

## Langfristige Ökosystembeobachtung - Endbericht Modul 02: Botanisch/Vegetationskundliche Analysen

Mit Unterstützung von Bund und Europäischer Union

**Impressum**

Für den Inhalt verantwortlich:

Thomas Eberl, Roland Kaiser

Nationalparkrat Hohe Tauern, Kirchplatz 2, 9971 Matrei i.O.

Projektleitung: Thomas Eberl, Roland Kaiser & Helmut Wittmann

Fotos: © Thomas Eberl, Roland Kaiser

Titelbild: Ansicht des am steilsten geneigten Transekts UN1 am Standort Untersulzbachtal

Zitiervorschlag: Eberl, T & Kaiser, R (2019): Interdisziplinäres, integratives Monitoring- und Forschungsprogramm zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern 2016-2019. - Modul 02: Botanisch/Vegetationskundliche Analysen. Endbericht.

Unveröffentlichter wissenschaftlicher Bericht im Auftrag des Nationalparks Hohe Tauern .

[http://www.parcns.at/npht/mmd\\_fullentry.php?docu\\_id=38610](http://www.parcns.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=38610)

Feldkirchen bei Mattighofen, 21. Mai 2019

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

Endbericht (2019) Modul 02:  
Botanisch/Vegetationskundliche Analysen

Thomas Eberl & Roland Kaiser

21. Mai 2019



Mit Unterstützung von Bund und Europäischer Union

 Bundesministerium  
Nachhaltigkeit und  
Tourismus

  
**LE 14-20**  
Entwicklung für den Ländlichen Raum

Europäischer  
Landwirtschaftsfonds für  
die Entwicklung des  
ländlichen Raums:  
Hier investiert Europa in  
die ländlichen Gebiete.



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| a. Ausgangssituation und Fragestellung                         | 1         |
| b. Zielsetzung   | 1         |
| <b>2. Material und Methoden</b>                                | <b>2</b>  |
| a. Probenahmedesign der Gesamtstudie mit Begriffserläuterungen | 2         |
| i. Grundlegendes   | 2         |
| ii. Skalen und Zufallsunterauswahl                             | 2         |
| iii. Zeitlicher Aspekt   | 3         |
| b. Verwendete Ausrüstung                                       | 3         |
| i. Kamera- und Stativ-Konstruktion                             | 3         |
| ii. Probenahme-Raster  | 4         |
| c. Geländearbeit und Nachbereitung der Rohdaten                | 4         |
| i. Erhebungszeitpunkte   | 4         |
| ii. Antransport  | 4         |
| iii. Kamera-Aufbau   | 4         |
| iv. Auslegen des Probenahme-Rasters                            | 5         |
| v. Bewegen des Kamera-Aufbaus                                  | 5         |
| vi. Entwicklung der digitalen Negative                         | 6         |
| vii. Rektifizierung  | 6         |
| d. Auswertung von Bildkategorien                               | 6         |
| i. Erfassung und Definition von Bildkategorien                 | 6         |
| ii. Auswertung der Bildkategorien                              | 7         |
| e. Erfassung von Grenzlinien                                   | 7         |
| i. Abgegrenzte Strukturen                                      | 7         |
| ii. Topologische Regeln der Geometrien                         | 8         |
| f. Auswertung auf Populationsebene                             | 8         |
| i. Erfasste Arten  | 8         |
| ii. Digitalisierung und Auswertung                             | 9         |
| g. Quantifizierung der Passgenauigkeit zweier Bildserien       | 9         |
| i. Digitalisierung und Auswertung                              | 9         |
| <b>3. Ergebnisse und Diskussion</b>                            | <b>10</b> |
| a. Informationsgehalt von Bildkategorien                       | 10        |
| i. Befund  | 10        |
| ii. Generelle Validierung der Methode                          | 11        |
| iii. Fazit   | 11        |
| b. Grenzlinien   | 12        |
| i. Befund  | 12        |
| ii. Generelle Validierung der Methode                          | 12        |
| iii. Fazit   | 12        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| c.        | Auswertung auf Populationsebene . . . . .     | 13        |
| i.        | Befund . . . . .                              | 13        |
| ii.       | Generelle Validierung der Methode . . . . .   | 13        |
| iii.      | Fazit . . . . .                               | 14        |
| d.        | Generelle Machbarkeit . . . . .               | 14        |
| i.        | Zu- und Abstieg . . . . .                     | 14        |
| ii.       | Markierung der Transekte . . . . .            | 15        |
| iii.      | Zeitaufwand . . . . .                         | 15        |
| e.        | Eignung und Grenzen der Methodik . . . . .    | 16        |
| i.        | Bildqualität und Informationsgehalt . . . . . | 16        |
| ii.       | Passgenauigkeit zweier Bildserien . . . . .   | 16        |
| iii.      | Statistische Anforderungen . . . . .          | 17        |
| f.        | Eignung der Probeflächen . . . . .            | 17        |
| i.        | Befund . . . . .                              | 17        |
| ii.       | Fazit . . . . .                               | 18        |
| <b>4.</b> | <b>Schlussbemerkung und Ausblick</b>          | <b>18</b> |
|           | <b>Kosten-Analyse</b>                         | <b>19</b> |
|           | <b>Danksagung</b>                             | <b>19</b> |
|           | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                  | <b>20</b> |
|           | <b>Tabellenverzeichnis</b>                    | <b>20</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>                   | <b>21</b> |



## 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.

### **a. Ausgangssituation und Fragestellung**

Das vegetationsökologische Monitoring stellt ein Modul eines auf mehrere Jahrzehnte ausgelegten Langzeitmonitorings dar, welches auch andere Organismengruppen wie beispielsweise Säugetiere, Boden-Mesofauna und Boden-Mikrobiologie 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 Helmut 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 (2016). Die technische Umsetzung der grundlegenden fotografischen Dokumentation wurde von der Firma Ennacon weiterentwickelt.

