

Carolin Bimüller

Die Böden im Ostpamir Tadschikistans

Charakteristik im Kontext ihrer Nutzung*

mit 3 Abbildungen und 1 Foto

1 Forschungen auf dem Pamir

In jüngerer Vergangenheit war die Zugänglichkeit der zentralasiatischen Gebirge für die internationale Wissenschaft kaum möglich. Erst seit den 1990er Jahren sind Reisen in die peripher gelegene Hochgebirgsregion und autonome Provinz Gorno Badakhshan im Osten der ehemaligen Sowjetrepublik Tadschikistan wieder durchführbar. Dabei besuchte schon Marco Polo den Pamir im 13. Jahrhundert (POLO 1983) und auch zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden erste internationale Pamir-Expeditionen durchgeführt. Zu Sowjetzeiten wurde dann die Erforschung anhand von wissenschaftlich und politisch motivierten Forschungsreisen weitergeführt, um mit diesem Wissen unter anderem auch die Produktivität der Hochweiden zu verbessern. Die Grenzregion zur gegenüberstehenden Großmacht England wurde damals stark subventioniert. In den 1960ern und 1970ern machte O.E. AGACHANJANC (1985) hierbei wichtige Studien auf den Hochweiden des Pamir. Die Untersuchungen für die vorliegende Studie wurden im Rahmen eines von der Volkswagenstiftung unterstützten interdisziplinären Projektes während der Weidesaison 2008 durchgeführt. Die jeweiligen Einzelstudien betrachteten hierbei den Transformationsprozess im Ostpamir der einstigen Sowjetrepublik

*) Dieser Beitrag basiert auf Ausschnitten einer Diplomarbeit mit dem Thema „Die Böden im Ostpamir Tadschikistans - Charakteristik und Einfluss unterschiedlicher Beweidungsintensitäten“, die am Institut für Geographie der Universität Erlangen-Nürnberg unter Betreuung von Prof. Dr. Cyrus Samimi und Prof. Dr. Rupert Bäumler im Dezember 2009 abgeschlossen wurde. Sie wurde mit dem Wissenschaftspreis 2010 der FGG ausgezeichnet. Die Arbeit ist Teil des interdisziplinären Forschungsprojektes Transformation Processes in the Eastern Pamirs of Tajikistan. Changing Land Use Practices, Possible Ecological Degradation and Sustainable Development. Sie wurde durch die Volkswagenstiftung nachhaltig gefördert. Die Autorin möchte sich bei Dr. Kim Vanselow und Desiree Dotter für die Zusammenarbeit in Gelände und Labor sowie für die Durchsicht des Manuskriptes herzlich bedanken.

Tadschikistan von ökologischer als auch sozialgeographischer Seite. Ziel dieser Arbeit ist die deskriptive Beschreibung der Böden des Ostpamir im Kontext der Weidenutzung vor dem Hintergrund der fehlenden internationalen Forschung nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion.

2 Untersuchungsgebiet: Die Hochweiden des Ostpamir

Die isolierte Hochgebirgsregion des Ostpamir befindet sich zwischen 35° und 40° N und 70° und 76° E. Der Pamir wird geomorphologisch im Norden vom Alai Tal in Kirgistan, 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). Die Grenze zum Westpamir liegt bei 72° 45' E. Der östliche Teil des Gebirges zeichnet sich durch breite glaziale Täler und weite eiszeitlich geformte Hochebenen, die *Pamire* aus. Diese alluvial verfüllten Talböden der Hochplateaus liegen zwischen 3000 und 4000 m ü. NN und werden von abgerundeten Gipfeln mit Höhen von 5000 m bis 7500 m umgeben. Die benachbarten Gebirgsketten des Westpamir, des Hindukush und des Himalaya schirmen den Ostpamir gegen niederschlagsbringende Westwinde und den Indischen Monsun ab. Klimatisch gehört der Ostpamir damit zur kontinental ariden Zone mit kühlen Sommern und kalten Wintern. In der Klassifikation nach W. Köppen und R. Geiger von 1961 lassen sie sich den kalten Wüstenklimaten (BWk-Klimaten) zuordnen. Die geringen Niederschläge (72 mm a⁻¹ für Murghab) fallen vornehmlich im Sommer mit hoher Variabilität und nehmen von SW nach NE ab. Die Vegetationsperiode beträgt nur 100 Tage. 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 Vegetationseinheiten des Untersuchungsgebietes umfassen Hochgebirgswüsten- und Zwergstrauchsteppen, sowie alpine Matten und Quellrasen. Die dominierenden Zwergsträucher sind Teresken (*Kraschinnikovia ceratoides*), eine der wichtigsten Charakterpflanzen des Ostpamir, und im etwas feuchteren Südwesten Wermut (*Artemisia leucotricha*). Bäume sind im Ostpamir nur rudimentär an einer Stelle vorhanden und stehen daher nicht als Energierohstoff zur Verfügung. Allerdings ist im Untersuchungsgebiet 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. 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 (AGAKHANJANZ/BRECKLE 2004; AGAKHANJANZ/BRECKLE 2003).

Die Größe des Untersuchungsgebiets beträgt 38.000 km². Geologisch gliedert es sich in eine nordöstliche Sedimentzone bestehend aus Kalken und Schiefer sowie eine Zone mit metamorphen Kristallingesteinen aus Gneisen und Glimmerschiefern im Südwesten. Die Beziehung zum Ausgangsgestein ist hierbei besonders eng, wenn sich die Entwicklung des Bodens noch im Initialstadium befindet (WIESSNER 2009).

