

Ber. d. Reinh.-Tüxen-Ges. 28, 65-81. Hannover 2017

Fernerkundungsbasierte Erfassung der Vegetationszusammensetzung und Produktivität von Grünlandbeständen im Großen Kaukasus

– Anja Magiera, Gießen, Hannes Feilhauer, Erlangen, Rainer Waldhardt, Gießen, Martin Wiesmair, Köln, Annette Otte, Gießen –

Abstract

High mountain ecosystems and their services are of global importance. They take 20 percent of the terrestrial surface, offer habitat to humans, a diverse fauna and flora, and play a key role for fresh water supply. But for all that, they are prone to global change. Remote, high mountain regions, especially from former Soviet Union States experience a strong change in the agricultural sector, which impacts socio-economy, ecosystem functioning and biodiversity in the end. Thus, interdisciplinary research, joining social and ecological systems is highly needed. In the research region, Kazbegi (Greater Caucasus, Georgia) of the interdisciplinary research projects AMIES and AMIES II (Analysing multiple interrelationships between environmental and societal processes in mountainous regions of Georgia) these processes become highly visible. The local subsistence agriculture is based on pastured cattle for dairy production. Meadows are of high economic importance, as they serve as the main fodder source. Thus, this study focuses on modelling the vegetation composition and biomass of the subalpine grassland by means of remote sensing. Our results show that the subalpine grassland vegetation is characterized by broad transitions between grassland types. In a gradual modelling approach, including multispectral imagery, vegetation indices and topographical parameters we could map floristic composition as well as biomass. The resulting multiscale maps compose important information for calculating the carrying capacity of the researched grasslands. This allows an integrative analysis of the multifunctionality of the high mountain landscape with the help of normative scenarios.

1. Einleitung

Gebirgsökosysteme und ihre Ökosystemleistungen sind weltweit von großer ökologischer und ökonomischer Bedeutung (GRET-REGAMEY et al. 2012). Sie nehmen mit 20 % der Landoberfläche einen Großteil der Erdoberfläche ein, sind Lebensraum für weltweit über 386 Millionen Menschen und liefern lebenswichtiges Wasser für die Hälfte der Erdbevölkerung (KÖRNER 2004; MESSERLI et al. 2004; WOODWELL 2004; KÖRNER et al. 2017). Zugleich sind sie einzigartige Horte der Biodiversität. So liegen etwa die Hälfte der globalen Biodiversitäts-Hot-Spots und ein Drittel der terrestrischen Artenvielfalt in Gebirgsregionen (MYERS et al. 2000; KÖRNER 2004; BARTHLOTT et al. 2005). Ein Zusammenspiel aus geographischer Isolation und Fragmentierung von Lebensräumen, die kurze Abfolge verschiedener Klimazonen und die hohe Vielfalt an Mikrohabitaten führen, bedingt durch eine hohe topographische Heterogenität, zu einer hohen Artenvielfalt und zu Endemitenreichtum in Gebirgsregionen (KÖRNER 2004). Eine artenreiche, intakte Vegetationsdecke ist dabei die Grundvoraussetzung zum Schutz vor Umweltrisiken (KÖRNER 2004).

Gebirgsökosysteme reagieren frühzeitig auf den Klimawandel, wodurch sich ihre Funkti-

onsfähigkeit (z. B. Produktivität, Oberflächenabfluss) verändert (WATSON & HAEBERLI 2004). Dies ist besonders kritisch, da große Teile der Gebirgsregionen in Entwicklungsländern liegen und ungefähr die Hälfte ihrer Bevölkerung direkt oder indirekt von Mangel an Nahrungsmitteln aus der Region betroffen ist (MESSERLI et al. 2004). Daher sind die peripheren Gebirgsregionen auch von politischer Instabilität und Landflucht geprägt, welche durch die Abkehr von der Landwirtschaft aufgrund fehlender Zukunftsperspektiven verstärkt werden. Gesteigert werden diese Effekte noch durch Transformationsprozesse, in denen sich immer noch viele ehemalige Staaten der Sowjetunion befinden. Die grundlegenden Veränderungen in der Agrarstruktur von einer zentral organisierten großflächig wirtschaftenden, intensiven Landwirtschaft zu einer privaten kleinteiligen Subsistenzlandwirtschaft haben einen besonders ausgeprägten Landschaftswandel zur Folge, der sich in geänderten Ökosystemfunktionen (z. B. Biodiversität) und sozioökonomischen Verhältnissen zeigt (VOLZ et al. 2011; WALDHARDT et al. 2011). Integrative, zukunftsorientierte Landnutzungskonzepte, die die multiplen Mensch-Umwelt-Beziehungen berücksichtigen, werden in diesen Regionen daher dringend benötigt. Inter- und transdisziplinäre Forschung, die die Daten sozialer und ökologischer Systeme zusammenführt, ist allerdings rar (GURUNG et al. 2012).

Dieser Forschungsbedarf wurde in den Projekten AMIES (Wechselwirkungen von ökologischen und sozialen Prozessen in Bergregionen Georgiens) und AMIES II (Szenarienentwicklung für nachhaltige Landnutzung im Großen Kaukasus Georgiens) am Beispiel der Untersuchungsregionen Kazbegi und Bakuriani (nur AMIES) aufgegriffen. Die in AMIES durchgeführte Analyse von Beziehungen zwischen ökologischen und gesellschaftlichen Prozessen unter Berücksichtigung des Landschaftsmusters und die daraus abgeleitete Formulierung von regional differenzierten Empfehlungen für eine nachhaltige Landnutzung ist in der Hochgebirgsregion Kazbegi aufgrund der tiefgreifenden Veränderungen der sozioökonomischen Struktur und den damit einhergehenden Umweltrisiken und Landschaftsveränderungen von besonderer Bedeutung (KEGGENHOFF et al. 2011; OTTE et al. 2011; VOLZ et al. 2011; WALDHARDT et al. 2011). Die Analyse einer multifunktionalen Landschaft mittels normativer Szenarien (AMIES II) wird dabei genutzt, um das Produktionspotential der Landschaft unter verschiedenen Landnutzungsszenarien darzustellen und um Empfehlungen für eine nachhaltige Landnutzung weitergeben zu können (WALDHARDT et al. 2010).

Eine Hauptkomponente der Szenarienentwicklung liegt dabei in der Erfassung der Grünlandvegetation und der damit verbundenen oberirdischen Biomasse, die in dieser Arbeit stellvertretend für den Heuertrag steht. Die periphere Lage der Region Kazbegi bedingt landwirtschaftliche Subsistenzwirtschaft mit kleinflächigem Gemüseanbau und vor allem Viehhaltung zur Gewinnung von Milchprodukten (HEINY et al. 2017). Die Region ist im Winter wegen der Schnee- und Lawinengefahr häufig von der Außenwelt abgeschnitten, zudem ist die Grenze zu Russland für Georgier in der Regel nicht passierbar, so dass die Bevölkerung auf lokal verfügbare Lebens- und Futtermittel angewiesen ist (NAKHUTSRISHVILI et al. 2005). Die Bewirtschaftung der regionalen Wiesen und Weiden bildet somit die Grundlage der Milchproduktion und trägt erheblich zur Ernährungssicherung bei. Flächenmäßig betrachtet ist das Weidegrünland, welches ca. 54 % der Landfläche im Untersuchungsgebiet umfasst, ein wichtiger Produktionsfaktor (CERNUSCA & NAKHUTSRISHVILI 1983). Die Mähwiesen zur Heugewinnung nehmen nur einen geringen Anteil der Landfläche ein, sind aber die einzige Winterfutterquelle. Der hohe Artenreichtum des Wirtschaftsgrünlandes der Region Kazbegi, der im Talraum eng an die landwirtschaftliche Nutzung gekoppelt ist, wurde von TEPHNADZE et al. (2014) beschrieben. Die Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung, wie sie lokal (Ukhati, Toti, Juta) zu beobachten ist, führt zu Phytodiversitätsverlusten, die die Funktionsfähigkeit des Hochgebirgsökosystems einschränken (TASSER et al. 2003; KLIMEK et al. 2008; NIEDRIST et al. 2009; COCCA et al. 2012). Folgen dieses Prozesses sind im Raum Kazbegi die

Wiederetablierung und Ausbreitung natürlicher Birken-Krummholz-Niederwälder mit *Betula litwinowii*, die Ausbreitung von Sukzessionsflächen mit Sanddorngebüsch (*Eleagnus rhamnoides*) und eine zunehmende Dominanz von weißem Germer (*Veratrum lobelianum*) in Weideflächen mit geringem Weidedruck (NAKHUTSRISHVILI et al. 2006; NAKHUTSRISHVILI et al. 2012). Auch schwer zugängliche, hochgelegene und weit von den Dörfern entfernte Mähwiesen, die früher für die Winterfuttergewinnung genutzt wurden, fallen aus der Bewirtschaftung. Diese abgelegenen Wiesen wachsen allerdings häufig auf vergleichsweise produktiven Standorten über tiefgründigen Böden und sind durch eine hohe Phytodiversität (LICHTENEGGER et al. 2006) gezeichnet.