### **b. Zielsetzung**

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 Wittmann) und mögliche Änderungen unter den gegenwärtigen Klimaszenarien zu erwarten sind (Matteodo et al. 2016, Amagai et al. 2018) 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 (z. B. 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 dem vorliegenden Endbericht werden alle durchgeführten Arbeiten umfänglich dokumentiert und die methodischen Details der Felderhebungen sowie der Auswertung 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. Im Mittelpunkt steht ebenfalls (4) die Validierung des erstellten Bildmaterials, dessen Reproduzierbarkeit und Eignung für weitere (zukünftige) Untersuchungen. Im Zuge der Wiederholungsbeprobung 2018 wurde besonderes Augenmerk auf Reproduzierbarkeit gelegt (5), wobei auch eine Evaluation von Fehlerquellen im Wiederho-



lungsdurchgang (Zweitbefundung) im Fokus stand. Letztlich wird (6) eine Darstellung aller gewonnenen Befunde gegeben und (7) Querverbindungen zu anderen Modulinhalten hergestellt.

## 2. Material und Methoden

### a. Probenahmedesign der Gesamtstudie mit Begriffserläuterungen

#### i. Grundlegendes

Als Stichprobe (»sample«) der anvisierten Lebensräume Krummseggenrasen und Schneeböden haben die drei »core sites« Innergschlöss (IN), Untersulzbachtal (UN) und Seebachtal (SE) zu gelten; sie werden im Folgenden als Standorte bezeichnet (vgl. Tab. 1). Die Stichprobeneinheit (»sampling unit«) ist 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. Erster sind mit Zahlen von 1 bis 4, und letztere mit den Buchstaben a bis d kodiert. Wir bezeichnen im Weiteren die 50 cm Einheit als Rasterzelle (bzw. Rasterfläche) und fügen keine weitere Größendimension hinzu. Hierfür liegen dementsprechend große Bilder als Rohdaten vor (vgl. Abb. 6), auf deren Basis auch kleinere Teil-Ausschnitte ausgewählt werden können, die dann sinngemäß als Teil-Rasterzellen zu bezeichnen sind, wobei die gewählte Kantenlänge (z. B. 10 cm) angegeben wird. Die eindeutige Ansprache einer Rasterzelle wird durch einen Schlüssel mit folgendem Schema sichergestellt: Stichprobe + Stichprobeneinheit + Rasterzelle – z. B. IN + 1 + 1a. Die Gerätschaft mit welcher 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 IN1 wird als solche negiert (Angaben von 0 bis 4 m).

#### ii. Skalen und Zufallsunterauswahl

Aus den Gesamtmosaiken pro Transekt (vgl. Abb. 10) kann randomisiert eine Zufallsunterauswahl (»sub-sample«) für spezifische Auswertungen gezogen werden. Dieses Vorgehen kann für die gegenständliche Arbeit als adäquat erachtet werden, zumal eine Totalauswertung mit erheblichem Zeitaufwand verbunden wäre. So werden in den Datenauswertungen in diesem Bericht mehrfach 10 cm × 10 cm große Flächen (25 Teil-Rasterzellen je Rasterzelle) herangezogen. Die Bezeichnung der 10 cm Teil-Rasterzellen folgt einer von links oben nach rechts unten laufenden Nummerierung von 1 bis 25 (vgl. Abb. 6). Dem oben genannten Schema folgend, ist eine einzelne 10 cm Teil-Rasterzelle z. B. mit IN + 1 + 1a + 1 eindeutig angesprochen. Zur stringenten Auswahl und Benennung einer Zufallsunterauswahl wurden Programm-Skripte (R) entwickelt.

Die Größenskala der untersuchten statistischen Population ist, soweit dies die Informationen in den Bildern unterstützen, generell frei wählbar. Für einzelne Fragen können beispielsweise die 50 cm Flächen der Rasterzellen selbst dienen (z. B. Ziehung von Grenzlinien). Weitere sinnvolle Skalen sind 2 und 5 cm große Ausschnitte (z. B. Auswertung auf Populationsebene). Als besonders geeignet haben sich im Zuge der Auswertungen 10 cm Ausschnitte erwiesen.



### iii. Zeitlicher Aspekt

Ein wesentlicher methodischer Aspekt bei Monitoring-Ansätzen ist letztlich auch der Parameter Zeit, und zwar als eigener Parameter. Um unterschiedliche Zeitzustände einer Beobachtung zu integrieren, wurden die Rohdaten sowie abgeleitete Daten streng nach Zeitpunkten organisiert, und so auch in Dateisystemen modelliert. Somit liegen alle Daten stets gemeinsam mit ihrem Zeitstempel vor.

## b. Verwendete Ausrüstung

### i. Kamera- und Stativ-Konstruktion

Als Kamera wurde eine Vollformatkamera (CMOS-Sensor  $35,9 \times 24,0$  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 (1 × 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) Friktionsarme (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. 16)

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 Beinaustellwinkel wurde auf die erste Rastpositionen (Standardposition) arretiert (ca.  $\alpha=23^\circ$ ). Zur Schonung des Bodens wurden die werksseitig montierten Gummi-Füßchen belassen. Die Bildwinkel ( $\alpha$ ) bei Objektweite von 1,5 m und Blende F 11 betragen  $39.6^\circ$  (horizontal),  $26.99^\circ$  (vertikal) bzw.  $46.79^\circ$  (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  $100 \times 67$  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. Abb. 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 Schattenvorhang 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 Kameraeinstellungen 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.