Die extremen Umweltbedingungen erlauben nur eine extensive Form der Landnutzung wie die mobile Viehwirtschaft, die traditionell von Kirgisen betrieben wird. Sie halten Alai-Fettschwanz- bzw. Karakul-Schafe (*Ovis aries platyura* Fitz), Angora- und Kaschmirziegen (*Capra hircus angorensis* und *Capra hircus laniger*) sowie Yaks (*Bos grunniens*). Während der Sowjetzeit garantierte das Weidemanagement ein saisonales Rotationssystem über regionale Grenzen hinweg. Basierend auf der Darstellung bei KREUTZMANN (2003) funktionierte der traditionelle Nomadismus nach einem Migrationszyklus: längere Aufenthalte auf den dezentralen Sommerhochweiden in höher gelegenen Tälern während der wenigen schneefreien Monate wechselten mit Aufhalten auf den zentralen Winterweiden in tiefer gelegenen geschützten Beckenlagen mit Zugang zu frischem Wasser. Die Lage der Weideplätze von Haushalten variiert dabei 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 an einen häufigen Transport angepasst sind. Seit der Unabhängigkeit Tadschikistans 1991 verknappte sich die Energiesituation. Seitdem ist die Mobilität erschwert, was teilweise in einer Überweidung nahe der Jurten camps und Siedlungen resultiert.

3 Stand der Forschung: Bodenbildung im Ostpamir

Die Bodenbildung wird stark beeinflusst durch das kontinentale Klima der Hochgebirgswüste mit ihrer geringen Produktion an organischer Substanz, wodurch Hochgebirgswüstenböden den Ostpamir dominieren. Generell ist die Pedogenese im Ostpamir durch eine extreme Trockenheit, eine dadurch verringerte biologische Aktivität, eine schwache Abfuhr chemischer Substanzen, aktive Umlagerungsprozesse und eine schütterere Vegetation gehemmt. In den höheren Lagen wird die Aridität der Hochgebirgswüste 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. 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. Nach AGACHANJANC (1979) nehmen diese Gebiete 50% bis 88% der Fläche des Pamir ein.

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 Boden zonierung 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 Autoren, die nur eine Bodenstufe, die der grau-braunen Böden alpiner und subalpiner Wüsten ausweisen (ANTIPOV-KOROTAEV 1951 zit. in AGAHANJANZ 1965), aber auch Vertreter, die zwei Bodenstufen, der Wüsten- und der Wüsten-Steppenböden differenzieren (KUTEMINSKI 1960 zit. in AGAHANJANZ 1965).

Teilweise treten polygonale Spaltenbildung an der Oberfläche und takyrähnliche, helle Biokrusten auf. Die Bodenmächtigkeit beträgt 30-50cm, 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 – im Untersuchungsgebiet in Form von Frostverwitterung und Insulationsverwitterung, durch die diese primitiven Böden mit Schotter oder Grus bedeckt werden. Sie besitzen eine rissige, poröse, grau-blassgelbe Carbonatkruste mit Mächtigkeiten von 3-5cm. 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 Alumnosilikate fehlen nach AGAHANJANZ (1965) im Ostpamir vollständig.

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. Von AGAHANJANZ (1965) wird die Hypothese aufgestellt, dass 50 bis 70% der Fläche des Ostpamir unter Grobmaterial ohne Bodenbildung liegen und somit von solchen Wüstenpflastern bedeckt werden. Diese Steinpflaster vermindern den äolischen Abtrag der feineren Bodenfraktionen.

Nur wenige Gebiete mit lokal höherer Bodenfeuchtigkeit wie an Quellen, Bächen und 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 organischer Substanz verzögern. Andere Quellen wie JUSUFBEKOV (1968) und AGAHANJANZ (1965) sprechen von 2-3% Humusgehalt für Moorwiesen-Böden und 3-17% Humusgehalt für Torfmoore. 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 geringer ausgeprägt, 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 Frost-Prozesse begünstigt. Auf den Quellrasen führt das hochliegende Grundwasser zu Kryoturbationserscheinungen mit bis zu mehreren Dezimetern hohen Thufuren.

4 Material und Methoden: Geländeaufnahmefethoden

Die untersuchten Flächen umfassen Aufnahmen bei Alichur, in der Umgebung von Murghab und im Chong Pamir (Abbildung 1). Daneben konzentrieren sich die aufgenommenen Flächen auf drei Beispieltäler: Pshart Gumbez Kol (Foto 1), Madian Gumbez Kol und Bash Gumbez. 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. Die geologische Ausgangssituation ist verschieden und auch innerhalb der Vegetation wird in den Zwergstrauch-Polster-Steppen der Teresken (*Krascheninnikovia spec.*) als dominierende Pflanze in Bash Gumbez von Wermut (*Artemisia leucotricha*) abgelöst. Die Probeflächen, auf denen in einer weiteren Studie parallel die Vegetation aufgenommen wurde, orientieren sich entlang von senkrecht zum Talverlauf angelegten U-förmigen Transekten. Mit der Auswahl der Beispieltäler und der Untersuchungsflächen sollten verschiedene Situationen und Bedingungen des Untersuchungsgebietes näher erfasst werden.

