

**Interdisziplinäres, integratives Monitoring- und
Forschungsprogramm zur langfristigen,
systematischen Ökosystembeobachtung im
Nationalpark Hohe Tauern 2016 – 2019**

Leistungsbericht 1 (2017) Modul 2 Botanisch/Vegetationskundliche Analysen

Thomas Eberl, & Roland Kaiser

30. November 2017



MIT UNTERSTÜTZUNG VON BUND UND EUROPÄISCHER UNION



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Landwirt-
schaftsfonds für die Entwik-
lung des ländlichen Raums:
Hier investiert Europa in die
ländlichen Gebiete



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Material und Methoden	3
2.1	Probenahmedesign der Gesamtstudie mit Begriffserläuterungen . . .	3
2.2	Verwendete Ausrüstung	4
2.3	Durchführung	5
2.4	Explorative Analyse	10
3	Ergebnisse und Diskussion	13
3.1	Generelle Machbarkeit	13
3.2	Eignung der Probeflächen	14
3.3	Eignung und Grenzen der Methodik	15
3.4	Exemplarische explorative Analyse des ersten Befundes	15
	Danksagung	24
	Literaturverzeichnis	25

1 Einleitung

Die Firma Ennacon KG wurde vom »Haus der Natur (Museum für Natur und Technik)« mit der Durchführung des Moduls 02: Botanisch/Vegetationskundliche Analysen im Rahmen des »Pilot-Projekt zur methodischen Entwicklung, Ersteinrichtung und Validierung eines interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern 2016 – 2019« betraut.

Das vegetationsökologische Monitoring stellt ein Modul eines auf mehrere Jahrzehnte ausgelegten Langzeitmonitorings dar, welches auch andere Organismengruppen wie beispielsweise Säugetiere, Bodenmesofauna und Bodenmikrobiologie umfasst. Während der gegenständlichen Pilotphase (2016 bis 2019) sollen die in den Jahren 2014 bis 2016 erarbeiteten Forschungsansätze und Forschungsmethoden geprüft und optimiert werden. Die diesbezügliche Methodik und Vorgangsweise gehen auf die Überlegungen, Planungen und das Konzept von H. Wittmann (Haus der Natur) zurück; sie ermöglicht eine umfassende Reduktion des Beobachterfehlers, insbesondere im Zuge der Geländearbeit. Für eine Übersicht zu möglichen Fehlerquellen siehe z. B. Morrison et al. (2016). Die

technische Umsetzung der fotografischen Dokumentation wurde von der Firma Ennacon weiterentwickelt.

Als zentraler Inhalt der gegenständlichen Untersuchung wurden die Feststellung, Verteilung und zeitliche Änderung von Vegetationseinheiten, deren Grenzen und die Korrelation mit biotischen und abiotischen Parametern im Modellsystem Schneeböden festgelegt. In dieser Hinsicht stellen diese von langer Schneebedeckung gekennzeichneten Lebensräume ideale Modell-Ökosysteme dar, da sie durch wenige und potentiell gut modellierbare Gradienten gekennzeichnet sind (vgl. das Konzept von H. Wittmann) und mögliche Änderungen unter den gegenwärtigen Klimaszenarien zu erwarten sind (vgl. Matteodo et al. 2016) bzw. aus Transplantationsexperimenten abgeleitet werden können (Lord et al. 2017). Alpine Grasländer und Heiden sind hypothetisch in dieser Beziehung als wesentlich resilienter einzustufen (vgl. die in Matteodo et al. 2016 zitierte Literatur).

Methodisch können durch die vergleichsweise einfache fotografische Auswertung von wenig komplexen Systemen potentielle Verschiebungen von Grenzlinien und der Artfeinverbreitung reproduzierbar gemessen und gezählt, und nicht wie bei anderen zeitsparenden Monitoringmethoden (Deckungsschätzung) lediglich halb-quantitativ erhoben werden. Da keine Proben zur Bestimmung entnommen werden müssen, ist dabei eine minimale Einflussnahme auf das Untersuchungsobjekt gewahrt. Letztlich ist wesentlich, dass die Befunde in der Zukunft - in welcher Form auch immer - neu oder anders ausgewertet werden können.

Mit diesem ersten Leistungsbericht werden die bisher durchgeführten Arbeiten dokumentiert und die methodischen Details der Felderhebungen - der Daten generierende Prozess - umfänglich beschrieben. Generell soll dabei die: (1) Eignung und Grenzen der Methodik aufgezeigt, (2) die generelle Machbarkeit validiert, und (3) die Eignung der Probeflächen für diese Zielsetzungen überprüft werden. Weiters wird eine (4) explorative Darstellung der gewonnenen Befunde gegeben. Im Mittelpunkt steht dabei die Validierung des erstellten Bildmaterials, dessen Reproduzierbarkeit und Eignung für weitere Untersuchungen. Die Existenz von (starken) ökologischen Gradienten an den einzelnen Untersuchungsflächen wird exemplarisch auf Gültigkeit getestet, als dass sie den Grundstein des Untersuchungsdesigns der Gesamtstudie bildet.

2 Material und Methoden

2.1 Probenahmedesign der Gesamtstudie mit Begriffserläuterungen

Als Stichprobe (sample) der anvisierten Lebensräume Krummseggenrasen und Schneeböden haben die »3 core sites«: Innergschlöß (IG), Untersulzbachtal (US) und Seebachtal (SB) zu gelten – im Folgenden als Standorte bezeichnet (vgl. Tab. 1). Die Stichprobeneinheit (sampling unit) sind der »plot« in Form eines Transekts. Die Längen der bereits in den Vorarbeiten abgesteckten Transekte sind nicht normiert und schwanken zwischen 4 und 8 m (Mittelwert von 6 m). Das Design der Gesamtstudie sieht eine zweistufige »subplot«-Hierarchie vor, welche auf 100 cm und 50 cm Flächen beruht. Erstere sind mit Zahlen von 1 bis 4, und letztere mit den Kleinbuchstaben a bis d kodiert. Wir bezeichnen im Weiteren die 50 cm Einheit als Rasterzelle und fügen keine weitere Größendimension hinzu. Hierfür liegen dementsprechend große Bilder als Rohdaten vor (vgl. Abb. 9 auf Seite 22). Die eindeutige Ansprache einer Rasterzelle wird durch einen Schlüssel mit folgendem Schema sichergestellt: Stichprobe + Stichprobeneinheit + Rasterzelle – z. B. IG + 1 + 1a. Die Gerätschaft mit welchem die Rasterzellen abgesteckt werden, bezeichnen wir als Probenahme-Raster. Letztlich ist hier zu erwähnen, dass für die gegenständlichen Analysen nur der »B-Streifen« des Probenahmedesigns der Gesamtstudie als Untersuchungsobjekt dient, da dieser immer gänzlich unbeeinflusst bleibt und nicht destruktiv von anderen Modulen beansprucht wird. Die räumliche Teilung des Transekts IG1 wird als solche negiert (Angaben von 0 bis 4 m).

Tabelle 1: Termini des Probenahmedesigns.

Statistische Einheit	Bedeutung
core sites	Stichproben (Standorte)
sampling units (plots)	Stichprobeneinheiten (Transekte)
subplots	Hierarchische Gliederung der Transekte in 1 × 1 m Flächen mit vier darin enthaltenden 50 × 50 cm Quadraten (Rasterzellen)

In der ersten explorativen Datenauswertung in diesem Bericht wird exemplarisch eine definierte Bildkategorie auf Basis von 10 cm Flächen (Teil-Rasterzelle) als beprobare Population eingesetzt. Die Größenskala der untersuchten statistischen Population ist, soweit dies die Informationen in den Bildern unterstützen, generell frei wählbar. Für andere Fragen können beispielsweise die 50 cm

Flächen der Rasterzellen selbst dienen. Weitere sinnvolle Skalen sind 5 und 2 cm große Ausschnitte. Die objektive Definition von Grenzlinien ist Inhalt der laufenden Methoden-Weiterentwicklung.

2.2 Verwendete Ausrüstung

Kamera- und Stativ-Konstruktion. Als Kamera wurde eine Vollformatkamera (CMOS-Sensor 35,9 × 24,0 mm, 24,93 Millionen Pixel) mit 50 mm Normalobjektiv eingesetzt. Als Beleuchtung kamen zwei mit Diffusor ausgerüstete Reportageblitze zum Einsatz. Die Kameraeinstellungen waren wie folgt: Verschlusszeit M 1:125, Blende F 11, Sensor-Empfindlichkeit ISO 100, Weißabgleich »white balance flash«, Focus manuell 1,5 m und Bildformat RAW.