Die methodische Herausforderung der Modellierung von Grünlandvegetation und Biomasse besteht darin, dass das in einer kleinstrukturierten Mittelgebirgsregion bereits erfolgreich getestete Patch-Pattern-Konzept (BUREL & BAUDRY 2003; FORMAN 1995) in der Hochgebirgslandschaft nur bedingt anwendbar ist. Der weitläufigen Landschaft fehlt es aufgrund der starken topographischen Gradienten und der Landnutzung, denen das Artenvorkommen folgt, an deutlichen Grenzlinien zwischen den Grünlandgesellschaften (GLEASON 1926). Zur Erfassung der Biomasse und der floristischen Zusammensetzung des subalpinen Wirtschaftsgrünlandes wurde daher ein nicht-klassifikatorischer Ansatz gewählt, der die floristische Komposition mithilfe von Fernerkundungsdaten abbildet (SCHMIDTLEIN et al. 2007; FEILHAUER et al. 2011).

Eine Zusammenführung der in AMIES II gewonnen Ergebnisse soll genutzt werden, um den örtlichen Landwirten – basierend auf wissenschaftlicher Grundlage – praktische Vorschläge für zukünftige nachhaltige Nutzungsalternativen zu machen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher i) Biomassepotenziale abzubilden und diese gleichzeitig anhand der ii) Vegetationszusammensetzung bewerten zu können. Zudem soll als wichtiger Einflussfaktor der floristischen Diversität iii) die lokale Praxis des Grünlandmanagements erfasst werden. Die in dieser Studie diskutierten Ergebnisse sind eine Zusammenfassung von bereits in *Ecological Indicators* publizierten Daten (MAGIERA et al. 2017) und bisher unveröffentlichten Auswertungen der Vegetationszusammensetzung (MAGIERA et al. n. d.) sowie von Untersuchungen zum Weidemanagement.

2. Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet (Fläche 155 km²) befindet sich im Distrikt Kazbegi (1.200 - 5.033 m NN) im zentralen Teil des nordseitigen Großen Kaukasus in Georgien. Das Gebiet wird vom Terek entwässert (Abb. 1), dem die Große Georgische Heerstraße – eine historische Süd-Nord-Verbindung – folgt. An dieser Verkehrsachse liegen zahlreiche kleine Dörfer, häufig auf den Schuttfächern seitlicher Zuflüsse. Das Verwaltungszentrum der Region ist Stepantsminda (2016 ca. 1.300 Einwohner). Mit ungefähr 3.5 Einwohnern pro km² (in 2016) ist der Distrikt Kazbegi nur dünn besiedelt (NATIONAL STATISTICS OFFICE OF GEORGIA 2016).

Das Ausgangsgestein im Untersuchungsgebiet ist überwiegend vulkanischen Ursprungs und umfasst tertiäre und quartäre Andesite und Dazite (MINISTRY OF GEOLOGY OF THE USSR 1983; HANAUER et al. 2017). Desweiteren finden sich terrigene Flyschserien, Ton-schiefer und mergeliger Sandstein aus dem Jura sowie Kalkgestein der Unteren Kreide (MINISTRY OF GEOLOGY OF THE USSR 1983; HANAUER et al. 2017). Die Böden der Untersuchungsregion sind allgemein nährstoffarm mit einem hohen Humusanteil im Oberboden (TEPHNADZE et al. 2014). Die Bodentypen umfassen flachgründigen Leptosol an südexpo-nierten Steilhängen, skelettreichen Regosol sowie tiefgründigen Cambisol und Umbrisol mit besserer Nährstoffversorgung (HANAUER et al. 2017). In den Flussauen überwiegen Flu-viosol und Gleysol.

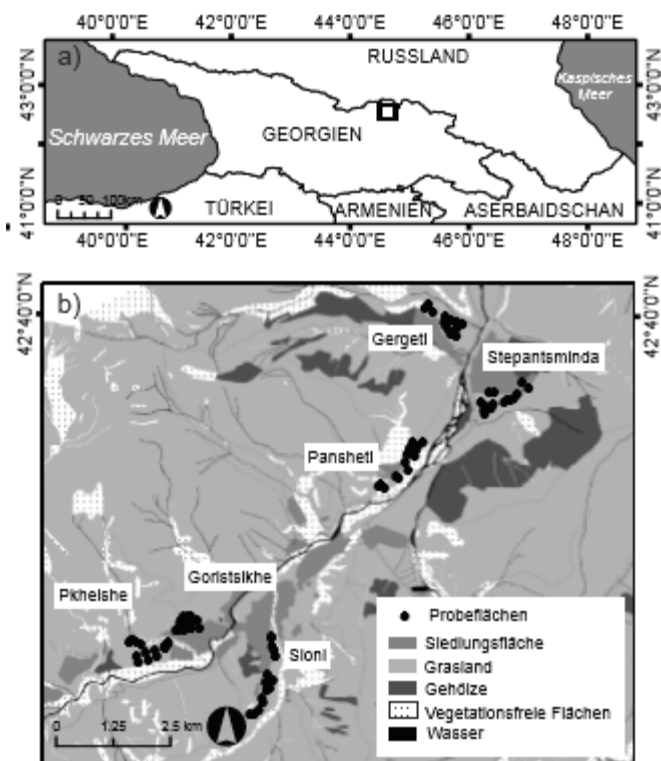


Abb. 1: a) Lage des Untersuchungsgebietes innerhalb Georgiens und b) Lage der Probeflächen im Terek-Tal, modifiziert nach WIESMAIR et al. 2016.

Aufgrund der Lage im zentralen Großen Kaukasus ist das Klima der Untersuchungsregion relativ kontinental (LICHTENEGGER et al. 2006). Die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt nur 4.7°C, und der durchschnittliche Jahresniederschlag (hauptsächlich im Juli und August) liegt im Talgrund (1.700 m NN) bei nur 806 mm. Die daraus resultierende, kurze Vegetationsperiode im Untersuchungsgebiet bedeutet für eine moderate Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung eine Herausforderung (NAKHUTSRISHVILI 1999; NAKHUTSRISHVILI et al. 2006; KIKVIDZE et al. 2006). Zudem variiert das Geländeklima zwischen nord- und süd-exponierten Hanglagen stark, was wiederum die Abfolge der Höhenstufen beeinflusst. Die nach Norden exponierten, kälteren Hanglagen liegen im Schatten und weisen eine kürzere Vegetationsperiode auf als die nach Süden exponierten. Die subalpine Höhenstufe beginnt daher bei 1.800 bzw. 1.900 m NN und erreicht die alpine Höhenstufe bei 2.400 bzw. 2.500 m NN und erstreckt sich bis 2.960 bzw. 3.000 m NN. Darauf folgen die subnivale Stufe (bis 3.600 bzw. 3.750 m NN) und die nivale Höhenstufe, die die Höhenlagen über 3.750 m NN umfasst (NAKHUTSRISHVILI 2012).

Die Region Kazbegi ist floristisch eingehend untersucht worden (SEIFRIZ, 1931; NAKHUTSRISHVILI 1976, 1999; PYŠEK & ŠRUTEK 1989; KIKVIDZE 1996; AKHALKATSI et al. 2006; TEPHNADZE et al. 2014) und zeichnet sich durch einen hohen Arten- und Endemitenreichtum aus. Deshalb wurde die gesamte Kaukasusregion als globaler Hot-Spot der Biodiversität ausgewiesen (MYERS et al. 2000). Im Untersuchungsgebiet kommen circa 1.100 Pflanzenarten vor; davon 595 in der subalpinen Höhenstufe, wovon 33 % als endemisch gelten (NAKHUTSRISHVILI et al. 2006).

Ein hoher Grünland-Anteil auf über 50 % der Landfläche prägt die waldarme Landschaft. Reste von Birkenwäldern (*Betula litwinowii*) – die potentielle natürliche Vegetation der subalpinen Stufe – stocken an unzugänglichen nach Norden exponierten Hängen. Dort sind auch Anzeichen einer einsetzenden Ausbreitung der Birkengebüsche zu beobachten (THEISSEN 2011). Ortsnahe Anpflanzungen von Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*), die in der Sowjetzeit vorgenommen wurden, bilden mittlerweile dichte, aber brandgefährdete Bestände.