Um Auswirkungen potentiell unterschiedlicher Beleuchtungsmittel zu ergründen, wurde im Jahr 2018 eine leicht adaptierte Blitzanlage mit variierten Einstellungen zum Einsatz gebracht. So wurden in diesem Jahr zwei verschiedene Beleuchtungssätze genutzt. Als Reportageblitze kamen, bei sonst unverändertem Aufbau, (1) je eine Einheit Nikon® SB 910 (wie 2017) sowie eine bauungleiche Einheit Metz®





mecablitz 52 AF-1 digital und (2) das mitgeführte Ersatzsystem 2 × Yonguno® Speedlite YN560-III mit Yongnuo® YN560-TX Steuerungsgerät zur Anwendung. Dabei wurde die Blitzstärke auf beiden Blitzen auf 1/1 gesetzt. Im Jahr 2017 wurde stets einer der Blitze mit halber Lichtstärke betrieben (Einstellung am Gerät 1/2). Für das zukünftige Vorgehen wird eine Blitzstärke von 1/1 bei beiden Blitzen empfohlen. Es ist ratsam, einen Ersatzblitz mitzuführen.

## ii. Probenahme-Raster

Ein 8 m langer und auf  $\pm 1$  cm maßhaltiger Probenahme-Raster wurde aus käuflichen Materialien hergestellt (vgl. Abb. 3). Das strickleiterartig konstruierte Netz wurde aus 17 Stück, 6 mm starken und exakt 1 m langen Carbon-Rohren (Innen-Durchmesser 4 mm) und einer 1,5 mm starken Dyneema® Schnur, fixiert mit Stellringen (2 mm Innendurchmesser), gefertigt. Jede »Sprosse« des Rasters wurde auf beiden Seiten mit Hilfe eines Beschriftungsgerätes (schwarz auf gelb) mit einer Halbmeter-Bezeichnung versehen (vgl. dazu Abb. 2 H sowie auch Abb. 4). Diese Beschriftungen ermöglichen auch die Kontrolle der Bildrotation (Beschriftung sollte lesbar sein, sprich »nicht am Kopf stehen«).

### c. Geländearbeit und Nachbereitung der Rohdaten

Im Folgenden werden alle für die Freilandarbeit und spätere Nachbearbeitung der Kamera-Rohdaten notwendigen Details geschildert.

#### i. Erhebungszeitpunkte

Die Geländearbeiten fanden in beiden Jahren zum etwa selben Zeitraum und insbesondere bei annähernd gleich entwickelter Vegetation statt (Tab. 2). Als phänologisches Kriterium können die Fruchtreifen von *Gnaphalium supinum* und *Salix herbacea* sowie die Vollblüte von *Euphrasia minima* genannt werden. Es sollte berücksichtigt werden, dass Morgentau bzw. Nässe die Bilder durch gleißende Reflexionen stört. Daher sollten alle Fotos bei trockenem Boden aufgenommen werden.

#### ii. 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. 16).

#### iii. 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 zentralen 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 (Abb. 2 H.).





#### iv. Auslegen des Probenahme-Rasters

Im Sinne einer exakten Reproduzierbarkeit war es notwendig, eine auf  $\pm 2$  cm maßhaltige, wiederfindbare Position des Probenahme-Rasters an den bestehenden Holz-Markierungen zu finden. Jede solche wurde im Zuge der Erstbefundung 2017 fotografisch mit Smartphone (iPhone SE) und 10 cm Fotomaßstab dokumentiert. In Einzelfällen kamen nicht vermeidbare Abweichungen vor (vgl. UN1 in Abb. 5), welche aufgrund der Notwendigkeit der Orthogonalität des ausgelegten Rasters sowie der Reproduzierbarkeit der festgelegten Lage in Kauf genommen wurden. 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 Bilddokument trägt den Bezeichner der betroffenen Rasterzelle(n).

Im Zuge der Wiederholungsbefundung dienten beschriftete Abzüge der Dokumentationsfotos aus dem Vorjahr der möglichst exakten Repositionierung des Probenahme-Rasters. Nachdem die vorjährige Lage wiedergefunden war, wurden zwei permanente Unterflurmarkierungen positioniert, sodass der Probenahme-Raster künftig (zusätzlich oder alleinig) an zwei primären Ankerpunkten befestigt werden kann. Sämtliche Positionen wurden wiederum fotografisch mit Maßstab verbürgt. Die wesentlichen Strecken wurden gemessen (Genauigkeit  $\pm 0,5$  cm), sodass in Zukunft Messschnüre zur Arretierung an den Mittelpunkten der Unterflurmarkierungen fungieren können (siehe Tab. 3 sowie Abb. 4). In wenigen Fällen haben sich die bestehenden Holzpflocke dabei als hinderlich erwiesen. Um die Spannung einer künftig zu verwendenden Messschnur um den Pflock zu berücksichtigen, mussten in sieben aus 60 Fällen zwei Teilstrecken gemessen werden. Eine beispielhafte Angabe von  $75,5 + 4$  cm bedeutet, dass eine Schnur vom Probenahme-Raster aus gesehen zuerst 4 cm entlang des Holzpflockes spannt, bevor die weitere freie Strecke von 75,5 cm bis zum Mittelpunkt der Unterflurmarkierung erreicht ist (vgl. dazu die Abb. 4).

Als Vermarkungsmaterial wurde käufliche und im Vermessungswesen übliche Ausrüstung verwendet (Goecke GmbH & Co. KG). Es kamen Vermarkungsrohre Nr. 17 (1/2 Zoll) mit Längen von 10 cm bis 20 cm zum Einsatz. Diese wurden mit KU-Vermessungsmarken für Rohr Nr. 17, (Kopf- $\emptyset = 60$  mm) in den Farbausführungen rot und weiß versehen. Die »T« oder »Tal-Position« (Beginn des Transekts 0 m) ist mit roten Kappen, die »K« bzw. »Kopf-Position« mit weißen Kappen eindeutig identifiziert. Dem flachgründigen Boden schuldend, wurden überwiegend 10 cm Rohre verwendet; alle Rohre hatten festen Sitz im Boden.