Die Kamera- und Stativ-Konstruktion (vgl. Abb. 1) bestand aus acht wesentlichen Teilen (in Klammern Angabe der Hersteller Bezeichnung): (A) Dreibein-Stativ (Rollei® Rock Solid Alpha XL Carbon), (B) Stativ-Kugelkopf mit Schnellwechselplatte (2 × Manfrotto® 498 RC2), (C) Kameragehäuse mit 50 mm Objektiv (Nikon D750, Nikon AF-S Nikkor 50 mm 1:1.8 G), (D) Klemme zum Befestigen der Friktionsarme (2 × Manfrotto® 035 Superclamp), (E) Friktionsarm (2 × Manfrotto® Magic Arm 244N), (F) Kameraschiene (2 × Manfrotto® 143 BKT) mit Blitzschuh, bzw. Fernauslöser, (G) Beleuchtung (2 × Nikon SB 910) und (H) Diffusor (2 × B.I.G. Blitz-Softbox 33). Die Ausrüstung kann von 2 Personen transportiert werden (vgl. Abb. 11)

Die obersten drei Stufen des Stativs wurden auf vollen Auszug, die unterste (vierte) Stufe auf Position 6 eingestellt. Der Abstand der Sensorebene zum Boden betrug somit ca. 1,5 m (vgl. Abb. 1). Der Beinstellwinkel wurde auf die erste Rastpositionen (Standardposition) arretiert (ca. $\alpha=23^\circ$). Zur Schonung des Bodens wurden die werksseitig montierten Gummi-Füßchen belassen. Die Bildwinkel (α) bei Objektweite von 1,5 m und Blende F 11 betragen 39.6° (horizontal), 26.99° (vertikal) bzw. 46.79° (diagonal). Der Schärfentiefebereich liegt rechnerisch zwischen 1,25 m und 1,87 m (0,62 m). Die Objektgröße, sprich die fotografierte Fläche, beläuft sich auf rund 100 × 67 cm (Abb. 1 b). Zur späteren Kalibrierung der digitalen Negative wurden Stufen-Graukeil und Farbkarte verwendet (Breite 18 cm, Hersteller B.I.G., mit Buchbinderleim auf Siebdruckkarton kaschiert, Abb. 1 J). Ein Schattenvorhang wurde von der Firma Windner Costüme (Berthold Winder) maßgefertigt (vgl. 2 E bis G). Er besteht aus einem dem Stativ eng anliegendem Kopfteil aus festem, schwarzem und blickdichtem Baumwoll-

Webstoff von ca. 60 cm Höhe, der einen verschließbaren Zugriff zur Kamera gewährt (vgl. Abb. 2 G). Der untere Teil des Vorhanges besteht aus schwarzem, flexiblem, leicht opakem Baumwoll-Strickstoff. Es war nicht beabsichtigt durch den Schattivorhang eine komplette Abdunklung herzustellen. Vielmehr wurde eine leicht transparente Schattierung gewählt, um genügend Restlicht für die Kameravorschau zur Verfügung zu haben. Bei den eingangs erwähnten Kameraeinstellung resultierten ohne Einsatz der Blitze schwarze Fotos, womit bestätigt ist, dass sich das geringe Umgebungslicht, welches durch den Vorhang hindurch tritt, nicht auf die Belichtung der Fotos auswirkt.

Probenahme-Raster. Ein 8 m langer und auf ± 1 cm maßhaltiger Probenahme-Raster wurde aus käuflichen Materialien hergestellt. Das Strickleiter-artig konstruierte Netz wurde aus 17 Stück, 6 mm starken und exakt 1 m langen Carbon-Rohren (Innen-Durchmesser 4 mm) und einer 1,5 m starken Dyneema® Schnur, fixiert mit Stellringen (2 mm Innendurchmesser), gefertigt. Es maß 8 m ± 1 cm. Jede »Sprosse« des Rasters wurde auf beiden Seiten mit Hilfe eines Beschriftungsgerätes (schwarz auf gelb) mit einer Halbmeter-Bezeichnung versehen (vgl. dazu Abb. 2).

2.3 Durchführung

Antransport. In für den Einsatz im alpinen Gelände angepassten Transportbehältnissen wurde die in Summe rund 20 kg schwere Ausrüstung (inklusive diverser Ersatzmaterialien, Laptop und Kleinwerkzeug) zum Einsatzort getragen. Dabei traten keine Schwierigkeiten auf (siehe Abb. 11).

Kamera-Aufbau. Nach Aufbau und Überprüfung der Ausrüstung wurden Kalibrierungsaufnahmen angefertigt. Dazu wurde je ein ungebrauchter DIN A3 Graukarton mit darauf platziertem Farb- und Graukeil im gesamten Aufnahmebereich der Kamera (Abb. 1 b, Objektgröße) fotografiert. Farb- und Graukeil wurden – neben einem kleinen Papierblock mit der eindeutigen Nummer der Rasterzelle – jedem weiteren Bild beigelegt.

Auslegen des Probenahme-Rasters. Im Sinne einer exakten Reproduzierbarkeit war es notwendig, eine auf ± 2 cm maßhaltige, wiederfindbare Position des Probenahme-Rasters an den bestehenden Holz-Markierungen zu finden. Jede

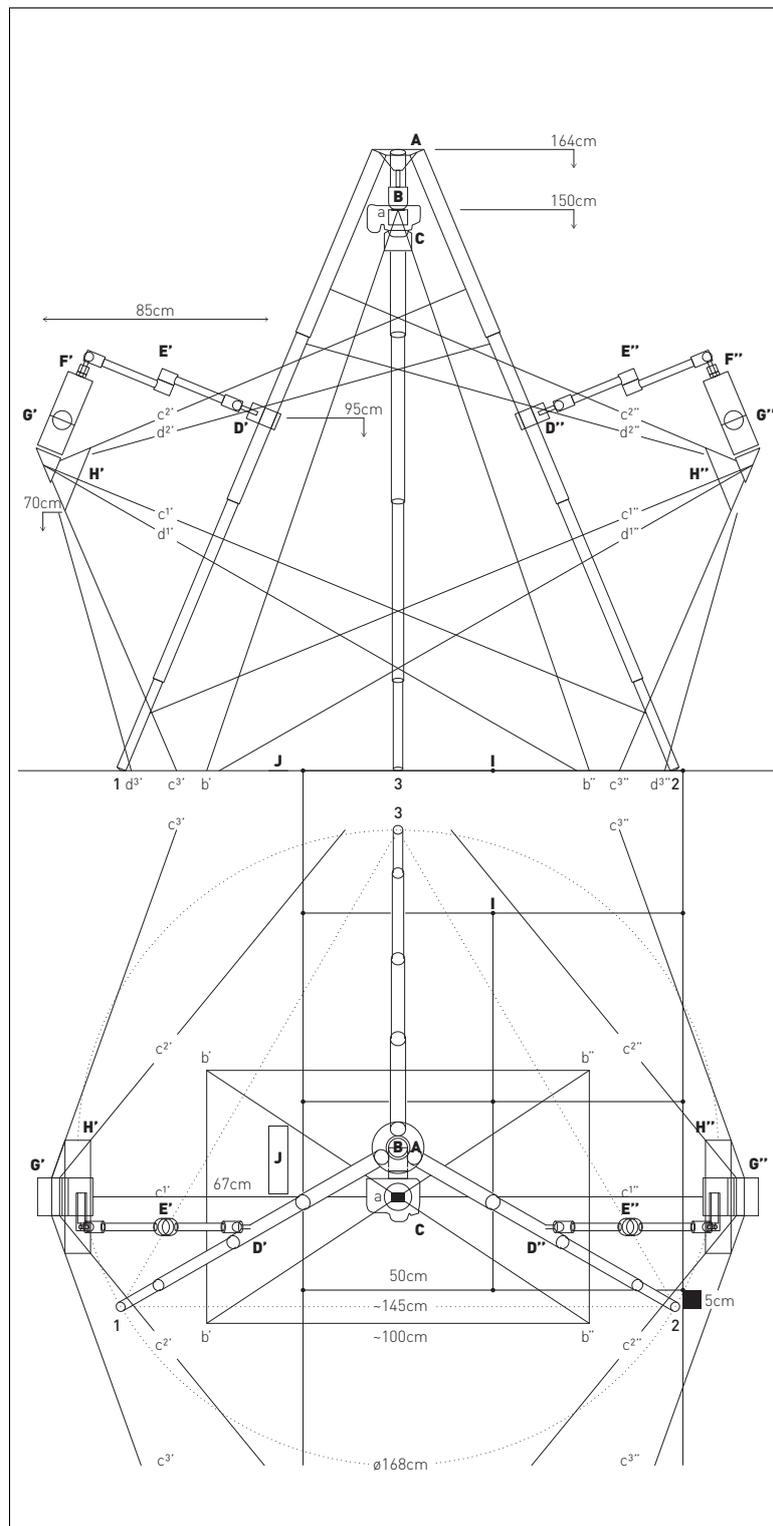


Abbildung 1: Patentzeichnung Kameraaufbau (M 1:20). **A:** Dreibein-Stativ, **B:** Stativ-Kugelkopf mit Schnellwechselplatte (vgl. Abb. 2 D), **C:** Kameragehäuse mit 50 mm Objektiv, **D:** Klemme zum Befestigen der Friktionsarme (im Grundriss nicht dargestellt), **E:** Friktionsarm (*Blitz-Arm*), **F:** Kameraschiene, **G:** Beleuchtung, **H:** Diffusor, **I:** Probeflächen-Raster (4 komplette Rasterflächen zu $0,5 \times 0,5$ m, nach oben (talwärts) und unten (bergan) verlängert), **J:** Stufen-Graukeil und Farbkarte. *a:* Sensorebene, *b:* Objektgröße, *c:* Strahlengang (¹ Mitte, ² oben, ³ unten) bei Blitz Neigung 23° (Maximum), *d:* Strahlengang Blitz bei Neigung 30° (Minimum). Der Basis-Umkreis des Dreibein-Stativs ist punktiert im Grundriss dargestellt, ebenso das umschreibende gleichseitige Dreieck. 1: linkes und 2: rechtes bergseitiges Bein, 3: Tal-Bein.

