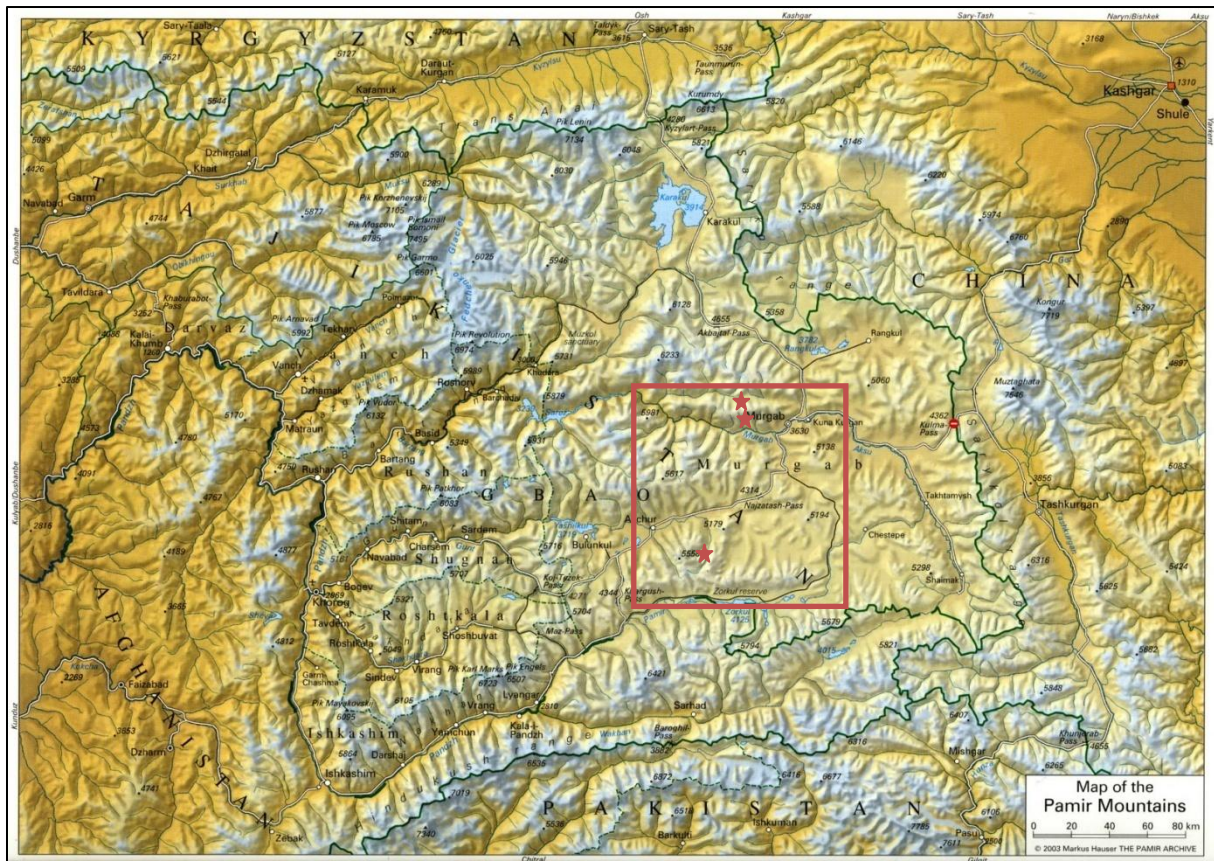
Die geologische Karte in Abb. 7 wurde auf Grundlage der kleinmaßstäblichen 1 : 1.500.000 Tektonikkarte des Tadschikischen Nationalatlas, der Übersichtskarte zur Tektonik bei KHAIN (1994) sowie eigenen Erhebungen im Gelände erstellt.

Bodenschätze lagern im Ostpamir bei Alichur und Rangkul, aber eine hohe Spekulation mit kommerzieller Ausbeutung wäre übertrieben. Wegen der hohen Explorationskosten werden die Vorkommen an Metallen, Erzen, Bausteinen, Evaporiten und Edelsteinen wenig genutzt. Kohle und Kohlenwasserstoffe sind kaum vorhanden. Da die Infrastruktur für den Bergbau fehlt, die Qualität und Quantität der Bodenschätze nicht ausreichen, die periphere Hochgebirgslage und die Wasser- und Energieversorgung nur rudimentär sind, ist der Abbau derzeit nicht rentabel (SCHNEIDER 2003).

Die Geologie spielt als bodenbildender Faktor in Form des Ausgangsgesteins eine wichtige Rolle. Es bestimmt durch seine Zusammensetzung in wesentlichem Maße die physikalischen und chemischen Substrateigenschaften. Die Beziehung zum Ausgangsgestein ist besonders eng, wenn sich die Entwicklung des Bodens noch im Initialstadium befindet (WIEßNER 2009). Im Arbeitsgebiet liegen als Ausgangsgesteine für die Bodenbildung vor allem Paläozoische und Mesozoische Sedimente in Form von Kalken und Schiefen sowie metamorphe Gesteine vor (Abb. 7).

### 3.5 Geomorphologie

Die Gliederung des Pamir in einen West- und einen Ostteil spiegelt sich auch in der Geomorphologie wider. Während sich der Westteil durch eine äußerst tiefe Zerschneidung von 2500-3000 m Tiefe auszeichnet, besteht der Ostpamir aus 3500-4500 m hoch gelegenen Plateaus und Bergländern, die von mehr als 6000 m hohen Gebirgszügen überragt werden (Abb. 8). Nach FRANZ (1973) war die lokale Bezeichnung *Pamir* für die hochgelegenen Becken und Talböden namensgebend. Er nennt diesen Relieftyp aus Hochplateaus und Bergländern, auch *Syrte*. Sie sind vor allem für die intramontanen Depressionen zwischen 3300 m ü. NN und 4000 m ü. NN typisch. Die Verebnungsflächen werden von Ketten mit vergleichsweise wenig Reliefdifferenz und absoluten Höhen von 5000-5700 m ü. NN unterbrochen, was einem Höhenunterschied von 700-1200 m entspricht. Diese sind Relikte prämiozäner Oberflächen, die von jüngeren Pedimenten überdeckt wurden. Der Pedimentationsprozess beinhaltet eine Kombination aus Flächenspülung und Hangrückschreiten. FRANZ (1973) spricht von *Adyren*, wenn es sich um Pedimente aus mesozoischen oder känozoischen Sedimenten handelt, die im Pliozän und Quartär entstanden sind und mitgehoben wurden. Sie sind heute teilweise bereits wieder zerschnitten. Das Streichen der parallelen Gebirgszüge beginnt im Westen mit NE-SW, biegt dann in W-E um und endet im Osten mit NW-SE (GUNDLACH 1934). Aufgrund der Niederschlagsarmut überwiegt der Prozess der Flächenbildung in der Geomorphologie.



Untersuchungsgebiet im engeren Sinne

★ Beispeltal

**Abb. 8: Topographie des Pamir**

Quelle: verändert nach HAUSER 2003a: o.S.

Die alpinen Formen der Gebirge entstanden während der letzten kaltzeitlichen Vergletscherung und sind somit vor allem dem glazialen Formenschatz zuzurechnen. Hierzu zählen scharfe Kämme, Kare, Karlinge und Trogtäler, die besonders auf der Nordabdachung vorbildlich entwickelt sind, da hier durch die verminderte Einstrahlung die Ausaperung verzögert wurde. So sind die letzten Kargletscher und Firneisfelder auch heute noch meist nordexponiert. Daneben sind auf den Hochplateaus Formen der glazialen Serie zu finden, da sie während der Kaltzeit ebenfalls vergletschert waren. AGACHANJANC (1985b) unterscheidet zusammen mit der pliozänen Vergletscherung vor drei Millionen Jahren insgesamt vier Glazialphasen: 1,0-0,5 Millionen Jahre B.P., 300.000-120.000 Jahre B.P. (maximale Vergletscherung) und 44.000-30.000 Jahre B.P. Jedes nachfolgende Glazial war kälter als das vorangegangene, da mit der Heraushebung des Pamir die Landmasse in kältere Schichten der Troposphäre hineinwuchs. Aufgrund der geringen Reliefunterschiede waren die Gletscher auf den Hochebenen aber inaktiv. Trotz seiner Leelage und der vergleichsweise geringen Höhenunterschiede wird angenommen, dass zur Zeit der maximalen Vergletscherung auch der Ostpamir von einer zwar geringmächtigen, aber dennoch geschlossenen Firneisdecke überzogen war, die nur durch die Gipfel der höheren Ketten durchbrochen wurde. Zwar gliederte sie die

morphologischen Unebenheiten nicht völlig aus, aber rezente Gletscherschliffe, *Roches moutonnées* und Moränenablagerungen zeugen von ihrer Existenz. Die oberquartäre Vergletscherung mit Talvergletscherung betraf den Ostpamir wahrscheinlich nicht mehr. Die rezente Vergletscherung im Ostpamir ist auf nordexponierte Kargletscher in Höhen von über 5.000 m ü. NN limitiert. Die Dauer der Vergletscherung bzw. besonders die seit der vollständigen Ausaperung verstrichene Zeit spielt für die Bodenbildung eine wichtige Rolle.

Akkumulationsgebiete konnten sich aus den schuttbedeckten unteren Teilen der Pedimente in den intramontanen Depressionen entwickeln. Sie bestehen aus zusammengewachsenen fluvialen Schwemmkegeln, die wiederum oft von Flüssen zerschnitten wurden, bzw. aus limnischen Terrassen.

Wie alle mittelasiatischen Gebirge zeichnet sich auch der Pamir durch eine lebhaft rezente geomorphologische Dynamik aus. Aufgrund der starken Einstrahlung und damit täglichen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen sind besonders die physikalische, aber auch die chemische Verwitterung intensiv, so dass für die Erosion große Materialmengen zur Verfügung stehen, die besonders während der Schneeschmelze oder bei Starkregenereignissen verlagert werden. Die unteren Teile der Wände sind oft mit mehreren hundert Metern hoch reichenden Halden bedeckt. Dies gilt insbesondere für pleistozän übersteilte Täler und für Gebiete mit besonders intensiver rezenter Verwitterung. Das Material auf diesen Halden wird weiter verlagert, da es sich auf Grund des Hangneigungswinkels nur in einem labilen Gleichgewicht befindet und schon kleine Impulse ausreichen, es erneut in Bewegung zu versetzen. Dies können Erdbeben, Regen- oder Schmelzwässer, aber auch Wild- und Weidetiere sein. Somit befindet sich das Lockermaterial der Halden in einer langsamen aber stetigen hangabwärtsgerichteten Bewegung.

### 3.6 Boden

Generell ist die Pedogenese im Ostpamir durch eine extreme Trockenheit, unterdrückte biologische Aktivität, eine schwache Abfuhr chemischer Substanzen, eine reliktdäre unspezifische Mikroflora, aktive Umlagerungsprozesse und eine schütterere Vegetation gehemmt. Die Bodenbildung wird stark beeinflusst durch das kontinentale Klima der Hochgebirgswüste mit ihrer geringen Produktion an organischer Substanz, wodurch Hochgebirgswüstenböden den Ostpamir dominieren. In den höheren Lagen wird der eingeschränkte hydrothermale Faktor vom limitierenden Faktor der Temperatur abgelöst (CHERBAR 2001). Die Gebirgsböden sind durch eine geringere Mächtigkeit, einen hohen Skelettanteil und Reichtum an unverwitterten Mineralien gekennzeichnet. Zwar bedingt die Langlebigkeit und vergleichsweise geringe Phytomasse einen nur sehr niedrigen jährlichen Bestandsabfall, allerdings ist auch die Zersetzung bei den tiefen

Temperaturen gehemmt, wodurch sich die Streu ansammelt. Bei der Verteilung der Böden in den ariden Gebirgen spielt die Exposition die dominierende Rolle, da diese die Verdunstung und damit die Feuchtigkeitsversorgung reglementiert. Eine konkrete Höhenstufung ist dagegen kaum vorhanden. Eine vertikale Bodenzonierung wird in der Literatur diskutiert und ebenso wie für die Vegetationsgliederung mit einer differierenden Anzahl von Höhenstufen angegeben. AGACHANJANC (1979) schiebt diese Kausalität auf die gestörten Beziehungen zwischen Boden und Vegetation unter ariden Bedingungen. So werden die biologischen Faktoren der Bodenbildung, der Stofftransport und andere Bodenbildungsprozesse limitiert. Es gibt Anhänger für nur eine Bodenstufe, der grau-braunen Böden alpiner und subalpiner Wüsten (ANTIPOV-KOROTAEV 1951 zit. in AGAHANJANZ 1965), aber auch Vertreter für zwei Bodenstufen, der Wüsten- und der Wüsten-Steppenböden (KUTEMINSKI 1960 zit. in AGAHANJANZ 1965). Teilweise treten polygonale Spaltenbildung an der Oberfläche und takyrähnliche, helle Krusten auf. Die Bodenmächtigkeit beträgt 30-50 cm, häufig tritt Versalzung auf. Die sehr flachgründigen alpinen Wüstenböden sind durch Deflation und Veränderungen in der schützenden Vegetationsbedeckung bedroht. Die grau-blassgelben Böden der Wüsten-Steppen entwickeln sich hingegen unter etwas kühleren und feuchteren Bedingungen. Sie unterscheiden sich durch ihren etwas höheren Humusgehalt von 2-3 % und damit auch einer dunkleren Färbung. AGAHANJANZ (1965) beschreibt weiterhin noch eine Stufe der primitiven Hochgebirgs-Mergelböden. Bei ihrer Entstehung ist hauptsächlich die physikalische Verwitterung beteiligt, durch die diese primitiven Böden mit Schotter oder Grus bedeckt werden. Sie besitzen eine rissige, poröse, grau-blassgelbe Carbonatkruste mit Mächtigkeiten von 3-5 cm.

Auf nackten Felspartien und Schutthalden kann sich unter den ariden Bedingungen und den latenten Denudationsprozessen kaum Vegetation ansiedeln, die zu einer Weiterentwicklung des Bodens und einer edaphischen Ausdifferenzierung beitragen könnte. AGACHANJANC (1979) gibt diese Flächen mit 50 % bis 88 % für den Pamir an.

Wie AKHMADOV (2003) ausführt, sind durch Wind geformte Steinpflaster weit verbreitet, die die Oberfläche vor Verwitterung schützen und an deren Unterfläche sich migrierte Carbonate ansammeln. In AGAHANJANZ (1965) wird die Hypothese aufgestellt, dass 50 bis 70 % der Fläche des Ostpamir unter Grobmaterial ohne Bodenbildung liegen und somit von solchen Wüstenpflaster bedeckt werden.

Mit zunehmender Aridität nimmt auch der Carbonat- und Gipsgehalt Richtung Osten hin zu. Gleichzeitig wird in der Literatur eine abgeschwächte Profildifferenzierung sowie eine Abnahme des Humusgehaltes im Boden postuliert. Tiefgreifende Bodenbildungsprozesse mit Akkumulation sekundärer Aluminosilikate fehlen nach AGAHANJANZ (1965) im Ostpamir vollständig.

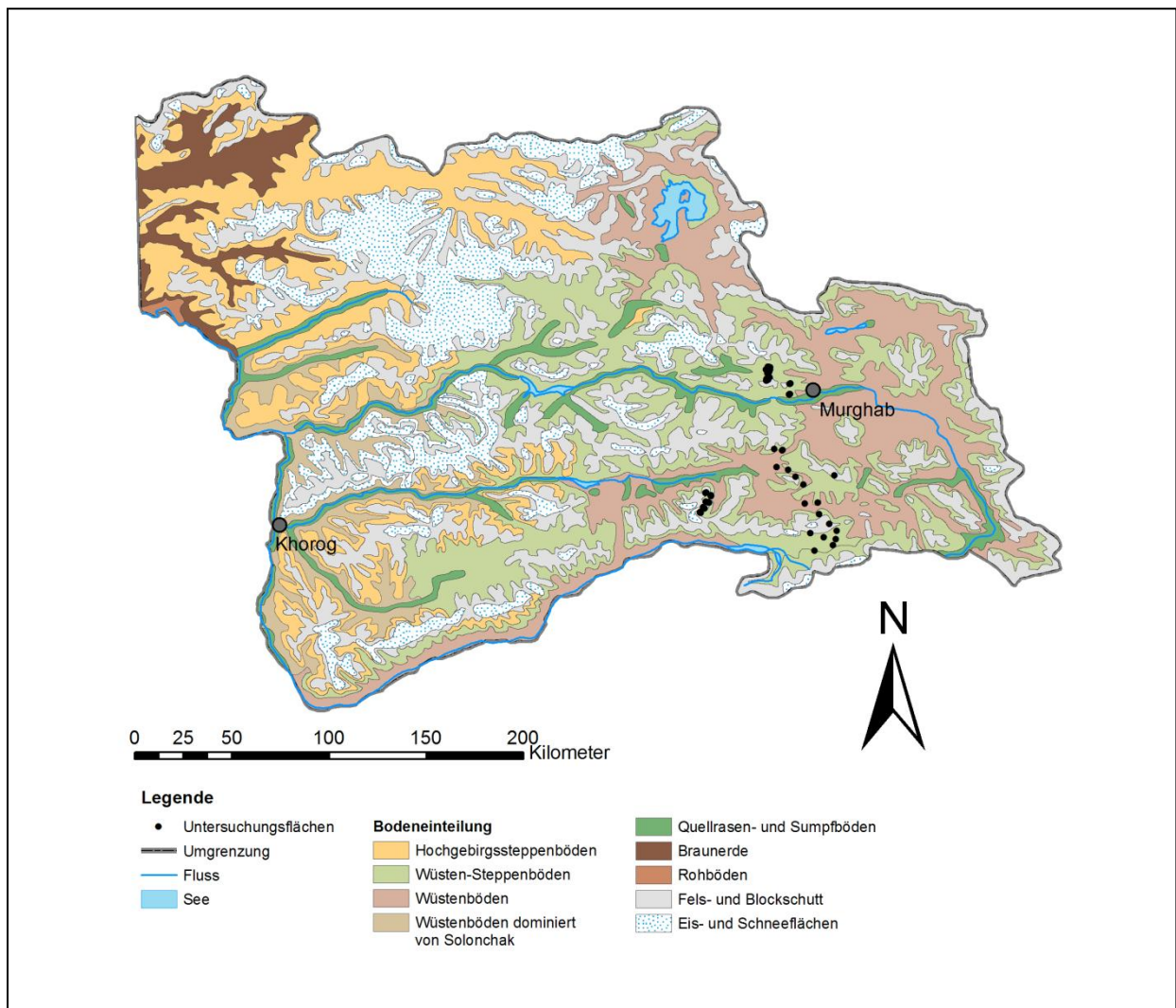
Nur wenige Gebiete mit lokal höherer Bodenfeuchtigkeit wie an Quellen, Bächen und mäandrierenden Flüssen verfügen über Quellrasen. Die oberen skelettarmen Bodenhorizonte der Quellrasen sind dicht durchwurzelt und mit 3-10 % relativ humusreich, weil die niedrigen Temperaturen den Abbau verzögern. Hierbei kann es zu Anreicherung von Torfmassen kommen, sodass auf die unterirdische organische Masse nach WALTER & BRECKLE (1994) Prozentwerte von 94,6-98,5 % entfallen können. Andere Quellen wie JUSUFBEKOV (1968) und AGAHANJANZ (1965) sprechen von 2-3 % Humusgehalt für Moorwiesen-Böden und 3-17 % Humusgehalt für Torfmoore. Im Vergleich mit den selbst erhobenen Daten erscheinen diese Werte realistischer. Die Mächtigkeiten des Torfhorizontes können 5 bis 120 cm erreichen. AGAKHANYANTZ (1978) spricht von einer reichen Bodenfauna für die Quellrasen. Auch wenn die Übernutzung der Quellrasen diese degradiert, sind Schäden in ihren Böden weniger betroffen, da sie oftmals von einer dichten Vegetation mit Deckungswerten von 70-100 % bestockt werden. Wie JUSUFBEKOV (1968) ausführt, besitzen die oberen Horizonte der Moorwiesen-Böden des Ostpamir dunkelgraue Farben und werden im Liegenden von grauen oder rostig-ockerfarbenen Horizonten unterlagert. Dies deutet neben der hellbraunen Torfbildung in den oberen Horizonten auch auf Vergleyung hin, was in den oberen Höhenlagen bei niedrigen Temperaturen zu Frost-Prozessen führt. Auf den Quellrasen führt das hochliegende Grundwasser zu Kryoturbationserscheinungen mit bis zu mehreren Dezimetern hohen Thufuren (Abb. 9).



**Abb. 9: Thufure**

Deutliche Frostbodenformen kennzeichnen den obersten alpinen Bereich zwischen 4.500 m ü. NN und 5.000 m ü. NN. Diese sind allerdings für das Weidepotential nicht mehr so relevant, da sich nicht nur die Tiere den extremen Hochlagen fernhalten, sondern auch die Pflanzen das feinerdige, durch die hohe Wasserkapazität, den starken Frostwechselkräften ausgesetzte Material meiden. Neben den bereits vorgestellten Störungen werden die Böden des Ostpamir zusätzlich durch kleine Bodenwühler be-

einflusst (AGAHOJANZ 1965; HUSS 1978; BREU & HURNI 2003a, FRANZ 1973; HERGARTEN 2003).



**Abb. 10: Böden des Pamir**

Quelle: verändert nach KERZUM 1968: 95

Die Karte der Böden des Pamir (Abb. 10) wurde auf Grundlage der kleinmaßstäblichen 1 : 1.500.000 Boden-Karte des Tadschikischen Nationalatlas erstellt. Die Untersuchungsflächen umfassen somit Wüsten- und Wüsten-Steppenböden, Böden unter Quellrasen sowie Fels- und Blockschutthalden

### 3.7 Vegetation

Die Flora von GBAO umfasst 2.200 Spezies höherer Pflanzen. AGAKHANYANTZ (1978) geht von 800 Pflanzenspezies mit 10,7 % Endemiten für den Ostpamir aus. Bäume fehlen, abgesehen von einigen Zwergsträuchern und der Fedschenko-Weide im Ostpamir völlig. Aufgrund von verschiedenen Expositionen, Niederschlag, Hangneigung, Boden und Habitat ist die Vegetation sehr unterschiedlich. Die Aridität und die Variabilität der Nie-

derschläge sind der limitierende Faktor der Vegetationsentwicklung. Da das Temperaturregime im Hochgebirge in Bodennähe am günstigsten ist, bleiben die Pflanzen dicht an der Bodenoberfläche; auch ihre Wurzeln breiten sich nicht in große Tiefen aus.

WALTER & BRECKLE (1986: 324) deklarieren den Pamir als „extrem kalt-arides Subzonobiom VII (t IX) der Kälte- und Hochplateauwüsten Zentralasiens“. Zonal umfasst der Ostpamir die subalpine und die alpine Höhenstufe (BERG 1959), vgl. Tab. 1. In den meisten Gebieten des Pamirs erstrecken sich die Wüstenformationen von den Talböden bis in die glazial-nivale Zone, die allerdings wegen der spärlichen Niederschläge und der damit fehlenden Schneegrenze oft nicht zu finden ist. Die anderen Höhenstufen werden unterdrückt, da die Aridität die Stufen im Gebirge nach oben verschiebt.

**Tab. 1: Höhenstufung**

Quelle: Entwurf nach WALTER & BRECKLE 1986: 331

Höhenlage	Höhenstufe	Vegetationseinheit
3.500-4.200 m ü. NN	Subalpin	Zwergstrauchwüsten und -steppen
4.200-4.700 m ü. NN	Alpin	Polstervegetation und Wiesen
> 4.700 m ü. NN	Nival	Wenige Solitärpflanzen

AGACHANJANC (1985a) weist für den Ostpamir drei Höhenstufen aus: Gebirgswüsten, Gebirgsxerophytenfluren und Gebirgssteppen (Abb. 11). Alle Höhenstufentypen zeigen wüstenhafte Elemente. Das Auftreten der Vegetationstypen ist nach Höhenlage gestaffelt, allerdings können die Substratverhältnisse modifizierend wirken. Azonale Vegetationsmodifikationen entstehen durch Auestandorte, Quellfluren und Halophyten (HERGARTEN 2003; AGAKHANJANZ & BRECKLE 2004; AGAKHANJANZ & BRECKLE 2003; WALTER & BRECKLE 1994).

Die Projekt-Untersuchungen differenzieren für die Aufnahmen dieser Studie zwischen Quellrasen, Alpinen Matten, Felsvegetation, Wüsten und Zwergstrauchwüsten, Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ *Krascheninnikovia*) mit Untertyp *Leymus* und Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ *Seriphidium*). Die realen Vegetationsgrenzen sind allerdings kleinräumig sehr variabel und besitzen einen fließenden Übergang in ihrer mosaikhaften Gesamtstruktur. Auch dies ist auf die Aridität und Kontinentalität zurückzuführen. Das Kontinuum anstelle der Höhenstufung ist auch auf die kurze Entstehungszeit von nur 12.000 bis 14.000 Jahren zurückzuführen (AGACHANJANC 1978, 1985a).



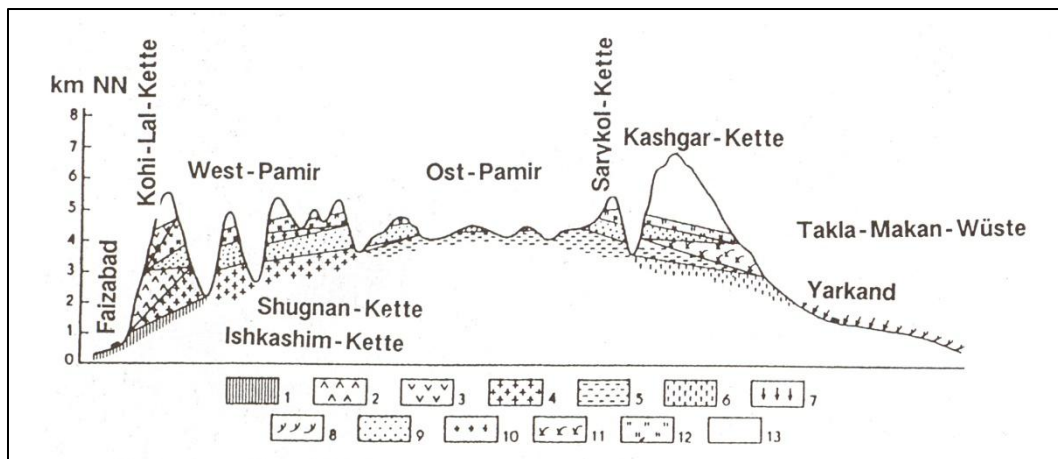


Abb. 11: Geobotanisches West-Ost-Profil durch den Pamir

1 = Ephemeretum; 2 = Gehölzgürtel; 3 = Wiesengürtel; 4 = Artemisia-Halbwüstengürtel; 5 = Artemisia-Ceratoides-Kryophytenwüste; 6 = Salsola-Ephedra-Wüstengürtel; 7 = Salsola-Wüste; 8 = Sandwüste; 9 = Gebirgsxerophytengürtel; 10 = Gebirgssteppengürtel; 11 = Gebirgshalbwüste; 12 = Kryophytenhöhengürtel; 13= Nivalstufe

Quelle: BURGA 2004:154

Die Wüsten mit vorherrschenden Halbsträuchern nehmen den größten Raum im Ostpamir ein. Sie sind artenarm und ihre Deckung liegt bei etwa 8-15 %. Die dominierenden Zwergsträucher sind Teresken *Kraschinnikovia ceratoides*, die wichtigste Charakterpflanze des Ostpamir, und im etwas feuchteren Südwesten Wermut *Seriphidium leucotrichum*. Der Teresken-Zwergstrauch wächst sehr langsam und besitzt ein ausgeprägtes, holziges Wurzelsystem. Er wird ebenso wie verschiedene Wermutarten als Brennholz genutzt, da er zum überwiegenden Teil aus verholzten Massen besteht und ist gleichzeitig besonders im Winter selbst bei Schneebedeckung aus Mangel an Alternativen eine wichtige nährstoffreiche Futterpflanze. Als Nahrung werden von den Weidetieren nur die zarten Spitzentriebe aufgenommen, die weniger als einem Achtel der Pflanzenmasse entsprechen (KELLNER 1996). Die Hauptwurzel der Zwergsträucher kann bis etwa 1 bis 1,5 m in die Tiefe reichen, horizontal verzweigen sich Seitenwurzeln, die eine extensive Absorption des Bodenwassers ermöglichen. Die unterirdische Pflanzenmasse ist bei Teresken etwa zehnmal, bei Wermut sogar fünfzehnmal so hoch. Der größte Teil der organischen Massen entfällt mit 70-95 % auf die Wurzeln. Allgemein ist der Hauptwurzelraum nur bis 40 cm unterhalb der Geländeoberkante zu finden.

Im Übergang von den Wüsten bilden auf weniger trockenen Standorten die Wüstensteppen mit *Christolea*-Gesellschaften eine weitere Vegetationseinheit. Polstergesellschaften (*Acantholimon*) besitzen mit 30-40 % eine vergleichsweise hohe Deckung. In ihren Kissen können die nur sehr langsam wachsenden Pflanzen große Regenwassermengen speichern. Die Polster und Zwergsträucher können Alter von mehreren hundert Jahren erreichen.

Die alpinen Wiesen mit hohen Futterwerten konzentrieren sich auf kleine Flächen längs der Bäche, mäandrierenden Flüssen oder in Senken. Die Vegetation ist hier auf Standorte mit allochthoner Wasserzufuhr konzentriert. Sie sind am artenreichsten und besitzen die höchsten Deckungsgrade. Die wirtschaftliche Bedeutung der Quellrasen ist sehr groß, da sie im Vergleich zu den anderen Gesellschaften des Gebietes die höchsten Produktionsraten besitzen, was auf die günstige Wasserversorgung zurückzuführen ist. Die Wasserentnahme der Pflanzen erfolgt vor allem aus Tiefen von 20-50 cm (WALTER & BRECKLE 1986).

Die Primärproduktion der Wüsten beträgt 0,6-2 t ha<sup>-1</sup>, die der Steppen 2-4 t ha<sup>-1</sup> und 5-12 t ha<sup>-1</sup> in den Polsterpflanzengesellschaften (WALTER & BRECKLE 1986). Die jährlichen Produktionsraten schwanken abhängig von Niederschlag, Deckungsgrad und Temperaturen. Der Nährwert der Pamirpflanzen ist dank ihres langsamen Wachstums und ihren kleinen Zellen sehr proteinreich und stellt damit eine optimale Futterressource für das Vieh dar (DOMEISEN 2003).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Vegetation des Pamir sowohl alpine Elemente mit Steppenelementen kombiniert, als auch Vertreter der Wüsten und Halbwüsten beinhaltet. Die Vegetationsverteilung entspricht somit einem extrazonalen Vorkommen nach dem *Gesetz der relativen Standortkonstanz und des Biotopwechsels* (WALTER & BRECKLE 1986). AGAKHANYANTZ (1978) macht die Aridität, aber auch die intensive Beweidung für die Mosaikstruktur der Vegetation mit Wüsten-, Wüstensteppen und alpinen Elementen im Pamir verantwortlich. Durch eine beständige Beweidung werden die Pflanzenarten begünstigt, die von den Tieren gemieden werden. Meist zeichnen sich diese durch giftige, stark aromatische Inhaltsstoffe oder dornigen Schutz aus (HUSS 1978).

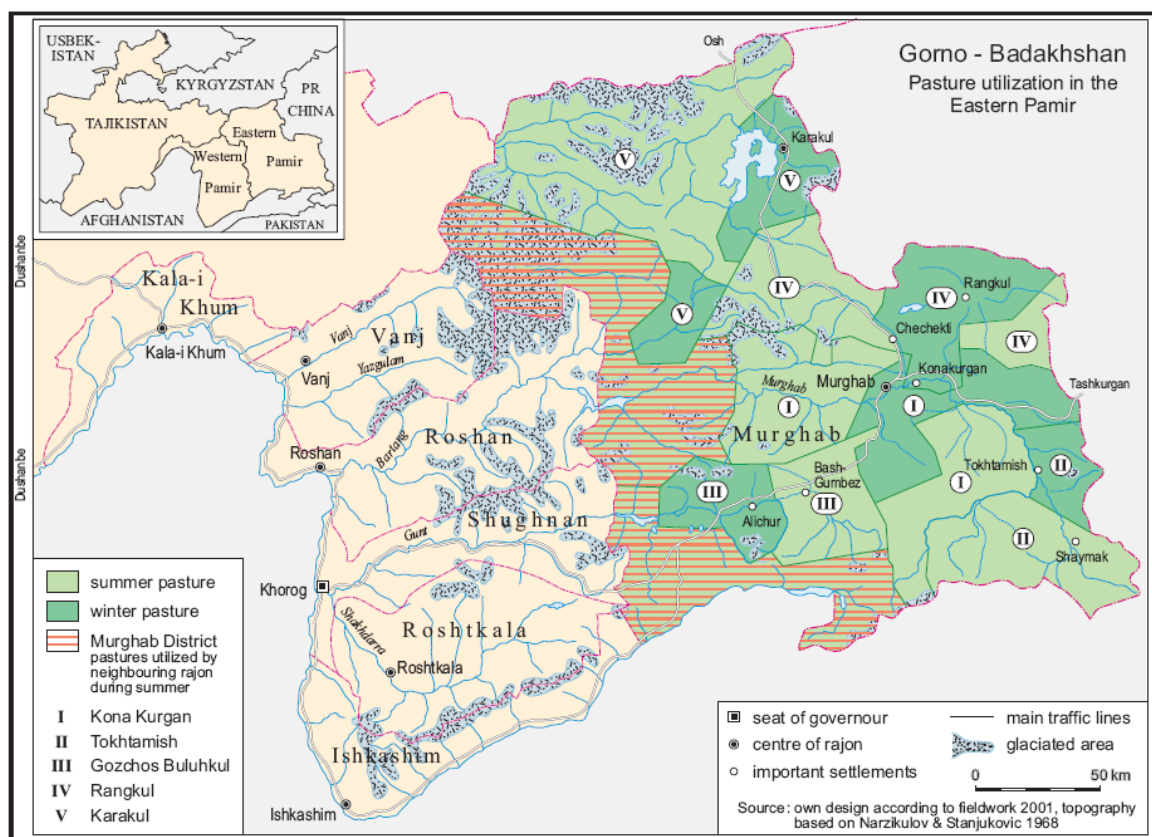
Für die Pedogenese spielt die Vegetation als bodenbildender Faktor eine Rolle, indem sie mit ihrer Streu das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung liefert und darüber hinaus Erosion und Deflation verhindert. Die Aridität limitiert diesen Einfluss jedoch sehr stark, da der Feuchtigkeitsfaktor in seiner Ausprägung im Ostpamir als Minimum vorhanden ist und nach der *Liebig'schen Regel* deshalb die Hauptwirkung auf die Vegetation besitzt (AGACHANJANC 1985a, 1978; WIEßNER 2009).

### 3.8 Nutzung: Traditioneller Pastoralismus im Hochgebirge

Landwirtschaftlich nutzbares Land ist eine rare Ressource; die Biomasseproduktion ist stark limitiert. WALTER & BRECKLE (1986) schätzen die ostpamirischen Weiden auf 1.099.900 ha, was etwa 40 % der Oberfläche entspricht. Andere Angaben über das gesamte Weideland des Ostpamirs sprechen von 773.000 ha. DOMEISEN (2003) argumentiert mit noch viel niedrigeren Angaben von 384.733 ha, die sich auf das *Agroprom*

*Murghab* stützen. Nur die Quellrasen entlang der mäandrierenden Flüsse können zur Futterproduktion und Heuernte genutzt werden. Ihre Fläche ist stark limitiert (BREU & HURNI 2003). Nach Auffassung von LUDI (2003b) sind nur 13.000 ha im Ostpamir nutzbar; die für die Beweidung verwertbare Phytomasse des Ostpamir liegt bei 60 000 t (WALTER & BRECKLE 1986).

Das traditionelle Weidemanagement existierte schon vor der sozialistischen Umgestaltung und nachdem daran außer den Besitzverhältnissen kaum etwas geändert wurde, besitzt es seit deren Ende wieder dem Ursprünglichen ähnliche Gültigkeit. Domestiziert werden Alai-Fettschwanz- bzw. Karakul-Schafe (*Ovis aries platyura Fitz*) und Yaks (*Bos grunniens*).



**Abb. 12: Weidenutzung im Ostpamir während der Sowjetzeit**  
Quelle: KREUTZMANN 2008: 168

Basierend auf der Darstellung bei KREUTZMANN (2003) funktionierte der traditionelle Nomadismus nach einem Migrationszyklus mit längeren Aufenthalten auf den dezentralen Sommerhochweiden in höher gelegenen Tälern während der wenigen schneefreien Monate und zentralen Winterweiden in tiefer gelegenen geschützten Beckenlagen mit Zugang zu frischem Wasser (Abb. 12). Oftmals legten die nomadischen Gruppen mehrere hundert Kilometer zwischen den verschiedenen Weiden zurück, wobei der Haushalt seinen Wohnsitz temporär auf die Sommerweide verlagerte. Tra-

ditionell existierten auch keine festen Winterlager, sondern es handelte sich um Seminomadismus, bevor während der Sowjetzeit feste Siedlungen angelegt wurden. Es erfolgte also ein Wandel zur Transhumanz, da nun auch im Sommer ein Teil des Haushalts im Dorf verbleibt und kein kompletter Umzug in die höher gelegenen Täler mehr erfolgt (SCHILLHORN VAN VEEN 1995). Die Nomaden wurden als mobile Gruppe toleriert und entrichteten, wenn erforderlich, auch Gebühren für das Weideland. KREUTZMANN (2003) unterscheidet die „combined mountain agriculture“, bei der im Winter keine Winterweiden explizit aufgesucht werden, sondern das Winterfutter nahe der permanenten Siedlung produziert wird.

Mit dem Übergang zur Marktwirtschaft ist heute nur noch ein chaotisches System der früher traditionellen Landnutzung übrig geblieben, wobei eine veränderte und verringerte Mobilität zwischen den Weidegründen, sowie eine Konzentration der Herden in der Nähe fester Siedlungen festzustellen sind, wo früher primär Heu zur winterlichen Zufütterung produziert wurde. Die Strategiemuster der Viehhaltung variieren in den einzelnen Haushalten je nach sozioökonomischem Status. Generell liegt aber ein Kombinationsmuster aus Transhumanz und Halbnomadismus zugrunde. Verschiedene Weidegründe werden saisonal aufgesucht, wobei nicht nur die absolute Höhenlage ausschlaggebend ist, sondern auch eine geschützte schneefreie Lage in den Tälern nahe der Siedlungen im Winter zwischen Dezember und Mai eine wichtige Rolle spielen. Ein lokales Beispiel für eine Winterweide aus dem Untersuchungsgebiet sind die tieferen Lagen des Pshart Tales und das 60 km lange Madian Tal, die beide zum *Jemoat Kuna Kurgan* gehören (Abb. 12). Letzteres wird aber neben der Übernutzung durch Bodendegradation in Form von Salzausblühungen und Frostschäden negativ beeinflusst (DOMEISEN 2003). Die Sommerweiden werden zwischen Juli und September aufgesucht und befinden sich in Höhen von 3.500 m bis 4.700 m ü. NN, in vergleichsweise engen Seitentälern. Die Lage der Weideplätze von Haushalten variiert kaum und resultiert aus Gewohnheitsrechten, die wie die Nutzungsrechte der Heuflächen in den tiefer gelegenen Tälern über Generationen weitergegeben und von den selben Haushalten genutzt werden. Die temporären Lager bestehen aus Filzzelten (Jurten), die optimal transportierbar und gut isoliert sind (KRAUDZUN 2005). Die Hütetätigkeit auf den *Jailoos*, den Sommerweiden, kommt im Zuge der Arbeitsteilung meist sehr jungen und alten Familienmitgliedern zu. Heute suchen nur noch sehr wenige Viehhalter Frühjahrs- und Herbstweiden auf, da die Benzinpreise für die Transportkosten zu hoch sind. Die Mobilitätsmuster sind demzufolge ein Spiegel der sozioökonomischen Lage der Haushalte. Normalerweise steigt mit der Größe der Herde und dem Haushaltseinkommen die Bereitschaft eine größere Distanz zwischen Winter- und Sommerquartieren zu überwinden. Da sich viele Haushalte diese Transportkosten nicht leisten können, überstieg in der jüngsten Vergangenheit eine Intensivierung und Konzentration der landwirtschaft-

lichen Nutzung die natürliche Tragfähigkeitskapazität in einigen Gebieten, vor allem in der Nähe von permanenten Siedlungen, was eine Degradation von Boden und Vegetationsbedeckung als Folge der Überweidung nach sich zog (LUDI 2003b). Hierzu zählen vor allem die übernutzten Heuweiden in der Nähe der Flüsse, die für die Zufütterung im Winter sehr wichtig sind. AKNAZAROV, KH. A. (2003) stellt heraus, dass Vergleichsstudien zwischen den Jahren 1965 und 2000 eine verminderte Produktivität der Hochweiden diagnostizierten und hierfür die Überweidung verantwortlich machen. Sowohl die Bedeckung als auch die Artenanzahl der Pflanzen habe demnach abgenommen. Analog dazu ging die Produktion auf entfernten Weiden ebenfalls zurück, da die Biomasseproduktion durch Akkumulation von totem Pflanzenmaterial und die Dominanz alter Pflanzen reduziert wird. Folglich ergibt sich ein höheres Maß an Vulnerabilität für die Weidetiere, speziell in harten Wintern, da die lokalen Landressourcen degradiert und die Futterimporte weggebrochen sind. Hinzu kommt die prekäre Energieversorgung der Region. Seit der Unabhängigkeit Tadschikistans sei der Druck auf den Raubbau an Zwergsträuchern zur Energieversorgung der Bevölkerung gestiegen, nachdem die Versorgung mit fossilen Energieträgern plötzlich weggebrochen war. Ein großes Maß an Mobilität ist deshalb wichtig um eine angepasste Nutzung für das fragile Ökosystem des Ostpamir auch im Hinblick auf den Klimawandel zu gewährleisten. Ein weiteres Problem hinsichtlich der Mobilität ist der fehlende Zugang zu Absatzmärkten. Daher bleibt der lokalen Bevölkerung nichts anderes als eine Subsistenzwirtschaft. Der Selbstversorgungsgrad des alpinen Pastoralismus ist aufgrund der limitierten Produktvielfalt der reinen Viehzucht jedoch begrenzt; deshalb ist ein Produkttausch mit Talökonomien erforderlich, wodurch eine Abhängigkeit von wirtschaftlichen Austauschprozessen entsteht (KRAUDZUN 2005). Darüber hinaus überschreitet die aktuelle Bevölkerungszahl von 16.000 Personen die Tragfähigkeit der Region, die etwa zwischen 3.000 und 5.000 Personen liegt. Folglich können nur sehr wenige Haushalte Gewinne in der extensiven Viehwirtschaft erzielen. Eine Lösungsmöglichkeit ist der Zusammenschluss zu größeren Vieheinheiten, wodurch der Transport zu Hochweiden in entlegenen Gebieten rentabler werden soll und diese intensiver genutzt werden können. Bauernverbände sollen die Landnutzung von Weiden und Heuwiesen regulieren, lokales Wissen mithilfe von Workshops auffrischen und weitergeben, und gleichzeitig die Interessen ihrer Mitglieder bei der lokalen Verwaltung vertreten. Ersichtlich ist aber dennoch, dass die subsistenzorientierte Viehwirtschaft die Region nicht ernähren kann und Erwerbsmöglichkeiten in anderen Sektoren nötig sind, um eine Unabhängigkeit von externer humanitärer Hilfe zu erzielen (BREU & HURNI 2003a; HURNI ET AL. 2004; LUDI 2003a).

### 3.8.1 Kleinvieh

Kleinvieh wird im Gegensatz zu den Yaks nicht für die Subsistenz sondern vorwiegend für den Markt produziert. Der Anteil der Angora- und Kashmere-Ziegen mit ihrem ge-

ringeren Wert liegt bei 20-25 % der Zahlen für das Kleinhornvieh (Abb. 13). Sie sind nicht so gut an das raue Pamirklima angepasst wie die Karakul- und Alai-Fettschwanz-Schafe. Mutterschafe und -ziegen geben während der Sommerweidezeit 0,2 bis 0,4 Liter Milch pro Tag, allerdings ist die Ziegenmilch weniger beliebt, da sie fettärmer ist (DOMEISEN 2003). Sie besitzen eine im Vergleich zu Yaks höhere Reproduktionsrate (KRAUDZUN 2005). Folglich reagierte ihre Zahl viel schneller und stärker auf die veränderten sozioökonomischen Rahmenbedingungen der letzten Dekaden. Im Kontext der Planwirtschaft konnte ein Trend zu Fettschwanzschafen und Ziegen festgestellt werden; diese Tendenz nahm unter den gelockerten Gesetzen und steigenden Nachfragen auf den städtischen Märkten noch weiterhin zu. Das Kleinvieh spielt somit derzeit eine lebenswichtige Rolle, um finanzielle Engpässe zu überbrücken, indem die Haushalte auch kurzfristig Erträge aus dem Viehverkauf erzielen können, indem sie ein Schaf oder eine Ziege verkaufen. So sanken nach LUDI (2003b) die Schafzahlen im *Distrikt Murghab* von 69.300 Tieren 1990 auf 31.200 Tiere 1999. Der geringe Wert, der bei Ziegen noch unter dem von Schafen liegt, ermöglicht eine bedarfsgerechte Mobilisierung kleinerer finanzieller Beträge. Nach DOMEISEN (2003) entspricht der Tauschwert eines Schafes im Vergleich zu einem Yak etwa einem Fünftel.



**Abb. 13: Kleinhornvieh**

Aufgrund ihres Fraßverhaltens werden Schafe als *browser* bezeichnet, da sie bei ihrer Futteraufnahme auf den Weiden oft mehrere Duzend Kilometer pro Tag zurücklegen,

wobei sie besonders alpine Kräuter bevorzugen, die sie fast bis hinunter zur Wurzel abfressen. Dank ihrer Kiefer- und Hufanatomie ist es ihnen möglich, selbst bei Schneebedeckung, Pflanzen auszugraben (DOMEISEN 2003). Das Kleinvieh wird von Viehhirten gemanagt, die es hüten und über die ertragsreichsten Weiden führen. Sie sollten bei deren Zustandsänderungen eingreifen, noch bevor sich dramatische Veränderungen der Vegetationsbedeckung und der Landdegradation zeigen (HERBERS 2003; KREUTZMANN 2003). Die Schafe und Ziegen werden über Nacht nahe den Jurtencamps eingepfercht bzw. nach Hause gebracht, da karnivore Raubtiere im Hochgebirge nicht selten sind (SCHILLHORN VAN VEEN 1995).

### 3.8.2 Großvieh

Das Weideland über 4000 m ü. NN eignet sich kaum mehr zur Haltung anderer Weidetiere als den gut an die Höhe angepassten Yaks, die sich dem niedrigen Sauerstoffpartialdruck durch spezielle Ausbildung der Blutbestandteile adaptiert haben. Die Versorgung der Körperzellen mit Sauerstoff bzw. der Abtransport des Kohlendioxides wird von den Erythrozyten übernommen, deren Durchmesser bei den Yaks zwar im Vergleich zu normalen Rindern kleiner, ihre Anzahl aber größer ist. Zusätzlich kann das Yakhämoglobin mehr Sauerstoff pro Einheit binden (SCHINDLER 1996). Traditionell werden von Kirgisen Yaks nicht mit anderen Rinderarten gekreuzt. Die Fellfarbe der Yaks reicht von schwarz über grau meliert bis weiß. Yaks werden ihrem Fraßverhalten nach als *grazer* charakterisiert, da sie es vorziehen während eines Weidetages in ein und derselben Region der Weide zu verbleiben und im Wechsel fressen und wiederkäuen (DOMEISEN 2003). Die Tiere nehmen auf den Sommerweiden, wo sie tagsüber meist unbeaufsichtigt sind und nur abends von den Hirten zurückgeholt werden, energiereiches Futter auf und setzen damit Gewicht an, das sie speichern und unter den harschen Winterbedingungen wieder verlieren. Einzelne Yakbullen bleiben sogar das ganze Jahr über unbeaufsichtigt. Die vielseitigen Nutztiere versorgen die Besitzer primär mit Milch, aus der verschiedene Produkte hergestellt werden: Joghurt (*ayran*), Sahne (*merik, kaymak*), Butter (*kol mai*), Buttermilch, Butterfett und *qurut*, eine in der Sommersonne getrocknete Proteinmasse, die die Haltbarmachung der Milch und damit Lagerung bis in den Winter hinein gewährleistet. Alle Aufgaben der Milchverarbeitung inklusive dem allmorgendlichen und -abendlichen Melken fallen in den weiblichen Zuständigkeitsbereich (Abb. 14). Die Männer sind hingegen traditionell für den Umtrieb auf die verschiedenen saisonalen Weiden, die Schlachtung und Verarbeitung des Fells zuständig. Während Sowjetzeiten stand die Viehzucht im vollen Aufgabenbereich der Männer. Die Schlachtung erfolgt vor Ort am Ende der Sommersaison, wenn die Tiere das meiste Gewicht besitzen. Aus den Yakhaaren werden Seile gefertigt und Wolle, die zu Teppichen weiterverarbeitet wird. Yakschwänze werden als Staubwedel benutzt, aber man findet sie vor allem auch an Holzpfähle genagelt auf den kirgisischen Gräbern. Der Yakdung

wird auf den Weiden in der Umgebung der Jurten Camps gesammelt, in der Sonne getrocknet und als Brennstoff zum Kochen und Heizen verwendet, da er einen relativ hohen Brennwert bei vergleichsweise geringer Rauchentwicklung besitzt (KUTTLER 1996). Die mit Yakdung vergleichbare Masse an Rinderdung wirkt sich im Gelände nach Auffassung von ROBERSON (1996) durchschnittlich auf eine Fläche von umgerechnet etwa 0,24 m<sup>2</sup> aus.



**Abb. 14: Yaks**

Eine Vermarktung der Yakprodukte und vor allem des Fleisches findet über den Familienclan hinaus in den letzten Jahren nur schleppend statt (KREUTZMANN 2003). Heute organisieren sich die Yak-Hirten in der Bauernvereinigung. Ihre ökonomische Lage hat sich seit der Unabhängigkeit verschlechtert, da die Futterbestände oftmals knapp sind und ein Zukauf von Futter für die meisten unerschwinglich. Im *Rayon Murghab* werden etwa 14.000 Yaks gehalten. Die Zahl stieg mit der Einführung des Vertragshirtentums, bei dem Herdenreicher Besitzer von Hirten als Dienstleistung auf den Weiden beaufichtigt werden. Hierbei zeigt sich, dass Yaks nicht nur zur Subsistenz gehalten werden, sondern auch Investitionssicherheiten mit vergleichsweise geringem Arbeitsaufwand und zusätzlichen Nebeneffekten wie Milch und Fellen bieten und als langfristiges, akkumulierbares Kapital fungieren. Yaks gelten als bessere Futterverwerter als Schafe, liefern mehr Milch, erfordern weniger Hüteaufwand und sind besser an das strenge Hochgebirgsklima des Ostpamir angepasst (KRAUDZUN 2005). Dennoch stützt sich KREUTZMANN (2003) auf Daten mit stetigen Yakzahlen, während die sonstigen Viehbestände stärker variieren. Für den sozioökonomischen Wandel scheint demnach der



Yak ein weniger wichtiger Indikator zu sein, nichtsdestotrotz spielt er in der Binnenwirtschaft eine nachhaltige Rolle.

### 3.9 Beispieltäler

Mit der Auswahl der Beispieltäler sollten neben den sonstigen Aufnahmen bei Alichur, in der Umgebung von Murghab und im Chong Pamir, verschiedene Situationen und Bedingungen des Untersuchungsgebietes näher betrachtet werden. Alle drei Täler sind kleinere Seitentäler. Während sich die beiden Täler Pshart Gumbez Kol und Madian Gumbez Kol im Zentrum des Ostpamir befinden, liegt Bash Gumbez im Südwesten (Abb. 8). Die geologische Ausgangssituation ist deshalb verschieden und auch innerhalb der Vegetation wird in den Zwergstrauch-Polster-Steppen der Teresken (*Krascheninnikovia*) als dominierende Pflanze in Bash Gumbez von Wermut (*Seriphidium*) abgelöst.

#### 3.9.1 Pshart Gumbez Kol

Das Pshart Gumbez Kol Tal (Abb. 15) befindet sich nordwestlich von Murghab in der Pshart Range. Der Talverlauf des Pshart Gumbez Kol erstreckt sich SSE-NNW. Geologisch fällt das Tal in die Rushan-Pshart-Zone bzw. in die südliche Sedimentzone; es dominieren carbonathaltige Gesteine sowie Tonschiefer. Die Wasserversorgung des nach Norden orientierten Tales wird durch einen Bach, der aus Kargletschern bzw. Firneisfeldern gespeist wird, sicher gestellt.



Abb. 15: Pshart Gumbez Kol

Die Weidefläche des vergleichsweise engen Seitentals des Pshart Tales umfasst etwa 919 ha, wovon 80 ha Quellrasen den Talboden bedecken. Die Ergebnisse der sozio-ökonomischen Projektarbeiten ergaben für die Yakzahlen ein Minimum von 63 Yaks und ein Maximum von 97 Yaks. Die Zahlen für das Kleinvieh schwankten zwischen null und 300. Die Zahlen implizieren zwar keine Gleichzeitigkeit bzw. einen gleichzeitigen Ausschluss; dennoch erkannten die Haushalte des *Jailoos*, dass das Tal mit 300 Ziegen und Schafen in der Weidesaison 2007 überweidet war und hüteten in der folgenden Saison 2008 ausschließlich 97 Yaks.

### 3.9.2 Madian Gumbez Kol

Das Madian Gumbez Kol (Abb. 16) ist eine Verlängerung des Pshart Gumbez Kol nach SSE. Sein Talverlauf im oberen Abschnitt ist demnach NNE-SSE. Es befindet sich ebenfalls in der Pshart Range und wird durch einen Pass vom Pshart Gumbez Kol getrennt, dessen zugehöriger Gipfel eine Höhe von 5567 m erreicht. Das Ausgangsgestein ist vorwiegend carbonathaltig. Ein Bach versorgt das nach Süden offene Tal mit Wasser. Das Tal ist allerdings viel enger und damit auch die Weidefläche auf 463 ha limitiert. Nur ein Haushalt hütete in der Weidesaison 2008 hier seine Tiere. Die Anzahl der Yaks schwankte während des Projektzeitraumes von 2007-2009 zwischen 38 und 60 Tieren. Die Zahl des Kleinviehs blieb mit 250 Vieheinheiten konstant.



Abb. 16: Madian Gumbez Kol

### 3.9.3 Bash Gumbez

Das Bash Gumbez Tal (Abb. 17) befindet sich in der südlichen Alichur Range und besitzt somit eine absolut westlichere Lage. Sein Verlauf erstreckt sich SSW-NNE. Der Talquerschnitt ist im Vergleich zu den beiden anderen Beispieltälern offener, und der Talboden ist breiter. Geologisch wird das Tal von Silikatgestein aufgebaut. Ein vergleichsweise breiter Bach entwässert das Tal mit Schmelzwässern der Kargletscher nach NNE. In einigen Teilen des Tales, speziell im Unterlauf, bildet er eine für Mensch und Tier unüberwindbare Barriere. Die Weidefläche erstreckt sich über 4931 ha, das westliche Seitental umfasst zusätzlich 1400 ha. Die sozio-ökonomischen Erhebungen ergaben ein Minimum von 377 Yaks und ein Maximum von 450 Grunzochsen für den Zeitraum 2007-2009. Während dieser Zeit schwankten die Kleinviehzahlen zwischen 585 und 780 Tieren.



Abb. 17: Bash Gumbez

## 4 Methodik

### 4.1 Feldarbeit

Die Feldarbeit erfolgte im Ostpamir Tadschikistans in den Monaten Juli bis September 2008.

#### 4.1.1 Probenentnahmetechnik

Die Lage des für die projektspezifischen Flächen charakteristischen Profils wurde an einer jeweils für die 60 m x 60 m Fläche repräsentativen Stelle platziert. Die Bodengruben sind keine idealen Ausschnitte des Pedons von der Bodenoberfläche bis zum Ausgangsgestein, wie dies normalerweise von Bodenkundlern angelegt wird, sondern vielmehr Teilausschnitte. Wurden Wälzkühen oder sonstige geeignete Stellen vorgefunden, so wurden diese präferiert.

Als Entnahmeart wurden ungestörte Proben mittels Stechzylinder gewählt. Die Stechzylinder mit einem Einzelvolumen von 100 cm<sup>3</sup> wurden horizontal in die Profilwand mithilfe eines Gummihammers geklopft. Die Proben wurden aus zwei verschiedenen Tiefenstufen in -15 cm und -30 cm entnommen, die im Folgenden als Horizonte angesprochen werden, wohl wissend, dass sie kein Synonym zur klassischen Horizontdefinition in der Bodenkunde bilden. Die Profiltiefe umfasst somit den Hauptwurzelraum zahlreicher wichtiger Pflanzen. So reichen nach WALTER & BRECKLE (1994) die Wurzeln von *Aremisia rhodanta* 10-15 cm tief und verzweigen sich in zahlreiche horizontale Seitenwurzeln. Die Entnahme erfolgte beginnend von der Profilschle bis zur Oberfläche um eine Vermischung der tieferen Schichten mit herabfallendem Material zu verhindern. Pro Horizont wurden drei Stechzylinder entnommen und anschließend deren Inhalt in einen PE-Beutel gegeben. Eine Beförderung im üblichen Stil in einem luftdichten, gepolsterten Transportkoffer war wegen der schwierigen Bedingungen vor Ort nicht möglich. Die Proben wurden systematisch mit einer Projekt-ID nummeriert und doppelt beschriftet: Eine wasserfeste Beschriftung auf den PE-Beuteln als auch ein Etikett in den Probenbeuteln gewährleistete eine eindeutige Identifizierung im Labor. Zusätzlich erfolgte eine Flächenbeprobung mithilfe einer Sammelprobennahme aus -10 bis -20 cm Tiefe, deren fünf Entnahmepunkte rein zufällig über die 60 m x 60 m Fläche verteilt wurden. Mithilfe dieser Entnahmetechnik wurde versucht, eine interpolative Projektion der pedogenen Punktinformation auf die Fläche wiederzugeben (SAMIMI 2003). Für diese gestörte Probe wurden etwa 500 g Mischprobe in PE-Beutel verpackt und ebenfalls doppelt beschriftet.

Des Weiteren erfolgte für einige weitere, konkrete Problemstellungen eine gezielte, speziell abgestimmte Probenentnahme im Gelände. Hierzu zählen gestörte Proben aus den

obersten Zentimetern des Ah-Horizontes auf stark beweideten Flächen. Die Bezeichnung „Ah“ steht in diesem Fall stellvertretend und pauschalisierend für die geringmächtigen obersten Zentimeter bzw. Auflagen, obwohl bekannt ist, dass es sich bei den Initialböden im Untersuchungsgebiet oftmals lediglich um Ai-Horizonte handelt. Sie wurden im Labor einer C/N-Analyse unterzogen. Darüber hinaus wurden entlang von Linientransekten ungestörte Proben entnommen. Unter anderem sollen diese den Einfluss von Viehgängen auf die Bodeneigenschaften näher beleuchten.

Insgesamt wurden während des Geländeaufenthalts 304 Proben genommen. Die einzelnen Analysen erfolgten jedoch meist mit einer kleineren, aber dennoch statistisch repräsentativen, Stichprobenanzahl, bevorzugt von Mischproben. Um darüberhinaus differenzierte Aussagen über die verschiedenen Bodenparameter innerhalb der Profile treffen zu können, wurden in die Analysen auch a- und b-Proben einbezogen. Bei der Präsentation der Ergebnisse ist die jeweils differierende Stichprobenanzahl  $n$  stets angegeben.

#### 4.1.2 Aufnahmesituation

Zur Charakterisierung des Standorts wurden allgemeine Informationen zu den Profildaten aufgenommen: Ort, Datum, Uhrzeit, Höhe über NN, Witterung, Aufschluss, Hangneigung, Exposition, Wölbung, Reliefform, Nutzung, Bedeckungsgrad, Entfernung zur nächsten Jurte, Entfernung zum nächsten Gewässer, Lagerungsdichte, Wurzelhorizontgrenze, Bodenfarbe in -15 cm und -30 cm Tiefe, Feinwurzelintensität, Grobwurzelintensität und Temperatur in -15 cm und -30 cm Tiefe. Die Höhe über NN wurde mit GPS-Geräten *MyPal A632N GPS Pocket PC* der Firma *ASUS* aufgenommen und im Vergleich zu topographischen Karten vermutlich um 20 bis 30 m unterschätzt. Trotzdem wird im Folgenden mit diesen Höhenangaben gearbeitet. Die Schätzungen zum Deckungsgrad und zur Beweidungsintensität wurden zum Teil von mehreren Projektmitgliedern getroffen um Objektivität zu gewährleisten; Stichproben ergaben Übereinstimmungen in der Einschätzung der ökologischen Parameter und erlauben deshalb eine Vergleichbarkeit der Daten. Schließlich wurden von den angelegten Profilen Fotoaufnahmen angefertigt.

Die Exposition wurde anschließend in Anlehnung an LEYER & WESCHE (2007) und MCCUNE & KEON (2002) in die Variable Südlichkeit mittels folgender Formel [2] umgerechnet:

$$\text{Südlichkeit} = \sin \alpha \times (-\cos \theta) \quad [2]$$

mit  $\alpha$  = Hangneigung in  $^\circ$ ,  
 $\theta$  = Exposition in  $^\circ$ Ost über Nord.

Die Westlichkeit wurde analog mithilfe der Formel [3] errechnet:

$$\text{Westlichkeit} = \sin \alpha \times (-\sin \theta) \quad [3]$$

Die Wertebereiche liegen somit bei [-1; 1].

#### 4.1.3 Bodenfarbe

Die Bodenfarbe wurde direkt im Gelände bestimmt. Wohl wissend, dass die allgemeine Farbansprache des Bodens bei Feldkapazität erfolgt, wurde die Bestimmung vor Ort in situ vorgenommen, was meist sehr geringen Wassergehalten entsprach. Hintergrund dafür ist die im Projekt implementierte Satellitenbildanalyse, wofür die Kombination mit einer Bestimmung der Bodenfarbe in trockenem Zustand für sinnvoll zu erachten ist.

Als Referenzkartenwerk dienten die *Munsell*-Farbtafeln, die die Farben mittels einer Kombination aus Buchstaben und Zahlen beschreiben. Hierbei werden Farbe (Hue), Helligkeit/Grauwert (Value) und Intensität (Chroma) bemessen (MACBETH DIVISION OF KOLLMORGAN INSTRUMENTS CORPORATION 1994; SPONAGEL ET AL. 2005).

#### 4.1.4 Bodentemperatur

Als Messgeräte für die Temperaturaufzeichnungen im Boden wurden Datenlogger der Firma *ONSET* aus der Baureihe *HOBO® Pro v2* verwendet. Sie wurden von Kim Vanselow im Jahr 2007 vergraben und 2008 sowie 2009 ausgelesen. Die Schurfgruben wurden anschließend immer wieder mit dem Aushub verfüllt und die vorgefundenen Oberflächenbedingungen wiederhergestellt, so dass von keinen relevanten Auswirkungen auf den Bodenhaushalt ausgegangen werden kann. Das Messintervall wurde auf 20 Minuten eingestellt, die Berechnungen für die Thermoisoplethendiagramme erfolgten auf Basis der Bildungen von Stundenmittelwerten. Nach einer Datenaufbereitung der Messergebnisse des Zeitintervalls Sommer 2007 bis Sommer 2008 in Excel 2007 wurden mit dem Programm Surfer 8 die Thermoisoplethendiagramme für drei Stationen erzeugt. Aus logistischen Gründen umfasst das Messjahr nicht genau 365 Tage; da die Berechnungen aber mithilfe von Mittelwertbildungen erfolgten, stehen die Ergebnisse einer groben Interpretation nicht im Wege.

#### 4.1.5 Lagerungsdichte

Aus logistischen Gründen konnte im Gelände nur die Rohdichte [4] und nicht die Lagerungsdichte bestimmt werden, bei der die Masse des feuchten Bodens anstelle der Masse des bei 105°C getrockneten Bodens berücksichtigt wurde.

$$\rho_B = \frac{m_f + m_w}{V_g} \quad [4]$$

mit  $\rho_B$  = Rohdichte,  
 $m_f$  = Masse der Bodenmatrix,

$m_w$  = Masse des Wassers,

$V_g$  = Gesamtvolumen.

Für die Bestimmung der Lagerungsdichte wurden zwei verschiedene Methoden verwendet: Zum einen wurde aus dem Gewicht der ungestörten Proben die Rohdichte ermittelt; zum anderen wurden Penetrometermessungen mit einem Taschenpenetrometer *CL700A der Soil test incorporation USA* durchgeführt um Oberbodenkompaktionen und Krustenbildung diagnostizieren zu können (RIETKERK ET AL. 2000). Der Messbereich lag zwischen 0 und 5 kg cm<sup>-2</sup>. Während jeweils drei Stechzylinderproben horizontal aus den beiden Horizonten entnommen wurden, wurden die Penetrometermessungen sowohl horizontal in den beiden unterschiedlichen Tiefen -15 cm und -30 cm, als auch zusätzlich vertikal an der Bodenoberfläche durchgeführt. Gemessen wurde jeweils an 5 verschiedenen Stellen im Horizont bzw. auf der Bodenoberfläche und anschließend jeweils der Mittelwert aufgenommen.

Das Porenvolumen kann mittels der Bestimmung der Lagerungsdichte und der Dichte der Festsubstanz unter Berücksichtigung folgender Gleichung [5] errechnet werden: (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)

$$PV = n = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_F} \quad [5]$$

mit  $\rho_B$  = Lagerungsdichte,

$\rho_F$  = 2,65 g cm<sup>-3</sup> spezifisches Gewicht der Körner mit Quarz als häufigstem Mineral

#### 4.1.6 Wassergehalt

Zur Bestimmung des Wassergehaltes wurden die ungestörten Proben direkt im Gelände und in lufttrockenem Zustand in Murghab gewogen. Eine Trocknung erfolgte hierbei bei etwa 40 °C. Der Gewichtsverlust ergab den Wassergehalt in Prozent, der somit nicht allein auf den Feinboden, sondern auf die Gesamtbodenprobe bestehend aus Fein- und Grobboden bezogen ist. Hinzu kam der Gewichtsverlust durch Doppelbestimmung im Trockenschrank bei 105 °C im geomorphologischen Labor der Universität Erlangen-Nürnberg.

#### 4.1.7 Hauptwurzelaum

Um den Hauptwurzelaum zu charakterisieren wurde im Gelände die Durchwurzelungsintensität anhand der mittleren Anzahl der Wurzeln pro dm<sup>2</sup> nach der Nomenklatur der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung bestimmt (Tab. 2). Als Feinwurzeln werden Wurzeln mit einem Durchmesser < 2 mm, als Grobwurzeln ab einem Durchmesser ≥ 2 mm angesprochen (SPONAGEL ET AL. 2005).