Neben einer Betrachtung von Leitprofilen wurden während der Feldarbeiten 125 Bodenmischproben für 60 m × 60 m Flächen aus einer Tiefe von 15 cm entnommen, deren fünf Entnahmepunkte zufällig über die Plots verteilt wurden. Mithilfe dieser Methodik wurde versucht, eine interpolative Projektion der pedogenen Punktinformation der Fläche wiederzugeben (SAMIMI 2003). Darüberhinaus wurden folgende allgemeine Umweltfaktoren aufgenommen: Höhe über NN, Hangneigung, Exposition, Bedeckungsgrad, Entfernung zur nächsten Jurte, Entfernung zum nächsten Gewässer, Lagerungsdichte, Wurzelhorizontgrenze, Bodenfarbe, Fein- und Grobwurzelintensität. Die Parameter elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Körnung, organischer Kohlenstoff (C_{org}), Stickstoff (N), Humus, das



*Foto 1: Yaks und Jurten im Beispieltal Pshart Gumbez Kol
(Aufnahme: Carolin Bimüller 2008)*

sich ergebende C/N-Verhältnis sowie die Kationenaustauschkapazität (Na, K, Ca und Mg) wurden nach Standardlabormethoden ermittelt. Die Exposition wurde anschließend in Anlehnung an LEYER/WESCHE (2007) und MCCUNE/KEON (2002) in die Variable Südlichkeit mittels folgender Formel umgerechnet: Südlichkeit = $\sin \alpha \times (-\cos \theta)$ mit α = Hangneigung in $^\circ$ und θ = Exposition in $^\circ$ Ost über Nord. Die Westlichkeit wurde analog mithilfe der Formel errechnet: Westlichkeit = $\sin \alpha \times (-\sin \theta)$. Die Wertebereiche liegen somit bei [-1; 1]. Die Beweidungsintensität wurde mit Hilfe einer sechsklassigen Ordinalskala über die Indikatoren Tritts Spuren, Verbissintensität und Vorkommen von Exkrementen eingestuft. 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 Exkremente 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.

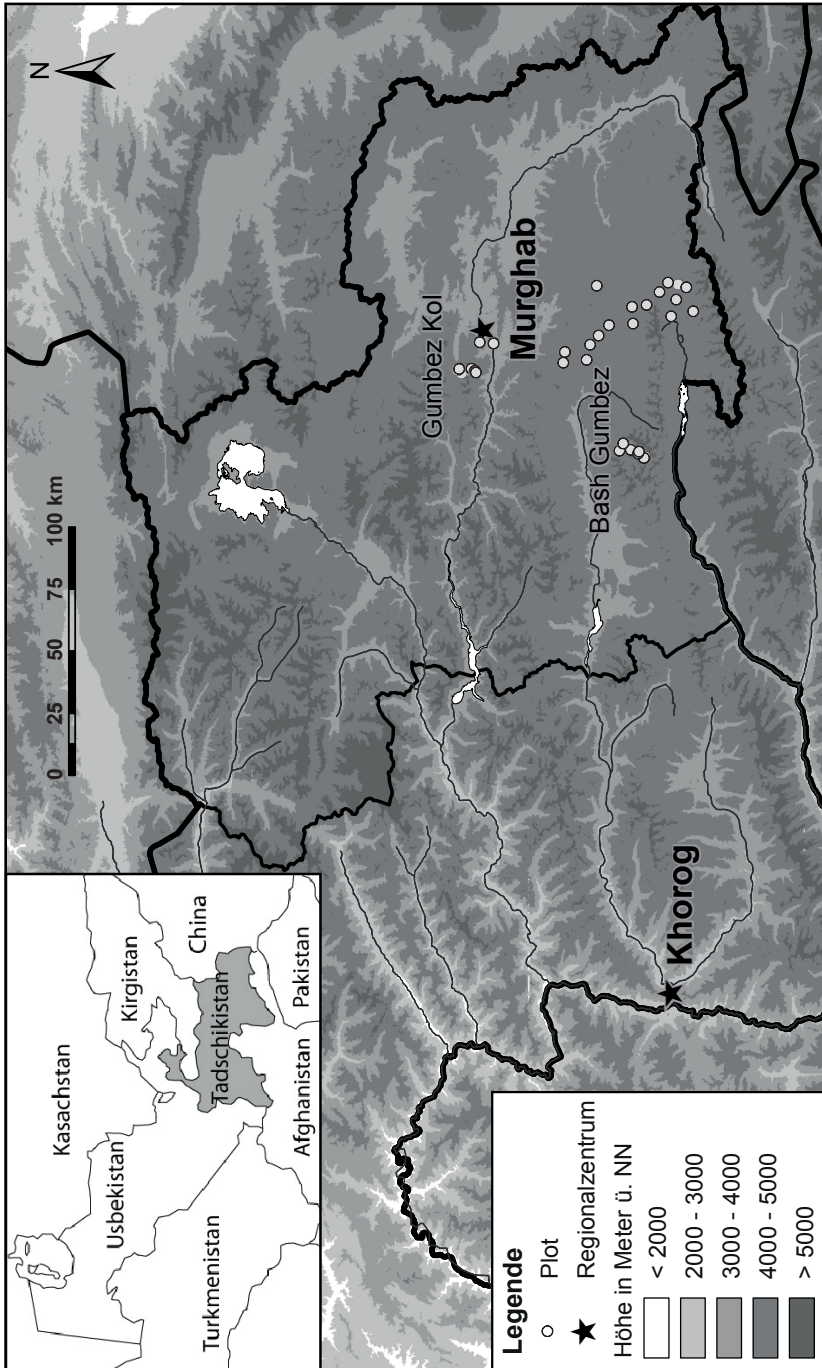


Abb. 1: Geographische Umgebung des Pamir und die Lage der beprobten Flächen im Untersuchungsgebiet

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Beweidungsintensität zeigen eine Normalverteilung ($p = 0,001$) mit einer Dominanz von mittelstark beweidete Flächen im Untersuchungsgebiet (Abbildung 2). Eine lineare Zunahme der Beweidungsintensität mit fortschreitender Vegetationsperiode kann anhand des über die Weidesaison 2008 aufgenommenen Datensatzes ($n = 125$ Mischproben) festgestellt werden. Zur monatsübergreifenden Berechnung wurde hierbei auf das Julianische Datum mit fortlaufender Tageszählung zurückgegriffen.