#### v. Bewegen des Kamera-Aufbaus

Für jede  $0,25\text{m}^2$  große Rasterzelle musste der Kameraaufbau inklusive Schattivorhang bewegt werden. Um die Unversehrtheit der Vegetation zu wahren, wurde ausnahmslos barfuß vorgegangen. Drei Personen waren am Prozedere beteiligt. Die Choreographie umfasste folgende Schritte: (1) Anheben des Vorhangs; (2) Bewegen des gesamten Aufbaus und positionieren auf  $\pm 5$  cm an einer günstigen Position des Probenahme-Rasters (vgl. 5 cm Maßstabkasten 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 die Kamera 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.





## vi. Entwicklung der digitalen Negative

Die »RAW-Verarbeitung« geschah gemäß dem Stand der Technik (Adobe Photoshop® CC 2018, 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. Als Dateiformat fand von hier ab das verlustfreie TIF-Format Anwendung (Farbtiefe 8-Bit). Bei der Entwicklung der digitalen Negative wurde die Schärfung des Sensorbildes variiert um optimale Einstellungen für die gegenständlichen Rohdaten zu finden. Schließlich wurden die Parameter »Amount« und »Detail« auf 100 % bzw. 50 % fixiert. Sämtliche getroffene Einstellungen liegen jedem digitalen Negativ in Form einer XMP-Datei (extensible metadata platform file) bei.

## vii. Rektifizierung

Weitere Schritte der Bildverarbeitung verwenden die GDAL-Softwarebibliothek (2.3.3, [www.gdal.org](http://www.gdal.org)). Alle anderen Arbeiten wurden in *R* ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)) und mit Systemwerkzeugen (Bash-Unix shell) bewerkstelligt. Für die Rektifizierung wurden »Boden«-Kontrollpunkte herangezogen. Dazu wurden vier Pixel-Koordinaten bei 100 % Bildvergrößerung ermittelt – und zwar jeweils an den vier Eckpunkten der Rasterzelle. Ein solcher Eckpunkt entspricht genau ( $\pm 0,5$  mm) der Mitte des Durchmessers der Carbonstäbe am Durchtrittspunkt der Schnüre. Die Nummerierung der Kontrollpunkte beginnt in der linken unteren Ecke und wird gegen den Uhrzeigersinn fortgeführt (vgl. Abb. 2 H). Mit Hilfe dieser Punkte wurden jeweils exakt gleich große Kachelbilder ( $3000 \times 3000$  Pixel entsprechend  $500 \times 500$  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. 10). Alle Arbeitsschritte sind lückenlos dokumentiert (*R* und Bash-Skripte). Die aufbereiteten Daten lassen sich in einem GIS-System – analog zu klassischen Luftbildern – nahtlos visualisieren.

### d. Auswertung von Bildkategorien

Im Weiteren wird eine Auswertung von nachstehend definierten Bildkategorien in einer Stichprobe erläutert.

#### i. Erfassung und Definition von Bildkategorien

Aus einer Gesamtheit von 8200 Teil-Rasterzellen á  $10 \times 10$  cm (25 pro Rasterzelle) wurden 416 (ca. 5 %) Teil-Rasterzellen zufällig ausgewählt und auf die darauf erkennbaren Bildkategorien hin untersucht (IN:  $n=149$ , SE:  $n=110$ , UN:  $n=157$ , vgl. Abb. 7).

Dazu wurde je ein ausgeschnittenes, mit einem Python-Programm erzeugtes Bild mit doppelter Auflösung (200 %) auf einem qualitativ hochwertigem Bildschirm angezeigt (Apple iMac 27" Retina 5K Display, Auflösung von  $5120 \times 2880$  Pixel). Durch das Freistellen des Bildes wurde sichergestellt, dass nur die direkt am Bild befindliche Information ausgewertet wird. Vorkommen einer Kategorie in einem Bild wurden binär in einer Datenmatrix protokolliert. Die Größe der Stichprobe war ausreichend, um die wesentlichen Eigenschaften des Datensatzes abzuleiten. Die ausgewerteten Bild-Kategorien mit Einteilung in Übergruppen sind in Tab. 4 dargestellt. Diese Liste enthält in sieben Gruppen und weitere 41 Unterkategorien eingeteilte Bildinhalte, welche überwiegend auf Artniveau (Nomenklatur nach Fischer et al.



2008) oder als Sammelgruppe (z. B. Strauchflechten) angesprochen sind. Aussagekräftige und unmissverständlich an den Bildern zu interpretierende Arten-(Gruppen) oder Lebensraumstrukturen sind in der Tab. 4 markiert.

## ii. 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 & Tibshirani, 1990) visualisiert, um Art-Optima (van der Maarel & Franklin, 2013) zu überprüfen. Um die Existenz von ökologischen Gradienten zu testen (Optimum vs. Minimum), wurde eine auf eine Lösung mit zwei Gruppen (Optimum vs. Pessimum) beschränkte Clusteranalyse (partitioning around medoids, Reynolds et al. 1992, Jaccard-Distanz) durchgeführt. Die Validität der Cluster wurde mittels Varianzanalyse von Distanzmatrizen (analysis of variance using distance matrices, Anderson 2001, Jaccard-Distanz) geprüft.