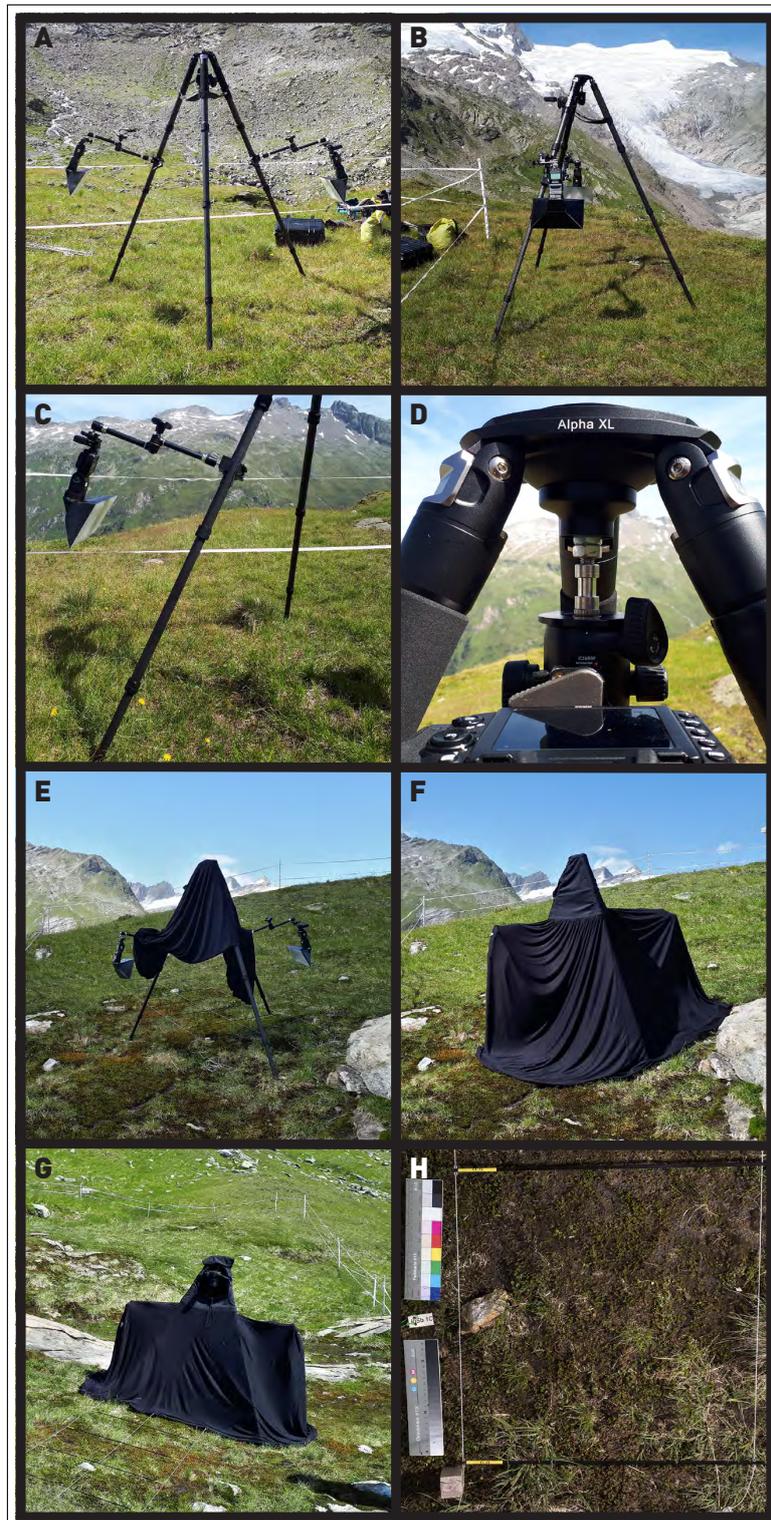


Abbildung 2: Bildtafel Kameraaufbau (zu den Richtungsangaben vgl. Abb.1). **A:** Ansicht von hinten, **B:** Ansicht von rechts, **C:** Block auf den linksseitig montierte Blitz mit Friktionsarm und Klemme am Stativ, **D:** Stativ-Kugelkopf mit Schnellwechselplatte, **E:** nach oben geschlagener Schattenvorhang auf der Fläche US5 am Quadrat 1c, **F:** wie E nur Vorhang am Boden, **G:** Blick von vorne auf F, **H:** quadratischer Ausschnitt des unverarbeiteten Originalbilds der Fläche US5B 1c. (Bilder A bis G, Stefan Pfeiffer, Salzburg)



Abbildung 3: Ausgelegtes Probenahme-Raster am Transekt IG5 von oben gesehen (vgl. Abb. 2 E bis H, dort Ansicht von unten). Unten im Bild *Carex curvula*-Windkantenrasen mit Strauchflechten und Ericaceae (Loiseleurio-Caricetum curvulae). Oben, im Hintergrund, *Polytrichum*-Schneeboden mit *Deschampsia cespitosa* und *Nardus stricta* (Polytrichetum sexangularis). Dazwischen *Carex curvula*-Rasen (Caricetum curvulae). Erkennlich sind die roten Zelt-Heringe zur Fixierung sowie der Weidezaun.

solche wurde fotografisch mit Smartphone (iPhone SE) und 10 cm Fotomaßstab dokumentiert. In Einzelfällen kamen größere, nicht vermeidbare Abweichungen vor (vgl. US1 in Abb. 4), die sich aufgrund der Notwendigkeit der Orthogonalität des ausgelegten Rasters sowie der Reproduzierbarkeit der festgelegten Lage nicht vermeiden ließen. Die Enden des Sprossengitters wurden mit dünnen Zelt-Heringen befestigt. Fallweise wurde das einseitig an den Schnüren verwindbare Gitter mit Metallstift-Heringen zusätzlich an einzelnen Geländestellen fixiert. Alle derartigen Positionen wurden dokumentiert. Der Name des diesbezüglichen Dokuments trägt den Bezeichner der betroffenen Rasterzelle(n).

Bewegen des Kamera-Aufbaus. Für jede 0,25m² große Rasterzelle musste der Kameraaufbau inklusive Schattiervorhang bewegt werden. Um die Unversehrtheit der Vegetation zu wahren, wurde ausnahmslos barfuß vorgegangen. Drei Personen waren beteiligt. Die Choreographie umfasste folgende Schritte: (1) Anheben des Vorhangs; (2) Bewegen des gesamten Aufbaus und positionieren auf ± 5 cm an einer günstigen Position des Probenahme-Rasters (vgl. 5 cm Maßstabskasten in Abb. 1.); (3) wieder ablegen des Vorhangs über den Blitz-Armen; (4) eine Person prüft unterhalb des Vorhangs freie Beleuchtung sowie unerwünschte harte Umgebungslichter; (5) eine weitere Person bedient die Sofortvorschau am Smartphone (Nikon[®]-App) per Drahtlosverbindung und (6) löst den Kamera-Vorhang aus; (7) schließlich bestätigt die Person unter dem Vorhang das korrekte Auslösen der Blitze; dann weiter mit (1) ... u.s.f. Es ist zu erwähnen, dass zum Auslösevorgang zwei Personen den flexiblen Vorhangstoff gegen Wind arretiert hielten.

Entwicklung digitale Negative. Die »RAW-Verarbeitung« geschah gemäß dem Stand der Technik (Adobe Photoshop[®] CC 2017, lizenziert an R. Kaiser). Der Weißabgleich jeder Foto-Serie (eine pro Standort) wurde an den Kalibrierungsfotos gemessen. Weitere Verfahren waren Kissen-Entzerrung durch Linsenkorrektur (Objektivtyp war unterstützt) und Schärfung des Sensorbildes auf 100%. Als Dateiformat fand von hier ab das TIF-Format Anwendung.

Rektifizierung. Weitere Schritte verwenden die GDAL-Softwarebibliothek (2.1.3, www.gdal.org). Alle anderen Arbeiten wurden in R (www.r-project.org) und mit Systemwerkzeugen (Bash-Unix shell) bewerkstelligt. Zur Ermittlung von »Boden«-Kontrollpunkten, welche für die Rektifizierung notwendig sind, wurde systematisch vorgegangen. Das Bild wurde auf 100% Auflösung

am Bildschirm angezeigt und vier Pixel-Koordinaten ermittelt - und zwar jeweils an den vier Eckpunkten der Rasterzelle, genau ($\pm 0,5$ mm) in der Mitte des Durchmessers der Carbonstäbe am Durchtrittspunkt der Schnüre. Mit Hilfe dieser Punkte wurden jeweils exakt gleich große Kachelbilder (3000×3000 Pixel = 500×500 mm) erzeugt und diesen je nach Lage eine Position im Null-Koordinatensystems des einzelnen Transekts zugeordnet ($x = 0-1000$ mm, $y = 0-8000$ mm, Ursprung unten links = 1c, vgl. Nummerierung Rasterflächen in Abb. 5). Alle Arbeitsschritte sind dokumentiert (R und Bash-Skripte).

2.4 Explorative Analyse

Erfassung von Bildkategorien. Aus einer Gesamtheit von 8200 Teil-Rasterzellen á 10×10 cm (25 pro Rasterzelle) wurden 416 (ca. 5%) zufällig ausgewählt und auf die darauf erkennbaren Bildkategorien hin untersucht (IG: $n=149$, SB: $n=110$, US: $n=157$, vgl. Abb. 10 auf Seite 23). Dazu wurde je ein ausgeschnittenes Bild, das mit einem Python-Programm erzeugt wurde, auf 200% auf einem qualitativ hochwertigem Bildschirm angezeigt (Apple iMac 27" Retina 5K Display, Auflösung von 5120×2880 Pixeln). Durch das Freistellen des Bildes wurde sichergestellt, dass nur die direkt am Bild befindliche Information ausgewertet wird. Vorkommen einer Kategorie in einem Bild wurde binär in einer Datenmatrix protokolliert. Die Größe der Stichprobe war ausreichend, um Trends im Datensatz abzuleiten. Auf den Bildern ausgewertete Bild-Kategorien mit Einteilung in Übergruppen sind in Tab. 2 dargestellt. Diese Liste enthält an den Bildern zu interpretierende Bildinhalte, eingeteilt in sieben Gruppen und weitere 41 Unterkategorien, welche überwiegend auf Artniveau (Nomenklatur nach Fischer et. 2007) oder als Sammelgruppe (z. B. Strauchflechten) angesprochen sind. Aussagekräftige und unmissverständlich an den Bildern zu interpretierende Arten-(Gruppen) oder Lebensraumstrukturen sind in der Tab. 2 markiert.