5.1 Physikalische Eigenschaften

Die häufigste *Munsell*-Farbe des oberen Bodenhorizontes ist 2.5Y 5/3 „light olive brown“, gefolgt von 2.5Y 4/3 „olive brown“ (*Macbeth Division Of Kollmorgan Instruments Corporation* 1994). In tieferen Horizonten nimmt die Farbintensität meist eine Stufe ab. Die Phaeozeme 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.

Die Beschreibung der Durchwurzelung beinhaltet eine Bewertung der Durchwurzelungstiefe und der Durchwurzelungsintensität. Die Ergebnisse zeigen eine mittlere Tiefe des Durchwurzelungshorizontes von 17 cm, wobei auf etwa 20% der Flächen im Gelände aufgrund fehlender Deckung kein erkennbarer Wurzelhorizont ausgewiesen werden konnte. Hinsichtlich der Intensität überwiegen Feinwurzeln. Die Geländeaufnahmen des Hauptwurzelraumes bestätigen die ariden Züge der Vegetationsanpassung. Die Wurzelsysteme sind meist radial entwickelt und besitzen die Tendenz sich 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).

Der Wassergehalt des Bodens wurde nach Standardmethoden gravimetrisch durch Gewichtsverlust bei 105 °C bestimmt. Er 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/BRECKLE 1986). Eine hohe Verdichtung ist besonders auf den Viehgangeln zu finden; diese

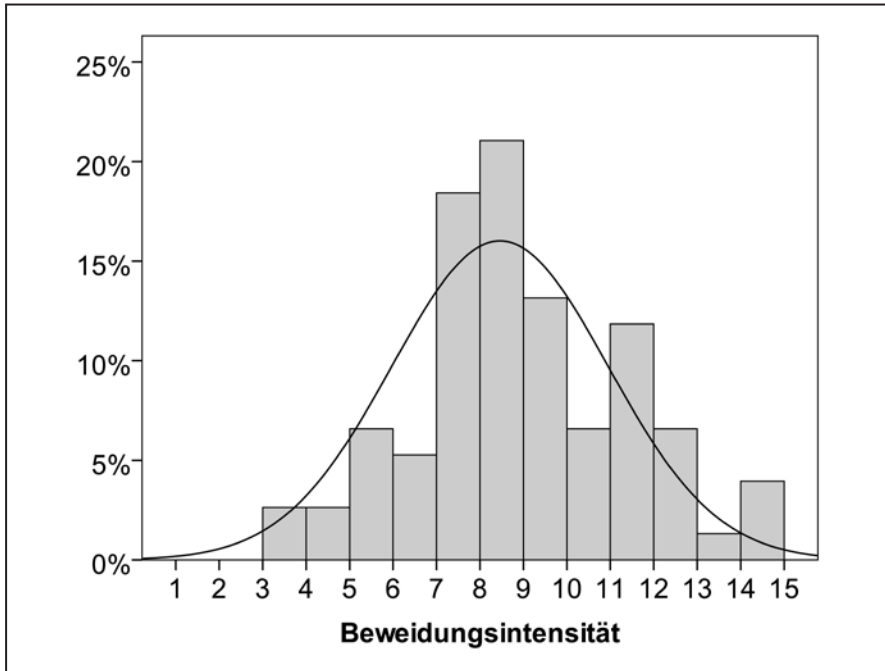


Abb. 2: Histogramm der Beweidungsintensität

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).

Allgemein ist der Abrundungsgrad der Bodenpartikel 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 stärker abgerundetes, gut sortiertes feineres Körnungsspektrum, das durch den fluvialen Transport gekennzeichnet ist (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010). Wie SCHMIZ (2009) beschreibt, ist auf südexponierten Hängen feinkörnigeres 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.

5.2 Chemische Eigenschaften

Die pH-Werte liegen im schwach alkalischen Milieu. Dies entspricht dem oberen Distrikt des ökologischen Optimalbereichs von 5 bis 7,5 (Gisi et al. 1997). Die Leitfähigkeit der untersuchten Proben liefert einen Mittelwert von $572 \mu\text{Scm}^{-1}$, was einem mittleren Versalzungsgrad entspricht (HINTERMAIER-ERHARD/ZECH 1997). Ausreißer und Extremwerte treten nur im oberen Wertebereich auf. 75% der Werte liegen unter $483 \mu\text{Scm}^{-1}$. Die höchsten Werte stammen von Flächen, auf denen eine Salzausfällung an der Bodenoberfläche im Gelände optisch sichtbar war. Schnelltests ergaben Sulfatgehalte von $400\text{--}800 \text{ mg l}^{-1}$ in den Perkolaten aller Stichproben, während Chlorid nur bei einigen Proben nachgewiesen werden konnte. Im Vergleich 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. Extremwerte setzen sich allerdings bis in den Unterboden durch. Im Gelände konnten Salzausfällungen vor allem auf feinem Material an Unterhängen beobachtet werden. Salzausblühungen treten besonders 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. Hinzu können die versalzten Flächen als lokale Erscheinung bewertet werden, die im Untersuchungsgebiet nicht flächenhaft in Erscheinung treten.