## e. Erfassung von Grenzlinien

Auf Basis der Bildmosaike aus dem Jahr 2017 wurden Grenzlinien am Bildschirm digitalisiert und erkennbare Fixpunkte (Steine größer 5 cm sowie im Bildausschnitt angeschnittene Holzpflocke) abgegrenzt. Mit Hilfe der Umrisse von Steinen wurde auch die Passgenauigkeit der beiden Bildserien (2017 vs. 2018) bestimmt (siehe dazu den Abschnitt »Quantifizierung der Passgenauigkeit zweier Bildserien«).

## i. Abgegrenzte Strukturen

Eine Liste der definierten (Vegetations-)Strukturen ist in Tab. 5 dargestellt. Es handelt sich um Pflanzengesellschaften im Sinne von Grabherr (1993) sowie zusätzliche ad-hoc definierte Strukturmerkmale derselben. Ergänzend sind nicht als Vegetationsstruktur aufzufassende Bildbereiche gelistet (z. B. Steine). Entsprechende Beispielbilder sind in Abb. 9 zusammengestellt. Das Vorgehen kann als semi-subjektive, Experten-gestützte Bildinterpretation mittels Interpretationsschlüssel eingestuft werden.

Die Katena an Pflanzengesellschaften nach Grabherr (1993) bildet das Rückgrat der abgegrenzten Vegetationsstrukturen. In Summe wurden sechs Assoziationen berücksichtigt, welche von Hochgraswiesen über windgefegte Krummseggenrasen bis zu typisch ausgeprägten Schneeböden reichen: (1) Festucetum picturatae > (2) Loiseleurio-Caricetum curvulae > (3) Caricetum curvulae > (4) Hygrocarietum curvulae > (5) Salicetum herbaceae > (6) Polytrichetum sexangularis. Zur allgemeinen Vereinfachung lassen sich die eingangs dargelegten sechs Vegetationstypen wie folgt gruppieren: 1 ist als »Violettschwingelrasen« (Verband Agrostion schraderianae), 2,3 und 4 können als »Krummseggenrasen« (Verband Caricion curvulae) und der Rest (5, 6) als »Schneeboden« (Verband Salicion herbaceae) angesprochen werden. Zur besseren und vor allem eindeutigen Ansprache sind die wissenschaftlichen Bezeichnungen der Pflanzengemeinschaften besser geeignet als deren deutschsprachige Pendant.



## ii. Topologische Regeln der Geometrien

Der Digitalisierung der Grenzlinien liegt ein auf ein 2 cm Gitter (kurz Zelle) genormter Objektfang («snapping») zugrunde. Dieses Vektor-Gitter teilt eine 50 cm Rasterzelle in 625 Teilzellen á 4 cm<sup>2</sup> (625 × 4 = 50 × 50). Die topologische Toleranz wurde stringent auf 3 Karteneinheiten (Millimeter) gehalten. Grenzlinien von Vegetationsbeständen sowie Strukturen innerhalb dieser (Nr. 1 bis 7 in Tab. 5) sind restriktiv auf die Verwendung der Stützpunkte (Eckpunkt, Vertex) des Gitters beschränkt. Diese Vorgehensweise löst zahlreiche Ambiguitäten hinsichtlich der Positionierung einer jeweiligen Grenzlinie (z. B. Umriss eines kleinen Grashorstes). Für den häufigen Fall der Trennung von Gräsern und kleinen Kräutern bzw. Kryptogamenvereinen (z. B. Grenzlinie zwischen *Caricetum curvulae* und *Polytrichetum sexangularis*) wurde ein Anteil von zumindest 20 % an grünen Grashalmen in der Zelle als Kriterium definiert. Da auch die Diagonalen einer Zelle topologisch zulässig sind (diagonale Querteilung), ist eine Geometrie nicht rein auf eine streng rasterartige (kachelartige) Linienführung beschränkt, womit genügend Spielraum bei der Abgrenzung natürlicher Strukturen vorliegt und eine subjektiv »verspielte« Grenzziehung ausgeschlossen wird.

Bildinhalte deren Grenzen ganz objektiv am Bild gesehen werden können – insbesondere Steine und Holzpflocke – wurden mit höherem Detailgrad digitalisiert. Dazu wurden auch die Kanten des 2 cm Gitters zum Objektfang benutzt («*edge snapping*»). Zusätzlich sind maximal zwei weitere Stützpunkte ohne Objektfang innerhalb einer einzelnen Zelle nur für diese Strukturen zulässig. Mit diesen Grundregeln kann ein Stein also (1) mit Gitter-Stützpunkten, (2) mit zusätzlichem Objektfang auf die Gitterkanten, und – wenn nötig – (3) mit maximal zwei frei gewählten Stützpunkten innerhalb einer Zelle umrissen werden. In Summe sind damit hoch konsistente GIS-Topologien sowie homogene Stützpunkt-Abstände gewährleistet. Die Digitalisierungsarbeiten wurden wie beschrieben in einem GIS-System durchgeführt (QGIS Development Team, 2018), wobei für jedes Transekt und Jahr eine eigenständige Datenebene als ESRI® Shapefile angelegt wurde. Die finalen Polygontopologien wurden mit GRASS-GIS (Neteler & Mitasova, 2008) erstellt, womit höchste Zuverlässigkeit und Genauigkeit gewährleistet ist. Alle Abläufe sind als Programm-Skript dokumentiert (Bash-Unix shell).

## f. Auswertung auf Populationsebene

Die im Abschnitt »Auswertung von Bildkategorien« beschriebene Stichprobe (416, entsprechend 5 % aller 10 cm Teil-Rasterzellen) wurde auf Basis einzelner Individuen bzw. definierter Spross-Strukturen räumlich-explizit ausgewertet. Hierbei wurden die Jahre 2017 und 2018 getrennt analysiert, was einen Vergleich zwischen den Jahren sowie die Abschätzung der statistischen Eigenschaften ermöglicht. Das Transekt UN6 – für das keine Daten aus 2017 vorliegen – konnte dahingehend nicht ausgewertet werden.