**Tab. 2: Einstufung der Durchwurzelungsintensität**  
 Quelle: SPONAGEL ET AL. 2005: 129

Stufe der Durchwurzelung	Bezeichnung	Wurzeln pro dm <sup>2</sup>
0	keine Wurzeln	0
1	sehr schwach	1-2
2	schwach	3-5
3	mittel	6-10
4	stark	11-20
5	sehr stark	21-50
6	extrem stark bis Wurzelfilz	>50

#### 4.1.8 Beweidungsintensität

Neben zahlreichen anderen Störungen stellt die Beweidung eine kontinuierliche Störung auf den Hochweiden im Ostpamir dar. Ihre Intensität wurde mit einer über die 60 m x 60 m Flächen gemittelten Schätzung der Indikatoren Trittsuren, Verbissintensität und Exkremete boniert. Alle drei Parameter wurden mittels eines sechsstufigen Boniturschlüssels einer Ordinalskala von 0 bis 5 aufgenommen. In der Variablen Beweidungsintensität werden im Folgenden Tritt, Verbiss und Exkremete additiv zusammengefasst, wodurch sich eine Skala von 0 bis 15 ergibt. Die auf subjektiven Einschätzungen basierende Ratingskala wird zwar auch im Folgenden als Ordinalskala angesprochen, allerdings wurde bei der Aufnahme darauf geachtet, dass die Abstände der aufeinander folgenden Merkmalsausprägungen äquidistant sind, was einer Intervallskala entspricht. Der Proxy Exkremete, der über die vorgefundene Anzahl beurteilt wurde, kann nicht als zuverlässig bewertet werden, da im Umkreis von oft mehreren Kilometern um die Jurten die Yak-Exkremete als Brennmaterial gesammelt werden. Die Distanz ist dabei aber auch immer vom Relief und der Talform abhängig. Die Quantifizierung der zum Heizen und Kochen verwendeten Exkremete fällt schwer, da sie mit Zwergsträuchern vermischt werden. Von diesen verwendet wiederum jede Familie etwa ein Bündel à 15 kg an Sommertagen, während im Winter mindestens das Doppelte verbraucht wird. LEILIBEKOW (2003) führt dazu aus, dass jede Familie täglich etwa 150-200 Tereskensträucher zur Verheizung verbraucht. Teilnehmende Beobachtungen erbrachten eine Quantifizierung von 42 - jedoch volumenmäßig größeren - Wermutsträuchern pro Bündel. Allerdings wurde betont, dass es sich hierbei um ein kleines Bündel handelte. Ähnliche Stückzahlen dürften es beim Yakdung sein. Mündlich überlieferte Angaben von ACTED über völlig unbeweidete Flächen im Untersuchungsgebiet wurden mittels eines Groundchecks überprüft, konnten allerdings nicht bestätigt werden, da auch hier frische Viehexkremete sowie teilweise Viehgangeln aufgefunden wurden.



## 4.2 Laboranalysen

Für die anstehenden Laboranalysen wurden die Bodenproben vor Ort in Murghab/Tadschikistan luftgetrocknet und der Grobboden vom Feinboden mittels eines 2 mm-Siebes getrennt. Eine gravimetrische Bestimmung lieferte den Skelettgehalt. Größere Wurzeln wurden hierbei ebenfalls entfernt. Nur der Feinboden wurde für die weiteren Proben verwendet. Zwischen der Probennahme und der Untersuchung im bodenkundlichen und geomorphologischen Labor der Universität Erlangen-Nürnberg lagen teilweise mehrere Wochen bis Monate. In jegliche Laboranalysen an der Universität Erlangen-Nürnberg wurde der Laborstandard „Testboden“ als Kontrolle miteinbezogen. Mit Ausnahme der Bestimmung der Korngrößenverteilung wurden alle Proben doppelt beprobt.

### 4.2.1 Korngrößenanalyse

Die feste Phase der Pedosphäre liegt in Form von anorganischen Gesteins- und Mineralpartikeln, aber auch organischen Komponenten wie teilweise zersetzten Pflanzenteilen vor. Die anorganische Komponente eines Bodens in Form der Körnung bestimmt seinen Charakter und ist eine wichtige Voraussetzung für Wasser, Luft, Wurzeln und Bodentiere. Das Bodenskelett wird vom Feinboden durch die künstlich festgelegte 2 mm Äquivalentdurchmessergrenze definiert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Zur weiteren Bestimmung der Textur im Labor wurde die Kombination aus einer Nasssiebung nach einer veränderten DIN ISO 11277:1994-06 (BLUME ET AL. 2000b) und der Messung mittels eines Sedigraphen der Firma *Micromeritics* gewählt. Vor der Siebung wurde bei allen Proben der Kalkanteil mittels 10 % Salzsäure zerstört, da primäre (gesteinsbürtige) und sekundäre (pedogene) Carbonate das Ergebnis verfälschen könnten und sie zu Koagulierung führen. Anschließend wurden die Proben so lange mit destilliertem Wasser perkoliert und zentrifugiert, bis die Leitfähigkeit des jeweils verworfenen Überstandes  $< 200 \mu\text{S}$  betrug. Somit wurden gleichzeitig alle Salze entfernt. Die Proben wurden anschließend im Trockenschrank bei  $80^\circ\text{C}$  eingedampft. Bei  $C_{\text{org}}$ -Gehalten  $> 2 \%$  wurde zusätzlich eine Humuszerstörung mit  $\text{H}_2\text{O}_2$  durchgeführt, wobei die organische Substanz oxidiert wurde und somit Aggregationseffekte ausgeschlossen werden können.

Unter der Zugabe von 80 ml Natriumpyrophosphatlösung als Dispergierungsmittel wurden die Proben 16 Stunden mechanisch geschüttelt. Dieses Phosphat hat eine komplexierende Wirkung auf die koagulierend wirkenden Al-, Ca-, und Mg-Ionen, die dann durch stark peptisierende Na-Ionen ersetzt werden. Im Anschluss erfolgte eine Abtrennung der Fraktionen Grobsand (2000-630  $\mu\text{m}$ ), Mittelsand (630-200  $\mu\text{m}$ ) und Feinsand (200-63  $\mu\text{m}$ ) mittels einer Nasssiebung. Die in Suspension verbleibenden Fraktionen wurden auf 80ml im Trockenschrank bei  $80^\circ\text{C}$  eingedampft.

Mithilfe von Ultraschallbad sowie Magnetrührer und -fischchen wurden die Tonminerale physikalisch peptisiert, bevor die verbliebenen Proben im Particle Size Analyzer *SediGraph III 5120 #310* von *Micromeritics* mittels Röntgenstrahlung in Schluff (63-2  $\mu\text{m}$ ) und Tonfraktion (< 2  $\mu\text{m}$ ) unterteilt wurden.

#### 4.2.2 pH-Wert

Die pH-Wert-Bestimmung erfolgte nach DIN 19684-1: 1977-02 (BLUME ET AL. 2000b). Hierzu wurden 5 g Feinboden mit 12,5 ml 0,01-molare  $\text{CaCl}_2$ -Lösung versetzt (1:2,5 Mischungsverhältnis) und, um Reaktionen mit der Atmosphäre sowie Verdunstung zu vermeiden mit einem Deckel verschlossen. Die Calciumchloridlösung simuliert hierbei eine salzhaltige Bodenlösung, bei der wegen des Ca-Überschusses auch die an den Austauschern fester sorbierten  $\text{H}^+$ -Ionen ersetzt werden und somit die Gesamtacidität erfasst wird. Nach einer Stunde wurde der pH-Wert im Bodenüberstand mittels einer auf pH 7,0 und 9,0 geeichten und anschließend 5 min. gewässerten Glaselektrode bei einer Temperatur von 24 °C gemessen. Nach jeder Einzelmessung wurde die Messelektrode mit destilliertem Wasser abgespült. Als Voraussetzungskriterium wurde eine Stabilität des pH-Wertes über 5-10 Sekunden angestrebt (WEISSER 2009). Das benutzte pH-Meter *WTW pH 530* der *Wissenschaftlich-Technischen Werkstätten GmbH* besaß eine Messgenauigkeit von  $\pm 0,01 \pm 1$  Digit.

#### 4.2.3 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Summenparameter für gelöste dissoziierte Stoffe und damit für den Ionengehalt. Mithilfe ihrer Bestimmung können Rückschlüsse auf den Anteil löslicher Salze und somit auf das Nutzungspotential von Böden gezogen werden.

Zur Messung der Leitfähigkeit wurden 5 g Feinboden eingewogen und im Verhältnis 1:5 mit 25 ml destilliertem Wasser versetzt und maschinell geschüttelt (SCHLICHTING ET AL. 1995). Die Eigen-Leitfähigkeit des destillierten Wassers betrug < 5  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Die Messung der Eluate erfolgte nach 2 Stunden mittels eines Leitwert-Meßgerätes *GMH 3410* der Firma *Greisinger electronic GmbH* bei einer Temperatur von 24 °C. Zwischen den Einzelmessungen wurde die Messsonde mit destilliertem Wasser abgespült. Die Messung war mit einem Gerätefehler von  $\pm 0,5$  % v. MW  $\pm 0,5$  % FS behaftet.

#### 4.2.4 C/N-Verhältnis

Eine wichtige Einflussgröße zur Abschätzung des Anteils des organischen Materials im Boden, stellt die Bestimmung des Kohlenstoffs dar. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich der Gesamtkohlenstoff aus organischem und anorganischem Kohlenstoff zusammensetzt, wobei ersterer für die Abschätzung des Anteils an organischem Material relevant ist. Der anorganische Kohlenstoff lässt sich unterscheiden in primäre (gesteinsbürtige) und sekundäre (pedogene) Carbonate.

Um Aussagen über die Bodenfruchtbarkeit und die Qualität des organischen Materials treffen zu können, ist die Bestimmung des Gesamtstickstoffs eines Bodens von Bedeutung. Als limitierender Wachstumsfaktor beeinflusst seine Disponibilität die Aktivität der Bodenmikroorganismen und das Pflanzenwachstum. Diese Verfügbarkeit kann mithilfe des C/N-Verhältnisses abgeschätzt werden.

Um zwischen organischem und anorganischem Kohlenstoff differenzieren zu können, wurden zwei Messung vorgenommen: Die erste Messung erfolgte ohne Vorbehandlung der Proben zur Bestimmung des Gesamtkohlenstoffs. Die zweite Teilprobe wurde zwei Stunden im Muffelofen bei 430°C verascht. Aus der Differenz der Gewichte von Muffelofen bei 430°C und Trockenschrank bei 105°C wurde der Glühverlust für die Humusberechnung kalkuliert. Für die korrigierten Kohlenstoffwerte der C/N-Berechnung wurde hingegen der totale Gewichtsverlust im Muffelofen verwendet, der auch den Wasserverlust bei 105°C berücksichtigt. Die Bestimmung ergab hierbei nur noch den anorganischen Kohlenstoff, da der organische Kohlenstoff verbrannt wurde. Unter Berücksichtigung des Gewichtsverlustes kann aus der Differenz des gemessenen Gesamtkohlenstoffs und dem anorganischen Kohlenstoff näherungsweise der Anteil an organischem Kohlenstoff berechnet werden (veränderte DIN ISO 10694:1996-08 nach BLUME ET AL. 2000a).

Der Carbonatgehalt wurde unter Berücksichtigung des Glühverlustes mittels der Formel [6] berechnet:

$$\text{CaCO}_3 [\%] = (100,09 / 12,0107 \times c_{\text{korrr}}) \quad [6]$$

$$\text{mit } c_{\text{korrr}} = \frac{(100 - \text{Glühverlust} [\%])}{(100 \times c_{\text{anorg}})}$$

Die Analyse erfolgte im *TruSpec*® CN-Analyser von LECO. Vor der Analyse wurde das Gerät mittels 5-10 Blindwerten und zwei ungewogenen Standardproben EDTA im Vorlauf konditioniert und geeicht. Von jeder Probe wurden je 0,2 g in Zinnfolie mittels einer Feinwaage auf vier Nachkommastellen genau eingewogen. Die Datenausgabe erfolgte in Prozent.

Zur Interpretation der Ergebnisse wurde der Mittelwert aus den jeweils parallelen Proben ermittelt. Um den Humusgehalt abzuschätzen, wurde der prozentuale organische Kohlenstoffgehalt mit 1,72 multipliziert, da es sich bei den Analysen immer um Mineralboden handelte (SPONAGEL ET AL. 2005).

#### 4.2.5 Kationenaustauschkapazität nach Trüby und Aldinger

Um einer Verfälschung durch gelöste Salze zu vermeiden, wurden jegliche Proben mit destilliertem Wasser perkoliert und der Überstand abzentrifugiert bis ihre Leitfähigkeit unter 50  $\mu\text{S cm}^{-1}$  lag (SCHLICHTING ET AL. 1995). Stichprobenartig wurden hierbei die aus-

gewaschenen Salze in Schnelltests (Sulfat-Test und Chlorid-Test mittels Silbernitratlösung) qualitativ bestimmt. Nach dieser Vorbehandlung wurden die Proben im Trockenschrank auf 40°C über Nacht getrocknet und anschließend 5 g Feinboden eingewogen und mit 50 ml 1-molare  $\text{NH}_4\text{Cl}$  versetzt. Nach dem Verschließen wurden die Polyflaschen kräftig von Hand geschüttelt und über Nacht stehen gelassen. Am darauf folgenden Tag wurde nochmals kurz von Hand aufgeschüttelt und anschließend ohne Deckel zentrifugiert. Vor dem Dekantieren/Filtrieren des Überstandes in Polyflaschen wurde in der Austauschlösung und im Überstand der pH-Wert gemessen; in der Austauschlösung zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit. Diese Parameter werden zur Berechnung der austauschbaren Protonen am Austauscher benötigt. Hierbei wurde darauf geachtet, dass jeweils vor dem Eintauchen in den Überstand die pH-Elektrode sehr gut mit  $\text{H}_2\text{O}_{\text{dest}}$  gespült wurde um eine den Meßwert verfälschende Verschleppung von  $\text{K}^+$ -Ionen zu vermeiden (SCHLICHTING ET AL. 1995).

Nach dem Dekantieren und Filtrieren wurden aus der Extraktionslösung Verdünnungen im Verhältnis 1:10 hergestellt, um in der jeweils optimalen Konzentrationsstufe Na, K, Mg und Ca zu messen. Als Ionisationspuffer wurden Lanthan und Cäsium zugegeben um Verfälschungen der Messwerte zu vermeiden. Lanthan verhindert die Bildung von Eigenverbindungen in der Flamme bei der Ca- und Mg-Messung, während Cäsium die Ionisierungs- und Verdampfungsinterferenzen bei Na und K kompensiert. Die Verdünnungen von zunächst 1:10 wurden wie folgt in 50 ml Polyflaschen angesetzt: 20 ml bestehend aus 2 ml Extraktionslösung, 2 ml  $\text{CsCl}$ , 1 ml  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 0,2 ml  $\text{HNO}_3$  und 14,8 ml  $\text{H}_2\text{O}_{\text{seradest}}$ .

Unter Verwendung der entsprechenden Eichlösungen wurden Ca und Mg durch Absorption am Atomabsorptionsspektrometer und K und Na mittels Emission am Flammenphotometer *Unicam M Series* gemessen.

Bei der Messung am AAS ergab sich bei einigen Proben die Notwendigkeit, die Verdünnung auf 1:100 zu erhöhen, da die Meßwerte mit der Verdünnung von 1:10 außerhalb des Meßbereichs lagen.

Mithilfe folgender Formel [7] konnte die ermittelte Konzentration ( $\text{mg l}^{-1}$ ) in  $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$  Boden umgerechnet werden:

$$c\left(\frac{\text{cmol}}{\text{kg}}\right) = \frac{c_{\text{kor}}\left(\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right) \times V(\text{l}) \times Z \times 100}{M\left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) \times \text{EW}(\text{g})} \quad [7]$$

mit  $c_{\text{kor}}$  = tatsächliche Konzentration im Extrakt unter Berücksichtigung der Verdünnung,  
 $V(\text{l})$  = Extraktionsvolumen, 0,05 l,  
 $Z$  = Wertigkeit (K und Na = 1; Ca und Mg = 2),  
 $M(\text{g/mol})$  = Molare Masse (Na = 23; K = 39; Ca = 40; Mg = 24),  
 $\text{EW}$  = Einwaage

#### 4.2.6 Phosphor

Als Vorgehen für die Phosphorbestimmung wurde die Methode der wasserlöslichen Phosphor-Konzentration gewählt. Hierbei wird der für die Pflanzenwurzeln verfügbare Phosphor erfasst, der einen limitierenden Faktor für den Pflanzenwuchs darstellt (PAGE 1982).

Der pflanzenverfügbare wasserlösliche Phosphor wurde an 26 ausgewählten Proben (incl. Laborstandard Testboden) untersucht.

Nach PAGE 1982 wurden 5 g lufttrockener Feinboden mit 50 ml dest. Wasser versetzt, 5 min geschüttelt, zentrifugiert und filtriert. 20 ml des Filtrats wurden 4 ml einer Lösung aus Ammonium-Paramolybdat, Kalium-Antimon-Tartrat, Schwefelsäure und Ascorbinsäure zugegeben und mit dest. Wasser auf 25 ml verdünnt. Die Messung der Farbtintensität folgte anschließend optisch am *Photometer DR 5000* von *Hach Lange* mittels einer Eichkurve bei 882 nm.

#### 4.2.7 Stabilisotopenanalytik

Die Stabilisotopenanalyse der 12 Pflanzen- und 11 Bodenproben wurde in Kooperation mit Dr. Michael Zech an der Abteilung Bodenphysik der Universität Bayreuth durchgeführt. Hierfür wurden etwa 5 mg luftgetrocknetes (40 °C), gut homogenisiertes und mittels Schwingmühlen fein gemahlene Pflanzenmaterial bzw. 50 mg mit dem Mörser zerkleinerte und entkalkte Feinerde mit Wolframoxid als Oxidationsmittel in Zinnschiffchen eingewogen. Die Carbonatzerstörung erfolgte mittels 10 %ige Salzsäure und anschließender Perkolation bis die Leitfähigkeit des abzentrifugierten Überstandes < 200 µS betrug. Die Messungen wurden am Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER) an einem Elementaranalysator (*Carlo Erba NC 2500*) durchgeführt, der über ein *Conflow II interface* (Thermo Finnigan MAT, Bremen, Germany) an einem *Delta<sup>plus</sup>* Isotopenmassenspektrometer (Thermo Finnigan MAT, Bremen, Germany) gekoppelt ist. Die Messgenauigkeit liegt hier standardmäßig bei rund ±0,2 ‰, wurde jedoch bei manchen Bodenproben durch geringe C- und N-Konzentrationen auch überschritten.

Als Isotope bezeichnet man unterschiedlich schwere Atome eines Elements. Sie besitzen im Periodensystem der Elemente also die gleiche Ordnungszahl (gleiche Anzahl an Protonen), aber eine unterschiedliche Anzahl an Neutronen. Manche Isotope sind stabil, während andere radioaktiv sind. Aufgrund ihrer Massendifferenzen variieren die Isotope und Moleküle die aus unterschiedlichen Isotopen aufgebaut sind (z.B. <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> und <sup>13</sup>CO<sub>2</sub>) hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften. Als Folge davon kommt es bei physikalischen Prozessen (z.B. Diffusion, Verdampfung, etc.) zu sog. *Kinetischer Fraktionierung* (KENNEDY & KROUSE 1990; PATAKI ET AL. 2007; SCHNYDER & AUERSWALD 2008), d.h.

zur Bevorzugung/Benachteiligung der leichten/schweren Isotope bzw. Moleküle. Des Weiteren fraktionieren auch enzymatische Prozesse wie die CO<sub>2</sub>-Fixierung, die N-Fixierung oder die Denitrifizierung teilweise sehr stark gegenüber den schweren Molekülen. Dies führt zur Ab- bzw. Anreicherung der schweren Isotope in bestimmten Pools. Die Anwendung der Stabilisotopenanalytik hat in den letzten zwei Jahrzehnten stark zugenommen und erstreckt sich von der Forensik bis hin zu paläoklimatischen Fragestellungen. Der Fokus in dieser Arbeit liegt bei den für die Ökologie wichtigen stabilen Isotopen <sup>13</sup>C und <sup>15</sup>N (Tab. 3). Diese Isotope können in ihrer natürlichen Häufigkeitsverteilung (natural abundance) verwendet werden, um zwischen verschiedenen Photosynthesewegen (C3 versus C4) zu unterscheiden, um Trockenstress aus den δ<sup>13</sup>C-Werten von Pflanzen zu diagnostizieren, oder um Prozesse des Stickstoffkreislaufes zu untersuchen. Hierzu wurden sowohl Boden- als auch Pflanzenproben untersucht. Daneben liefern Stickstoffisotopenverhältnisse Informationen über die Ernährung und das Trophieniveau von Tieren sowie die Stickstofffixierung in der Pflanzen-Microben-Symbiose. Die Isotopen-Signatur wird verwendet um den Aktionsradius von Tieren, die Nährstoffbewegungen und Partikeltransporte im Landschaftsbild und zwischen den Einzelteilen der Biosphäre zu verfolgen. Somit können Aspekte der Ernährung sowie ökologische Umweltzusammenhänge nachvollzogen werden (WEST ET AL. 2006).

**Tab. 3: Durchschnittliche wichtige relative Häufigkeiten stabiler Kohlenstoff- und Stickstoffisotope**

Quelle: verändert nach WEST 2006: 409

Element	Isotop	Durchschnittliche relative Häufigkeit
<b>Kohlenstoff</b>	12C	98,89
	13C	1,11
<b>Stickstoff</b>	14N	99,63
	15N	0,37

Die relative Häufigkeit von stabilen Isotopen wird im Verhältnis von seltenem zu häufigem Isotop relativ zu einem Standard in der sog. Delta-Nomenklatur mithilfe Formel [8] ausgedrückt:

$$\delta = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \text{ ‰} \quad [8]$$

Hierbei steht R für das molare Verhältnis von schwerem zu leichtem Isotop der Probe sowie des Standards.

Als Kohlenstoffstandard wird PDB (Pee Dee Belemnite, die Carbonatschale eines kreidezeitlichen Mollusken aus South Carolina) mit einem im Vergleich zu organischem Material höheren <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C-Verhältnis von 11237,2 × 10<sup>-6</sup> verwendet. Als Stickstoffstandard wird isotopisch uniforme atmosphärische Luft mit einem <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N-Verhältnis

von  $3676,8 \times 10^{-6}$  verwendet. Die  $\delta$ -Notation wird meist negativ, da das Verhältnis der Probe enger als das des Standards ist (KENNEDY & KROUSE 1990; SCHNEIDEGGER 2000; SCHNYDER & AUERSWALD 2008; WEST 2006; WITTMER ET AL. 2008).

Die primäre Kohlenstoffquelle für terrestrische Pflanzen stellt das atmosphärische  $\text{CO}_2$  dar, dessen  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert bei  $-7,7 \text{ ‰}$  liegt. Der Kohlenstoffdioxidgehalt der Luft und damit auch der  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert unterliegt saisonalen und temporären Schwankungen. Aktuelle Werte liegen mindestens  $1,4 \text{ ‰}$  unter den Werten vor der industriellen Revolution, was auf die Verbrennung von fossilen Brennstoffen mit  $^{13}\text{C}$ -abgereichertem  $\text{CO}_2$  zurückzuführen ist.

#### 4.2.8 Alkanalyse

Alkane sind Biomarker, die von Pflanzen stammen und sich mit der Streu im Boden anreichern, da es sich um eine selektive Konservierung chemisch resistenter Lipid-Moleküle handelt, die gegen biochemische Degradation und Diagenese resistent sind. Der chemische Aufbau der Kohlenwasserstoffmoleküle durch ausschließlich Kohlenstoff- und Wasserstoffatome erniedrigt ihre Reaktivität. Die Alkane sind Epicuticular- und Wurzelwachse wie Cutin und Suberin. Sie schützen die Pflanzen vor Wasserverlust und mikrobiellen Attacken (GLEIXNER 2005, ZECH & GLASER 2008).

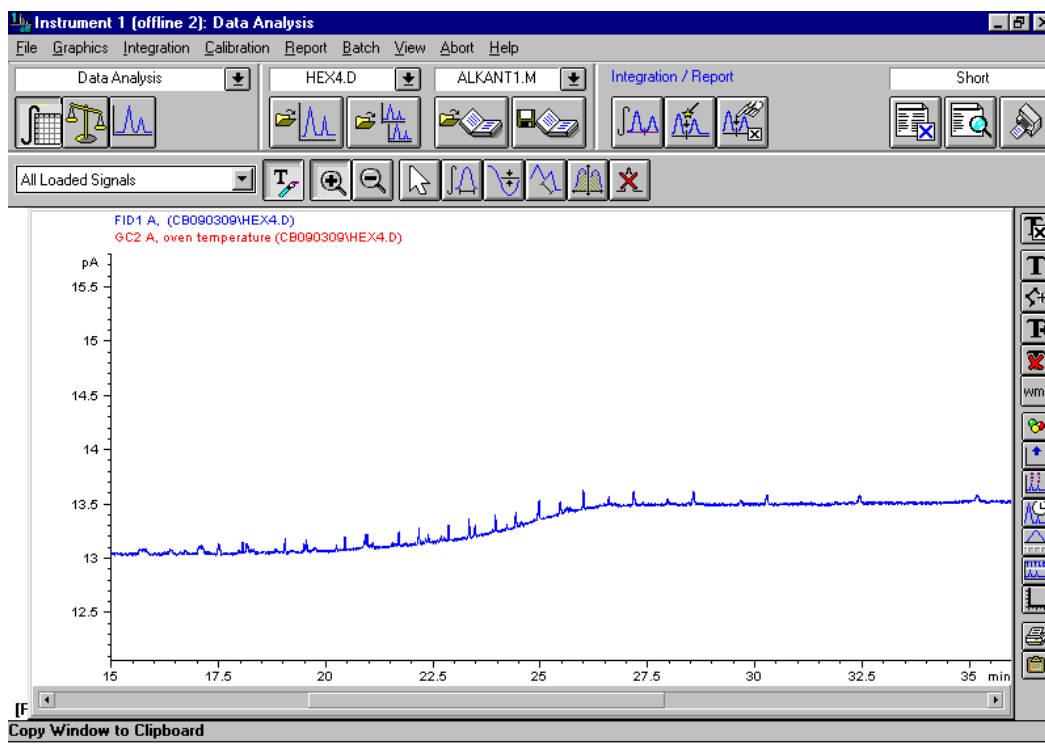
Auch die Alkanalysen ausgewählter Boden- und Pflanzenproben wurden in Kooperation mit Dr. Michael Zech an der Universität Bayreuth durchgeführt. Zur Aufbereitung der Proben wurde die Methode von BOURBONNIERE ET AL. (1997) und ZECH & GLASER (2008) benutzt. Anstelle der Soxhlet-Extraktion wurde die ASE-Methode (accelerated solvent extraction method) zur n-Alkanextraktion verwendet. Die Extraktion der freien Lipide aus etwa 2 g Pflanzenprobe und 10 g luftgetrockneter ( $40 \text{ °C}$ ) Feinerde erfolgte mit einer 7:3 Methanol-Toluol-Mischung unter Zugabe von  $40 \text{ }\mu\text{l}$  des 1. Standards Androstan (ATE: 5,50 mg Androstane in 10 ml Toluol) sowie geglähter Cellite und Quarzsand an einem *Dionex ASE-200* im Labor für Isotopen-Biogeochemie am BayCEER. Alle Utensilien hierzu wurden vorab bei  $300 \text{ °C}$  gegläht um Verschleppungen vorzubeugen. Die weitere Probenaufbereitung erfolgte an der Abteilung Bodenphysik der Universität Bayreuth.

Die mittels Rotationsverdampfern einrotierten und unter Stickstoff eingedampften Proben wurden durch Zugabe von 1 ml 0,5-molarer NaOH verseift. Die konzentrierten Lipidextrakte wurden mithilfe von 3 g geglähtem, 5 % deaktiviertem Silica und 3 g geglähtem, 5 % deaktiviertem Alox aufgereinigt. Anschließend wurden die Alkane mit 10 ml Hexan/Toluol (85:15) eluiert und im Folgenden abermals einrotiert. Bei der Phasentrennung und Lipidfraktionierung durch die Alox-Silica-Säulen sind die meisten Verluste an Alkanen zu verzeichnen. Im letzten Schritt wurden die aufkonzentrierten und gereinigten Proben mit Hexan in 2 ml GC-Autosamplervials mit  $100 \text{ }\mu\text{l}$  Inlets

überführt und unter Stickstoff eingengt. Erst jetzt wurden 40 µl des 2. Standards C36-Standardlösung zugegeben.

Die Messung erfolgte abschließend an einem Gaschromatographen von *Hewlett Packard (HP 6890 GC)* bestückt mit einer 30 m Säule, der mit einem Flammen-Ionisationsdetektor (FID 185) gekoppelt ist. Zur Quantifizierung wurde eine externe Standardlösung (nC20 bis nC40) in unterschiedlicher Konzentration verwendet: 1, 2, 5 und 10 µg Alkan/Vial.

Abb. 18 zeigt zum einen ein typisches in GC-Chromatogrammen auftretendes Phänomen, das sog. Säulenbluten. Bei dem für die Alkanmessungen gewählten Temperaturprogramm führen die hohen GC-Ofentemperaturen von bis zu 300 °C zu einem dauerhaften Verlust an Säulenfilmmaterial und verursacht daher einen Anstieg der Basislinie ab etwa 25 min. Zum anderen erkennt man in Abb. 18 ein charakteristisches Alkanmuster, obwohl diese Probe aus reinem Hexan besteht. Es handelt sich hierbei um Kontaminationen des Hexans mit Alkanen aus den Gummisepten der Deckel der Autosamplervials, die nur bei wiederholten Injektionen auftreten, da bei der ersten Injektion die schützende Teflonbeschichtung der Septen beschädigt wird. Um diese Kontamination zu vermeiden, wurden die Vials nach den Injektionen spätestens nach 6 h mit einem neuen Deckel zugedecappt.



**Abb. 18:** GC-Chromatogramm für Hexan: Säulenbluten (Anstieg der Basislinie bei etwa 25 min durch hohe GC-Ofentemperaturen) und Alkankontamination aus dem Gummiseptum des GC-Vial-Deckels



## 4.3 Statistische Auswertungen

### 4.3.1 Deskriptive Statistik und explorative Datenanalyse

#### 4.3.1.1 Uni- und bivariate statistische Methoden

##### 4.3.1.1.1 Boxplots

Zur Beschreibung von größeren Datenmengen mindestens ordinal skalierten Merkmals dienen neben der Berechnung von Maßzahlen häufig graphische Methoden. Diese veranschaulichen das Verhalten der Daten in Bezug auf Konzentration, Ausdehnung oder Symmetrie. Eine Darstellungsform zur Charakterisierung der Häufigkeitsverteilung ist der Boxplot (Abb. 19). Er kennzeichnet die Lage des Medians, der 25 %- und 75 %-Quantile sowie der Extremwerte und Ausreißer (TOUTENBURG & HEUMANN 2008). Die untere bzw. obere Grenze der Box ist durch das untere bzw. obere Quartil gegeben (Abb. 20). Dies bedeutet, dass die Hälfte aller Werte in der Box liegt. Die Linie innerhalb der Box zeigt den Median. Außerhalb der Box liegen zum einen die Extremwerte, die mehr als 3 Boxlängen von deren Rand entfernt liegen und mit „\*“ gekennzeichnet sind, zum anderen die Ausreißer, die sich zwischen 1,5 und 3 Boxlängen von ihr entfernt befinden und durch „o“ wiedergegeben werden. Die äußeren Striche parallel zur Box kennzeichnen die kleinsten und größten beobachteten Werte, die aber noch nicht als Ausreißer deklariert werden. Boxplots eignen sich ideal zum Vergleich mehrerer Gruppen einer Gesamtheit in Bezug auf ein Merkmal. Sie wurden alle mit SPSS 16.0 angefertigt (SACHS & HEDDERICH 2009; TOUTENBURG & HEUMANN 2008).

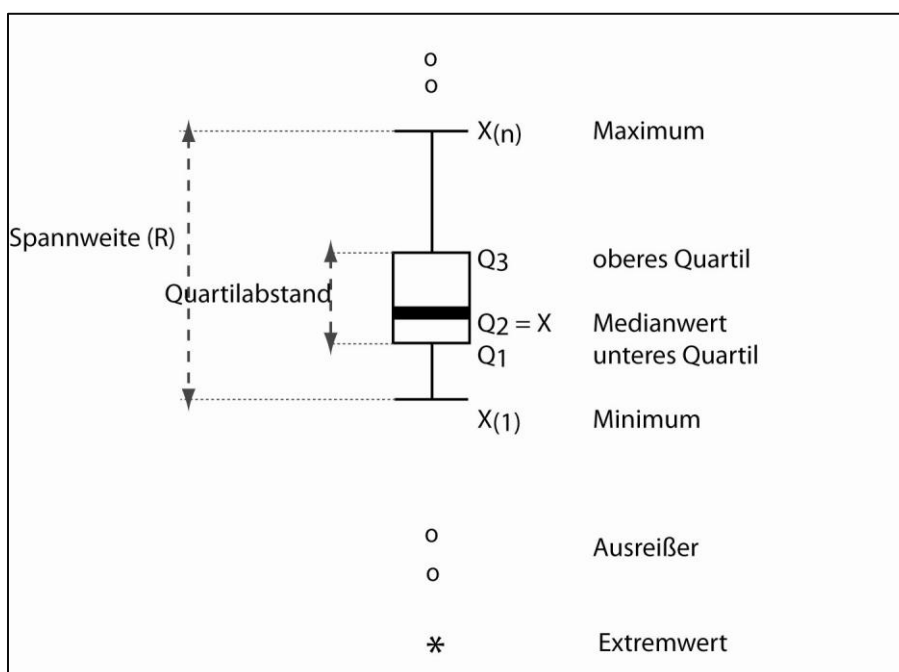


Abb. 19: Aufbau eines Boxplots

Quelle: verändert nach SACHS & HEDDERICH 2009: 69

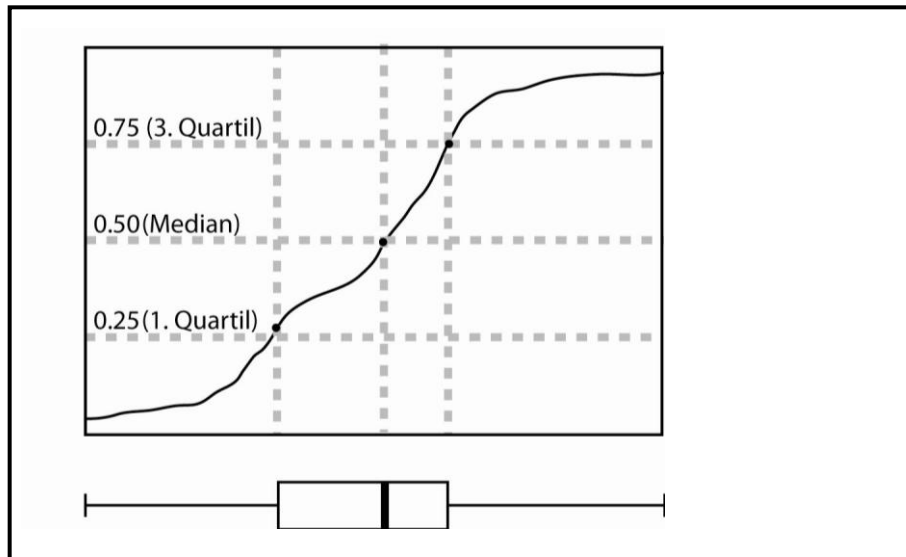


Abb. 20: Darstellung der Quartile im Boxplot

#### 4.3.1.1.2 Korrelationsanalyse

Regressions- und Korrelationsanalysen beschäftigen sich mit bivariaten und multivariaten Verteilungen. Korrelationsanalysen stellen dabei die Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei oder mehr Zufallsvariablen heraus, während Regressionsanalysen die Form des Zusammenhangs ermitteln. Um lineare Zusammenhänge zwischen zwei Variablen festzustellen, wurden Korrelationen mithilfe des *Rangkorrelationskoeffizienten* nach *Spearman* erstellt. Diese Art der Korrelation setzt keine normalverteilten Daten voraus und liefert auch bei nur geringen Stichprobenumfängen ordinalskalierte Daten exakte Ergebnisse. Desweiteren ist sie auf metrisch skalierte Daten, zwischen denen ein monotoner, aber nicht-linearer Zusammenhang vermutet wird, sinnvoll anzuwenden. Sie eignet sich daher sehr gut um bivariate Korrelationen zwischen der Beweidungsintensität und den verschiedenen Variablen des vorliegenden Datensatzes zu errechnen und einen einfachen, einseitigen Zusammenhang zu ermitteln (BAHRENBERG ET AL. 1999; JANSSEN & LAATZ 2007; RUDOLF & KULISCH 2008).

Der Korrelationskoeffizient dient dabei als Maß für die Stärke des linearen Zusammenhangs. Er ist auf Werte zwischen -1 und 1 normiert. Ist dieser positiv, so besteht eine gleichsinnige Beziehung, ist er negativ, besteht eine gegensinnige Beziehung. Der quadrierte Korrelationskoeffizient ergibt das Bestimmtheitsmaß, das für den „erklärten“ Varianzteil der Regressionsanalyse steht. Ist  $r = 0$ , so sind beide Variablen unkorreliert, d.h. es besteht kein linearer Zusammenhang. Die Stärke des Zusammenhangs ist demnach umso größer, je näher der Betrag von  $r$  an 1 liegt (Tab. 4). Für den Vergleich der Daten werden nicht die genauen Variablenwerte verwendet, sondern beide Datenreihen vorher in Rangreihen transformiert. Besitzen mehrere Fälle den gleichen Wert, so erhalten sie alle denselben mittleren Rangplatz. Anschließend werden für die Korrelation nur

die einzelnen Rangpaare der zu vergleichenden Messreihen einbezogen (LEYER & WESCHE 2007; SACHS & HEDDERICH 2009).

Der vorliegende Datensatz wird als Stichprobe der Grundgesamtheit interpretiert, um allgemeine Aussagen treffen zu können und zwischen den Hypothesen des Bestehens und Nichtbestehens einer Korrelation mithilfe schließender statistischer Methoden zu diskriminieren. Die Entscheidung für einen Zusammenhang zwischen zwei ordinalskalierten Variablen wird mittels eines Tests getroffen, dessen Nullhypothese  $H_0$  auf der Annahme basiert, dass beide Variablen keinen monotonen Zusammenhang besitzen. Als Mindeststichprobenumfang nennen RUDOLF & KULISCH (2008) einen Umfang von 16, empfehlen aber Stichproben größer als 30. Alle Korrelationsanalysen basieren auf der Verwendung von Mischproben der 60 m x 60 m Flächen.

Mithilfe eines Scatterplots, der die beiden Variablen in Form der Wertekombination der Untersuchungsobjekte als Punktwolke in einem Streudiagramm abbildet, kann entschieden werden, ob sich durch diese eine Kurve legen lässt, die Rückschlüsse auf Stärke und Richtung zulässt. Ist die Kurve eine Gerade, so besteht ein linearer Zusammenhang.

Diese Analyse wurde mit dem Programm R 2.8.1 durchgeführt. Das Skript ist im Anhang App. 1 zu finden.

**Tab. 4: Verbale Beschreibung der Größe des Korrelationskoeffizienten**  
Quelle: ZÖFEL 1988: 211

Betrag des Korrelationskoeffizienten	Beschreibung
$0 < r < 0,2$	Sehr geringe Korrelation
$0,2 < r < 0,5$	Geringe Korrelation
$0,5 < r < 0,7$	Mittlere Korrelation
$0,7 < r < 0,9$	Hohe Korrelation
$0,9 < r < 1$	Sehr hohe Korrelation

#### 4.3.1.2 Multivariate statistische Methoden

##### 4.3.1.2.1 Clusteranalyse

Die Clusteranalyse ist ein numerisches, hierarchisch-agglomeratives Klassifikationsverfahren, das sukzessive die Objekte eines Datensatzes zu Gruppen zusammenführt, so dass die Elemente einer Gruppe möglichst ähnlich und die Gruppen untereinander möglichst unähnlich sind. Die Objekte des Datensatzes werden hierbei durch eine Menge aus nominalen, ordinalen oder metrischen Merkmalen beschrieben. Die Ergebnisse werden graphisch in einem Dendrogramm dargestellt, das anhand einer leicht nachvollziehbaren Baumstruktur die bildhafte Umsetzung der Fusionierung erklärt. Hierbei sitzen die Objekte am Ende der Äste, deren Länge die Distanz zwischen den Elementen symbolisiert. Die hierarchische Ordnung wird durch Verschmelzung von unten nach

oben aufgebaut. Mathematisch beinhaltet dies eine Gruppenezusammenfassung von Aufnahme­flächen, die einen hohen Ähnlichkeitskoeffizienten besitzen, um sie dann auf einem niedrigeren Level der Ähnlichkeit mit anderen Gruppen zu verschmelzen. Dies wird durch die Abnahme des Ähnlichkeitskoeffizienten wiedergegeben (EAST 1987). Für die Analyse wird ein Distanzmaß festgelegt, um die Ähnlichkeit der Aufnahmeobjekte durch Überprüfung der Ausprägungen objektbezogener Variablenwerte der Rohdatenmatrix zu definieren. Der Cluster-Algorithmus determiniert den Ansatz zur Auswahl der ähnlichsten Aufnahmen und anschließenden Fusionierung (ECKSTEIN 2008; LEYER & WESCHE 2007).

Vor der Clusteranalyse wurden die Daten transformiert und die unterschiedlichen Skalen mittels einer Standardisierung angepasst, um Skaleneffekte auszuschalten. Als metrisches Ähnlichkeitsmaß wurde auf die *Euklidische Distanz* zurückgegriffen, da der Anteil der abiotischen Variablen überwiegt. Die Aufnahmen werden als Punkte in einem von den Variablen aufgespannten Variablenraum aufgefasst und ihre Distanz voneinander geometrisch über den pythagoräischen Lehrsatz bestimmt, was anschaulich der „Luftliniendistanz“ entspricht. Als Fusionierungsalgorithmus wurde die *Ward-Methode* verwendet, da sie alle Elemente in den Clustern berücksichtigt, wobei die Summe der Abweichungsquadrate vom Mittelpunkt des Clusters – also ein mit der Varianz verwandter Term – innerhalb des Clusters betrachtet wird. Die Abweichungsquadrate innerhalb der Gruppen lassen sich als quadrierte Distanzen aller Clusterelemente berechnen und werden dann auf die Anzahl der Klassenobjekte standardisiert. Die Fusionierung verläuft über eine möglichst geringe Zunahme der Summe der gruppeninternen Abweichungsquadrate, weshalb der Fusionierungsalgorithmus auch *Minimum-Variance-Methode* genannt wird. Die Methode wird der Forderung nach interner Homogenität der Cluster und maximaler Heterogenität zwischen den Gruppen gerecht. Es ergibt sich eine klare Gruppenstruktur mit relativ ausgeglichenen Clustergrößen, in denen eine ähnliche Anzahl von Objekten gruppiert ist. Wegen der quadrierten Abstände fallen die großen Abstände zwischen den Hauptgruppen durch Überhöhung stärker ins Gewicht. Wachsende Unterschiede werden also folglich überproportional betont (BAHRENBERG ET AL. 2003; ECKSTEIN 2008; LEYER & WESCHE 2007).

Clusteranalysen, bei denen alle erhobenen Variablen mit in die Klassifizierung einfließen, gewichten bei der Gruppenbildung einige Eigenschaften stärker. Insbesondere sind dies solche, die durch mehrere Variablen in ähnlicher Weise beschrieben werden. Dies wird durch die hohen Korrelationen zwischen den Variablen deutlich. Eine vorgeschaltete Hauptkomponentenanalyse der Bodenlabordaten bringt dazu deshalb mehr Aufschluss (BAHRENBERG ET AL. 2003).

Die Clusteranalysen wurden mit R 2.8.1 durchgeführt (vgl. App. 1).

#### 4.3.1.2.2 Ordination

Neben Klassifikationsverfahren stellt die Ordination ein weiteres Verfahren für die Darstellung multivariater Beziehungen im Zuge einer Dimensionsreduktion dar. Grundsätzlich steht im Vordergrund eine Visualisierung der wesentlichen Information und damit der Suche nach Hypothesen. Der multivariate Datensatz wird als n-dimensionaler Hyperraum interpretiert. Werden Objekte im Raum der ihnen zugeordneten Variablen dargestellt, handelt es sich um eine R-Analyse, während bei einer Q-Analyse Variablen im Objektraum betrachtet werden. Die Ordination sollte die Differenzen zwischen den Aufnahmen so erfassen, dass mit möglichst wenigen Dimensionen oder Achsen ein möglichst großer Anteil dieser Unterschiede reproduziert wird und die wesentlichen ökologischen Zusammenhänge abgebildet werden können. Demzufolge erhalten die ersten jeweils unkorrelierten orthogonalen Achsen die maximale Varianz im Datensatz. Die Darstellung erfolgt meist mittels einfacher Streudiagramme (*scatter plot*). Enthält das Ordinationsdiagramm nicht nur die Variablen, sondern auch die Aufnahmeobjekte, so handelt es sich um einen *Biplot* bzw. *Joint Plot*. Die relativen Distanzen zwischen den Objekten entsprechen ihren Unähnlichkeiten. Der vom Ursprung ausgehende Vektorpfeil zeigt den jeweiligen Gradienten der Variablen (LEYER & WESCHE 2007; WEBSTER & OLIVER 1990).

##### 4.3.1.2.2.1 Hauptkomponentenanalyse (PCA)

Die Hauptkomponentenanalyse ist ein Verfahren der multivariaten Statistik, das dazu benutzt wird, umfangreiche komplexe Datensätze zu strukturieren, zu vereinfachen und zu veranschaulichen. Hierbei wird eine Vielzahl statistischer Variablen, als direkt beobachteter Größen, durch eine geringere Zahl möglichst aussagekräftiger Linearkombinationen – die Hauptkomponenten – genähert. Dabei wird der Datensatz vereinfacht und auf die darunter liegende kausale Struktur nicht direkt beobachtbarer, komplexer Größen reduziert, deren Variablen miteinander hoch korreliert sind. Da die Variablen in unterschiedlichen Einheiten gemessen wurden, werden die Werte zuvor standardisiert und transformiert. Die Länge der Vektoren wird damit vergleichbar. Die Ausgangsvariablen müssen metrisch skaliert sein, ihre Beziehungen sollten linear sein, da die PCA als Distanzmaß auf die *Euklidische Distanz* benutzt. Die Hauptkomponentenanalyse versucht Faktoren zu finden, die die gesamte Variation der ursprünglichen Datenmatrix reproduzieren und dabei Redundanzen zusammenfassen. Sie ist demnach ein rein algebraisches Verfahren, das „varianzorientiert“ arbeitet und versucht die gesamte Varianz jeder Variablen durch die Hauptkomponenten zu erklären. Dieses abstrakte Konstrukt lässt sich nur durch die Korrelation zu den Variablen definieren. Die einzelnen Hauptkomponenten werden schrittweise nacheinander extrahiert, so dass sie die Gesamtvarianz des Datensatzes erklären. Die erste Hauptkomponente wird so ge-

wählt, dass auf sie ein möglichst großer Anteil der Varianz entfällt. Die zweite Hauptkomponente muss orthogonal zur ersten sein, steht also senkrecht auf dieser und ist unkorreliert. Die quadrierten Ladungen der Hauptkomponenten geben an, welcher Anteil der jeweiligen Variablen auf die Hauptkomponenten entfällt. Diese Korrelationen der Variablen mit der Hauptkomponente sind umso höher, je stärker der Zusammenhang und die Zunahme in Richtung der Komponenten sind. Die Ladungen werden standardmäßig quadriert, da auch negative Ladungen möglich sind. Die Summe der quadrierten Ladungen einer Hauptkomponente ergibt ihren Eigenwert. Dieser liefert ins Verhältnis mit der Zahl der Variablen gesetzt, den Anteil an der Gesamtvarianz, der durch die jeweilige Hauptkomponente erklärt wird. Enthält die Datenmatrix  $m$  Variablen, so sind  $m$  Hauptkomponenten nötig, um die gesamte Varianz der Variablen in einem  $m$ -dimensionalen Raum vollständig zu beschreiben. Die  $m$  extrahierten Hauptkomponenten stehen dann paarweise orthogonal zueinander. Mit jeder weiteren neu extrahierten Hauptkomponente sinkt der Eigenwert und damit der entsprechend erklärte Varianzanteil (BAHRENBERG ET AL. 2003; DENT & YOUNG 1981; EAST 1987; LEYER & WESCHE 2007).

Nach WEBSTER & OLIVER (1990) hat sich die Hauptkomponentenanalyse als eines der ältesten Ordinationsverfahren auch als eine der wichtigsten Analysen von Bodendaten herausgestellt, bei der die Aufnahmen im Raum ihrer Variablen untersucht werden. Die Analyse findet die Hauptachsen einer multidimensionalen Struktur und gibt jeder Aufnahme dazu relative Koordinaten. Die Beziehungen zwischen den Individuen können dann anhand ihrer Lage im von den neuen synthetischen Achsen aufgespannten Raum dargestellt werden. Graphisch werden die Variablen als Vektoren dargestellt, während die Raumeinheiten entsprechend als Punkte festgelegt werden. Nach dem Kaiserkriterium scheint es nur sinnvoll solche Hauptkomponenten zu extrahieren, deren Eigenwert größer als 1 ist, die also einen größeren Varianzanteil auf sich vereinen als jede Ausgangsvariable für sich selbst. Die Dimensionskonzentration, also die Zusammenfassung redundanter Information auf einige wenige Achsen, vernachlässigt die weniger wichtigen Achsen mit nur irrelevantem Rauschen. Nach LEYER & WESCHE (2007) werden bei ökologischen Fragestellungen in der Regel nur die ersten zwei bis vier Achsen interpretiert. Sie spiegeln die wichtigsten ökologischen Gradienten wider. Die inhaltliche Interpretation der Hauptkomponenten geschieht mittels Hauptkomponentenladungen, also den einfachen Korrelationskoeffizienten zwischen den Variablen und den Hauptkomponenten. Natürlich sind die Hauptkomponenten demnach genauso wie die Ausgangsvariablen variable Größen (BAHRENBERG ET AL. 2003; LEYER & WESCHE 2007).

Das für die Berechnung mithilfe des Programms R 2.8.1 verwendete Skript befindet sich im Anhang App. 1.

#### 4.3.1.2.2.2 Detrended Correspondence Analysis (DCA)

Die DCA (= *Detrended Correspondence Analysis*) als Weiterentwicklung der Korrespondenzanalyse wird als populärstes Ordinationsverfahren der indirekten Gradientenanalyse (*Unconstrained Ordination*) in der Ökologie verwendet und basiert auf dem Algorithmus des *Reciprocal Averaging*. Sie geht von der Annahme aus, dass sich die Variablen unimodal und nicht linear entlang der wichtigsten Umweltgradienten verhalten und arbeitet dabei implizit mit *Chi-Quadrat-Distanzen* (LEYER & WESCHE 2007).

Indirekte Gradientenanalysen setzen nach der Findung der Achsen im ersten Schritt des Ordinationsverfahrens in einem zweiten Schritt diese post hoc in Beziehung zu den gemessenen Umweltvariablen. Im vorliegenden Fall greift also die Ordination nur auf den Datensatz der im Labor erhobenen Bodendaten zurück, um die Flächen entlang von Achsen, die die Hauptgradienten des Datensatzes zusammensetzen, zu ordnen. Für die Berechnung der eigentlichen Ordination spielen die Umweltvariablen somit keine Rolle, sondern sie werden erst in einem zweiten Schritt zur Interpretation der Ordination und Aufklärung der wesentlichen Zusammenhänge genutzt. Somit lassen sich einfache Gradienten entlang der Achsen identifizieren, wobei einzelne Umweltvariablen mit anderen interagieren können, und es zu voneinander abhängigen Effekten verschiedener Umweltvariablen kommen kann. Im Diagramm wird die Richtung durch einen Pfeil bestimmt, dessen relative Länge im Vergleich zu den anderen Umweltvariablen die Stärke der Änderung angibt. Der Ursprung des Vektors ist der Mittelpunkt der Punktwolke, die von den Aufnahmewerten gebildet wird. Während die absolute Länge der Vektoren im Diagramm willkürlich ist, geben die relativen Längen der Vektoren untereinander einen Vergleich der Korrelationskoeffizienten. Nominal skalierte Variablen können als Zentroide in das Diagramm projiziert werden und somit den Datensatz nach Klassenzugehörigkeit aufspalten. Im Gegensatz dazu, wird bei der direkten Gradientenanalyse der ökologische Raum unmittelbar durch die Kombination der Boden- und Umweltvariablen aufgespannt. Folglich kommen der indirekten Ordination und der direkten Ordination in der Ökologie verschiedene Aufgaben zu (LEYER & WESCHE 2007; ØKLAND 1996).

Mathematisch betrachtet stellen die Achsen der Korrespondenzanalyse Eigenvektoren dar, wobei jede Ordinationsachse einen Eigenwert  $\lambda$  besitzt, der ein Maß für die Dispersion, also die Aufspaltung der Variablenwerte entlang der Achse ist. Je wichtiger die Achse für die Variation des Datensatzes, desto höher ist ihr Eigenwert. Die Summe aller Eigenwerte ist ein Maß für die Gesamtvarianz in den Daten. Der Anteil der Varianz, der durch die einzelnen Achsen erklärt wird, ergibt sich aus dem Verhältnis des Eigenwertes der jeweiligen Achse zur Gesamtvarianz (LEYER & WESCHE 2007).

Die DCA versucht durch ein *Detrending by Segments* den *Arch-Effekt* und andere mathematische Artefakte der Korrespondenzanalyse zu umgehen. Diese bogenförmige, nicht interpretierbare Anordnung entsteht, wenn die Positionen der einzelnen Aufnahmen auf der 2. Achse sehr stark von ihrer Position auf der 1. Achse abhängen. Durch eine Neuskalierung der Achsen mithilfe eines Vielfachen der durchschnittlichen Standardabweichung des Artwechsels – hier der Bodenvariablen - kann eine Äquidistanz zwischen den Aufnahmewerten erzielt werden. Unterscheiden sich die Aufnahmewerte von zwei Aufnahmen um mehr als vier SD-Einheiten voneinander, so besitzen sie normalerweise keine Ähnlichkeit.

LEYER & WESCHE (2007) empfehlen trotz zahlreicher Kritiker die Verwendung von Korrespondenzanalysen und speziell der DCA als multivariate Analyse eines ökologischen Datensatzes aufgrund ihrer Robustheit und guten Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Ein Nachteil der indirekten Gradientenanalyse ist die Tatsache, dass der Teil der Variation, der in Beziehung zu den Umweltdaten steht, nicht immer ermittelt werden kann.

Die DCA wurde mithilfe des Programms R 2.8.1 berechnet. Das verwendete Skript ist im Anhang App. 1 zu finden.

#### 4.3.1.2.3 Multivariate Analyse ordinal skalierten Daten

Die klassischen multivariaten Analysemethoden fordern das Kriterium einer metrischen Datenskalisierung. In der Literatur wird besonders von PODANI (2005, 2006) propagiert, ordinal skalierte Daten würden von den konventionellen multivariaten Methoden nicht richtig behandelt werden, da diese nur für rational skalierte Variablen geeignet seien. RICOTTA & AVENA (2006) setzen dem allerdings entgegen, dass die Verwendung von Ordinaldaten keine schwerwiegenden methodischen Fehler nach sich zieht, sondern die Ergebnisse entsprechend interpretiert werden können. Vielmehr könnten explizit für Ordinaldaten entwickelte multivariate Methoden nie die intuitive Klassifikation entfalten wie die konventionellen Methoden. Der ordinal skalierten Datenmatrix liegt ein topologischer Raum zugrunde, in der die einzige verfügbare Information die intuitive Lage der Datenstruktur im Anschauungsraum betrifft, während metrische Informationen vernachlässigt werden. Die Verwendung metrischer Operationen der Verhältnisskala ist deshalb erlaubt, da lediglich die topologischen Distanzen damit quantifiziert werden, während die metrische Information an sich ignoriert wird. Methoden wie *Non-metric Multidimensional Scaling* für rangskalierte Variablen sind bereits verfügbar. Die ordinal skalierten Daten, die in dieser Arbeit in die Ordination einfließen, sind die mittels Rängen aufgenommenen Ergebnisse der Beweidungsintensität. Die Abstände zwischen den Schätzklassen der Rohdaten Tritt, Verbiss und Exkrementen wurden im Gelände als gleich groß festgelegt. Die Ränge repräsentieren die darunter liegende



Reihenfolge der Werte, sodass Differenzen zwischen den Rängen quantifizierbar sind. RICOTTA & AVENA (2006) stellen damit heraus, dass die generelle Anwendbarkeit arithmetischer Operationen auch auf Ordinaldaten ausgeweitet werden kann.

### 4.3.2 Schließende Statistik

Mithilfe der schließenden Statistik sollen Hypothesentests an verschiedenen Bodenparametern durchgeführt werden.

#### 4.3.2.1 Test auf Normalverteilung

Viele statistische Verfahren setzen normalverteilte Daten voraus. In der Arbeit wurde zum Testen auf Normalverteilung auf den *Kolmogorov-Smirnov-Test* zurückgegriffen. Dieser vergleicht Abweichungen der Lage-, Streuungs-, Schiefe- und Wölbungsparameter der empirisch gewonnenen Stichprobendaten mit einer theoretischen Verteilungsfunktion. Voraussetzung ist eine n-dimensionale unabhängige Verteilungsfunktion, die stetig und metrisch sein sollte. Sind die beiden letzten Kriterien nicht erfüllt, so verliert der Test an Trennschärfe und wird konservativer. Liegen also ordinalskalierte Merkmale vor, so wird die Nullhypothese seltener verworfen. Die Beweidungsintensität betreffend, die mithilfe dieses Testverfahrens induktiv betrachtet werden soll, kann allerdings von diskreten metrischen Erhebungsmerkmalen ausgegangen werden, da die Abstände zwischen den Schätzklassen der Ordinalskala gleich sind und einer Intervallskala entsprechen. Der Test liefert ein Signifikanzniveau  $p$ ; ist dieses sehr klein, so kann die Hypothese „Die Beweidungsintensität einer Fläche ist eine Realisation einer normalverteilten Zufallsgröße“ verworfen werden. Liegt der  $p$ -Wert unter 0,05, so ist mit 95% Wahrscheinlichkeit eine Normalverteilung zu verwerfen, liegt er unter 0,01, sogar mit 99% Sicherheit. Je größer der Stichprobenumfang, desto sicherer das Ergebnis. Für den Test der einzelnen Täler wurde ein weiterer Normalverteilungstest speziell für Stichprobengrößen unter 50 verwendet. Der *Shapiro-Wilk-Test* zeichnet sich durch gute Teststärke gegenüber vergleichbaren Tests aus. Zur besseren optischen Veranschaulichung wurden die Beweidungsintensitäten als Histogramme dargestellt und mit einer Normalverteilungskurve verglichen. Die Durchführung erfolgte mit SPSS 16.0, wobei der verwendete Test der *Kolmogorov Smirnov* Statistik entstammt, die für den Test auf Normalitätsvoraussetzung spezielle, weniger konservative Signifikanzlevels nach *Lilliefors* benutzt, da die Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  der Normalverteilung aus der Stichprobe geschätzt wurden. Der *Kolmogorov-Smirnov-Test* in der Modifikation nach *Lilliefors* ist ein unvollständig spezifizierter Anpassungstest (DULLER 2008; ECKSTEIN 2008; JANSSEN & LAATZ 2007; RUDOLPH & KULISH 2009).

#### 4.3.2.2 U-Test

Der U-Test nach *Mann* und *Whitney* dient dem Vergleich zweier unabhängiger Stichproben, die nicht der Voraussetzung einer Normalverteilung genügen müssen. Das Prinzip

basiert auf der Ersetzung der gegebenen Variablenwerte durch Rangplätze. Die Stichprobenwerte werden mit einer gemeinsamen Rangreihe versehen, das heißt, für den Test wird statt der Variablenwerte selbst die Rangordnung überprüft. Der U-Test vergleicht somit die zentrale Tendenz der Mittelwerte zweier Stichproben, also hier die beiden Beweidungsintensitäten „schwach“ und „stark“. Die Untersuchung soll zeigen, ob die Variablen der einen Stichprobe insgesamt größer sind als die der anderen, das heißt, ob es sich um eine oder um zwei Stichproben handelt. Überprüft wird die Nullhypothese „Beide Zufallsvariablen sind gleich groß“, es handelt sich also um nur eine Stichprobe. Dem gegenüber steht die Alternativhypothese: „Die Zufallsvariablen sind nicht gleich groß“; es handelt sich also um zwei Stichproben. Für den Test muss ein Signifikanzniveau festgelegt werden, das den Schwellenwert der Prüfgröße reglementiert. Die im Test berechnete Prüfgröße U kann mit den kritischen Werten einer U-Tabelle verglichen werden. Im Gegensatz zu den meisten anderen Testverfahren muss hier der berechnete U-Wert kleiner oder gleich dem kritischen U-Wert sein, wenn Signifikanz auf der betreffenden Stufe vorliegen soll (ZÖFEL 1988). Für den Test der jeweiligen Alkanmuster und der Beweidungsintensität wurde ein Signifikanzniveau von 5 % angenommen. Die Durchführung des U-Tests erfolgte mit SPSS 16.0.

#### 4.3.2.3 H-Test

Der H-Test von *Kruskal* und *Wallis* ist eine Generalisation des U-Tests. Er überprüft, ob die k Stichproben derselben Grundgesamtheit angehören. Auch hier muss keine Normalverteilung vorliegen. Welche der Stichproben sich im Einzelnen signifikant voneinander unterscheiden, kann nicht im H-Test ermittelt werden (ZÖFEL 1988). Überprüft wird die Nullhypothese „Die k Stichproben entstammen derselben Grundgesamtheit“. Demnach lautet die Alternativhypothese „Es handelt sich um mindestens zwei Stichproben“, das heißt mindestens zwei Verteilungsfunktionen sind ungleich. Die Prüfgröße H ist  $\chi^2$ -verteilt mit  $df = k-1$  Freiheitsgraden. Die Nullhypothese wird demnach abgelehnt, wenn die Prüfgröße H größer als der Tabellenwert unter dem bestimmten Signifikanzniveau ist, d.h. sobald  $H > \chi^2_{k-1; \alpha}$  liegt Signifikanz vor. (SACHS & HEDDERICH 2009). Auch hier wurde ein Signifikanzniveau von 5 % postuliert. Die Durchführung des H-Tests erfolgte mit SPSS 16.0.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Beweidungsintensität

Eine lineare Zunahme der Beweidungsintensität mit fortschreitender Vegetationsperiode kann anhand des über die Weidesaison 2008 aufgenommenen Datensatzes ( $n = 125$  Mischproben) festgestellt werden. Zur Berechnung wurde auf das Julianische Datum zurückgegriffen, dessen Tageszählung die laufenden Tage des Jahres seit Jahresbeginn durchzählt. Für den 1. Januar ist  $LT = 0$ , für den 31. Dezember ist  $LT = 365$ , da 2008 ein Schaltjahr war. Eine Korrelation des Aufnahmedatums mit den erfassten Beweidungszeigern Verbiss, Tritt und Exkremente zeigt einen Anstieg der Beweidungsintensität mit fortschreitender Weidesaison. Der Korrelationskoeffizient hierzu liegt bei 0,223, 0,444 und 0,513. Damit ergibt sich für die Beweidungsintensität ein Korrelationskoeffizient von 0,423, für Tritt und Verbiss entsprechend 0,363 (Tab. 5). Die Korrelationstests mit dem Datum ergeben signifikante Zusammenhänge ( $p = 0,000 < 0,05$ ) für Tritt, Beweidungsintensität und Tritt & Verbiss. Damit tendiert der Beobachter dazu, die durchschnittliche Beweidungsintensität der Flächen zu Beginn der Saison oftmals leicht zu unterschätzen, da die Schäden durch Tritt und Verbiss deutlich geringer sind, während sie gegen Ende vergleichsweise eher überschätzt wird.

Tab. 5: Korrelation der Beweidungsintensität mit dem Julianischen Datum

	Verbiss	Tritt	Exkremente	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>r</b>	0,223	0,444	0,513	0,423	0,363
<b>p</b>		0,000		0,000	0,000

Die Histogramme zeigen die Beweidungsintensität im Vergleich zur Normalverteilung (Abb. 21). Ihre verschiedenen Stichprobenumfänge sind Tab. 6 zu entnehmen. Die regionalen Begriffe Madian und Chong Pamir wurden interpoliert; so beinhaltet das Diagramm Madian ein Seitental des großen Aksuflusses und das Diagramm Chong Pamir alle auf der Tour „Chong Pamir“ aufgenommenen Flächen, die sich zwangsweise nicht im Großen Pamir befinden, aber dennoch alle südlich des Neizatash Passes liegen.