Die untersuchten Proben lassen sich von humusfrei bis extrem humos beschreiben. Die Humusgehalte und damit auch der organische Kohlenstoff zeigen – abgesehen von Ausreißern und Extremwerten – eine Abnahme im Unterboden. Der Median der C_{org} -Gehalte liegt allerdings unter 1%. Der Korrelationskoeffizient der Beweidungsintensität mit dem Humusgehalt ($n = 125$ Mischflächen) liegt bei 0,428 und ist mit einem p -Wert = 0,000 signifikant. Es zeigt sich somit, dass Flächen mit einer Konzentration an Exkrementen auch höhere Humusgehalte aufweisen. Im Mittel liegt somit eine gute N-Versorgung vor. Generell nimmt das C/N-Verhältnis mit zunehmender Profiltiefe ab, da der Eintrag vorrangig von der bestockenden Biomasse stammt und der Abbau sowie das Humusalter in größeren Tiefen zunehmen (NIEDER/BENBI 2008). Die Humusqualität ($C/N < 10$) kann als überwiegend sehr hoch eingeschätzt werden.

5.3 Nährstoffsituation unter Sonderbedingungen des Ostpamir

Die Basensättigung aller untersuchten Proben beträgt 100%. Bei allen Proben ist Calcium mit einem Maximum an den Austauschern vertreten. Die gemessenen Natrium-Konzentrationen rangieren zwischen $0,19$ und $3,07 \text{ cmol kg}^{-1}$,

der Mittelwert liegt bei $0,48 \text{ cmol kg}^{-1}$. Die Kalium-Konzentrationen schwanken zwischen $0,11$ und $3,29 \text{ cmol kg}^{-1}$. Ihr Mittelwert liegt bei $0,66 \text{ cmol kg}^{-1}$. Die gemessenen Calcium-Konzentrationen variieren zwischen $5,33$ und $94,88 \text{ cmol kg}^{-1}$ um den Mittelwert von $18,17 \text{ cmol kg}^{-1}$. Die ermittelten Konzentrationen für das Element Magnesium rangieren zwischen $0,38$ und $8,07 \text{ cmol kg}^{-1}$. Sie streuen um den Mittelwert von $2,01 \text{ cmol kg}^{-1}$. Wie AGAHANJANZ (1965) ausführt, rangiert die Kationenaustauschkapazität im Ostpamir zwischen 10 und 50 cmol kg^{-1} . Dies konnte im Allgemeinen bestätigt werden. 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.

Die untersuchten Phosphorgehalte (P) der Testflächen rangieren auf einem sehr niedrigen, für den Ostpamir charakteristischen Niveau zwischen 0 und $2,48 \text{ mg kg}^{-1}$ und besitzen somit keine weite Streuung um den Mittelwert von $0,69 \text{ mg kg}^{-1}$, der als niedrig eingestuft werden kann. Eine P-Anreicherung in Oberböden durch Vegetationsrückstände konnte allerdings bestätigt werden. Im unteren Wurzelbereich nimmt der P-Gehalt im Vergleich zum Oberboden ab, da das Recycling durch die Pflanzen wegfällt (GISI et al. 1997). Die N- und P-Verfügbarkeit konzentriert sich auf die oberen Horizonte stark beweideter Stellen mit erhöhter Dungzufuhr, wodurch die Nährstoffe auf einzelne Flächen eingetragen werden (AYUBA 2001). Allerdings sind die P-Werte vergleichsweise gering, was auf die Verwendung des Viehdungs als Brennmaterial zur Energiegewinnung mangels Alternativen und das deshalb konsequente Einsammeln der Exkremete zurückzuführen ist. Dies gilt nicht nur für den Phosphor, sondern für alle sonst rückgeführten Nährstoffe, die dabei irreversibel dem Boden entzogen werden (GYAMTSHO 2002). Zuzüglich wird der Nährstoffkreislauf durch die Beweidung diversifiziert (ZECH et al. 2011), da die Nährstoffe zunächst von den Tieren durch das Futter aufgenommen werden und in tierische 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. 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 „Exkremete“. Diese flüssige Nährstoffzufuhr kann dem Boden durch einfaches Aufsammeln nicht wieder entzogen werden. Allerdings fallen stark beweidete Flächen nicht grundsätzlich mit einer Akkumulation an Dung zusammen. Dies liegt zum einen an der bereits ausgeführten Brennstoffnutzung der Exkremete durch die lokale Bevölkerung, zum anderen jedoch an den Tieren selbst, die vor allem in der Nähe der Jurtencamps für eine erhöhte Dungzufuhr und damit für einen zentripedalen Nährstofftransport sorgen. Zwar wird der Yakdung bevorzugt nahe der Jurten gesammelt, aber die Exkremete des Kleinhornviehs verbleiben auf den Flächen.

Neben diesen bleiben nur die wenigen Pflanzenrückstände im System, die der dünnen Humusauflage zugeführt werden, und gehen nicht verloren (GYAMTSHO 2002). Umgekehrt, würden die Exkreme auf den Weideflächen liegen gelassen, wären die Dunggradienten in den Bodenparametern stärker ausgeprägt (STUMPP et al. 2005). Trotz dieser Sondersituation konnte eine durch die Beweidung dezimierte Nährstoffverfügbarkeit im Boden nicht nachgewiesen werden; im Gegenteil wurden sogar positive signifikante Korrelationen der Nährstoffverfügbarkeit mit der Beweidung festgestellt. Diesem Zusammenhang liegt aber sicher die Tatsache zugrunde, dass die Tiere bevorzugt Gunststandorte mit einer guten Nährstoffversorgung aufsuchen.