Auswertung der Bildkategorien. Die gewonnenen Bildkategorien aus der 5% Stichprobe wurden tabuliert und auf deren Häufigkeitsverteilung hin untersucht. Die multivariate Verteilung wurde mit NMDS (nonmetric multidimensional scaling, Minchin 1987, Jaccard-Distanz) überprüft. Weiters wurden graphische Trends (Verteilung entlang der Transekte) mithilfe von GAM (generalized additive models, Hastie TJ, & Tibshirani, 1990) visualisiert um Art-Optima (van der Maarel E & Franklin, 2013) zu überprüfen. Eine auf eine Lösung mit 2 Grup-

pen (Optimum vs. Pessimum) beschränkte Clusteranalyse (partitioning around medioids, Reynolds et al. 1992, Jaccard-Distanz) wurde durchgeführt. Die Validität der Cluster wurde mittels Varianzanalyse von Distanzmatrizen (analysis of variance using distance matrices, Anderson 2001, Jaccard-Distanz) geprüft.

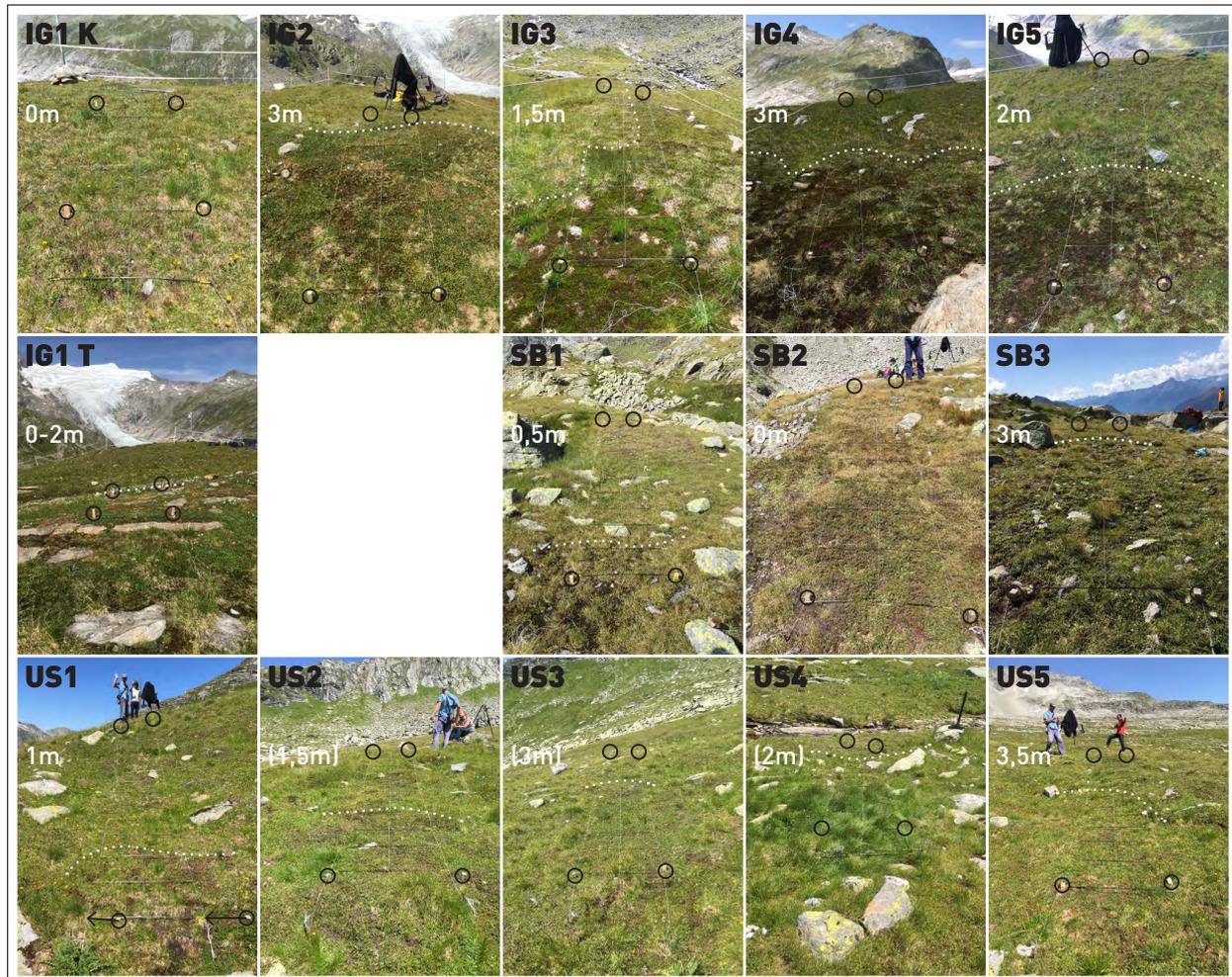


Abbildung 4: Übersichten der Transekte mit Blick hangaufwärts (Ausnahme US4 hier Blick hangabwärts). Punktierter weiße Linie: approximierter Grenze von Krummseggenrasen zu Schneeböden (oder chinophilen Krummseggenrasen US2, US3, US4). Beachte SB2 weist keine Bereiche mit Schneebodenvegetation auf. Das geteilte Transekt IG1 ist ganzheitlich den Schneeböden (IG1 T) bzw. Grasland zuzuordnen. Die Zusätze »T« und »K« bedeuten Tal und Kopf, sprich topographisch unten bzw. oben. Schwarze Kreise: Eckmarkierungen (Holzpflocke). Abweichungen sind insbesondere bei US1 (Pfeile) gegeben, da hier die Pflocke nicht ausreichend genau in Linie gesetzt wurden. Transekt US6 wurde nicht beprobt, das Panel ist leer.

Tabelle 2: Ausgewertete Bildkategorien mit Angabe der verwendeten dreistelligen Code-Bezeichnung und Auswahl (×) der geeigneten Indikatoren. Der erste Buchstabe des Kategorie-Codes verweist auf die Gruppe (vgl. Klammerausdruck der fetten Zwischenüberschriften). †: Die Gruppe enthält die Arten *Agrostis rupestris*, *Nardus stricta*, *Oreochloa disticha* sowie (selten) Kümmerexemplare von *C. curvula* und *F. picturata*, die nicht zweifelsfrei zu attributieren waren. ‡: Morphospezies.

Code	Kategorie
Steine (r)	
rcr	× Steine mit Kryptogamen
ruv	Steine ohne Bewuchs
Erde (s)	
sbs	× unbewachsene Erde
sdc	abgestorbene terrestrische Kryptogamen
Flechten (l)	
lcl	terrestrische Krustenflechten (z. B. <i>Dibaeis baeomyces</i>)
lci	<i>Cetraria islandica</i> (inkl. <i>C. ericetorum</i>)
lfl	terrestrische Strauchflechten (z. B. <i>Cladonia</i> sp.)
lsc	× <i>Solorina crocea</i>
lth	terrestrische thallose Flechten (z. B. <i>Peltigera</i> sp.)
Moose (b)	
bps	× <i>Polytrichum</i> sp. (<i>P. sexangulare</i> , <i>P. juniperinum</i>)
bbr	Laubmoose
blw	Lebermoose
Gräser, Seggen und Simsen (g)	
gaa	<i>Anthoxanthum alpinum</i>
gav	<i>Avenula versicolor</i>
gcc	× <i>Carex curvula</i>
gcs	<i>Carex</i> sp. (<i>C. nigra</i> , <i>C. atrata</i> , <i>C. sempervirens</i>)
gdc	× <i>Deschampsia cespitosa</i>
gfp	<i>Festuca picturata</i>
gla	× <i>Luzula alpino-pilosa</i>
gnl	schmalblättrige, kleine Süßgräser (Poaceae) †
Kräuter (h)	
hca	kleine Caryophyllaceae
hha	<i>Homogyne alpina</i>
hem	× <i>Euphrasia minima</i>
hgm	× <i>Geum montanum</i>
hgs	× <i>Gnaphalium supinum</i>
hla	× <i>Leucanthemopsis alpina</i>
hli	<i>Ligusticum</i> »s.lat« ‡ (<i>Mutellina adonidifolia</i> , <i>Pachypleurum mutellinoides</i>)
hpa	× <i>Potentilla aurea</i>
hpu	<i>Pulsatilla alpina</i> spp. <i>austriaca</i>
hph	<i>Phyteuma hemisphaericum</i>
hpg	× <i>Primula glutinosa</i>
hpm	× <i>Primula minima</i>
hse	<i>Sedum</i> sp.
hsh	× <i>Scorzoneroides helvetica</i>
hsp	× <i>Soldanella pusilla</i> ssp. <i>alpicola</i>
Zwergsträucher (d)	
dem	<i>Empetrum</i> sp. (<i>E. hermaphroditum</i> , <i>E. nigrum</i>)
dkp	× <i>Loiseleuria procumbens</i>
dsh	× <i>Salix herbacea</i>
dvg	× <i>Vaccinium gaultheroides</i>
dvm	<i>Vaccinium myrtillus</i>
dvv	<i>Vaccinium vitis-idea</i>

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswahl von Standorten mit ausreichend großen und für die Untersuchung verschiedener Organismengruppen geeigneten Schneeböden ist mit einigen Schwierigkeiten behaftet. Zum Einen kommen derartige Biotope naturgemäß im Hochgebirge zu liegen, sodass ein »vertretbarer« Anstieg einen wichtigen Aspekt darstellt, da sich physisch herausfordernde Anstiege nachteilig auf die Qualität der Geländeergebnisse auswirken (vgl. Burg et al. 2015). Andererseits sind die Anforderungen an biotische Faktoren wie Bodentiefe etc. derart umfangreich, dass wohl kaum ein Standort von sämtlichen Bearbeitern der verschiedenen Module als Optimal bezeichnet werden wird.