Tab. 6: Stichprobenumfänge der einzelnen Täler und Lagemaße der Beweidungsintensität

	alle Flächen	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez	Madian	Chong Pamir
<b>n</b>	76	23	14	17	5	17
<b>Mittelwert</b>	8,46	8,39	9,79	7,65	7	8,71
<b>Std.-Abw.</b>	2,49	2,17	2,83	1,87	2,35	2,87
<b>Median</b>	8,00	8,00	8,50	7,00	8,00	8,00

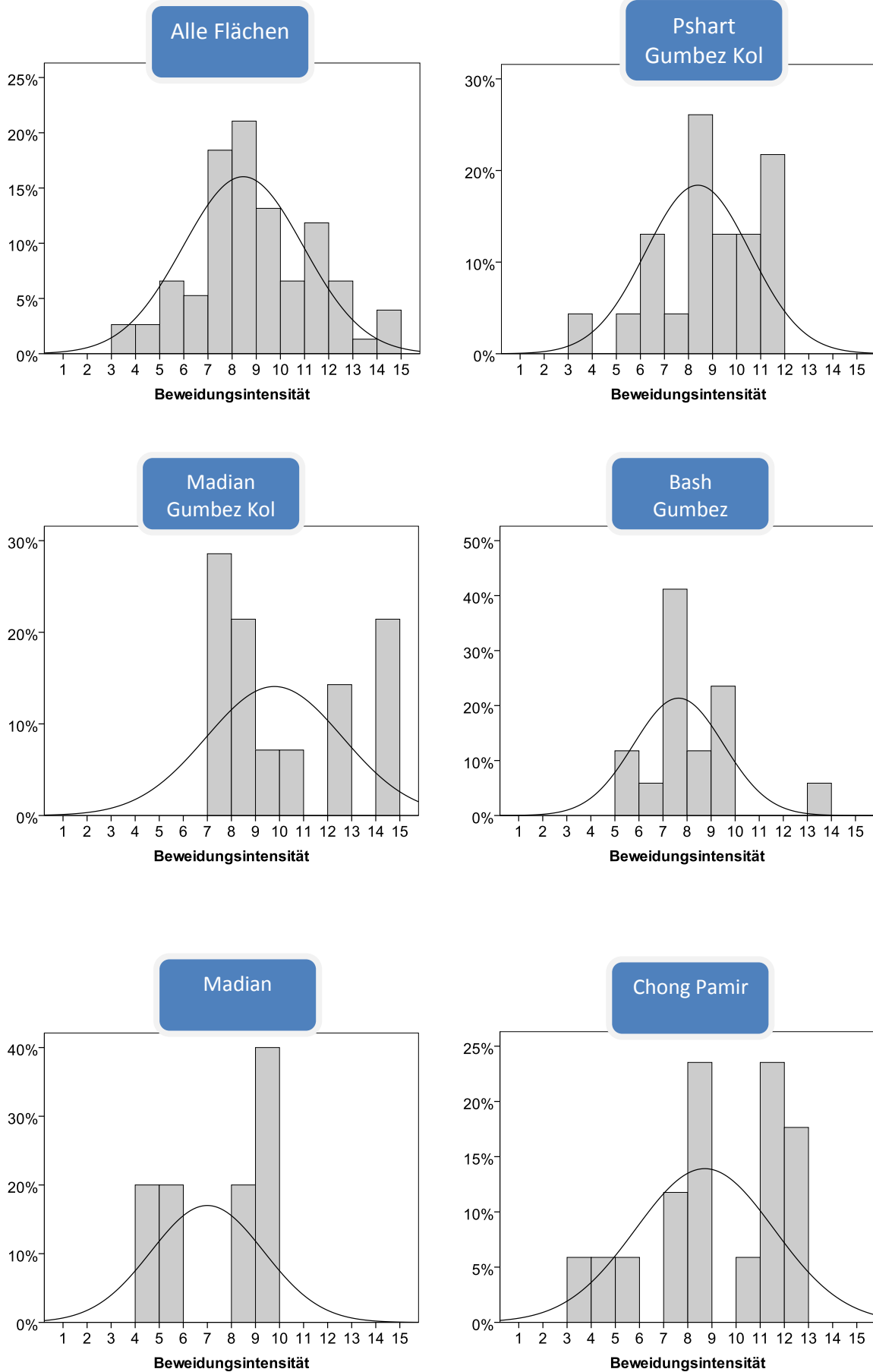


Abb. 21: Histogramme der Beweidungsintensitäten

Tab. 7: Normalverteilungstest der Beweidungsintensität

	alle Flächen	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez	Madian	Chong Pamir
<b>n</b>	76	23	14	17	5	17
<b>p(KS-Test)</b>	0,001	0,093	0,034	0,024	0,200	0,069
<b>p(Shapiro)</b>	0,080	0,071	0,011	0,015	0,154	0,074

Die Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung (Tab. 7) zeigen die p-Werte der Reihen p(KS-Test) und p(Shapiro). Liegen die Werte unter dem Signifikanzniveau von 0,05, so stammt die beobachtete Verteilung der Stichprobe mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht aus einer normalverteilten Grundgesamtheit. Eine Normalverteilung kann also für das Gesamtgebiet „alle Flächen“ nicht bestätigt werden. Der Shapiro-Test würde für die kleineren Stichprobenumfänge (< 50) der Täler eine Normalverteilung für das Pshart Gumbez Kol und das Madian Tal annehmen. Allerdings wird die zu prüfende Hypothese umso eher bestätigt, je kleiner der Stichprobenumfang ist. Die Histogramme zeigen rein visuell große Abweichungen von der Normalverteilungskurve.

Die statistische Betrachtung der Beweidungsintensität liefert einen ersten Eindruck über diesen, aus im Gelände geschätzten Größen zusammengesetzten, Parameter, der in die späteren Korrelationstests sowie die Ordinationen einfließt. Darüber hinaus zeigt sich aus den Diagrammen (Abb. 21), dass die Beweidungsintensität vor allem in den mittleren Klassen ihr Maximum hat.

## 5.2 Physikalische Eigenschaften

Zu Beginn jeder Bodenbeschreibung stehen die jeweils typischen physikalischen Eigenschaften eines Bodens. Hierbei sind Farbe, Körnung und Skelettgehalt am augenscheinlichsten. In enger Verbindung dazu stehen Speicherfähigkeit, Wasser-, Luft- und Temperaturhaushalt, die anschließend abgeschätzt werden, sowie Bewegungs- und Transportvorgänge, deren Erfassung sich allerdings eher aufwendig gestaltet. Die Bodenstabilität bzw. mechanische Festigkeit als standortspezifische Tragfähigkeit ist primär von Bodenentwicklung sowie Nutzung, Klima und Hydrologie abhängig (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

### 5.2.1 Bodenfarbe

Die häufigste Farbe des oberen Horizontes bis -15 cm ist 2.5Y 5/3 „light olive brown“, gefolgt von 2.5Y 4/3 „olive brown“. Im tieferen Horizont von -15 bis -30 cm nimmt die Farbintensität meist eine Stufe ab. Die häufigste Farbe ist hier 2.5Y 5/4 „light olive brown“. Daneben wurden viele Profile wiederum mit 2.5Y 5/3 „light olive brown“ angesprochen. Die Chernozeme der Quellrasen besitzen dunklere olivfarbene Brauntöne, was auf höhere Gehalte an organischer Substanz zurückzuführen ist. Sowohl der

Wassergehalt als auch der Humusgehalt modifizieren die Bodenfarbe. Je dunkler die Farbe, umso begünstigter ist der Auftauprozess im Sommer, was zur Folge hat, dass die Böden somit schneller wassergesättigt sind.

### 5.2.2 Wurzelhorizont

Die Beschreibung der Durchwurzelung beinhaltet eine Bewertung der Durchwurzelungstiefe und der Durchwurzelungsintensität nach (Tab. 2). Auf etwa 20 % der Flächen konnte im Gelände aufgrund fehlender Deckung kein erkennbarer Wurzelhorizont ausgewiesen werden. Diese Flächen sind nicht in die Tabelle einbezogen. Die Ergebnisse zeigen eine mittlere Tiefe des Durchwurzelungshorizontes von 17 cm (Tab. 8). Die Wahl der Entnahmehorizonte mit -15 und -30 cm ist somit positiv zu bewerten. Im sog. a-Horizont konnte der durchwurzelte Oberboden erfasst und mithilfe der folgenden Analysen bewertet werden. Hinsichtlich der Intensität überwiegen Feinwurzeln (Tab. 9).

Tab. 8: Durchwurzelungstiefe

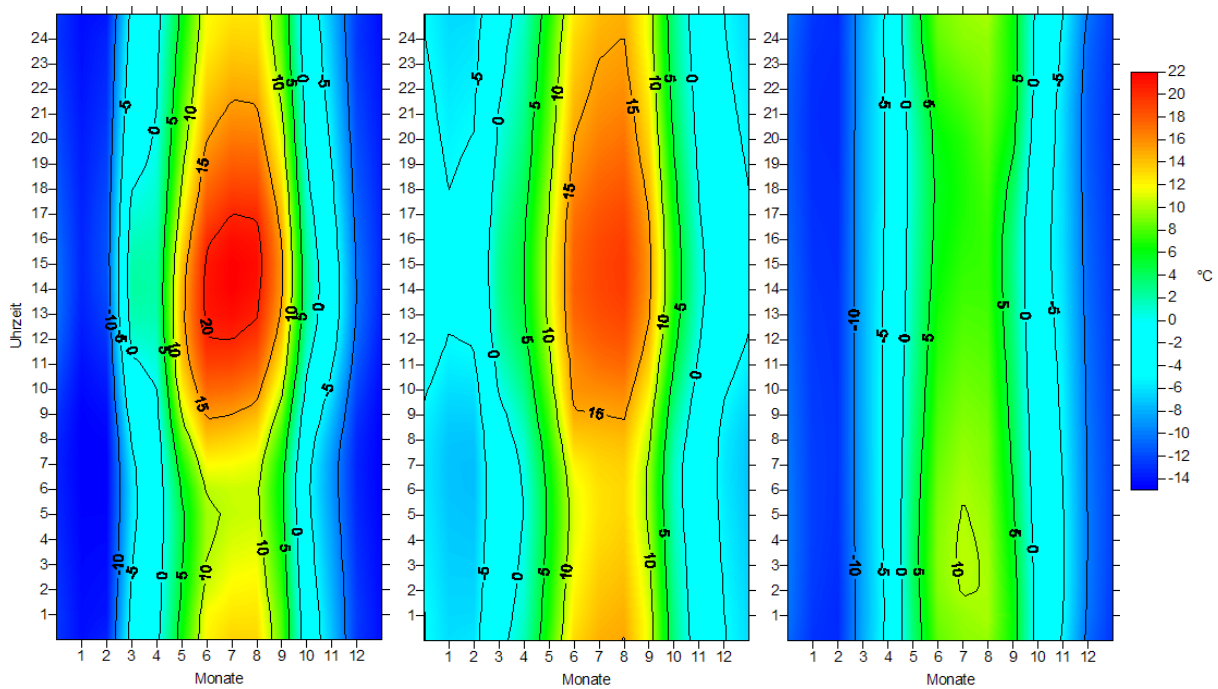
Wurzelhorizontgrenze	n=73
Minimum	5,00
1.Quartil	14,00
Median	17,00
Mittelwert	16,96
3.Quartil	20,00
Maximum	30,00
St-Abw.	5,05
Varianz	25,53

Tab. 9: Durchwurzelungsintensität

n=72	Feinwurzel- intensität -15cm	Grobwurzel- intensität -15cm	Feinwurzel- intensität -30cm	Grobwurzel- intensität -30cm
Minimum	0	0	0	0
1.Quartil	2	0	2	0
Median	3	0	2	0
Mittelwert	3	1	2	1
3.Quartil	4	2	3	1
Maximum	6	4	5	3

### 5.2.3 Bodenwärmehaushalt

Die Thermoisoplethendiagramme (Abb. 22) zeigen die Temperatur in -15 cm Bodentiefe. Die vertikale Orientierung der Isoplethen verdeutlicht das kontinentale Klima der gemäßigten Zone mit hohen jährlichen Temperaturunterschieden verglichen mit den geringer ausfallenden täglichen Temperaturschwankungen.



Station/ Hobo	Tamdy	Madian	Pshart Gumbez Kol
Höhenlage	4189 m ü. NN	3545 m ü. NN	4220 m ü. NN
UTM Koordinaten	349939 E 4159439 N	400039 E 4220634 N	396397 E 4233635 N

Abb. 22: Thermoisoplethendiagramme für die Stationen Tamdy Tal, Madian Gumbez Kol und Pshart Gumbez Kol

Die Messungen der beiden ersten Diagramme erfolgten im Talgrund jeweils am Rande von Quellrasen, während die Klimastation im Pshart Gumbez Kol am Osthang in einer mit Polstern und Gräsern durchsetzten Alpenen Matte steht. Die aus den Messungen berechneten absoluten minimalen und maximalen Stundenwerte betragen im Tamdy Tal  $-19,24$  und  $31,37$  °C, im Madian Tal  $-10,53$  bzw.  $42,73$  °C und im Pshart Gumbez Kol Tal  $-16,83$  und  $14,10$  °C. Damit ergibt sich die höchste Temperaturamplitude von  $53,26$  K für das Madian Tal. Im Vergleich hierzu liegt die Temperaturamplitude an der Klimastation im Pshart Gumbez Kol Tal bei nur  $30,93$  K. Wichtig für das Wurzelwachstum ist die Dauer der Vegetationsperiode, das heißt die Zeitspanne, in der die Temperaturen über  $5$  °C liegen. Diese umfasst im Tamdy und im Madian Tal fünf Monate von Ende April bis Mitte September, indessen ein Wachstum an der Klimastation im Pshart Gumbez Kol Tal nur während vier Monaten ab Mitte Mai bis Anfang September möglich ist. Die Hauptwachstumszeit, in deren Verlauf die mittleren Temperaturen über  $10$  °C liegen, umfasst im Tamdy Tal und Madian Tal etwa jeweils vier Monate, an der Klimastation im Pshart Tal einen Monat. Die klimatische Vegetationszeit ist neben den mittleren Temperaturen auch durch die Humidität definiert. Diese konnte aus logistischen Gründen nicht gemessen werden; die einführenden Erläuterungen zum Untersuchungsgebiet zeigen aber, dass es sich um

aride Sommermonate handelt, woran die lokale Vegetation angepasst ist. Die Humidität sollte daher für das Pflanzenwachstum keine größere Rolle spielen. Zusammenfassend ist also nicht unbedingt die absolute Höhenlage, sondern vielmehr eine Komposition aus Höhenlage, Exposition und absoluter Lage im Relief für das Mikroklima und somit für das Pflanzenwachstum bestimmend. Die Ergebnisse der ausgewerteten Messwerte der Bodentemperaturfühler zeigen jeweils ein Spiegelbild der individuellen Lage in der Gebirgsmorphologie.

#### 5.2.4 Dichte

HINTERMAIER-ERHARD & ZECH (1997) bewerten die Lagerungsdichte im Intervall 1,4-1,6 g cm<sup>-3</sup> als gering, im Intervall von 1,6-1,8 g cm<sup>-3</sup> als mittel. Bezüglich der Abschätzung der Rohdichte muss beachtet werden, dass sie stets über dem Wert der Lagerungsdichte liegt, da sie sich nicht auf die bei 105 °C getrocknete Bodenmasse bezieht, sondern auch den Wassergehalt einschließt. Aufgrund dessen liefern die Ergebnisse geringe bis mittlere Dichten.

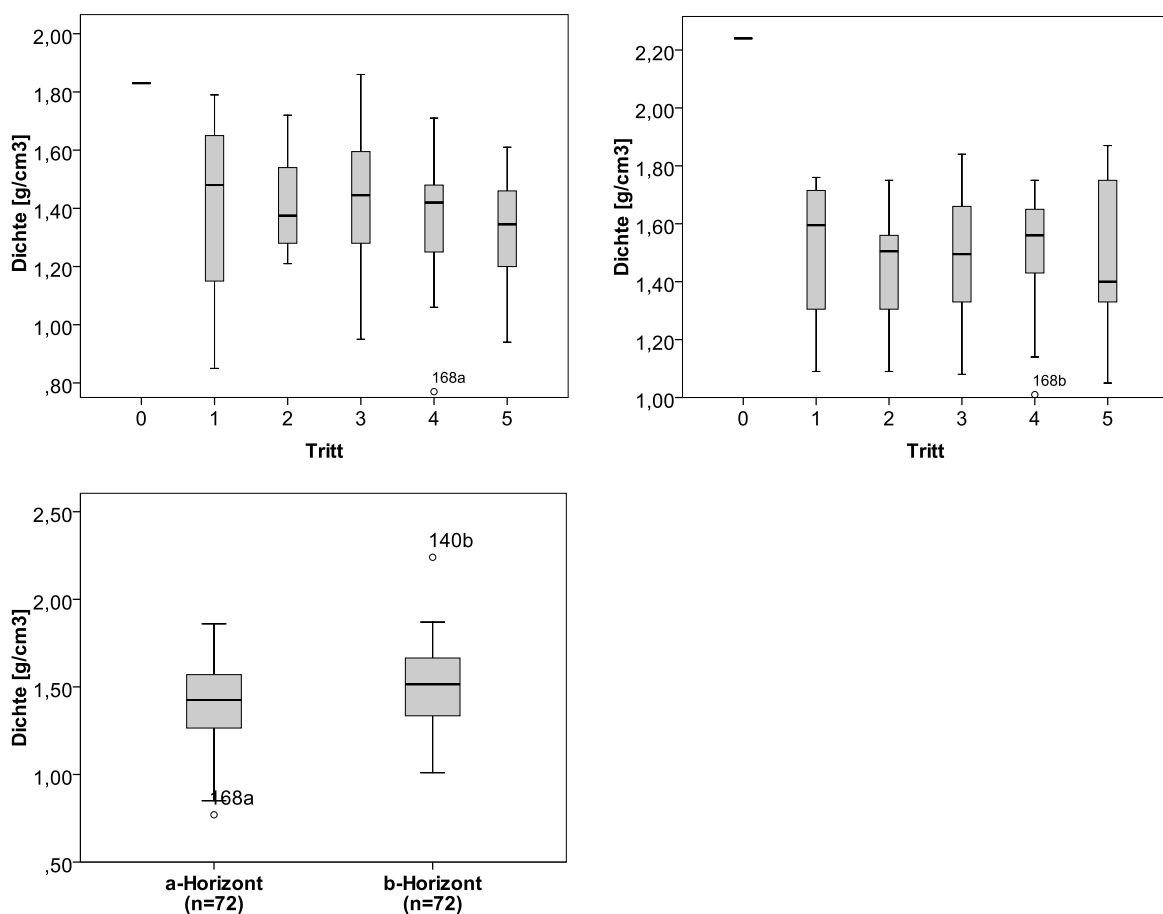


Abb. 23: Lagerungsdichte mittels Stechzylindern (n = 72)



Tab. 10: Trittintensität für n = 72

Tritt	n (a-Horizont)	n (b-Horizont)
0	1	1
1	4	4
2	8	8
3	32	32
4	21	21
5	6	6

Die Ergebnisse der Dichteuntersuchung (Abb. 23, App. 2) mittels Stechzylindern zeigen kaum Unterschiede in den beiden beprobten Tiefen. Die Korrelationen (Tab. 11 und Tab. 12) ergeben keine signifikanten Zusammenhänge mit der Beweidungsintensität.

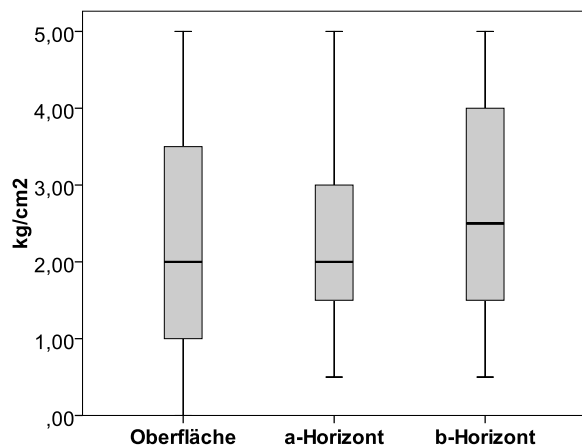


Abb. 24: Penetrometermessungen

Auf 65 Flächen wurden sowohl eine Dichtebestimmung mittels Stechzylindern als auch Penetrometermessungen durchgeführt. Die Korrelationen der Dichtebestimmung mittels Penetrometer mit den Beweidungsparametern liefern deutlich bessere Werte als die Stechzylinder. Zwar handelt es sich hierbei auch nur um geringe Korrelationen, allerdings sind diese auf  $\alpha = 0,05$  signifikant. Die Stechzylinderproben liefern im Oberboden einen unerklärlichen negativen Zusammenhang (Tab. 11).

Tab. 11: Korrelationskoeffizienten der Dichtebestimmung

n=65	Verbiss	Tritt	Exkremente	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
Penetrometer Oberfläche	0,427	0,398	0,239	0,413	0,453
Penetrometer a	0,270	0,197	0,115	0,231	0,270
Penetrometer b	0,308	0,253	0,159	0,284	0,316
Lagerungsdichte a	-0,037	-0,064	-0,105	-0,062	-0,045
Lagerungsdichte b	0,037	0,091	0,111	0,095	0,067

Tab. 12: p-Werte des Korrelationstests der Dichtebestimmung

n=65	Tritt	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>Penetrometer Oberfläche</b>	0,001	0,001	0,000
<b>Penetrometer a</b>	0,115	0,064	0,030
<b>Penetrometer b</b>	0,042	0,022	0,010
<b>Lagerungsdichte a</b>	0,613	0,623	0,721
<b>Lagerungsdichte b</b>	0,471	0,449	0,596

Der Vergleich der beiden Methoden zur Dichtebestimmung zeigt anhand der Korrelationskoeffizienten für den a-Horizont (-0,067) und den b-Horizont (0,173) keine Korrelation. Auch ein Korrelationstest bestätigt mit  $p = 0,594$  für den a-Horizont und  $p = 0,167$  für den b-Horizont keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den Penetrometermessungen und der mittels Stechzylinder bestimmten Rohdichte (Tab. 12).

### 5.2.5 Wassergehalt

Die gestapelten Balkendiagramme zeigen die Summe beider durch Gewichtsverlust bestimmter Wassergehalte bei Grenztemperaturen von 40 °C bzw. 105 °C. Da eine Trocknung im Ofen bei 105 °C erst in Deutschland möglich war, ist es zwar wahrscheinlich, aber dennoch nicht sicher, dass der Wassergehalt der in PE-Beuteln verpackten Proben nicht beim Transport gestört wurde. Der Mittelwert des Wasserverlustes bei 105 °C liegt bei 1,53 %.

Da der Appendix App. 3 alle erhobenen Daten zeigt und nur dazu dient, die Verhältnisse der beiden Wassergehalte aufzuzeigen, liefert Abb. 25 eine Detailbetrachtung der Mischproben und gibt somit einen genaueren Aufschluss über die regionalen Hintergründe. Abgesehen von Probe 184 besitzen die Flächen in Bash Gumbez die geringsten Wassergehalte. Im Pshart Gumbez Kol sind die größten Differenzen zwischen den einzelnen Flächen zu finden. Ersichtlich sind aber nicht nur regionale Unterschiede, sondern auch Differenzen innerhalb der Täler. Eine Abnahme des Wassergehaltes ist nicht nur in der Profildifferenzierung ersichtlich, sondern auch abhängig vom vorliegenden Bodentyp bzw. der Bodenart und damit dem Speichervolumen. Der Anhang App. 6 zeigt, dass die Korngrößenverteilung der in Abb. 25 dargestellten Flächen aus Bash Gumbez nicht vom Durchschnitt „Sl – lehmige Sande“ abweicht. Die niedrigeren Wassergehalte können somit nicht mit der Textur begründet werden.

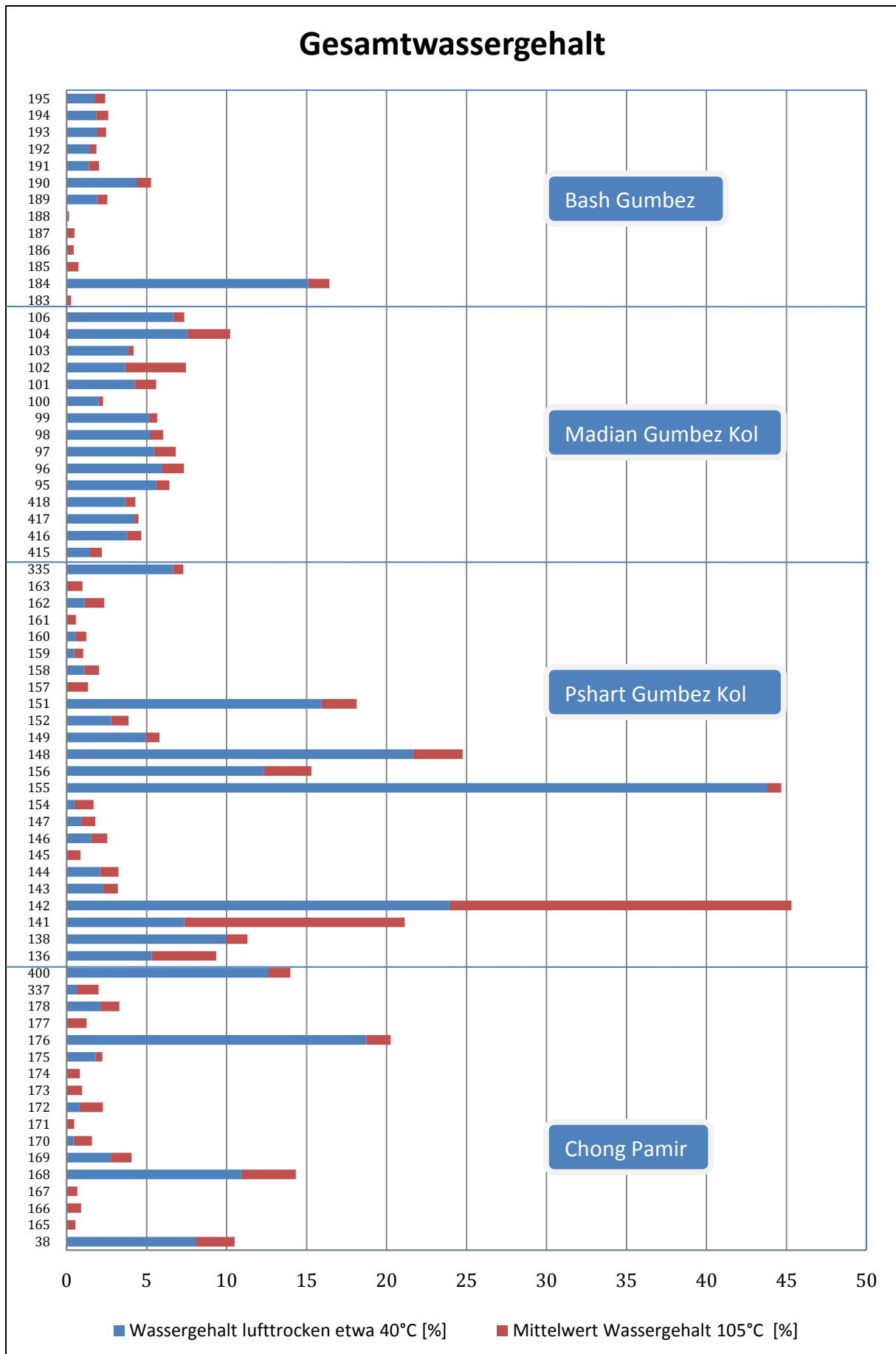
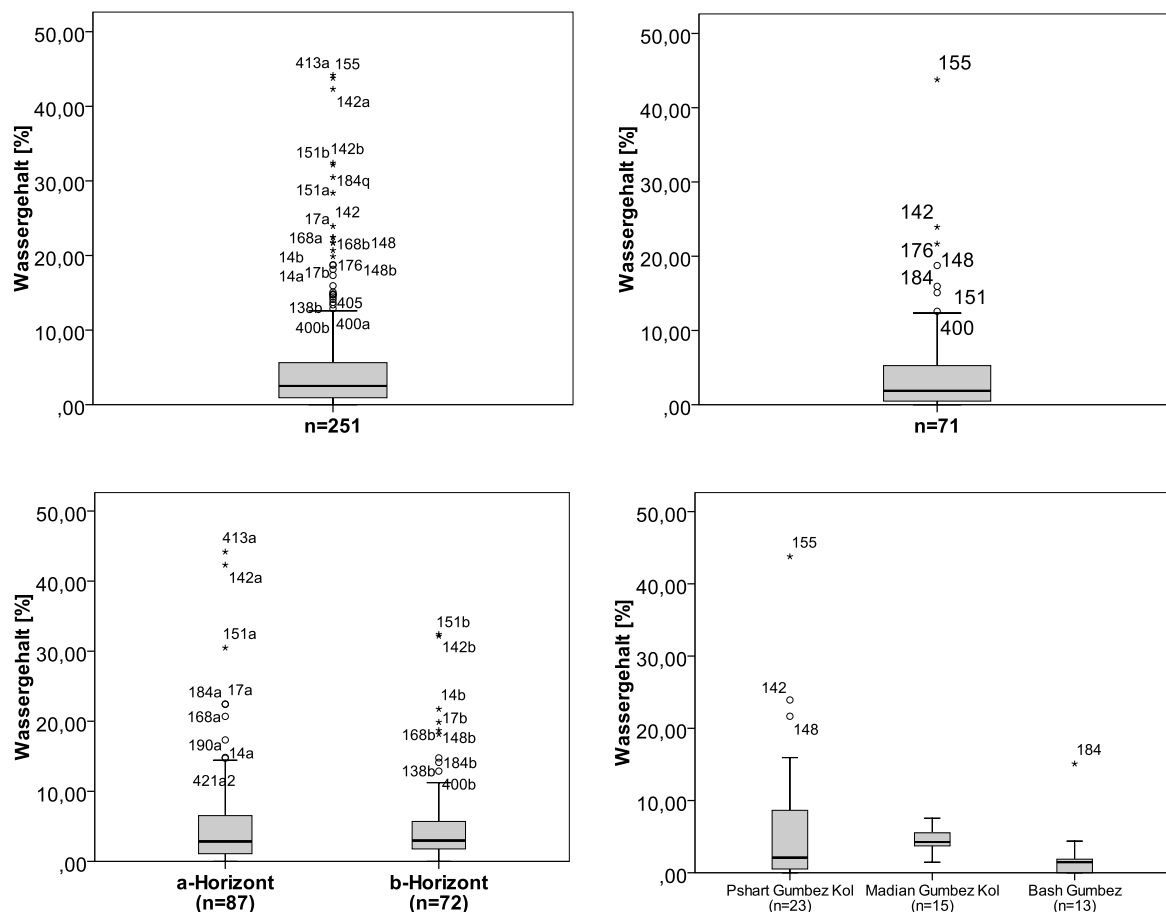


Abb. 25: Nach Tälern getrennter Gesamtwassergehalt

Die folgenden Ergebnisse zeigen alle nur noch den Wassergehalt, der durch den gravimetrischen Verlust der lufttrockenen Proben bei einer Temperatur von etwa 40 °C bestimmt ist.

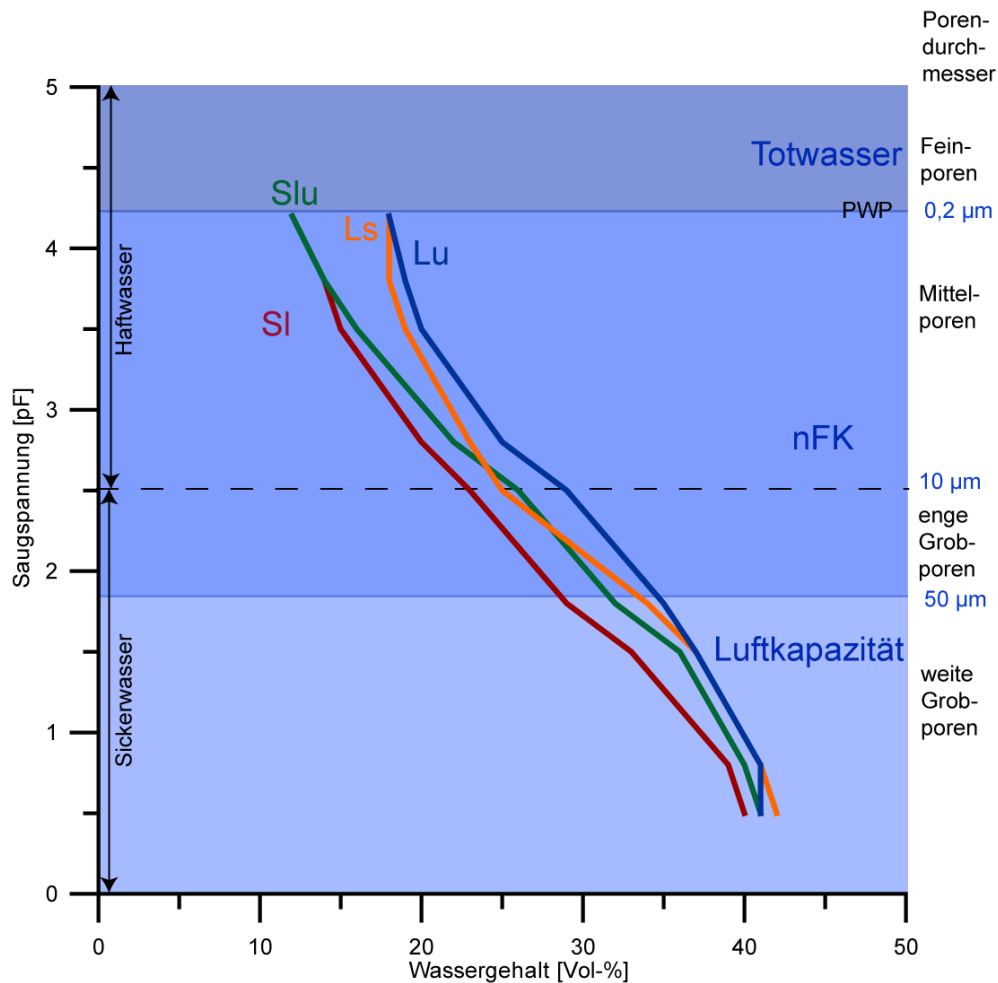


**Abb. 26: Wassergehalte bei 40 °C**

Der Tälervergleich der Wassergehalte bei 40 °C bestätigt nochmals die geringsten Gehalte in Bash Gumbez (Abb. 26, App. 4). Die Boxplots für die Horizonte zeigen leicht erniedrigte Werte für den b-Horizont.

Das Gesamtporenvolumen kann bei einer näherungsweise Annahme von 1,3-1,4 g cm<sup>-3</sup> als Lagerungsdichte und einer Dichte der Bodenmatrix von 2,65 g cm<sup>-3</sup> mit 47 % bis 51 % als hoch eingestuft werden. Die Lagerungsdichte wurde hierbei aus der mittleren Rohdichte und dem Wassergehalt geschätzt.

Aufgrund der fehlenden Möglichkeit und des Transporthindernisses, aus ungestörten Stechzylinderproben unter Labormethoden eine Tensions-Wassergehaltskurve zu erstellen, wurden für die Beurteilung der Wasserbindung Näherungswerte aus SPONAGEL ET AL. (2005) unter Berücksichtigung der bestimmten Körnung herangezogen.



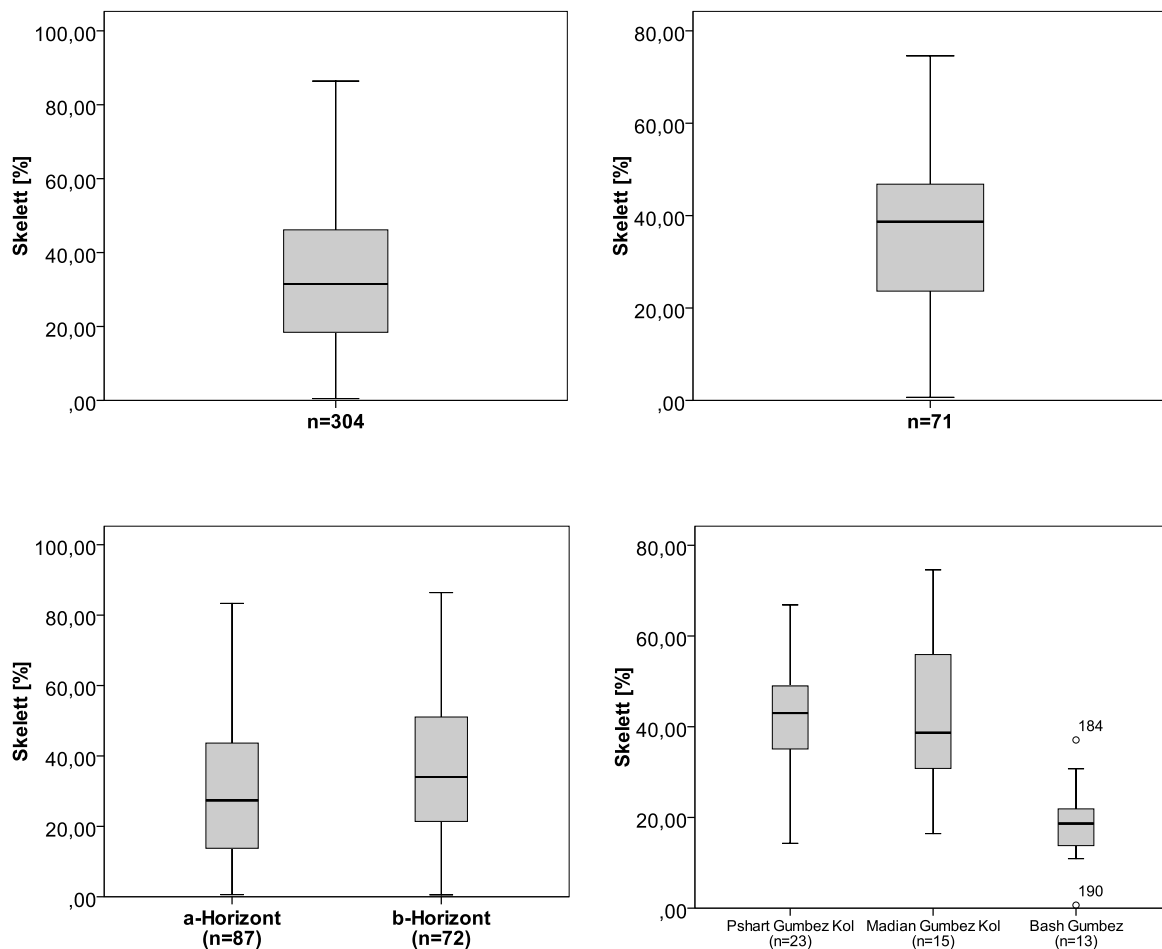
**Abb. 27: Wasserspannungskurven für die 4 dominierenden Bodenarten (nach SPONAGEL ET AL. 2005)**

Die Wasserspannungskurve (Abb. 27) charakterisiert als Summenkurve die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt. Die pF-Werte der Ordinate entsprechen den logarithmierten Werten der Wasserspannung. Die Verlaufskurven der verschiedenen Bodenarten zeigen, dass sich die Körnung auf die Verteilung und die Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers auswirkt. Die Feldkapazität entspricht dem Volumenanteil der Poren  $\leq 0,5 \mu\text{m}$  Äquivalentdurchmesser. Sie umfasst die maximal gegen die Schwerkraft gehaltene Wassermenge, die in den Feinporen, den Mittelporen und den engen Grobporen gespeichert werden kann. In den Feinporen ist das Wasser so fest gebunden, dass es für die Pflanzen nicht verfügbar ist. Der permanente Welkepunkt bei pF 4,2 gibt dabei die Obergrenze des Totwasseranteiles an, der nicht mehr zur nutzbaren Feldkapazität zählt. Sowohl die nutzbare Feldkapazität als auch die vorliegenden Totwasseranteile sind nach SPONAGEL ET AL. (2005) als mittel einzustufen. In sandigeren Böden mit vielen Grob- und wenig Feinporen ist der Großteil des nicht sofort versickernden Wassers pflanzenverfügbar. Grobporen können das Wasser nicht speichern, sondern werden schnell entwässert. Wie in Abb. 27 ersichtlich, steigt die Bindungsstärke bei gleichem Wassergehalt mit zunehmendem Tongehalt. Die unterschiedliche Bindungsstärke in Abhängigkeit von der Bodenart ist auf die Zunahme

der adsorbierenden Oberfläche und die Abnahme des Porendurchmessers zurückzuführen. Während das Bodenwasser in den Grobporen frei beweglich ist, dominieren in den Mittel- und Feinporen Bindungskräfte zwischen den Wassermolekülen und der Bodenmatrix (Adhäsion) sowie den Wassermolekülen selbst (Kohäsion) (SPONAGEL ET AL. 2005).

Die Luftkapazität umfasst den Porenraum, der bei Feldkapazität ( $pF < 1,8$ ) mit Luft erfüllt ist. Sie stellt ein Maß für die Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln dar und liegt nach SPONAGEL ET AL. (2005) für die vorgestellten Korngrößen im mittleren Bereich.

### 5.2.6 Skelettgehalt



**Abb. 28: Skelettgehalt**

Ein Vergleich der ermittelten Werte mit Tab. 13 resultiert in einer Beurteilung des durchschnittlichen Skelettgehaltes mit mittleren Werten. Allerdings treten im Untersuchungsgebiet auch sehr stark skelettierte Böden auf. Die Ergebnisse decken die komplette Messskala in Tab. 13 ab. Mit der Profiltiefe in Richtung Ausgangsgestein nimmt die Verwitterung ab und der Skelettanteil zu. Ersichtlich ist, dass der Skelettgehalt in Bash Gumbez deutlich niedriger ist, als in den beiden anderen

Beispieltälern (Abb. 28, App. 5). Die Grobbodenfraktionen sind als kantig einzustufen und je nach Ausgangsgestein eher leicht abgerundet (Bash Gumbez) bis plattig (Schiefer im Pshart Gumbez Kol).

**Tab. 13: Einteilung der Bodenskelettanteile nach DIN 4220**

Quelle: verändert nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 157

Masse-%	
< 2	sehr schwach
2 - 15	schwach
15 - 45	mittel
45 - 60	stark
60 - 85	sehr stark
> 85	Skelettboden

### 5.2.7 Korngrößen

Eine Möglichkeit zur Darstellung der Körnung sind Dreiecksdiagramme (Abb. 29). Die dominierenden Bodenarten im Untersuchungsgebiet sind lehmige Sande, schluffig lehmige Sande, sandige Lehme und schluffige Lehme. Darüber hinaus ergeben die Analysen sandige Sande, tonige Sande, schluffige Sande, sandige Schluffe, schluffige Schluffe, tonige Schluffe, sandig lehmige Schluffe, schluffige Tone, tonige Lehme und sandig tonige Lehme.

Große Unterschiede zwischen den Horizonten manifestieren sich nicht in der Korngröße. Die zugehörigen, zwischen den Horizonten differenzierenden, Diagramme sind im Anhang App. 7 zu finden.

Die Korrelation zwischen dem prozentualen Sandgehalt ( $n = 125$  Mischproben) und der Beweidungsintensität liegt bei  $-0,301$ , die mit Tritt & Verbiss bei  $-0,309$  (Tab. 14). Die p-Werte von  $0,001$  (Beweidungsintensität) und  $0,000$  (Tritt & Verbiss) sind stark signifikant und weisen damit auf eine negative Korrelation hin.

**Tab. 14: Korrelation der Bodentextur mit der Beweidung**

n=125	Tritt	Verbiss	Exkrement	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
r	-0,263	-0,294	-0,272	-0,301	-0,309
p				0,001	0,000

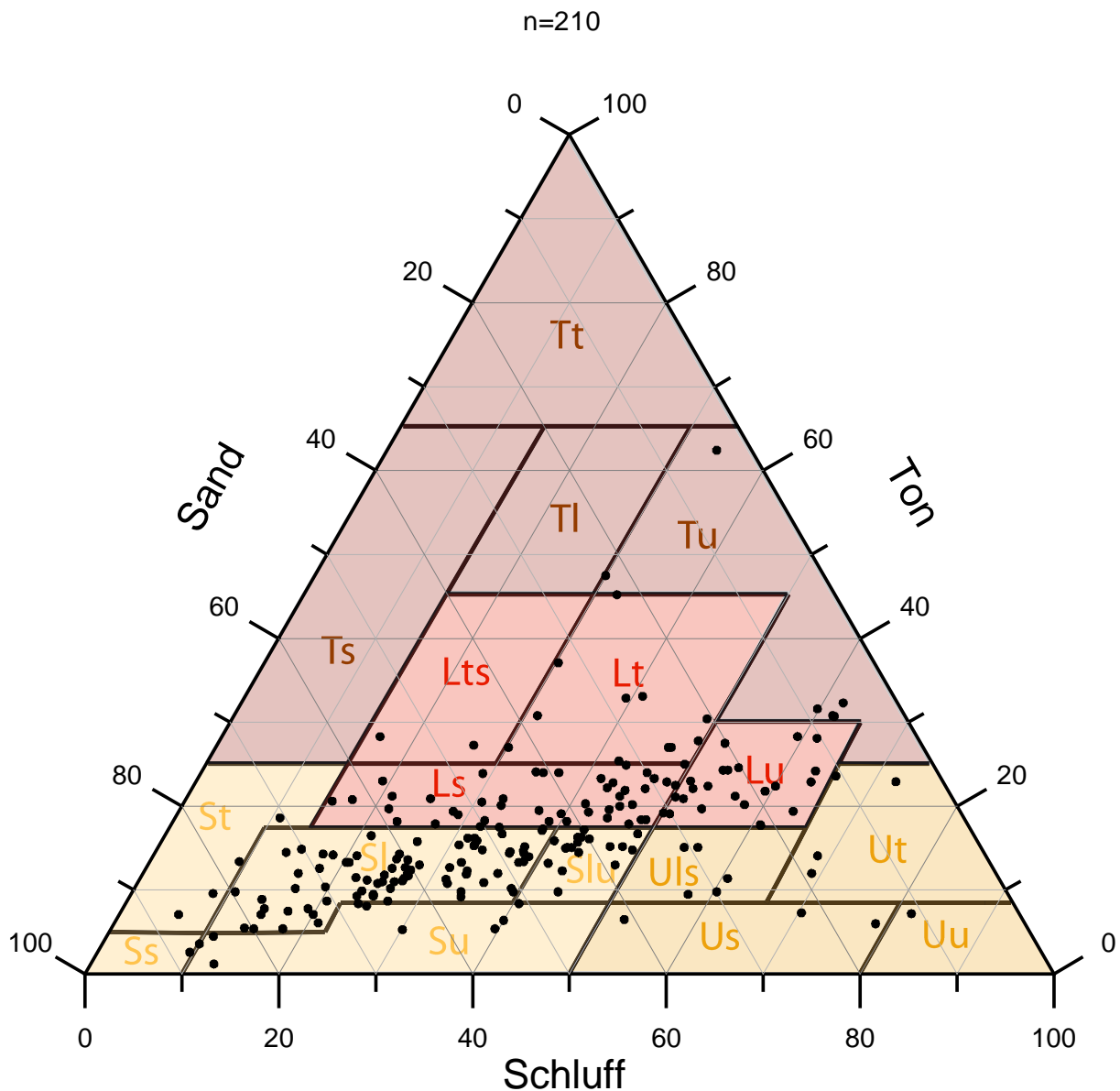


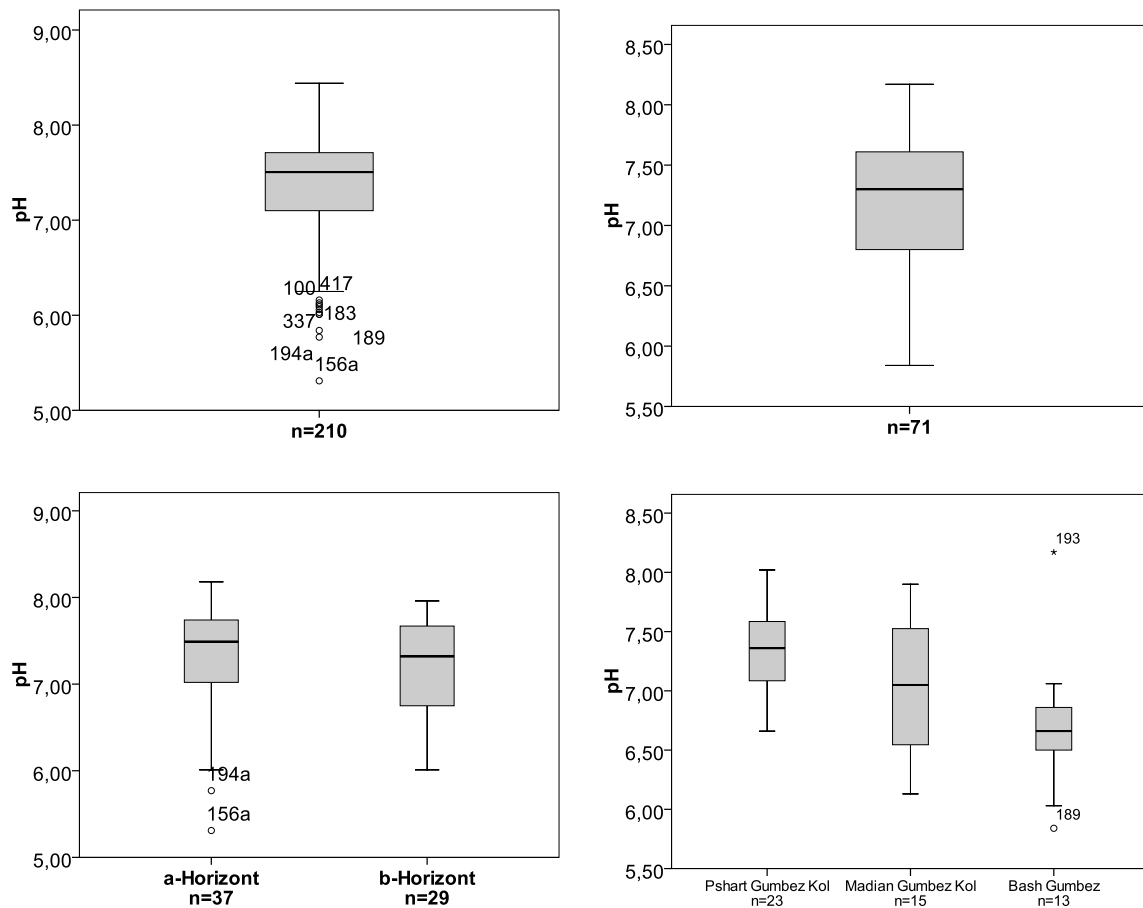
Abb. 29: Bodentextur

### 5.3 Chemische Eigenschaften

#### 5.3.1 Bodenacidität

Die Laboranalysen aller 210 Proben zeigen einen mittleren pH-Wert von 7,37. Die Werte innerhalb der Box für alle 210 Proben liegen im schwach alkalischen Milieu (Tab. 15), welches im oberen Distrikt des Optimalbereichs, der von 5 bis 7,5 angesetzt wird, rangiert (GISI ET AL. 1997). Die Ausreißer befinden sich alle im sauren Bereich (Abb. 30).





**Abb. 30: Bodenacidität**

Die pH-Werte der Oberböden zeigen einen minimal höheren Wert als die der Unterböden (Abb. 30, App. 8). Dieses, der Bodenbildung widersprüchliche Phänomen, kann mit der differierenden Stichprobenanzahl der beiden Horizonte und Meßungenauigkeiten begründet werden.

**Tab. 15: Einstufung der Bodenreaktion**

Quelle: nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 129

pH-Wert	Bezeichnung
< 3,0	extrem sauer
3,0 - 3,9	sehr stark sauer
4,0 - 4,9	stark sauer
5,0 – 5,9	mäßig sauer
6,0 – 6,9	schwach sauer
7,0	neutral
7,1 – 8,0	schwach alkalisch
8,1 – 9,0	mäßig alkalisch
9,1 – 10,0	stark alkalisch
10,1 – 11,0	sehr stark alkalisch
> 11,0	extrem alkalisch

Wie die Boxplots zeigen, liegen die pH-Werte der Täler Pshart Gumbez Kol und Madian Gumbez Kol höher als im Beispieltal Bash Gumbez (Abb. 30). Die Fläche 193 stellt in Bash Gumbez einen Extremwert im mäßig alkalischen Bereich dar. Die Leitfähigkeit dieser Probe ist ebenfalls erhöht. Die größte Streuung innerhalb der Täler liegt in Madian Gumbez Kol vor.

**Tab. 16: Korrelation des pH-Wertes mit der Beweidung**

n=125	Tritt	Verbiss	Exkrement	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>r</b>	0,002	0,097	-0,110	0,003	0,047
<b>p</b>				0,976	0,606

Zwischen den Variablen „pH-Wert“ und „Beweidungsintensität“ besteht kein linearer Zusammenhang (Tab. 16). Die ermittelten Signifikanzniveaus  $p = 0,976$  (Beweidungsintensität) und  $p = 0,606$  (Tritt & Verbiss) liegen über der bei statistischen Tests üblichen Höhe von 0,05. Insofern wird die  $H_0$ -Hypothese, „es besteht kein Zusammenhang“, beibehalten.

### 5.3.2 Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit der 210 Proben liefert einen Mittelwert von  $572 \mu\text{S cm}^{-1}$ , was einem mittleren Versalzungsgrad nach HINTERMAIER-ERHARD & ZECH (1997) entspricht (Tab. 17). Ausreißer und Extremwerte treten nur im oberen Wertebereich auf (Abb. 31). 75 % der Werte liegen unter  $483 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Die höchsten Extremwerte stammen von Flächen, auf denen eine Salzausfällung an der Bodenoberfläche im Gelände optisch sichtbar war. Die Salze wurden durch Perkolation der Bodenproben gewonnen und qualitativ mittels Schnelltests bestimmt, aber nicht weiter quantitativ differenziert. Der Sulfat-Test ergibt für alle Stichproben einen Wert von  $400\text{--}800 \text{ mg l}^{-1}$ , während der Chlorid-Test mittels Silbernitratlösung nur bei einigen Proben einen Nachweis für Chlorid anhand des gebildeten Niederschlags (Silberchlorid) liefert. Die ersten 500 ml der Perkolate ausgewählter Proben wurden gesammelt und ebenfalls am AAS gemessen. Für Natrium können Maxima von bis zu  $85,62 \text{ mg l}^{-1}$  detektiert werden. Damit übersteigen die Salzkonzentrationen die Konzentrationen an den Austauschern. Desweiteren werden folgende Maxima gemessen: Kalium  $7,32 \text{ mg l}^{-1}$ , Calcium  $7,85 \text{ mg l}^{-1}$  und Magnesium  $9,68 \text{ mg l}^{-1}$ .

Im Vergleich der a- und b-Horizonte treten in den Oberbodenhorizonten höhere Leitfähigkeitswerte auf als im Unterboden, was mit der Anreicherung von Salzen im Oberboden beziehungsweise der Bildung von Salzkrusten konform geht (Abb. 31). Der Mittelwert der a-Horizonte liegt bei  $725 \mu\text{S cm}^{-1}$ , während er in den b-Horizonten einen Wert von nur noch  $468 \mu\text{S cm}^{-1}$  aufweist. Die Standardabweichung der Oberboden-

horizonte ist mit  $1196 \mu\text{S cm}^{-1}$  deutlich höher als im Unterboden; dies bedeutet eine größere Streuung der Werte um den Mittelwert. Sichtbar wird allerdings, dass sich die Extremwerte der Flächen 99 und 162 vom a-Horizont bis in den b-Horizont durchsetzen. Im Vergleich der Beispieltäler zeigt das Madian Gumbez Kol mit einem Mittelwert von  $549 \mu\text{S cm}^{-1}$  die höchste Leitfähigkeit, aber auch die größte Streuung (Abb. 31, App. 9).

Tab. 17: Versalzungsgrad

Quelle: HINTERMAIER-ERHARD & ZECH (1997): 51

Versalzungsgrad	Elektrische Leitfähigkeit [ $\mu\text{S cm}^{-1}$ ] bei 25 °C	entsprechender Salzgehalt [mg l <sup>-1</sup> ]
gering	0 – 250	0 – 160
mittel	250 – 750	160 – 480
hoch	750 – 2250	480 – 1440
sehr hoch	2250 – 5000	1440 – 3200

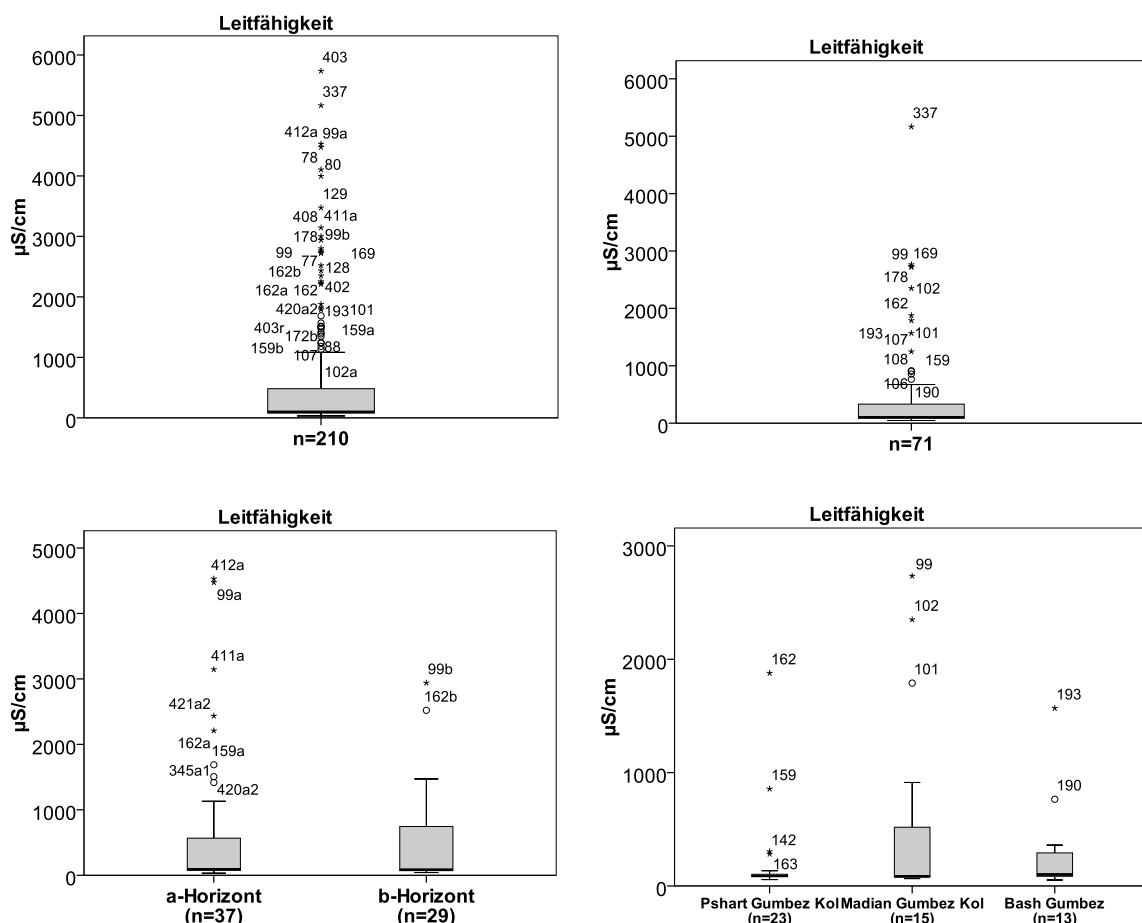


Abb. 31: Leitfähigkeit

Die Korrelationstests liefern geringe Korrelationen zwischen Leitfähigkeit und Beweidungsintensität. Dennoch bestätigen sie einen signifikanten Zusammenhang (Tab. 18).

Tab. 18: Korrelation der Leitfähigkeit mit der Beweidung

n=125	Verbiss	Tritt	Exkremente	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>r</b>	0,220	0,257	0,289	0,270	0,248
<b>p</b>				0,002	0,005

### 5.3.3 Kalkgehalt

Die Boxplots (Abb. 32, App. 10) zeigen leicht erhöhte Werte für den Oberboden, was auf sekundäre Carbonatanreicherungen während der Pedogenese zurückzuführen ist. Im Vergleich der Beispieldäler rangieren die Ergebnisse des Pshart Gumbez Kol und vor allem des Madian Gumbez Kol in einem viel größeren Wertebereich als im Bash Gumbez Tal, dessen Kalkgehalte aufgrund des kristallinen Ausgangsgesteins viel niedriger sind.

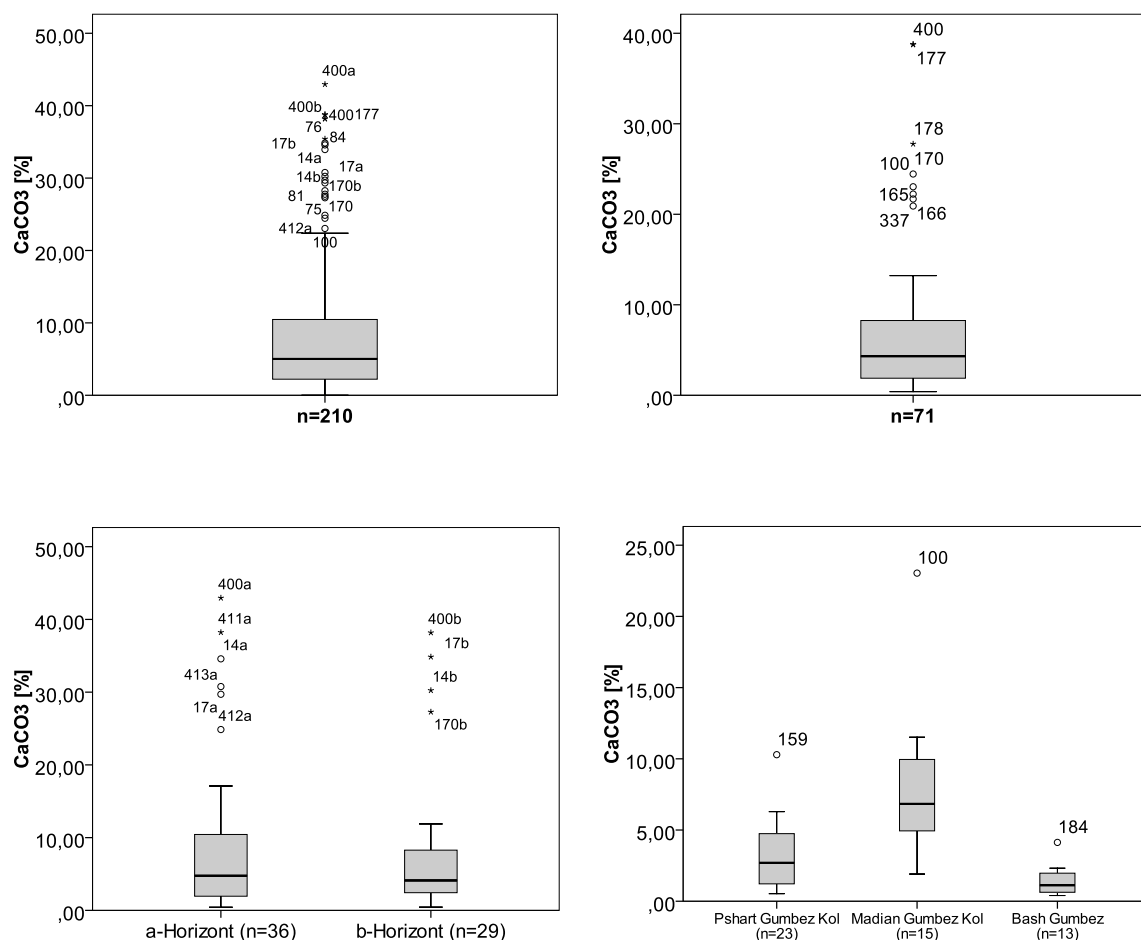


Abb. 32: Kalkgehalt

### 5.3.4 Organischer Kohlenstoffgehalt

Die mittleren Gehalte des organischen Kohlenstoffs übersteigen in den a-Horizonten die Werte der b-Horizonte, da der Input an organischer Substanz – abgesehen von Wurzeln und Bodenorganismen – vor allem an der Oberfläche erfolgt (Abb. 33, App. 11). Im Tälervergleich offenbart das Pshart Gumbez Kol höhere Werte als die beiden anderen Beispieltäler. Die Korrelationsanalysen zeigen geringe aber hoch signifikante positive Zusammenhänge des organischen Kohlenstoffgehaltes mit der Beweidung (Tab. 19). Das Signifikanzniveau von  $p = 0,000$  gibt an, dass mit dieser Irrtumswahrscheinlichkeit die  $H_0$ -Hypothese „es besteht kein Zusammenhang“, abgelehnt und damit die Alternativhypothese  $H_a$  „es besteht ein Zusammenhang“, angenommen werden kann.

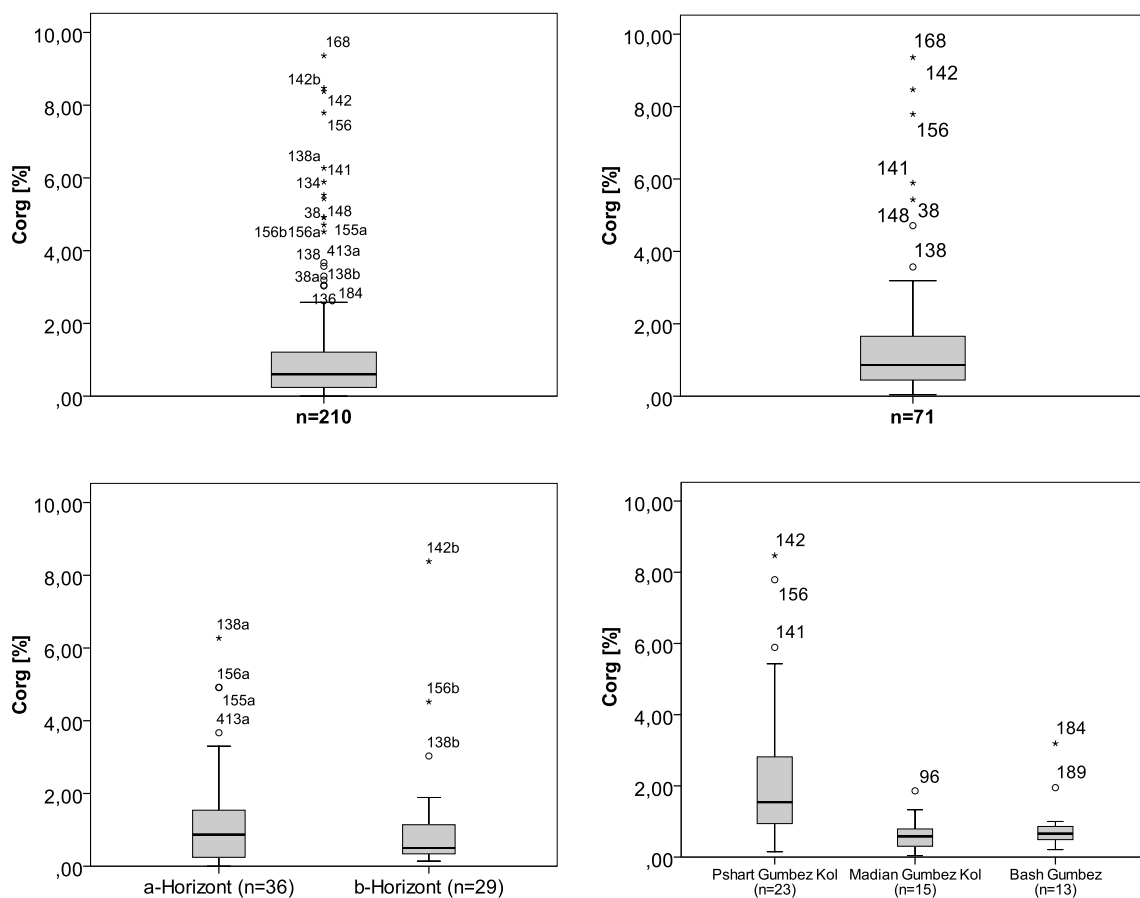


Abb. 33: Organischer Kohlenstoffgehalt

Tab. 19: Korrelation des organischen Kohlenstoffgehaltes mit der Beweidung

n=125	Tritt	Verbiss	Exkrement	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
r	0,347	0,293	0,474	0,401	0,342
p			0,000	0,000	0,000

### 5.3.5 Humusgehalt

Die untersuchten Proben lassen sich von humusfrei bis extrem humos beschreiben (Tab. 20). Die Humusgehalte und damit auch der organische Kohlenstoff zeigen – abgesehen von Ausreißern und Extremwerten – eine Abnahme im Unterboden (Abb. 34, App. 13). Die Differenzierung der einzelnen Täler illustriert deutlich für das Pshart Gumbez Kol erhöhte Werte, während die Ergebnisse aus Bash Gumbez nur geringfügig über denen des Madian Gumbez Kol rangieren.