5.4 Multivariate statistische Methoden

5.4.1 Klassifikation der Bodentypen

Die Auswertung der Ergebnisse und anschließende Interpretation erfolgte mittels multivariater statistischer Methoden. Hierzu wurde das Programm R 2.8.1 benutzt. Mithilfe der Clusteranalyse – 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 – konnten 125 der untersuchten Flächen im Ostpamir in ihren heterogenen Eigenschaften zusammengefasst und nach dem Bestimmungsschlüssel der *WRB* (*IUSS Working Group WRB* 2007) verschiedenen Bodentypen zugewiesen werden. 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. Als Fusionierungsalgorithmus wurde die *Ward-Methode* verwendet, weil 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 Fusionierung verläuft über eine möglichst geringe Zunahme der Summe der gruppeninternen Abweichungsquadrate, weshalb der Fusionierungsalgorithmus auch *Minimum-Variance-Methode* genannt wird. Als Variablen wurden in der vorliegenden Clusteranalyse die Bodenparameter elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Skelettgehalt, die Korngrößen Sand, Schluff und Ton, C_{org} -Gehalt, N-Gehalt, C/N-Verhältnis, CaCO_3 -Gehalt und Humusgehalt verwendet. Da der volle Datensatz verwendet wurde, kam es zu Redundanzen, weil miteinander hoch korrelierte Variablen in die Clusteranalyse einfließen (LEYER/WESCHE 2007). Dennoch können somit einige einflussreiche Merkmale gewichtet werden, die bedeutende Unterschiede zwischen den sechs Bodentypen markieren:

Arenosole sind sandige Böden, die kaum eine Profildifferenzierung besitzen. Auf ihnen dominiert Zwergstrauch-Polster-Steppe (Typ *Artemisia leucotricha*).

Lokal kommen sie vor allem auf silikatreichem Ausgangsmaterial im Beispieltal Bash Gumbez vor.

Leptosole sind sehr flachgründige bzw. extrem skelettreiche azonale Böden. Sie treten vor allem an steilen Hängen mit Felsgestein auf. 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.

Regosole zeigen nur eine initiale Bodenbildung auf Lockergestein. Sie weisen *calcaric*-, *takyric*-, *ardic*- und *hyposalic* Eigenschaften auf. Die Leitfähigkeiten erreichen nicht den Schwellenwert der Solonchaks von 15 mScm^{-1} . Die Gruppenstruktur der Clusteranalyse definiert sich aber vor allem über die hohen Leitfähigkeiten und damit hohen Salzgehalte.

Die Phaeozeme weisen einen dunklen *mollic* Horizont sowie einen hohen Basenstatus auf. 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 sowie die wassergesättigten Bedingungen der Quellrasen im Ostpamir hemmen bzw. verlangsamen den Abbau von organischer Substanz.

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

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

Abgesehen von den Quellrasen sind die angesprochenen Böden überwiegend flachgründig und steinreich, wobei mit zunehmender Höhe auch die Bodenentwicklung abnimmt und Initialböden überwiegen. Diese 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. Denudationsformen unterschiedlicher Dimension und damit Störungen der Bodenentwicklung entstehen durch die Trittbelastung. 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; GYAMTSHO 2002).

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 (AGAHAJANZ 1965). Dies relativiert auch den Einfluss der Beweidung.

5.4.2 PCA – Principal component analysis

Ein Zusammenhang aus Vegetation und Böden konnte mittels einer Ordination dargestellt werden, wobei sich steuernde Faktoren jeweils wechselseitig in der Bio- bzw. der Pedosphäre durchsetzen (vgl. Abbildung 3). 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. Die Ordination erfasst die Differenzen zwischen den Aufnahmeflächen so, dass mit wenigen Dimensionen oder Achsen ein großer Anteil dieser Unterschiede reproduziert wird und die wesentlichen ökologischen Zusammenhänge abgebildet werden können. 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 erste Hauptkomponente in Abbildung 3 erklärt 34,86% der Gesamtvarianz, die zweite 18,61%. Die im Labor untersuchten Bodenparameter werden anhand von schwarzen Pfeilen dargestellt. Ihre vom Ursprung ausgehenden Vektorpfeile zeigen die jeweiligen Gradienten der Variablen. Die relativen Distanzen zwischen den Objekten entsprechen ihren Unähnlichkeiten. Nach LEYER/WESCHE (2007) sind Ladungen ab einem Betrag von 0,3 in die Interpretation mit einzubeziehen. Die einzelnen Flächen wurden in Abbildung 3 durch ihre Klassifikation in die verschiedenen Bodentypen einer vorgeschalteten Clusteranalyse ersetzt.

Nach der Achsenbildung im ersten Schritt des Ordinationsverfahrens wurden in einem zweiten Schritt die gemessenen signifikanten Umweltvariablen post hoc in den Plot eingefügt. 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 von-

einander abhängigen Effekten verschiedener Umweltvariablen kommen kann. Im Diagramm wird die Richtung durch einen grauen 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. Somit können geographisch weit entfernte Flächen relativ ähnliche Eigenschaften besitzen; umgekehrt können starke Unterschiede zwischen räumlich nahe gelegenen Flächen auftreten (LEYER/WESCHE 2007; ØKLAND 1996).