Die nachfolgende Methodenkritik erfolgt vom Standpunkt des vegetationsökologischen Monitorings und in dem Wissen, dass unsere als ideal zu bezeichnenden Vorstellungen für andere Bearbeiter nicht ausschlaggebend sind.

3.1 Generelle Machbarkeit

Zu- und Abstieg. In Anbetracht der zeitaufwändigen Arbeit vor Ort, sollte aus unserer Sicht die Wegzeit zur Fläche im optimalen Fall unter zwei Stunden (3,5 bis 4 Stunden für Auf- und Abstieg) gehalten werden. Von weiteren Wegstrecken sollte prinzipiell Abstand genommen werden, da der Arbeitsaufwand selbst an einem langen Sommertag sonst schwer zu bewerkstelligen ist. Der entlegene und die meisten Transekte beherbergende Standort Untersulzbachtal ist in dieser Hinsicht als bedingt geeignet zu beurteilen. Die betreffenden Arbeiten konnten an einem 15-stündigen Arbeitstag nur unter Zeitdruck bewältigt werden, wodurch sich die Fehleranfälligkeit nachweislich erhöht. Der Ausgangspunkt am Talboden konnte erst wieder in der Abenddämmerung erreicht werden; ein für das Hochgebirge empfehlenswerter Zeitpolster stand nicht zur Verfügung. Eines der sechs Transekte konnte 2017 noch nicht beprobt werden, da dafür keine Zeit mehr verblieb.

Markierung der Transekte. Während die drei Standorte dank der übermittelten Koordinaten und Kartenausschnitte problemlos aufzufinden waren, erwies sich die erste Nachsuche nach den einzelnen Transekten zum Teil durchaus schwierig. Dies vor allem am Standort Untersulzbachtal, wo die Transekte auf weitläufigem Gelände mit ausgeprägtem Mesorelief zu liegen kommen. Im Sin-

ne eines erleichterten Auffindens empfehlen wir für die Zukunft die Installation von weithin sichtbaren und beschrifteten Ortsmarkierungen für jedes Transekt. Weiters würde eine präzise Verortung ($\pm 2\text{m}$) sowie ein maßhaltiger Plan das Auffinden maßgeblich erleichtern.

Das fotografische Monitoring erfordert eine möglichst präzise Vermarkung sämtlicher Transekte, da nur dadurch eine exakte Wieder-Positionierung des Probenahme-Rasters - und folglich der $50 \times 50\text{ cm}$ Rasterzellen - gewährleistet werden kann. Allfällige Ungenauigkeiten haben eine Reduzierung der redundant zu fotografierenden Bodenoberfläche zur Folge, welche sich in einer Verkleinerung der zu vergleichenden Bildausschnitte äußert und zusätzliche Arbeitsschritte notwendig macht. Die im Vorfeld der Untersuchung vermarkten Transekte sind für Untersuchungen im Dezimeter-Maßstab geeignet. Für unsere Zwecke wäre jedoch eine höhere Präzision der Strecken und Winkel förderlich. Für künftige Vermarkungen empfehlen wir die Verwendung eines Probenahme-Rasters wie dem Unseren, an dessen Eckpunkten die Markierungspunkte exakt gesetzt werden können. Sollten Steine oder seichtgründiger Boden ein Einschlagen von Markierungen (Vermessungsmarken mit Vermarkungsrohr, Fa. Goecke, www.goecke.de) unterbinden, kann das Rechteck beliebig verschoben werden, oder ein Bohranker gesetzt werden. Durch Anhalten eines rechten Winkels ist neben präzisen Entfernungen auch ein Höchstmaß an Orthogonalität gewährleistet.

Statistische Anforderungen. Der Stichprobenplan ist durch die Verwendung unterschiedlicher Transekt-Längen und Anzahlen pro Standort (vgl. Abb. 5) als nicht ausgewogen zu bezeichnen, was statistische Nachteile für Vergleiche zwischen den Transekten mit sich bringt (Legendre & Legendre 2012). Durch die subjektive Auswahl der Transekte ergeben sich gewisse Bedenken in Bezug zur generellen Validität der Ergebnisse. Diese sind für Zeitvergleiche jedoch nicht ausschlaggebend.

3.2 Eignung der Probeflächen

Auswahl der Standorte aus vegetationsökologischer Sicht. Wie einleitend beschrieben, ist die von H. Wittmann (Haus der Natur) ersonnene Methodik auf eine Anwendung in »einfachen Systemen« ausgelegt. Im Laufe der Arbeiten stellte sich heraus, dass die vorliegenden Standorte nur verhältnismäßig geringe An-

teile an artenarmen Schneeböden im engeren Sinne beherbergen, welche die Anforderung eines einfachen Systems erfüllen. Ein Großteil der Stichprobeneinheiten (Transekte) wird mehrheitlich von chionophilen (Schneeschutz-bedürftigen) Krummseggenrasen eingenommen, die zwar zu den Schneeböden vermitteln, aber durchaus artenreiche und somit komplexe Systeme darstellen, in denen auch inter- und intraspezifische Konkurrenz eine wesentliche Rolle spielen dürfte. Klassische, an Kryptogamen (Moosen und Flechten) reiche Schneeböden sind lediglich am Standort Innergschloß in größerem Maßstab anzutreffen. Diese als einfache Systeme anzusprechenden Schneeböden wurden jedoch nur zu geringen Anteilen in die Transektflächen implementiert. Die beiden anderen Standorte weisen vergleichsweise kleinflächig entwickelte Schneeböden i.e.S. auf, sodass ein überwiegender Anteil der Transekte auf Krummseggenrasen entfällt.

Die fotografische Auswertung des Bildmaterials ist auch in diesen artenreicheren und daher komplexeren Systemen möglich, allerdings sind allfällig dokumentierte Änderungen erschwert zu interpretieren und kaum auf einen konkreten Vektor (Wirkungsfaktor) zurückzuführen. Vom Standpunkt des vegetationsökologischen Monitorings ist die Auswahl der Standorte Seebachtal und Untersulzbachtal daher als suboptimal zu bezeichnen. Falls weitere Transekte für das Projekt ausgewählt werden, so sollte zu deren Auswahl ein Vegetationsfachmann beigezogen werden.

3.3 Eignung und Grenzen der Methodik

Bei der Durchführung der Erstbefundung traten in der Regel keine Probleme auf. Lediglich am ersten Transekt am Standort Untersulzbachtal (US1) erwies sich die Steilheit des Geländes als erschwerender Faktor. Um ein Kippen des Kamera-Stativs zu verhindern, musste dieses permanent von einer Person fixiert werden. Da Schneeböden naturgemäß an ebene bis wenig geneigte Schneeakkumulationslagen gebunden sind, wird für die Auswahl von Transekten ein maximaler Neigungswinkels von etwa 20 Grad empfohlen. Wie im Folgenden gezeigt wird, kann ein Beleg für die generelle Eignung der Methodik in Form einer exemplarischen Auswertung erbracht werden.

3.4 Exemplarische explorative Analyse des ersten Befundes

Die folgenden Ausführungen gründen alleinig auf den angefertigten Fotos die am Bildschirm ausgewertet wurden. Eine Ansprache von Pflanzengesellschaften und von typischen Arten war ohne Schwierigkeiten möglich.

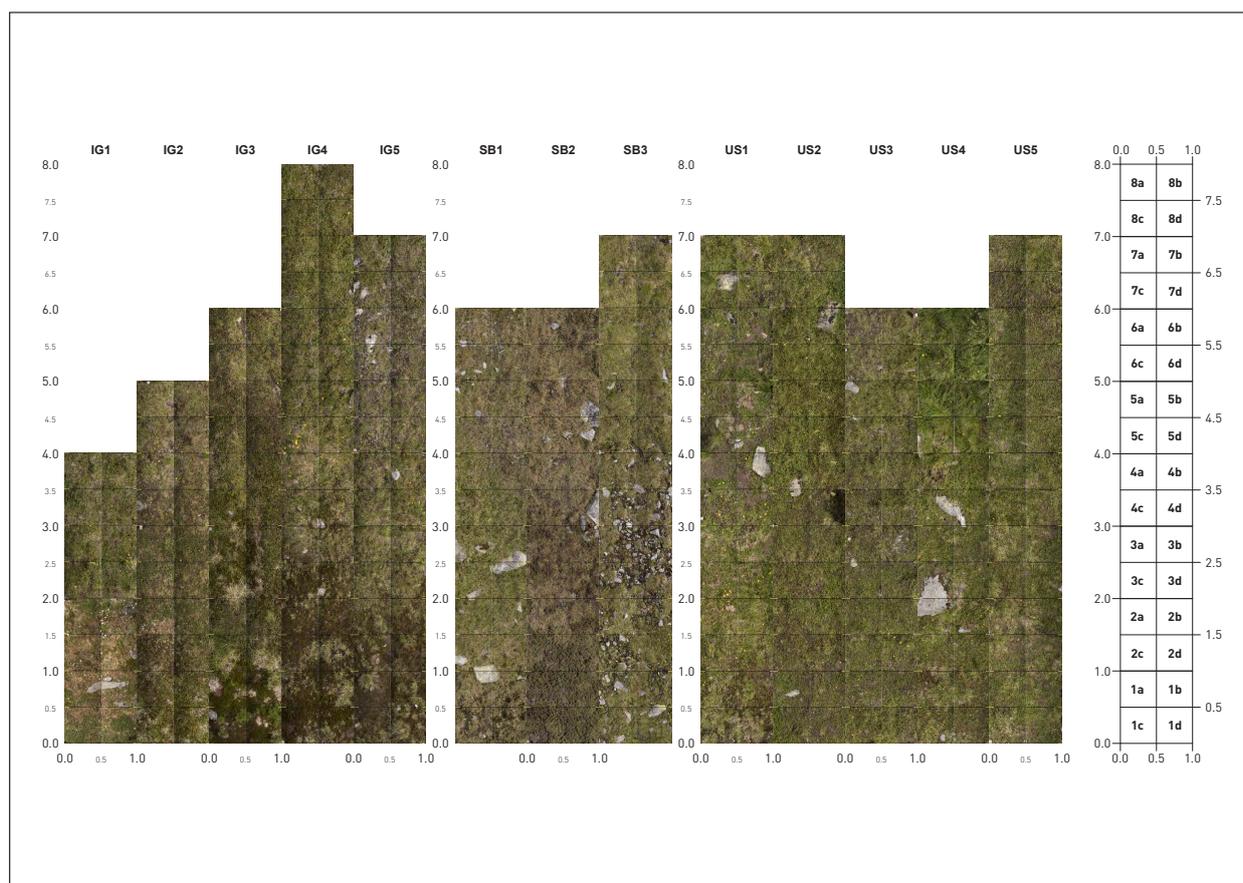


Abbildung 5: Bildmosaik aller Einzelbilder sowie eindeutige Nummerierung der $0,5 \times 0,5$ m Rasterflächen.