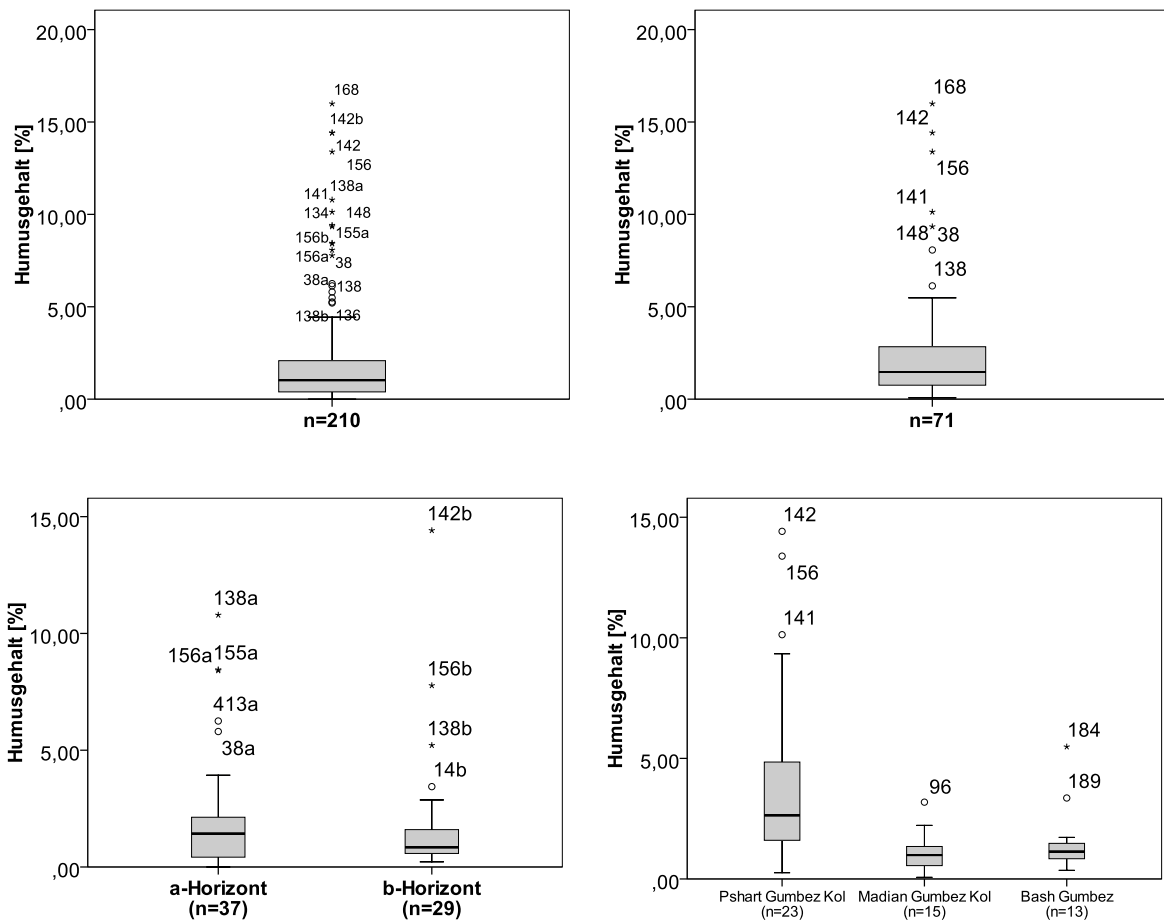


Abb. 34: Humusgehalt

Tab. 20: Beschreibung der Humusgehalte

Quelle: nach SPONAGEL ET AL. 2005: 112

Bezeichnung	in Masse-%
humusfrei	0
sehr schwach humos	<1
schwach humos	1 – 2
mittel humos	2 – 4
stark humos	4 – 8
sehr stark humos	8 – 15
extrem humos	15 – 30
organisch	> 30

Der Korrelationskoeffizient der Beweidungsintensität mit dem Humusgehalt ( $n = 125$  Mischflächen) liegt bei 0,428 und ist mit einem  $p$ -Wert = 0,000 signifikant korreliert. Hier erzielt der Zusammenhang des Humusgehaltes mit Tritt & Verbiss nur einen Wert von 0,370, ist jedoch immer noch mit  $p = 0,000$  signifikant korreliert (Tab. 21). Es zeigt sich somit, dass Flächen mit einer Konzentration an Exkrementen auch höhere Humusgehalte aufweisen.

Tab. 21: Korrelation des Humusgehaltes mit der Beweidung

n=125	Tritt	Verbiss	Exkremte	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>r</b>	0,365	0,326	0,492	0,428	0,370
<b>p</b>			0,000	0,000	0,000

### 5.3.6 Stickstoff

Proben mit  $N < 0,5 \text{ ‰}$  gelten als N-arm, mit  $> 2 \text{ ‰}$  als N-reich. Im Mittel liegt somit eine gute Stickstoffversorgung vor. Niedrige Stickstoffwerte können auf vergleichsweise niedrige organische Substanz in sandigen Böden zurückgeführt werden (AYUBA 2001).

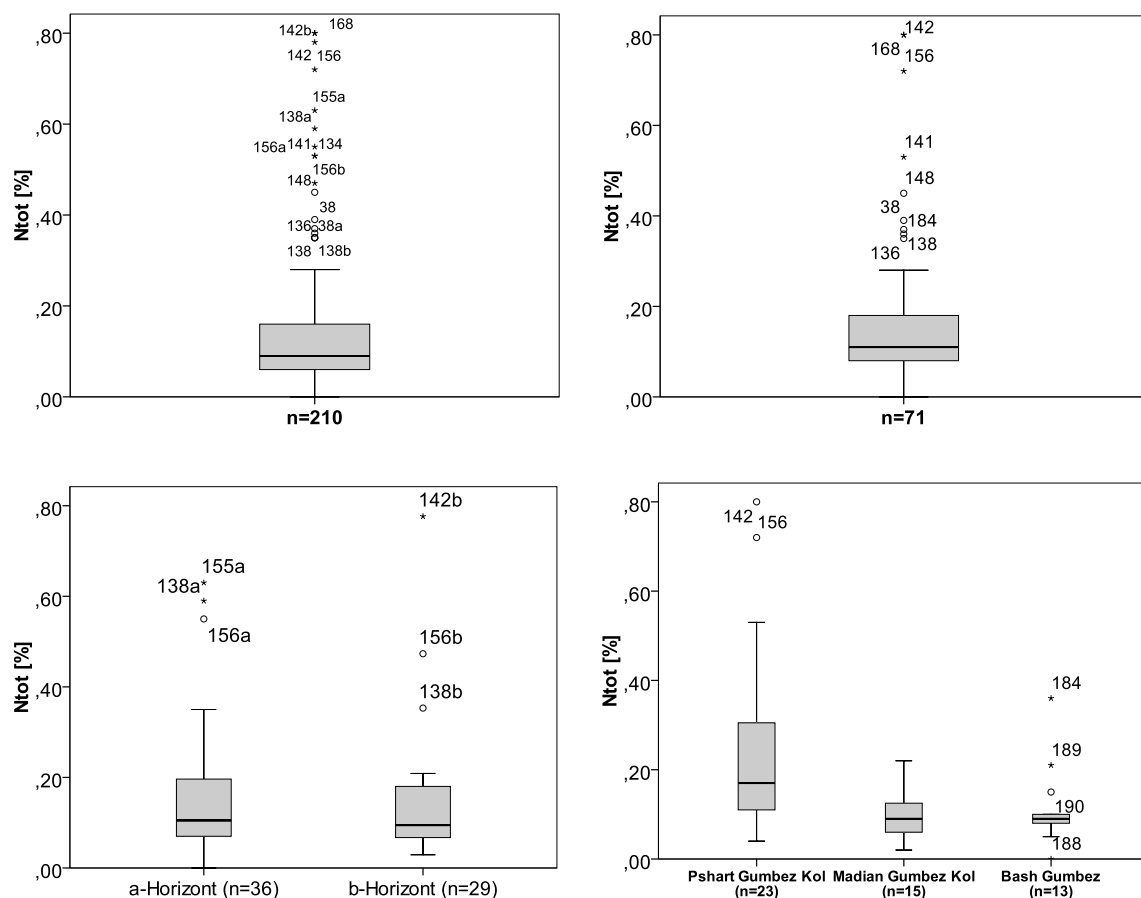


Abb. 35: Stickstoffkonzentration

Die Stickstoffkonzentrationen lassen sich hinsichtlich der Horizonte kaum näher differenzieren (Abb. 35, App. 14). Das Pshart Gumbez Kol Tal zeigt höhere Konzentrationen als die beiden anderen Beispieltäler. Geringe, aber hoch signifikante Korrelationen liegen für den Stickstoffgehalt vor (Tab. 22).

**Tab. 22: Korrelation des Stickstoffgehaltes mit der Beweidung**

n=125	Verbiss	Tritt	Exkremete	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>r</b>	0,195	0,260	0,365	0,287	0,240
<b>p</b>			0,000	0,001	0,007

Die absoluten Gehalte an Gesamt-N sind ökologisch und pedogenetisch wenig aussagekräftig. Ihren Wert als Maß für die Humusform erlangen sie erst durch einen Bezug zur Konzentration der organischen Substanz, also einer Beurteilung relativ zum C-Gehalt.

### 5.3.7 C/N-Verhältnis

Generell nimmt das C/N-Verhältnis mit zunehmender Profiltiefe ab (Abb. 36, App. 15), da der Eintrag vorrangig von der bestockenden Biomasse stammt und der Abbau sowie das Humusalter in größeren Tiefen zunehmen (NIEDER & BENBI 2008). Das C/N-Verhältnis der Horizonte nimmt – abgesehen von Probe 17b als zweifelhafter Extremwert – im Unterboden leicht ab. Im Tälervergleich besitzt das Pshart Gumbez Kol die höchsten C/N-Verhältnisse, gefolgt von Bash Gumbez. Die Humusqualität kann anhand Tab. 24 als überwiegend sehr hoch eingeschätzt werden. Die Korrelationstests zeigen signifikante Zusammenhänge mit Korrelationskoeffizienten geringer Korrelation (Tab. 23). Der stärkste Zusammenhang besteht mit dem Proxy Exkremete.

**Tab. 23: Korrelation des C/N-Verhältnisses mit der Beweidung**

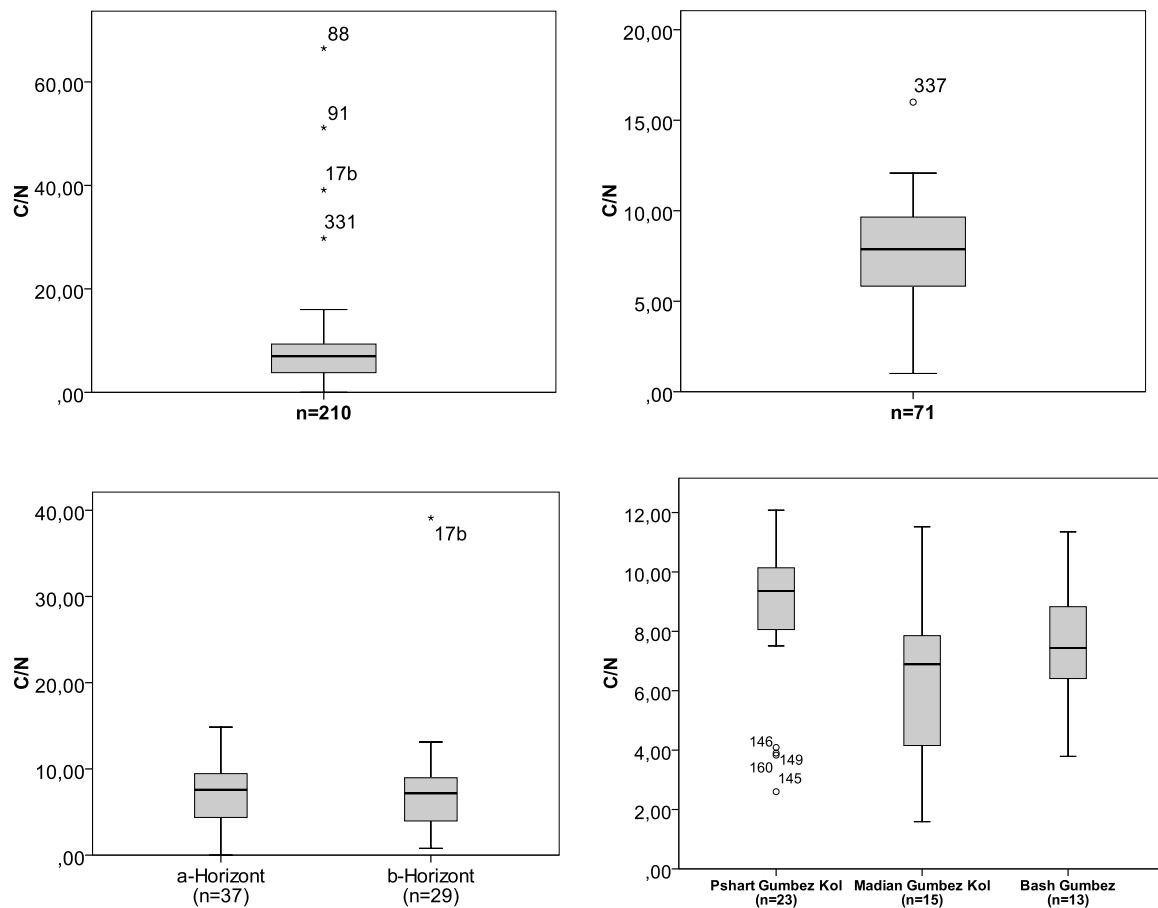
n=125	Tritt	Verbiss	Exkremete	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>r</b>	0,345	0,312	0,439	0,403	0,355
<b>p</b>			0,000	0,000	0,000

**Tab. 24: Beurteilung der Humusqualität aus dem C/N-Verhältnis**

Quelle: SPONAGEL ET AL. 2005: 372

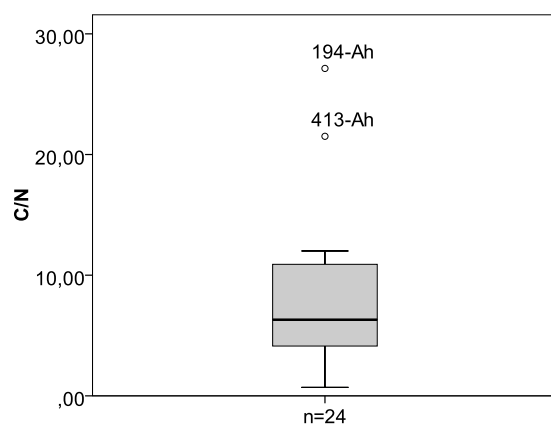
Bezeichnung für die Humusqualität	C/N-Verhältnis
<b>sehr gering</b>	≥ 25
<b>gering</b>	25 – 20
<b>mittel</b>	20 – 15
<b>hoch</b>	15 – 10
<b>sehr hoch</b>	< 10





**Abb. 36: C/N-Verhältnis**

Die C/N-Verhältnisse der obersten Zentimeter differieren nicht stark von den sonst ermittelten Werten für die Stichprobe von  $n = 24$  Proben (Abb. 37, App. 16). Die Zusammenhänge der vergleichsweise kleinen Stichprobe sind hier aber negativ. Allerdings zeigen alle untersuchten Parameter der Ah-Horizonte keine signifikanten Zusammenhänge mit der Beweidung (Tab. 25 und Tab. 26).



**Abb. 37: C/N-Verhältnis für die Ah-Horizonte**

Tab. 25: Korrelationen der Ah-Proben mit der Beweidung

r	Verbiss	Tritt	Exkremete	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>C<sub>org</sub></b>	-0,143	-0,180	-0,251	-0,021	-0,208
<b>N</b>	-0,347	-0,262	-0,322	-0,322	-0,350
<b>Humus</b>	-0,147	-0,226	-0,253	-0,209	-0,212
<b>C/N</b>	0,076	-0,165	-0,218	-0,108	-0,039

Tab. 26: Signifikanzniveaus für die Korrelationstests der Ah-Proben mit der Beweidung

p	Verbiss	Tritt	Exkremete	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>C<sub>org</sub></b>			0,237	0,337	0,329
<b>N</b>			0,125	0,125	0,093
<b>Humus</b>			0,232	0,327	0,319
<b>C/N</b>		0,442	0,305	0,614	0,858

### 5.3.8 Kationenaustauschkapazität

In den 108 untersuchten Proben lag der pH-Wert der 1-molaren NH<sub>4</sub>Cl-Lösung mit 4,70 tiefer als der der Proben-Extraktionslösung; somit konnte kein Nachweis für H<sup>+</sup>-Ionen an den Austauschern erbracht werden. Für die Leitfähigkeit wurden 89,3 mS cm<sup>-1</sup> gemessen. Gewöhnlich wird mit der angewandten Methode die effektive KAK gemessen, die in einem Boden beim jeweiligen aktuellen pH wirksam ist. Da die pH-Werte im Bereich der KAK<sub>pot</sub> zwischen 7 und 7,5 rangieren, sind die effektive KAK und die potentielle KAK, die normalerweise nur in carbonathaltigen Böden erreicht wird, identisch.

Die Basensättigung aller untersuchten Proben beträgt 100%. In diesem Fall ist der S-Wert dem T-Wert gleich. Bei allen Proben ist Calcium mit einem Maximum an den Austauschern vertreten. Die 41 untersuchten Mischproben zeigen allerdings eine deutliche Differenzierung nach Tälern (Abb. 38). Der Calcium-Gehalt und damit verbunden die gesamte Basensättigung in Bash Gumbez ist deutlich niedriger (App. 17).

Tab. 27: Korrelation der KAK mit der Beweidung

n=49	Verbiss	Tritt	Exkremete	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
<b>Na</b>	0,343	0,220	0,326	0,293	0,279
<b>K</b>	0,226	0,420	0,310	0,347	0,319
<b>Ca</b>	0,425	0,462	0,354	0,457	0,469
<b>Mg</b>	0,399	0,456	0,402	0,423	0,434
<b>KAK</b>	0,467	0,500	0,402	0,499	0,507

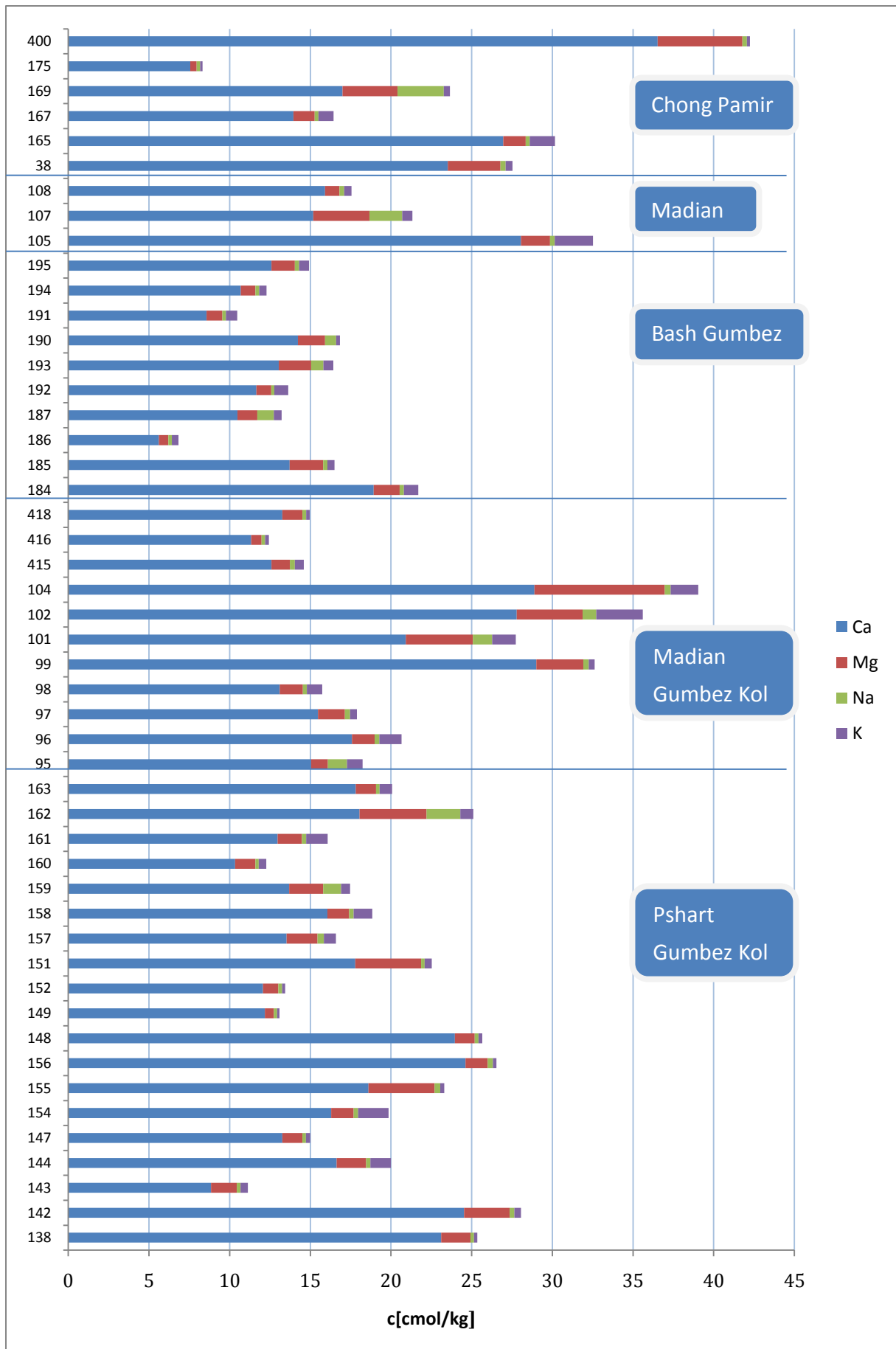


Abb. 38: KAK

Die Korrelationen zeigen geringe bis mittlere Zusammenhänge (Tab. 27). Der p-Wert für den Korrelationstest beträgt für die KAK 0,004 (Exkremete) bzw. 0,000 (Beweidungsintensität) und 0,000 (Tritt & Verbiss). Die Korrelationen sind damit hoch signifikant (Tab. 28).

Tab. 28: Korrelationstest KAK

n=49	Exkremete	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
p(KAK)	0,004	0,000	0,000

### 5.3.8.1 Natrium

Die gemessenen Natrium-Konzentrationen rangieren zwischen 0,19 und 3,07 cmol kg<sup>-1</sup>, der Mittelwert liegt bei 0,48 cmol kg<sup>-1</sup>. Die mittleren Natrium-Gehalte der a-Horizonte übersteigen die Werte der b-Horizonte (Abb. 39, App. 18). Die Extremwerte decken sich größtenteils mit den Extremwerten der Leitfähigkeit. Im Tälervergleich zeigt das Pshart Gumbes Kol – abgesehen von zwei Extremwerten – die geringste Streuung.

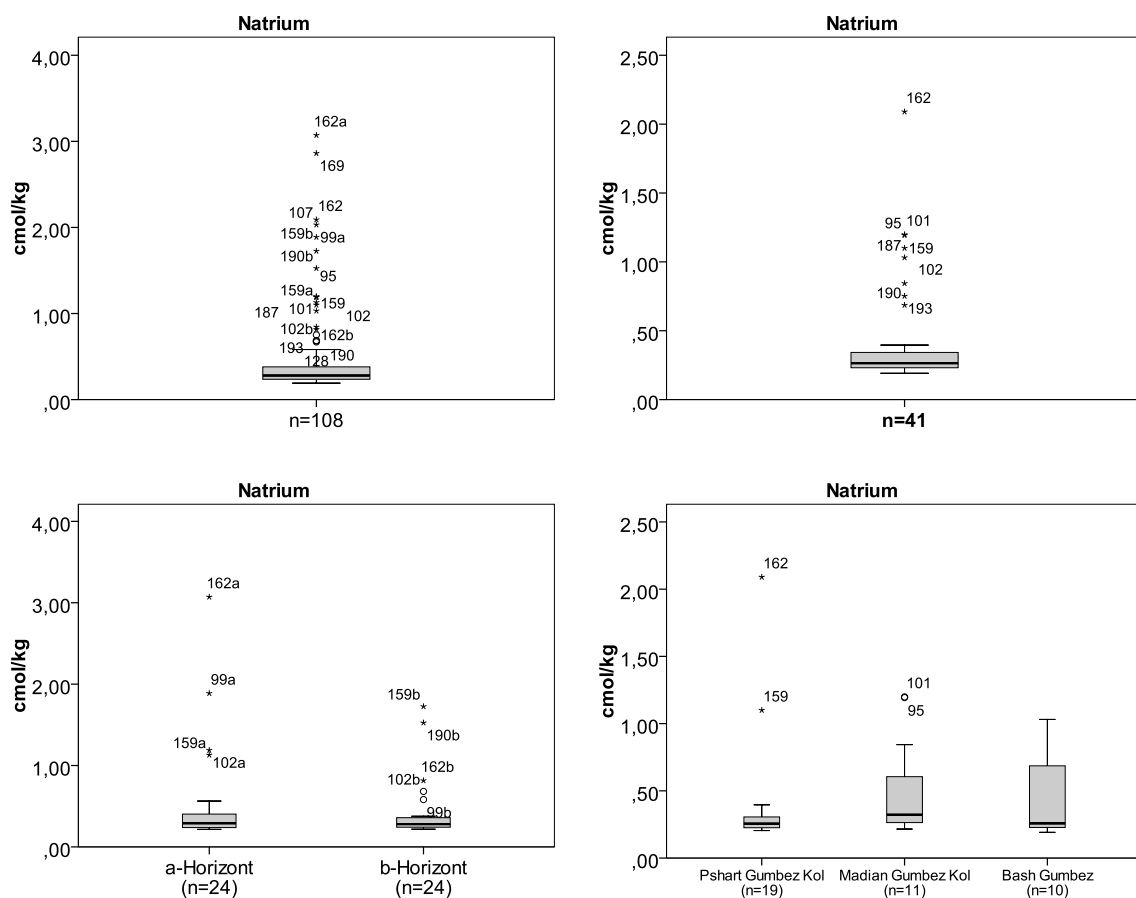


Abb. 39: Natrium-Konzentration

### 5.3.8.2 Kalium

Die Kalium-Konzentrationen schwanken zwischen 0,11 und 3,29 cmol kg<sup>-1</sup>. Ihr Mittelwert liegt bei 0,66 cmol kg<sup>-1</sup>. Die Boxplots der Kalium-Konzentrationen zeigen für den a-Horizont höhere Werte als für den b-Horizont (Abb. 40, App. 19). Dies ist jedoch vor allem auf die Ausreißer und Extremwerte zurückzuführen, die die Streuung erhöhen. Fläche 104 zeigt durchgängig im Ober- und Unterboden auffällig hohe Werte. Im Vergleich der Täler besitzt das Madian Gumbez Kol die höchsten Konzentrationen.

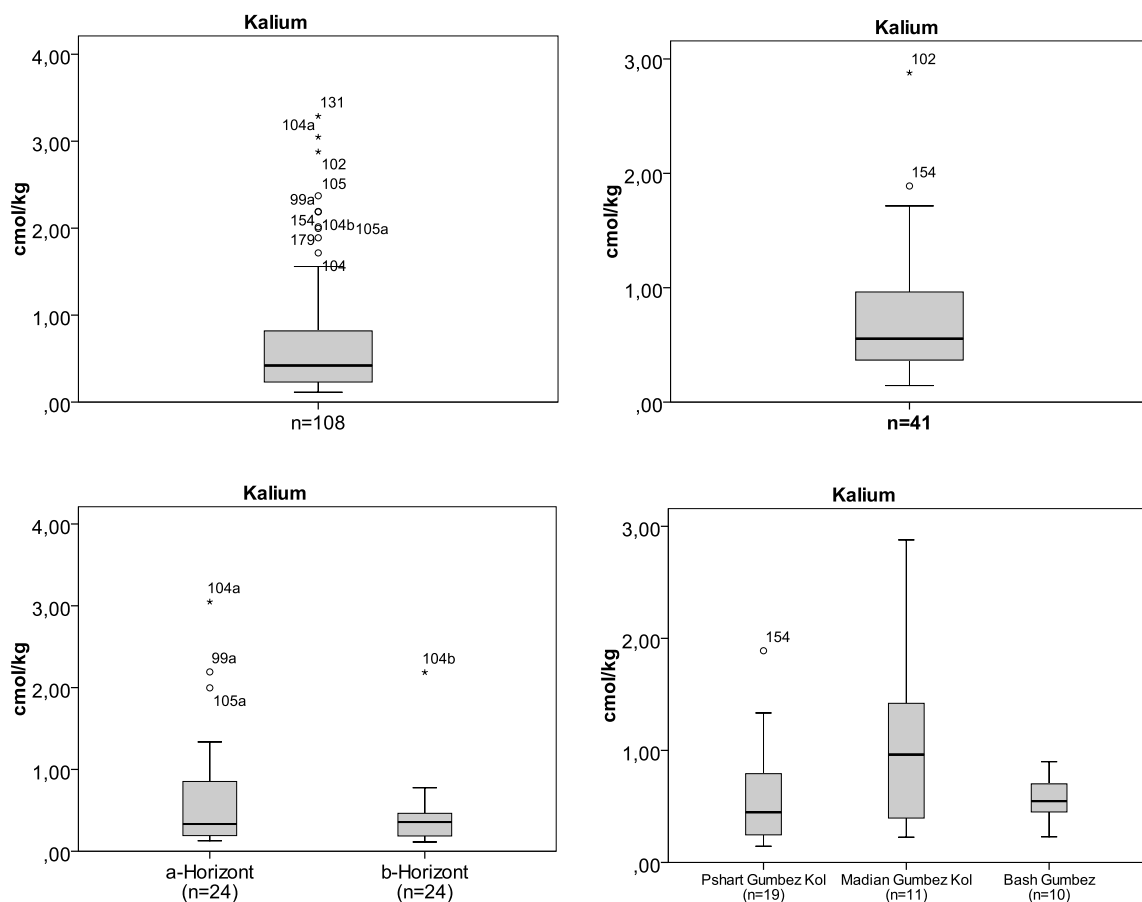


Abb. 40: Kalium-Konzentration

### 5.3.8.3 Calcium

Die gemessenen Calcium-Konzentrationen variieren zwischen 5,33 und 94,88 cmol kg<sup>-1</sup> um den Mittelwert von 18,17 cmol kg<sup>-1</sup>. Die Werte der a- und b-Horizonte differieren kaum (Abb. 41, App. 20). Der Vergleich der drei Beispieltäler zeigt für Bash Gumbez die niedrigsten Calcium-Gehalte.

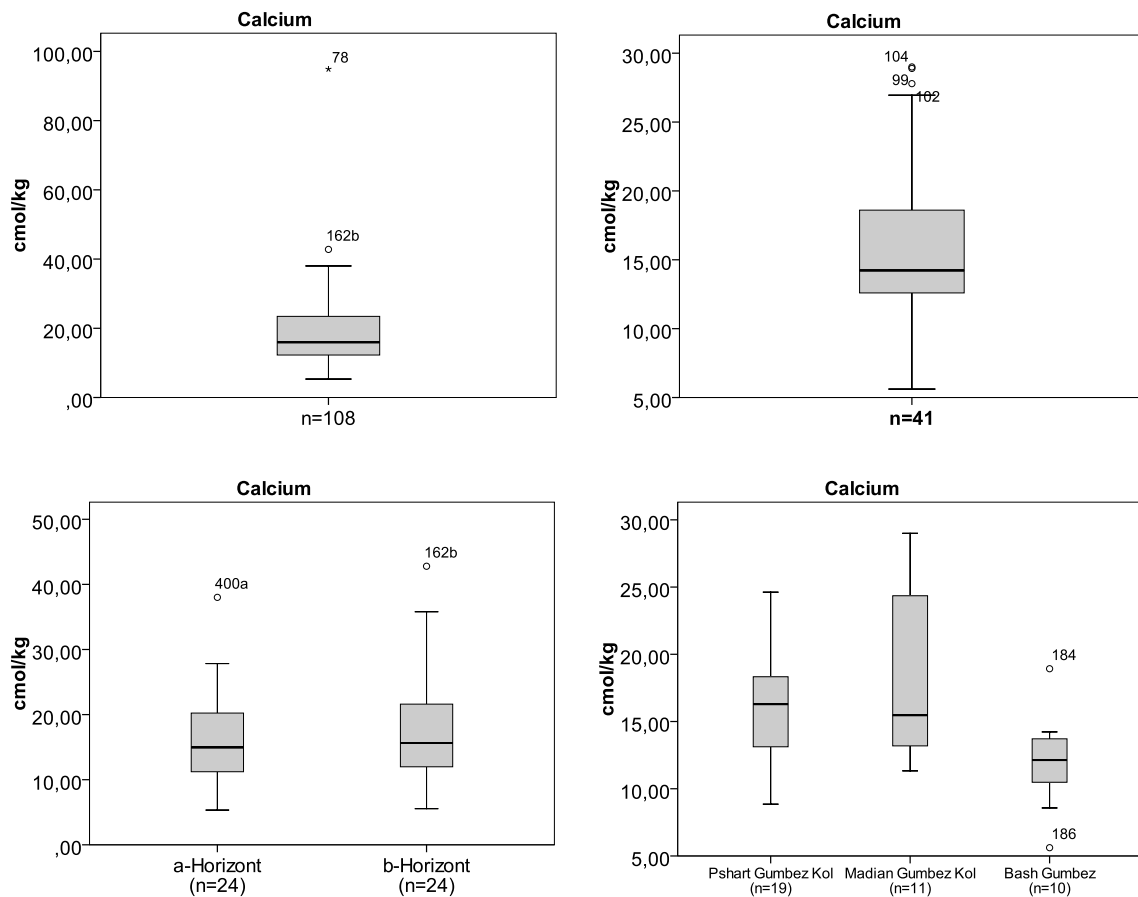


Abb. 41: Calcium-Konzentration

#### 5.3.8.4 Magnesium

Die ermittelten Konzentrationen für das Element Magnesium rangieren zwischen 0,38 und 8,07 cmol kg<sup>-1</sup>. Sie streuen um den Mittelwert von 2,01 cmol kg<sup>-1</sup>. Die Magnesium-Konzentrationen der a- und b-Horizonte sind homolog (Abb. 42, App. 21); allerdings nimmt der Gehalt an austauschbarem Magnesium auf einigen Flächen mit wachsender Profiltiefe zu. Das Madian Gumbez Kol zeigt im Vergleich der Täler die größte Streuung.

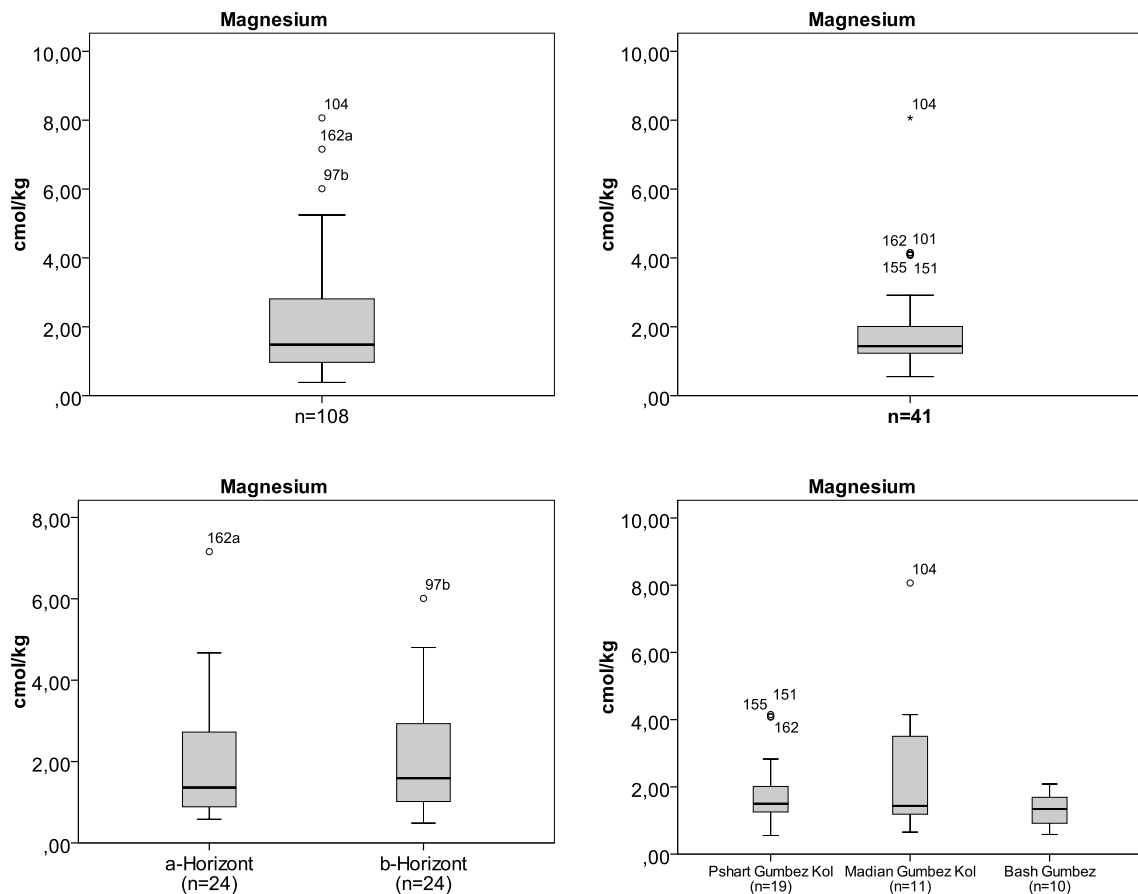


Abb. 42: Magnesium-Konzentration

### 5.3.9 Phosphor

Bei der Phosphoruntersuchung konnte keine starke Blaufärbung festgestellt werden. Die Werte der 25 Proben rangieren zwischen 0,00 und 2,48 mg kg<sup>-1</sup> und besitzen somit keine weite Streuung um den Mittelwert von 0,69 mg kg<sup>-1</sup> (Abb. 43), der als niedrig eingestuft werden kann (Tab. 32). Nur die Probe 93a stellt einen Ausreißer dar. Die Einstufung nach Tab. 29 ergibt somit eher niedrige Phosphorgehalte. Dies ist ein Charakteristikum für die Böden im Ostpamir. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung von a- und b-Horizonten zeigen sowohl höhere Phosphorgehalte als auch eine größere Streuung für den Oberboden. Ebenso weisen in Abhängigkeit der Weideintensität die stärker beweideten Flächen einen höheren Phosphorgehalt auf als die schwach beweideten Flächen. Allerdings zeigt der Boxplot zur Weideintensität nur eine Grobeinteilung der Flächen in 2 Klassen anhand der Parameter Tritt, Exkrement und Verbiss.

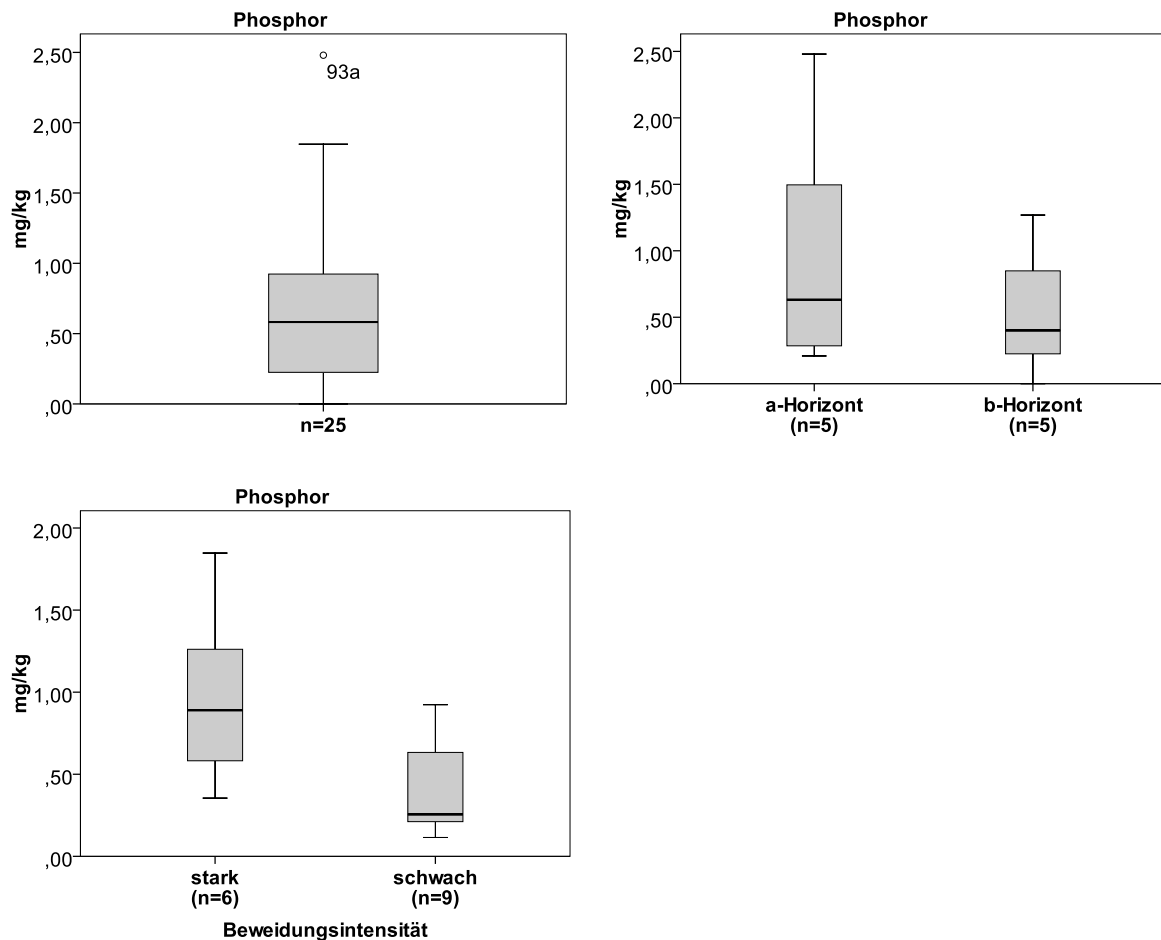


Abb. 43: Phosphor-Konzentration

Tab. 29: Beurteilung des wasserlöslichen, pflanzenverfügbaren P-Gehaltes

Quelle: LANDON 1991: 136 &amp; BINGHAM 1962: 93

	niedrig	mittel	hoch
Verfügbares P [mg/kg]	<1	1-2	>2

Die Korrelationskoeffizienten zeigen eine geringe Korrelation, ihre Korrelationstests einen p-Wert, der auf keine Signifikanz hinweist (Tab. 30). Allerdings entspricht der Stichprobenumfang von nur 14 Proben nicht dem geforderten Umfang für den Test.

Tab. 30: Korrelation des Phosphorgehaltes mit der Beweidung

n=14	Tritt	Verbiss	Exkremete	Beweidungsintensität	Tritt & Verbiss
r	0,494	0,497	0,255	0,410	0,494
p			0,378	0,145	0,073

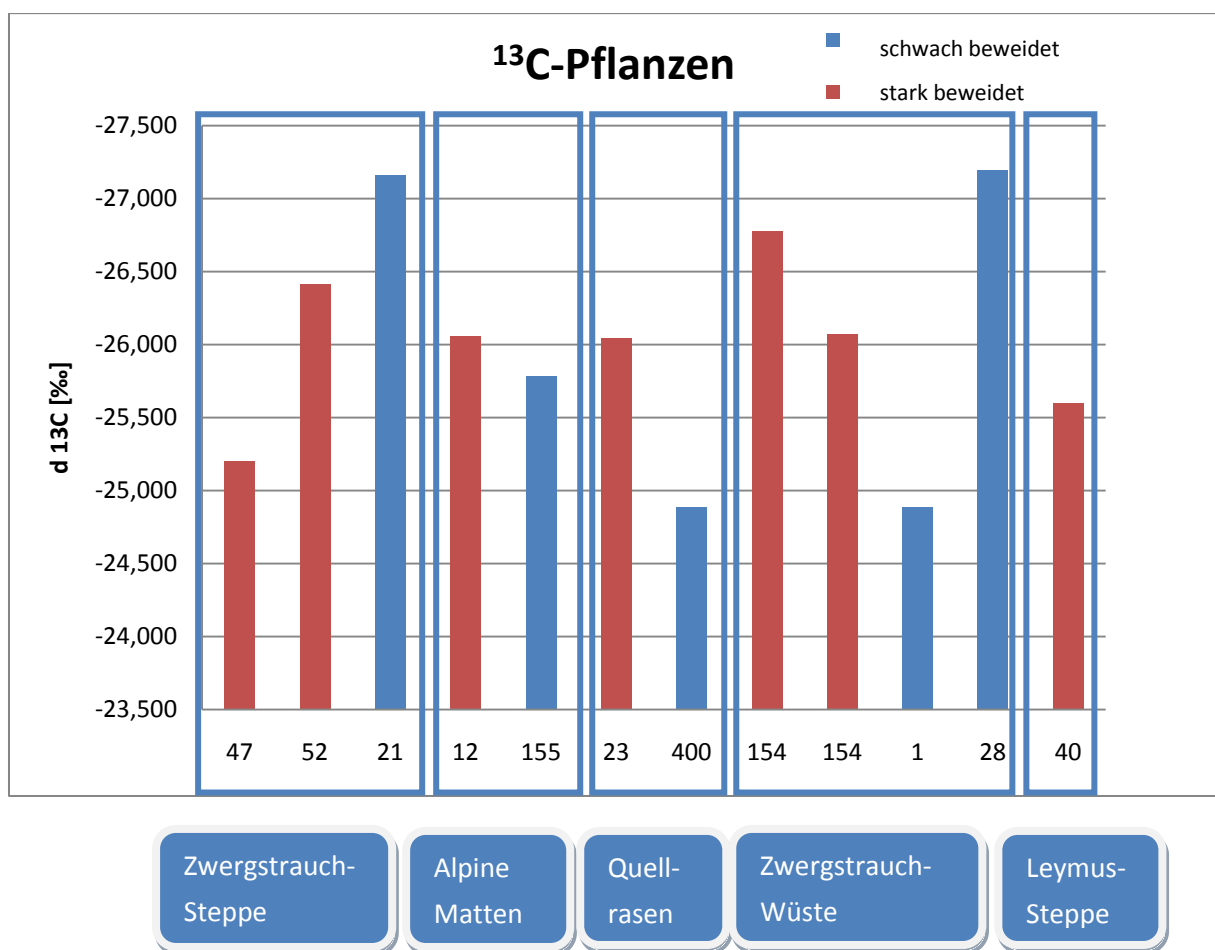


### 5.3.10 Stabile Isotope

Die Säulendiagramme in Abb. 44 bis Abb. 47 zeigen die stark beweideten Flächen in rot, die eher unbeweideten oder wenig genutzten Flächen in blau.  $\delta$  wird negativ, wenn  $R_{\text{sample}} < R_{\text{standard}}$  (vgl. Formel 8)

#### 5.3.10.1 Kohlenstoff

Der typische  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert für C3-Pflanzen liegt bei  $-27\text{‰}$  (WEST 2006), nach KENNEDY & KROUSE (1990) und PATAKI ET AL. (2007) rangiert er zwischen  $-20$  bzw.  $-21$  und  $-35\text{‰}$ . Alle untersuchten Pflanzenproben liegen in diesem Bereich (Abb. 44, App. 23).



**Abb. 44:**  $^{13}\text{C}$  der Pflanzenproben

Da die  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Pflanzen nicht nur vom Photosyntheseweg (im vorliegenden Fall liegen alle  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Bereich des C-3 Photosyntheseweges) abhängen, sondern auch von Umweltbedingungen wie Temperatur und Wasserstress sowie von der Biomasseproduktivität, wurden entsprechende Zusammenhänge statistisch getestet. Wider Erwarten, konnten mit dem vorliegenden Datensatz aber weder klimatische Effekte (bspw. Vergleich Quellrasenstandorte mit Trockenstandorten) noch Beweidungseffekte bestätigt werden. Die Ergebnisse des U-Tests der gemessenen  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte liefern

Signifikanzniveaus, die  $\alpha = 0,05$  übersteigen (Tab. 31). Damit wird die  $H_0$ -Hypothese, „es handelt sich um nur eine Stichprobe“, in der sowohl beweidete als auch unbeweidete Flächen enthalten sind, angenommen. Das heißt, es besteht kein Zusammenhang mit der Beweidung.

**Tab. 31: U-Test für die Gruppenvariable Beweidung der  $\delta^{13}\text{C}$ -Konzentrationen in den Pflanzenproben**

U-Test für die Gruppenvariable Beweidung	
	$\delta^{13}\text{C}$
Mann-Whitney-U	16,000
Wilcoxon-W	44,000
Z	-,244
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,808
Exakte Signifikanz [2*(1-seitig Sig.)]	,876 <sup>a</sup>

a. Nicht für Bindungen korrigiert.

Abb. 45 zeigt die  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der zugehörigen entkalkten Bodenproben. Auch hier ergibt der U-Test ein ähnliches Ergebnis, mit dem die  $H_0$ -Hypothese von nur einer Stichprobe beibehalten wird (Tab. 32). Damit kann auch im Boden kein signifikanter Zusammenhang der  $\delta^{13}\text{C}$ -Konzentrationen mit der Beweidung ermittelt werden. Auffällig ist jedoch, dass einige Bodenproben mit  $\delta^{13}\text{C}$ -Werten größer als  $-15\text{‰}$  für C3-Photosynthese-standorte deutlich zu positive Isotopensignaturen aufweisen. Da in diesen Proben auch die C/N-Verhältnisse gleich oder weiter als 20 sind (Abb. 49), ist dies ein starkes Indiz dafür, dass die Entcarbonatisierung nicht vollständig gelungen ist. Möglicherweise ist dies auf in den entsprechenden Proben enthaltenen Dolomit zurückzuführen, der bei Entkalkung Probleme machte. Erwähnenswert ist in jedem Fall auch die Quellrasenprobe 23 (Abb. 45, App. 23). Sie besitzt den negativsten  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von allen Bodenproben. Vermutlich spiegelt dies wider, dass an diesem Standort die Degradation des organischen Bodenmaterials, die an den anderen Standorten zu deutlich positiveren  $\delta^{13}\text{C}$ -Werten verglichen mit dem Pflanzenausgangsmaterial führt, durch Wasserstaubedingungen und anmoorige Bodenbedingungen gehemmt ist.

**Tab. 32: U-Test für die Gruppenvariable Beweidung der  $\delta^{13}\text{C}$ -Konzentrationen in den Bodenproben**

U-Test für die Gruppenvariable Beweidung	
	$\delta^{13}\text{C}$
Mann-Whitney-U	9,000
Wilcoxon-W	30,000
Z	-1,095
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,273
Exakte Signifikanz [2*(1-seitig Sig.)]	,329 <sup>a</sup>

a. Nicht für Bindungen korrigiert.

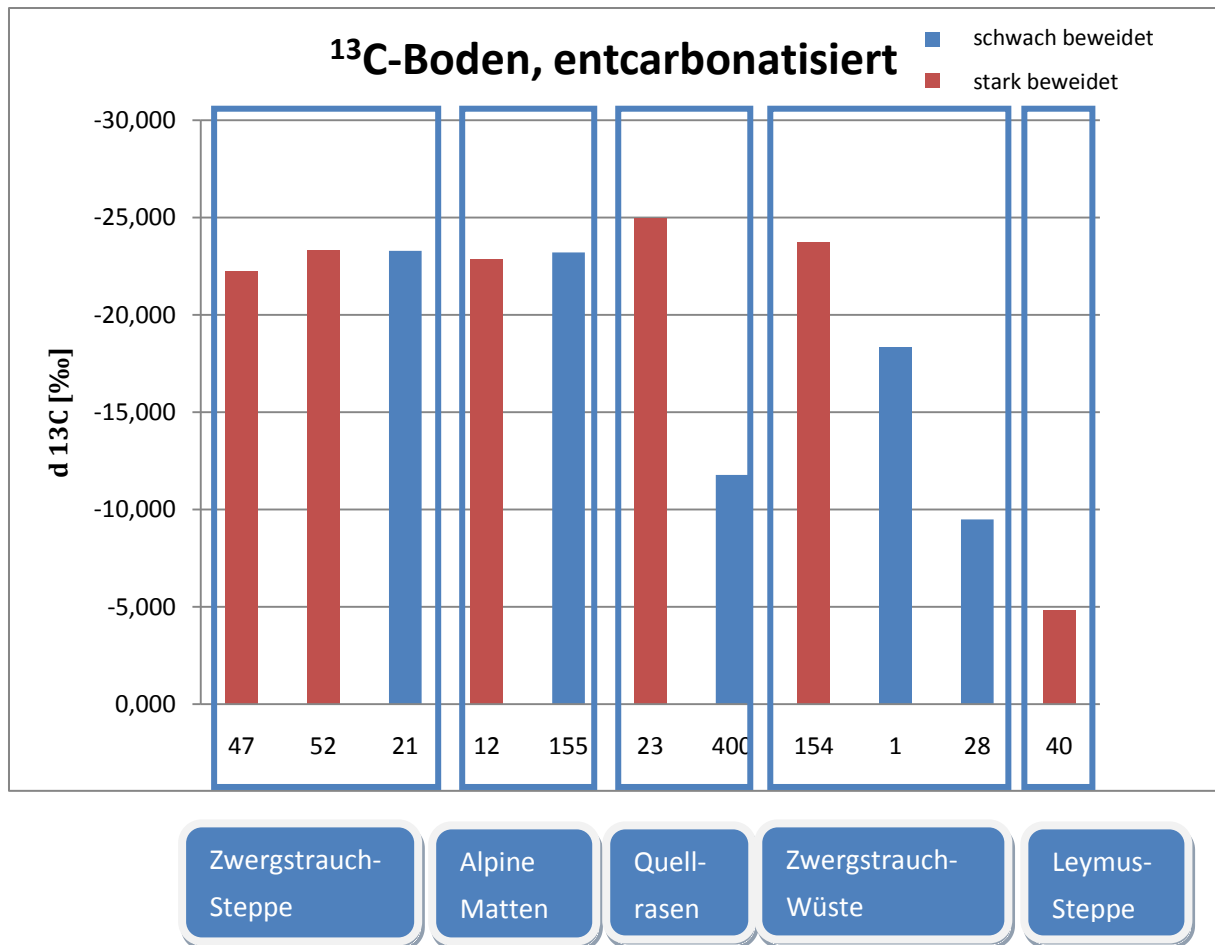


Abb. 45:  $^{13}\text{C}$  der entcarbonatisierten Bodenproben

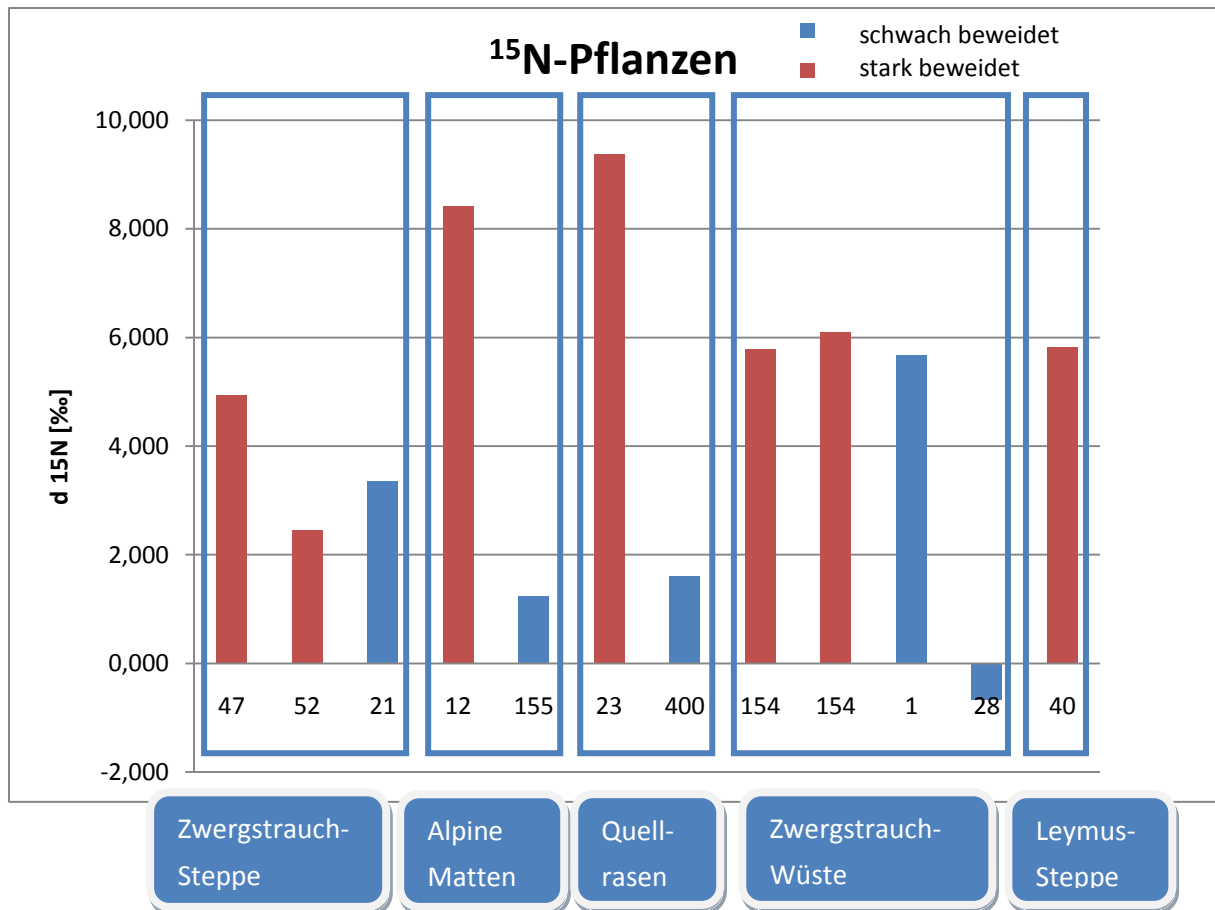
### 5.3.10.2 Stickstoff

In allen Vegetationseinheiten zeigen die stärker beweideten Flächen eine Anreicherung mit  $^{15}\text{N}$  (Abb. 46, App. 24). Pflanzen, die keinen Stickstoff fixieren, besitzen  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte, die etwas negativer sind als die der dazugehörigen Böden.

Tab. 33: U-Test für die Gruppenvariable Beweidung der  $\delta^{15}\text{N}$ -Konzentrationen in den Pflanzenproben

U-Test für die Gruppenvariable Beweidung	
	$\delta^{15}\text{N}$
Mann-Whitney-U	3,000
Wilcoxon-W	18,000
Z	-2,355
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,019
Exakte Signifikanz [2*(1-seitig Sig.)]	,018 <sup>a</sup>

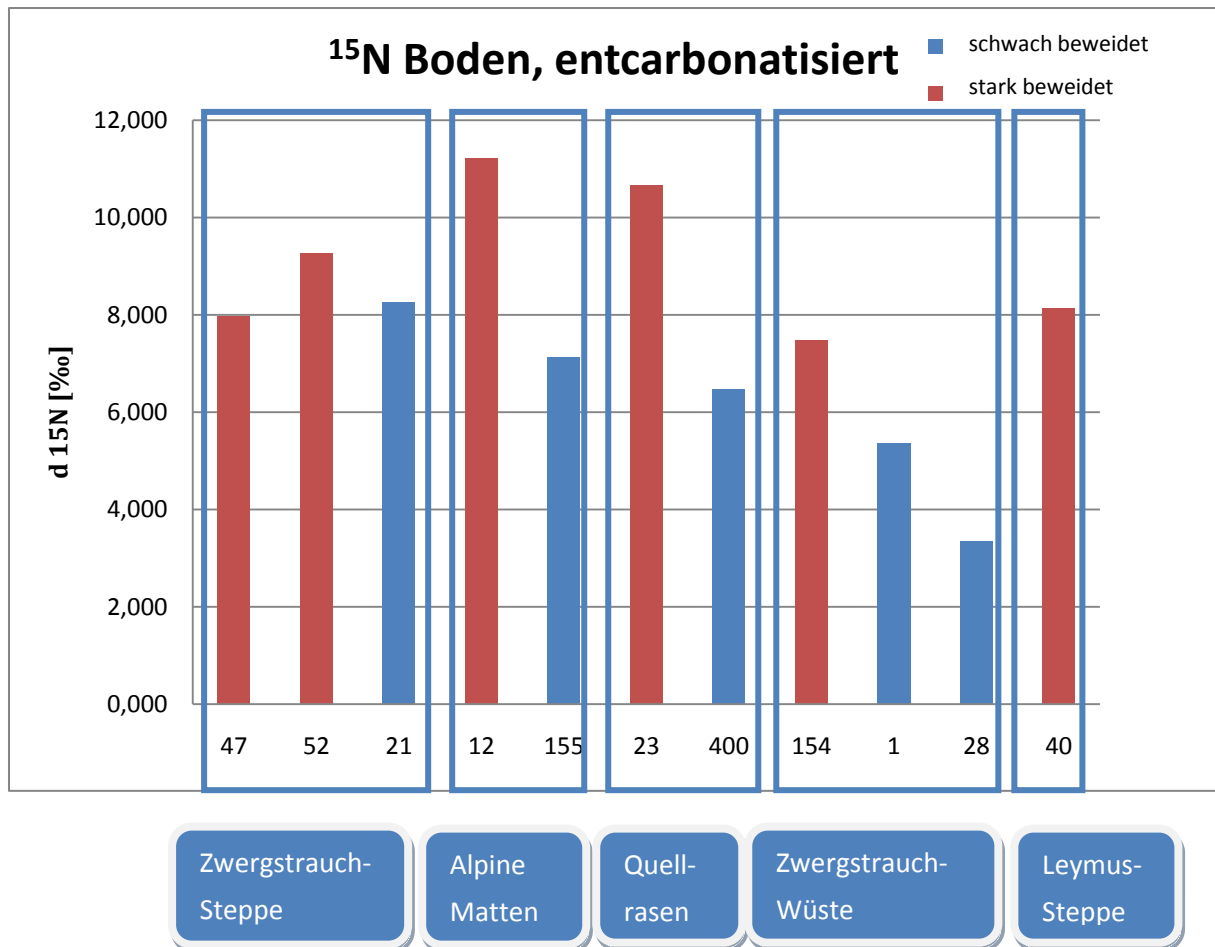
a. Nicht für Bindungen korrigiert.



**Abb. 46:**  $^{15}\text{N}$  der Pflanzenproben

Die Ergebnisse des U-Tests der gemessenen  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte liefern Signifikanzniveaus, die unter  $\alpha = 0,05$  liegen (Tab. 36). Es handelt sich also wirklich um zwei verschiedene Stichproben. Damit bestehen signifikante Zusammenhänge zwischen den  $\delta^{15}\text{N}$ -Konzentrationen und der Beweidungsintensität.

Die  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte des Bodenstickstoffs sind im Vergleich zum atmosphärischen Stickstoff meist schwerer (Abb. 47, App. 24). Sie schwanken nach KENNEDY & KROUSE (1990) zwischen -7 und +18 ‰ um den Mittelwert +5,0 ‰. Die Bodenprobe 23 zeigt anaerobe Bedingungen mit Denitrifizierungsprozessen, wobei der leichtere Stickstoff verloren geht und der  $\delta^{15}\text{N}$ -Wert positiv wird.



**Abb. 47:**  $^{15}\text{N}$  der entcarbonatisierten Bodenproben

Der U-Test zeigt, dass es sich um zwei Stichproben aus unbeweideten und beweideten Flächen handelt. Die Ergebnisse des U-Tests liefern signifikante Zusammenhänge zwischen den  $\delta^{15}\text{N}$ -Konzentrationen der Böden und der Beweidung (Tab. 34).

**Tab. 34:** U-Test für die Gruppenvariable Beweidung der  $\delta^{15}\text{N}$ -Konzentrationen in den Bodenproben

U-Test für die Gruppenvariable Beweidung	
	$\delta^{15}\text{N}$
Mann-Whitney-U	3,000
Wilcoxon-W	18,000
Z	-2,191
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,028
Exakte Signifikanz [2*(1-seitig Sig.)]	,030 <sup>a</sup>

a. Nicht für Bindungen korrigiert.