## i. Erfasste Arten

Für die Auswertung wurden gut bis sehr gut erkenntliche, durchwegs kleinwüchsige Arten mit unterschiedlichen Lebensraumansprüchen und Lebensformen ausgewählt; es sind dies: *Euphrasia minima*, *Gnaphalium supinum*, *Primula glutinosa*, *P. minima*, *Salix herbacea* und *Soldanella pusilla* (vgl. Tab. 6).

Bezüglich der ökologischen Einnischung der ausgewählten Arten in Krummseggenrasen oder Schneeböden liegt numerische Parität vor. *Euphrasia minima*, *Primula glutinosa* und *P. minima* gelten als Arten der Krummseggenrasen (Verband *Caricion curvulae*), jedoch ohne besonders strikter Bindung an diesen



Lebensraum. *Gnaphalium supinum*, *Salix herbacea* und *Soldanella pusilla* fungieren als Charakterarten der Schneeböden (Verband Salicion herbaceae).

## ii. Digitalisierung und Auswertung

Die Auswertung geschah am Bildschirm bei stets gleichbleibenden und standardisierten Bedingungen. Pro 10 cm Teil-Rasterzelle wurde die genaue Lage eines Individuums bzw. einer Spross-Struktur bei etwa ca. 3-facher Vergrößerung durch einen Punkt digitalisiert. Da mit der Methode unter anderem Teile von klonalen Organismen (*Gnaphalium supinum*, *Salix herbacea*) und andererseits einzelne Blättchen eines Individuums (*Soldanella pusilla*) erfasst werden, ist zu bemerken, dass für die Hälfte der Arten keine Individuenzahlen i. e. S. gegeben werden. Der Einfachheit und Klarheit halber wird im Weiteren dennoch von »Individuen« gesprochen.

Für jedes Transekt und Jahr (2017 und 2018) wurde eine eigenständige Datenebene als ESRI® Shapefile angelegt, wobei jede einzelne Position im Null-Koordinatensystems eines einzelnen Transekts dokumentiert wurde. Wie bereits bei der Erfassung von Grenzlinien kam ein GIS-System zum Einsatz (QGIS Development Team, 2018). Für die nachfolgende statistische Auswertung wurden alle Einzelpunkte innerhalb einer Teil-Rasterzelle zu einer einzigen Zahl summiert. Als Resultat ergibt sich die statistische Stichprobe für eine 10 cm Teil-Rasterzelle. Die wenigen, am Rand einer Teil-Rasterzelle gelegenen Punkte wurden nicht gezählt. Für jede Art pro Transekt wurden die Unterschiede zwischen den beiden Jahren mit Hilfe des Wilcoxon Tests (Wilcoxon signed rank test) für die zweiseitige (ungerichtete) Alternativhypothese ermittelt. Der Test wurde nur ab einer Stichprobengröße größer gleich 4 angewandt. Alternativ wurde ein t-Test für abhängige Stichproben auf Basis logarithmierter Werte gerechnet. Die gesamte Datenaufbereitung und Analyse wurde als Programm-Skript (R) abgefasst.

### ***g. Quantifizierung der Passgenauigkeit zweier Bildserien***

Im Folgenden wird ein einfacher und nachvollziehbarer Ansatz zur Bestimmung der Passgenauigkeit zweier (oder auch mehrerer) Bildserien dargelegt. Als Basis dazu fungieren die methodischen Ansätze bzw. die Ergebnisse aus der Erfassung von Grenzlinien. Das Vorgehen ist simpel und wird im Anschluss erklärt.

## i. Digitalisierung und Auswertung

Zur Abschätzung des Überlappungsgrads der Bildserien 2017 vs. 2018 wurden die Grenzlinien der Steine aus dem Jahr 2017 auf die Bilder aus dem Jahr 2018 übertragen und entsprechend angepasst. Dabei kamen die exakt gleichen topologischen Regeln wie bei deren erstmaliger Erzeugung zum Einsatz (siehe Abschnitt »Erfassung von Grenzlinien«). Hernach wurden die in Polygone umgewandelten Umrisse verglichen. Folgende Statistiken wurden daraus berechnet: (1) die prozentuale Überlappung zweier Geometrien, (2) die prozentuale Flächendifferenz (2017 - 2018) mit Angabe des Vorzeichens und letztlich (3) der Abstand zweier Polygon-Zentroide (Polygonmittelpunkt, vgl. Prakash 2005). Mit Hilfe der Mittelwerte der Zentroid-Abstände kann die mittlere Passgenauigkeit exakt gemessen werden. Visuelle Abschätzungen anhand des 2 cm Vektor-Gitters als Maßstab hatten zuvor eine Passgenauigkeit von 1 bis 2 cm nahegelegt. Die Prozedur ist exakt in Programm-Skripten (R) festgehalten.



### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### a. Informationsgehalt von Bildkategorien

Die folgenden Ausführungen gründen allein auf den ausgewählten Ausschnitten als Stichprobe aus den gesamten verfügbaren Fotos (vgl. Abb. 10). Mit diesem Ansatz soll die vorliegende aus den Bildern ableitbare Artengarnitur, deren räumliche Verteilung und Gemeinschaftsökologie dargestellt werden.