Beschreibung und Synthese der Vegetation. Eine bildliche Dokumentation der beprobten Transekte ist in Abb. 4 dargestellt. Eine Übersicht der verarbeiteten Bilder gibt die Abb. 5. Die festgestellten Frequenzen der ausgewerteten Bildkategorien ist der Abb. 6 zu entnehmen. Im Durchschnitt wurden 5 Arten (Bildkategorien) in einem Teil-Rasterfeld gezählt (Minimum 1 und Maximum 10). Pro Transekt summiert sich dieser Wert auf 20 verschiedene Arten bzw. Bildkategorien (Min. 16 und Max. 23).

An Pflanzengesellschaften (sensu Grabherr 2003) wurde in Summe die folgende – von windgefügten Krummseggenrasen bis zu typisch ausgeprägten Schneeböden reichende – Katena festgestellt: (1) *Loiseleurio-Caricetum curvulae* > (2) *Caricetum curvulae* > (3) *Hygrocarietum curvulae* > (4) *Salicetum herbaceae* > (5) *Polytrichetum sexangularis*. Typische Lebermoos-Schneeböden (*Cardamino alpinae-Anthelietum jaratzkanae*) wurden nicht belegt. In dieser Hinsicht sind Vorkommen von *Solorina crocea* noch dem *Polytrichetum sexangularis* zuzuordnen (häufig nur bei IG1, kleinflächig noch in IG2 und fragmentarisch bei

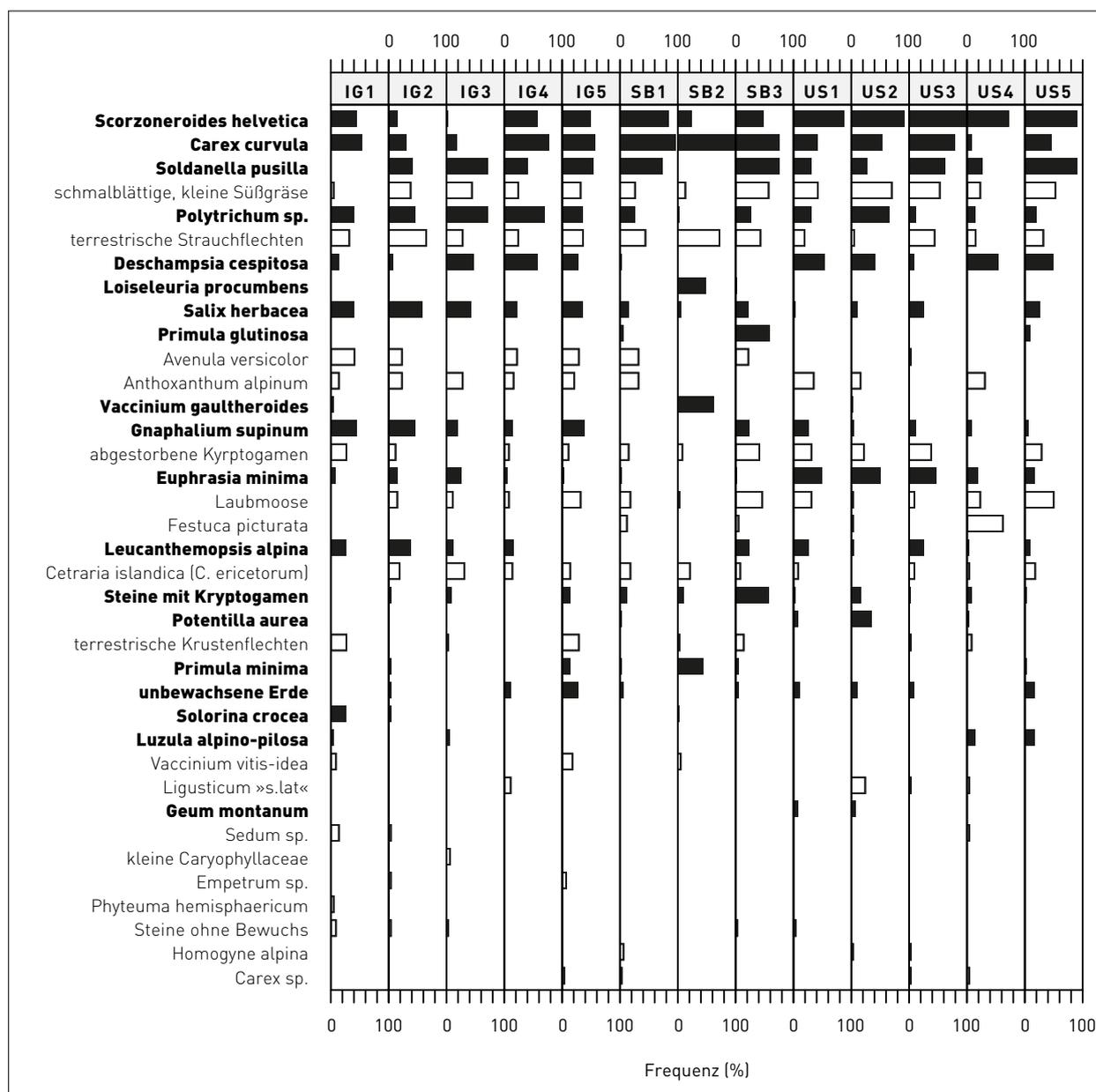


Abbildung 6: Graphische Häufigkeits-Tabelle der Bildkategorien mit Kennzeichnung (fett) von ausgewählten Arten (vgl. Tab. 2).

SB2). An alpinen Hochgraswiesen wurde punktuell das Festucetum picturata am Standort Untersulzbachtal (US4) dokumentiert.¹ Insgesamt ist der Großteil der Vegetation den chionophilen (Schneeschutz-bedürftigen) Krummseggenrasen (3) anzuschließen. Nur am Standort Innergschlöß kommen gut entwickelte Kraut-Weidenspalier (4) und Moos-Schneeböden vor (5). Die höhenzonalen Sauerrasen - Krummseggenrasen (2) - sind allorts und repräsentativ ent-

¹F. picturata war auch am Standort SB vorhanden, jedoch nicht bestandsbildend.

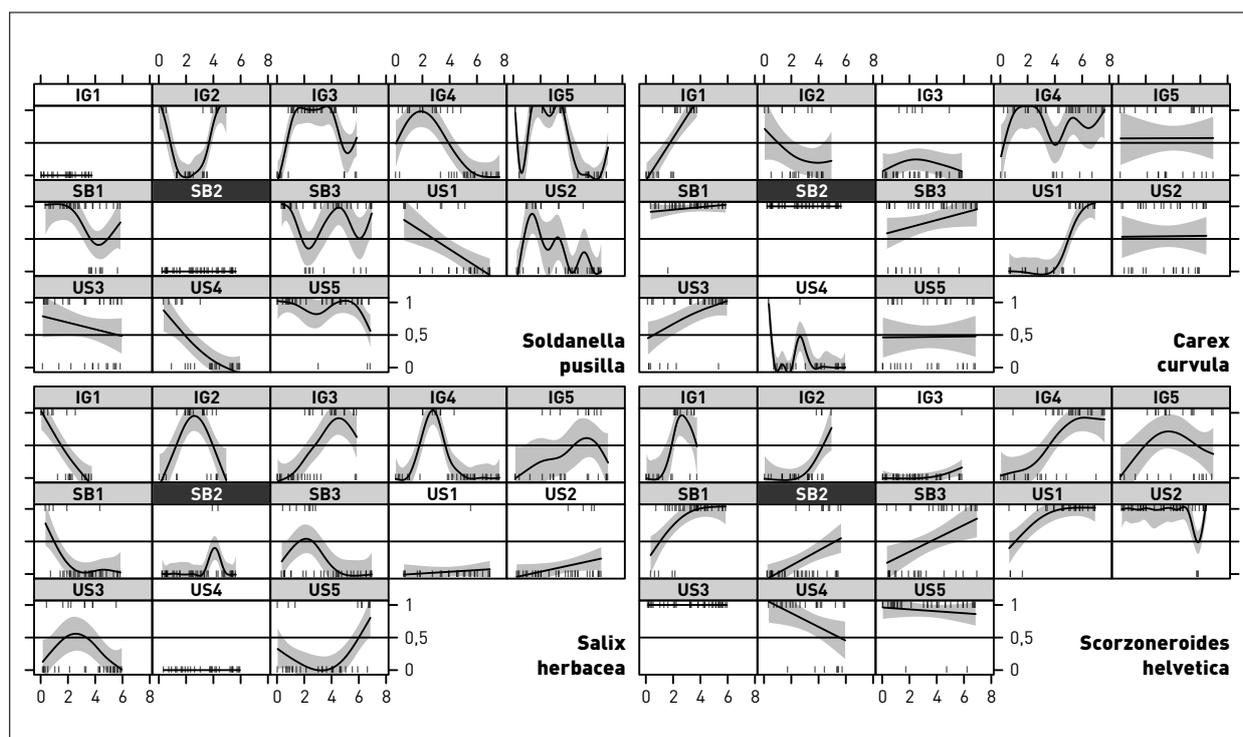


Abbildung 7: Präferenz-Muster für die häufigsten 4 Pflanzen-Arten entlang der Transekte von bis zu 8 m Länge (putative Produktivitäts-Gradienten). Graue Bänder sind Konfidenzintervalle der angepassten Kurven (GAM). Anteile der Kurve über der horizontalen Linie je Panel weisen auf ein modelliertes, wahrscheinliches Auftreten einer Art pro Transekt (jeweils in Grau hervorgehoben) und solche unter der Linie auf eine modellierte Absenz der Art hin. Kurze vertikale Linien markieren eine nachgewiesene Präsenz (oben) bzw. Absenz (unten) der Art in einem Teil-Rasterfeld. Schneeboden-Bedingungen können aus der Verteilung von *Salix herbacea* abgeleitet werden. *Carex curvula* kennzeichnet Grasland. *Soldanella pusilla* unterstreicht eindeutig die allgemein schneereiche Lage der Transekte. Die Besonderheit des Transekts SB2 ist hervorgehoben (2 Arten fehlen). *Soldanella pusilla* meidet den eher extremen Schneeboden der Fläche IG1 (vgl. Abb. 9). Jede Art fehlt an 2 oder 3 Transekten.