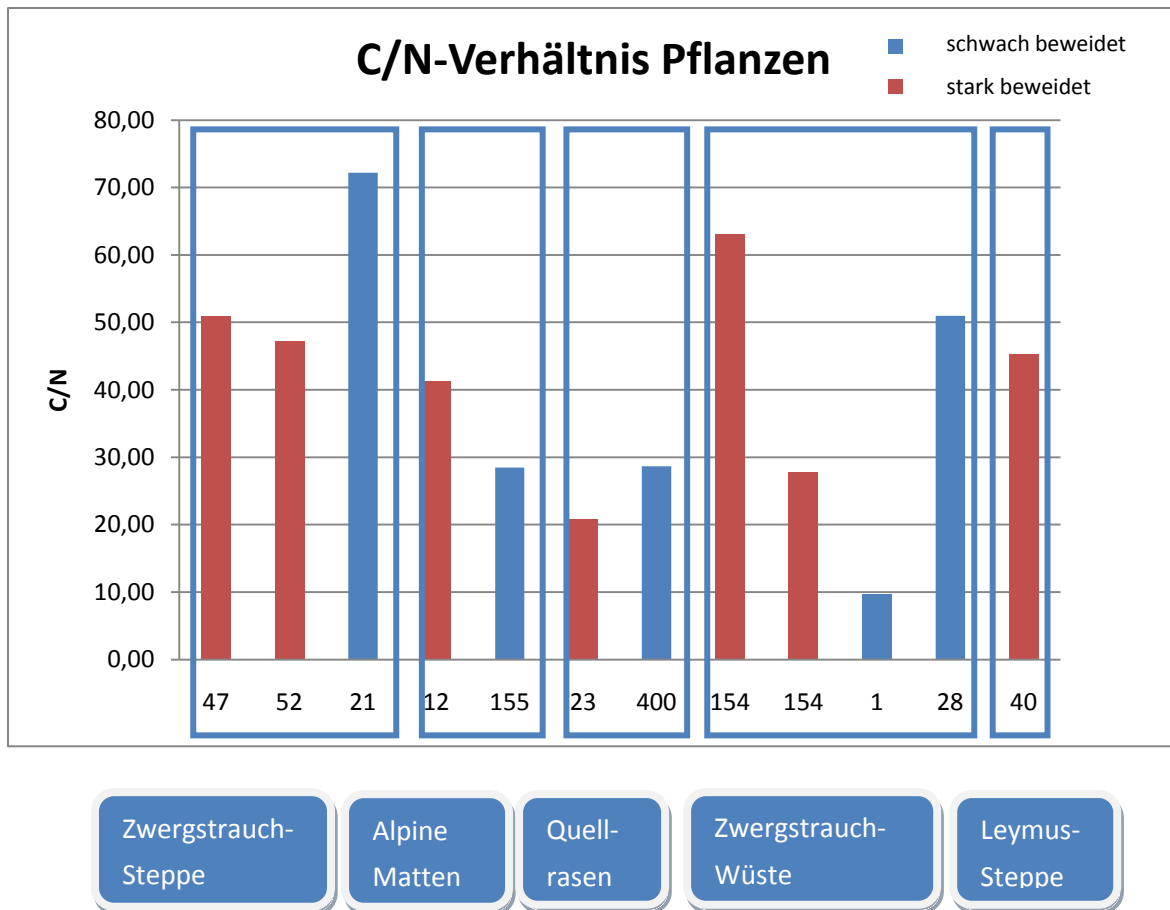


Abb. 48: C/N-Verhältnis der Pflanzen

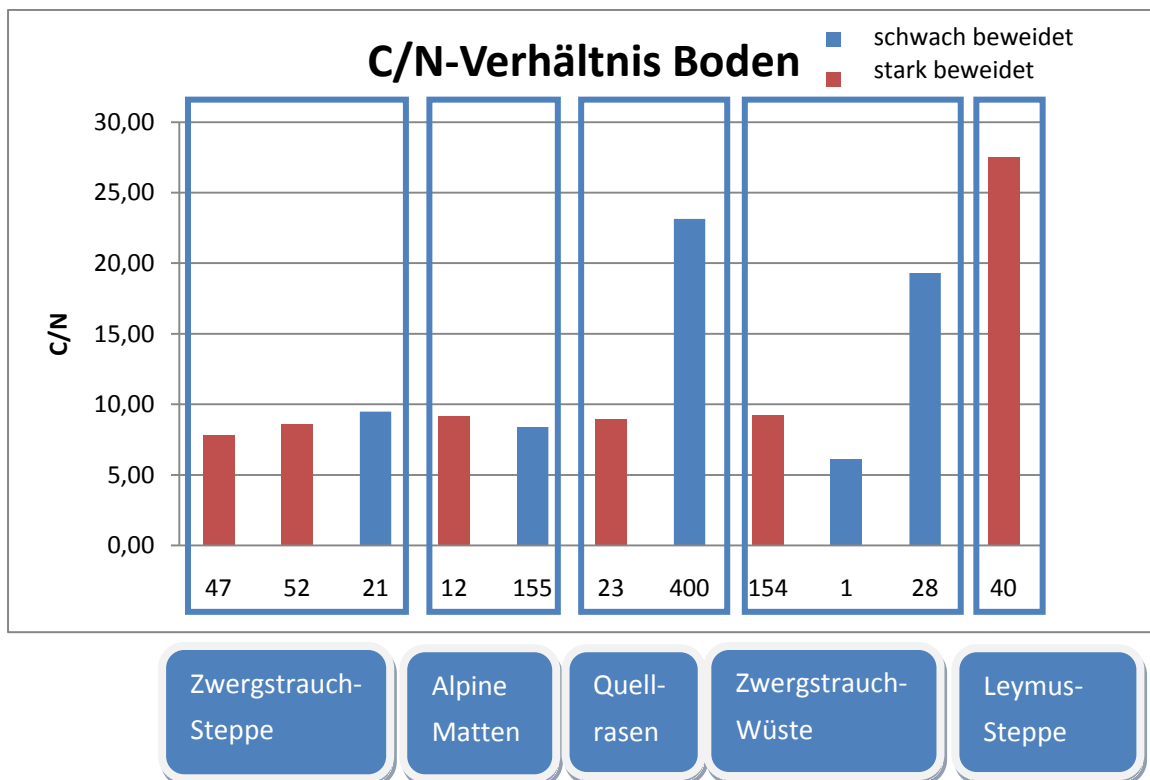


Abb. 49: C/N-Verhältnis der Bodenproben

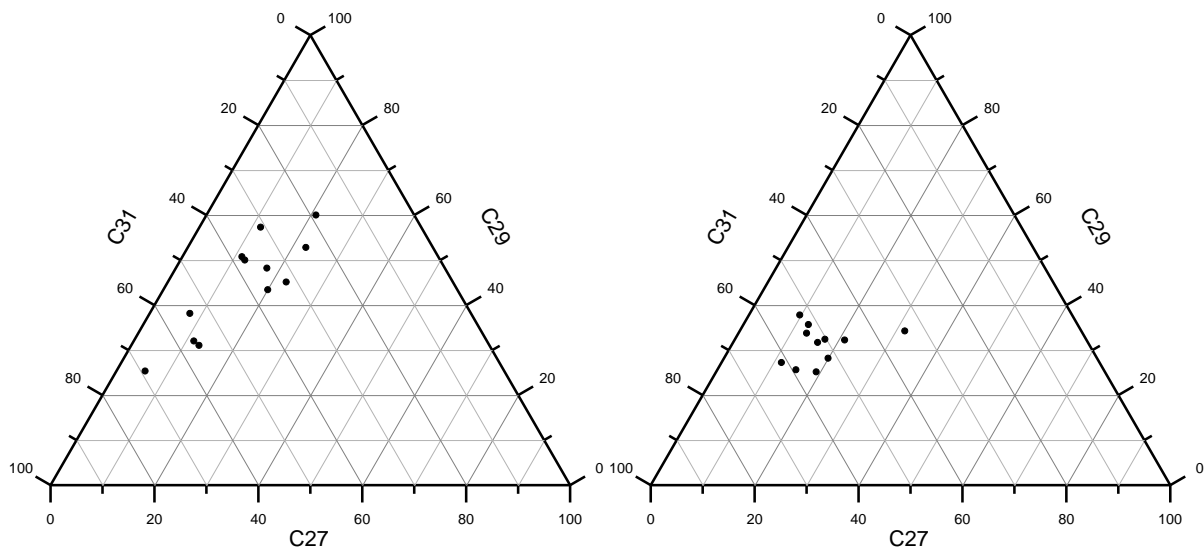
Bei der Analyse der Isotope wurde auch der organische Gesamtkohlen- bzw. Stickstoffgehalt bestimmt. Aus den ermittelten Werten lässt sich der Quotient des C/N-Verhältnisses bilden. Die C/N-Verhältnisse der Pflanzen zeigen durchschnittlich wesentlich höhere Werte als die der Böden (Abb. 48 und Abb. 49). Generell übersteigen die C/N-Verhältnisse der bestockenden Pflanzen die Quotienten der zugehörigen Böden. Nach

Tab. 24 lassen sich die Humusqualitäten der untersuchten Bodenproben überwiegend als sehr hoch einstufen. Probe 28 zeigt eine mittlere Humusqualität, Probe 400 eine geringe und Probe 40 eine sehr geringe. Dies ist insofern auffallend, da die Fläche 400 ein seit Sowjetzeiten unbeweideter Quellrasen ist. Eine Erklärung wäre die Akkumulation von organischem Material. Eine weitere Analyse in Erlangen ergibt allerdings mit 10,48 einen viel niedrigeren Wert. Dies zeigt deutlich die Auswirkung der Heterogenität des Stoffes Boden bei kleinen Einwaagemengen von nur 0,2 g.

### 5.3.11 Alkane

Terrestrische Pflanzen bauen in ihre kutinisierte Kutikula n-Alkane mit der allgemeinen Summenformel  $C_nH_{2n+2}$  und Kettenlängen zwischen C20 und C35 ein. Pflanzenbürtige n-Alkane in Böden sollten demnach ein ähnliches n-Alkanmuster zeigen, womit die vergangene Vegetation rekonstruiert werden kann (ZECH 2006). Anhand der Alkanmuster sollen unterschiedlich stark anthropogen beeinflusste Weidestandorte charakterisiert werden.

Die Zusammensetzung der Alkane ist für verschiedene Pflanzentypen charakteristisch und wird zur Rekonstruktion von Paläoumweltbedingungen herangezogen. Höhere Pflanzen werden meist von Alkanen mit Kettenlängen von 27, 29 und 31 Kohlenstoffatomen aufgebaut, die aus epikutikulären Wachsen stammen. Die Identität verschiedener Pflanzen kann durch ein Dreiecksdiagramm (Abb. 50, App. 25) ermittelt werden. C31 und C33 sind für Gräser und Kräuter charakteristisch, während verholzende Pflanzen vor allem aus C27 und C29 aufgebaut werden. Der unterschiedliche Aufbau der Alkane ist somit typisch für ihre spezifische Pflanzenherkunft. Die relative Abundanz dieser drei Alkane ist auch in Lipiden, die von Böden extrahiert wurden, zu finden. Folglich handelt es sich um pflanzenstämmige Biomarker im Boden (GLEIXNER 2005; ZECH & GLASER 2008).



**Abb. 50:** Relative Zusammensetzung der Alkane C27, C29 und C31 in Pflanzenproben (links) und Bodenproben (rechts)

Ein U-Test der Pflanzen- und Bodenproben gibt Aufschluss, ob die Stichprobe unabhängig von der Bodennutzung erfolgte (Tab. 35 und Tab. 36).

**Tab. 35:** U-Test für die Alkanmuster der Pflanzenproben

Statistik für Test <sup>b</sup>									
	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33
Mann-Whitney-U	15,000	14,000	15,000	14,000	14,000	15,000	14,000	14,000	15,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	1,000	,855	1,000	,855	,855	1,000	,855	,855	1,000
Exakte Signifikanz [2*(1-seitig Sig.)]	1,000 <sup>a</sup>	,931 <sup>a</sup>	1,000 <sup>a</sup>	,931 <sup>a</sup>	,931 <sup>a</sup>	1,000 <sup>a</sup>	,931 <sup>a</sup>	,931 <sup>a</sup>	1,000 <sup>a</sup>

a. Nicht für Bindungen korrigiert.

b. Gruppenvariable: Beweidung

Die Prüfgröße U des U-Testes liegt für alle Alkane der Pflanzenproben bei einem Signifikanzniveau von 5 % über dem kritischen Tabellenwert von  $U = 5$  für  $n_1 = 6$  und  $n_2 = 6$ . Analog liegen die ermittelten Signifikanzniveaus p alle über der 5 %-Grenze. Die Nullhypothese kann somit beibehalten werden. Es handelt sich also um nur eine Stichprobe, in der beweidete und unbeweidete Flächen zusammen enthalten sind. Der U-Test für die Bodenproben liefert das gleiche Ergebnis mit dem kritischen Tabellenwerten von  $U = 3$  für  $n_1 = 5$  und  $n_2 = 6$ .



Tab. 36: U-Test für die Alkanmuster der Bodenproben

Statistik für Test <sup>b</sup>									
	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33
Mann-Whitney-U	14,000	12,000	15,000	13,000	14,000	14,000	14,500	12,500	15,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,851	,545	1,000	,694	,854	,846	,927	,560	1,000
Exakte Signifikanz [2*(1-seitig Sig.)]	,931 <sup>a</sup>	,662 <sup>a</sup>	1,000 <sup>a</sup>	,792 <sup>a</sup>	,931 <sup>a</sup>	,931 <sup>a</sup>	,931 <sup>a</sup>	,662 <sup>a</sup>	1,000 <sup>a</sup>

a. Nicht für Bindungen korrigiert.

b. Gruppenvariable: Beweidung

Mittels eines H-Tests kann geprüft werden, ob die Alkanmuster für die einzelnen Vegetationseinheiten signifikant sind (Tab. 37 und Tab. 38). Getestet wurden die Unterschiede zwischen Quellrasen, Alpinen Matten, Steppen und Wüsten.

Tab. 37: H-Test für die Alkanmuster der Pflanzenproben

Statistik für Test <sup>a,b</sup>									
	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33
Chi-Quadrat	,288	1,058	5,904	5,519	4,673	4,962	5,519	5,192	3,981
df	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Asymptotische Signifikanz	,962	,787	,116	,137	,197	,175	,137	,158	,264

a. Kruskal-Wallis-Test

b. Gruppenvariable: Vegetationseinheit

Die  $\chi^2$ -Werte der Prüfgröße für die Pflanzenproben liegen alle unter dem Tabellenwert von 7,815 für  $df = k-1 = 3$  und  $\alpha = 5\%$ . Analog liegen die ermittelten Signifikanzniveaus  $p$  alle über der 5 %-Grenze. Dies bedeutet, dass die  $H_0$ -Hypothese „es handelt sich um nur eine Stichprobe“ beibehalten werden kann. Diese Aussage gilt auch für die untersuchten Bodenproben.

Tab. 38: H-Test für die Alkanmuster der Bodenproben

Statistik für Test <sup>a,b</sup>									
	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33
Chi-Quadrat	5,417	2,394	3,598	4,530	5,235	4,394	3,939	2,121	1,758
df	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Asymptotische Signifikanz	,144	,495	,308	,210	,155	,222	,268	,548	,624

a. Kruskal-Wallis-Test

b. Gruppenvariable: Vegetationseinheit

Die Korrelationen innerhalb der n-Alkane (App. 26 und App. 27) zeigen sowohl für die Pflanzen als auch die Bodenproben hohe Korrelationskoeffizienten auf signifikanten

Niveaus. C32 weicht etwas ab: hier sind die Korrelationen nicht so hoch bzw. nicht so signifikant. Im Zusammenhang mit der Beweidungsintensität kann allerdings keine signifikante Korrelation festgestellt werden.

Die OEP (*odd-over-even predominance*) wurde nach folgender Formel [9] berechnet:

$$\text{OEP} = \frac{(C25+C27+C29+C31+C33)}{(C26+C28+C30+C32)} \quad [9]$$

Langkettige Alkane mit einer starken OEP sind für Wachse höherer Pflanzen charakteristisch. Durch chemische Degradation nimmt die OEP im Boden ab; gleichzeitig nehmen die geradzahligen Alkane relativ gesehen zu. Hierbei werden vor allem die Maxima stark abgebaut. Erfolgt kein Abbau, so reichern sich Alkane relativ im Boden an. Die Alkane könnten dann von Mikroorganismen stammen (ZECH & GLASER 2008). Eine solche Zunahme der OEP ist allerdings nur bei Probe 400 der Fall (Tab. 39 und Abb. 51).

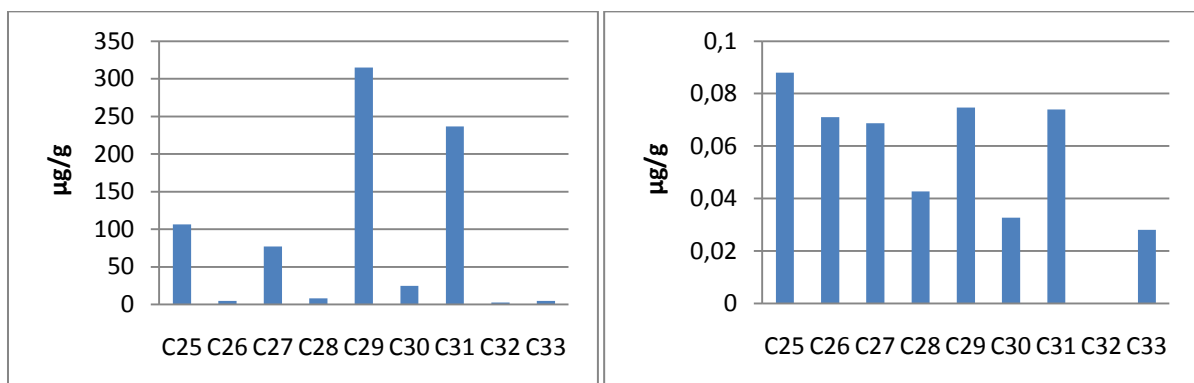
Tab. 39: OEP

Pflanzenprobe	OEP Pflanzen	Bodenprobe	OEP Boden
1	18,26	1	2,28
12	15,47	12	8,04
21	13,15	21	6,86
23	10,11	23	7,80
28	10,09	28	5,28
40	13,07	40	4,97
47	15,72	47	5,86
52	12,86	52	4,44
154	9,94	154	8,61
154	16,68	154	8,61
155	15,34	155	9,65
400	10,61	400	11,27



Abb. 51: OEP

Die folgenden Säulendiagramme (Abb. 52 bis Abb. 62, App. 25) setzen die gemessenen n-Alkankonzentrationen in Relation zum eingewogenen Pflanzen- bzw. Bodenmaterial. In der Farbe Blau sind eher unbeweidete Flächen, in Rot überweidete Flächen dargestellt.

Abb. 52: links: Pflanzenprobe 1 (Teresken-Wüste mit *Christolea* und *Zygophyllum*, mäßig beweidet); rechts: Bodenprobe 1

Die Pflanzenprobe 1 „Frühjahrsteresken“ zeigt relative Maxima für die C27 und C29-Alkane (Abb. 52). Dies deutet auf Verholzung hin. In der dazugehörigen Bodenprobe nimmt die OEP mit der chemischen Degradation ab. Allerdings gewinnen die kürzerkettigen Alkane prozentual an Bedeutung. Dies kann auf einen Input von Wurzel- oder mikrobieller Biomasse sowie auf Biodegradation zurückzuführen sein.

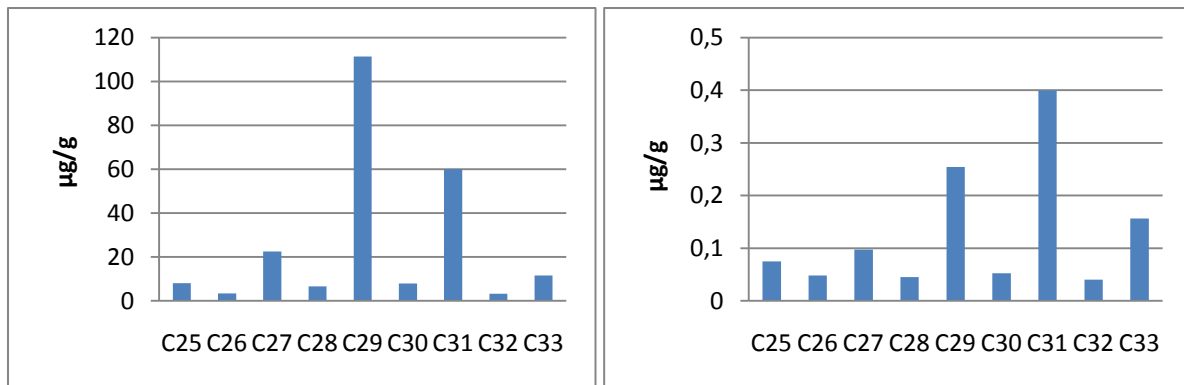


Abb. 53: links: Pflanzenprobe 28 (trockenes Flussbett mit Wüstenvegetation, dominant *Artemisia-Dracocephalum*-Wüste, schwach beweidet); rechts: Bodenprobe 28

Die hohen Konzentrationen von C27 und C29 deuten auf eine Dominanz verholzter Pflanzen in Pflanzenprobe 28 hin (Abb. 53). Die OEP wird mit chemischer Degradation im Boden abgebaut; hier sind C31 und C33 dominanter, was mit mikrobiellen Inputs oder der Zufuhr von Wurzelmaterial sowie Biodegradation zusammenhängen könnte.

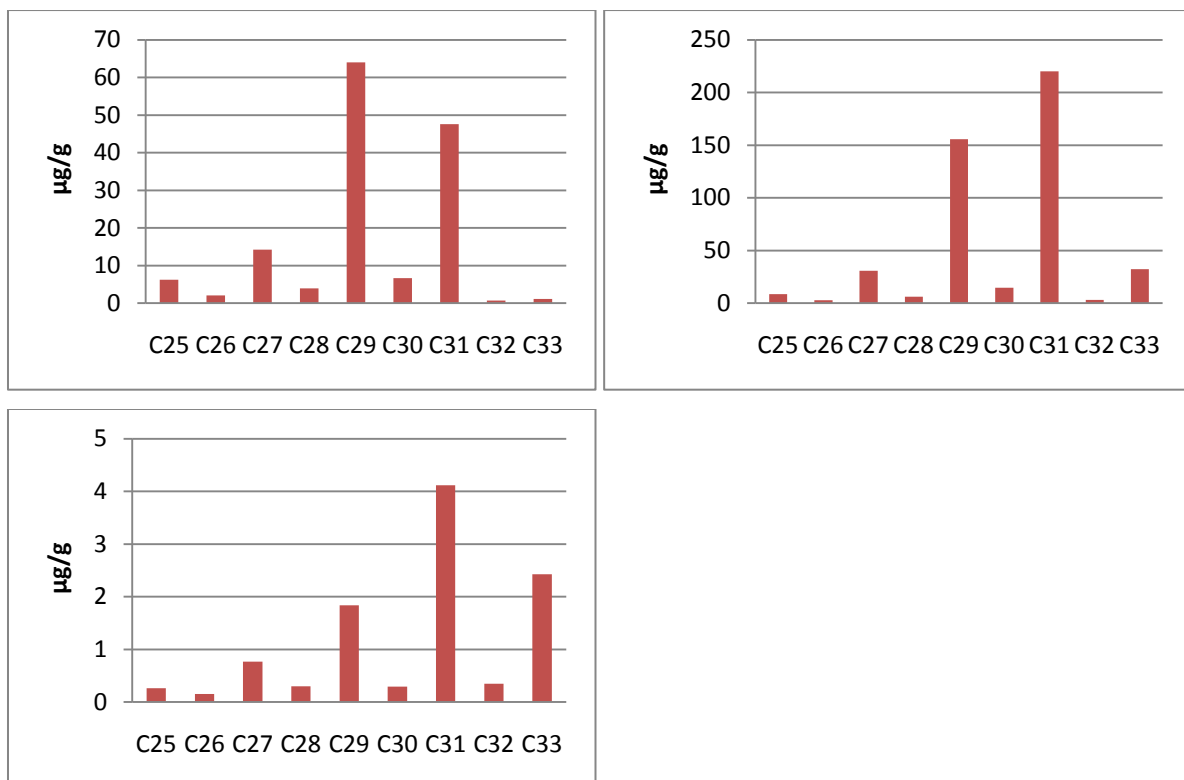


Abb. 54: oben links: Pflanzenprobe 154 (Teresken-Wüste mit *Kraschinnikovia ceratoides*, stark beweidet); oben rechts: Pflanzenprobe 154 (Teresken-Wüste mit *Kraschinnikovia ceratoides*, *Christolea* und *Zygophyllum*, stark beweidet); unten: Bodenprobe 154

Da es sich um Pflanzenmischproben handelt, sind sowohl C27 und C29 für verholzte Pflanzen als auch C31 und C33 (Abb. 54) für Gräser dominant. In der Bodenprobe dominieren C31 und C33.

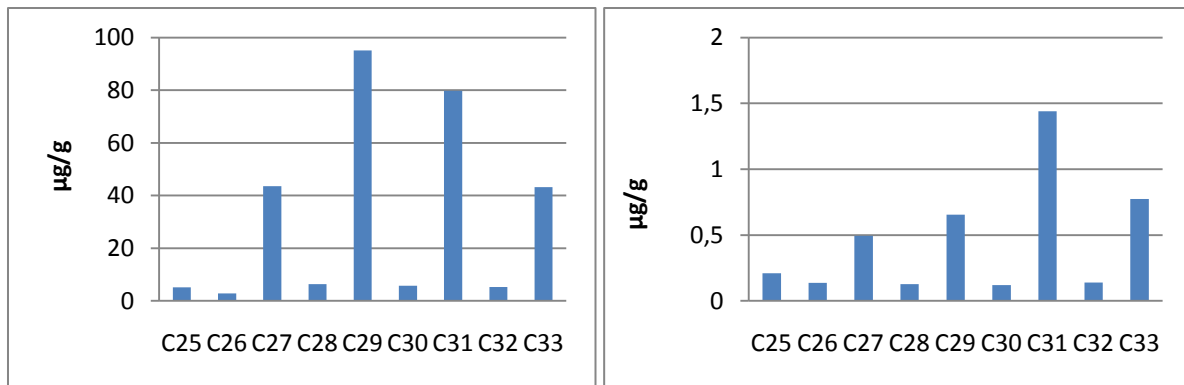


Abb. 55: links: Pflanzenprobe 21 (Zwergstrauch-Steppe mit *Seriphidium leucotrichum*, schwach beweidet) rechts: Bodenprobe 21

Die Dominanz von C27 und C29 der Pflanzenprobe 21 spricht für verholzte Pflanzen (Abb. 55); im Boden erscheint aber ein Signal von C31 und C33, vergleichbar mit Bodenprobe 28. Die Abnahme der OEP durch chemische Degradation ist im Boden gegeben.

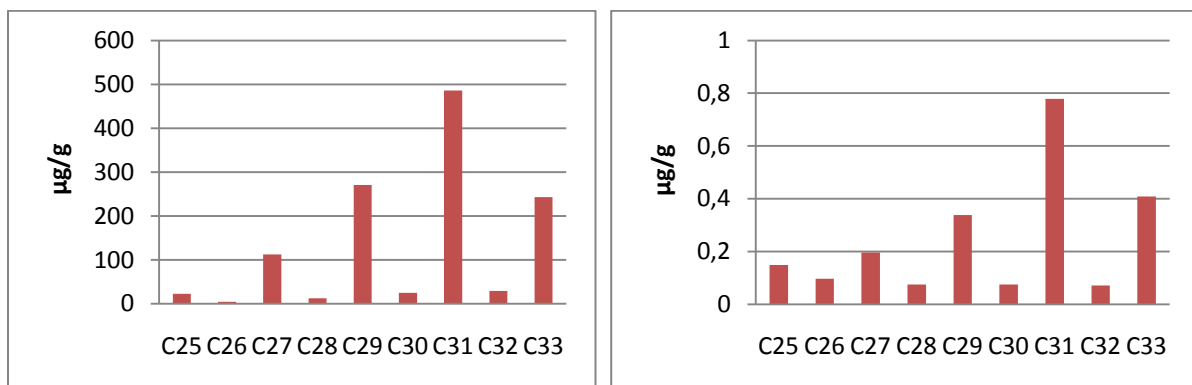


Abb. 56: links: Pflanzenprobe 47 (Zwergstrauch-Steppe mit *Seriphidium leucotrichum* und *Kraschinnikovia ceratoides*, stark beweidet); rechts: Bodenprobe 47

Die Pflanzenmischprobe 47 enthält viele Gräser (*Stipa*, *Hordeum*, *Elymus*, *Festuca*), was sich in der Dominanz von C31 und C33 widerspiegelt (Abb. 56). Diese ist auch in der zugehörigen Bodenprobe 47 erhalten, wobei die OEP wegen der chemischen Degradation dezimiert ist.

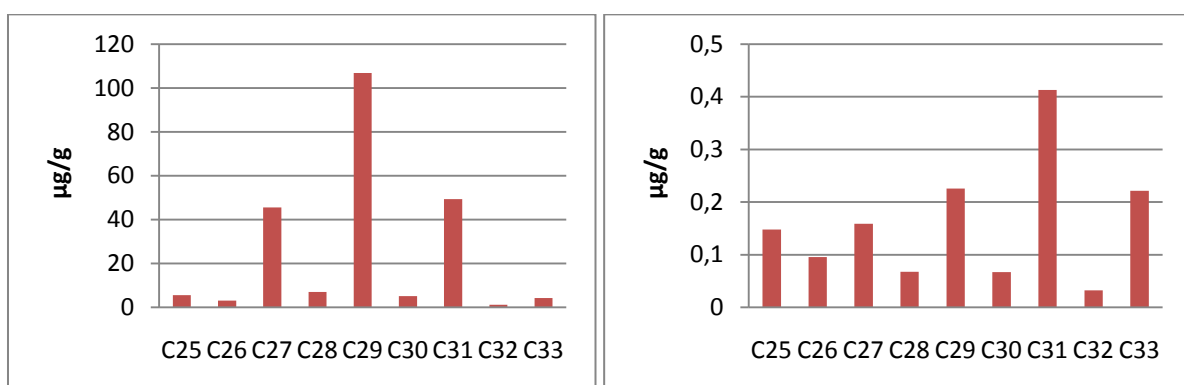


Abb. 57: links: Pflanzenprobe 52 (Zwergstrauch-Steppe mit *Xylanthemum pamiricum* und *Seriphidium leucotrichum*, stark beweidet); rechts: Bodenprobe 52

Die Pflanzenprobe 52 lässt aufgrund der Dominanz von C27 und C29 auf verholzte Pflanzen schließen (Abb. 57); dies entspricht der durch *Xylanthemum pamiricum* und *Seriphidium leucotrichum* vertretenen Zwergstrauch-Steppe. Die beigeordnete Bodenprobe 52 bestätigt einen Abbau der totalen Alkan-Konzentration unter besonderer Berücksichtigung der Maxima der Kettenlängen C27 und C29. Dies manifestiert sich in einer Abnahme der OEP.

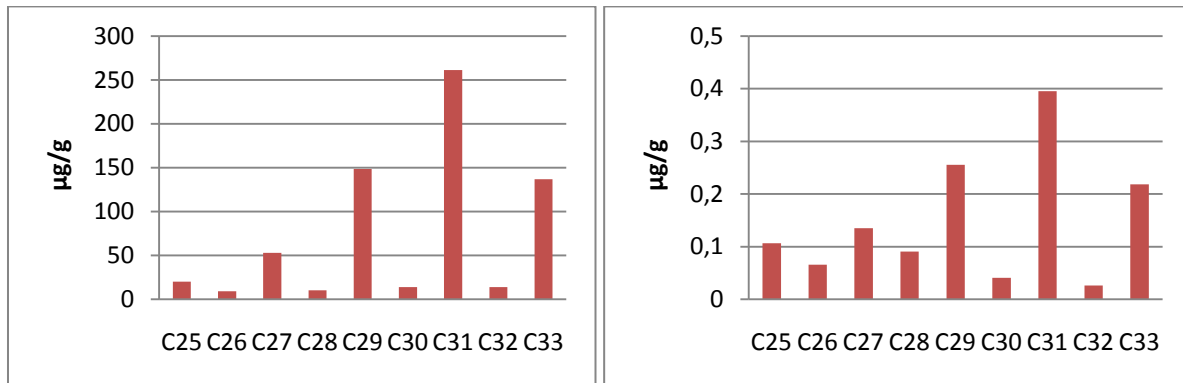


Abb. 58: links: Pflanzenprobe 40 (Leymus-Steppe, stark beweidet); rechts: Bodenprobe 40

Ein Charakteristikum für Gräser zeigt die Pflanzenprobe 40 durch die Dominanz von C31 und C33 (Abb. 58). Die OEP wird im darunterliegenden Boden in Bodenprobe 40 abgebaut.

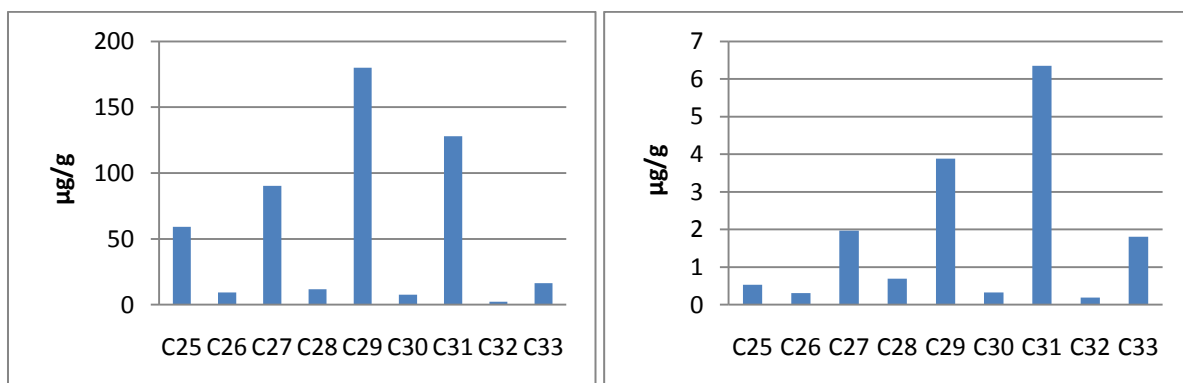


Abb. 59: links: Pflanzenprobe 155 (Alpine Matten, schwach beweidet); rechts: Bodenprobe 155

Die Pflanzenprobe 155 zeigt Maxima von C27 und C29, was nicht mit der Tatsache konform geht, dass die Probe vor allem aus Gräsern und Kräutern besteht (Abb. 59). Dominant ist vor allem *Oxytropis platonychia*, eine stickstoffbindende Fabaceae. Die OEP nimmt in der zugehörigen Bodenprobe 155 ab.

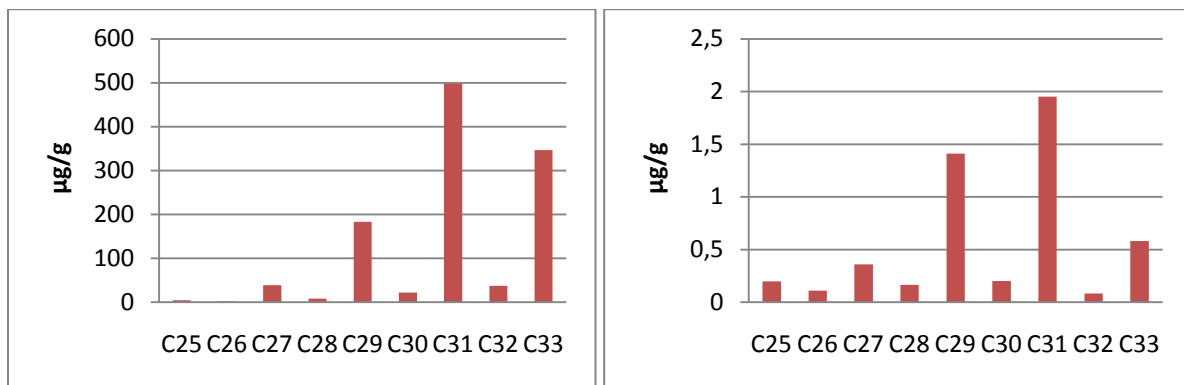


Abb. 60: links: Pflanzenprobe 12 (Alpine Matten, stark beweidet); rechts: Bodenprobe 12

Die Pflanzenprobe 12 zeigt eine Dominanz von C31 und C33, was für Gräser spricht (Abb. 60). In der entsprechenden Bodenprobe 12 wird die OEP abgebaut, die Dominanz von C31 und C33 bleibt jedoch erhalten.

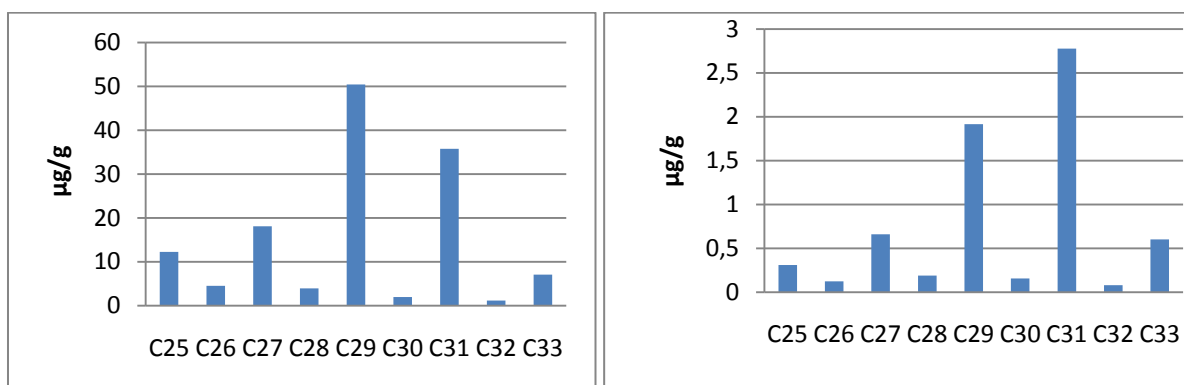


Abb. 61: links: Pflanzenprobe 400 (Quellrasen, unbeweidet); rechts: Bodenprobe 400

Die Pflanzenprobe 400 zeigt eine leichte Dominanz von C27 und C29, was für verholzte Pflanzen spricht (Abb. 61). Diese sind für einen Quellrasen eher uncharakteristisch. Die verwandte Bodenprobe 400 zeigt mit einer C31 und C33 Dominanz die Eigenschaften der Biomarker von Gräsern. Eine weitere Auffälligkeit ist die Zunahme der OEP in der Bodenprobe 400.

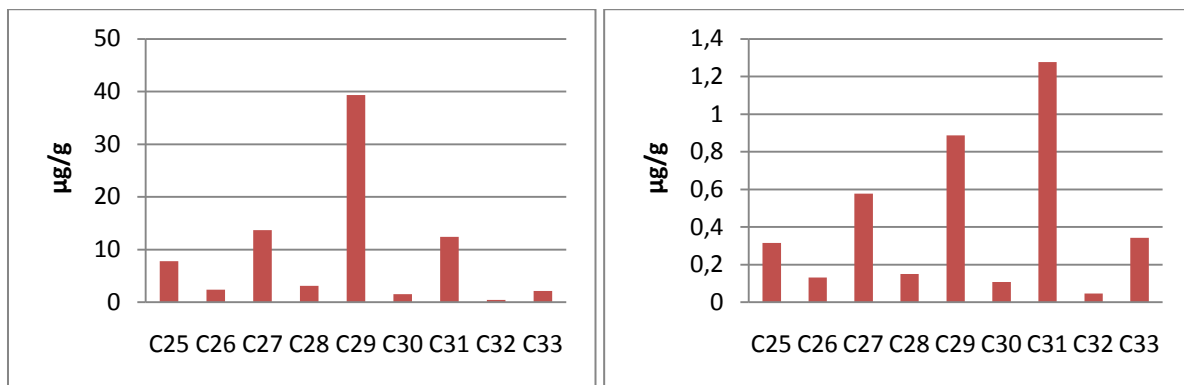


Abb. 62: links: Pflanzenprobe 23 (Quellrasen, stark beweidet); rechts: Bodenprobe 23

Auch der Quellrasen der Pflanzenprobe 23 zeigt das verholzende Signal der Dominanz von C27 und C29 (Abb. 62). Anders als bei der Bodenprobe 400, ist in der Bodenprobe 23 eine Abnahme der OEP zu verzeichnen. Im zugehörigen Boden ist wieder eine auf Gräser deutende C31 und C33 Dominanz erkennbar (Abb. 62).

#### 5.4 Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse dient der Dimensionsreduktion. Die im Labor untersuchten Bodenparameter (App. 28) werden anhand von Pfeilen dargestellt. Die erste Komponente ist die wichtigste; sie beschreibt den größten Teil der Gesamtinformation. Infolge des Kaiserkriteriums ist es nur sinnvoll zwei Komponenten zu extrahieren. Die Standardabweichung zeigt hierbei die Quadratwurzel der jeweiligen Eigenwerte, die als Säulen in Abb. 63 dargestellt sind. Die erste Hauptkomponente erklärt also 50,91 % der Gesamtvarianz, die zweite 29,77 % und die dritte nur noch 9,67 % (Tab. 40).

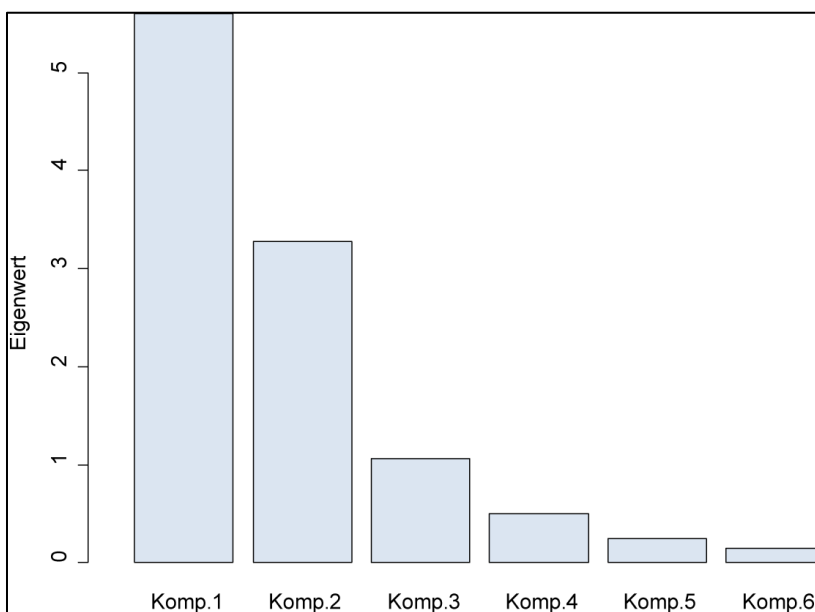


Abb. 63: Eigenwerte der ersten sechs Hauptkomponenten



Tab. 40: Zusammenfassung der extrahierten Hauptkomponenten

	Komp.1	Komp.2	Komp.3	Komp.4	Komp.5	Komp.6
<b>Standardabweichung</b>	2,3664	1,8095	1,0312	0,7115	0,4983	0,3817
<b>Varianzanteil</b>	0,5091	0,2977	0,0967	0,0460	0,0226	0,0132
<b>Kumulativer Anteil</b>	0,5091	0,8067	0,9034	0,9494	0,9720	0,9852

Die Parameter  $N_{\text{tot}}$  und  $C_{\text{org}}$ , sowie die aus ihnen resultierenden Variablen C/N und Humus, sind mit der ersten Hauptkomponente korreliert (Abb. 64). Auch der Schluff wird durch die erste Hauptkomponente erklärt. Die Vektoren unkorrelierter Variablen stehen senkrecht aufeinander. Die zweite Hauptkomponente vereint vor allem Informationen aus der Körnung, sowie dem pH-Wert, dem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt und der Leitfähigkeit. Bei der Bodenart sind die feineren Fraktionen aus Schluff und Ton den Grobfraktionen Sand und Skelett genau entgegengesetzt orientiert. Dies bedeutet, ihre Werte schließen sich tendenziell aus, sind also negativ korreliert. Die Leitfähigkeit besitzt dieselbe Orientierung wie die feinen Korngrößen. Die Bodenacidität zeigt sich stark korreliert mit dem Kalkgehalt. Die Messwerte der Bodenvariablen lassen eine teilweise starke Korrelation und eine mögliche Reduktion auf wenige Hauptgradienten erkennen. Nach LEYER & WESCHE (2007) sind Ladungen ab einem Betrag von 0,3 in die Interpretation mit einzubeziehen (Tab. 41).

Tab. 41: Ladungen der Komponenten

	Komp.1	Komp.2	Komp.3	Komp.4	Komp.5	Komp.6
<b>Leitfähigkeit</b>		-0.479	0.252	-0.527		0.155
<b>pH</b>	-0.241	-0.341		0.601	-0.640	
<b>Skelett</b>		0.238	-0.828	-0.217	-0.337	
<b>Sand</b>	-0.292	0.375	0.204			0.313
<b>Schluff</b>	0.310	-0.334	-0.180			-0.638
<b>Ton</b>	0.180	-0.421	-0.350	0.152	0.350	0.619
<b><math>\text{CaCO}_3</math></b>	-0.260	-0.383		-0.395	-0.306	
<b><math>C_{\text{org}}</math></b>	0.414				-0.221	0.125
<b><math>N_{\text{tot}}</math></b>	0.407			-0.191		0.216
<b>C/N</b>	0.381	0.108	0.161	0.293	-0.383	
<b>Humus</b>	0.414				-0.220	0.123

Die PCA zeigt, dass in die im weiteren Schritt aus denselben Daten (App. 28) berechnete Clusteranalyse redundante Informationen einfließen.

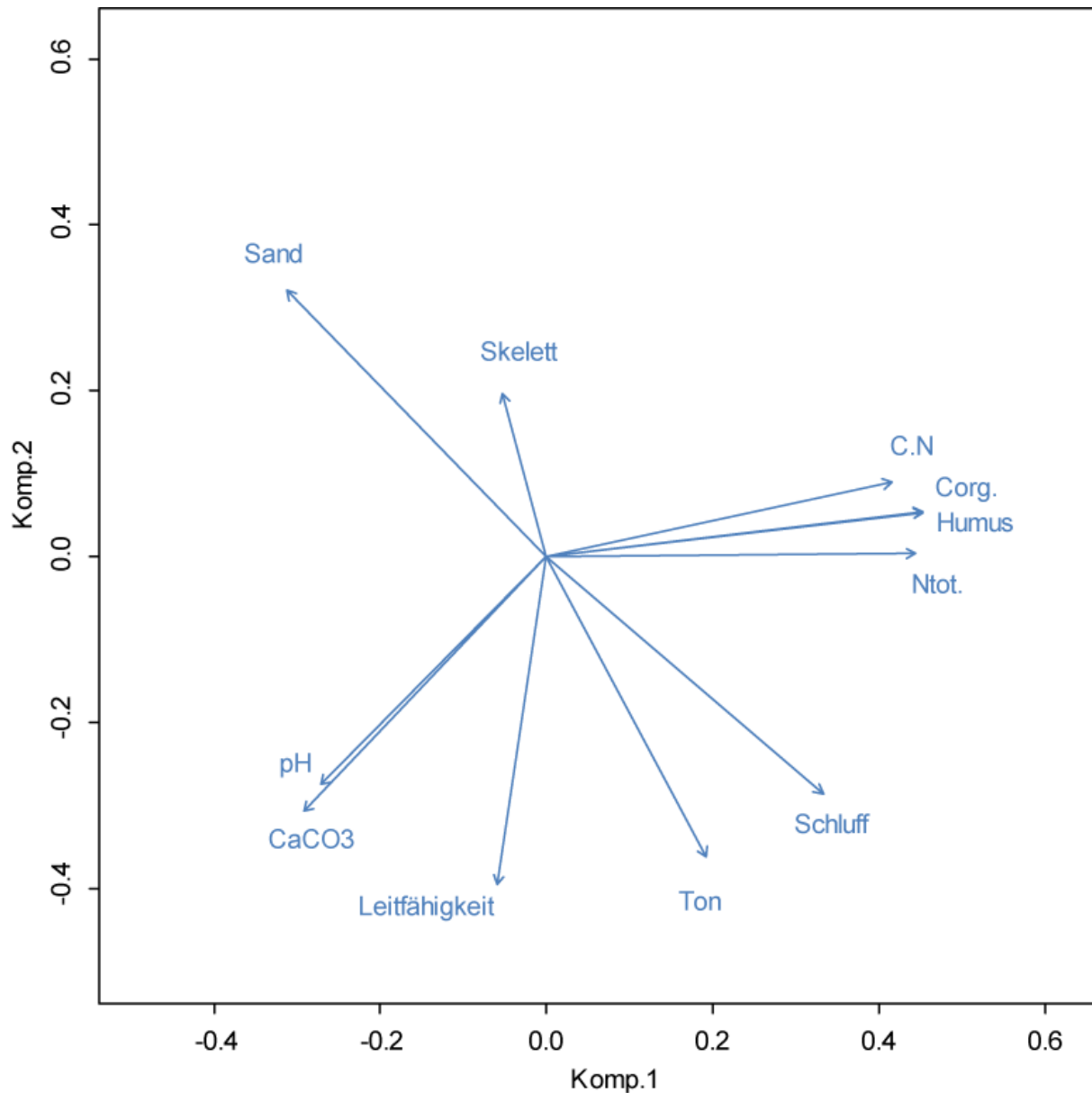


Abb. 64: Ordinationsdiagramm der Bodenlaborparameter für  $n = 125$  Mischproben unter Verwendung einer PCA

### 5.5 Clusteranalyse

Das Klassifikationsverfahren kann herangezogen werden um Gruppen von verschiedenen Bodentypen auszuweisen (Abb. 65). Als Variablen werden in der vorliegenden Clusteranalyse die Bodenparameter elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Skelettgehalt, die Korngrößen Sand, Schluff und Ton, organischer Kohlenstoffgehalt, Stickstoffgehalt, C/N-Verhältnis,  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt und Humusgehalt verwendet (App. 28). Der Stichprobenumfang umfasst  $n = 125$  Mischproben. Die Länge der Äste des Diagramms ist ein Maß für die Unähnlichkeit, also die Distanz zwischen den einzelnen Aufnahmen. Die Reihenfolge der Objekte im Dendrogramm ist unerheblich. Die Clusteranalyse verwendet diskrete Kategorien mit einer linearen Grenze zwischen räumlich definierten Gruppen (EAST

1987). Die Klassifikation der Leitprofile erfolgt nach der World Reference Base for Soil Resources (WRB) (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE 2007).

Es ergibt sich eine Struktur von 9 Gruppen bei einer Ähnlichkeitsstufe von 15. In Gruppe 1 clustern sich die Arenosole, deren Gruppenstruktur durch ähnliche pH-Werte zustande kommt, was sich auf das silikatische Ausgangsgestein zurückführen lässt. Die Aufnahmeflächen dieser Gruppe liegen vorwiegend im Beispieltal Bash Gumbez, als Vegetationseinheit dominiert Zwergstrauch-Polster-Steppe (Typ *Seriphidium*). Cluster 2 fasst die Zwergstrauch-Polster-Steppe (Typ *Seriphidium*) sowie zwei Ausreißer mit Quellrasen, Fläche 176 und 123, zusammen. Hierzu gehören Vertreter der Bodentypen Arenosol, Leptosol und Regosol. Im Untersuchungsgebiet sind sie lokal vor allem bei Alichur im Südwesten des Untersuchungsgebietes zu finden. Die kleine Gruppe 3 ist eine Wüstengruppe mit Leptosolen. Als Cluster 4 schließt sich eine weitere Gruppe mit Leptosolen unter Wüstenvegetation an. Gruppe 5 ist durch Leptosole gekennzeichnet, die hohe Skelettanteile aufweisen. Eine Zuordnung zur Vegetationseinheit der Felsvegetation ist hier gegeben. Cluster 6 umfasst mit seinen Chernozemen die Quellrasen. Räumlich dominiert hier das Pshart Gumbez Kol Tal. In Gruppe 7 zeichnen sich Sonderstandorte mit hohen elektrischen Leitfähigkeiten und damit hohen Salzgehalten ab. Als Bodentyp können hierfür hypersaline Regosole ausgewiesen werden. Als Cluster 8 lassen sich Kastanozeme zusammenfassen, unter die sich jedoch auch eine Untergruppe von jungen Leptosolen unter Zwergstrauch-Polster-Steppe (Typ *Seriphidium*) mischt, die durch einen vergleichsweise hohen Humusgehalt charakterisiert werden kann. Gruppe 9 klassifiziert Wüsten und Zwergstrauchwüsten mit Leptosolen im Übergang zur Zwergstrauch-Polster-Steppe (Typ *Krascheninnikovia*). Durch fortschreitende Bodenentwicklung können sich hierbei Cambisole bilden. Diese Gruppe beinhaltet mit Fläche 400 und 38 zwei Ausreißer der Quellrasen.

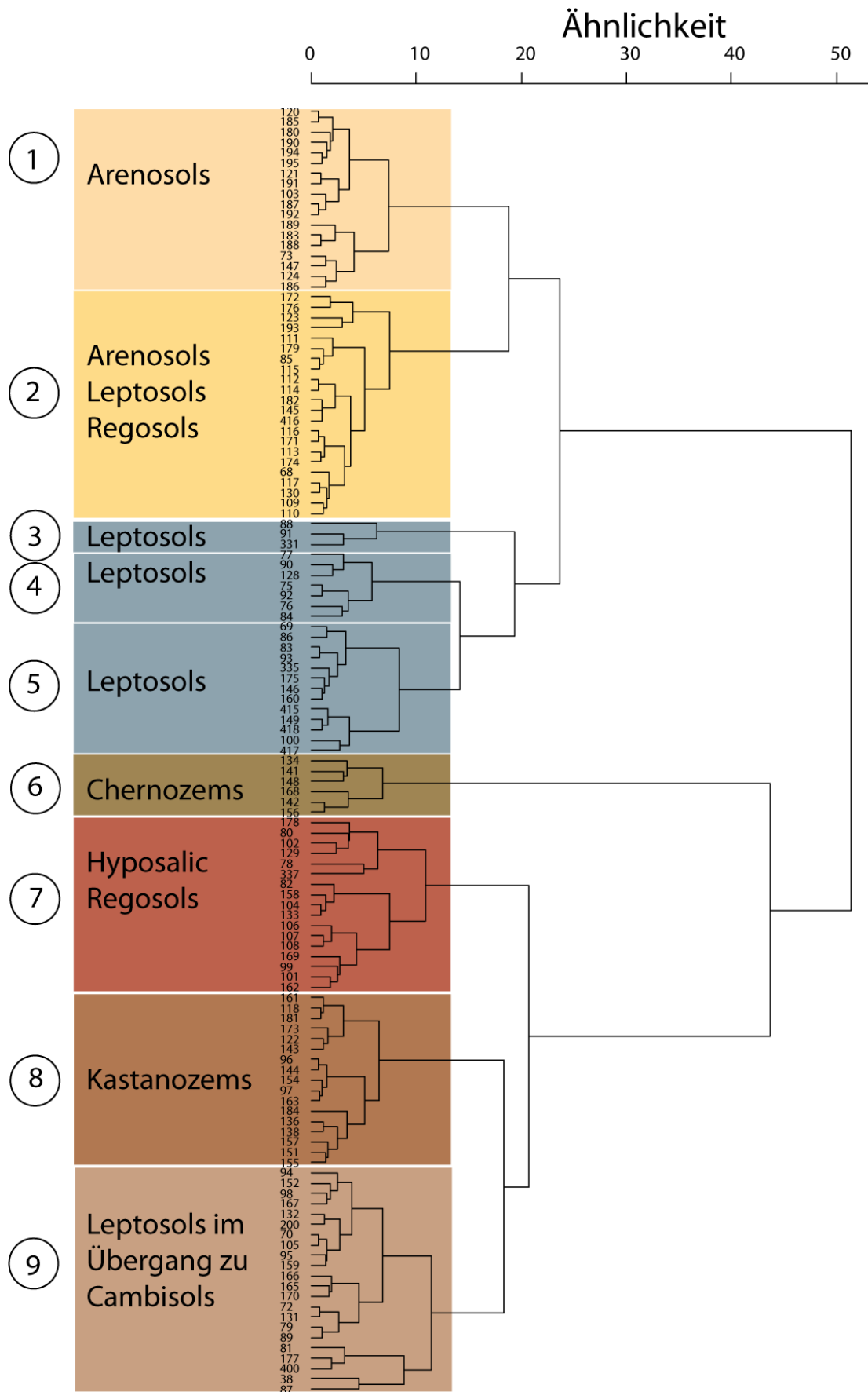


Abb. 65: Clusteranalyse der 11 Bodenvariablen für n = 125 Flächen

## 5.6 Charakteristische Leitprofile

### 5.6.1 Arenosole

Arenosole sind sandige Böden, die kaum eine Profildifferenzierung besitzen (Abb. 66). Auf ihnen dominiert Zwergstrauch-Polster-Steppe (Typ *Seriphidium*). Lokal kommen sie vor allem auf silikatreichem Ausgangsmaterial im Beispieltal Bash Gumbez vor.

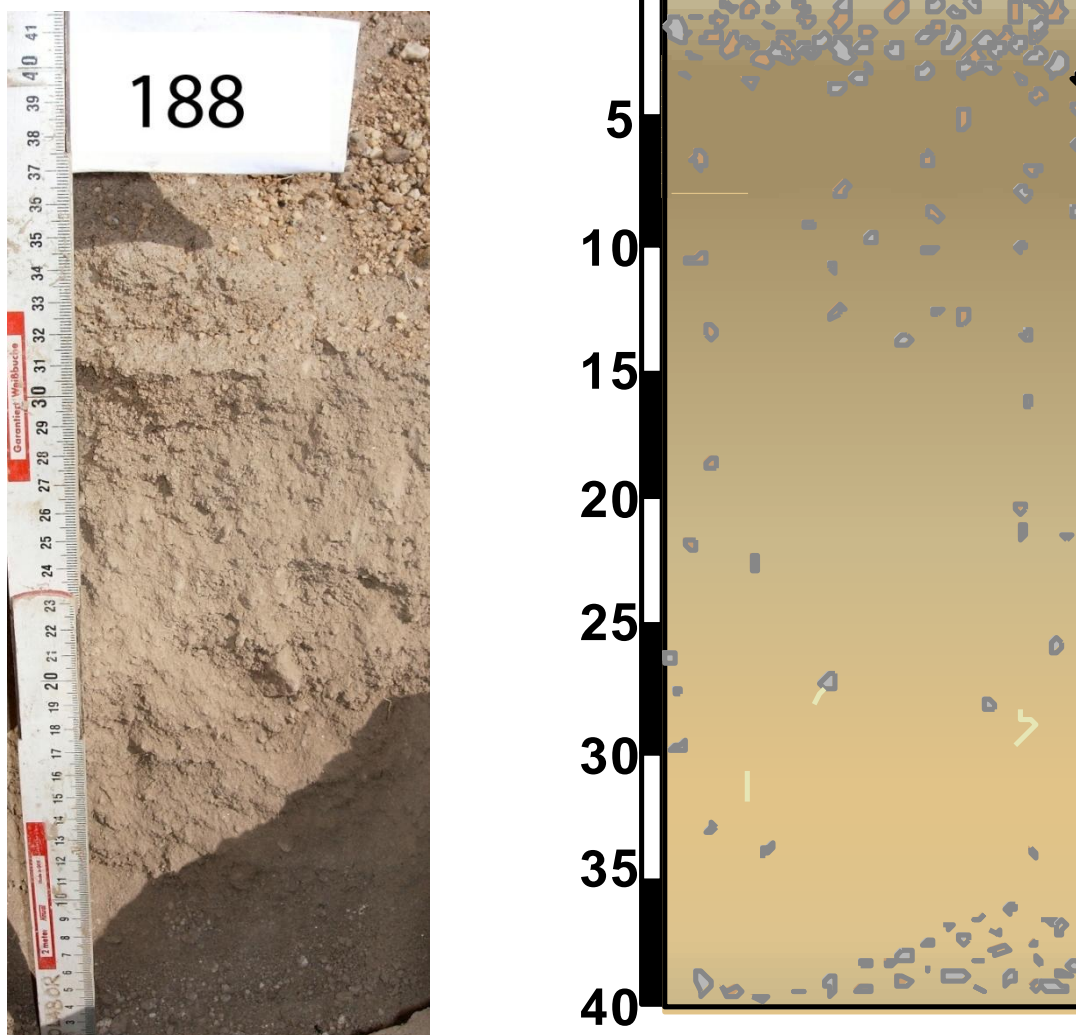


Abb. 66: Arenosol

### 5.6.2 Leptosole

Leptosole sind sehr flachgründige bzw. extrem skelettreiche azonale Böden. Sie treten vor allem an steilen Hängen mit Felsgestein auf (Abb. 67 und Abb. 68). Neben der Felsvegetation sind die zugehörigen Vegetationseinheiten vor allem Wüsten und Wüstensteppen, unter denen sich *Yermic*-Horizonte mit Wüstenpflastern bilden. Auf kalkhaltigem Ausgangsmaterial entwickeln sich *Rendzic Leptosole*. Das Beispielprofil Abb. 68 zeigt eine Entwicklung auf Schiefer in plattiger Verwitterung; eine starke Abgrenzung des unteren Horizontes mit deutlich mehr Feuchtigkeit ist sichtbar.

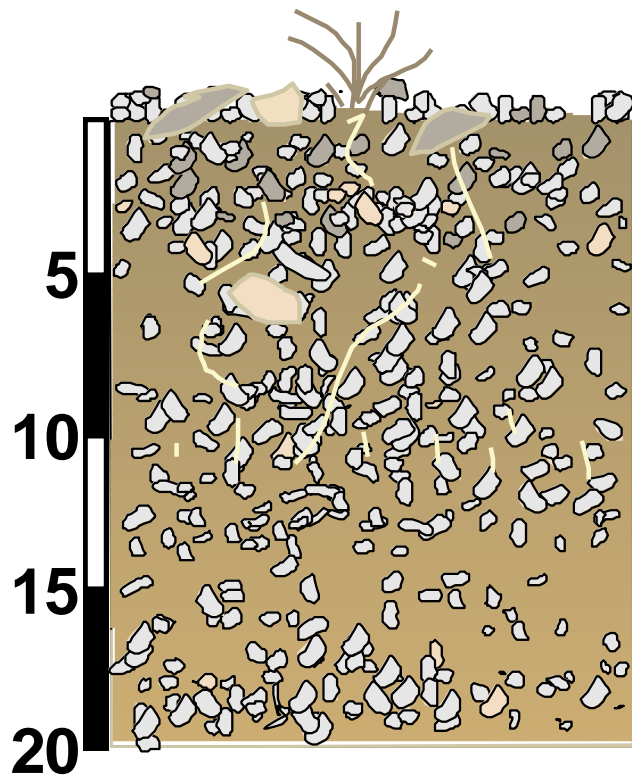


Abb. 67: Leptosol auf Carbonatgestein

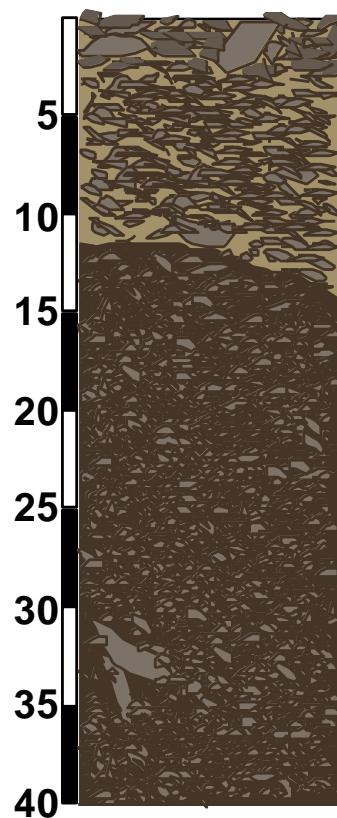


Abb. 68: Leptosol auf Tonschiefer

### 5.6.3 Regosole

Regosole zeigen nur eine initiale Bodenbildung auf Lockergestein (Abb. 69). Sie weisen *Calcaric*-, *Takyric*-, *Ardic*- und *Hyposalic*-Eigenschaften auf. Die Leitfähigkeiten erreichen nicht den Schwellenwert der Solonchaks von  $15 \text{ mS cm}^{-1}$ . Die Gruppenstruktur der Clusteranalyse definiert sich aber vor allem über die hohen Leitfähigkeiten und damit hohen Salzgehalte. Das Beispielprofil 162 zeigt einen deutlichen *Yermic*-Horizont mit Schaumgefügen (*vesicular layer*).

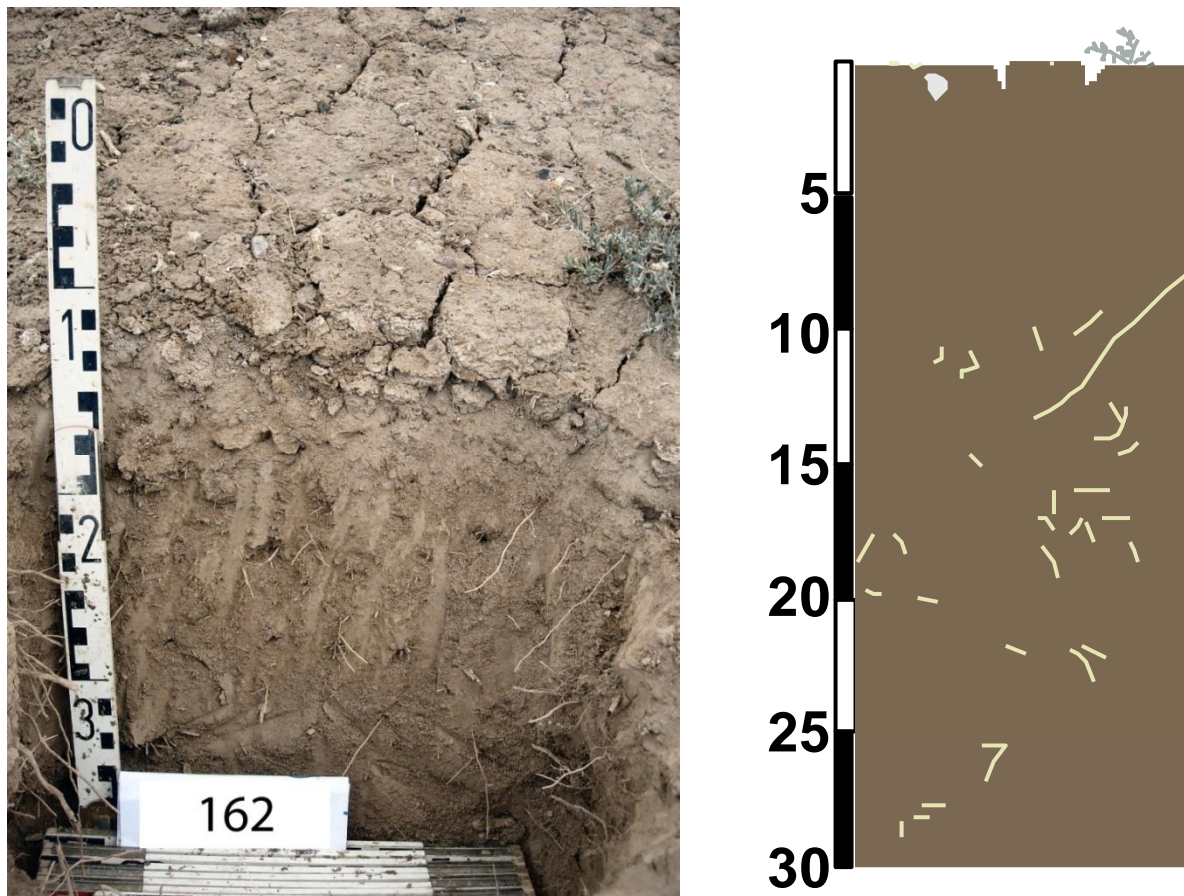


Abb. 69: Regosol

#### 5.6.4 Chernozeme

Die Chernozeme weisen einen dunklen *Mollic*-Horizont sowie einen hohen Basenstatus auf (Abb. 70). Ihr Vorkommen ist lokal begrenzt auf die Quellrasen entlang der Bäche und Flüsse. Sie sind vergleichsweise stark durchwurzelt. Teilweise tritt Versalzung, desweiteren auch Kryoturbationserscheinungen mit Thufuren, sowie Vergleyung auf. Durch ihre Auelage können *Fluvic*-Horizonte in Erscheinung treten. Die tiefen Temperaturen und die kurze Vegetationsperiode im Ostpamir hemmen den Abbau von organischer Substanz.