#### i. Befund

Die festgestellten Frequenzen der ausgewerteten Bildkategorien in Teil-Rasterzellen mit 10 cm Kantenlänge ist der Abb. 11 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 et al. 1993) wurde in Summe die folgende – von windgefeigten Krummseggenrasen bis zu typisch ausgeprägten Schneeböden reichende – Katena festgestellt: (1) *Loiseleuria-Caricetum curvulae* > (2) *Caricetum curvulae* > (3) *Hygrocarieetum curvulae* > (4) *Salicetum herbaceae* > (5) *Polytrichetum sexangularis*. Typische Lebermoos-Schneeböden (*Cardamino alpinae-Anthelietum jaratzkanae*) als ökologischer Eckpunkt wurden nicht belegt. In dieser Hinsicht sind Vorkommen von *Solorina crocea* noch dem *Polytrichetum sexangularis* zuzuordnen (häufig nur bei IN1, kleinflächig noch in IN2 und fragmentarisch bei SE2). An alpinen Hochgraswiesen wurde punktuell das *Festucetum picturata* am Standort Untersulzbachtal (UN4) dokumentiert. *F. picturata* war auch am Standort Seebachtal vorhanden, dort jedoch nicht bestandsbildend.

Insgesamt ist der Großteil der Vegetation den chionophilen (Schneeschutz-bedürftigen) Krummseggenrasen (3) anzuschließen. Nur am Standort Innergschlöß kommen gut entwickelte Kraut-Weidenspaliere (4) und Moos-Schneeböden vor (5). Die höhenzonalen Krummseggenrasen (2) sind allorts und repräsentativ entwickelt. Etwas windgefeigte Geländestellen nehmen lokal Windkantenrasen mit Krummsegge (1) ein. Flächig sind diese am Transekt SE2 ausgebildet, womit sich dieses deutlich von den restlichen Probestellen unterscheidet (vgl. Abb. 12 sowie auch die abweichende Bildfarbe in Abb. 5).

Die Flächen mit Moos-Schneeböden (IN2, IN3 und zur Hälfte IN1, vgl. Abb. 12) differenzieren sich durch nur geringe Frequenzen von *Scorzoneroide 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.

Von kleinen Dikotylen (*Scorzoneroide helvetica*, *Soldanella pusilla* und *Primula glutinosa*) bestimmte chinophile Krummseggenrasen prägen den Standort Untersulzbachtal (UN1 bis UN5) und mit einem Beispiel auch den Standort Seebachtal (SE3). 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* (SE2).

Das Muster von *Carex curvula* charakterisiert die Dominanz der alpinen Rasen allgemein sehr gut. Als eine der drei häufigsten Arten ist *Soldanella pusilla* häufig auch in Lücken von Krummseggenrasen etabliert. Diese Art eignet sich zur Charakterisierung der schneereicheren Ausbildungen der Krummseggenrasen (*Hygrocarieetum curvulae*, 3).

Zur allgemeinen Vereinfachung lassen sich die eingangs dargelegten fünf Vegetationstypen in zwei Cluster gruppieren: 1,2 und 3 können als Krummseggenrasen »*Caricetum curvulae* i.w.S.« (Verband



Caricion curvulae, *Optimum*-Cluster) und der Rest (4, 5) als Schneeboeden »Salicetum herbaceae i.w.S.« (Verband Salicion herbaceae, *Pessimum*-Cluster) angesprochen werden, womit eine basale Zweiteilung und Simplifizierung der Vegetationsstrukturen ermöglicht wird. Diese Einteilung wurde durch Cluster-Validierung bestätigt (*P*-Wert mit 999 Permutationen < 0.001). Dem nicht widersprechend weisen die drei Standorte zueinander größere Unterschiede auf. Eine auf die zwei basalen Vegetationseinheiten bezogene multivariate Betrachtung unter Verwendung aller Bildkategorien (Arten) ist in Abb. 13 gegeben. Diese Analyse legt nahe, dass an den Transekten UN2 bis UN4 im Prinzip keine klassischen Schneeboeden vorliegen. Ferner, dass Schneeboeden nicht immer lehrbuchmäßig – sprich graduell – entlang der Transektlinie verteilt sind (SE1 und UN5). Daraus lässt sich die Existenz mehrerer interner Grenzlinien postulieren.

## ii. Generelle Validierung der Methode

Alleinig die Auswertung der Bildkategorien auf 5% der fotografierten Fläche ermöglichte den oben getroffenen, substanziellen Befund. Wie die Häufigkeitsverteilung der Arten (Bildkategorien, Abb. 11) zeigt, lassen sich hierbei bereits grundlegende und aussagekräftige Muster nachweisen. Gleichfalls aufschlussreich ist die Verteilung der Arten entlang der Transekte (Abb. 12). Gemessen am Artenwandel (»species turn-over«) an den Transekten lässt sich die Existenz von (steilen) ökologischen Gradienten bejahen.

Die räumliche Verteilung der Cluster koinzidiert vielfach mit den Linien in Abb. 5. Darüber hinaus wird die durchaus komplexe Struktur der Vegetation belegt. Die modellierten Abschnitte, die als Schneeboeden (Verband Salicion herbaceae) zu bezeichnen sind, entsprechen weitgehend dem Geländebefund, womit die Sensitivität der Daten erhärtet wird.

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. Da *Polytrichum sexangulare* eine wichtige diagnostische Rolle unter den Kryptogamen innehält, wäre eine Ansprache auf Artniveau wünschenswert gewesen. Die Art konnte anhand der Fotos jedoch nicht immer einwandfrei von *P. juniperinum* unterschieden werden. Eine allfällige Artansprache ist deshalb wohl nicht reproduzierbar. Dennoch zeichnen sich flächige Vorkommen der Moosvereine von *P. sexangulare* spektral und strukturell sehr gut auf den Bildern ab.