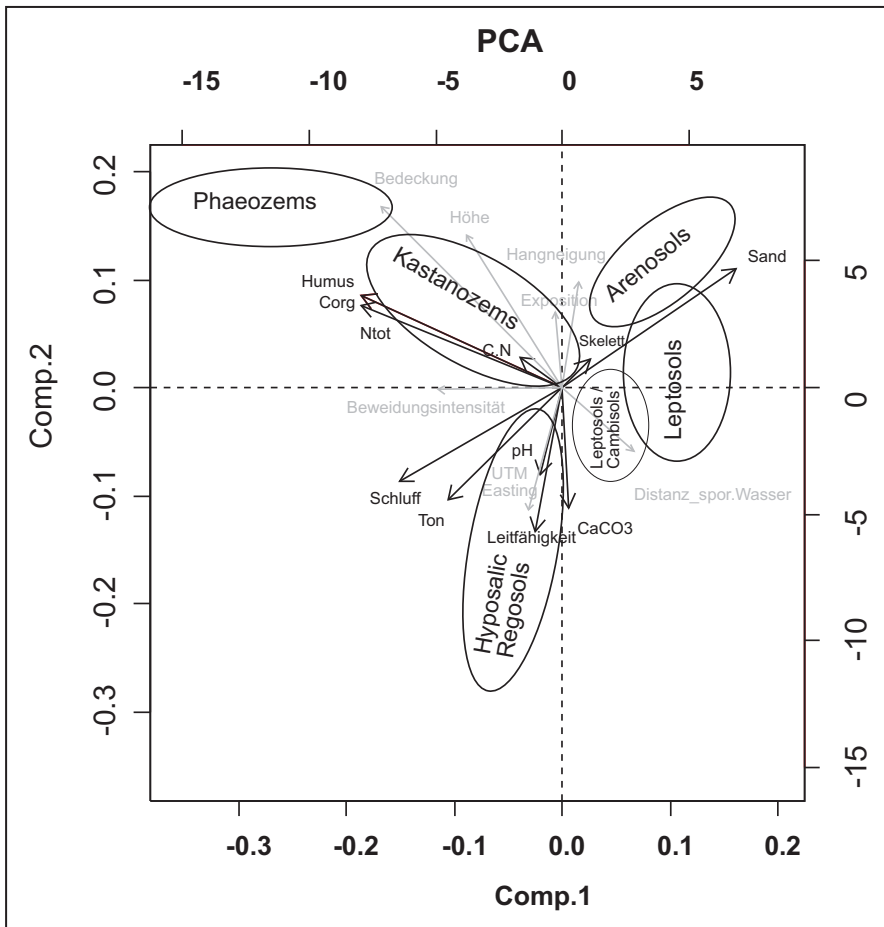


Abb. 3: PCA mit geplotteten Umweltvariablen (Signifikanz < 0,05)

Die Parameter N_{tot} und C_{org} , sowie die daraus resultierende Variable Humus, sind mit der ersten Hauptkomponente negativ korreliert. Auch Schluff und Sand werden durch die erste Hauptkomponente erklärt. Die Vektoren unkorrelierter Variablen stehen senkrecht aufeinander. Die zweite Hauptkomponente vereint vor allem Informationen aus der Körnung, dem 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.

Demzufolge sind die Salzböden vor allem im dritten Quadranten zu finden. Im ersten und vierten Quadranten sammeln sich die skelettreichen Leptosole unter Felsvegetation. Die Kastanozeme der alpinen Matten und die Phaeozeme der Quellrasen mit erhöhtem organischem Kohlenstoff sind im zweiten Quadranten zu finden. Die sandigen Arenosole liegen im ersten Quadranten. Die Gruppe der Leptosole, die sich in ihrer Entwicklung im Übergang zu Cambisolen befinden, sind in der Nähe der Leptosole im vierten Quadranten vertreten.

Über die PCA wurden sieben signifikante Umweltvariablen geplottet. 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. Bedeckung und Höhenlage beeinflussen somit die Bodeneigenschaften am stärksten.

Die erste Achse hängt mit den Umweltvariablen Bedeckung, Beweidung und der Distanz zu sporadischem Wasser zusammen. Die Umweltvariablen Hangneigung, Höhe, Exposition sowie das UTM-Easting (Universal Transverse Mercator), das mit zunehmender Ost-Lage steigt, und abermals die Bedeckung orientieren sich vor allem an der zweiten Achse. Steilere Flächen sind im ersten Quadranten zu finden, während Aufnahmen, die absolut eher im Osten liegen, sich im unteren Teil des Diagramms befinden. Ersichtlich ist hierdurch eine Zunahme der Versalzung gegen Osten. 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. Salzanreicherungen finden sich tendenziell eher in abflusslosen Senken oder am schwach geneigten Hangfuss auf tonigem Substrat. Sie sind genau entgegen des Hangneigungsvektors orientiert.

Abbildung 3 zeigt durchaus einen Zusammenhang der Bodeneigenschaften, bzw. der Bodentypen, mit der Beweidung. Allerdings ist diese nur eine der sieben signifikant beeinflussenden Variablen. 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 Phaeozeme, während der Vektor der Distanz zu sporadischem Wasser in Richtung der Leptosole weist.

6 Synthese

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die physikalischen, chemischen und bodenmikrobiologischen Indikatoren durch die Beweidung zwar beeinflusst werden, dass die jeweiligen abiotischen Faktoren jedoch einen weit ausgeprägteren Einfluss auf diese Bodeneigenschaften 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. Da im Untersuchungsgebiet keine unbeweideten Flächen gefunden werden konnten, kann keine Aussage getroffen werden, ob die Pedosphäre 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.