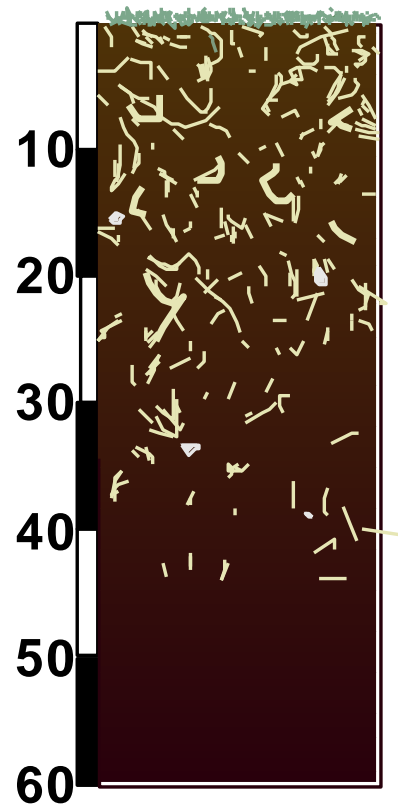


Abb. 70: Chernozem



### 5.6.5 Kastanozeme

Kastanozeme sind flachgründiger als Chernozeme. Auf ihnen stocken Alpine Matten mit krautreichen Wiesen, die sich im Gegensatz zu den Quellrasen nicht in den Tiefenlinien befinden, sondern eher an den Hängen und somit einem geringeren Grundwassereinfluss unterliegen. Der *mollic* A-Horizont ist nicht so dunkel wie bei den Chernozemen, sondern besitzt eine kastanienbraune Farbe (Abb. 71).

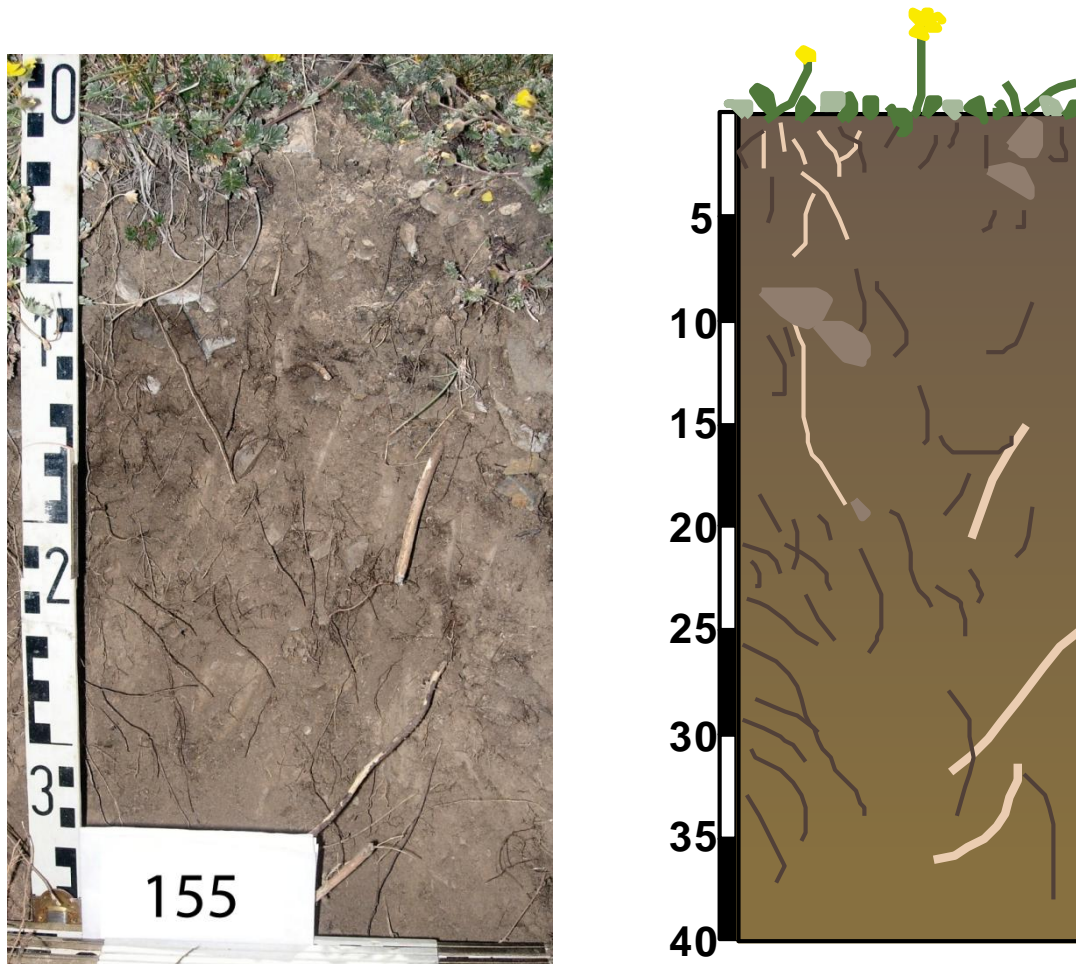


Abb. 71: Kastanozem

### 5.6.6 Cambisole

Kennzeichnend für die pedogene Weiterentwicklung der Cambisole aus Regosolen und Leptosolen ist der Bv-Horizont, der durch den Prozess der Verbraunung entsteht (Abb. 72). Teilweise konnten *Hyperochric*-Eigenschaften der Cambisole diagnostiziert werden.

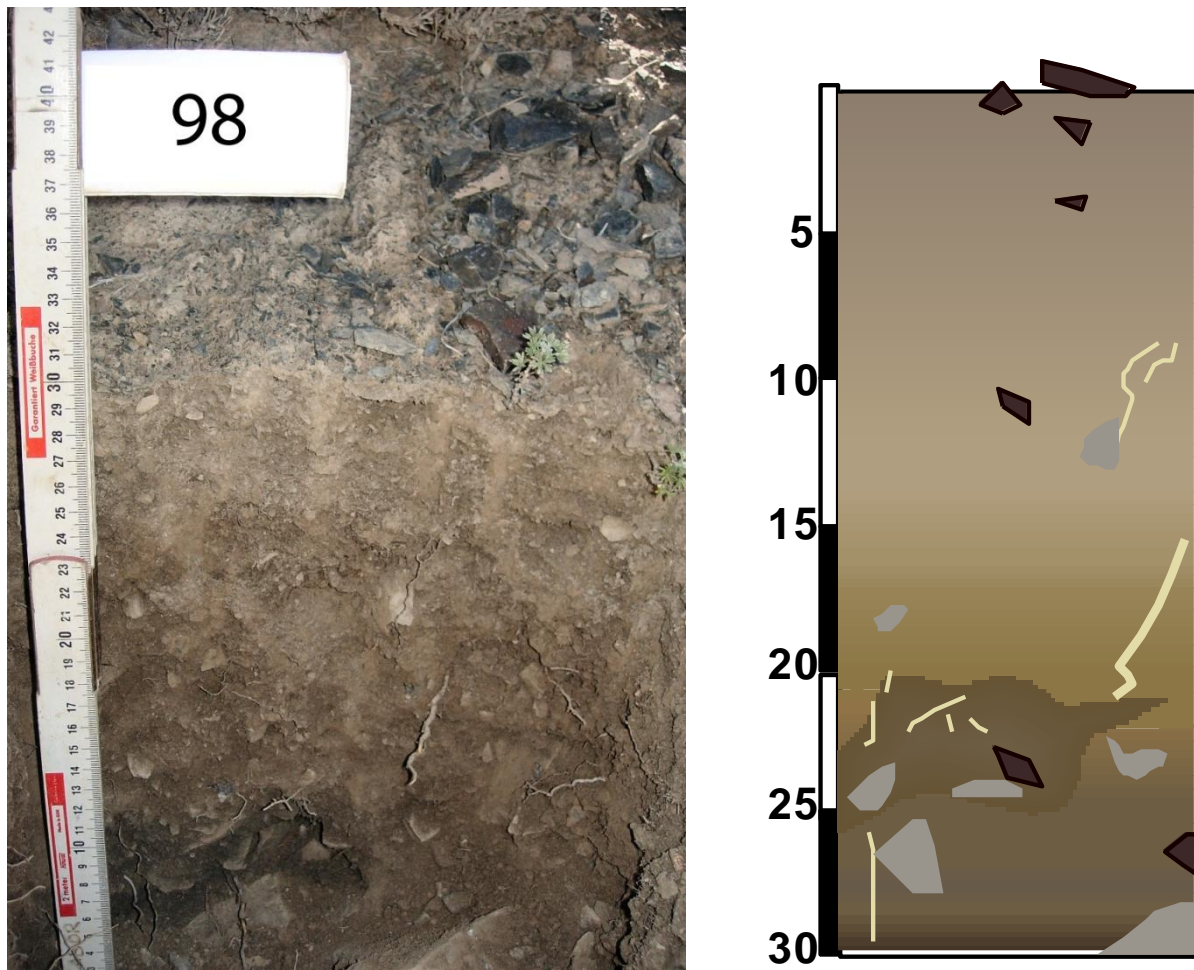


Abb. 72: Cambisol

### 5.7 Ordination

Die Ordination zeigt ein weiteres Verfahren um Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Flächen darzustellen. Das Ordinationsdiagramm (Abb. 73) zeigt das Ergebnis einer DCA. Die unterschiedlichen Farben resultieren aus der vorgeschalteten Clusteranalyse (Abb. 65) und kennzeichnen die Gruppenzugehörigkeit der Flächen zu den unterschiedlichen Bodentypen. Geographisch weit entfernte Flächen können relativ ähnliche Eigenschaften besitzen; umgekehrt können starke Unterschiede zwischen räumlich nahe gelegenen Flächen auftreten. Die erste Achse vereint in positiver Richtung vor allem Informationen aus der elektrischen Leitfähigkeit, in negativer Richtung den Skelettanteil und die organische Zusammensetzung bestehend aus  $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ , C/N und Humus. Demzufolge sind

die Salzböden (gelb) vor allem im rechten Teil des Plots zu finden. Im linken Teil sammeln sich zum einen die skelettreichen Leptosole (türkis) unter Felsvegetation und zum anderen die Kastanozeme (grau) der Alpinen Matten und die Chernozeme (pink) der Quellrasen mit erhöhtem organischem Kohlenstoff. Die zweite Achse zeigt eine negative Korrelation mit dem Kalkgehalt und der Korngröße Sand. Ein positiver Zusammenhang ist wieder mit der organischen Komponente gegeben. Die sandigen Arenosole (orange) sind deshalb im linken unteren Quadranten zu finden, während sich die mit organischem Material angereicherten Böden im linken oberen Quadranten gruppieren.

Über die DCA wurden elf Umweltvariablen geplottet (App. 29), die Tab. 43 zu entnehmen sind. Der Ursprung zeigt jeweils den Zentralwert. Liegen die Flächen auf der gleichen Seite wie der Kopf des Vektorpfeils, so ist ihr Wert im Bezug auf diese Variable höher als der Durchschnitt; liegt umgekehrt der Ursprung zwischen der Fläche und der Pfeilspitze, so ist dessen Wert unterdurchschnittlich. Wichtigere Umweltvariablen, entlang deren Gradienten sich die Bedingungen stark ändern, beeinflussen die ökologischen Konditionen stark und werden deshalb äquivalent dazu, mittels relativ längeren Pfeilvektoren, dargestellt. Die Bedeckung, die Position im Relief, die durch die Höhenlage und die Hangneigung gebildet wird, sowie die Beweidung, beeinflussen somit die Bodeneigenschaften am stärksten.

Die Umweltvariable Hangneigung sowie das UTM-Easting, das mit zunehmender Ost-Lage steigt, orientieren sich vor allem an der ersten Achse. Steilere Flächen sind auf der linken Seite zu finden, Aufnahmen, die absolut eher im Osten liegen, im rechten Teil des Diagramms. Ersichtlich ist hierdurch eine Zunahme der Versalzung gegen Osten. Die zweite Achse hängt mit den Umweltvariablen Höhe, Südlich- und Westlichkeit, Bedeckung, Beweidung, Exposition und den Distanzen zu Wasser und Siedlung zusammen. Solch ein, durch die Ordination dargestelltes, Hauptmuster entlang von Gradienten wird von VIRTANEN ET AL. (2006) als *ecoline* beschrieben.

Der Plot zeigt eine Korrelation der Umweltvariablen Höhe und Bedeckung. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass die Wüsten mit geringer Bedeckung vor allem in tieferen Lagen zu finden sind, da die Niederschlagssummen im Pamir mit der Höhe deutlich ansteigen. Darüber hinaus umfasst der untersuchte Stichprobenumfang sehr viele Flächen im Pshart Gumbez Kol mit starken Deckungswerten und einer hohen absoluten Lage. Flächen mit einer höheren Bedeckung sind zudem stärker beweidet. Sie befinden sich zunehmend in Siedlungs- und Jurtennähe, in kurzer Entfernung zu Wasser. In Richtung der zunehmenden Südlichkeit werden die strahlungsbegünstigten Flächen dargestellt, während mit zunehmender Westlichkeit die niederschlagsbegünstigten Flächen repräsentiert werden. Salzanreicherungen finden sich tendenziell eher in abflusslosen Senken

oder am schwach geneigten Hangfuß. Sie sind genau entgegen des Hangneigungsvektors orientiert.

Es zeigt sich somit durchaus ein Zusammenhang der Bodeneigenschaften, bzw. der Bodentypen, mit der Beweidung. Allerdings ist diese nur eine der sechs signifikant beeinflussenden Variablen.

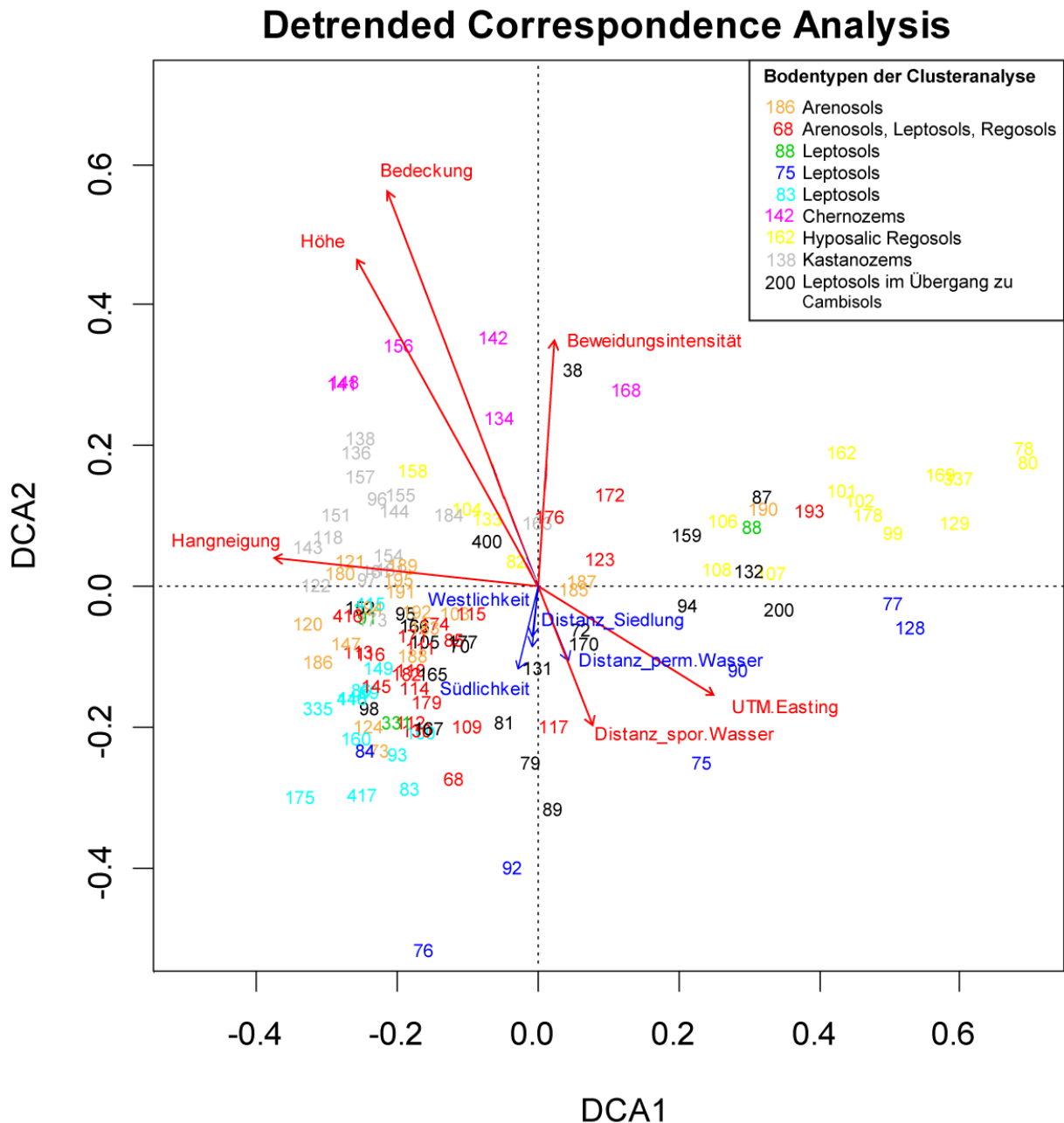


Abb. 73: DCA mit geplotteten Umweltvariablen (rote Vektoren: Signifikanz  $< 0,05$ , blaue Vektoren: Signifikanz  $> 0,05$ )

Tab. 42: Eigenwerte der DCA

	DCA1	DCA2	DCA3	DCA4
<b>Eigenwerte</b>	0,1155	0,03055	0,0138	0,0097

Tab. 43: Species Scores

	DCA1	DCA2	DCA3	DCA4
Leitfähigkeit	1,1461	0,2637	-0,1810	0,1082
pH-Wert	-0,5616	-0,0808	-0,3581	-0,6622
Skelett	-0,9971	-0,6251	1,0389	0,3940
Sand	-0,8202	-1,2996	-1,4910	-0,2522
Schluff	-0,4184	0,5968	0,6111	-1,3733
Ton	-0,3759	0,3974	0,7481	-1,0135
CaCO <sub>3</sub>	0,1800	-1,7729	1,8282	1,5799
C <sub>org</sub>	-0,8922	2,3384	-0,1150	1,2196
N <sub>tot</sub>	-0,7434	1,4552	0,2744	-0,1662
C/N	-0,6571	1,0745	-1,0557	2,0233
Humus	-0,8912	2,3398	-0,1145	1,2175

Tab. 44: Ladungen für die geplotteten Umweltvariablen (Signifikanz &lt; 0,05 blau hinterlegt)

	DCA1	DCA2
UTM.Easting	0.851085	-0.525028
Höhe	-0.483725	0.875220
Südlichkeit	-0.224389	-0.974500
Westlichkeit	-0.131140	-0.991364
Beweidungsintensität	0.063945	0.997953
Bedeckung	-0.355039	0.934852
Hangneigung	-0.994485	0.104883
Exposition	-0.372678	0.927961
Distanz_perm.Wasser	0.376841	-0.926278
Distanz_spor.Wasser	0.366351	-0.930477
Distanz_Siedlung	-0.088533	-0.996073

In einem weiteren Ordinationsdiagramm (Abb. 74) wird die Variable Vegetationseinheiten auf die bestehende DCA der Bodenvariablen geplottet. Die Symbole bilden jeweils das Zentrum des Centroids, das von der Vegetation auf den einzelnen Aufnahme­flächen bestimmt wird. Vor allem die Vegetationseinheiten der Quellrasen, Alpinen Matten und der Felsvegetation wirken sich auch im Boden aus und lassen sich durch deutlich voneinander unterscheidbare Bodentypen abgrenzen. Im Vergleich mit Abb. 73 zeigt sich eine Dominanz von vorwiegend Zwergstrauch-Polster-Steppen des Typs *Seriphidium* im Westen, während mit steigendem UTM-Easting gegen Osten der Typ *Krascheninnikovia* dominiert.

Wie von STUMPP ET AL. (2005) bei Forschungen in der Mongolei herausgestellt wird, ist unter Gleichgewichtsbedingungen (*equilibrium*) die Vegetationszusammensetzung durch die Beweidungsintensität und die Bodeneigenschaften beeinträchtigt, während sie in Ökosystemen, die sich nicht im Gleichgewicht befinden (*non-equilibrium*), vor

allem von der interannuellen Variabilität der Niederschläge abhängt. Bei Niederschlägen unter 250 mm, die im Untersuchungsgebiet deutlich unterschritten werden, treten *non-equilibrium* Dynamiken in den Vordergrund. Die Ergebnisse der Studien von BIONDINI & MANSKE (1996) aus den USA bestätigen dies ebenso wie die vorliegende Ordination: Der Vektor der Beweidung zeigt in die Richtung der Quellrasen und Chernozeme, während der Vektor der Westlichkeit, der die Ausrichtung gegenüber den Niederschlag liefernden Luftmassen aus Westen berücksichtigt, entgegengesetzt in die Richtung der Wüstenböden Arenosole, Leptosole und Regosole weist.

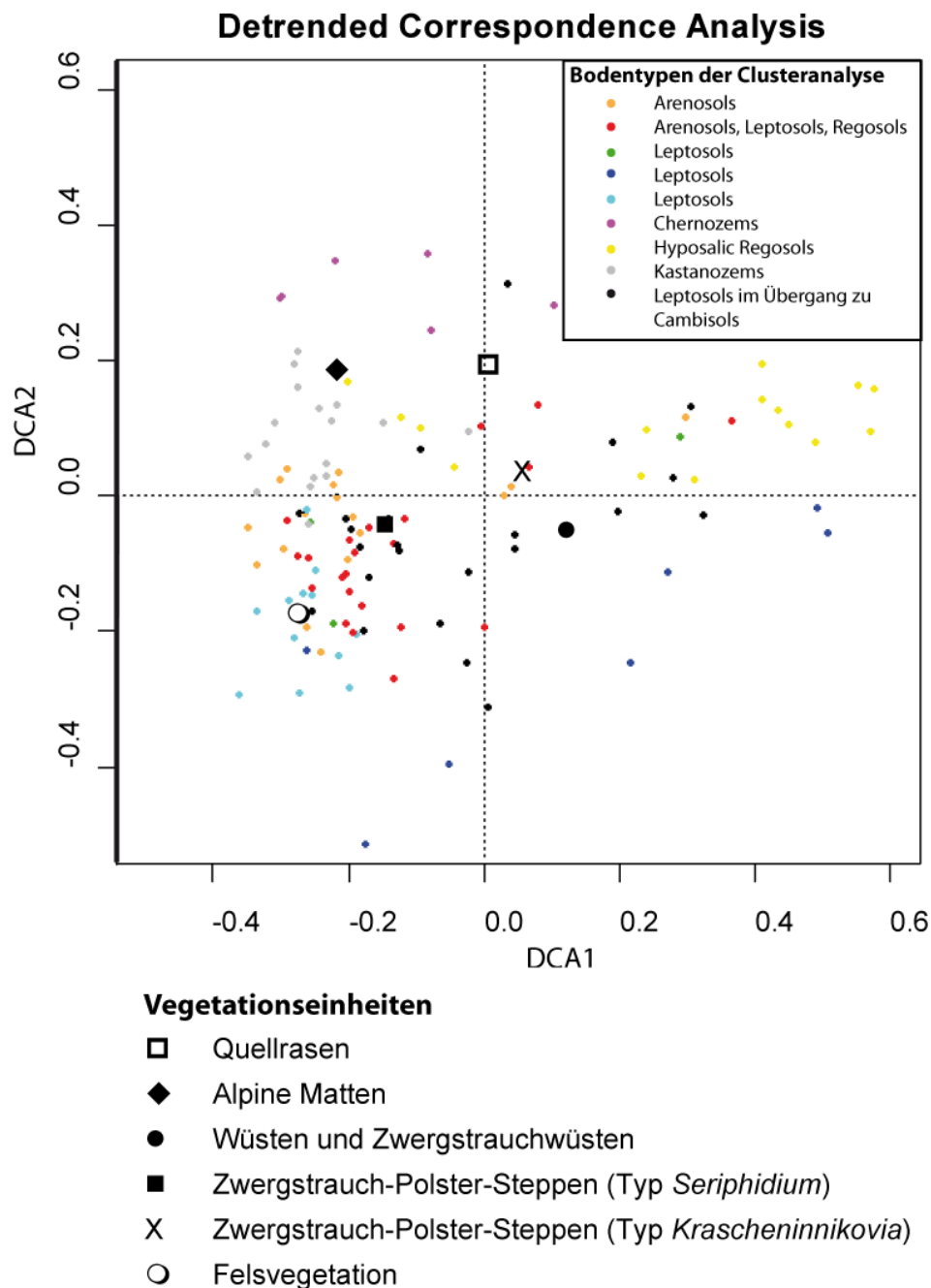


Abb. 74: DCA mit geplotteten Vegetationseinheiten

## 6 Diskussion

### 6.1 Physikalische Eigenschaften

#### 6.1.1 Hauptwurzelraum

Die Geländeaufnahmen des Hauptwurzelraumes bestätigen die ariden Züge der Vegetationsanpassung. Die Wurzelsysteme sind meist radial entwickelt und besitzen die Tendenz sich eher in bodenoberflächennahen Schichten auszubreiten. Desweiteren konnte anhand der Wurzelschätzungen bestätigt werden, dass sich in Gebirgsböden 80-95 % der unterirdischen Phytomasse auf die Tiefenstufe 0-10 cm konzentrieren und somit das Nährstoffangebot des Oberbodens nutzen (BOHNER 2001). In der Literatur wird diskutiert, dass wachsende Weidetierzahlen zu einem Rückgang der Durchwurzelungstiefe, der Wurzelmasse und -länge sowie der Oberflächen- und Volumendichte pro Bodenvolumeneinheit in tieferen Horizonten führen (SCHNYDER ET AL. 2006). Zwar wurde eine Korrelation mit der Beweidungsintensität nicht vorgenommen, allerdings scheint eine geringere Durchwurzelung eine direkte Folge einer degradierten Vegetationsbedeckung zu sein.

#### 6.1.2 Bodenwärmehaushalt

Der Bodenwärmehaushalt beinhaltet den bilanzmäßig erfassbaren Energieumsatz aus Wärmezufuhr und -abgabe. Der Boden besitzt drei verschiedene Energiequellen. Die bedeutendste Wärmequelle ist die mit etwa  $1,2 \text{ kW m}^{-2}$  im Ostpamir besonders hohe Sonneneinstrahlung. Sie besteht aus der Globalstrahlung, der Summe aus direkter und diffuser Strahlung, abzüglich atmosphärischer Reflexionen und terrestrischer Albedo und wird durch Sonnenstand, Exposition und Hangneigung modifiziert. Eine eher untergeordnete Rolle spielen der um vier Größenordnungen kleinere geothermische Wärmefluss aus dem Erdinneren und die von der Solarenergie abhängige Reaktionswärme aus dem mikrobiellen Abbau organischer Substanz (SCHMIZ 2009). Weitere den Bodenwärmehaushalt beeinflussende Faktoren sind die makroskaligen Klimatelemente Lufttemperatur, Niederschlag und Wind sowie die meso- und mikroskaligen Parameter der Substrateigenschaften und der Vegetationsbedeckung. Die Isolationseigenschaften einer albedoreichen Schneedecke wirken sich konservierend auf die Bodentemperaturen aus. Je steiler ein Gelände, desto deutlicher macht sich der Expositionseffekt bemerkbar. Die Vegetationsbedeckung wirkt sich dämpfend auf die Temperaturamplitude aus. An Südhängen gelegene Böden der Nordhemisphäre sind aufgrund ihrer Exposition gegenüber der Sonneneinstrahlung energetisch begünstigt (WIEßNER 2009).

Die Wärmeabgabe erfolgt durch langwellige Wärmeabstrahlung, Wärmeableitung und Verdunstungskälte im Zuge der Evapotranspiration. Die oberen Bodenhorizonte be-

sitzen einen sinusförmigen Tages- und Jahresgang der Temperatur, dessen Amplitude mit zunehmender Tiefe im Bodenprofil abnimmt und sich der Jahresdurchschnittstemperatur der Luft in etwa -50 cm Tiefe angleicht. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Phasenverschiebung des Temperaturjahresgangs zu. Feuchtere Böden erwärmen sich im Vergleich zu trockenen langsamer und weniger, kühlen allerdings nachts auch weniger ab (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

### 6.1.3 Lagerungsdichte

Mit einer Zunahme der Lagerungsdichte bzw. analog der Rohdichte erniedrigt sich die Porosität und das Infiltrationsvermögen. Die Porenformen unterteilen sich in körnungsbedingte feinere Primärporen und gröbere Sekundärporen, die durch Schrumpfrisse oder Wurzel- und Wurmröhren sowie Krotowinen entstehen. Abgesehen von der Pedoturbation durch Megafauna und den auf Schrumpfs- und Quellungsprozesse zurückzuführenden Sekundärporen ist der Anteil der Sekundärporen im ariden Klima des Untersuchungsgebietes eher gering. Das Wasser in den Feinporen ist im Gegensatz zu den Mittelporen nicht für das Pflanzenwachstum verfügbar. Die Grobporen sind in der Regel wasserfrei und vielmehr für die Belüftung von wichtiger Bedeutung. Die Porengrößenverteilung ist bezüglich der Primärporen abhängig von Körnung und Kornform, während für die Sekundärporen das Bodengefüge und die Bodenentwicklung von wichtiger Bedeutung sind. Durch eine Kompaktion des Bodens wird das Aggregatgefüge verändert bzw. zerstört. Böden mit einem hohen Gehalt an organischer Substanz besitzen meist ein großes Porenvolumen, da eine Bildung von größeren Aggregaten begünstigt wird, die allerdings weniger stabil sind und leicht zu kleineren Fragmenten zersetzt werden (STEFFENS ET AL. 2009).

Jede anthropogene Nutzung verändert bzw. zerstört die Bodenaggregate, was eine Absenkung und damit Verdichtung der Bodenoberfläche zur Folge hat. Dies zieht wiederum eine Abnahme des Porenanteils sowie eine Verringerung der Durchwurzelbarkeit, Luft- und Wasserkapazität nach sich. Die durchschnittliche Zunahme der Dichte auf Weideland, im Vergleich zu natürlichen Ökosystemen, beträgt  $9,5 \pm 2,1$  % (NIEDER & BENBI 2008). Die Verdichtung des Bodens führt zu erhöhtem Oberflächenabfluss der minimalen Niederschläge, da eine Infiltration erschwert wird. Eine hohe Verdichtung ist besonders auf den Viehgangeln zu finden (Abb. 75); diese durch das Vieh geschaffenen Pfade begünstigen die Bodenerosion in Form von Leitbahnen für den Oberflächenabfluss während der seltenen Starkregenereignisse, wenn die Infiltrationsraten überschritten werden (DOMMERMUTH 1996; GYAMTSHO 2002). Die Feuchtigkeit konzentriert sich somit zusammen mit den abgeführten Nährstoffen an geomorphologisch begünstigten Stellen mit einer mosaikhaften Verteilung in der Landschaft. Die Bodenstruktur ist maßgeblich für die Anteile an den Phasen Luft und Wasser sowie den Lebensraum der Wurzeln und Bodenorganismen verantwortlich. Durch eine Verdich-



tung des Bodens werden die Luft- und Wasserinfiltration sowie das Wurzelwachstum limitiert und die Produktivität sinkt. Bei einer Kompression der Böden mit Tiergewichten von 500 kg kommt es zu Druckbelastungen von 1,7-4,2 kg cm<sup>-2</sup>. Die projektbegleitenden eigenen Yakbeobachtungen zeigten allerdings, dass die Tiere vor allem an den Hängen oftmals auf nur 3 Beinen stehen, was den Druck nochmals erhöht. Besonders hoch ist die Vulnerabilität an feuchten Standorten (ROBERSON 1996). Die Ergebnisse der Dichtebestimmung mittels Stechzylinder liefern allerdings im Vergleich zur Literatur keine hohen Verdichtungswerte.



**Abb. 75: Viegangeln nahe Murghab**

Beide in dieser Studie verwendeten Methoden zur Dichtebestimmung sind mit Fehlern behaftet. Da die Böden im Untersuchungsgebiet oftmals sehr skelettreich sind, war es teilweise nicht einfach die ungestörten Bodenproben mittels Stechzylindern mit einem Volumen von nur 100 cm<sup>3</sup> zu entnehmen. Desweiteren liefert die Bestimmung mittels Handpenetrometer keine Dichte, sondern einen Widerstandsdruck, bei dem die geprüfte Oberfläche nachgibt. Die ermittelten Werte resultieren zwar schon aus Mittelwerten von 5 Messungen, allerdings ist die Berührungsfläche mit < 1 cm<sup>2</sup> auf einem skelettreichen Boden als sehr klein einzustufen und leicht durch Steine beeinflussbar. Die Ergebnisse sind deshalb nur auf Basis dieses Hintergrundes zu interpretieren.

#### 6.1.4 Wasserhaushalt

Die Schmelzwässer können im Frühjahr in den noch gefrorenen Boden kaum eindringen, da das Wasser in der noch kalten obersten Bodenschicht sofort gefriert und den Boden undurchlässig macht, sodass das Schmelzwasser oberflächlich abfließt. Durch Wasserkondensation in den im Winter stark abgekühlten oberen Bodenhorizonten, kann jedoch eine gewisse Wasserversorgung in den Böden von unten erfolgen, wenn die oberen Horizonte tiefere Temperaturen aufweisen als die darunter liegenden feuchteren Schichten. Allerdings spielt diese Kondensation nur eine geringe Rolle, da sie bei tieferem Durchfrieren des Bodens wieder verschwindet und im Winter die Wurzeln in-

aktiv sind. Der Wassergehalt des Bodens beträgt meist nicht mehr als 2-3 % und liegt somit unterhalb des Welkepunktes. Die sommerlichen Regenniederschläge führen nur zu einer kurzen Durchfeuchtung der obersten Bodenschicht und trocknen durch die Evaporation schnell wieder aus. Die Wasserversorgung der Pflanzen ist somit limitiert, da die skelettreichen Böden geringe Wasserkapazitäten besitzen und nur sehr unregelmäßig durch Niederschläge versorgt werden. Dennoch sind die Bodenarten als adäquat für das Pflanzenwachstum unter den vorherrschenden Bedingungen einzustufen, da sie die wenigen Niederschläge des Untersuchungsgebietes mit vergleichsweise geringer Wasserspannung binden (WALTER 1986).

Die Ergebnisse der Wassergehaltsanalysen zeigen niedrigere Werte für das im Südwesten gelegene Tal Bash Gumbez. Diese Ergebnisse gehen auf den ersten Blick nicht konform mit der im einleitenden Teil zum Untersuchungsgebiet postulierten These der Feuchtigkeitsabnahme von SW nach NE. Ein Vergleich mit der Vegetationsbedeckung bestätigt auch für dieses Merkmal vergleichsweise geringere Werte für Bash Gumbez, wengleich sowohl der Bodentyp als auch vor allem die Bodenart für das Wasserspeichervolumen ausschlaggebend sind. Das Körnungsdiagramm (App. 6) zeigt für Bash Gumbez aber keine großen Abweichungen von den ermittelten Korngrößen „lehmiger Sand“. Hinzu kommt die Lage des Tales, die allerdings mit seinem SSW-NNE-Verlauf nicht stark von der Exposition des Pshart Gumbez Kol Tales abweicht. Dennoch zeigt sich hier eine regionale Anomalie, die durch die vergleichsweise introvertiertere Lage in einem Gebirgskomplex und die daraus resultierende Abschirmung des Tales durch höhere Ketten gegen Westen zustande kommt.

#### 6.1.5 Korngröße

Die einzelnen Körner entstehen durch physikalische Verwitterung – im Untersuchungsgebiet in Form von Frostverwitterung und Insulationsverwitterung. Die chemische Verwitterung ist aufgrund der hohen Aridität stark limitiert. Neben Bruchstücken und Abbauprodukten können auch Neubildungen im Boden auftreten, die als diskrete Körner vorliegen oder Primärpartikel überziehen. Bilden sich aus Primärteilchen zusammengesetzte Körper, so spricht man von Aggregaten. Die Feststoffpartikel bilden die Matrix, deren Porenvolumen abhängig von der Bodenentwicklung, der Kornform und dem Gehalt an organischer Substanz ist (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Die Abweichung der Körnung von der Kugelform in Richtung blättchenartige Struktur bewirkt eine Zunahme des Porenvolumens ähnlich einer Kartenhausstruktur. Aus den Daten der Körnung und Lagerung ist es möglich Rückschlüsse über den Wasser- und Lufthaushalt zu ziehen (Abb. 27).

Das Auftreten bestimmter Körnungen ist eng an das Klima, die Geologie und Geomorphologie einer Landschaft geknüpft. Die Formen der einzelnen Korngrößen sind

sehr verschieden, allerdings ist gerade bei Schiefer (Pshart Gumbez Kol) als Ausgangsgestein eine unregelmäßige, scherbige Blättchenform besonders im Grobboden unverkennbar. Hierdurch erhöht sich die Oberfläche der Partikel. Allgemein ist der Abrundungsgrad eher gering, da die Böden des Untersuchungsgebietes sich an Ort und Stelle entwickelten und kaum Transport des Ausgangsmaterials erfolgte. Das breite Korngrößenspektrum mancher Standorte wird durch ihre Nähe zu in situ verwitterndem Ausgangsmaterial aus gravitativen Massenbewegungen begründet. Die relativ gute Sortierung der Bodenart in Sande und Lehme resultiert aus dem trockenen Klima und der damit verbundenen Deflation kleinerer Korngrößen. Die Tonanteile anderer Flächen sind durch die Schieferverwitterung bedingt. Die Quellrasen in der Nähe von Bachläufen verfügen über ein eher abgerundetes gut sortiertes feineres Körnungsspektrum, das durch den fluviatilen Transport gekennzeichnet ist (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Die Korngrößenverteilung ändert sich nur verhältnismäßig langsam. Ein Beweis hierzu liefert die sehr ähnliche Körnungszusammensetzung der a- und b-Horizonte. Innerhalb von Bodenprofilen findet eine abwärtsgerichtete Tonverlagerung statt, während es durch Quellungs- und Schrumpfungszyklen sowie Kryoturbation zu Kornscheidungen kommen kann. Erstere ist im Untersuchungsgebiet auf Grund der Aridität und dem meist temporären Standpunkt der Böden auf der Initialstufe der Bodenbildung zu vernachlässigen.

Wie SCHMIZ (2009) beschreibt, ist auf südexponierten Hängen eher feinkörniges Material zu finden als an nordexponierten, wo durch große annuelle Temperaturschwankungen eine intensivere tiefgründige Frostverwitterung stattfinden kann und sich somit entsprechend gröberes Schuttmaterial ansammelt. Diese These kann für das Untersuchungsgebiet bestätigt werden.

Entgegen der Ausführungen bei BATKHISHIG (2000) und SU ET AL. (2005), die eine Verschiebung in die gröbere Korngrößenfraktion durch intensive Beweidung bestätigten, kann keine positive Korrelation zwischen dem relativen Sandanteil und der Beweidungsintensität in den erhobenen Daten festgestellt werden. Somit kann auch keine in der Literatur diskutierte erhöhte Winderosion bestätigt werden, der auf überweideten Flächen aufgrund der Dezimierung der schützenden Vegetations- und Oberbodendecke eine verstärkte Angriffsoberfläche geboten wird, wodurch die sandige Korngrößenfraktion Präferenz erhält. Im Ostpamir hindern und vermindern Steinpflaster äolischen Abtrag der feineren Bodenfraktionen.

## 6.2 Chemische Eigenschaften

### 6.2.1 Bodenacidität

Die Bedeutung der Bodenacidität liegt weniger in der absoluten Konzentration der Protonen, als in der Beeinflussung weitreichender ökologischer Funktionen. So steht der pH-Wert in enger Beziehung zu den physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften und beeinflusst direkt oder indirekt das Pflanzenwachstum. Die Bodenacidität wirkt sich auf das Bodengefüge, den Wasser- und Lufthaushalt, die Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen und die Lebensbedingungen der Bodenorganismen aus (GISI ET AL. 1997).

Die Acidität eines Bodens beruht auf der Bilanz aus dem Gewinn von Protonen von außen, internen Umsetzungen und dem Verlust von Basen nach außen. Der Eintrag von Protonen erfolgt unter anderem durch saure Niederschläge. Desweiteren setzen vier wichtige Prozesse im Boden Protonen frei: die Wurzelatmung, die Kationenaufnahme, die Humifizierung und die biotische Oxidation der Biomasse. Bei der Atmung der Wurzeln und Bodenorganismen werden im Boden große Mengen an  $\text{CO}_2$  gebildet und in der Bodenluft angereichert. Die gebildete Kohlensäure ist neben von Pflanzenwurzeln abgeschiedenen einfachen organischen Säuren eine wichtige  $\text{H}^+$ -Quelle. Bei der Aufnahme von Metallkationen werden von den Pflanzenwurzeln äquivalente Mengen an  $\text{H}^+$ -Ionen ausgeschieden, während bei der Aufnahme von Anionen  $\text{OH}^-/\text{HCO}_3^-$  abgeschieden werden. Bei der Humifizierung der organischen Ausgangssubstanz werden Fulvo- und Huminsäuren gebildet, während Oxidationsprozesse ebenfalls zur Protonenfreisetzung beitragen (GISI ET AL. 1997, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

In ariden Klimaten findet eine Akkumulation von freigesetzten Basen und damit eine Alkalisierung der Böden bei vorwiegend aufwärtsgerichtetem Wasserstrom statt. Es können sich Salz- und Alkaliböden mit hohen pH-Werten entwickeln. Ein statistisch linearer Zusammenhang der Bodenacidität mit der Beweidung kann aus der Datenmatrix nicht nachgewiesen werden. Dies steht sowohl den häufig in der Literatur postulierten Annahmen zur Abnahme des pH-Wertes bei intensiver Beweidung (ROBERSON 1996), als auch der These von SU ET AL. (2005) gegenüber, die erhöhte pH-Werte für beweidete im Gegensatz zu unbeweideten Flächen ausmachen konnten, wo eine vermehrte Absonderung organischer Säuren durch die Wurzeln und eine Freisetzung von Kohlenstoffdioxid durch Wurzelatmung vorlag.

Die mineralische Zusammensetzung des Ausgangsgesteins kann durch die mögliche Freisetzung basischer Kationen bei der Verwitterung den pH-Wert beeinflussen (Abb. 64). Dies ist besonders in den Tälern Pshart Gumbez Kol und Madian Gumbez Kol der Fall, da es sich hier um carbonathaltiges Ausgangsmaterial handelt. Auf Kalkböden im

Carbonat-Pufferbereich ( $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} > 6,2$ ) dominiert  $\text{Ca}^{2+}$  am Sorptionskomplex und in der Bodenlösung (BOHNER 2001). Dies zeigen sowohl der pH-Wert als auch die Ergebnisse der KAK.

### 6.2.2 Versalzung

Die Anreicherung von wasserlöslichen Salzen in Böden oder Bodenhorizonten wird als Versalzung definiert. Atmosphärische Salze werden durch Niederschläge oder auch Stäube transportiert und dem Boden arider Klimate zugeführt. Die Menge an angereicherten Salzen ist unter anderem abhängig von der Reliefposition und der Wasserdurchlässigkeit. Durchlässige und in Senken liegende Böden können salzfrei sein, da seltene Starkregenereignisse die Böden stark perkolieren und die Salze verlagern. In ariden Gebieten kann die Ursache der Salzanreicherung neben den Niederschlägen auch aus in situ salzhaltigen Ausgangsgesteinen resultieren. Die Salze steigen mit dem Kapillarwasserstrom auf und werden nach folgender Löslichkeitsreihe gefällt, sobald das Bodenwasser verdunstet: Calciumcarbonat, Gips, Soda und Natriumsulfat, Na- und Ca-Chloride und schließlich Nitrate. Salzflecken und -krusten können entstehen, wenn das Grundwasser die Bodenoberfläche erreicht (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Eine Anreicherung von Salzen führt zur Stabilisierung des Bodengefüges bei Austrocknung und zur Alkalisierung der Böden. Es bilden sich Solonetze beziehungsweise Natriumböden und Solonchaks, wobei AKHMADOV (2003) für den Pamir von einer Salzfreiheit für Solonchaks ab Tiefen von 30-50 cm ausgeht (AGAHANJANZ 1965).

Im Gelände konnten Salzausfällungen vor allem auf feinem Material an Unterhängen beobachtet werden (Abb. 76). Die Na-Belegung der Austauscherebene führt zu Verschlammung, Tonverlagerung, erhöhter Lagerungsdichte, einem ungünstigen Luft- und Wasserhaushalt sowie einer reduzierten Nährstoffaufnahme. Ertragseinbußen sind bei Kulturpflanzen ab einer Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt von  $1 \text{ mS cm}^{-1}$  festzustellen, Salzschäden treten ab  $2 \text{ mS cm}^{-1}$  auf. Die Sensitivität der einzelnen Pflanzen auf den Salzgehalt ist allerdings unterschiedlich (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Tolerant gegenüber oberflächennahen Salzen konnten im Gelände die Pflanzen Teresken *Krascheninnikovia ceratoides* und Strandroggen *Leymus secalinus* identifiziert werden. Die Erklärung für Teresken kann allerdings auch im tief- und weitreichenden Wurzelsystem begründet sein.

Da im Untersuchungsgebiet der Wassergehalt der Böden während der Vegetationsperiode meist tiefer liegt als im Sättigungsextrakt, ergibt sich für die natürliche Bodenlösung ein höherer osmotischer Druck, welcher sich schädlich auf das Pflanzenwachstum auswirken kann. Der schädliche Einfluss löslicher Salze auf das Pflanzenwachstum kann sowohl auf die Überschreitung der Toxizitätsgrenze als auch auf die osmotische Wirkung zurückgeführt werden, die den Pflanzen die Wasserauf-

nahme erschwert. Weitere Salzsäden können durch Nährstoffmangel entstehen, wenn die Ionenkonkurrenz durch den Überschuss an löslichen Kat- und Anionen der Salze die Nährstoffaufnahme der Pflanzen nachhaltig dominiert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).



**Abb. 76: Versalzung**

Von der lokalen Bevölkerung werden die Salzausblühungen als negativ eingeschätzt; ihre Tiere würden davon krank werden, schilderten sie in mündlichen Darstellungen. Der kausale Zusammenhang ist aber vielmehr darin zu sehen, dass sich ein hoher Salzgehalt negativ auf das Pflanzenwachstum auswirkt. Ein geringeres Nahrungsangebot führt zur Unterernährung der Tiere, wodurch diese für Krankheiten anfällig werden. Die Korrelationstests zeigen aber genau den umgekehrten Fall: Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Beweidung und der elektrischen Leitfähigkeit. Salzausblühungen treten vor allem auf Quellrasen nahe der Flüsse bzw. an Unterhängen mit *Stipa*-Wiesen auf, da hier genügend Wasser vorhanden ist bzw. akkumuliert wird, um Salze zu lösen und dann mit dem aufwärtsgerichteten Bodenwasserstrom zur Oberfläche zu bringen. Gleichzeitig bedingt diese bessere Durchfeuchtung im Vergleich zu anderen Flächen aber auch ein größeres Pflanzenwachstum mit bevorzugten Futterpflanzen der Yaks; Deshalb ist dort die Beweidungsintensität höher. Somit stehen die Salzflächen synonym für eine gute Wasserversorgung mit für die Tierernährung bevorzugter Vegetation. Ein randlicher Nebeneffekt hierbei ist die Aufnahme von lebensnotwendigen Mineralen durch die Tiere. Die geringe Korrelation zeigt aber auch, dass sie dies nur in beschränktem Maße vollführen. Hinzu können die versalzten Flächen als lokale Erscheinung bewertet werden, die im Untersuchungsgebiet nicht flächenhaft in Erscheinung treten.

Die vergleichsweise starke Versalzung im Madian Gumbez Kol resultiert aus seiner Lage. Das Tal ist nach Süden hin geöffnet, wodurch es höhere Einstrahlungswerte erhält und somit die Evaporation begünstigt, welche einen aufsteigenden Bodenwasserstrom hervorruft. Die Folge sind Salzakkumulationen an der Bodenoberfläche.

Insgesamt ist die Versalzung im Untersuchungsgebiet mit einem Mittelwert von  $572 \mu\text{S cm}^{-1}$  deutlich unter  $1 \text{ mS cm}^{-1}$  vernachlässigbar und die Gesamtsituation aufgrund der Kleinräumigkeit als nicht besorgniserregend einzustufen. Ein Zugang zu Salzen ist für die Tiere sogar essentiell notwendig.

Als Meliorationsmaßnahme für versalzten Flächen werden Grundwasserspiegelabsenkungen, Dränung in Verbindung mit Unterbodenlockerung und die Zufuhr großer Wassermengen eingesetzt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002), deren Verwirklichung in der peripheren Region des Untersuchungsgebietes kaum möglich ist.

### 6.2.3 Kohlenstoff

Das organische Material im Boden dient nicht nur als Nährstofflieferant für Mikroorganismen, sondern beeinflusst auch die Aggregatstabilität, die Filterfunktion und den Wasserhaushalt des Bodens.

Der organische Kohlenstoff, der in die Humusberechnung mit einfließt, ist auf den Flächen mit mittlerer Beweidungsintensität am höchsten, während stark beweidete sowie eher unbeweidete Flächen niedrigere Werte aufzeigen (vgl. App. 12). Stark beweidete Flächen neigen dazu weniger Streuauflage und damit weniger organische Substanz zu besitzen, da diese vom Vieh aufgenommen und verwertet wird. Dies hat negative Rückkopplungseffekte bezüglich der Bodenstruktur und der Wasserhaltekapazität zur Folge und bietet kaum Repositorien für Nährstoffe (ROBERSON 1996). Die geringeren absoluten Kohlenstoffgehalte, sowie ihre niedrigeren Gehalte in Relation zu den Stickstoffkonzentrationen und damit schnellere Umsetzungsrate auf unbeweideten im Vergleich zu beweideten Flächen, sind auf die größere mikrobielle Aktivität durch die günstigeren Bodenfeuchteverhältnisse und den besseren Nährstoffhaushalt zurückzuführen.

Der Humusgehalt der als stark beweidet eingestuften Flächen ist teilweise nicht so stark reduziert wie angenommen, sondern die statistischen Auswertungen zeigen sogar eine geringe positive Korrelation. Dies kann auf die Akkumulation von Exkrementen und deren Nährstofftransfer zurückgeführt werden, die dem Boden nun einen erhöhten Düngereinput liefert (BATKHISHIG 2000). Zwar wird der Yackdung bevorzugt nahe der Jurten gesammelt, aber die Exkremente des Kleinhornviehs verbleiben auf den Flächen. Allgemein kann eine Zunahme des Humus zu einer Steigerung der Produktivität führen (AYUBA 2001). Nicht immer fallen stark beweidete Flächen allerdings mit einer Akkumulation an Dung zusammen. Dies liegt zum einen an der Brennstoffnutzung der Exkremente, zum anderen jedoch an den Tieren selbst, die vor allem in der Nähe der Jurtencamps für eine erhöhte Dungzufuhr sorgen.

Die Abnahme mit der Tiefe ist auf den Input an der Geländeoberfläche sowie eine erhöhte Humifizierung in den oberen Horizonten zurückzuführen. Die Differenzen im Tälervergleich spiegeln die verschiedenen Anteile an den Vegetationseinheiten wieder.

Wie in BATKHISHIG (2000) ausgeführt wird, reagiert der Boden nur sehr träge auf Beweidung. So konnte bei vergleichbaren Untersuchungen keine Veränderung des organischen Kohlenstoffs durch Beweidung während eines Beobachtungszeitraumes von sieben Jahren ausgemacht werden. Allerdings müssen die Anreicherungen mit organischem Kohlenstoff und der Vergleich mit anderen Studien immer im Kontext der Umweltbedingungen betrachtet werden. Das Untersuchungsgebiet stellt hierbei durch die extreme Aridität und Kälte kaum annuelle Zeiträume für die mikrobielle Zersetzung und anschließende Mineralisierung, sondern begünstigt eine Humifizierung und damit Akkumulation von organischer Substanz.

Die Pedosphäre enthält in 1 m Tiefe global gesehen etwa 1.500 Gt organischen Kohlenstoff, was dem doppelten Gehalt in der Atmosphäre und dem dreifachen Gehalt der Biosphäre entspricht. Durch anthropogen induzierte Störungen seit dem Neolithikum verloren die Böden zwischen 40 und 90 Gt organischen Kohlenstoff. Der größte Anteil organischer Substanz und Stickstoff ist im A-Horizont gespeichert. Der organische Kohlenstoff der Böden kann mittels einer stärkeren Primärproduktion durch verstärkte Photosynthese und einen angeregten Kohlenstofffluss von der Atmosphäre in die terrestrische Biosphäre stimuliert werden. Die abgestorbene Biomasse wird von Mikroorganismen wieder mineralisiert, wobei der meiste Kohlenstoff als  $\text{CO}_2$  an die Atmosphäre abgegeben wird. Alternativ kann durch eine verminderte Dekompositionsrate die Akkumulation im Langzeit-Kohlenstoff-Pool erzielt werden. Im Hinblick auf den globalen Klimawandel stellt die Pedosphäre eine wichtige Kohlenstoffsенке dar, die nicht zuletzt durch eine angepasste Weidenutzung erhalten bzw. verstärkt ausgenutzt werden sollte (SMITH ET AL. 2007; NIEDER & BENBI 2008; GLEIXNER 2005). Abhängig von der anthropogenen Nutzung können die Böden als Quelle oder Senke für Kohlenstoff fungieren. Generell wird in der Literatur postuliert, dass eine Weidenutzung natürlicher Ökosysteme zum Abbau der Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffdioxidemissionen führt, da neben der verringerten Kohlenstoffzufuhr durch Pflanzenreste die schützenden Oberbodenhorizonte gestört und die Bodenbildungsprozesse unterbrochen werden. Überweidung begünstigt demnach die Dekompositionsrate organischen Materials und setzt somit  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre frei. Die Konsequenz intensiverer Nutzung ist eine erhöhte Freisetzung der Treibhausgase  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$ . Dass dies im Untersuchungsgebiet nicht der Fall ist, zeigen die vorliegenden Ergebnisse. STEFFENS ET AL. (2009) stellt eine Pauschalisierung von Steppenökosystemen als Kohlenstoffsенken in Frage sowie die Tatsache, dass eine Nutzungsänderung durch Extensivierung zwangsläufig in einer steigenden Kohlenstoffbindung resultiert. So akkumulierte sich zwar nach einem Be-



weidungsstopp in Nordchina das abgestorbene Pflanzenmaterial, wurde jedoch nicht sehr fest im Boden gebunden. Nur eine tiefe Festsetzung des Kohlenstoffs im Boden kann die Senkenfunktion garantieren und das Kohlenstoffdioxid stabil in der Pedosphäre binden. Neben dem Nutzungswandel könnte eine Humidisierung des Klimas ferner sogar die Kohlenstoffdioxid-Freisetzung beschleunigen. GLEIXNER (2005) betont ebenfalls, dass der Kohlenstoff jedoch nicht im Boden stabil festgesetzt wird, sondern kontinuierlich von den Mikroorganismen umgebaut wird. Diese Umbauraten sind vom globalen Klimawandel viel stärker betroffen als die Bodenspeicherkapazität, die rein von der Bodenmineralogie abhängig ist. Unser begrenztes Wissen über anthropogen genutzte und ungenutzte Ökosysteme mindert die Vorhersagekraft der Effekte des Klimawandels auf diese und bedarf somit der weiteren Forschung (ZHOU ET AL. 2007). Die Ergebnisse der Literatur können in der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden. Allerdings kann herausgestellt werden, dass im Untersuchungsgebiet Flächen mit mittlerer bis starker Beweidungsintensität eine Senkenfunktion für organische Bodensubstanz darstellen.

#### 6.2.4 Nährstoffhaushalt

Zu den Hauptnährelementen zählen Stickstoff, Kalium, Calcium, Magnesium und Phosphor. Zusätzlich wirkt sich Natrium sehr positiv auf das Pflanzenwachstum aus. Eine Zufuhr von Bodennährstoffen erfolgt durch Viehdung, Bindung aus der Atmosphäre und Mineralisierung (GYAMTSHO 2002). Wie AGAHANJANZ (1965) ausführt, rangiert die Kationenaustauschkapazität im Ostpamir zwischen 10 und 50 cmol kg<sup>-1</sup>. Dies konnte im Allgemeinen bestätigt werden.

Der Nährstoffkreislauf wird durch die Beweidung diversifiziert, da die Nährstoffe zunächst von den Tieren durch das Futter aufgenommen werden und in tierischer Biomasse angesetzt werden, bevor einige Nährstoffe an anderen Stellen im Gelände dem Boden in Form von Exkrementen wieder zugeführt werden, wodurch die Dekompositionsrate erhöht wird. Der Transport der Nährstoffe erfolgt meist zentripetal auf Quellrasen nahe Wasserstellen oder Jurtencamps, wo die Tiere länger unter anderem zum Wiederkäuen verweilen. Daneben verbleiben nur die wenigen Pflanzenrückstände, die der dünnen Humusaufgabe zugeführt werden, im System und gehen nicht verloren. Besonders steile Hänge sind nährstoffarm (GYAMTSHO 2002). Die Verfügbarkeit von Nährstoffen reglementiert die Produktivität und erleichtert die Invasion von Pflanzengesellschaften (ROBERSON 1996).

Allgemein konnte eine durch die Beweidung dezimierte Nährstoffverfügbarkeit im Boden nicht nachgewiesen werden. Die Stickstoff- und Phosphorverfügbarkeit konzentriert sich auf stark beweidete Stellen mit erhöhter Dungzufuhr, wodurch die Nährstoffe auf einzelne Flächen eingetragen werden. Die Bodenfruchtbarkeit wird durch

das Sammeln von Viehdung als Brennmaterial erniedrigt (Abb. 77), da somit die Nährstoffe dem Boden irreversibel entzogen werden. Umgekehrt, würden die Exkreme auf den Weideflächen liegen gelassen, wären die Dunggradienten in den Bodenparametern stärker ausgeprägt (STUMPP ET AL. 2005).



**Abb. 77: Gesammelte Exkreme**

Da durch Beweidung in den kompletten Nährstoffkreislauf eingegriffen wird, diskutiert die Literatur, ob hierdurch sogar die Produktivität erhöht werden kann (BIONDINI & MANSKE 1996).

#### 6.2.4.1 Stickstoff

Stickstoff gehört zu den Hauptnährelementen. Seine Verfügbarkeit steuert maßgeblich das Pflanzenwachstum und die biologische Aktivität. Der Optimalbereich für Pflanzen ist bei Stickstoff verglichen mit anderen Nährstoffen sehr eng. Der Stickstoffpool der Böden unterliegt einer ständigen Zufuhr und Freisetzung. Der Stickstoffkreislauf erfolgt zwischen anorganischen und organischen Verbindungen und wird über die Prozesse der Mobilisierung und Immobilisierung gelenkt. Im Oberboden kommt Stickstoff zu 90% in organischer Form vor. Seine Verbindungsformen stammen aus Umsetzungsprodukten von abgestorbener Vegetation und Organismen oder sie sind Stoffwechselprodukte der Bodenorganismen: Aminosäuren, Amino Zucker und Nucleine. Daneben ist Stickstoff auch in Huminstoffen gebunden. Anorganisch und pflanzenverfügbar ist der Stickstoff in Form von leicht löslichem Nitrat und Ammonium, wobei in kühlen Klimaten die Ammonifikation, also die Umwandlung organischer N-Verbindungen in  $\text{NH}_4^+$ -Ionen, schneller verläuft als die Nitrifikation, bei der Ammonium von Mikroorganismen in Nitrat umgewandelt wird. Wird mehr Stickstoff freigesetzt als die Mikroorganismen benötigen, verbleiben die  $\text{NH}_4^+$ -Ionen in der Bodenlösung, gehen in die austauschbare Form über oder unterliegen der Nitrifikation. Ist hingegen der N-Gehalt zu gering, wird mineralischer Stickstoff von den Mikroorganismen im Zuge der Immobilisierung aus dem Boden aufgenommen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Neben der Zufuhr aus der

Atmosphäre und mineralischen N-Quellen, erfolgt eine Nachlieferung vor allem aus biologischer  $N_2$ -Fixierung und der Umsetzung der organischen Substanz, wozu auch die Dungdeposition der Weidetiere zu zählen ist. Stickstoffverluste entstehen durch Pflanzenentzug, Auswaschung, Erosion sowie den gasförmigen Transfer von Verbindungen des Bodenstickstoffs in die Atmosphäre. Zusätzlich wird im Untersuchungsgebiet der Stickstoff durch das Sammeln des Viehdungs dem System entzogen. Der Bodenstickstoff als molekularer Stickstoff ( $N_2$ ) bzw. seine Verbindungen zu Distickstoffoxid ( $N_2O$ ), Stickstoffmonoxid (NO) und Ammoniak ( $NH_3$ ) sind somit auch in die Erzeugung von Treibhausgasen einbezogen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Ihr Fluss wird durch den Partialdruck der Gase in der Atmosphäre und ihre Konzentration in der Bodenlösung gesteuert. Lachgas ( $N_2O$ ) entsteht vor allem bei mikrobiellen Prozessen als Zwischenprodukt der Denitrifikation und Nitrifikation, trägt durch Absorption von Infrarotstrahlung zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei und fördert den Abbau des stratosphärischen Ozons. Ammoniakemissionen treten auf, wenn dem Boden Ammoniak, Ammoniumsalze oder Harnstoff bzw. tierische Exkremente zugeführt werden. Die  $NH_3$ -Verluste steigen mit dem pH-Wert. Ammoniakentgasungen finden aus biologisch aktiven, kalkhaltigen Böden statt, deren Emissionsrate mit der Transportrate, mit der es durch die Bodenporen entweicht, sowie mit der Austrocknung der Bodenoberfläche konform geht. In stabilen Ökosystemen ist die Stickstoffbilanz ausgeglichen. Die Ammoniakemissionen werden durch die Pflanzendecke absorbiert oder durch die Atmosphäre umgelagert. Die Ammoniakemission bei Weidewirtschaft beträgt zwischen 10 und 14 kg  $NH_3$ -N je Großvieheinheit bei 180 Weidetagen, die im Untersuchungsgebiet niemals erreicht werden. Sie resultiert primär aus der mikrobiellen Zersetzung des Harnstoffs im Urin. Eine Gefahr für die Trinkwasserversorgung könnte im Untersuchungsgebiet durch die Nitratanreicherung im Grundwasser auf den stark beweideten Flächen nahe der Jurten Camps bestehen, da hier eine intensive Zufuhr tierischer Exkremente erfolgt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Der Eintrag durch Urin konnte nicht sichtbar eingeschätzt werden, ist aber sicherlich nicht zu vernachlässigen. Eine Korrelation mit Tritt und Verbiss ist deshalb sinnvoller (Tab. 27). Der Verbleib und die Umsetzung von Stickstoff in Böden kann mittels  $^{15}N$ -Isotopen-Technik verfolgt werden (vgl. 6.2.7.2).

#### 6.2.4.2 Natrium

Für C3-Pflanzen ist Natrium ein nützliches Element und reguliert den Wasserhaushalt. Die Natrium-Gesamtgehalte der Böden betragen im Mittel 1-10 g  $kg^{-1}$ . Dies harmoniert mit den Analysen. Für die Tierernährung ist ein Natriumgehalt der Weidegräser von 2,0 g  $kg^{-1}$  Tr.S. nötig (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Die größten Gehalte im Boden sind in der Schlufffraktion zu finden, wo Natrium vor allem an Feldspäte gebunden ist. Für die Pflanzenversorgung ist die  $Na^+$ -Konzentration der Bodenlösung und der Gehalt an

austauschbarem Natrium wichtig. Allerdings wird es wegen seiner schwachen Bindung sehr leicht ausgewaschen. Höhere Konzentrationen an Natrium in austauschbarer und gelöster Form treten in ariden Gebieten auf. Einige der Untersuchungsflächen konnten schon im Gelände anhand von sichtbaren Salzausblühungen einem hohen Versalzungsgrad zugeordnet werden. Das Maximum der Na-Konzentration der KAK liegt bei  $3,07 \text{ cmol kg}^{-1}$ . Solch hohe Werte beeinträchtigen das Wachstum der meisten Pflanzen. Eine Natriumzufuhr erfolgt neben dem Eintrag durch Niederschläge vor allem durch Exkremate und Urin.

#### 6.2.4.3 Kalium

Kalium unterliegt im System Pflanze-Boden einer Vielfalt an Umsetzungen. Die Zufuhr erfolgt durch Verwitterung: Gesteine enthalten durchschnittlich 1,9 % Kalium, was vor allem in Feldspäten und Glimmern festgesetzt ist. Im Boden ist Kalium in verschiedenen Formen vorhanden, die miteinander im Gleichgewicht stehen. Während austauschbares Kalium sehr schnell in die Bodenlösung übergeht, reagiert Kalium, das im Zwischenschichtraum von Illiten und Glimmern spezifisch gebunden ist, wesentlich träger. Pflanzen können in der Rhizosphäre ihre K-Konzentration so stark erniedrigen, dass sie auch auf das fixierte Zwischenschicht-Kalium zurückgreifen können. Deshalb lässt sich das pflanzenverfügbare Kalium mit der KAK nicht quantifizieren (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

#### 6.2.4.4 Calcium

Die Analyse ergab ein Maximum für das Nährelement Calcium. Dies ist auf den Carbonatgehalt des Ausgangsgesteins zurückzuführen. Durch Kohlensäureverwitterung werden Carbonat-Ionen aus dem Gestein gelöst. Ein wesentlicher Anteil des Gesamt-Calciums liegt in austauschbarer Form vor. Calcium ist besonders für das Pflanzenwachstum, speziell für das Wurzelwachstum, die Stabilisierung der Zellwände, die Aktivierung einzelner Enzyme sowie für Osmoseregulationen von großer Bedeutung. Calciummangel konnte für keine der Untersuchungsflächen diagnostiziert werden, da alle eine Konzentration von  $20 \text{ mg Ca l}^{-1}$  weit überschreiten. Allerdings wird ersichtlich, dass die geringeren Absolutwerte der Basensättigung in Bash Gumbez auf das Ausgangsgestein zurückzuführen sind. Der geologische Untergrund wird hier vor allem von kristallinem Gestein gebildet. Folglich ist im Vergleich zu den anderen Tälern die Calcium-Konzentration an den Austauschern geringer (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

#### 6.2.4.5 Magnesium

Magnesium als weiteres wichtiges Makronährelement ist Baustein wichtiger Pflanzeninhaltsstoffe, aktiviert viele Enzyme und reguliert das Kationen/Anionen-Gleichgewicht. Silikatreiche Tonböden sind normalerweise reich an Magnesium. In Salzböden arider

Gebiete kann Magnesium auch als leichtlösliches Mg-Salz vorliegen. Für die Pflanzenversorgung sind vor allem die Konzentration der Bodenlösung und der Gehalt an austauschbarem Magnesium von Bedeutung. Allerdings wird die Mg-Aufnahme durch Ionenkonkurrenz in Folge hoher  $\text{NH}_4^+$ -,  $\text{K}^+$ - und  $\text{Ca}^{2+}$  Konzentrationen erniedrigt.

Eine optimale Magnesium-Versorgung der Pflanzen wird nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002) ab 15 % Anteil an der KAK gewährleistet. Die Laboranalysen zeigten einen Mittelwert der Magnesiumsättigung von 9,59 %.