wickelt. Etwas windgefegte Geländestellen nehmen lokal Windkantenrasen mit Krummsegge (1) ein. Flächig sind diese am Transekt SB2 ausgebildet, womit sich dieses deutlich von den restlichen Probeflächen unterscheidet (vgl. Abb. 7 sowie auch Bildfarbe in Abb. 4).

Die Flächen mit Moos-Schneeböden (IG2, IG3 und zur Hälfte IG1, vgl. Abb. 7) enthalten nur geringe Frequenzen von *Scorzoneroides helvetica* und *Carex curvula*; des Weiteren aber abundant *Gnaphalium supinum* und in kleinen Teilbereichen auch *Solorina crocea*. Größere Abschnitte dieser Transekte können deshalb als typische Schneeböden angesprochen werden.

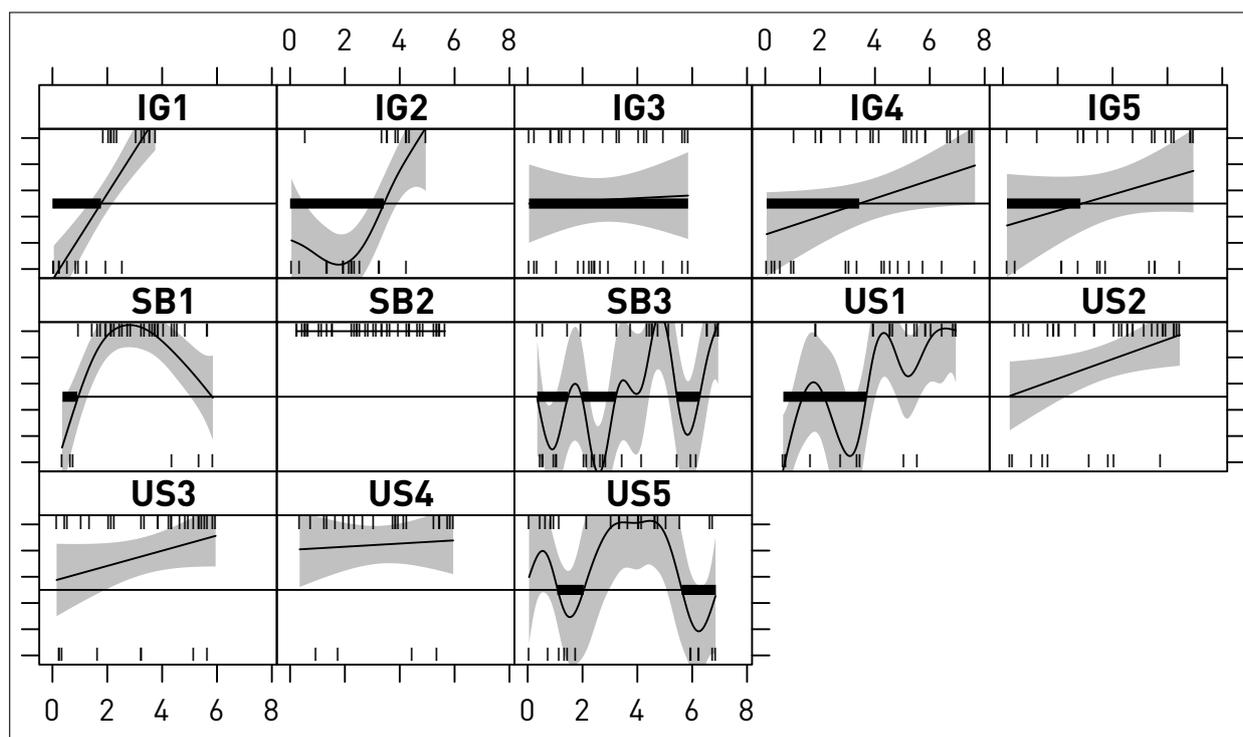


Abbildung 8: Verteilung der Cluster analog Abb. 7. Abschnitte am Transekt die den Schneeböden zuzuordnen sind mit dicker Linie gekennzeichnet. Der Erwartung entsprechend finden sich die Abschnitte mit Schneeböden links (zu Beginn des Transekts) und somit in der Regel in der konkaven Hangsituation des Pessimium; aber teils auch fleckig und dispers (z. B. SB3 und US5).

Von kleinen Dikotylen (*Scorzoneroides helvetica*, *Soldanella pusilla* und *Primula glutinosa*) bestimmte chinophile Krummseggenrasen prägen den Standort Untersulzbachtal (US1 bis US5) und mit einem Beispiel auch den Standort Seebachtal (SB3). Eine gute Abschätzung der länger schneebedeckten Abschnitte kann näherungsweise aus der Verteilung von *Salix herbacea* abgeleitet werden, ein fehlender Schneeschutz durch das Auftreten von *Loiseleuria procumbens* und *Vaccinium gaultherioides* (SB2).

Das Muster von *Carex curvula* charakterisiert die Dominanz der alpinen Rasen allgemein sehr gut. Als eine der drei häufigsten Arten ist *Soldanella pusilla* stets auch in Lücken von Krummseggenrasen etabliert. Diese Art eignet sich zur Charakterisierung der schneereicheren Ausbildungen der Krummseggenrasen (»Caricetum curvulae i.w.S.«).

Zur allgemeinen Vereinfachung lassen sich die eingangs dargelegten fünf Vegetationstypen gruppieren: 1,2 und 3 können als Krummseggenrasen »Caricetum curvulae i.w.S.« (Verband Caricion curvulae, *Optimum*) und der Rest (4, 5)

als Schneeboden »Salicetum herbaceae i.w.S.« (Verband Salicion herbaceae, *Pessimum*) angesprochen werden, womit eine basale Zweiteilung und Simplifizierung der Vegetationsstrukturen möglich wird. Eine Einteilung die ferner durch eine Clusteranalyse bestätigt wurde (P -Wert mit 999 Permutationen < 0.001). Dem nicht widersprechend weisen die drei Standorte zueinander größere Unterschiede auf. Eine auf die zwei basalen Vegetationstypen bezogene multivariate Betrachtung unter Verwendung aller Bildkategorien (Arten, vgl. Tab. 2) ist in Abb. 8 gegeben. Diese Analyse legt nahe, dass an den Transekten US2 bis US4 im Prinzip keine klassischen Schneeböden vorliegen. Ferner, dass Schneeböden nicht immer lehrbuchmäßig – sprich graduell – entlang der Transektlinie verteilt sind (SB3 und US5). Daraus lässt sich die Existenz mehrerer interner Grenzlinien ableiten.

Die räumliche Verteilung der Cluster koinzidiert weiters vielfach mit den Linien in Abb. 4. Darüber hinaus wird die durchaus komplexe Struktur der Vegetation belegt. Die modellierten Abschnitte die als Schneeboden (»Salicetum herbaceae i.w.S.«) zu bezeichnen sind, entsprechen weitgehend dem Geländebefund, womit die Sensitivität der Daten erhärtet wird.

Generelle Validierung der Methode. Alleinig die Auswertung der Bildkategorien auf 5% der fotografierten Fläche ermöglichte den oben getroffenen Befund. Wie die Häufigkeitsverteilung der Arten (Bildkategorien, 6) zeigt, lassen sich hierbei bereits grundlegende und aussagekräftige Muster nachweisen. Gleichfalls aufschlussreich ist die Verteilung der Arten entlang der Transekte (Abb. Abb. 7). Abschließend lässt sich die eingangs gestellte Hypothese zur Existenz von (steilen) ökologische Gradienten, gemessen am Artenwandel (»species turnover«) an den Transekten, als zutreffend beurteilen.

Aspekte der Bildverarbeitung und Kategorisierung. Die Bildqualität kann als sehr gut bezeichnet werden, womit nun für viele weitere Schritte wertvolle Roh-Daten vorliegen. Die einzelnen Kacheln (Rasterzellen) messen 3000×3000 Pixel (Pixelgröße 0,1666667 mm), wodurch wichtige Details stets gut erkennbar sind. Die Schärfe am Boden ist auf den Bildern als sehr gut zu bezeichnen. Einzelne Aufnahmen enthalten *Festuca picturata* mit bis 30 cm langen Blütenständen (US4); diese liegen außerhalb des Focusbereichs. Die Passgenauigkeit des Kontaktbereiches zweier Rasterbilder beträgt – gemessen an der Meterbeschriftung nach Entzerrung und Rektifizierung – maximal ± 5 mm. Wie zu erwarten, weisen die sehr niederwüchsigen (»zweidimensionalen«) Schneeböden (besonders

die Moos-Schneeböden) die meisten eindeutig interpretierbaren Details auf. Die vertikal strukturierten Grasländer sind ärmer an erkennbaren Details. Eine Reihe an Organismen kann sehr gut auf Art-Niveau angesprochen werden (vgl. Tab. 2). Für eine signifikante Anzahl an Arten könnten Populationszahlen und räumliche Verteilungsmuster ermittelt werden; es sind dies: *Euphrasia minima*, *Gnaphalium supinum*, *Primula glutinosa*, *P. minima*, *Salix herbacea* und *Soldanella pusilla*.