Derzeit ist die Landwirtschaft, insbesondere die Grünlandwirtschaft mit Rindern, in der Hochgebirgsregion Kazbegi ein wirtschaftlich, sozial und kulturell bedeutender Faktor. Die frühere Übernutzung durch intensive Schafbeweidung fand in der Region Kazbegi vor allem zu Zeiten der Sowjetunion statt. Bis in die 1980er Jahre war es gängige Beweidungspraxis, große Schafherden aus Aserbaidschan (transnationale Transhumanz) im Frühjahr entlang der Großen Georgischen Heerstraße auf die Sommerweiden in den Hochlagen zu treiben. Ausgehend von zentralen Orten wie Stepantsminda wurden Herden mit bis zu 1.000 Tieren von berittenen Hirten auf subalpine und alpine Weiden in Höhen bis zu 3.000 m NN getrieben (CERNUSCA & NAKHUTSRISHVILI 1983). Auch heute werden noch einzelne Flächen in Allmendenutzung mit Rindern beweidet. Seit der Unabhängigkeit Georgiens (1991) haben sich durch die bis heute weitgehende Schließung der Grenze nach Russland die Weidesysteme im Großen Kaukasus deutlich verändert (NAKHUTSRISHVILI et al. 2005). Eine Nutzung der Weiden in der subalpinen Höhenstufe kann derzeit nur begrenzt stattfinden, da ein Großteil der Flächen in einem so schlechten Zustand ist (erodiert, steinreich, geringer Futterwert), dass sich eine Weidenutzung nicht empfiehlt. Insbesondere die zu frühe Beweidung wird als Grund für die voranschreitenden Degradationsprozesse angesehen (SAKHOKHIA 1983). Das während der gesamten Vegetationsperiode genutzte Weidegrünland erreicht hier nur Bestandshöhen von etwa 2 cm und wird von wenigen weidetoleranten Arten dominiert (CERNUSCA & NAKHUTSRISHVILI 1983). Aufgrund starker Tritteinwirkung bilden sich lückige Grasnarben, was Erosionsprozesse fördert, die zur Degradation der Böden und zur Verarmung der Bestände an Nährstoffen führt. Besonders stark ist dies entlang der Auftriebsrouten zu beobachten (vgl. WIESMAIR et al. 2016).

Für die Wiesen der subalpinen Stufe ist eine ein- bis zweischürige Mahd typisch, wobei der erste Schnitt Ende Juni bis Anfang Juli und der zweite Schnitt Ende August erfolgt (SAKHOKHIA 1983). Einige Landwirte betreiben ein mehrjähriges Rotationssystem, das Mähwiesen und Kartoffeläcker in einer Fruchtfolge integriert (THEISSEN 2011). Auch werden im zeitigen Frühjahr Teile der Wiesenfläche vor der Bannzeit beweidet.

Im Rahmen der Subsistenzlandwirtschaft wird neben dem kleinflächigen Anbau von Gemüse im Haus- und Feldgarten sowie im Gewächshaus vor allem Viehhaltung betrieben, um Milchprodukte zu erzeugen (HEINY et al. 2017). Die Bewirtschaftung der örtlichen Wiesen und Weiden ist daher Grundlage für die Milchproduktion und trägt erheblich zur Ernährungssicherung bei. Flächenmäßig betrachtet ist das beweidete Grünland, das ca. 54 % der Landfläche im Untersuchungsgebiet umfasst, der wichtigste Produktionsfaktor in der Vegetationszeit (NAKHUTSRISHVILI et al. 2005). Die Mähwiesen, die nur einen geringen Anteil der Landfläche einnehmen, sind die einzige Winterfutterquelle. Neben dieser als Subsistenzlandwirtschaft betriebenen Bewirtschaftung ist in größerer Entfernung von den Siedlungen eine zunehmende Aufgabe der Grünlandnutzung zu beobachten (NAKHUTSRISHVILI et al. 2005). Die Nutzungsaufgabe, die mit Landflucht einhergeht, betrifft vor allem die Grünlandgebiete, die von hochgelegenen Gebirgsdörfern aus im Zuge der grenzüberschreitenden Transhumanz bewirtschaftet wurden (GRACHEVA et al. 2012).

3. Methoden

3.1 Floristische Erhebungen und Biomasseschnitte

Insgesamt wurden im Juni und Juli 2014 90 Vegetationsaufnahmen nach der Methode von BRAUN-BLANQUET (1964) zum Biomassehöchststand dokumentiert; die Nomenklatur folgt dabei weitestgehend dem aktuellen Stand der Plantlist 1.1 (THE PLANTLIST 2010). Erfasst wurde das Wirtschaftsgrünland der Dörfer Stepantsminda, Gergeti, Pansheti, Sioni, Phkelsche und Goristikhe in einem stratifiziert-zufälligen Design.

Aufgenommen wurden auf den 25 m² großen Plots, neben der Artzusammensetzung, die Gesamtdeckung der Vegetation, der Anteil von offenem Boden und Gestein, auch die Höhe und Deckung der oberen und unteren Krautschicht. Um den Ertrag der Heuwiesen zu ermitteln, wurde kurz vor Beginn der Heuernte (Ende Juli) eine Biomassebeerntung auf vier gleichmäßig verteilten Quadraten (0.1 m²) durchgeführt. Das Schnittgut wurde in einem Trockenschrank bei 60 °C 48 Stunden getrocknet und danach ausgewogen. Da das subalpine Grünland in der Region Kazbegi im zeitigen Frühling stark beweidet wird und keine horstbildenden Gräser enthält, kann davon ausgegangen werden, dass nur Biomasse des aktuellen Jahres geerntet wurde.

3.2 Fernerkundungsdaten

Aus einer multispektralen Satellitenbildszene abgeleitete Vegetationsindizes und ein digitales Höhenmodell bilden die Grundlage der räumlichen Modellierung. Die Aufnahme des Satellitenbildes erfolgte am 21. Juni 2014 durch den RapidEye Sensor mit einer räumlichen Auflösung von 5 x 5 m in fünf multispektralen Bändern (blau 440 - 510 nm, grün 520 - 590 nm, rot 630 - 685 nm, red edge 690 - 730 nm, und NIR 760 - 850 nm; WEICHEL et al. 2011). Beleuchtungsunterschiede aufgrund des starken Reliefs wurden mithilfe einer Cosinus-Korrektur ausgeglichen (TEILLET et al. 1982). Neben den fünf Bändern wurden verschiedene Vegetationsindizes berechnet; diese beinhalten sogenannte Einzelband Ratios wie: red edge / rot, NIR / red edge, red edge / NIR, NIR / red und NIR / grün. Zusätzlich wurden weitere komplexere Vegetationsindizes berechnet:

- Atmospherically Resistant Vegetation Index 2 (ARVI2, KAUFMAN & TANRE 1992),
- Blue-wide dynamic range vegetation index (BWDRVI, GITELSON 2004),
- Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI, QI et al. 1994),
- Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI, HUETE 1988),
- Enhanced Vegetation Index (EVI, HUETE et al. 1999),
- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI),
- Red edge NDVI (HERRMANN et al. 2010),
- Blue Wide Dynamic Range Vegetation Index (BWDRVI, GITELSON 2004).

Alle Indizes wurden mithilfe des R Pakets raster Version 2.5-8 berechnet (HIJMAN 2015).

Aus dem Höhenmodell (20 x 20 m Auflösung) wurden folgende topographische Indices mithilfe der Arc Map 10.2.1 tool box und der Geomorphometry and Gradient tool box (EVANS et al. 2014) abgeleitet:

- Eastness und Northness (ZAR 1998),
- Hangneigung und Exposition,
- Hangform (plan curvature, mean curvature, profile curvature),
- Sonneneinstrahlung,
- CTI (Compound Topographic Index),
- TRI (Topographic Ruggedness Index),
- HLI (Heat Load Index) und SRR (Surface Relief Ratio).

3.3 Auswertungsmethoden

Die Modellierung der Biomasse erfolgte in einem zweistufigen Verfahren und ist detailliert beschrieben in MAGIERA et al. (2017). Die Grundlage der Biomassemodellierung bildet eine graduelle Vegetationskarte. Hierfür wurden in drei Random Forest-Regressions-modellen (R Package randomForest Version 4.6 1-2) die Vegetationsähnlichkeiten in Form von drei Isometric Feature Mapping (ISOMAP)- Ordinationsachsen in Beziehung zu den fünf Bändern der Satellitenbildszene, den daraus abgeleiteten Vegetationsindizes und den topografischen Indizes gesetzt (LIAW & WIENER 2002). Die entstandenen Karten der drei floristischen Hauptgradienten wurden zum einen als Vorhersagevariablen für die Biomassemodellierung genutzt. Zum anderen wurden sie zu einer graduellen Vegetationskarte zusammengesetzt.

Die Vegetationsdaten wurden zudem mithilfe von ISOPAM-Clusteranalyse (SCHMIDTLEIN et al. 2010), Indikatorartenanalyse (DUFRENE & LEGENDRE 1997) und Ordinationsmethoden (ISOMAP, TENENBAUM et al. 2000) ausgewertet. Hierfür wurden die R Packages vegan Version 2.2.1, labdsv Version 1.7 und isopam Version 0.9 1-3 genutzt (SCHMIDTLEIN et al. 2010; OKSANEN et al. 2015; ROBERTS 2015). Signifikante Unterschiede zwischen den Grünlandtypen wurden mithilfe der Kruskal Wallis ANOVA und Nemenyi-Tests für multiple Gruppenvergleiche aus dem R Package PMCMR Version 4.1 und dem Package stats Version 3.2.4 ermittelt (KRUSKAL & WALLIS 1952; POHLERT 2014; R CORE TEAM 2016). Eine detaillierte Beschreibung der oben genannten uni- und multivariaten statistischen Methoden ist bei MAGIERA et al. (2017) dargestellt.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Vegetation und Landnutzung

In 90 Vegetationsaufnahmen (25 m²) des subalpinen Wirtschaftsgrünlandes (1.800 - 2.500 m NN) wurden insgesamt 177 höhere Pflanzenarten aus 35 Familien erfasst. Die durchschnittliche Artenzahl pro Aufnahme lag bei 28 Arten, sie variierte jedoch stark (15 - 45 Arten).