In Bezug auf die Gesundheit der Tiere sollte der Mg-Gehalt der Gräser  $2,0 \text{ g kg}^{-1}$  betragen. Neben dem Eintrag durch Verwitterung der Gesteine, stellt der Mg-Eintrag durch Niederschlag mit  $0,5\text{-}3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  für meeresferne Gebiete in Anbetracht der Aridität des Ostpamir eine eher geringe Bedeutung dar. Auf der anderen Seite der Bilanz stehen Auswaschung und Entzug durch die Pflanzen und anschließend die Wiedetiere (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

#### 6.2.4.6 Phosphor

Als weiteres Hauptnährelement ist der Phosphorgehalt für den Nährstoffhaushalt von Interesse. Phosphor liegt meist gebunden in oxidiert Form als Orthophosphat vor und nur ca. 0,1 % befinden sich in der Bodenlösung. Die P-Gehalte sind abhängig von Ausgangsgestein, Textur und Entwicklungsgrad des Bodens. Speicher für gebundenes Phosphat sind organische Salze, Oberflächen von Sorbenten, organische Verbindungen und Bodenorganismen. In der Regel steigt der P-Gehalt mit Zunahme des Humusgehaltes und Abnahme der Korngröße, da eine Bindung an die Oberflächen der Tonminerale erfolgt. Die organischen Bindungsformen am Gesamtposphorgehalt von Böden betragen 15-80 %, wovon wiederum 3-20 % in lebenden Organismen vorübergehend festgesetzt sind (GISI ET AL. 1997). Die Gesteine sind der größte Phosphorspeicher, wobei das Phosphat für den globalen Kreislauf überwiegend aus Apatiten mobilisiert wird. Durch Erosion wird der P-Gehalt an Hängen dezimiert und in Senken akkumuliert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Die untersuchten Phosphorgehalte der Testflächen rangieren auf einem sehr niedrigen, für den Ostpamir charakteristischen Niveau (Tab. 29). Nur das vierte Quartil rangiert im mittleren Bereich. Eine P-Anreicherung in Oberböden durch Vegetationsrückstände konnte bestätigt werden. Im unteren Wurzelbereich nimmt der Phosphorgehalt im Vergleich zum Oberboden ab, da das Recycling durch die Pflanzen wegfällt (GISI ET AL. 1997). Erhöhte Phosphorwerte sind vor allem in den oberen Horizonten stark beweideter Flächen zu finden, was auf den Dungeintrag zurückzuführen ist (AYUBA 2001). Phosphor ist insbesondere in den festen Dungausscheidungen enthalten und wird durch die Tiere mobilisiert und bevorzugt auf den stark beweideten Flächen eingetragen. Allerdings sind die Werte vergleichsweise gering, was auf die Verwendung des Viehdungs als

Brennmaterial zur Energiegewinnung und das deshalb konsequente Einsammeln der Exkremente zuzüglich des Nährstoffentzugs durch die Futteraufnahme des Viehs und die Umsetzung in Fleisch- und Milchprodukte, zurückzuführen ist (GYAMTSO 2002). Dies gilt nicht nur für den Phosphor, sondern für alle Nährstoffe, die dabei irreversibel dem Boden entzogen werden. Der Nährstoffkreislauf wird somit unterbrochen. Die Zufuhr durch die Weidetiere konnte bei den Aufnahmen nur durch die visuelle Wahrnehmung von festen Exkrementen bewertet werden, die allerdings einen Großteil des zugeführten Phosphors enthalten; eine Zufuhr durch Urin blieb unbewertet, differiert aber sicherlich nicht stark von der Intensität der Bonierung mit „Exkremente“. Diese Nährstoffzufuhr kann allerdings dem Boden durch einfaches Aufsammeln nicht wieder entzogen werden.

### 6.2.5 C/N-Verhältnis

Zum einen wird das C/N-Verhältnis durch die elementare Zusammensetzung der Streu beeinflusst, zum anderen durch die Dekompositionsrate. Beim Abbau des organischen Kohlenstoffs wird CO<sub>2</sub> freigesetzt (ZECH ET AL. 2007).

Hoch aktive Böden mit einem hohen Anteil an Biomasse besitzen ein enges C/N-Verhältnis, da Mikroorganismen sehr N-reich sind. Hier wird aus organischen Ausgangsstoffen Stickstoff freigesetzt. Bei niedrigen Temperaturen hingegen steigen der Stickstoffgehalt und auch der Kohlenstoffgehalt an. Bei C/N-Verhältnissen von 20 wird aus der organischen Substanz weder Stickstoff abgegeben noch mineralischer Stickstoff mikrobiologisch fixiert. Ein sehr weites C/N-Verhältnis ist typisch für Böden mit einem hohen Gehalt an unzersetzter Pflanzenmasse. Solch hohe C/N-Verhältnisse sind in den Proben 17, 88, 91 und 210 zu finden. Probe 17 ist ein Quellrasen, während die anderen drei Flächen der Vegetationseinheit Wüsten und Zwergstrauchwüsten zugerechnet werden können. Ein hoher Gehalt an unzersetzter Pflanzenmasse ist hier eher in Frage zu stellen. Das C/N-Verhältnis ist ein wichtiger geoökologischer Standortindikator zur Unterscheidung der Humusformen. Mit zunehmendem atmosphärischem Stickstoffeintrag wird das natürliche C/N-Verhältnis deutlich eingengt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Die Abnahme des C/N-Verhältnisses mit zunehmender Profiltiefe aus Studien von GLEIXNER (2005) konnte anhand des untersuchten Datensatzes bestätigt werden (Abb. 36). Die Unterschiede zwischen den Tälern sind auf die Anteile an den Vegetationseinheiten zurückzuführen. Dabei besitzt das Pshart Gumbez Kol den höchsten prozentualen Anteil an den Quellrasen, gefolgt von Bash Gumbez.

Durch Beweidung werden die C- und N-Flüsse in Grünlandsystemen im Vergleich zur ungenutzten Situation in erheblichem Umfang verändert, da der größte Teil des von den Tieren über das Futter aufgenommenen Stickstoffs dem Boden über die Ausscheidung der Exkremente wieder zugeführt wird. Ein Wechsel der Vegetation bzw. der Boden-

nutzung ziehen eine Änderung des  $N_{\text{tot}}$ -Gehaltes nach sich. Die Fäkalien enthalten generell zum Großteil unverdaute Futterrückstände, bestehend aus Cellulose und Ligninfasern. Im Vergleich zur Ausgangsbiomasse sind sie mit Lignin und Mineralien angereichert. Darüber hinaus enthalten sie Zellen von Mikroorganismen. Das C/N-Verhältnis der Exkremente beträgt normalerweise 15-30. Urin kann durch Hydrolyse signifikante Mengen an  $NH_4^+$  enthalten (NIEDER & BENBI 2008).

Verglichen mit STEFFENS ET AL. (2009) liegen die ermittelten C/N-Verhältnisse etwas niedriger, da die Aridität des Untersuchungsgebietes im Vergleich mit den dort beschriebenen semi-ariden Steppen Nordchinas eine geringere Produktionsrate zulässt und somit auch weniger organische Substanz für die Bodenbildung zur Verfügung steht.

BIONDINI & MANSKE (1996), STEFFENS ET AL. (2009) und SU ET AL. (2005) konnten entgegen der vorliegenden Ergebnisse einen Verlust von pedogenem organischem Kohlenstoff und Stickstoff durch starke Beweidung nachweisen. Da es sich beim C/N-Verhältnis um einen Quotienten handelt, ist besonders der organische Kohlenstoff maßgebend, da dieser durch die Beweidung reglementiert wird. Wiederum andere Studien zeigen, dass die Stickstoffgehalte durch die Beweidung sogar erhöht werden können (BIONDINI & MANSKE 1996). Die Ergebnisse der Literatur sind demnach nicht auf die vorliegende Studie übertragbar. Im Untersuchungsgebiet herrscht demzufolge ein Sonderfall vor, da die Exkremente von den Viehnomaden zur Brennstoffgewinnung aufgesammelt werden und somit die Stickstoffzufuhr künstlich unterdrückt wird. Daneben ist anorganischer Stickstoff vor allem im Urin enthalten. Dieser Parameter konnte mangels Sichtbarkeit auf den Flächen nicht geschätzt werden. Allerdings bleibt anzunehmen, dass zwar die Verteilung dieser Variablen mit den festen Dungausscheidungen konform geht, allerdings eine weitere anthropogene Modifikation durch Einsammeln unterbleibt. Dies spricht zwar nicht für eine direkte Erhöhung des C/N-Verhältnisses, aber möglicherweise für eine diversifizierte Einschätzung der Weideintensität und deren Korrelation.

Von KÖRNER ET AL. (2007) wird ein großer Quotient des C/N-Verhältnisses sowohl für die herbivoren Konsumenten als auch die Dekompositionsrate als negativ eingeschätzt. Bei gleichbleibender Futtermenge werden weniger Proteine von den Tieren aufgenommen, was durch eine unterschiedliche Diversifizierung im Fraßverhalten zu kompensieren versucht wird. Durch eine Erhöhung des  $CO_2$ -Gehaltes im Zuge des Klimawandels prognostizieren die verschiedenen Szenarien eine verschlechterte Futterqualität. Dies hat nachhaltige Konsequenzen für die Weidetiere. Dennoch könnte, wie das *Harvard Soil Warming Experiment* zeigt, eine Erwärmung in einer erhöhten Bodenatmung resultieren. Allerdings liegen keine Langzeitstudien vor, die auch eine mit  $CO_2$ -angereicherte Atmosphäre berücksichtigen. Möglicherweise könnte dies den Effekt abpuffern (NORBY ET AL. 2007).

### 6.2.6 C/N-Verhältnis und das Tereskenproblem

SCHLESINGER ET AL. (1996) beschreiben die Zwergsträucher in Wüsten als Inseln der Fruchtbarkeit, da unter ihnen eine Akkumulation der limitierenden Pflanzennährstoffe Stickstoff und Phosphor nachgewiesen werden konnte. Sie sehen die Sträucher in Wüsten als Streulieferanten mit einer Inselfunktion der biotischen Aktivität und des biogeochemischen Kreislaufes. Auch BOHNER (2001) bestätigt eine charakteristische Zustandsänderung durch Zwergsträucher im Boden; allerdings geht er von einer Humusanreicherung nicht nur durch erhöhte Bestandsabfälle, sondern auch durch geringere Mineralisationsraten infolge tiefer Temperaturen und einer schwereren Abbaubarkeit stickstoffarmer Bestandsabfälle aus. Folglich reichert sich stickstoffarmer Humus an und das C/N-Verhältnis im Oberboden erweitert sich. In vielen Trockengebieten ist die Abundanz von Sträuchern positiv mit dem Weidedruck korreliert. Allerdings ist im Untersuchungsgebiet eher ein Rückgang der Strauchbedeckung zu erwarten, da nicht nur der Weidedruck, sondern auch der Mangel an Alternativen in der Energiegewinnung auf der Ressource Zwergstrauch lastet. Die divergierenden Thesen in der Literatur, bezüglich des *Tereskenproblems*, konnten, anhand von teilnehmenden Beobachtungen, nicht bestätigt werden. So wird beim Wermut- oder Tereskenstechen die Wurzel nicht ganz ausgerissen, sondern vielmehr herausgeholt (Abb. 78). Ein Vergleich der beiden Sträucher ergibt zwar ein größeres Volumen pro Strauch für den Wermut, allerdings besitzt der Teresken einen höheren Brennwert und wird von der lokalen Bevölkerung bevorzugt. In vergleichbaren Studien in der Mongolei konnten aber keine statistischen Zusammenhänge zur Beweidung bezüglich der Zwergsträucher gezogen werden (STUMPP ET AL. 2005).



Abb. 78: Nutzung von Zwergsträuchern als Brennmaterial



### 6.2.7 Stabile Isotope

Die Verteilung von Isotopen in der Biosphäre ist nicht homogen, sondern folgt charakteristischen räumlichen und zeitlichen Verteilungsmustern. Diese An-/Abreicherungen resultieren aus den unterschiedlichen Verhaltensweisen gegenüber Fraktionierung bei physikalischen sowie enzymatischen Prozessen und werden von den Umweltbedingungen und biologischen Eigenschaften von Organismen und Ökosystemen gesteuert. Nach SCHNYDER & AUERSWALD (2008) gilt folgende Regel: Das jeweils leichtere Isotop wird schneller verlagert und wird bevorzugt in biochemischen Reaktionen umgesetzt, so dass es sich im Produkt oder der Senke anreichert, wohingegen das schwerere Isotop tendenziell im Substrat oder der Quelle verbleibt.

Studien von MÄNNEL ET AL. (2007) zeigten anhand von Stabilisotopuntersuchungen, dass die absolute Höhe einen Einfluss auf das Klima und die edaphischen Bedingungen hat und somit auch auf die Primärproduktion und die Degradationsprozesse. Aufgrund des vergleichsweise kleinen Stichprobenumfangs von nur  $n = 11$  Bodenproben und  $n = 12$  Pflanzenproben, die auch noch über verschiedene Vegetationseinheiten streuen, kann in der vorliegenden Untersuchung keine Aussage hinsichtlich des Höheneinflusses getroffen werden.

#### 6.2.7.1 Kohlenstoff

Die Kohlenstoffisotopenzusammensetzung aller Pflanzen ist abhängig von der Konzentration des atmosphärischen  $\text{CO}_2$  und von der Leitfähigkeit der Stomata und der Photosyntheseaktivität. Während des Aufnahmeprozesses unterscheiden Pflanzen zwischen schwereren und leichteren Isotopen eines Elements. Dieser Prozess wird Fraktionierung genannt und hängt von Umweltfaktoren wie Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit, dem  $\text{CO}_2$ -Gehalt und dem Mikroklima ab. Da die Anreicherung integrativ während des ganzen Pflanzenlebens erfolgt, wird ein Langzeitsignal der Umwelteinflüsse aufgezeichnet. Niedrigere  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen bzw. geringere atmosphärische  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisse führen zu einer reduzierten Isotopenfraktionierung und damit positiveren  $\delta^{13}\text{C}$ -Werten (SCHNYDER & AUERSWALD 2008; ZECH ET AL. 2007). Wenn Pflanzen unter Stress stehen, können Stoffwechselprozesse Veränderungen in der Isotopenfraktionierung bewirken. Stress kann mit externen Umweltfaktoren wie Temperatur, Aridität, Salz, Höhe oder der Verfügbarkeit von Nährstoffen verbunden sein. Für  $\text{C}_3$ -Pflanzen werden niedrige  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte mit Licht- oder Nährstoffdefizienten sowie tiefen Temperaturen gleichgesetzt. Hohe  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte werden hingegen mit hohen Salzgehalten, extremen Höhenlagen und Wassermangel in Verbindung gebracht. So verengen während trockenen Perioden Pflanzen ihre Stomata, wodurch die  $\text{CO}_2$ -Versorgung limitiert wird. Folglich wird der  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert positiver. Besteht kein Wasserstress, so ist im Interzellularraum viel  $\text{CO}_2$  enthalten und die Pflanze ist vor allem durch das leichtere Kohlenstoffisotop gekenn-

zeichnet (KENNEDY & KROUSE 1990; MÄNNEL ET AL. 2007; PATAKI ET AL. 2007; SCHNYDER ET AL. 2006; WITTMER ET AL. 2008, ZECH ET AL. 2007).

Die Reaktionsmuster der Pflanzenarten auf veränderte Umweltbedingungen durch Landnutzungswandel differieren. Bei STEFFENS ET AL. (2009) wird verstärkte Lignindegradation in der Zusammensetzung organischer Bodensubstanz durch Beweidung beschrieben. Ein bei abnehmender Landnutzung zu erwartendes niedrigeres  $\delta^{13}\text{C}$ -Signal durch die höhere Leitfähigkeit der Stomata aufgrund einer höheren Luftfeuchte konnte in den Ergebnissen nicht gefunden werden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen keinen Zusammenhang der  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte mit der Beweidung, was mit Studien von SCHNYDER ET AL. (2006) konform geht. Auch SCHNEIDEGGER (2000) konnte keine systematischen Muster der Bodennutzung anhand der  $\delta^{13}\text{C}$ -Ergebnisse feststellen. Die Variabilität reflektiert hier eine hohe funktionelle Diversität der Kohlenstoffgewinnungsprozesse und ist ein Ausdruck der Anpassung an die Umweltbedingungen. Darüber hinaus ist diese Variabilität ein artspezifisches Charakteristikum zur Anpassungen an die differierenden Umweltbedingungen, welches das Landnutzungssignal überdeckt.

Die kurzzeitige Information über die Ernährung wird typischerweise besonders gut in kontinuierlich wachsenden Proteinen, wie das Keratin, aus dem Nägel und Haare aufgebaut werden, gespeichert, während Langzeitinformationen im Carbonat des Zahnschmelzes erhalten werden (WEST ET AL. 2006). Einige Studien von SCHNYDER ET AL. (2006) und SCHNYDER & AUERSWALD (2008) untersuchten die  $\delta^{13}\text{C}$ -Verhältnisse der Schwanzhaare von Weidetieren, speziell von Schafen und Rindern. In den Haaren wird die Isotopeninformation des Weidefutters mit einer konstanten Wachstumsrate, die bei Rindern etwa 0,74-0,80 mm pro Tag beträgt, gespeichert. Die Untersuchungen zeigten, dass einzelne Stichproben auf alle Tiere der Herde übertragbar waren und auch ihre Ernährung und somit das gesamte Weidefutter mit einer hohen zeitlichen Auflösung eingeschätzt werden konnte. Die Laboranalysen im Untersuchungsgebiet stehen für das bereits erhobene Datenmaterial an Haarproben noch aus.

#### 6.2.7.2 Stickstoff

Die  $\delta^{15}\text{N}$ -Konzentration hängt von einer Vielzahl externer unbekannter schwankender Stickstoffquellen ab: Bodenlösung, Bodenluft und atmosphärische Stickstofffixierung. Die Verhältnisse im Boden können durch Mikroorganismen stark modifiziert werden. Typischerweise sind die  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Boden höher (Abb. 47) als in der umgebenden Vegetation (Abb. 46). Der Stickstoffkreislauf bestehend aus Böden, mikrobieller Biomasse und Vegetation diskriminiert das schwerere Stickstoffisotop während der Degradation der organischen Biomasse und reichert es im Boden an. Erhöhte biogeochemische Umsetzungsraten durch wärmere Klimabedingungen manifestieren sich in einer Anreicherung von  $\delta^{15}\text{N}$ . Umgekehrt sprechen relativ negativere Werte für

tiefere Temperaturen. Dieser Effekt ist auch von Stickstofffixierern bekannt. Denitrifikation diskriminiert gegen das schwere  $^{15}\text{N}$  und führt zu einer bevorzugten  $^{14}\text{N}$ -Emission in Form von  $\text{N}_2$  oder  $\text{N}_2\text{O}$ . Dies resultiert in einem positiveren  $\delta^{15}\text{N}$ -Wert (ZECH ET AL. 2007).

Im globalen und regionalen Kontext stellen SCHNYDER & AUERSWALD (2008) einen negativen Zusammenhang zwischen dem  $\delta^{15}\text{N}$  in Pflanzen bzw. im Boden und dem Niederschlag heraus. MÄNNEL ET AL. (2007) konnten in ihren Studien eine Abnahme der  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte mit der Höhe bestätigen, den sie analog ebenfalls über Haare der Weidetiere nachwiesen. Analog zu den  $\delta^{13}\text{C}$ -Konzentrationen kann aus dem erhobenen Datensatz keine Aussage über ein Höhensignal getroffen werden, da hierzu der Stichprobenumfang zu gering ist.

Jahreszeitliche Schwankungen der biologischen Aktivität verursachen Variationen in der Nitratkonzentration und somit auch verschiedene fraktionierende Prozesse. Generell erzeugen biologische Prozesse, die unter höheren Sommertemperaturen verstärkt ablaufen, einen Anstieg der schweren Isotope, da Organismen die leichteren Isotope präferieren (JOHANNSEN ET AL. 2008).

Das  $\delta^{15}\text{N}$ -Signal ist nicht uniform, sondern nimmt mit der Profiltiefe zu. Es wird durch die In- und Outputs determiniert. So ist der tiefere Stickstoff gegen atmosphärische Inputs isoliert und in Mineralisationsprozessen diskriminiert. Außerdem wird von den Wurzeln der mit  $^{14}\text{N}$ -angereicherte Stickstoff präferiert (SCHEIDEGGER 2000).

Eine Anreicherung mit schwerem  $\delta^{15}\text{N}$  kann an Stellen mit Stickstoffakkumulation und Mineralisation, wie feuchten Senken, in der Landschaft gefunden werden oder auf durch Urin- und Dungeffekte überweideten Flächen (SCHNYDER & AUERSWALD 2008); vgl. Abb. 47. So konnte PÉREZ (2005) nach einer Düngung mit Urin beobachten, dass das Produkt der Nitrifikation ( $\text{NO}_3^-$ ) einen niedrigeren  $\delta^{15}\text{N}$ -Wert aufweist als das Substrat ( $\text{NH}_4^+$ ). Die erhöhten  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte werden mit einem offenen Nährstoffkreislauf in Trockengebieten in Zusammenhang gebracht. Dies trifft auf die untersuchten Flächen zu: Durch eine intensive Bewirtschaftung wird der Stickstoffkreislauf geöffnet. Während der Dekomposition wird der Stickstoff im Boden fraktioniert, was sich in einem Signal von positiven  $\delta^{15}\text{N}$ -Werten manifestiert. Positivere  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in den obersten Bodenhorizonten sowie den Pflanzen konnten somit mit einer erhöhten Düngerzugabe von speziell organischem Dung, der generell mit  $^{15}\text{N}$  angereichert ist, durch Überweidung festgestellt werden. Da eine höhere mikrobielle Aktivität zu einer Stimulation der pedogenen Umsetzungsprozesse und damit zu einem höheren Stickstoffumsatz des leichteren  $^{14}\text{N}$  in den Pflanzen führt, wobei Komponenten aus schwererem  $^{15}\text{N}$  diskriminiert werden, kommt es zu einer Anreicherung in den Böden und der auf ihnen stockenden Biomasse (SCHEIDEGGER 2000; ZECH ET AL. 2007). Von

ESHETU & HÖGBERG (2000) wird solch eine Isotopen-Anreicherung in einem geöffneten N-Kreislauf durch Landnutzungseffekte in Äthiopien beschrieben. Der  $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Boden wird positiv, da dem isotopisch leichteren Stickstoff der Vorzug gegeben wird (Abb. 79). In einem auf Landschaftsebene basierenden Maßstab trifft dies allerdings nicht mehr zu, da feuchtere Flächen relativ zu ihrer Umgebung mit  $^{15}\text{N}$  angereichert sein können. SCHEIDEGGER (2000) belegte in ihren Studien umgekehrt, dass  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte mit einer Extensivierung sanken. Das  $\delta^{15}\text{N}$ -Signal der Pflanzen fällt dabei mit abnehmender Nutzungsintensität und folgt dem Bodensignal. Umgekehrt ist auf gut gedüngten Flächen, aufgrund von höherer mikrobieller Aktivität und höheren Stickstoffumsatzraten, eine Anreicherung von  $\delta^{15}\text{N}$  zu beobachten (SCHEIDEGGER 2000).

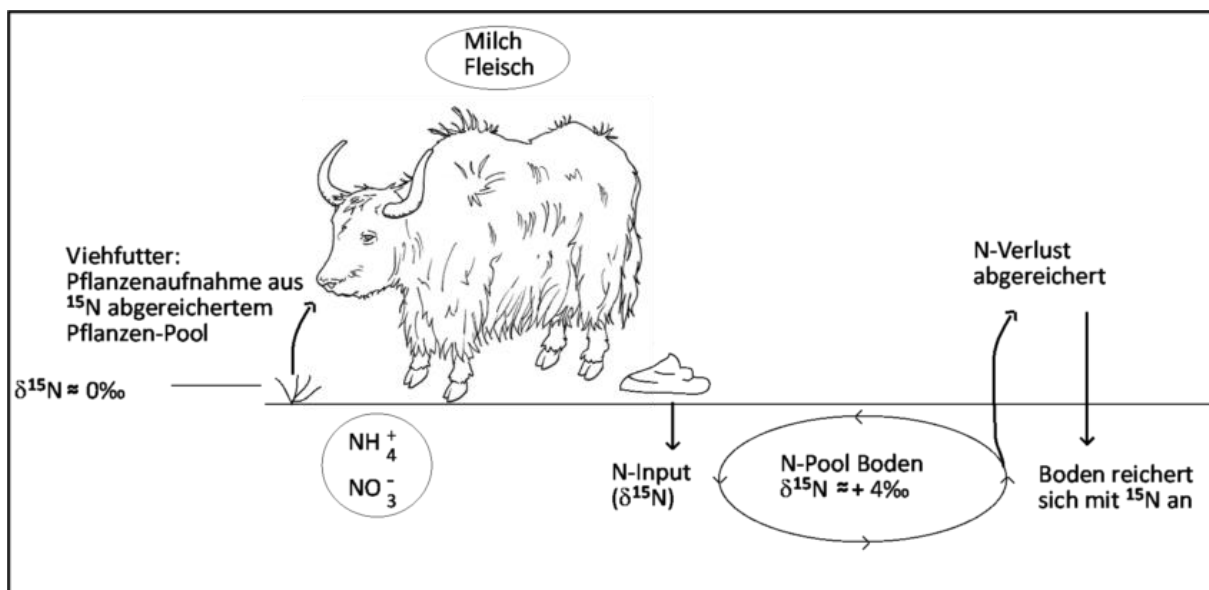


Abb. 79: Geöffneter Stickstoffkreislauf

Bodenökosystemare Prozesse reagieren sehr sensitiv auf anthropogene Einflüsse, was im  $\delta^{15}\text{N}$ -Signal der bestockenden Pflanzen implementiert wird. Das Verhältnis folgt streng den Landnutzungsmerkmalen und ist deshalb ein gutes Hilfsmittel um Landnutzungsänderungen, die in dieser Studie als Beweidungsdruck vorliegen, zu identifizieren. Anstatt des Parameters  $N_{\text{tot}}$  propagiert SCHEIDEGGER (2000) das sensitivere  $\delta^{15}\text{N}$ -Signal als Indikator für Landnutzungsänderung.

### 6.2.8 Alkane

Die Interpretation der identifizierten Alkanmuster aus den Bodenproben wird dadurch erschwert, dass keine Tiefenfunktion vorhanden ist. Damit kann nicht herausgestellt werden, was auf Mineralisation und Alterung bzw. auf Vegetationsveränderung in den letzten hundert Jahren zurückzuführen ist. Die Stichprobenanzahl der untersuchten Proben ist vergleichsweise gering, da die Labormethode sehr umfangreich, zeitintensiv und aufwändig ist. Statistische Aussagen sind deshalb nur bedingt möglich.

Anhand der statistischen Tests kann gezeigt werden, dass der Beweidungseinfluss für den untersuchten Probensatz keinen statistisch signifikanten Effekt auf die Alkanmuster hat. Desweiteren kann mittels eines H-Tests gezeigt werden, dass die Proben alle einer Stichprobe entstammen und somit keine Differenzierung nach ökologischen Variablen des Standortes erfolgt. Damit ist die These, dass Arten unter verschiedenen Umweltbedingungen kein gleiches Alkanmuster aufweisen und sich somit an ihre Umgebung anpassen in dieser Studie nicht belegt worden. Es kann deshalb nicht gezeigt werden, dass Pflanzen unter Wasserstress ein eher langkettiges Alkanmuster zum Transpirationsschutz entwickeln. Dieses Resultat steht im Kontrast zu dem sonst in der Literatur propagierten chemischen Fingerabdruck der Alkanmuster verschiedener Vegetationstypen (ZECH ET AL. 2008). Mögliche Ursachen für dieses Ergebnis können die geringen Stichprobenumfänge pro Vegetationseinheit von durchschnittlich zwei Proben, aber auch die verfälschende Projektion der untersuchten Mischproben auf die Artebene sein. Darüber hinaus spielt sicher eine Gesamtkomposition aus verschiedenen Stressfaktoren, darunter auch die Höhenlage, im Untersuchungsgebiet eine Rolle.

Basierend auf der Darstellung bei LEILIBEKOW (2003) wurden in der Nähe von Murghab Wurzelreste und einige einzelne Rest-Bestände von Weiden in den Auen des Aksu gefunden. Alkanuntersuchungen von Pflanzenresten und Bodenproben können die geeignete State-of-the-Art-Methode sein, um die Vegetationsveränderung im Ostpamir in weiterführenden Arbeiten näher zu erforschen, wenngleich die Ergebnisse der Alkananalyse der vorliegenden Studie keinen Aufschluss liefern. Der Pilotversuch zielt jedoch auf die Fragestellung des Einflusses der Beweidung und der Unterscheidung von trockenen und feuchten Standorten ab. Deutliche Unterschiedungen können zwischen verholzten Pflanzen und Gräsern getroffen werden, was für die Vegetationsrekonstruktion entscheidend ist.

### 6.3 Charakteristische Leitprofile

#### 6.3.1 Bodenentwicklung

Abgesehen von den Quellrasen sind die angesprochenen Böden überwiegend flachgründig und steinreich, wobei mit zunehmender Höhe auch die Bodenentwicklung abnimmt und Initialböden überwiegen. Die vergleichsweise jungen Initialböden entwickeln sich normalerweise im Laufe der Zeit weiter. Zutreffend wäre dies für Profile in erst seit kurzer Zeit eisfreien Lagen. Wird die Bodenentwicklung ständig gestört und ist die Vegetationsentwicklung gehemmt, so können die Böden auch in einem Initialstadium stagnieren und nur bedingt als jung angesprochen werden (WIEßNER 2009). Zu den ständigen Störungen zählen auch Wildtiere, darunter vor allem Kleinnager mit ihrer Wühltätigkeit. Die Eingänge zu ihren Bauten werden bevorzugt von den Yaks zu Wälzkühen ausgebaut. Sie wetzen dort ihre Hörner und reißen große Bodennarben in das

Landschaftsbild. Denudationsformen unterschiedlicher Dimension und damit Störungen der Bodenentwicklung entstehen durch die Viehbelastung. Die pedogenen Schäden sind in Form von Blaiken zu erkennen. Dieser Begriff subsummiert auf Abtragung zurückzuführende vegetationsfreie oder schütter bewachsene flächenhafte Hohlformen. Vor allem beim Abstieg kann es auch zur Auflockerung, Ausreißen und Lostreten ganzer Bodenstücke durch das Vieh kommen (DOMMERMUTH 1996).

Die edaphische Differenzierung vollzieht sich nur sehr viel langsamer als die Etablierung der Vegetation. Aufgrund des eingeschränkten biochemischen Stoffkreislaufes reagieren die Böden auf lokale Veränderungen, vorzugsweise der Pflanzendecke zeitverzögert und schwach. Die Bedeutung der Vegetation für die Pedogenese bleibt deswegen gering und wird durch andere abiotische Einflussfaktoren überdeckt (AGAHANJANZ 1965). Dies relativiert auch den Einfluss der Beweidung.

### 6.3.2 Bodentypen

Die tiefen Temperaturen sowie die wassergesättigten Bedingungen der Quellrasen im Ostpamir verlangsamen die Dekompositionsrate des organischen Materials. Dies ist der Grund dafür, dass Histosole besonders viel Kohlenstoff und Stickstoff enthalten. Sie gelten deshalb als Senke. Anhand der untersuchten Proben konnte dieser Bodentyp allerdings nicht ausgewiesen werden, da kein *Organic*-Horizont mit 20 % organischem Kohlenstoff diagnostiziert wurde. Dem gegenüber besitzen Xerosole und Yermosole nur sehr wenig organischen Kohlenstoff und Stickstoff, da auf Wüstenböden das Pflanzenwachstum limitiert ist. In der WRB sind diese in Leptosole, Arenosole und Regosole übergegangen. (NIEDER & BENBI 2008).

Die Clusteranalyse schafft einen ersten Überblick über die vorhandenen Böden des Untersuchungsgebietes und stellt die Bodentypen heraus. Da der volle Datensatz verwendet wurde, kam es zu Redundanzen, weil miteinander hoch korrelierte Variablen (vgl. Abb. 64) in die Clusteranalyse einfließen (LEYER & WESCHE 2007). Dennoch können somit einige einflussreiche Merkmale gewichtet werden, die bedeutende Unterschiede zwischen den Bodentypen markieren.

Die Arbeit erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit der Erfassung aller Bodentypen im Ostpamir. Charakterisiert werden konnten nur Eigenschaften des erhobenen Datensatzes.

## 7 Synthese

Alle während der Sommerweidesaison 2008 aufgesuchten Weiden präsentierten sich in einem vergleichsweise guten Zustand und zeigten lediglich in direkter Umgebung um die Jurten Camps und um Siedlungen starke Überweidungserscheinungen. Das Gesamtprojekt konnte für das Untersuchungsgebiet bestätigen, dass der Boden auf Beweidung träger reagiert als die Pflanzendecke (BATKHISHIG 2000).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die physikalischen, chemischen und bodenmikrobiologischen Indikatoren durch die Beweidung immerhin beeinflusst werden, dass die jeweiligen abiotischen Bodeneigenschaften jedoch einen weit ausgeprägteren Einfluss auf diese Anzeiger ausüben. Zwar spiegelt sich die Beweidung in den Böden in einigen Merkmalen wider, allerdings verändert sie die Charakteristika nicht so stark, dass ihre systematische Zuordnung zu den Bodentypen verändert wird. Ebenso wie andere vegetationsökologische Studien mittels multivariater Methoden (VIRTANEN ET AL. 2006) zeigten, ist die Verteilung und die Eigenschaft der Böden ein heterogenes Bild, das von vielen Umweltvariablen abhängt. Die Beweidung repräsentiert nur einen dieser veränderlichen Faktoren. Die wichtigsten Ergebnisse der Studie über die Böden im Ostpamir liegen in der Funktion als Kohlenstoffsенке unter den vorliegenden Bedingungen sowie in der Aussage zum geöffneten Stickstoffkreislauf durch Beweidung.

Da im Untersuchungsgebiet keine unbeweideten Flächen gefunden werden konnten, kann keine Aussage getroffen werden, ob die Landschaft tiefgreifend durch die Beweidung verändert wurde. Der heutige Zustand von Vegetation und Boden ist sicherlich ein durch Beweidung hervorgerufener Pseudoklimax-Zustand, der stabil und beweidungsresistent scheint.

Dennoch darf auch die Tatsache, dass das Vieh gezielt Flächen mit begünstigter Vegetation bevorzugt aufsucht – sei es aufgrund der Bedeckung als auch des Futterwertes oder der Schmackhaftigkeit, nicht unterbewertet bleiben. Diese favorisierten Pflanzen wachsen unter speziellen ökologischen Standortbedingungen, deren Integral nicht zuletzt durch die pedogenen Eigenschaften bestimmt wird. Damit wären die Bodeneigenschaften kein direkter Schluss aus der Beweidung, sondern eine sie diversifizierende Folge der begünstigten Ausgangsbedingungen.

Für das Weidemanagement ist eine Kenntnis der genauen Viehbestände unabdingbar. Eine Einschätzung der Tragfähigkeit und Weidekapazität ist wegen der klimatischen Variabilität des Untersuchungsgebietes nicht einfach. Hinzu kommen die saisonalen Wanderungen des Viehs. Eine Einschätzung der Überweidung kann mithilfe der

räumlichen Verteilung der Bodennährstoffe als Index für die räumlich heterogenen Bodeneigenschaften herangezogen werden (RIETKERK ET AL. 2000, SCHLESINGER ET AL. 1996).

SU ET AL. (2005) zeigten anhand von Einzäunungen, dass es möglich ist, eine Erholung und Wiederherstellung der Bodenfruchtbarkeit nach starker Beweidung zu erreichen. Schon nach fünf bzw. zehn Jahren stellten sich demzufolge erhöhte organische Kohlenstoffwerte ein, und die biologische Aktivität konnte verbessert werden. STEFFENS ET AL. (2009) konnten hingegen keine Veränderung der organischen Substanz durch erhöhte Streuzufuhr auf seit 25 Jahren unbeweideten Flächen feststellen. Sie führten dies auf eine gesättigte Kohlenstoffbindung der meist unverwitterten Tonminerale zurück. Zwar ist die Bodensanierung im Vergleich zur Erholung der Vegetation ein sehr langsamer Prozess, aber dennoch scheint es sinnvoll im Hinblick auf ein nachhaltiges Ressourcenmanagement, Umzäunungen gezielt ins Weidemanagement mittels eines rotierenden Zyklus zu integrieren. Im Untersuchungsgebiet zeigten die aufgesuchten Flächen hinsichtlich der pedogenen Nährstoffversorgung und des Humusgehaltes unter den vorherrschenden Umweltbedingungen im Ostpamir keine negative Beeinflussung der Bodenfruchtbarkeit durch die Beweidung. Im Gegenteil konnten sogar positive Effekte festgestellt werden.

Mit dem saisonalen Weidezyklus ist die mobile Viehwirtschaft eine kulturell und aus Sicht der Nutzung natürlicher Ressourcen adäquate Wirtschaftsweise in der Region. Eine angepasste Nutzungsstrategie sollte deshalb eine hohe Beweidungsintensität mit kurzen Zeitperioden kombinieren, auf die Erholungsphasen für die jeweiligen Flächen folgen. Somit bleibt auch der Schutz der Böden gewährleistet (BIONDINI & MANSKE 1996; DOMMERMUTH 1996). Um die entfernten Weidegründe und das alte System bestehend aus vier Saisonweiden nutzen zu können, bedürfte es einer Transportinfrastruktur die entweder zunächst von der Regierung, Spendengeldern oder Hilfsorganisationen getragen werden müsste (LUDI 2003). Hinzu kommt eine verbesserte ökonomische Einbindung in überregionale Absatzmärkte und eine bessere Vermarktung der Milch- und Fleischprodukte. Eine deutliche Verknüpfung zwischen Ökologie und Ökonomie wird hierdurch abermals deutlich. Weiterführende Projekte sollten deshalb auch zukünftig interdisziplinär angelegt sein.



## 8 Literaturverzeichnis

- AGACHANJANC, O.E. (1965): Osnovnye problemy fizičeskoj geographii Pamira. [Grundprobleme der physischen Geographie des Pamirs]. Band 1. Dušanbe.
- AGACHANJANC, O.E. (1979): Besonderheiten in der Natur der ariden Gebirge der UdSSR. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 123 (2). S. 73-77.
- AGACHANJANC, O.E. (1985a): Ein ökologischer Ansatz zur Höhenstufengliederung des Pamir-Alai. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 129 (1). S. 17-23.
- AGACHANJANC, O.E. (1985b): Zum Problem der rezenten und früheren Vergletscherung des Pamir. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 129 (4). S. 233-238.
- AGACHANJANC, O.E. (2002): Der Wind, der heißt Afghane. Forschungen auf dem Pamir im Jahr der Schlange. Aachen.
- AGAKHANJANC, O.E. & S.-W. BRECKLE (2003): Vegetation of the Pamirs – classification, cartography, altitudinal belts. In: BRECKLE, S.-W. (Hrsg.): Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 17-19.
- AGAKHANJANC, O.E. & S.-W. BRECKLE (2004): Pamir. In: BURGA, C., KLÖTZLI, F. & GRABHERR, G. (Hrsg.): Gebirge der Erde. Landschaft, Klima, Pflanzenwelt. Stuttgart. S. 151-157.
- AGAKHANYANTZ, O.E. & I. K. LOPATIN (1978): Main Characteristics of the Ecosystems of the Pamirs, USSR. In: Arctic and Alpine Research 10 (2). S. 397-407.
- AKHMADOV, H.M. (2003): Soil and desertification processes in the Pamirs. In: BRECKLE, S.-W.: Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 20-24.
- AKNAZAROV, KH. A. (2003): The present situation of pasture land in Eastern Pamir. In: BRECKLE, S.-W.: Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 30-32.
- AKNAZAROV, O. A. (2003): The Role of Khorog Botanical Garden in the study of the flora and vegetation of Pamir. In: BRECKLE, S.-W.: Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 33-36.
- AYUBA, H.K. (2001): Livestock Grazing Intensities and Soil Deterioration in the Semi-Arid Rangeland of Nigeria: Effects on Soil Chemical Status. In: Discovery and Innovation 13 (3). S. 150-155.
- BAHRENBERG, G., GIESE, E. & J. NIPPER (1999): Statistische Methoden in der Geographie. Band 1. Univariate und bivariate Statistik. Stuttgart.

- BAHRENBERG, G., GIESE, E. & J. NIPPER (2003): Statistische Methoden in der Geographie. Band 2. Multivariate Statistik. Berlin.
- BATKHISHIG, O. (2000): Influence of overgrazing for the soils cover in Mongolia. In: WALTHER, M., J. JANZEN, F. RIEDEL & H. KEUPP (Hrsg.): State and Dynamics of Geosciences and Human Geography of Mongolia. Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen A. Band 205. Berlin. S. 26-31.
- BELKIN, V.S. (1992): Biomedical Aspects of the Development of Mountain Regions: A Case-Study for the Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Tajikistan. In: Mountain Research and Development 12 (1). S. 63-70.
- BERG, L.S. (1959): Die Geographischen Zonen der Sowjetunion. Band 2. Leipzig.
- BINGHAM, F.T. (1962): Chemical tests for available phosphorus. In: Soil Science 94. S. 87-95.
- BIONDINI, M. & L. MANSKE (1996): Grazing Frequency and Ecosystem Processes in a Northern Mixed Prairie, USA. In: Ecological Applications 6 (1). S. 239-256.
- BLANK, B., BREUER, L., BUTTERBACH-BAHL, K. & H.-G. FREDE (2008): Einfluss der Beweidungsrate auf Wasser- und Stoffkreisläufe von Weideökosystemen der Inneren Mongolei. In: GFÖ AK Wüstenökologie: Beweidungsökologie und – Management in Trockengebieten. Leipzig. S. 4-5. [http://www.badr-online.de/abstracts\\_workshop\\_2008](http://www.badr-online.de/abstracts_workshop_2008) (20.11.2009).
- BLUME, H.-P., DELLER, B. LESCHBER, R., PAETZ, A., SCHMIDT, S. & B.-M.WILKE (2000a): Handbuch der Bodenuntersuchung. Band 5. Berlin.
- BLUME, H.-P., DELLER, B. LESCHBER, R., PAETZ, A., SCHMIDT, S. & B.-M.WILKE (2000b): Handbuch der Bodenuntersuchung. Band 7. Berlin.
- BOHNER, A. (2001): Bedeutung der Almwirtschaft für die Biotopvielfalt und floristische Artendiversität. In: Sauteria 11. S. 27-40.
- BORISOV A. (1965): Climates of the U.S.S.R.. Edinburgh.
- BOURBONNIERE, R.A., TELFORD, S.L., ZIOLKOWSKI, L.A., LEE, J., EVANS, M.S. & P.A. MEYERS (1997): Biogeochemical Marker Profiles in Cores of Dated Sediments from Large North American Lakes. In: EGANHOUSE R.P. (Hrsg.): Molecular Markers in Environmental Geochemistry. ACS Symposium Series 671. Washington D.C.. S. 133-150.
- BRECKLE, S.-W. (2003): Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZfF. Universität Bielefeld. Bielefeld.
- BREU, T. & HURNI, H. (2003a): Extreme environmental conditions in a breathtaking landscape. In: BREU, T. & HURNI, H.: The Tajik Pamirs: Challenges of Sustainable Development in an Isolated Mountain Region. Berne: Centre for Development and Environment (CDE), Universität Bern. S. 8-11.
- BREU, T. & HURNI, H. (2003b): Transdisciplinary research towards a strategy for sustainable development in the Pamir Mountains, Tajikistan. In: BRECKLE, S.: Natur

- und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 44-45.
- BREU, T. (2006): Sustainable Development in the Tajik Pamirs: The Role of Knowledge for Sustainable Land Management. Bern.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2007): World Reference Base for Soil Resources 2006. Ein Rahmen für internationale Klassifikation, Korrelation und Kommunikation. <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/> (3.11.2009).
- CHERBAR, V.V. (2001): Geographical Distribution of Soils in the Pamir Mountains as Dependent on Temperature and Hydrothermic Conditions. In: Eurasian Soil Science 34 (8). S. 815-819.
- DENMAN, K.L. & G. BRASSEUR (2007): Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR & H.L. MILLER (Hrsg.): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. S. 499-487.
- DENT, D. & A. YOUNG (1981): Soil Survey and Land Evaluation. London.
- DOMEISEN, M. (2003): Marginalized by the Impacts of Transformation. A Study of Post-Soviet Livestock Breeding in the High Mountains of the Eastern Pamirs. Diplomarbeit. Universität Bern.
- DOMMERMUTH, C. (1996): Die Gefährdung alpiner Ökosysteme durch beschleunigte Bodenabtragung. In: Geoökodynamik 17. S. 251-270.
- DULLER, C. (2008): Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS und R. Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch. Heidelberg.
- EAST, T.J. (1987): A multivariate analysis of the particle size characteristics of regolith in a catchment on the Darling Downs, Australia. In: Catena 14 (1/2), S. 101-118.
- ECKSTEIN, P.P. (2008): Angewandte Statistik mit SPSS. Wiesbaden.
- ESHETU, Z. & P. HÖGBERG (2000): Effects of land use on <sup>15</sup>N natural abundance of soils in Ethiopian highlands. Plant and Soil 222. S. 109-117.
- FRANZ, H.-J. (1973): Physische Geographie der Sowjetunion. Gotha.
- GISI, U., SCHENKER, R., SCHULIN, R., STADELMANN, F. X. & H. STICHER (1997): Bodenökologie. 2. Auflage. Stuttgart.
- GLEIXNER, G. (2005): Stable Isotope Composition of Soil Organic Matter. In: FLANAGAN, L.B., EHLERINGER, J.R. & D.E. PATAKI (Hrsg): Stable Isotopes and Biosphere-Atmosphere Interactions: Processes and Biological Controls. Amsterdam. S. 29-46.
- GUNDLACH K.(1934): Das Pamir-System. In: Geologische Rundschau 25 (5). S.330-355.
- GYAMTSHO, P. (2002): Condition and Potential for Improvement of High Altitude Rangelands. In: Journal of Buthan Studies 7. S. 82-98.

- HAUSER, M. (2003a): Map of the Pamir Mountains. Winterthur.
- HAUSER, M. (2003b): Zum Stand der kartographischen Erfassung der Pamirregion. In: BRECKLE, S.: Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 47-48.
- HEDIN, S. (1912): Durch Asiens Wüsten. Hamburg.
- HERBERS, H. (2003): Die postsowjetische Neuordnung der Landnutzung im Pamir: beeindruckender Erfolg mit kaum lösbaren Defiziten. In: BRECKLE, S.-W.: Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 88-97.
- HERGARTEN, C. (2003): Ecosystems and land resources. In: BREU, T. & HURNI, H.: The Tajik Pamirs: Challenges of Sustainable Development in an Isolated Mountain Region. Berne: Centre for Development and Environment (CDE), Universität Bern. S. 33-34.
- HINTERMAIER-ERHARD, G. & W. ZECH (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Stuttgart
- HITZ, C. (1995): Tadschikistan: ein Porträt. In: Geographica Helvetica 50 (3), S. 79-84.
- HURNI, H., BREU, T., LUDI, E. & B. PORTNER (2004): Der Tadschikische Pamir. Entwicklungsprobleme und Perspektiven einer Hochgebirgsregion in Zentralasien. In: Geographische Rundschau 56 (10). S. 60-65.
- HUSS, H. (1978): Über Flora und Vegetation des Wakhan und „Grossen Pamir“. In: SENARCLENS DE GRANCY, R. & R. KOSTKA: Grosser Pamir. Österreichisches Forschungsunternehmen 1975 in den Wakhan-Pamir, Afghanistan. Graz. S. 167-192.
- JANSSEN, J. & W. LAATZ (2007): Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows.
- JOHANNSEN, A., DÄHNKE, K. & K. EMEIS (2008): Isotopic composition of nitrate in five German rivers discharging into the North Sea. In: Organic Geochemistry 39. S. 1678-1689.
- JUSUFBEKOV, H. J. (1968): Uluchshenie pastbish i senokosov Pamira i Alaiskoi dolini. [Verbesserung von Weiden und Heuflächen des Pamir und des Alai-Tales]. Dušanbe.
- KELLNER, PH. (1996): Fütterung und Haltung. In: LENSCH, J., SCHLEY, P., ZHANG, R.-Ch. (1996): Der Yak (*Bos grunniens*) in Zentralasien. Osteuropastudien der Hochschulen des Landes Hessen. Reihe I. Giessener Anhandlungen zur Agrar- und Wirtschaftsforschung des Europäischen Ostens. Band 205. Berlin. S. 119-167.
- KENNEDY, B.V. & R. KROUSE (1990): Isotope fractionation by plants and animals: implications for nutrition research. In: Canadian Journal of Physiology and Pharmacology 68 (7) S. 960-972.
- KERZUM, P.A. (1968): Počvy [Boden]. In: NARZIKULOV, I.K. & K.V. STANJUKOVIČ (Hrsg.): Atlas Tadžikskoj Sovetskoj Socialističeskoj Respubliki. Dušanbe. S. 94-95.

- KHAIN, V. E. (1994): Geology of the USSR. Geology of Northern Eurasia (Ex-USSR). Band 2. In: BENDER, F., JACOBSHAGEN, V. & G. LÜTTIG (Hrsg.): Beiträge zur regionalen Geologie der Erde. Band 24. Berlin.
- KÖRNER, C., MORGAN, J., NORBY, R. (2007): CO<sub>2</sub> Fertilization: When, Where, How Much? In: CANADELL, J.G., PATAKI, D.E. & L.F. PITELKA (Hrsg.): Terrestrial Ecosystems in a Changing World. Berlin. S. 9-21.
- KRAUDZUN, T. (2005): Die institutionelle Dimension der Transformationsprozesse im Ost-Pamir, Tadschikistan. Diplomarbeit. Universität Hamburg.
- KREUTZMANN, H. (2002): Gorno-Badakhshan: Experimente mit der Autonomie – Sowjetisches Erbe und Transformation im Pamir. In: Internationales Asienforum. International Quarterly for Asian Studies 33 (1/2). S. 31-46.
- KREUTZMANN, H. (2003): Yak-keeping in the Pamirs: Strategies under changing frame conditions. In: BRECKLE, S.: Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 54-63.
- KREUTZMANN, H. (2008): Boundary-Making and Geopolitical Diversity in the Pamirian Knot. In: Colloquium Geographicum 31. S. 155-175.
- KUTTLER, S. (1996): Nutzleistungen und ihre Vermarktung. In: LENSCH, J., SCHLEY, P. & R.-CH. ZHANG: Der Yak (*Bos grunniens*) in Zentralasien. Osteuropastudien der Hochschulen des Landes Hessen. Reihe I. Giessener Anhandlungen zur Agrar- und Wirtschaftsforschung des Europäischen Ostens. Band 205. Berlin. S. 168-236.
- LANDON J.R. (1991): Booker tropical soil Manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Harlow.
- LEILIBEKOW, A. (2003): Historisch und gegenwärtige Veränderungen, der Zustand der Verschiedenartigkeit in Badachschan und Ostpamirische Desertifikations-Probleme. In: BRECKLE, S.-W.: Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 37-38.
- LENTZ, W. (2003): Auf dem Dach der Welt. Allendorf an der Eder.
- LEYER, I. & K. WESCHE (2007): Multivariate Statistik in der Ökologie. Berlin.
- LUDI, E. (2003a): Managing high pastures in the Eastern Pamirs. In: BREU, T. & HURNI, H.: The Tajik Pamirs: Challenges of Sustainable Development in an Isolated Mountain Region. Berne: Centre for Development and Environmen (CDE), Universität Bern. S. 22-23.
- LUDI, E. (2003b): Sustainable Pasture Management in Kyrgyzstan and Tajikistan: Development Needs and Recommendations. In: Mountain Research and Development 23(2). S. 119-123.
- MACBETH DIVISION OF KOLLMORGAN INSTRUMENTS CORPORATION (1994): Munsell Soil color charts. New Windsor.

- MÄNNEL, T.T., AUERSWALD, K. & H. SCHNYDER (2007): Altitudinal gradients of grassland carbon and nitrogen isotope composition are recorded in the hair of grazers. In: *Global Ecology and Biogeography* 16. S. 583-592.
- MCCUNE, B. & D. KEON (2002): Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. In: *Journal of Vegetation Science* 13. S.603-606.
- MIEHE, G., WINIGER, M., BÖHNER, J. & Z. YILI (2001): The climatic diagram map of High Asia. Purpose and concepts. In: *Erdkunde* 55 (1). S. 94-97.
- NEDZVEDSKY A.P. (1968): Tektonika [Tektonik]. In: NARZIKULOV, I. K. & K. V. STANJUKOVIČ (Hrsg.): *Atlas Tadžikskoj Sovetskoj Socialističeskoj Respubliki*. Dušanbe. S. 18-19.
- NIEDER, R. & D.K. BENBI (2008): *Carbon and Nitrogen in the Terrestrial Environment*. Berlin.
- NORBY, R.J., RUSTAD, L.E., DUKES, J.S., OJIMA, D.S., PARTON, W.J. DEL GROSSO, S.J., MCMURTRIE, R.E. & D.A. PEPPER (2007): Ecosystem Responses to Warming and Interacting Global Change Factors. In: CANADELL, J.G., PATAKI, D.E. & L.F. PITELKA (Hrsg.): *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin. S. 23-36.
- ØKLAND, R.H. (1996): Are ordination and constrained ordination alternative or complementary strategies in general ecological studies? In: *Journal of Vegetation Science* 7. S. 289-292.
- PAGE, A.L. (Hrsg.) (1982): *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. 2. Auflage. Madison, USA.
- PATAKI, D.E., LAI, C.-T., KEELING, C.D., EHLERINGER, J.R. (2007): Insights from Stable Isotopes on the Role of Terrestrial Ecosystems in the Global Carbon Cycle. In: CANADELL, J.G., PATAKI, D.E. & L.F. PITELKA (Hrsg.): *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin. S. 37-44.
- PÉREZ, T. (2005): Factors that Control the Isotopic Composition of N<sub>2</sub>O from Soil Emissions. In: FLANAGAN, L.B., EHLERINGER, J.R. & D.E. PATAKI (Hrsg.): *Stable Isotopes and Biosphere-Atmosphere Interactions: Processes and Biological Controls*. Amsterdam. S. 69-83.
- PODANI, J. (2005): Multivariate exploratory analysis of ordinal data in ecology: Pitfalls, problems and solutions. In: *Journal of Vegetation Science* 16. S. 497-510.
- PODANI, J. (2006) Braun-Blanquet's legacy and data analysis in vegetation science. *Journal of Vegetation Science* 17. S. 113-117.
- POLO, M. (1983): *Von Venedig nach China. Die größte Reise des 13. Jahrhunderts*. Darmstadt.
- RICOTTA, C. & G. AVENA (2006): On the evaluation of ordinal data with conventional multivariate procedures. In: *Journal of Vegetation Science* 17. S. 839-842.
- RIETKERK, M., KETNER, P., BURGER, J., HOORENS, B. & H. OLFF (2000): Multiscale soil and vegetation patchiness along a gradient of herbivore impact in a semi-arid grazing system in West Africa. In: *Plant Ecology* 148. S. 207-224.

- ROBERSON, E. (1996): Impacts of Livestock Grazing on Soils and Recommendations of Management. <http://www.cnps.org/cnps/archive/letters/soils.pdf> (12.08.09).
- RUDOLF, M. & W. KUHLISCH (2008): Biostatistik. München.
- SACHS, L. & J. HEDDERICH (2009): Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. 13. Auflage. Berlin.
- SAMIMI, C. (2003): Das Weidepotential im Gutu Distrikt (Zimbabwe). Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung unter Verwendung von Landsat TM-5. In: Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie. Band 19.
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Stuttgart.
- SCHIEDEGGER, Y. (2000): Effects of Land-Use Change on the Variation of Stable Isotopes in Mountainous Grassland Species. In: Geographica Bernensia. Bern.
- SCHICKHOFF, U. & A. ZEMMRICH (2003): Assessing Grazing Lands Carrying Capacity in West Mongolia / Altai Mountains - Basis for deriving Strategies Towards Sustainable Pastoral Land Use In: BRECKLE, S.-W. (2003): Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen? Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 81-87.
- SCHILLHORN VAN VEEN, T.W. (1995): The Kyrgyz sheep herders at a crossroads. Overseas Development Institute. Rural Policy and Environment Group. <http://www.odi.org.uk/networks/pdn/papers/38d.pdf> (24.11.09)
- SCHINDLER, M. (1996): Anatomie und physiologische Daten. In: LENSCH, J., SCHLEY, P., ZHANG, R.-CH.: Der Yak (*Bos grunniens*) in Zentralasien. Osteuropastudien der Hochschulen des Landes Hessen. Reihe I. Giessener Anhandlungen zur Agrar- und Wirtschaftsforschung des Europäischen Ostens. Band 205. Berlin. S. 41-83.
- SCHLESINGER, W. H., RAIKES, J. A., HARTLEY, A. E. & CROSS A. F. (1996): On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. In: Ecology 77 (2). S. 364-374.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P. & K. STAHR. (1995): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler. 2. Auflage. Berlin.
- SCHMIZ, P. (2009): Bodentemperaturmessungen zur expositions- und höhenbedingten Differenzierung des Bodenwärmehaushaltes im Hochgebirge. In: BAUMANN, M. et al. (2009): Landschaftsökologie des Hochgebirges (Zailijskij Alatau, Tien Shan, Kasachstan). Arbeitsmethoden der Physischen Geographie. Arbeitsband Methoden und Ergebnisse. Arbeitsberichte Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin, Band 150. Berlin. S. 42-46.
- SCHNEIDER, J. (2003): The geological setting: hazards and potentials. In: BREU, T. & HURNI, H.: The Tajik Pamirs: Challenges of Sustainable Development in an Isolated Mountain Region. Berne: Centre for Development and Environment (CDE), Universität Bern. S. 37-38.

- SCHNYDER, H. & K. AUERSWALD (2008): Isotopes as natural recorders of grassland ecosystem functioning and change. In: Multifunctional Grassland in a Changing World 1: S. 46-51.
- SCHNYDER, H., SCHWERTL, M., AUERSWALD, K. & R. SCHÄUFELE (2006): Hair of grazing cattle provides an integrated measure of the effects of site conditions and interannual weather variability on  $\delta^{13}\text{C}$  of temperate humid grassland. In: Global Change Biology 12. S. 1315-1329.
- SENARCLENS DE GRANCY, R. (1978): „Pamir-e Kalan“ ... „Grosser Pamir“ In: SENARCLENS DE GRANCY, R. & R. KOSTKA, R. (1978): Grosser Pamir. Österreichisches Forschungsunternehmen 1975 in den Wakhan-Pamir, Afghanistan. Graz. S. 1-55.
- SMITH, P., FALLOON, P., FRANKO, U., KÖRSCHENS, M., LAL, R., PAUSTIAN, K., POWLSON, D., ROMANENKOV, V., SHEVTSOVA, L. & J. SMITH (2007): Greenhouse Gas Mitigation Potential in Agricultural Soils. In: CANADELL, J.G., PATAKI, D.E. & L.F. PITEKKA (Hrsg.): Terrestrial Ecosystems in a Changing World. Berlin. S. 227-235.
- SPONAGEL, H. (Hrsg.), GROTTENTHALER, W., HARTMANN, K.-J., HARTWICH, R., JANETZKO, P., JOISTEN, H., KÜHN, D., SABEL, K.-J. & R. TRIDL (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover.
- STEFFENS, M., A. KÖLBL & I. KÖGEL-KNABNER (2009): Alteration of soil organic matter pools and aggregation in semi-arid steppe topsoils as driven by organic matter input. In: European Journal of Soil Science 60. S. 198-212.
- STUMPP, M., WESCHE, K., RETZER, V. & G. MIEHE (2005): Gradients of livestock density influence soil conditions but not vegetation composition in southern Mongolian desert steppes. In: Mountain Research and Development 25 (3). S. 244-251.
- SU, Y.-Z., LI, Y.-L., CUI, J.-Y. & W.-Z. ZHAO (2005): Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China. In: Catena 59 (3). S. 267-278.
- TOUTENBURG, H. & HEUMANN, CH. (2008): Deskriptive Statistik. Eine Einführung in Methoden und Anwendungen mit R und SPSS. 6. Auflage. Berlin.
- VIRTANEN, R., OKSANEN, J., OKSANEN, L. & V.Y. RAZZHIVIN (2006): Broad-scale vegetation-environment relationships in Eurasian high-latitude areas. In: Journal of Vegetation Science 17. S. 519-528.
- WALTER, H. & BRECKLE S. (1986): Spezielle Ökologie der Gemäßigten und Arktischen Zonen Euro-Nordasiens. Zonobiom VI – IX. In: Ökologie der Erde. Band 3. Stuttgart.
- WEBSTER, R. & OLIVER M. (1990): Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford.
- WEST, J. B., BOWEN, G. J., CERLING, T. E. & J. R. EHLERINGER (2006): Stable isotopes as one of nature's ecological recorders. In: Trends in Ecology and Evolution 21 (7). S. 408-414.
- WIEßNER, K. (2009): Der vertikale Wandel der Hochgebirgsböden im Linken Talgar-Tal, Tian Shan, Kasachstan. Bodenkundliche Untersuchungen. In: BAUMANN, M. et al.: Landschaftsökologie des Hochgebirges (Zailijskij Alatau, Tien Shan, Kasachstan).



- Arbeitsmethoden der Physischen Geographie. Arbeitsband Methoden und Ergebnisse. Arbeitsberichte Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin, Band 150. Berlin. S. 47-55.
- WITTMER, M.H.O.M., AUERSWALD, K., TUNGALAG, R., BAI, Y.F., SCHÄUFELE, R. & H. SCHNYDER (2008): Carbon isotope discrimination of C3 vegetation in Central Asian grassland as related to long-term and short-term precipitation patterns. In: *Biogeosciences* 5. S. 913-924.
- ZECH, M. & B. GLASER (2008): Improved compound-specific  $\delta^{13}\text{C}$  analysis of n-alkanes for application in palaeoenvironmental studies. In: *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 22. S. 135-142.
- ZECH, M. (2006): Evidence for Late Pleistocene climate changes from buried soils on the southern slopes of Mt. Kilimanjaro, Tanzania. In: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 242. S. 303-312.
- ZECH, M., BUGGLE, B., MARKOVIC, S., LUCIC, T., STEVENS, T., GAUDENYI, T., JOVANOVIC, M., HUWE, B. & L. ZÖLLER (2008): First Alkane Biomarker Results for the Reconstruction of the Vegetation History of the Carpathian Basin (SE Europe). In: REITNER, J. ET AL. (Hrsg.), *Veränderter Lebensraum – Gestern, Heute und Morgen. DEUQUA Symposium 2008. Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt* 62. Wien. S. 123-127.
- ZECH, M., ZECH, R. & B. GLASER (2007): A 240,000-year stable carbon and nitrogen isotope record from a loes-like palaeosol sequence in the Tumara Valley, Northeast Siberia. In: *Chemical Geology* 242. S. 307-318.
- ZEMMRICH, A. (2003): Tragfähigkeitsforschung – Grundlage des Naturschutzes in der Westmongolei/Altaigebirge. In: BRECKLE, S.-W. (2003): *Natur und Landnutzung in Pamir. Wie sind Erhalt der Biodiversität, Naturschutz und nachhaltige Landnutzung im Pamirgebirge in Einklang zu bringen?* Bielefelder Ökologische Beiträge. Band 18. Abteilung für Ökologie. ZiF. Universität Bielefeld. Bielefeld. S. 79-80.
- ZHOU, G., PENG, S., ZHOU, L., WANG, Y. & Z. XU (2007): Global Change Impacts on Agroecosystems of Eastern China. In: CANADELL, J.G., PATAKI, D.E. & L.F. PITELKA (Hrsg.): *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin. S. 273-283.
- ZÖFEL, P. (1988): *Statistik in der Praxis*. 2. Auflage. Stuttgart.

## 9 Nachwort

Dankende Worte für eine Zeit am Rande des Wahnsinns

Für die zahlreichen fachlichen und außerfachlichen Diskussionen und Ratschläge, sowie für die Möglichkeit dieser Arbeit und Erstkorrektur im Rahmen des von der Volkswagen Stiftung finanziell unterstützten Projektes am Institut für Geographie der Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich sehr herzlich PD Dr. Cyrus Samimi. Die Betreuung fand grenzübergreifend und interkontinental in Murghab, Erlangen und Wien statt. Dank der VoIP-Software Skype konnten zwischen den Projektmitarbeitern alle räumlichen Grenzen überwunden werden.

Ich danke Prof. Dr. Rupert Bäumler für die Übernahme der Zweitkorrektur und die beratenden Gespräche zur Vorbereitung der Probenentnahme sowie für die fachlichen Diskussionen bezüglich der Laboranalysen.

Ebenso danke ich Dr. Michael Zech für die wertvollen Tipps und die Anmerkungen zum Manuskript dieser Arbeit, für die Wochenend- und Nachtschichten im Labor und die herzliche Gastfreundschaft, mit der ich während meines Aufenthaltes in Bayreuth empfangen wurde. Angelika Mergner verdanke ich eine hilfsbereite Unterstützung bei der Alkanalanalyse.

Dr. Ute Schmidt danke ich für die fachliche und seelische Unterstützung im geomorphologischen und bodenkundlichen Labor des Geographischen Instituts der Universität Erlangen-Nürnberg. In keinem Labor der Welt fühle ich mich so zuhause.

Das Projekt wurde durch die Volkswagen Stiftung gefördert und finanziell unterstützt. Die Feldarbeiten im Ostpamir waren nur durch die freundliche Hilfe und Unterstützung von ACTED und der GTZ – allen voran André Fabian - möglich. Herzlichen Dank!

Für zahlreiche kreative Inspirationen danke ich meinem Bruder Johannes Bimüller.

Für die Durchsicht der kompletten Orthographie und etliche kritische Hinterfragungen sowie die finanzielle und moralische Unterstützung danke ich meinen Eltern Barbara und Norbert Bimüller. Sie spielen nun mit dem Gedanken sich 5 Yaks zu kaufen um Quellrasen zu beweiden.

Ein Dankeschön für orthographische Hinweise zu jeweils einzelnen Kapiteln geht desweiteren an Christina Brücher und Katrin Käppner. Eine Durchsicht und germanistisch-geographische Überprüfung des Literaturverzeichnisses verdanke ich Stefan Kordel. Fachliche konstruktive Kritik bekam ich desweiteren von Julia Krepkowski, Christian Bialas und Bruno Lasermann.

Für den letzten muttersprachlichen, akademischen Schliff des englischen Abstracts danke ich Kellie Johns und Brian Sinnet.

Ich danke den Kindern der dünnen Luft, dem Pamirteam: Tobias Kraudzun, Fanny Kreczi, Stefan Schuster, Kim Vanselow und Desiree Dotter. Die Mitarbeit in einem interdisziplinär angelegten Forschungsprojekt war für mich mit einer großen Erweiterung meiner fachlich-wissenschaftlichen sowie persönlichen Horizonte verbunden.

Zwei Menschen möchte ich hierbei besonders herausstellen:

Für die umseitige Betreuung der Arbeit von den Feldarbeiten bis zur Phase der Datenauswertung und Durchsicht des Manuskriptes, insbesondere für die konstruktive Kritik und Hilfestellung in statistischen Fragen möchte ich mich bei Kim Vanselow herzlich bedanken. Wenn mein Skype-Fenster mit einem trocken fränkischen „Bassd“ aufpoppte, wusste ich stets sein höchstes Lob für die abgelieferten Arbeiten zu schätzen.