In der nicht auflösbaren Kategorie »schmalblättrige, kleine Süßgräser« sind überwiegend Pflanzen von *Nardus stricta* inkludiert, einer Art die den gesamten abgebildeten ökologischen Raum besiedeln kann. Es ist dies auch die viert häufigste Bildkategorie. Eine Unterscheidung von *Polytrichum sexangulare* und *P. juniperinum* war bis jetzt nicht möglich und ist vermutlich schlecht reproduzierbar. Dies ist nachteilig, da *P. sexangulare* eine wichtige diagnostische Rolle unter den Kryptogamen innehält. Dennoch zeichnen sich flächige Vorkommen dieses Moosvereins spektral sehr gut auf den Bildern ab.

Fazit. Die Untersuchungsflächen weisen eine Vielzahl an interessanten Vegetationsstrukturen auf verschiedenen Skalen auf, welche es möglich machen, Ökosystemveränderungen zu detektieren. In der Menge sind zu wesentlichen Teilen höhenzonale Sauerrasen (Optimum, »Caricetum curvulae i.w.S.«) vertreten. Schneeböden (Pessimum, »Salicetum herbaceae i.w.S.«) sind nur an einem Standort (Innerschlöß) typisch ausgebildet. Die entwickelte Methode lässt letztlich eine sehr gute Reproduzierbarkeit erwarten.

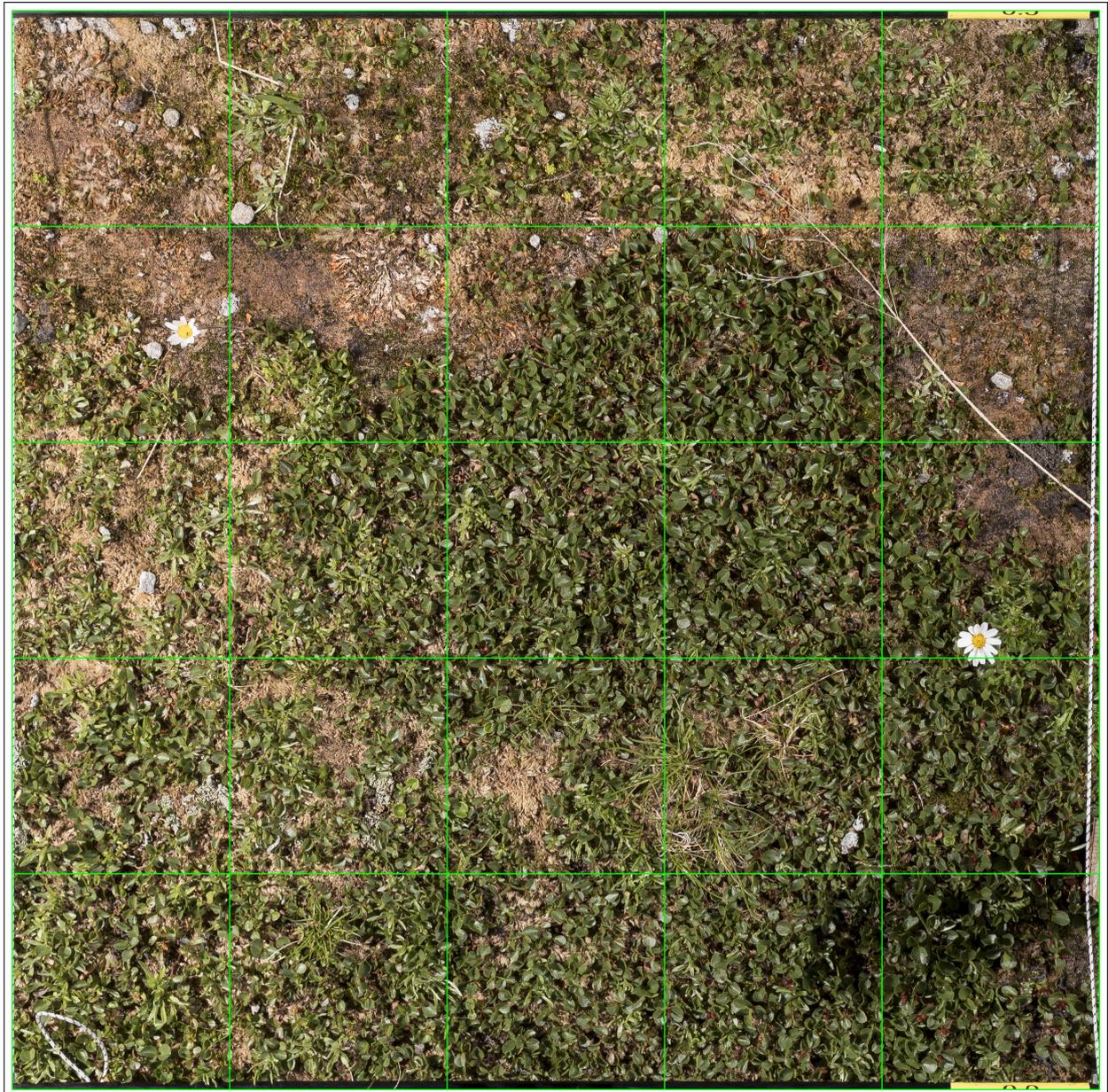


Abbildung 9: Beispiel eines rektifizierten Bildes von 50 cm Kantenlänge der Rasterfläche IG1 1b. Die grünen Linien teilen das Bild in 25 Teil-Rasterzellen á 10×10 cm (vgl. Abb. 10). Zu erkennen ist beispielsweise Kraut-Weide (*Salix herbacea*), Zwerg-Ruhrkraut (*Gnaphalium supinum*) und Kryptogamen-Synusien mit Safran-Flechte (*Solorina crocea*) oder solche an Gesteinsflächen.



Abbildung 10: Beispiel einer Teil-Rasterzelle von 10 cm Kantenlänge aus der Abb. 9 (dritte Reihe, vierte Spalte). Deutlich sind die einzelnen Blättchen der Kraut-Weide (*Salix herbacea*) und die Rosetten von Zwerg-Ruhrkraut (*Gnaphalium supinum*) zu identifizieren. Rechts neben dem Maßstabsbalken zeichnen sich die orangen Thallusunterseiten der Safran-Flechte (*Solorina crocea*) ab.



Abbildung 11: Antransport der Ausrüstung (Bild Stefan Pfeiffer, Salzburg).

Danksagung

Wir danken Helmut Wittmann und Robert Lindner (beide Haus der Natur) für wertvolle Anmerkungen zum Manuskript. Für die Unterstützung bei den Geländearbeiten in jeglicher Form ist dem Nationalpark Hohe Tauern mit deren Landesstellen großer Dank auszusprechen. Für die übersichtliche Organisation ist Elisabeth Hainzer zu danken. Sebastian Reutterer und Stefan Brameshuber unterstützen die Arbeiten wesentlich durch Überlassung von Kameraausrüstung, die Firma Windner Costüme durch Anfertigung des Schattivorhanges. Joachim Brocks lieferte wertvolle Beiträge zur Frühplanung der Fototechnik. Bei der Detailplanung und der technischen Umsetzung vor Ort war Stefan Pfeiffer maßgeblich beteiligt. Den genannten Personen gilt unser herzlichster Dank!

Literatur

- Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26: 32–46.
- Burg, S and Rixen, C and Stöckli, V and S Wipf (2015). Observation bias and its causes in botanical surveys on high-alpine summits. *Journal of Vegetation Science*, 26:191–200.
- Fischer, M. A., Oswald, K. & W. Adler (2008). *Exkursionsflora für österreich, Liechtenstein und Südtirol*. 3. Auflage. Biologiezentrum der Oberösterreichischen Landesmuseen.
- Hastie TJ, & Tibshirani, RJ (1990). *Generalized Additive Models*. Chapman and Hall.
- Grabherr, G. (ed.) (1993). *Die Pflanzengesellschaften Österreichs, Teil 2: Natürliche waldfreie Vegetation*. Fischer.
- Legendre, P & Legendre L (2012). Numerical ecology. *Developments in environmental modelling*, 24:1–990.
- van der Maarel E. & Franklin J. (eds) (2013). *Vegetation ecology*. Wiley-Blackwell.
- Minchin, P.R. (1987): An evaluation of relative robustness of techniques for ecological ordinations. *Vegetatio* 69, 89–107.
- Matteodo, M., Ammann, K., Verrecchia, E.P. & P. Vittoz (2016). Snowbeds are more affected than other subalpine-alpine plant communities by climate change in the Swiss Alps. *Ecology and Evolution*, 6:6969–6982.
- Lord, J.M., Alan F.M., Humar-Maegli T., Halloy S.R.P., Bannister P., Knight A., & Dickinson K.J.M. (2017). Slow community responses but rapid species responses 14 years after alpine turf transplantation among snow cover zones, south-central New Zealand. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, in Druck: doi.org/10.1016/j.ppees.2017.07.004
- Morrison, L.W. (2016). Observer error in vegetation surveys: a review. *Journal of Plant Ecology*: 367–379.
- Reynolds, A., Richards, G., de la Iglesia, B. & V. Rayward-Smith (1992). Clustering rules: A comparison of partitioning and hierarchical clustering algorithms. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 5, 475–504.