Die ISOMAP-Ordination der Vegetationsaufnahmen bildet die drei unterschiedenen Vegetationstypen und ihre graduellen Übergänge deutlich ab (Abb. 2). Insgesamt 79 % der Variation in den Vegetationsdaten werden durch den Ordinationsraum dargestellt. Die erste Achse erklärt dabei 53 % der Eingangsvariation.

Die erste Achse bildet vor allem den Ertragsgradienten ab. Er ist durch Biomasseertrag, Deckung der oberen und unteren Krautschicht und die Gesamtdeckung bestimmt. Die zweite Achse hingegen zeigt eine Differenzierung der Vegetation entlang des Höhengradienten und einen Bezug zur Ostexposition.

Mithilfe einer ISOPAM-Klassifikation lassen sich drei Grünlandtypen unterscheiden: *Hordeum brevisubulatum*-Heuwiesen (HB), *Gentianella caucasea*-Grünland (GC) und *Astragalus captiosus*-Grünland (AC). Sie sind durch Indikatorarten deutlich voneinander abgegrenzt (Tab. 1). Die HB-Heuwiesen zeichnen sich durch eine hohe Anzahl an Indikatorarten (18) aus. Es sind im Wesentlichen typische Arten des mitteleuropäischen mesophilen Wirtschaftsgrünlandes und nur wenige typische Grünlandarten des Kaukasus (*Hordeum brevisubulatum*, *Carum caucasicus*, *Ranunculus caucasicus*). Viele der mitteleuropäisch verbreiteten Arten weisen auf eine gute bis moderate Nährstoffverfügbarkeit in den Böden (*Festuca pratense*, *Phleum pratense*, *Poa pratensis*, *Poa trivialis*, *Rumex acetosa*, *Geranium sylvaticum*). Einige Aufnahmen in den HB-Heuwiesen sind jedoch auch durch das Auftreten von Stickstoffzeigern wie z. B. *Artemisia vulgaris*, *Rumex obtusifolius* und *Arctium lappa* charakterisiert. Diese Aufnahmen liegen häufig in Ortsnähe und wurden vermutlich bis Mitte der Achtzigerjahre als Ackerflächen für den Anbau von Sommer-Gerste und Hafer genutzt. Strukturell sind

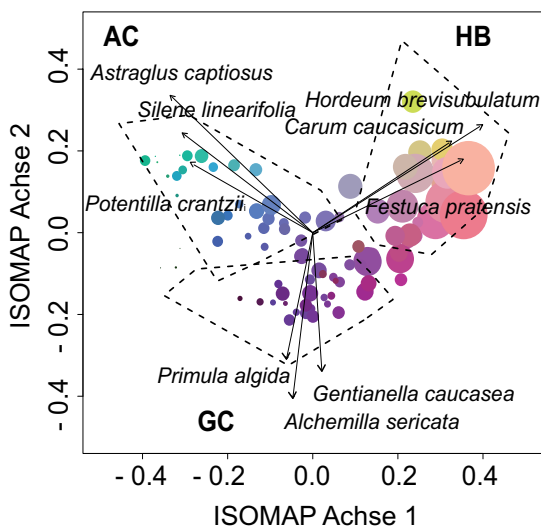


Abb. 2: ISOMAP Ordination der 90 Vegetationsaufnahmen. Die Länge der Pfeile entspricht der Stärke des Gradienten im Auftreten der jeweils wichtigsten drei Indikatorarten. Die Punkte repräsentieren Vegetationsaufnahmen. Deren Farbgebung ist wiederum an den RGB-Code der Vegetationskarte (Abb. 4) angepasst. Die Punktgröße spiegelt den Gradienten des Biomasse-Ertrags (MAGIERA et al. 2017). AC = *Astragalus captiosus*-Grünland, GC = *Gentianella caucasea*-Grünland, HB = *Hordeum brevisubulatum*-Heuwiesen.

die *Hordeum brevisubulatum*-Wiesen im Vergleich zu den beiden anderen Typen vor allem durch den hohen Gräseranteil gekennzeichnet (Tab. 2). Deshalb ist hier die Gleichverteilung der Arten (Evenness) auch am niedrigsten, da vor allem *Hordeum brevisubulatum* Dominanzbestände bildet, was diesen Typus besonders attraktiv für eine Mahdnutzung macht. Die ökologischen Standortbedingungen, unter denen *Hordeum brevisubulatum* vorkommt, ähneln denen von *Alopecurus pratensis* in Mitteleuropa und sind eng an eine hohe Bodenfeuchte gekoppelt (LICHTENEGGER et al. 2006). *Hordeum brevisubulatum*-Heuwiesen finden sich dabei in Höhen bis zu 2.500 m NN in Plateaulagen (LICHTENEGGER et al. 2006), meist in Dorfnähe, was als Indiz für die vormalige Ackernutzung der Flächen spricht. Auf den Hochplateaus (>1.900 m NN) finden sich in der Nähe der HB-Wiesen oft brachgefallene Siedlungen (Ukhati, Toti), was die langjährige Nutzung auch abgelegener Standorte belegt.

Das GC-Grünland ist der artenreichste der drei Grünlandtypen (30 Arten pro 25 m²). Indikatorarten sind hauptsächlich krautige Arten, unter anderem die beiden Frühjahrsblüher *Gentianella caucasea* und *Primula algida*. Zudem treten hier einige Orchideenarten kennzeichnend auf, wie *Gymnadenia conopsea* und *Herminium monorchis*. Typisch ist ein hoher Deckungsgrad bunt blühender Kräuter. Die Arten treten sehr gleichmäßig verteilt auf, was auf hohen Konkurrenzdruck und Störungseinfluss rückschließen lässt. Die Böden dieses Grünlandes entstanden aus proluvial-diluvial-verlagerten Sedimenten und sind relativ nährstoffarm. HB-Wiesen und GC-Grünland liegen räumlich häufig sehr dicht beieinander und gehen ineinander über (Abb. 2). Das GC-Grünland ist aufgrund seines Artenreichtums und einigen seltenen Arten äußerst attraktiv und als besonders schutzwürdig einzustufen.

Das AC-Grünland findet sich vor allem in den Auenlagen und an Steilhängen mit geringer Vegetationsdeckung und äußerst niedriger Bestandshöhe. Typisch sind wenige, dominante Arten wie die Endemiten *Astragalus captiosus* und *Medicago glomerata*. Der hohe Deckungsgrad an Leguminosen und die hohe Anzahl verschiedener Leguminosenarten unter

Tab. 1: Indikatorarten Analyse nach (DUFRENE & LEGENDRE 1997), Arten gelten als Indikatorarten, wenn der Indikatorwert >0.3 und $p > 0.05$ ist.

	Relative Abundanz			Indikator Werte	p- Wert
Art	HB	GC	AC		
<i>Hordeum brevisubulatum</i> Grasland (HB)					
<i>Hordeum brevisubulatum</i>	0.76	0.13	0.11	0.73	0.001
<i>Carum caucasicum</i>	0.84	0.14	0.02	0.69	0.001
<i>Festuca pratensis</i>	0.85	0.12	0.03	0.67	0.001
<i>Rumex acetosa</i>	0.74	0.22	0.04	0.65	0.001
<i>Silene vulgaris</i>	0.68	0.24	0.08	0.62	0.001
<i>Phleum pratense</i>	0.57	0.26	0.18	0.54	0.001
<i>Poa trivialis</i>	0.78	0.09	0.12	0.51	0.001
<i>Vicia tenuifolia</i> subsp. <i>variabilis</i>	0.78	0.14	0.08	0.47	0.001
<i>Bunias orientalis</i>	0.71	0.1	0.18	0.47	0.001
<i>Poa pratensis</i>	0.79	0.18	0.03	0.41	0.001
<i>Vicia alpestris</i>	0.53	0.28	0.18	0.4	0.001
<i>Pastinaca armena</i>	0.43	0.26	0.32	0.39	0.007
<i>Taraxacum spec.</i>	0.47	0.3	0.22	0.33	0.004
<i>Trifolium pratense</i>	0.44	0.36	0.2	0.32	0.03
<i>Geranium sylvaticum</i>	0.67	0.23	0.1	0.32	0.001
<i>Ranunculus ampelophyllus</i>	0.8	0	0.2	0.31	0.002
<i>Rumex obtusifolius</i>	1	0	0	0.30	0.001
<i>Ranunculus caucasicus</i>	0.62	0.34	0.04	0.30	0.004
<i>Gentianella caucasea</i> Grasland (GC)					
<i>Alchemilla sericata</i>	0.1	0.63	0.27	0.63	0.001
<i>Gentianella caucasea</i>	0.17	0.77	0.06	0.56	0.001
<i>Primula algida</i>	0	0.81	0.19	0.54	0.001
<i>Ranunculus oreophilus</i>	0.19	0.62	0.19	0.50	0.001
<i>Plantago atrata</i>	0.15	0.45	0.4	0.41	0.001
<i>Leontodon hispidus</i>	0.22	0.46	0.33	0.39	0.002
<i>Agrostis vinealis</i>	0.4	0.52	0.07	0.36	0.008
<i>Seseli alpinum</i>	0	1	0	0.36	0.001
<i>Cerastium arvense</i>	0.4	0.39	0.21	0.36	0.023
<i>Lotus corniculatus</i>	0.14	0.52	0.34	0.33	0.004
<i>Bupleurum polyphyllum</i>	0.07	0.79	0.14	0.31	0.002
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	0.09	0.85	0.06	0.31	0.001
<i>Astragalus captiosus</i> Grasland (AC)					
<i>Astragalus captiosus</i>	0	0.04	0.96	0.83	0.001
<i>Silene linearifolia</i>	0.04	0.11	0.84	0.60	0.001
<i>Potentilla crantzii</i>	0.1	0.21	0.69	0.49	0.001
<i>Bromus variegatus</i>	0.2	0.35	0.45	0.42	0.003
<i>Poa alpina</i>	0.09	0.31	0.61	0.41	0.001
<i>Koeleria luerksenii</i>	0.1	0.42	0.48	0.39	0.003
<i>Campanula sibirica</i> subsp. <i>hohenackeri</i>	0	0.18	0.82	0.34	0.001
<i>Trifolium ambiguum</i>	0.24	0.26	0.5	0.34	0.009
<i>Galium verum</i>	0.16	0.32	0.52	0.34	0.002
<i>Minuartia oreina</i>	0.03	0.43	0.54	0.31	0.017
<i>Euphrasia hirtella</i>	0.11	0.43	0.46	0.31	0.042
<i>Medicago glomerata</i>	0.17	0.11	0.72	0.30	0.002