Ganz besonders möchte ich meiner Diplomarbeitsschwester Desiree Dotter danken. Sie unterstützte mich bei der Laborarbeit; etwa 40 % der Proben wurden von ihr hinsichtlich der Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Körnung und C/N-Verhältnis bestimmt. Danke, dass du immer für mich da warst, wenn ich dich brauchte. Wie schön war doch jetzt im Rückblick unsere gemeinsame Diplomarbeitszeit, wenn auch verbunden mit arbeitsintensiven langen Abenden, die wir im CIP-Pool verbrachten oder Nächten in der Schreibhöhle zuhause via virtueller Skype-Verbindung. Von der Datenerhebung im Gelände bis zu den statistischen Auswertungen und der Endfassung unserer Arbeiten war unsere Zusammenarbeit und gegenseitige Unterstützung stets vorbildlich. Danke für deine kritischen Hinterfragungen bei der Durchsicht dieser Arbeit.

Danke allen, die mich auf dem Weg durch mein Studium an der Friedrich-Alexander-Universität und der James Cook University begleitet haben!



Foto: Tobias Kraudzun

## Wahrheitsgemäße Erklärung

Ich erkläre hiermit wahrheitsgemäß, dass ich

- die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe;
- außer den im Quellenverzeichnis angegebenen Stellen keine weiteren benutzt habe und alle Zitate, die aus dem Literaturverzeichnis ganz oder in Teilen entnommen sind, als solche kenntlich gemacht und einzeln durch die Angabe des Urhebers und des Erscheinungsjahres nachgewiesen habe;
- alle sonstigen Quellen als solche kenntlich gemacht und einzeln durch Angaben des Urhebers und des Erscheinungsjahres nachgewiesen habe;
- alle Personen und Stellen, die mir bei der Durchführung und Erstellung der Arbeit geholfen haben, genannt habe;
- die vorliegende Arbeit noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegt habe.

Mir ist ferner bekannt, dass die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg aufgrund der prüfungsrechtlichen Vorschriften einen Anspruch auf das Original der Arbeit hat. Die erforderlichen Dateien werde ich als Hardcover und pdf-Dokument dem Lehrstuhl zur Verfügung stellen. Dieser Anspruch bezieht sich jedoch nur auf das körperliche Eigentum an der Arbeit als solches und auf deren Verwendung zu den in der Prüfungsordnung festgelegten Zwecken.

Unabhängig von vorstehender Erklärung und in Ergänzung hierzu erkläre ich Folgendes:

Ich bin damit einverstanden, dass meine Arbeit ins Intranet des Lehrstuhls eingestellt und damit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Erlangen, den

## Appendix

### App. 1: R-Skripte

#### #Korrelation#

```
# Daten einlesen #
mydata <- read.csv(choose.files(), header=T, sep=";", dec=",")
attach(mydata)
summary(mydata)
cor(mydata, method="spearman")
#Korrelationstest#
cor.test(Datum, Tritt, method="spearman")
cor.test(Datum, Beweidungsintensität, method="spearman")
cor.test(Datum, Tritt+Verbiss, method="spearman")
```

#### #Clusteranalyse#

```
# Daten einlesen #
KopfDaten <- read.csv("Cluster4R4.csv", header=T, sep=";", dec=",", row.names=1)
# Daten transformieren und standardisieren #
KopfTrans <- scale(KopfDaten, center=T, scale=T)
# KopfTrans in data.frame umwandeln #
KopfTrans <- as.data.frame(KopfTrans)
# Distanzmatrix berechnen #
KopfDist <- dist(KopfTrans, method="euclidean")
# Klassifizieren #
Class.out <- hclust(KopfDist, method="ward")
# 10 Gruppen bilden #
Gruppen <- cutree(Class.out, k=10)
# Dendrogramm #
old.par <- par(no.readonly=T)
plot(Class.out, line=2, cex=0.6, cex.lab=1.8, hang=-1, main="", sub="", xlab="",
ylab="Ähnlichkeit")
# Standardeinstellungen wiederherstellen #
par(old.par)
```

#### #PCA#

```
# Daten einlesen #
mydata <- read.csv("PCA.csv", header=T, row.names=1, sep=";", dec=",")
names(mydata)
summary(mydata)
# Daten transformieren und standardisieren #
mydataTrans <- scale(mydata, center=T, scale=T)
mydataTrans <- as.data.frame(mydataTrans)
mydata.Kor <- cor(mydataTrans, method="spearman")
mydata.Dist <- mydata.Kor
Ergebnis <- princomp(mydata.Kor, cor=T)
summary(Ergebnis)
loadings(Ergebnis)
```

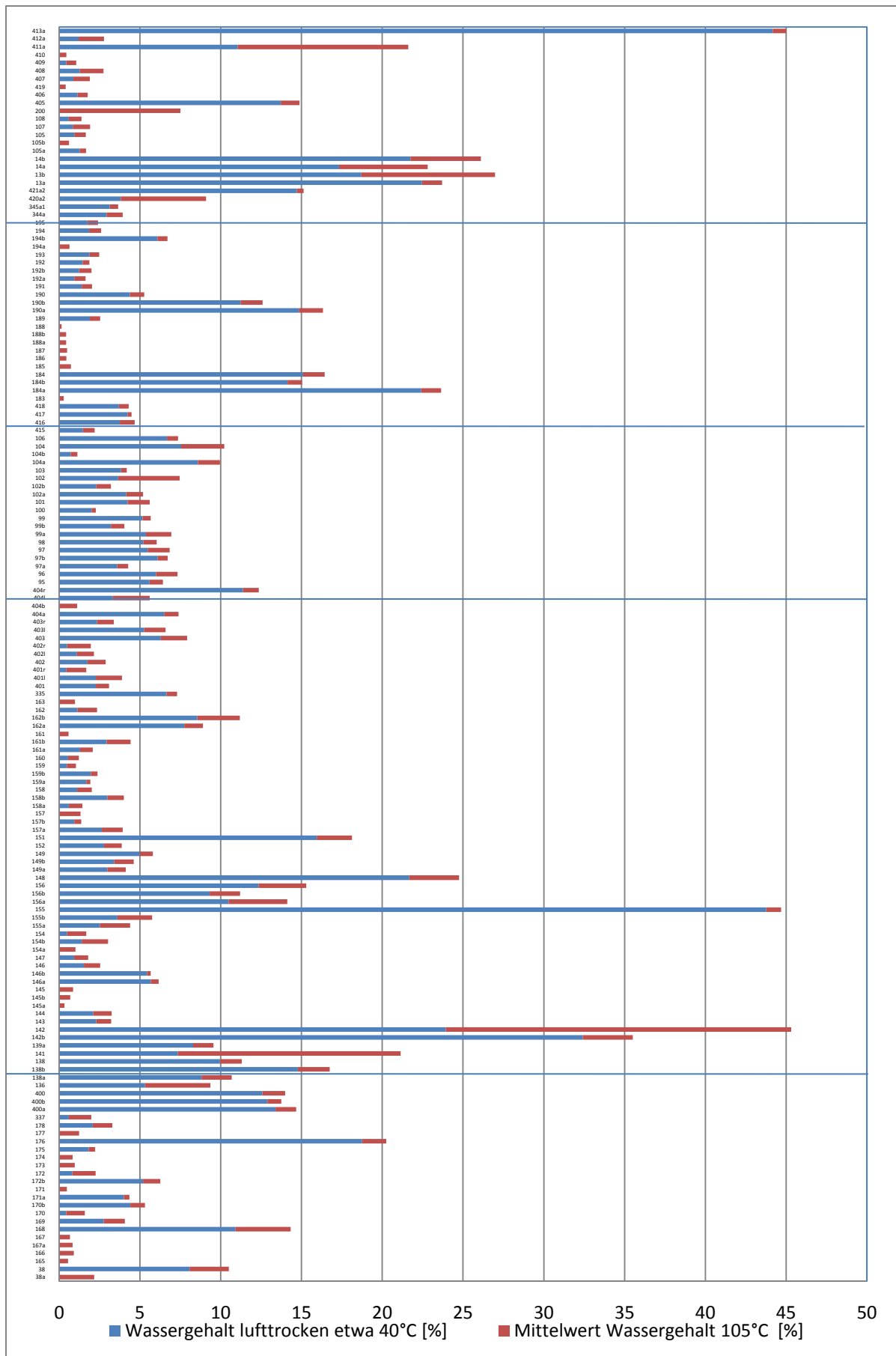
```
screepplot(Ergebnis)
biplot(Ergebnis)
```

### #DCA#

```
# einlesen der entsprechenden Dateien in R#
umweltvariablen_0708 <- read.table("DCA_env_test.csv", sep=";", header=TRUE, dec=".",
row.names=1)
aufnahmen_0708 <- read.table("DCA_Boden.csv", sep=";", header=TRUE, dec=".",
row.names=1)
Klassen <- read.table("Aufnahmen0708_Clusterklassen_test1.csv", sep=";", header=TRUE,
dec=".", row.names=1)
####DCA beginnt###
library(vegan)
dca_v1 <- decorana(sqrt(aufnahmen_0708), iweigh=0, iresc=4, ira=0, mk=26, short=0,
before=NULL, after=NULL)
dca_v1
summary(dca_v1)
## plot##
par(mar = c(4, 4, 1, 1) + 1)
plot(dca_v1, type = "n", xlim=c(-0.5, 0.7), ylim=c(-0.5, 0.7))
text(dca_v1, col = Klassen$Klasse, dis = "site", cex = 0.6)
title (main = "Detrended Correspondence Analysis")
#alternativ#
points(dca_v1, display = "sites", col = Klassen$Klasse, pch = 16, cex=0.5)
#und jetzt Umweltvariablen über DCA plotten#
fit <- envfit(dca_v1, umweltvariablen_0708, perm = 999)
fit
scores(fit, "vectors")
plot(fit, cex=0.6) #plottet alle berechneten Umweltvariablen
plot(fit, p.max = 0.05, col = "red", cex=0.6) #plottet nur Variablen mit hoher Signifikanz
```

### App. 2: Lagemaße Lagerungsdichte

Lagemaß	a-Horizont	b-Horizont
<b>Anzahl</b>	n=72	n=72
<b>Mittelwert</b>	1,41	1,50
<b>Median</b>	1,43	1,52
<b>Std.-Abw.</b>	0,23	0,23
<b>Varianz</b>	0,05	0,05
<b>Min</b>	0,77	1,01
<b>Maximum</b>	1,86	2,24
<b>1. Quartil</b>	1,26	1,33
<b>3. Quartil</b>	1,57	1,67



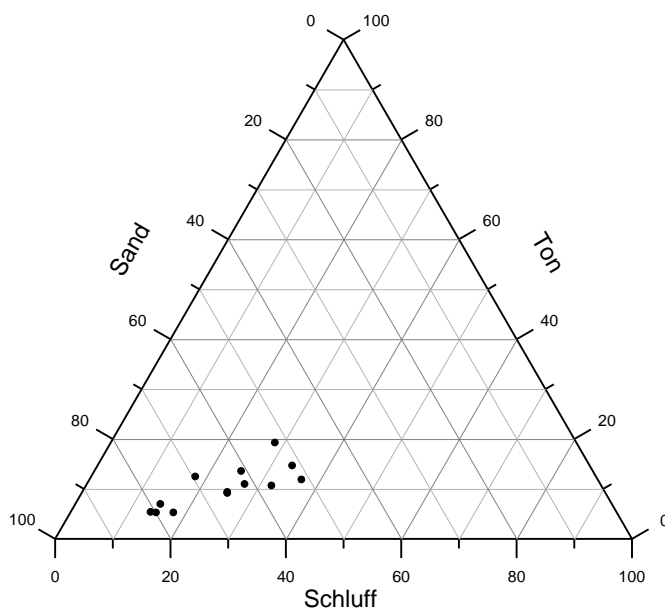
**App. 3: Wassergehalt**

## App. 4: Lagemaße Wassergehalte bei 40 °C

Lagemaß	alle Proben	Misch-proben	a-Horizont	b-Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
Anzahl	n=251	n=71	n=87	n=72	n=23	n=15	n=13
Mittelwert	5,13	4,48	5,73	5,29	6,90	4,57	2,28
Median	2,52	1,88	2,84	2,98	2,10	4,25	1,46
Std.-Abw.	7,35	7,07	8,24	6,71	10,66	1,63	4,05
Varianz	54,04	49,97	67,94	45,08	113,69	2,66	16,40
Minimum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,46	0,00
Maximum	44,18	43,78	44,18	32,41	43,78	7,55	15,09
1. Quartil	0,93	0,48	1,06	1,70	0,49	3,69	0,00
3. Quartil	5,67	5,32	6,57	5,83	9,95	5,59	1,89

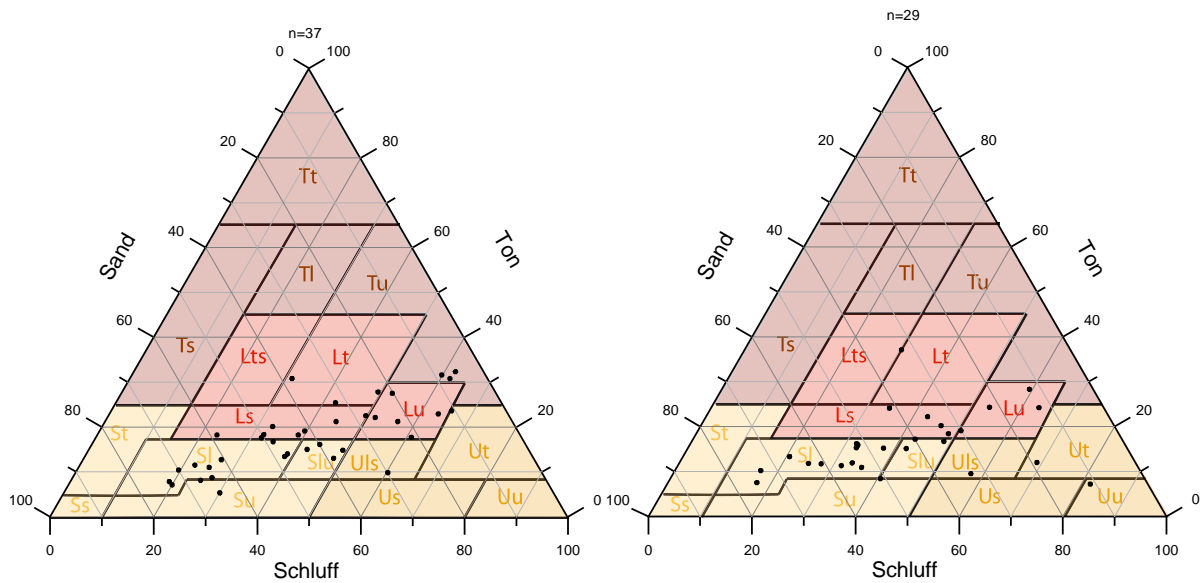
## App. 5: Lagemaße Skelettgehalte

Lagemaß	alle Proben	Misch-probe	a-Horizont	b-Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
Anzahl	n=304	n=71	n=87	n=72	n=23	n=15	n=13
Mittelwert	33,31	36,81	29,42	36,35	43,26	42,45	19,32
Median	31,50	38,69	27,37	34,03	43,00	38,69	18,66
Std.-Abw.	19,78	17,21	20,78	21,53	12,79	19,38	9,48
Varianz	391,18	296,14	431,67	463,41	163,70	375,75	89,82
Minimum	0,49	0,66	0,61	0,56	14,29	16,44	0,66
Maximum	86,40	74,59	83,33	86,40	66,86	74,59	37,08
1. Quartil	18,42	21,89	13,46	21,03	35,08	29,94	13,78
3. Quartil	46,19	47,13	43,72	51,15	49,19	60,58	25,88



## App. 6: Bodenart Bash Gumbez





App. 7: Korngrößen der a-Horizonte (links) und b-Horizonte (rechts)

App. 8: Lagemaße Bodenacidität

Lagemaß	alle Proben	Misch-proben	a-Horizonte	b-Horizonte	Pshart Gumbes Kol	Madian Gumbes Kol	Bash Gumbes Kol
Anzahl	n=210	n=71	n=37	n=29	n=23	n=15	n=13
Min	5,31	5,84	5,31	6,01	6,66	6,13	5,84
1. Quartil	7,10	6,80	6,97	6,69	7,08	6,54	6,42
Median	7,51	7,30	7,49	7,32	7,36	7,05	6,66
Mittelwert	7,37	7,19	7,29	7,21	7,34	7,03	6,70
3. Quartil	7,71	7,61	7,76	7,68	7,61	7,59	6,93
Maximum	8,44	8,17	8,18	7,96	8,02	7,90	8,17
Std.-Abw.	0,55	0,55	0,68	0,58	0,36	0,59	0,57
Varianz	0,30	0,31	0,47	0,33	0,13	0,35	0,32

App. 9: Lagemaße Leitfähigkeit

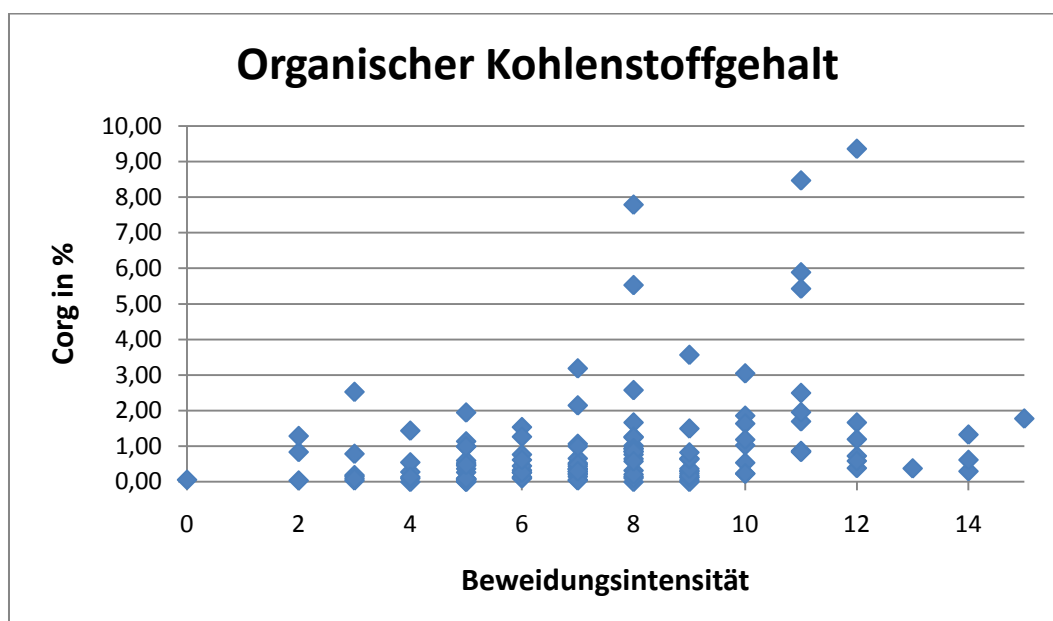
Lagemaß	alle Proben	Misch-proben	a-Horizonte	b-Horizonte	Pshart Gumbes Kol	Madian Gumbes Kol	Bash Gumbes Kol
Anzahl	n=210	n=71	n=37	n=29	n=23	n=15	n=13
Minimum	32	46	32	42	56	65	52
1. Quartil	78	84	74	71	79	76	77
Median	102	106	96	87	88	85	101
Mittelwert	572	476	725	468	217	549	296
3. Quartil	483	361	849	761	109	913	326
Maximum	5735	5165	4530	2940	1878	2735	1568
Std.-Abw.	1016	881	1196	757	399	926	430
Varianz	1033969	775991	1430356	573033	159259	857566	184595

App. 10: Lagemaße Kalkgehalt

Lagemaß	alle Proben	Misch-proben	a-Horizont	b-Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
Anzahl	n=210	n=71	n=36	n=29	n=23	n=15	n=13
Mittelwert	8,51	6,96	9,59	8,20	3,25	8,04	1,46
Median	5,03	4,31	4,77	4,11	2,70	6,84	1,12
Std.-Abw.	9,31	8,28	11,72	10,47	2,45	4,98	1,05
Varianz	86,62	68,52	137,25	109,67	5,99	24,78	1,11
Minimum	0,01	0,40	0,44	0,45	0,53	1,91	0,40
Maximum	42,95	38,79	42,95	38,18	10,29	23,04	4,13
1.Quartil	2,22	1,86	1,93	2,32	1,10	4,78	0,63
3.Quartil	10,47	8,39	10,53	8,79	4,94	10,20	2,12

App. 11: Lagemaße organischer Kohlenstoff

Lagemaß	alle Proben	Misch-proben	a-Horizont	b-Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
Anzahl	n=210	n=71	n=36	n=29	n=23	n=15	n=13
Mittelwert	1,09	1,50	1,30	1,15	2,35	0,64	0,90
Median	0,60	0,86	0,87	0,50	1,54	0,58	0,66
Std.-Abw.	1,54	1,90	1,52	1,69	2,36	0,48	0,81
Varianz	2,36	3,62	2,32	2,86	5,56	0,23	0,66
Minimum	0,00	0,04	0,00	0,14	0,15	0,04	0,21
Maximum	9,36	9,36	6,27	8,38	8,47	1,86	3,19
1.Quartil	0,24	0,44	0,24	0,29	0,86	0,30	0,43
3.Quartil	1,22	1,67	1,71	1,32	3,05	0,85	0,93



App. 12: Verteilung des organischen Kohlenstoffgehaltes

**App. 13: Lagemaße Humusgehalt**

Lagemaß	alle Proben	Mischproben	a-Horizont	b-horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
<b>Anzahl</b>	n=210	n=71	n=37	n=29	n=23	n=15	n=13
<b>Mittelwert</b>	1,85	2,56	2,18	1,95	4,03	1,10	1,56
<b>Median</b>	1,02	1,47	1,43	0,84	2,64	0,99	1,14
<b>Std.-Abw.</b>	2,64	3,26	2,58	2,91	4,04	0,81	1,40
<b>Varianz</b>	6,97	10,61	6,66	8,49	16,32	0,66	1,96
<b>Min</b>	0,00	0,07	0,00	0,22	0,26	0,07	0,36
<b>Maximum</b>	15,99	15,99	10,79	14,41	14,42	3,19	5,48
<b>1. Quartil</b>	0,39	0,74	0,42	0,50	1,47	0,51	0,73
<b>3. Quartil</b>	2,09	2,86	2,20	2,08	5,26	1,45	1,60

**App. 14: Lagemaße Stickstoffgehalt**

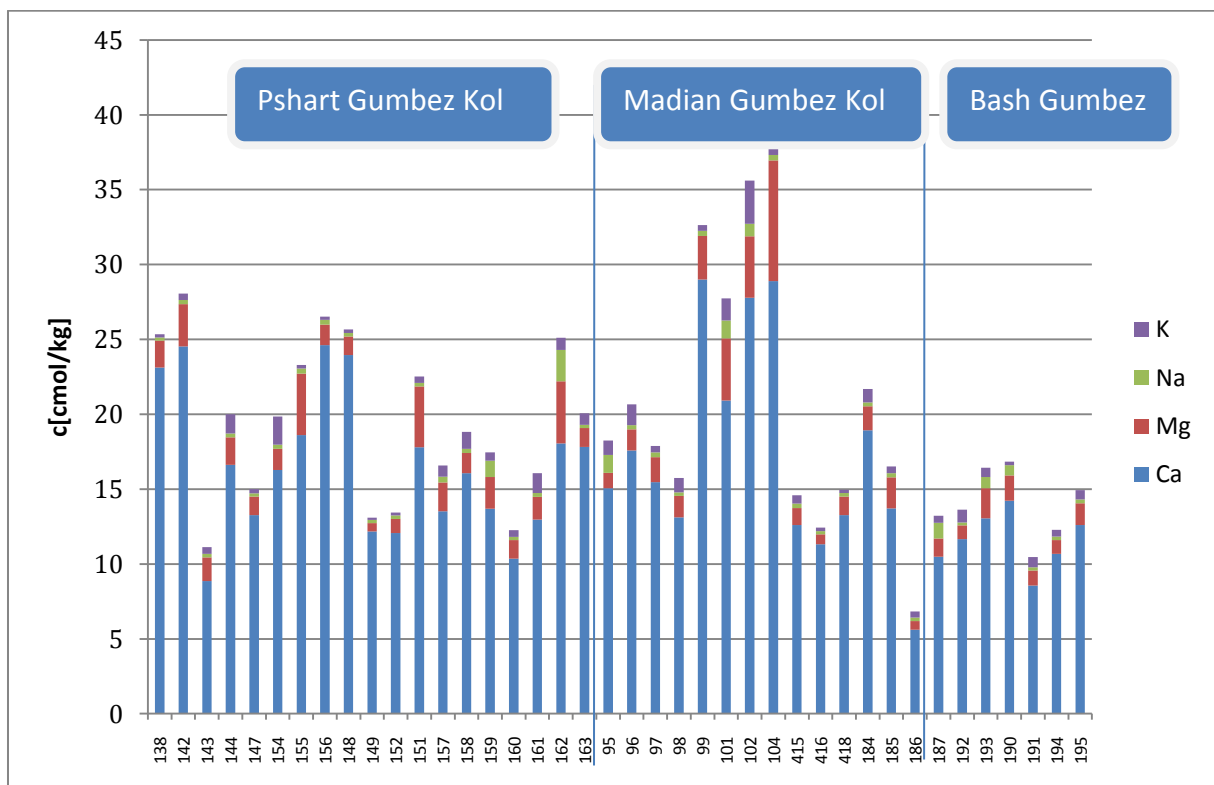
Lagemaß	alle Proben	Mischproben	a- Horizont	b- Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
<b>Anzahl</b>	n=210	n=36	n=36	n=29	n=23	n=15	n=13
<b>Mittelwert</b>	0,13	0,17	0,16	0,15	0,24	0,10	0,11
<b>Median</b>	0,09	0,11	0,11	0,09	0,17	0,09	0,09
<b>Std.-Abw.</b>	0,14	0,16	0,15	0,16	0,21	0,06	0,09
<b>Varianz</b>	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,00	0,01
<b>Minimum</b>	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04	0,02	0,00
<b>Maximum</b>	0,80	0,80	0,63	0,78	0,80	0,22	0,36
<b>1.Quartil</b>	0,06	0,08	0,07	0,07	0,10	0,05	0,08
<b>3.Quartil</b>	0,16	0,18	0,20	0,18	0,35	0,13	0,13

**App. 15: Lagemaße C/N-Verhältnis**

Lagemaß	alle Proben	Mischproben	a-Horizont	b-Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
<b>Anzahl</b>	n=210	n=71	n=37	n=29	n=23	n=15	n=13
<b>Mittelwert</b>	7,25	7,62	6,96	7,74	8,58	6,32	7,44
<b>Median</b>	6,97	7,87	7,58	7,17	9,36	6,89	7,44
<b>Std.-Abw.</b>	6,76	2,99	3,70	6,73	2,58	2,99	2,16
<b>Varianz</b>	45,72	8,96	13,71	45,23	6,67	8,96	4,65
<b>Minimum</b>	0,00	1,01	0,00	0,79	2,60	1,59	3,79
<b>Maximum</b>	66,49	16,00	14,85	39,11	12,08	11,52	11,35
<b>1. Quartil</b>	3,80	5,74	4,11	3,82	7,87	4,12	6,06
<b>3. Quartil</b>	9,34	9,66	9,67	9,06	10,23	8,48	9,11

**App. 16: Lagemaße C/N-Verhältnis  
der Ah-Horizonte**

n=24	C/N
<b>Mittelwert</b>	0,71
<b>Median</b>	6,31
<b>Varianz</b>	37,32
<b>Std.-Abw.</b>	6,11
<b>Minimum</b>	0,71
<b>Maximum</b>	27,13


**App. 17: KAK für die Täler Pshart Gumbez Kol, Madian Gumbez Kol und Bash Gumbez**
**App. 18: Lagemaße Natrium-Konzentration**

Lagemaß	Gesamt	Mischproben	a-Horizont	b-Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
<b>Anzahl</b>	n=108	n=41	n=24	n=24	n=19	n=11	n=10
<b>Mittelwert</b>	0,48	0,43	0,55	0,44	0,40	0,51	0,41
<b>Median</b>	0,28	0,26	0,29	0,28	0,26	0,32	0,26
<b>Std.-Abw.</b>	0,52	0,39	0,67	0,40	0,45	0,38	0,30
<b>Varianz</b>	0,27	0,15	0,45	0,16	0,21	0,15	0,09
<b>Minimum</b>	0,19	0,19	0,22	0,22	0,20	0,22	0,19
<b>Maximum</b>	3,07	2,09	3,07	1,73	2,09	1,20	1,03
<b>1. Quartil</b>	0,24	0,23	0,24	0,24	0,22	0,24	0,22
<b>3. Quartil</b>	0,38	0,35	0,43	0,37	0,33	0,84	0,70

## App. 19: Lagemaße Kalium-Konzentration

Lagemaß	alle Proben	Misch- proben	a-Horizont	b-Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
<b>Anzahl</b>	n=108	n=41	n=24	n=24	n=19	n=11	n=10
<b>Mittelwert</b>	0,66	0,74	0,68	0,42	0,62	1,02	0,57
<b>Median</b>	0,42	0,56	0,33	0,36	0,44	0,96	0,55
<b>Std.-Abw.</b>	0,65	0,57	0,76	0,42	0,48	0,81	0,21
<b>Varianz</b>	0,42	0,33	0,57	0,18	0,23	0,65	0,04
<b>Min</b>	0,11	0,14	0,13	0,11	0,14	0,23	0,23
<b>Maximum</b>	3,29	2,88	3,05	2,19	1,89	2,88	0,90
<b>1. Quartil</b>	0,23	0,32	0,19	0,18	0,24	0,37	0,44
<b>3. Quartil</b>	0,82	0,96	0,86	0,48	0,81	1,47	0,74

## App. 20: Lagemaße Calcium-Konzentration

Lagemaß	alle Proben	Misch- proben	a-Horizont	b-Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
<b>Anzahl</b>	n=108	n=41	n=24	n=24	n=19	n=11	n=10
<b>Mittelwert</b>	18,17	16,24	16,54	17,51	16,55	18,64	11,95
<b>Median</b>	15,94	14,23	14,96	15,64	16,29	15,47	12,13
<b>Std.-Abw.</b>	10,55	5,85	7,58	9,06	4,8	6,89	3,56
<b>Varianz</b>	111,35	34,17	57,4	82,13	23,03	47,49	12,66
<b>Minimum</b>	5,33	5,62	5,33	5,55	8,85	11,33	5,62
<b>Maximum</b>	94,88	29	38,01	42,79	24,62	29	18,93
<b>1. Quartil</b>	12,23	12,39	10,82	11,95	12,98	13,11	10
<b>3. Quartil</b>	23,48	18,77	21,09	22,49	18,61	27,79	13,84

## App. 21: Lagemaße Magnesium-Konzentration

Lagemaß	alle Proben	Misch- proben	a-Horizont	b-Horizont	Pshart Gumbez Kol	Madian Gumbez Kol	Bash Gumbez
<b>Anzahl</b>	n=108	n=41	n=24	n=24	n=19	n=11	n=10
<b>Mittelwert</b>	2,01	1,93	2,03	2,04	1,92	2,53	1,35
<b>Median</b>	1,48	1,44	1,36	1,59	1,5	1,44	1,34
<b>Std.-Abw.</b>	1,46	1,41	1,65	1,4	1,08	2,2	0,5
<b>Varianz</b>	2,14	1,99	2,72	1,96	1,17	4,84	0,25
<b>Minimum</b>	0,38	0,55	0,58	0,49	0,55	0,65	0,58
<b>Maximum</b>	8,07	8,07	7,16	6,01	4,15	8,07	2,08
<b>1. Quartil</b>	0,96	1,23	0,88	0,95	1,25	1,13	0,92
<b>3. Quartil</b>	2,82	2,05	2,76	2,94	2,11	4,09	1,77

App. 22: Lagemaße Phosphor-Konzentration

Lagemaß	Gesamt	schwach beweidet	stark beweidet	a-Horizont	b-Horizont
Anzahl	n=25	n=9	n=6	n=5	n=5
Mittelwert	0,69	0,4	0,97	1,02	0,55
Median	0,58	0,26	0,89	0,63	0,4
Std.-Abw.	0,6	0,28	0,55	0,96	0,51
Varianz	0,37	0,08	0,31	0,93	0,26
Minimum	0	0,11	0,35	0,21	0
Maximum	2,48	0,92	1,85	2,48	1,27
1. Quartil	0,22	0,2	0,53	0,25	0,11
3. Quartil	1,03	0,66	1,41	1,99	1,06

App. 23:  $^{13}\text{C}$ -Isotopenwerte für Pflanzen- und Bodenproben

Probe	Pflanzenprobe	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	Bodenprobe	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	Vegetations-einheit	Beweidung
47	K2	-25,201	K2	-22,231	Zwergstrauch-Steppe	stark
52	L7	-26,411	L7	-23,298	Zwergstrauch-Steppe	stark
21	D1	-27,160	D1	-23,277	Zwergstrauch-Steppe	schwach
12	C4 C	-26,058	C4	-22,832	Alpine Matten	stark
155	17a	-25,781	IB07m	-23,197	Alpine Matten	schwach
23	E1	-26,045	E1	-24,975	Quellrasen	stark
400	MQ1	-24,886	8J6m	-11,776	Quellrasen	unbeweidet
154	T	-26,777	IB06m	-23,712	Tereskenwüsten	stark
154	Wueste WM	-26,074			Tereskenwüsten	stark
1	FT	-24,887	A1	-18,313	Tereskenwüsten	mäßig
28	G4B	-27,196	G4	-9,488	Artemisiawüste	schwach
40	J3	-25,599	J3	-4,822	Leymussteppe	stark

App. 24:  $^{15}\text{N}$ -Isotopenwerte für Pflanzen- und Bodenproben

Probe	Pflanzenprobe	$\delta^{15}\text{N}$ [‰]	Bodenprobe	$\delta^{15}\text{N}$ [‰]	Vegetations-einheit	Beweidung
47	K2	4,937	K2	7,973	Zwergstrauch-Steppe	stark
52	L7	2,457	L7	9,253	Zwergstrauch-Steppe	stark
21	D1	3,362	D1	8,250	Zwergstrauch-Steppe	schwach
12	C4c	8,416	C4	11,213	Alpine Matten	stark
155	17a	1,248	IB07m	7,124	Alpine Matten	schwach
23	E1	9,373	E1	10,655	Quellrasen	stark
400	MQ1	1,605	8J6	6,457	Quellrasen	unbeweidet
154	T	5,778	IB06m	7,480	Tereskenwüsten	stark
154	WM	6,110	IB06m	7,480	Tereskenwüsten	stark
1	FT	5,679	A1	5,354	Tereskenwüsten	mäßig
28	G4B	-0,676	G4b	3,331	Artemisiawüste	schwach
40	J3	5,823	J3	8,128	Leymussteppe	stark

App. 25: Auswertung der Alkanmuster mit Wiederfindungsstandard C36: Konz. in ug/g Boden/Pflanze

		C15	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33
155	17A	5,16	31,14	4,93	47,43	6,13	94,76	4,01	67,27	1,17	8,53
155	IB07Bod	0,18	0,53	0,31	1,97	0,69	3,88	0,32	6,35	0,19	1,81
12	C4C	0,85	4,80	1,87	38,76	7,79	183,42	22,23	498,14	37,38	346,30
12	C4Bod	0,24	0,20	0,11	0,36	0,17	1,41	0,20	1,95	0,08	0,58
21	D1	1,57	5,07	2,86	43,60	6,34	95,11	5,78	79,80	5,30	43,16
21	D1Bod	0,09	0,21	0,14	0,49	0,13	0,65	0,12	1,44	0,14	0,77
23	E1	2,42	7,78	2,40	13,70	3,12	39,34	1,51	12,40	0,42	2,11
23	E1Bod	0,16	0,31	0,13	0,58	0,15	0,89	0,11	1,28	0,05	0,34
1	FT	1,80	106,23	4,77	76,86	8,14	314,79	24,86	236,43	2,71	4,85
1	A1Bod	0,09	0,09	0,07	0,07	0,04	0,07	0,03	0,07	0,00	0,03
28	G4B	2,16	8,11	3,44	22,55	6,53	111,35	7,90	60,00	3,29	11,51
28	G4BBod	0,07	0,08	0,05	0,10	0,05	0,25	0,05	0,40	0,04	0,16
40	J3	7,22	20,19	9,31	52,82	10,33	148,60	13,95	261,01	13,80	136,85
40	J3Bod	0,11	0,11	0,07	0,14	0,09	0,26	0,04	0,40	0,03	0,22
47	K2	1,98	22,77	4,85	112,14	12,63	270,89	25,14	486,11	29,60	243,29
47	K2Bod	0,27	0,15	0,10	0,20	0,08	0,34	0,08	0,78	0,07	0,41
52	L7	1,87	5,63	3,02	45,56	7,05	106,76	5,14	49,38	1,24	4,19
52	L7Bod	0,34	0,15	0,10	0,16	0,07	0,23	0,07	0,41	0,03	0,22
400	MQ1	3,71	12,26	4,54	18,13	3,97	50,41	1,99	35,76	1,15	7,12
400	8J6Bod	0,31	0,31	0,13	0,66	0,19	1,92	0,16	2,78	0,08	0,60
154	T	1,41	6,25	2,09	14,23	3,93	63,99	6,66	47,59	0,72	1,11
154	WM	1,17	8,63	2,92	30,87	6,27	155,56	14,61	220,11	3,03	32,15
154	IB06Bod	0,24	0,26	0,15	0,77	0,30	1,84	0,29	4,11	0,35	2,43

App. 26: Korrelationstest für die Alkanmuster der Pflanzenproben

Korrelationen nach Spearman für die Pflanzenproben											
		C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33	Bewei- dung
C25	r	1,000	,918**	,955**	,882**	,882**	,836**	,864**	,727*	,800**	,000
	Sig. (2- seitig)	.	,000	,000	,000	,000	,001	,001	,011	,003	1,000
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C26	r	,918**	1,000	,936**	,845**	,818**	,882**	,891**	,864**	,909**	-,058
	Sig. (2- seitig)	,000	.	,000	,001	,002	,000	,000	,001	,000	,866
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C27	r	,955**	,936**	1,000	,945**	,936**	,927**	,955**	,864**	,918**	,000
	Sig. (2- seitig)	,000	,000	.	,000	,000	,000	,000	,001	,000	1,000
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C28	r	,882**	,845**	,945**	1,000	,973**	,927**	,936**	,836**	,882**	,058
	Sig. (2- seitig)	,000	,001	,000	.	,000	,000	,000	,001	,000	,866
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C29	r	,882**	,818**	,936**	,973**	1,000	,927**	,945**	,845**	,864**	-,058
	Sig. (2- seitig)	,000	,002	,000	,000	.	,000	,000	,001	,001	,866
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C30	r	,836**	,882**	,927**	,927**	,927**	1,000	,991**	,945**	,936**	,000
	Sig. (2- seitig)	,001	,000	,000	,000	,000	.	,000	,000	,000	1,000

	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C31	r	,864**	,891**	,955**	,936**	,945**	,991**	1,000	,936**	,945**	-,058
	Sig. (2-seitig)	,001	,000	,000	,000	,000	,000	.	,000	,000	,866
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C32	r	,727*	,864**	,864**	,836**	,845**	,945**	,936**	1,000	,964**	-,058
	Sig. (2-seitig)	,011	,001	,001	,001	,001	,000	,000	.	,000	,866
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C33	r	,800**	,909**	,918**	,882**	,864**	,936**	,945**	,964**	1,000	,000
	Sig. (2-seitig)	,003	,000	,000	,000	,001	,000	,000	,000	.	1,000
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Bewei- dung	r	,000	-,058	,000	,058	-,058	,000	-,058	-,058	,000	1,000
	Sig. (2-seitig)	1,000	,866	1,000	,866	,866	1,000	,866	,866	1,000	.
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

\*\* . Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

\* . Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).

#### App. 27: Korrelationstest für die Alkanmuster der Bodenproben

Korrelationen nach Spearman für die Bodenproben											
		C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33	Beweidung
C25	r	1,000	,855**	,943**	,827**	,856**	,737**	,827**	,505	,770**	-,060
	Sig. (2-seitig)	.	,001	,000	,002	,001	,010	,002	,113	,006	,862
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C26	r	,855**	1,000	,915**	,973**	,913**	,961**	,907**	,616*	,826**	-,191
	Sig. (2-seitig)	,001	.	,000	,000	,000	,000	,000	,044	,002	,573
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C27	r	,943**	,915**	1,000	,940**	,937**	,879**	,942**	,657*	,899**	,000
	Sig. (2-seitig)	,000	,000	.	,000	,000	,000	,000	,028	,000	1,000
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C28	r	,827**	,973**	,940**	1,000	,913**	,974**	,931**	,731*	,878**	-,124
	Sig. (2-seitig)	,002	,000	,000	.	,000	,000	,000	,011	,000	,716
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C29	r	,856**	,913**	,937**	,913**	1,000	,901**	,975**	,521	,883**	-,058
	Sig. (2-seitig)	,001	,000	,000	,000	.	,000	,000	,100	,000	,865
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C30	r	,737**	,961**	,879**	,974**	,901**	1,000	,919**	,650*	,842**	-,061
	Sig. (2-seitig)	,010	,000	,000	,000	,000	.	,000	,030	,001	,858
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C31	r	,827**	,907**	,942**	,931**	,975**	,919**	1,000	,651*	,947**	-,029
	Sig. (2-seitig)	,002	,000	,000	,000	,000	,000	.	,030	,000	,933
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C32	r	,505	,616*	,657*	,731*	,521	,650*	,651*	1,000	,785**	-,184
	Sig. (2-seitig)	,113	,044	,028	,011	,100	,030	,030	.	,004	,588
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
C33	r	,770**	,826**	,899**	,878**	,883**	,842**	,947**	,785**	1,000	,000
	Sig. (2-seitig)	,006	,002	,000	,000	,000	,001	,000	,004	.	1,000
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Beweidung	r	-,060	-,191	,000	-,124	-,058	-,061	-,029	-,184	,000	1,000
	Sig. (2-seitig)	,862	,573	1,000	,716	,865	,858	,933	,588	1,000	.
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

\*\* . Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

\* . Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).



**App. 28: Datenmatrix der PCA und Clusteranalyse: 125 Mischproben**

Probe	Leitfähigkeit [μS/cm]	pH	Skelett [%]	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	CaCO <sub>3</sub> [%]	Corg [%]	Ntot [%]	C/N	Humus [%]
38	422	7,34	18,8	22,5	32,3	45,2	0,88	4,71	0,39	11,97	8,11
68	98	7,95	18,6	66,5	23,6	9,9	13,35	0,05	0,03	1,55	0,08
69	98	7,58	64,7	67,3	23,4	9,3	5,28	0,27	0,02	12,69	0,47
70	156	7,59	44,3	41,2	40,6	18,2	11,88	0,37	0,06	6,26	0,64
72	321	7,59	20,9	57,7	21,1	21,2	8,69	0,39	0,09	4,36	0,67
73	83	6,63	43,4	77,6	14,6	7,8	8,93	0,37	0,08	4,53	0,63
75	656	7,72	42,6	70,6	10,8	18,6	27,49	0,00	0,03	0,00	0,00
76	100	7,43	65,7	87,9	9,5	2,6	35,41	0,01	0,04	0,28	0,02
77	2800	7,65	43,0	64,2	15,2	20,6	21,45	0,10	0,07	1,28	0,16
78	4105	7,86	0,8	15,4	78,6	6,0	8,66	0,36	0,08	4,61	0,62
79	173	7,92	21,4	53,9	25,2	20,9	21,85	0,02	0,03	0,67	0,04
80	3995	7,89	0,5	7,3	62,0	30,7	18,44	0,24	0,16	1,50	0,41
81	139	7,53	31,3	26,3	46,7	27,0	29,33	0,04	0,04	0,90	0,07
82	126	7,50	1,1	30,6	54,3	15,1	16,06	0,77	0,12	6,31	1,33
83	96	7,46	47,9	70,3	14,9	14,9	9,20	0,07	0,05	1,26	0,11
84	83	7,58	76,9	59,9	26,5	13,6	33,94	0,53	0,04	12,70	0,91
85	107	7,60	19,5	38,4	42,3	19,3	8,51	0,23	0,07	3,36	0,40
86	103	7,67	82,9	67,3	18,5	14,2	10,47	0,79	0,07	11,06	1,37
87	1084	7,93	24,6	22,5	30,0	47,5	4,33	0,54	0,10	5,41	0,92
88	1389	7,93	16,9	46,3	26,5	27,3	20,94	0,24	0,00	66,49	0,42
89	153	7,62	10,3	57,8	19,2	23,0	22,39	0,00	0,03	0,00	0,00
90	832	7,60	16,8	77,4	9,2	13,4	20,56	0,13	0,02	5,57	0,23
91	104	7,58	32,2	86,4	10,0	3,6	10,37	1,44	0,03	51,15	2,47
92	169	7,80	42,5	72,0	16,0	12,0	28,25	0,00	0,04	0,00	0,00
93	86	7,67	42,0	64,9	21,0	14,1	11,48	0,15	0,04	3,52	0,25
94	882	7,44	56,5	55,4	16,3	28,3	10,70	0,46	0,09	5,27	0,78
95	85	7,68	38,7	26,0	51,0	23,0	11,52	0,53	0,13	4,19	0,92
96	83	7,16	33,5	26,5	53,8	19,7	4,30	1,86	0,22	8,58	3,20
97	75	6,95	42,4	34,1	43,1	22,8	6,83	1,07	0,15	7,23	1,84
98	76	7,59	60,6	47,0	29,1	23,9	6,28	0,15	0,08	1,93	0,25
99	2735	7,43	31,7	44,6	43,1	12,3	9,71	0,30	0,07	4,12	0,52
100	122	6,13	69,4	54,4	33,3	12,3	23,04	0,31	0,05	6,74	0,52
101	1790	7,05	19,8	29,2	55,7	15,1	6,84	0,73	0,10	7,04	1,26
102	2350	7,72	35,2	25,9	41,0	33,1	10,36	0,62	0,07	8,48	1,06
103	119	6,44	17,3	49,0	36,6	14,4	7,14	0,38	0,03	11,52	0,66
104	123	7,90	16,4	18,9	59,3	21,8	10,20	1,33	0,18	7,17	2,28
105	109	7,75	46,2	36,1	44,3	19,6	8,39	0,30	0,06	4,79	0,51
106	913	6,55	29,9	28,5	50,4	21,1	8,82	0,59	0,05	11,17	1,02
107	1248	7,10	47,1	38,2	41,5	20,3	8,13	0,13	0,04	3,55	0,23
108	905	6,82	41,2	41,8	43,7	14,5	8,01	0,32	0,05	6,44	0,56
109	93	7,50	10,6	59,0	28,0	13,0	8,38	0,06	0,04	1,71	0,11
110	72	7,82	13,3	62,6	26,4	11,0	0,93	0,10	0,03	3,16	0,16
111	79	8,32	19,7	43,6	40,5	15,9	4,24	0,11	0,02	4,57	0,19
112	84	7,81	37,3	53,6	40,0	6,4	4,56	0,06	0,05	1,30	0,11
113	73	7,64	38,7	64,4	24,8	10,8	5,29	0,84	0,11	7,82	1,44
114	82	7,82	25,0	55,0	39,6	5,4	3,93	0,14	0,05	2,78	0,24
115	99	7,52	12,0	34,9	47,2	17,9	3,84	0,12	0,05	2,38	0,21

116	66	7,52	28,2	57,8	26,4	15,8	1,40	0,27	0,08	3,60	0,47
117	195	7,54	24,9	56,3	33,9	9,8	3,40	0,00	0,01	0,00	0,00
118	48	7,46	20,9	48,5	34,0	17,5	0,35	0,99	0,11	8,79	1,70
120	41	7,04	24,0	66,4	20,3	13,3	0,27	0,60	0,10	5,96	1,03
121	35	7,23	6,4	42,2	42,7	15,1	0,39	0,33	0,09	3,89	0,57
122	68	7,17	66,0	54,5	32,2	13,3	0,72	1,29	0,18	7,35	2,23
123	368	7,70	8,2	86,1	12,7	1,2	2,57	1,78	0,16	10,90	3,06
124	64	7,40	21,1	84,5	11,0	4,5	0,33	0,18	0,06	3,33	0,32
128	2255	7,76	18,3	86,8	6,1	7,1	16,89	0,09	0,09	0,96	0,15
129	3475	7,62	12,3	42,8	30,2	27,0	13,68	0,28	0,09	3,02	0,49
130	88	7,46	30,4	63,4	26,4	10,2	5,92	0,09	0,03	2,83	0,16
131	215	7,64	24,0	52,0	29,0	19,0	10,70	0,19	0,07	2,83	0,32
132	983	8,02	28,8	35,1	41,6	23,3	12,24	0,21	0,04	4,74	0,36
133	149	7,59	17,8	21,4	60,8	17,8	10,12	1,14	0,13	8,52	1,95
134	235	7,39	40,3	4,9	72,5	23,0	20,60	5,53	0,53	10,51	9,51
136	88	7,86	40,7	33,3	44,8	21,9	0,67	3,05	0,35	8,68	5,25
138	84	7,37	34,3	29,6	47,1	23,3	1,86	3,57	0,37	9,66	6,14
141	88	8,02	38,8	31,2	46,8	22,1	0,59	5,89	0,53	11,17	10,13
142	283	7,46	25,6	20,6	49,0	30,4	2,26	8,47	0,80	10,55	14,58
143	56	7,09	46,5	52,4	31,4	16,2	0,53	1,64	0,19	8,53	2,81
144	95	7,02	35,1	28,5	48,6	22,9	4,55	1,67	0,17	9,64	2,87
145	78	7,72	47,3	56,0	31,3	12,7	4,94	0,37	0,14	2,60	0,64
146	79	7,56	63,8	68,3	17,4	14,3	2,94	0,45	0,12	3,90	0,78
147	70	6,80	42,5	67,6	24,0	8,4	5,02	1,02	0,09	10,74	1,75
148	87	7,19	47,9	22,4	70,3	7,3	1,01	5,43	0,45	12,08	9,35
149	85	6,80	59,8	47,4	37,9	14,7	2,39	0,15	0,04	4,09	0,26
151	74	7,34	52,0	39,1	36,9	24,0	0,62	1,70	0,17	9,92	2,92
152	88	7,81	66,9	44,1	38,6	17,3	1,34	0,48	0,06	7,51	0,82
154	97	6,66	45,5	34,8	45,2	20,0	6,19	1,50	0,18	8,25	2,57
155	109	7,56	35,1	31,7	43,4	24,9	3,23	2,15	0,25	8,49	3,70
156	134	7,27	30,5	21,5	54,2	24,3	2,22	7,79	0,72	10,77	13,40
157	92	7,08	49,2	33,4	48,2	18,4	1,10	2,58	0,26	10,04	4,44
158	90	7,39	25,7	17,2	63,4	19,4	2,70	1,27	0,16	7,87	2,19
159	857	7,62	48,8	30,7	50,1	19,2	10,29	0,86	0,09	10,05	1,48
160	76	7,10	60,2	72,0	13,5	14,5	4,31	0,26	0,07	3,83	0,44
161	88	7,36	41,4	43,4	37,1	19,5	3,44	1,03	0,10	10,23	1,77
162	1878	7,61	14,3	24,5	53,1	22,4	6,27	1,54	0,17	9,33	2,65
163	304	7,05	43,0	27,8	51,3	20,9	6,29	1,25	0,13	9,36	2,14
165	112	7,70	28,9	54,9	27,2	17,9	22,23	0,87	0,11	7,71	1,49
166	110	7,58	46,3	36,8	44,6	18,6	21,69	1,20	0,13	9,41	2,07
167	98	8,08	43,8	46,4	32,7	20,9	10,47	0,06	0,05	1,27	0,11
168	674	7,49	17,4	28,0	60,6	11,4	13,22	9,36	0,80	11,66	16,10
169	2720	6,63	5,1	25,6	49,4	25,0	7,71	0,44	0,09	4,95	0,76
170	424	7,95	45,7	56,6	34,2	9,2	24,45	0,94	0,15	6,11	1,62
171	106	7,57	31,0	60,4	25,3	14,3	4,51	0,65	0,10	6,60	1,12
172	482	8,03	25,4	41,1	52,4	6,5	4,13	1,96	0,21	9,56	3,37
173	90	7,49	46,1	58,8	21,5	19,7	2,85	1,00	0,17	5,93	1,72
174	132	7,30	28,9	65,3	23,5	11,2	5,53	0,93	0,10	9,28	1,59
175	47	7,49	68,0	79,6	10,6	9,8	1,19	0,10	0,10	1,01	0,17
176	266	7,83	6,9	50,9	39,3	9,8	10,07	2,50	0,28	8,93	4,30
177	161	7,71	56,9	26,0	47,0	27,0	38,79	1,19	0,18	6,69	2,05

<b>178</b>	2765	7,61	48,9	17,5	60,1	22,4	27,77	0,77	0,08	9,43	1,33
<b>179</b>	72	7,57	19,3	45,6	41,2	13,2	5,04	0,04	0,04	0,92	0,06
<b>180</b>	40	7,31	5,3	62,2	21,3	16,5	0,37	0,55	0,05	10,03	0,95
<b>181</b>	88	7,50	29,9	44,3	38,6	17,1	5,15	1,27	0,15	8,28	2,18
<b>182</b>	87	7,83	37,1	48,6	38,1	13,3	3,56	0,14	0,06	2,58	0,25
<b>183</b>	115	6,03	21,4	78,3	14,6	7,1	0,63	0,64	0,08	7,54	1,10
<b>184</b>	189	6,52	37,1	52,3	28,3	19,4	4,13	3,19	0,36	8,79	5,49
<b>185</b>	361	6,85	30,7	69,5	17,9	12,6	1,24	0,66	0,10	6,53	1,14
<b>186</b>	52	6,86	29,9	80,8	13,7	5,5	0,44	0,66	0,09	7,44	1,14
<b>187</b>	292	6,62	18,2	51,4	36,6	12,0	1,06	0,21	0,05	4,57	0,36
<b>188</b>	98	6,33	21,9	76,9	17,7	5,4	0,40	0,29	0,00	8,83	0,49
<b>189</b>	101	5,84	14,1	79,9	14,7	5,4	1,12	1,95	0,21	9,39	3,35
<b>190</b>	765	6,66	0,7	61,7	27,2	11,1	2,32	0,86	0,15	5,74	1,48
<b>191</b>	68	7,00	10,9	51,6	33,6	14,8	0,63	0,36	0,10	3,79	0,63
<b>192</b>	95	6,50	20,2	57,2	32,0	10,8	1,97	0,49	0,08	6,41	0,84
<b>193</b>	1568	8,17	18,7	61,0	25,3	13,7	2,27	0,83	0,08	9,85	1,43
<b>194</b>	61	7,06	13,8	65,6	25,1	9,3	0,79	0,62	0,09	6,52	1,06
<b>195</b>	86	6,66	13,8	65,5	25,0	9,5	1,92	1,00	0,09	11,35	1,73
<b>200</b>	1236	7,79	42,7	40,7	35,3	24,0	16,51	0,09	0,09	1,07	0,16
<b>331</b>	88	7,59	25,1	82,0	8,4	9,6	15,62	0,24	0,01	29,76	0,41
<b>335</b>	49	7,26	50,1	62,0	25,4	12,6	0,19	0,06	0,02	2,73	0,10
<b>337</b>	5165	6,11	44,6	17,3	68,6	14,1	20,91	0,84	0,05	16,00	1,44
<b>400</b>	184	7,68	41,5	10,4	61,5	28,1	38,74	2,53	0,24	10,48	4,35
<b>415</b>	81	6,54	51,2	41,3	43,0	15,7	5,10	0,85	0,12	6,89	1,46
<b>416</b>	65	7,46	44,3	47,5	38,1	14,4	1,91	0,58	0,11	5,03	0,99
<b>417</b>	78	6,16	74,6	72,9	21,0	6,1	3,72	0,04	0,02	1,59	0,06
<b>418</b>	73	6,67	71,6	53,7	30,9	15,4	4,78	0,30	0,09	3,18	0,51

## App. 29: Umweltvariablen der DCA

ID	UTM-Easting	Höhe ü. NN	Südllichkeit	Westlichkeit	Be-weidungs-intensität	Bedeckung [%]	Hang-neigung [°]	Distanz_ perm.Wasser [m]	Distanz_ spor.Wasser [m]	Distanz_ Siedlung [m]	Vegetation
38	403909,296	4241	-0,17	0	12	80	10	20	20	1170	Quellrasen
68	411614,183	3610	0,02	-0,02	9	10	2	1215	1215	650	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
69	410843,815	3737	0	-0,14	5	15	8	2550	2550	1700	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
70	410850,831	3757	-0,35	-0,35	5	10	30	2160	2160	1500	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
72	407104,402	3832	-0,19	-0,19	12	3	16	2740	1550	2080	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
73	407055,725	3886	0,16	-0,39	7	10	25	2730	1460	2090	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
75	419469,822	3595	0	0	9	1	0	770	770	1350	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
76	417509,255	3598	0	0	5	2	0	200	0	1240	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
77	416599,228	3621	0	0	5	2	0	780	560	1900	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
78	421846,016	3600	-0,02	0,01	7	5	1	460	460	250	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
79	425295,159	3635	0	0	5	1	0	1180	1180	4000	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
80	426338,905	3635	0	0	7	3	0	1580	1580	5000	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
81	435256,648	3660	0	0	2	5	0	670	670	13500	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
82	436979,145	3672	0	0	6	5	25	870	870	16000	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
83	436829,496	3782	0	-0,5	5	10	30	780	780	12920	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
84	435068,392	3689	0	0	5	10	0	4500	195	7850	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
85	430389,663	3913	0	-0,05	10	15	3	14130	330	1880	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
86	428452,322	3985	0	0	3	10	0	17070	0	2150	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
87	421803,202	4327	0	0,19	10	10	11	13900	725	5200	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
88	416171,942	3905	0	0	9	5	0	10260	160	2900	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
89	406458,175	3636	0	-0,02	8	3	1	670	350	760	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
90	406338,306	3644	0	-0,1	9	5	6	850	390	850	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
91	406254,936	3683	0	-0,57	4	3	35	870	480	870	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
92	406178,2	3693	0	0	5	2	30	950	560	910	Wüsten und Zwergstrauchwüsten

93	405973,624	3743	0	0	7	5	35	1360	650	1340	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
94	405810,766	3810	0	0	5	3	30	1990	650	1960	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
95	395639,278	4110	-0,59	0	7	20	36	220	220	1360	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
96	395626,333	4119	0,15	-0,15	10	20	12	40	40	1650	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
97	396425,756	4184	-0,21	0,5	7	20	33	230	230	1120	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
98	396176,575	4049	-0,2	0,49	8	15	32	200	200	930	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
99	395669,92	3965	0,05	0,05	14	15	4	40	40	290	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
100	395601,02	3975	0,47	0	9	10	28	30	30	300	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
101	395723,895	3975	0,06	0,06	12	20	5	15	15	400	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
102	395734,604	3975	-0,24	0,24	14	10	20	150	150	350	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
103	395814,594	4020	-0,29	0,29	13	20	24	200	200	330	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
104	396072	4024	0,09	0	14	15	5	30	30	950	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
105	404981,037	3912	-0,13	-0,32	9	10	20	4400	360	4120	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
106	395989,694	4045	0	-0,28	12	20	16	200	200	850	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
107	405385,249	3919	0,17	0,41	9	7	26	4240	180	3820	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
108	405259,245	3886	0,1	-0,04	8	15	6	4270	70	3840	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
109	346045,302	3875	0	0	5	5	0	150	150	500	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
110	345143,555	3929	0,05	0	6	20	3	30	30	2850	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
111	344564,216	3998	0,03	0,06	8	20	4	220	220	3230	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
112	344717,295	4026	0,1	0,24	5	20	15	480	480	3130	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
113	345014,083	4180	0,13	0,32	2	15	20	920	920	3050	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
114	344561,168	3958	0,02	-0,01	6	15	1	330	330	4070	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
115	344432,331	3961	0,02	-0,01	6	10	1	450	450	4070	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
116	344099,126	3981	-0,13	-0,05	6	20	8	780	780	4170	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).

117	343940,45	3990	0,25	-0,11	4	30	16	940	940	4130	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
118	343378,335	4181	0,24	-0,1	5	50	15	1540	1540	4250	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
120	343123,4	4300	-0,15	-0,15	5	25	12	1820	1820	4330	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
121	343127,616	4035	0,02	0,05	6	30	3	220	220	1260	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
122	341713,45	4130	0,07	0	2	20	4	550	550	915	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
123	353566,595	4053	-0,01	0,01	15	50	1	0	0	880	Quellrasen
124	353639,279	4057	0,04	0,04	9	15	3	150	150	810	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
128	414344,701	3682	0	0	5	1	0	2550	1000	3130	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
129	412414,813	3717	0	0	4	5	0	4090	430	1250	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
130	410742,642	3749	0	0	5	10	0	5800	180	1320	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
131	409340,585	3782	0	0	3	10	0	7380	270	850	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
132	407715,123	3808	0	0	8	10	0	200	3280	1300	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
133	402293,608	3912	0	0	5	10	0	1710	110	1650	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
134	390935,767	4236	0,04	-0,1	8	25	6	200	200	2170	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
136	396338,624	4213	-0,11	-0,11	10	60	9	25	25	2750	Alpine Matten
138	396529,872	4250	-0,23	0,23	9	80	19	100	100	2760	Alpine Matten
141	396666,446	4330	0	0,42	11	60	25	260	260	2830	Alpine Matten
142	396507,135	4185	-0,12	0	11	90	7	40	40	2540	Alpine Matten
143	396631,899	4129	-0,09	0	10	45	5	40	40	1760	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
144	396370,348	4200	0	-0,57	8	40	35	410	410	1800	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
145	396810,046	4170	0	0,45	9	20	27	200	200	1870	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
146	397252,698	4400	-0,17	0,42	6	1	27	500	500	1850	Felsvegetation
147	397029,281	4300	0	0,45	8	25	27	280	280	1870	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )

148	396334,063	4390	-0,17	0,17	11	50	14	100	100	3950	Alpine Matten
149	396562,027	4500	-0,18	0,43	3	2	28	310	310	3980	Felsvegetation
151	396220,234	4369	0,09	-0,21	11	60	13	20	20	3800	Alpine Matten
152	396073,099	4412	0,14	-0,35	5	3	22	230	230	3740	Felsvegetation
154	396250,974	4280	0	-0,5	9	25	30	520	320	1800	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
155	396068,379	4337	-0,42	0	7	40	25	700	190	1850	Alpine Matten
156	395514,669	4437	-0,36	-0,15	8	70	23	1220	40	2260	Quellrasen
157	396613,528	4080	0,06	-0,14	8	20	9	60	60	590	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
158	396241,801	4200	0,42	-0,42	8	15	36	350	350	830	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
159	396793,078	4070	-0,05	0	11	55	3	20	20	550	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
160	397281,502	4220	0	0,47	6	5	28	40	40	610	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
161	397164,262	4180	0	0,41	10	30	24	400	400	600	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
162	396935,898	4080	-0,06	0,14	6	15	9	200	200	550	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
163	396422,483	4120	0,28	-0,28	8	30	23	250	250	600	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
165	398370,464	4065	-0,13	0,05	11	15	8	3330	120	200	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
166	401487,344	4153	-0,32	-0,13	12	15	20	50	50	250	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
167	399086,865	4156	0,1	-0,24	7	15	15	700	120	550	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
168	406815,143	4224	-0,05	0,05	12	50	4	20	20	500	Quellrasen
169	410528,571	4190	-0,02	-0,02	7	15	2	230	230	550	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
170	416337,681	4307	-0,1	0	8	15	6	490	290	1300	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
171	420438,909	4297	0,1	-0,04	8	20	6	100	100	150	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
172	414182,036	4306	-0,04	-0,04	11	30	3	500	180	350	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
173	418023,355	4333	0,24	0	5	30	14	970	190	2120	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ

											<i>Krascheninnikovia</i> )
174	422914,483	4214	-0,08	0,03	8	10	5	540	540	1600	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
175	421909,147	4378	-0,33	0,33	4	1	28	720	720	770	Felsvegetation
176	423460,201	4169	-0,02	-0,02	11	70	2	40	40	400	Quellrasen
177	415871,965	4219	-0,19	-0,08	10	20	12	780	780	2350	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
178	422757,041	4249	0,01	-0,03	8	10	2	800	550	8300	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
179	352041,905	3893	0	0	3	10	0	2740	360	1640	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
180	351817,654	3902	0	-0,1	4	30	6	3370	580	1050	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
181	351398,631	3996	-0,05	-0,13	6	30	8	6630	360	3000	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
182	351611,777	4003	0	0	4	25	0	6420	110	2940	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
183	367740,275	4230	0,05	-0,11	9	35	7	30	30	400	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
184	367700,947	4235	-0,04	0,04	7	75	3	40	40	600	Alpine Matten
185	367942,842	4280	-0,26	0,26	7	40	22	280	280	600	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
186	367508,643	4280	0,17	-0,42	9	25	27	320	320	500	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
187	370286,608	4124	0,05	-0,02	7	20	3	520	520	500	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
188	369935,006	4168	0,32	-0,13	7	15	20	630	630	700	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
189	371473,61	4260	0	0,5	5	40	30	820	340	2100	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
190	370677,158	4106	-0,03	0	8	15	2	30	30	1960	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
191	370110,026	4180	0,11	-0,25	7	30	16	570	50	2100	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
192	372344,196	4190	0	0,47	7	20	28	1080	1080	1850	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
193	372220,114	4170	0	0,24	9	15	14	970	970	1560	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).



<b>194</b>	368894,18	4182	0	-0,26	6	40	15	300	300	3260	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Seriphidium</i> ).
<b>195</b>	369520,395	4209	0	0,24	7	30	14	50	50	3270	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
<b>200</b>	402131,289	4134	0	0	3	20	0	770	30	3420	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
<b>331</b>	405829,471	3765	0	-0,34	10	5	20	2120	570	2100	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
<b>335</b>	397020,445	4510	-0,24	0,24	0	0	20	630	630	2940	Felsvegetation
<b>337</b>	401745,574	4161	0,04	0,1	11	15	6	100	100	140	Zwergstrauch-Polster-Steppen (Typ <i>Krascheninnikovia</i> )
<b>400</b>	410126	4296	0,08	1,38	3	0	5	2	2	0	Quellrasen
<b>415</b>	396755	4220	1,71	0,29	8	0	27	100	100	2500	Wüsten und Zwergstrauchwüsten
<b>416</b>	396656	4310	1,71	0,29	8	0	23	200	200	2500	Alpine Matten
<b>417</b>	396979	4286	1	2	7	0	33	200	200	2500	Felsvegetation
<b>418</b>	396889	4221	1	2	7	0	30	50	50	2500	Felsvegetation