Die vorliegenden Ergebnisse beleuchten mittels ökologischer Untersuchungs- und statistischer Auswertungsmethoden eine Region auf dem Dach der Welt, die in der internationalen Wissenschaft aus bodenkundlicher Sicht lange im Abseits stand. Unter Verwendung geostatistischer Verfahren wurden hierbei die bodenkundlichen Punktdaten zumindest ansatzweise auf die Fläche übertragen. Dabei erhebt die Arbeit keinen Anspruch auf Vollständigkeit der Erfassung aller Bodentypen

im Ostpamir. Charakterisiert werden konnten vielmehr nur Eigenschaften des erhobenen Datensatzes. Weitere Untersuchungen könnten die Region mit einem flächendeckenderen Datensatz erfassen sowie Lösungsansätze hinsichtlich der Energieversorgung aufzeigen, die alternative Möglichkeiten zur Brennstoffgewinnung aus Zwergsträuchern und Dung nutzen.

Literatur

- AGACHANJANC, O.E. 1979: Besonderheiten in der Natur der ariden Gebirge der UdSSR. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 123 (2): 73-77.
- AGACHANJANC, O.E. 1985: Zum Problem der rezenten und früheren Vergletscherung des Pamir. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 129 (4): 233-238.
- AGAKHANJANZ, O.E. & S.-W. BRECKLE. 2003: Vegetation of the Pamirs – classification, cartography, altitudinal belts. In: BRECKLE, S.-W. (Hg.): Natur und Landnutzung im 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: 17-19.
- AGAKHANJANZ, O.E. & S.-W. BRECKLE. 2004: Pamir. In: BURGA, C. et al. (Hg): Gebirge der Erde. Landschaft, Klima, Pflanzenwelt. Stuttgart: 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): 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: 20-24.
- 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): 150-155.
- BERG, L.S. 1959: Die Geographischen Zonen der Sowjetunion. Band 2. Leipzig.
- BIONDINI, M. & L. MANSKE 1996: Grazing Frequency and Ecosystem Processes in a Northern Mixed Prairie, USA. In: Ecological Applications 6 (1): 239-256.
- BOHNER, A. 2001: Bedeutung der Almwirtschaft für die Biotopvielfalt und floristische Artenvielfalt. In: Sauteria 11: 27-40.
- BREU, T. & H. HURNI. 2003a: Extreme environmental conditions in a breathtaking landscape. In: BREU, T. & H. HURNI: The Tajik Pamirs: Challenges of Sustainable Development in an Isolated Mountain Region. Berne: Centre for Development and Environment (CDE), Universität Bern: 8-11.
- 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): 815-819.
- DOMMERMUTH, C. 1996: Die Gefährdung alpiner Ökosysteme durch beschleunigte Bodenabtragung. In: Geoökodynamik 17: 251-270.
- GISI, U. et al. 1997: Bodenökologie. 2. Auflage. Stuttgart.
- GYAMTSO, P. 2002: Condition and Potential for Improvement of High Altitude Rangelands. In: Journal of Buthan Studies 7: 82-98.
- HINTERMAIER-ERHARD, G. & W. ZECH 1997: Wörterbuch der Bodenkunde. Stuttgart.
- HURNI, H. et al. 2004: Der Tadschikische Pamir. Entwicklungsprobleme und Perspektiven einer Hochgebirgsregion in Zentralasien. In: Geographische Rundschau 56 (10): 60-65.

- IUSS Working Group WRB* 2007: World Reference Base for Soil Resources 2006. Erstes Update 2007. Deutsche Ausgabe.
- JUSUFBEKOV, H.J. 1968: Uluchshenie pastbish i senokosov Pamira i Alaiskoi dolini. [Verbesserung von Weiden und Heuflächen des Pamir und des Alai-Tales]. Dušanbe.
- 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: 54-63.
- LEYER, I. & K. WESCHE. 2007: Multivariate Statistik in der Ökologie. Berlin.
- Macbeth Division Of Kollmorgan Instruments Corporation*. 1994: Munsell Soil color charts. New Windsor.
- NIEDER, R. & D.K. BENBI. 2008: Carbon and Nitrogen in the Terrestrial Environment. Berlin.
- ØKLAND, R.H. 1996: Are ordination and constrained ordination alternative or complementary strategies in general ecological studies? In: Journal of Vegetation Science 7: 289-292.
- POLO, M. 1983: Von Venedig nach China. Die größte Reise des 13. Jahrhunderts. In: KNUST, T.A. (Hg.). Darmstadt.
- 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.
- SCHAEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL. 2010: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Heidelberg.
- SCHMIZ, P. 2009: Bodentemperaturmessungen zur expositions- und höhenbedingten Differenzierung des Bodewärmehaushaltes 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: 42-46.
- STUMPP, M. et al. (2005): Gradients of livestock density influence soil conditions but not vegetation composition in southern Mongolian desert steppes. In: Mountain Research and Development 25 (3): 244-251.
- VIRTANEN, R. et al. 2006: Broad-scale vegetation-environment relationships in Eurasian high-latitude areas. In: Journal of Vegetation Science 17: 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.
- 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: 47-55.
- ZECH, M., BIMÜLLER, C. et al. 2011: Human and climate impact on ¹⁵N natural abundance of plants and soils in high-mountain ecosystems: a short review and two examples from the Eastern Pamirs and Mt. Kilimanjaro. In: Isotopes in Environmental and Health Studies 47 (3): 286-296.