den Indikatorarten in diesem Grünlandtyp spiegeln eine Anpassung an magere Böden wider.

Die analysierte Grünlandvegetation bildet einen breiten Biomassegradienten ab. Er resultiert vor allem aus den abiotischen Standortfaktoren (Exposition, Hangneigung und Höhe

Tab. 2: Struktur der Grünlandtypen. Hochgestellte Buchstaben kennzeichnen homogene Gruppen nach einer Kruskal Wallis ANOV
A und Nemenyi Tests für multiple Gruppenvergleiche $p \leq 0.01$ (KRUSKALL & WALLIS 1952), aus MAGIERA et al. n. d.).

	<i>Hordeum brevisubulatum</i> Grasland				<i>Gentianella caucasea</i> Grasland				<i>Astragalus capitosus</i> Grasland			
	n=23				n=36				n=31			
	Median	25	Perz.	75	Median	25	Perz.	75	Median	25	Perz.	75
Strukturelle Kennzeichen												
Biomasse [$t \cdot ha^{-1}$]	5.97	4.80		7.98	2.61 ^{a)}	1.81		3.17	2.66 ^{a)}	2.13		3.16
Vegetationsdeckung (%)	100	98		100	95.5 ^{a)}	93.5		98	95 ^{a)}	90		96
Deckung der oberen Krautschicht [%]	25	12.5		37.5	4.5 ^{a)}	2		10	4 ^{a)}	2		6.5
Höhe der oberen Krautschicht [cm]	80	70		90	50 ^{a)}	35		57.5	58 ^{a)}	50		62.5
Höhe der unteren Krautschicht [cm]	45	36.5		52.5	19 ^{a)}	11.5		24	15 ^{a)}	10		20
Streubedeckung [%]	0	0		0	0.5 ^{a)}	0		2	0 ^{a)}	0		2.5
Offener Boden [%]	0	0		2	2.5 ^{a)}	1		5	4 ^{a)}	2		5
Offenes Gestein [%]	0 ^{a)}	0		0	0 ^{a)} b)	0		0	1 ^{b)}	0		4.5
Funktionelle Gruppen												
Gräser Anteil [%]	39	32		54	21 ^{a)}	15		29	22 ^{a)}	19		29
Kräuter Anteil [%]	43 ^{a)}	32		54	59	50		68	43 ^{a)}	32		50
Leguminosen Anteil [%]	12 ^{a)}	8		16	16 ^{a)}	9		23	35	18		43
Diversität												
Evenness	0.83 ^{a)}	0.76		0.86	0.88 ^{a)} b)	0.86		0.91	0.84 ^{b)}	0.81		0.89
Shannon Index	2.78 ^{a)}	2.49		2.92	2.99	2.82		3.18	2.69 ^{a)}	2.62		3.02
Artenzahl	28 ^{a)}	25		32	31 ^{b)}	28		35	27 ^{a)}	21		32

NN) und bedingt die Nutzung des Grünlandes als Wiese oder Weide. Während 83 % der Vegetationsaufnahmeflächen des HB-Grünlandes gemäht werden, sind dies nur 67 % der GC- und 65 % der AC-Aufnahmeflächen. Das Grünland in der Region Kazbegi wird i. d. R. nicht gedüngt. Nur der Dung der Weidetiere und verbliebener organischer Dünger aus einer vorausgegangenen Ackerperiode führen an etlichen Standorten zu einer erhöhten Produktivität. Die weitläufigen Wiesen und Weideflächen sind nur in Ortsrandlage durch Zäune begrenzt und werden in einem Rotationssystem mit Frühjahrsbeweidung genutzt (Abb. 3). Im Frühjahr werden vor allem die HB- und GC-Grünlandflächen relativ intensiv beweidet. Herden mit bis zu 100 Rindern beweideten ohne Führung durch Hirten alle erreichbaren, produktiven Flächen der

subalpinen Stufe. Das Grünland hat zu diesem Zeitpunkt erst eine Bestandshöhe von ungefähr fünf Zentimetern. Ab Ende Mai treffen Hirten in der Region ein und die Rinder-Herden werden geteilt. Ein großer Teil der Rinder wird von den Hirten in das weitgehend verlassene

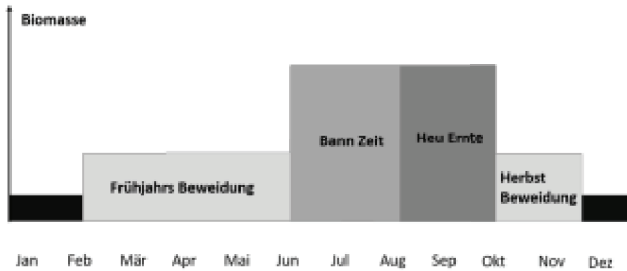


Abb. 3: Schematische Darstellung des Beweidungssystems in der Region Kazbegi, angepasst nach KAPFER (2010).

Truso-Tal (Quelllauf des Terek) getrieben. Die übrigen Tiere verbleiben im Haupttal und beweiden die ortsnahen Hanglagen. Eigene Untersuchungen mit GPS-Überwachung an Weidetieren zeigen, dass diese im Umkreis von sieben Kilometern weiden und dabei im Schnitt elf Stunden pro Tag außerhalb des Stalles verbringen. Die produktiven HC- und GC-Wiesen werden ab Ende Mai durch ein ausgeklügeltes Zaun-System vor den freilaufenden Weidetieren geschützt, damit die Bestände aufwachsen können.

Die Heuernte erfolgt erst im August, sodass meist nur ein Schnitt möglich ist. Das Futter ist zu diesem Zeitpunkt bereits überständig. Nach der Heu-Ernte kehren die Rinder aus dem Truso-Tal zurück ins Haupttal und beweiden die abgeernteten Flächen bis zum ersten Schneefall. Dieses System wurde von KAPFER als Teil der „Dreizelgenwirtschaft“ beschrieben und war in Süddeutschland bis Ende des Mittelalters (1250 - 1500 n. Chr.) weit verbreitet (KAPFER 2010). Da die Mahd mit der Sense erfolgt und die Nutzung einzelner Flächen über die Jahre hinweg räumlich und zeitlich variiert, werden breite Vegetationsgrenzen gefördert. Eine Mosaiklandschaft mit scharfen Grenzlinien, wie sie in den heutigen agrarischen Gunsträumen Mitteleuropas typisch ist, gibt es in der Extensivlandschaft der Kazbegi Region daher nicht.

4.2 Fernerkundungsansätze für die Erfassung gradueller Vegetationsunterschiede

Die breiten Übergänge in der Vegetation erschweren eine Klassifikation diskreter Einheiten im Grünland, sodass ein Ansatz der Modellierung der graduellen Vegetationsunterschiede gewählt wurde. Als Proxy für die graduellen Vegetationsunterschiede werden die Achsenwerte der ISOMAP-Ordination herangezogen. Aufgrund der genannten deutlichen strukturellen Eigenschaften des Grünlandes (Ertrag, Deckung, Grasanteil), welche sich gut durch die spektrale Signatur abbilden lassen, und wegen eines ausgeprägten Zusammenhangs zwischen den topographischen Indizes und der Vegetationszusammensetzung, ist die Anwendung dieses Verfahrens insbesondere für das Hochgebirge geeignet.

Die Modellierung der Vegetationsachsen mithilfe einer Random Forest-Regression ergab folgendes Bild: 64 % der Varianz der ersten Vegetationsachse, 33 % der zweiten Vegetationsachse und 46 % der dritten Vegetationsachse ließen sich durch die drei Modelle erklären und in Karten übertragen (Abb. 4). Als erklärende Variablen für die Modellierung der ersten Achse sind SAVI 05, das NIR Band und der MSAVI entscheidend (MAGIERA et al. 2017). Alle drei sind bekannt wegen ihrer Aussagekraft in Bezug auf Vegetationsdeckung und Biomasseertrag. Die Modellierung der zweiten Achse weist auf eine besondere Bedeutung der Hang-Exposi-

tion (Eastness) und der Höhenlage hin, während die Modellierung der dritten Achse vor allem durch Höhenlage und Nordausrichtung bedingt ist.

Das Biomassemodell selbst (Abb. 4) zeigt einen moderaten Zusammenhang zwischen der Vegetation und der Biomasse ($R^2 = 0.64$) und einem Root Mean Square Error vom $1.6 \text{ t}^* \text{ha}^{-1}$

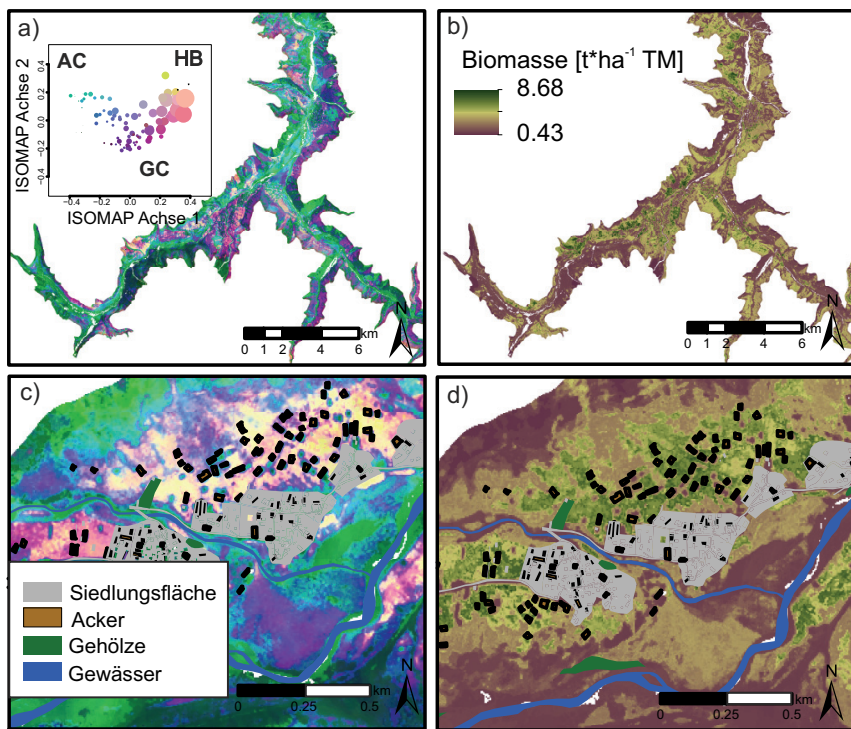


Abb. 4: Floristische Zusammensetzung des Grünlandes in ISOMAP-Achsenwerten a) und b) Biomasseertrag in $\text{t}^* \text{ha}^{-1}$ in Trockenmasse für das Untersuchungsgebiet und als vergrößerter Ausschnitt für das Dorf Goristhikhe c) bzw. d).

(MAGIERA et al. 2017). Die Modellierung der Biomasse ist auch allein mittels Satellitenbild, Vegetationsindizes und Topographie möglich. Der statistische Umweg über eine Vegetationskarte bietet jedoch den Vorteil einer gekoppelten Analyse von Vegetation und Biomasse. Das gezeigte Modell wurde kalibriert für das subalpine Wirtschaftsgrünland bis ca. 2.100 m NN zum Hochstand der Biomasse ab Mitte Juni. Die Übertragbarkeit des Modells ist schwierig, denn eine vorausgegangene Untersuchung zeigt vor allem, dass sich die Vegetationstypen zu einem späteren Zeitpunkt deutlich schlechter differenzieren lassen und Einbußen bei der Modellgüte zu erwarten sind, sobald das Modell zeitlich übertragen wird (MAGIERA et al. 2013). Dies liegt zum einen an veränderten atmosphärischen Einflüssen bei der Satellitenbilddaufnahme, zum anderen aber auch an der raschen phänologischen Entwicklung im Hochgebirge.

Mithilfe der zugehörigen Karten können die floristische Zusammensetzung des Grünlandes sowie artenreiche, schützenswerte Grünlandtypen - z. B. das GC-Grünland - identifiziert werden und entsprechende Pflege- und Schutzmaßnahmen in die Umweltplanung einfließen. Zugleich bietet die Biomassekarte die Möglichkeit, ertragreiche Standorte in der weitläufigen Landschaft zu identifizieren.

Artenzusammensetzung und Biomasse sind in einem natürlichen Ökosystem sehr eng miteinander verbunden (GUO 2007). Grünlandgesellschaften mit hoher Diversität sind aufgrund

von Nischenkomplementarität und ihrer funktionellen Eigenschaften häufig stabiler gegenüber Stress als artenarme Systeme (ROSCHER et al. 2012). Es können daher auch funktionelle Zusammenhänge aus Vegetationszusammensetzung und Biomasseverteilung abgeleitet werden. Die charakteristische Verteilung von Gräser-, Kräuter- und Leguminosen-Anteilen in den Grünlandtypen liefert wichtige Informationen über die Heu-Nutzung und den Futterwert des Grünlandes. Bodenbedeckung ist in der Region zudem ein wichtiger Faktor in Bezug auf Erosions- und Massenbewegungsereignisse (WIESMAIR et al. 2016). Die aus der Vegetations- / Biomassekarte gewonnenen Informationen können dazu genutzt werden, Beweidungsstärke und Mahdrhythmen dem Grünlandtyp anzupassen. Die erstellten Karten dienen unter anderem bei der Berechnung von normativen Szenarien (Ziel des AMIES II-Projektes) der Bewertung ökonomischer Nutzbarkeit der Landschaft unter ökologisch nachhaltigen Randbedingungen.

5. Fazit

Obwohl das Grasland der Region Kazbegi in der Vergangenheit stark und kontinuierlich genutzt wurde, ist es von großer Naturnähe (geringe Anteile nicht heimischer Arten) sowie mit einem großen Artenreichtum und strukturellen Besonderheiten ausgezeichnet. Die Diversität der Heuwiesen ist unter anderem durch die langjährige Praxis der Frühjahrsbeweidung geprägt. Somit ist die Erhaltung der floristischen Diversität eng an eine landwirtschaftliche Nutzung gekoppelt. Nachhaltige Landnutzungskonzepte für periphere Hochgebirgsregionen, die sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte berücksichtigen, können neue Wege zur Erhaltung der landwirtschaftlichen Praxis aufzeigen. Fernerkundungsgestützte Verfahren zur Erfassung von floristischer Diversität und Biomassewerten liefern dafür wichtige Informationen für den lokalen bis regionalen Maßstab.

Zusammenfassung

Gebirgsökosysteme und ihre Ökosystemleistungen sind global von großer ökonomischer und ökologischer Bedeutung, sind aber auch stark vom Globalen Wandel betroffen. Dies gilt insbesondere für die peripheren Hochgebirgsregionen der vormaligen Staaten der Sowjetunion. Sie unterliegen starken Veränderungen in der Agrarstruktur, was sowohl weitreichende sozio-ökonomische als auch ökologische Konsequenzen hat. In der Untersuchungsregion Kazbegi (Großer Kaukasus, Georgien) der interdisziplinären Forschungsprojekte AMIES (<https://www.uni-giessen.de/fbz/fb09/institute/ilr/loek/projekte/projalt/amies>) und AMIES II (<https://www.uni-giessen.de/fbz/fb09/institute/ilr/loek/projekte/currproj/AMIESII/AMIESII>) werden diese Prozesse besonders deutlich. Die dortige Subsistenzlandwirtschaft ist von Weidetierhaltung zur Milchgewinnung geprägt. Aufgrund der Abgeschiedenheit der Region ist das lokale Wirtschaftsgrünland die einzige Winterfutterquelle und daher von besonderer Bedeutung. Aufgrund dessen steht die Erfassung der Vegetationszusammensetzung und oberirdischen Biomasse mithilfe von Fernerkundungsdaten im Fokus dieses Artikels. Die Ergebnisse zeigen, dass die primär durch die physischen Standortparameter (Höhe m NN, Ost-Ausrichtung) bedingte Grünlandvegetation in der subalpinen Höhenstufe in der Region Kazbegi durch breite Übergänge zwischen den Wiesen und Weiden gekennzeichnet ist. Mittels multispektraler Satellitenbilder, Vegetationsindizes und Topographievariablen kann die Vegetationszusammensetzung und die Biomasse (Nettoprimärproduktion ($\text{g TM} \times \text{m}^{-2}$)) abgebildet werden. Eine multiskalige Biomasse-Prognose ist ein wichtiger Faktor für die Bestimmung der Tragfähigkeit der Hochgebirgslandschaft und somit auch ein integraler Bestandteil der Planung der landwirtschaftlichen Nutzung in peripheren Gebirgsregionen. Sie erlaubt auch eine integrative Analyse der multifunktionalen Hochgebirgslandschaft mithilfe normativer Szenarien.

Danksagung

Diese Arbeit ist eingebettet in das interdisziplinäre Projekt 'AMIES II (2014-2017) – Scenario development for sustainable land use in the Greater Caucasus, Georgia'. Wir danken daher der VolkswagenStiftung für die finanzielle Förderung. Für die Bereitstellung der Satellitenbildszene möchten wir dem Rapid Eye Science Archive (Project-ID 724) danken sowie dem DAAD für die Übernahme von Reisekosten. Für die Unterstützung bei der Feldarbeit danken wir herzlich allen unseren georgischen Projektpartnern. Großer Dank gilt Frau Dr. Gries für die konstruktiven Hinweise bei der Erstellung des Manuskriptes.

Literatur

- AKHALKATSI, M., O. ABDALADZE, G. NAKHUTSRISHVILI & W.K. SMITH (2006): Facilitation of seedling microsites by *Rhododendron caucasicum* extends the *Betula litwinowii* Alpine treeline, Caucasus Mountains, Republic of Georgia. – *Arctic Antarctic and Alpine Research* **38**: 481–488.
- BARTHLOTT, W., D. RAFIQPOOR, G. KIER & H. KREFT (2005): Global centers of vascular plant diversity. – *Nova Acta Leopoldina* **92** (342): 61–83.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1964): *Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde*. 3. Aufl., 888 S. – Springer, Berlin.
- BUREL, F. & J. BAUDRY (2003): *Landscape ecology: concepts, methods, and applications*. 1. Aufl., 362 S. – Science Publishers, Plymouth.
- CERNUSCA, A. & G. NAKHUTSRISHVILI (1983): Untersuchungen intensiver Schafbeweidung im Zentral Kaukasus. – *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* **10**: 183–192.
- COCCA, G., E. STURARO, L. GALLO & M. RAMANZIN (2012): Is the abandonment of traditional livestock farming systems the main driver of mountain landscape change in Alpine areas? – *Land Use Policy* **29** (4): 878–886.
- DUFRENE, M. & P. LEGENDRE (1997): Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. – *Ecological Monographs* **67**: 345–366.
- EVANS, J.S., S.A. CUSHMAN, & D. THEOBALD (2014): *An ArcGIS Toolbox for Surface Gradient and Geomorphometric Modeling*, Version 2.0-0.
- FEILHAUER, H., U. FAUDE, & S. SCHMIDTLEIN (2011): Combining Isomap ordination and imaging spectroscopy to map continuous floristic gradients in a heterogeneous landscape. – *Remote Sensing of Environment* **115**: 2513–2524.
- FORMAN, R.T. (1995): *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. 1. Aufl., 632 S. – Springer, Berlin.
- NATIONAL STATISTICS OFFICE OF GEORGIA (2016): *Demographic Situation in Georgia*. Online verfügbar unter: http://www.geostat.ge/cms/site_images/_files/georgian/population/Demografiuli%20Vitareba%20SaqartveloSi%20Krebuli%202016.pdf. (letzter Zugriff: 17.05.2017).
- GITELSON, A.A. (2004): Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. – *Journal of Plant Physiology*, **161** (2): 165–173.
- GLEASON, H.A. (1926): The individualistic concept of plant association. – *Bulletin of the Torrey Botanical Club* **53**: 7–26.
- GRACHEVA, R., T. KOHLER, J. STADELBAUER & H. MEESSEN (2012): Population dynamics, changes in land management, and the future of mountain areas in Northern Caucasus: the example of North Ossetia. – *Erdkunde* **66** (3): 197–219.
- GRET-REGAMEY, A., S.H. BRUNNER & F. KIENAST (2012): Mountain ecosystem services: Who cares? – *Mountain Research and Development* **32**: 23–34.
- GUO, Q. (2007): The diversity–biomass–productivity relationships in grassland management and restoration. – *Basic and Applied Ecology* **8** (3): 199–208.
- GURUNG, A.B., S.W. VON DACH, M.F. PRICE, R. ASPINALL, J. BALSIGER, J.S. BARON, E. SHARMA, G. GREENWOOD & T. KOHLER (2012): *Global Change and the World's Mountains - Research Needs and Emerging Themes for Sustainable Development*. – *Mountain Research and Development* **32**: 47–54.
- HANAUER, T., C. POHLENZ, B. KALANDADZE, T. URUSHADZE & P. FELIX-HENNINGSSEN (2017): Soil distribution and soil properties in the subalpine region of Kazbegi; Greater Caucasus; Georgia: Soil quality rating of agricultural soils. – *Annals of Agrarian Science* **15** (1): 1–10.

- HEINY, J., G. MAMNIASHVILI & I.-U. LEONHAEUSER (2017): The socioeconomic situation of private households in the Kazbegi region – First insights based on quantitative data. – *Annals of Agrarian Science* **15** (1): 31–39.
- HERRMANN, I., A. KARNIELI, D.J. BONFIL, Y. COHEN & V. ALCHANATIS (2010): SWIR-based spectral indices for assessing nitrogen content in potato fields. – *International Journal of Remote Sensing* **31** (19): 5127–5143.
- HIJMANS, R.J. (2015): raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package Version 2.3-40. Online verfügbar unter: <https://CRAN.R-project.org/package=raster> (letzter Zugriff 30.05.2017).
- HUETE, A., C. JUSTICE & W. VAN LEEUWEN (1999): MODIS vegetation index (MOD13). – Algorithm Theoretical Basis Document **3**: 213.
- HUETE, A.R. (1988): A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). – *Remote Sensing of Environment* **25** (3): 295–309.
- KAPFER (2010): Beitrag zur Geschichte des Grünlands Mitteleuropas. Darstellung im Kontext der landwirtschaftlichen Bodennutzungssysteme im Hinblick auf den Arten- und Biotopschutz. – *Naturschutz und Landschaftsplanung* **42** (5): 133–145.
- KAUFMAN, Y.J. & D. TANRE (1992): Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **30** (2): 261–270.
- KEGGENHOFF, I., T. KELLER, M. ELIZBARASHVILI, R. GOBEJISHVILI & L. KING (2011): Naturkatastrophen durch Klimawandel im Kaukasus? Hochwasser und Hanginstabilitäten in Georgien immer häufiger. – *Spiegel der Forschung* **28**: 16–23.
- KIKVIDZE, Z. (1996): Neighbour interaction and stability in subalpine meadow communities. – *Journal of Vegetation Science*, **7** (1): 41–44.
- KIKVIDZE, Z., L. KHETSURIANI, D. KIKODZE & R.M. CALLAWAY (2006): Seasonal shifts in competition and facilitation in subalpine plant communities of the central Caucasus. – *Journal of Vegetation Science*, **17** (1): 77–82.
- KLIMEK, S., L. MARINI, M. HOFMANN & J. ISSELSTEIN (2008): Additive partitioning of plant diversity with respect to grassland management regime, fertilisation and abiotic factors. – *Basic and Applied Ecology*, **9** (6): 626–634.
- KÖRNER, C. (2004): Mountain biodiversity, its causes and function. – *Ambio* **13**: 11–17.
- KÖRNER, C., W. JETZ, J. PAULSEN, D. PAYNE, K. RUDMANN-MAURER & E. SPEHN, (2017): A global inventory of mountains for bio-geographical applications. – *Alpine Botany* **127** (1): 1–15.
- KRUSKAL, W. H. & W.A. WALLIS (1952): Use of ranks in one-criterion variance analysis. – *Journal of the American Statistical Association* **47**: 583–621.
- LIAW, A. & M. WIENER (2002): Classification and Regression by randomForest. – *R News* **2**(3):18–22.
- LICHTENEGGER, E., D. BEDOSCHWILI, E. HÜBL & E. SCHARF (2006): Höhenstufengliederung der Grünlandvegetation im Zentralkaukasus. – *Verhandlungen der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Österreich* **143**: 43–81.
- MAGIERA, A., H. FEILHAUER, A. OTTE, R. WALDHARDT & D. SIMMERING (2013): Relating canopy reflectance to the vegetation composition of mountainous grasslands in the Greater Caucasus. – *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **177** (0): 101–112.
- MAGIERA, A., H. FEILHAUER, R. WALDHARDT, M. WIESMAIR & A. OTTE (2017): Modelling biomass of mountainous grasslands by including a species composition map. – *Ecological Indicators* **78**: 8–18.
- MAGIERA, A., H. H. FEILHAUER, R., WALDHARDT, M., WIESMAIR A. & OTTE, Mapping plant functional groups in subalpine grassland of the Greater Caucasus. – *Mountain Research and Development* (submitted on 27.07.2017).
- MESSERLI, B., D. VIVIROLI & R. WEINGARTNER (2004): Mountains of the World: Vulnerable Water Towers for the 21st Century. – *Ambio* **13**: 29–34.
- MINISTRY OF GEOLOGY OF THE USSR (1983): K38-54-Geological Map M 1:50.000. in Russian.
- MYERS, N., R.A. MITTERMEIER, C.G. MITTERMEIER, G.A.B. DA FONSECA & J. KENT, (2000): Biodiversity hotspots for conservation priorities. – *Nature* **403** (6772): 853–858.
- NAKHUTSRISHVILI, G. (1976): Ecological Investigations at Kazbeg High Mountain Station. – *Soviet Journal of Ecology*, **7** (3): 256–260. In Russian
- NAKHUTSRISHVILI, G. (1999): The vegetation of Georgia (Caucasus). – *Braun-Blanquetia* **15**: 5–74.
- NAKHUTSRISHVILI, G. (2012): The Vegetation of Georgia (South Caucasus). 1. Aufl., 236 S. – Springer, Berlin.
- NAKHUTSRISHVILI, G., O. ABDALADZE & M. AKHALKATSI (2006): Biotope types of the treeline of the Central Greater Caucasus. – In: GAFTA, D. & J.R. AKEROYD, (Hrsg.): *Nature conservation: Con-*

- cepts and practice. – 1. Aufl., S. 211–225, Springer, Berlin.
- NAKHUTSRISHVILI, G., ABDALADZE, O. & KIKODZE, A. (2005): Khevi - Kazbegi Region. 1. Aufl., 54 S. – Metsniereba, Tiflis.
- NIEDRIST, G., E. TASSER, C. LÜTH, J. DALLA VIA & U. TAPPEINER (2009): Plant diversity declines with recent land use changes in European Alps. – *Plant Ecology* **202** (2): 195–210.
- OKSANEN, J., F.G. BLANCHET, R. KINDT, P. LEGENDRE, P.R. MINCHIN, R. B. O'HARA, G.L. SIMPSON, P. SOLYMOS, M.H. STEVENS & H. WAGNER (2015): vegan: Community Ecology Package. R Package Version 2.2-1. Online verfügbar unter: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (letzter Zugriff 30.05.2017)
- OTTE, A., M. AKHALKATSI, G. NAKHUTSRISHVILI, D. SIMMERING & R. WALDHARDT, (2011): Phytodiversität in Georgien: Die Bedeutung von Standort und Landnutzung im Großen und Kleinen Kaukasus. – *Spiegel der Forschung* **28**: 24–31.
- POHLERT, T. (2014): The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package (PMCMR). R package, Online verfügbar unter: <http://CRAN.R-project.org/package=PMCMR> (letzter Zugriff 30.05.2017).
- PYŠEK, P. & M. ŠRUTEK (1989): Numerical Phytosociology of the subalpine belt of the Kazbegi region, Caucasus, USSR. – *Vegetatio* **81**(1–2): 199–208.
- QI, J., A. CHEHBOUNI, A.R. HUETE, Y.H. KERR & S. SOROOSHIAN (1994): A modified soil adjusted vegetation index. – *Remote Sensing of Environment* **48** (2): 119–126.
- R CORE TEAM (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Online verfügbar unter: <https://www.R-project.org/> (letzter Zugriff 30.05.2017).
- ROSCHER, C., J. SCHUMACHER, M. GUBSCH, A. LIPOWSKY, A. WEIGELT, N. BUCHMANN, B. SCHMID & E.-D. SCHULZE (2012): Using Plant Functional Traits to Explain Diversity–Productivity Relationships. – *PLoS ONE* **7** (5): e36760.
- SCHMIDTLEIN, S., L. TICHÝ, H. FEILHAUER & U. FAUDE (2010): A brute-force approach to vegetation classification. – *Journal of Vegetation Science* **21** (6): 1162–1171.
- SCHMIDTLEIN, S., P. ZIMMERMANN, R. SCHÜPFERLING & C. WEISS (2007): Mapping the floristic continuum: Ordination space position estimated from imaging spectroscopy. – *Journal of Vegetation Science* **18** (1): 131–140.
- SEIFRIZ, W. (1931): Sketches of the Vegetation of Some Southern Provinces of Soviet Russia. – *Journal of Ecology* **19** (2): 360–371.
- TASSER, E., M. MADER & U. TAPPEINER (2003): Effects of land use in alpine grasslands on the probability of landslides. – *Basic and Applied Ecology* **4** (3): 271–280.
- TEILLET, P.M., GUINDON, B. & D.G. GOODENOUGH (1982): On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data. – *Canadian Journal of Remote Sensing* **8** (2): 84–106.
- TENENBAUM, J.B., V. DE SILVA & J.C. LANGFORD (2000): A Global Geometric Framework for Non-linear Dimensionality Reduction. – *Science* **290** (5500): 2319–2323.
- TEPHNADZE, N., O. ABDALADZE, G. NAKHUTSRISHVILI, D. SIMMERING, R. WALDHARDT & A. OTTE (2014): The impacts of management and site conditions on the phytodiversity of the upper montane and subalpine belts in the Central Greater Caucasus. – *Phytocoenologia* **44** (3–4): 255–291.
- THEISSEN, T. (2011): Dynamics and spatial pattern of land cover and land use in a Greater Caucasus Region. – Masterarbeit, Justus-Liebig Universität, Giessen.
- THE PLANTLIST (2010): The Plantlist. – Online verfügbar unter: <http://www.theplantlist.org>. (letzter Zugriff 17.05.2017).
- VOLZ, J., N. CHKOIDZE & I.-U. LEONHÄUSER (2011): Landwirtschaftliche Transformation in Georgien. – *Spiegel der Forschung* **28**: 32–41.
- WALDHARDT, R., O. ABDALADZE, A. OTTE & D. SIMMERING (2011): Landschaftswandel im Kaukasus Georgiens. Interdisziplinäre Forschung für eine nachhaltigere Zukunft. – *Spiegel der Forschung* **28**: 4–15.
- WALDHARDT, R., M. BACH, R. BORRESCH, L. BREUER, T. DIEKOETTER, H.-G. FREDE, S. GAETH, O. GINZLER, T. GOTTSCHALK, S. JULICH, M. KRUMPHOLZ, F. KUHLMANN, A. OTTE, B. REGER, W. REIHER, K. SCHMITZ, P.M. SCHMITZ, P. SHERIDAN, D. SIMMERING, C. WEIST, V. WOLTERS & D. ZORNER (2010): Evaluating Today's Landscape Multifunctionality and Providing an Alternative Future: A Normative Scenario Approach. – *Ecology and Society* **15** (3): 30.
- WATSON, R.T. & W. HAEBERLI (2004): Environmental Threats, Mitigation Strategies and High-Mountain Areas. – *Ambio* **13**: 2–10.

- WIESMAIR, M., H. FEILHAUER, A. MAGIERA, A. OTTE & R. WALDHARDT (2016): Estimating Vegetation Cover from High-Resolution Satellite Data to Assess Grassland Degradation in the Georgian Caucasus. – *Mountain Research and Development* **36** (1): 56-65.
- WEICHELT, H., P. ROSSO, A. MARX, S. REIGBER, K. DOUGLASS & M. HEYNEN (2011): White Paper - The RapidEye Red Edge Band. – RapidEye White Papers. 1–6. Online verfügbar unter: http://web-dev.rapideye.de/rapideye/upload/Red_Edge_White_Paper.pdf (letzter Zugriff 29.05.2017).
- WOODWELL, G.M. (2004): Mountains: top down. – *Ambio* **13**: 35–38.
- ZAR, J.H. (1998): Biostatistical Analysis. 4 Aufl., 929 S. – Prentice Hall, Upper Saddle River.

Anschrift der Verfasser:

Anja Magiera, M. Sc. Justus-Liebig-Universität Gießen, Zentrum für internationale Entwicklungs- und Umweltforschung (ZEU), Senckenbergstraße 3, 35390 Giessen

Prof. Dr. Dr. habil. Dr. h.c. (TSU) Annette Otte, Justus-Liebig-Universität Gießen, Professur für Landschaftsökologie und Landschaftsplanung, Heinrich-Buff-Ring 26-32, 35392 Gießen

E-Mail: Anja.Magiera@agrار.uni-giessen.de

E-Mail: Hannes.Feilhauer@fau.de

E-Mail: Rainer.Waldhardt@umwelt.uni-giessen.de

E-Mail: Martin.Wiesmair@zeu.uni-giessen.de

E-Mail: Annette.Otte@umwelt.uni-giessen.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 2017

Band/Volume: [29](#)

Autor(en)/Author(s): Magiera Anja, Feilhauer Hannes, Waldhardt Rainer,
Wiesmair Martin, Otte Annette

Artikel/Article: [Fernerkundungsbasierte Erfassung der Vegetationszusammensetzung und Produktivität von Grünlandbeständen im Großen Kaukasus 65-81](#)