## iii. Fazit

Durch den gegenständlichen Forschungsansatz war eine Ansprache von Pflanzengesellschaften sowie von typischen Arten ohne große Schwierigkeiten möglich. In den Transekten sind zu wesentlichen Teilen höhenzonale Sauerrasen (*Optimum*-Cluster) vertreten. Schneeboeden (*Pessimum*-Cluster) sind nur an einem Standort (Innerschlöss) kontinuierlich und typisch ausgebildet. Zusammenfassend weisen die Untersuchungsflächen eine Vielzahl an interessanten Vegetationsstrukturen auf verschiedenen Skalen auf, welche es ermöglichen, Ökosystemveränderungen auf verschiedenen Maßstäben zu detektieren. Die getätigte Auswertung auf nur 10 cm großen Flächen rückt die Größenordnung der Beobachtung in Richtung der Point-Intercept-Methode (Punkt-Quadrat-Methode). Diese ist für ihre guten statistischen Eigenschaften bekannt (van der Maarel 2013). Im Prinzip können auch andere Probenahmestrategien wie z. B. die Line-Intercept Methode mittels der Daten simuliert werden.



## **b. Grenzlinien**

Mit diesem Ansatz wurde die gesamte Fläche eines Transektstreifens in die Auswertungen miteinbezogen. Es galt herauszufinden, ob eine nachvollziehbare und auch interpretierbare Segmentierung des Bildmaterials möglich ist.

### **i. Befund**

Durch die manuell gezogenen Grenzlinien konnten die Vegetationsstrukturen an den Transekten in sehr hohem Detailgrad dargestellt werden (Abb. 14). Im Zuge der Abgrenzung von Grenzlinien ergab sich insbesondere die Notwendigkeit eines durchgehend stringenten Digitalisierungs-Maßstabs. Mit breitem Hintergrundwissen über die an den Bildern zu erkennenden Bildsignaturen und deren Entsprechung zum Geländebefund wurde die maximale Auflösung der Geometrien auf ein 2 cm Vektor-Gitter bezogen. Eine derartige Zelle umfasst beispielsweise stets mehr als ein Blättchen von *Soldanella pusilla* und *Salix herbacea*, deren Durchmesser zwischen (0,3)0,5 und 1 (1,5) cm variieren, sowie eine durchschnittliche Rosette von *Gnaphalium supinum* (bis 2 cm im Durchmesser); größerskalige Strukturen können immer fein aufgelöst werden.

In Transektabschnitten mit Schneeböden (*Polytrichetum sexangularis*, *Salicetum herbaceae*) traten in der Regel keine Abgrenzungsschwierigkeiten auf. Die wenig ausgeprägten Strukturen innerhalb der Rasen (z. B. *Caricetum curvulae*) konnten jedoch nicht nachvollziehbar aufgelöst werden, wohl aber deren Grenze zu Schneeböden sowie fleckenweise eingestreute Grashorste verschiedener taxonomischer Identität. In manchen Fällen – insbesondere in länger schneebedeckten Rasen des *Hygrocaricetum curvulae* – sind innerhalb derselben Vegetationsstruktur Grenzlinien zu erkennen; die betreffenden Untereinheiten wurden als Strukturmerkmale bzw. als nicht näher kategorisierte Ausbildungen erfasst.

Die komplette Segmentierung aller Transekte liefert eine umfassende und exakt quantifizierte Flächenstatistik (vgl. Tab. 7), welche für zukünftige Vergleiche herangezogen werden kann. Daraus ist zu entnehmen, dass Krummseggenrasen (*Caricetum curvulae* und *Hygrocaricetum curvulae*) bei weitem die größten Flächen einnehmen.

### **ii. Generelle Validierung der Methode**

Die expertengestützte Digitalisierung von Grenzlinien resultiert in der möglichen Formulierung von räumlich expliziten Hypothesen zu zukünftigen Änderungen der Vegetations-Strukturmuster. Dahingehend können die nunmehr festgelegten Grenzlinien mit neuen Bildserien auf ihre Veränderung hin getestet werden. Falls Änderungen auftreten, können diese genau bestimmt und nachverfolgt werden. Die Wiederholungsaufnahme 2018 belegte ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit der gewählten Methode, wobei die avisierte Genauigkeit von  $\pm 2$  cm (oder besser) anhand ausgewählter Grenzlinien belegt werden konnte. Es ist anzunehmen, dass sich zukünftige Beprobungen in diese Reihe einfügen.

### **iii. Fazit**

Eine expertengestützte Analyse der Bildmosaike zur Ausweisung von Grenzlinien ergänzt jeden anderen (objektiven) Befund, auch wenn dem Ansatz ein inhärenter Mangel an Objektivität anhaftet. Eine exakte



Reproduzierbarkeit der angelegten Grenzlinien ist fallweise nicht gegeben. Das Einfließen der Expertenmeinung ist jedoch notwendig, um komplexe und auch relevante Informationen zu extrahieren und allfällige Änderungen beobachten und dokumentieren zu können. Eine Aktualisierung bzw. Überarbeitung der Grenzlinien-Ziehung im Zuge künftiger Wiederholungsdurchgänge sollte von einem versierten Vegetationsökologen mit Kenntnis über die Vegetation der Untersuchungsflächen vorgenommen werden.

### c. Auswertung auf Populationsebene

Im Folgenden werden die gewonnen Erkenntnisse zur Populationsstruktur der ausgewählten Arten gegeben. Es soll primär geprüft werden, ob aus dem vorliegenden Datenmaterial sensitive Statistiken abgeleitet werden können.

#### i. Befund

In Summe wurden 19.013 einzelne Datenpunkte für beide Jahre gesammelt. Eine Illustration der Daten anhand von einzelnen Beispielen liefert die Abb. 15. Die aus Poolbildung über alle Transekte berechneten Summen bzw. Differenzen der zwei Jahre legen geringfügige Unterschiede auf höchster Ebene nahe (Tab. 8). Eine Auswertung der Individuen bzw. Spross-Strukturen auf Stufe der Transekte fördert im Vergleich von nur zwei Folgejahren bereits einige wenige, überwiegend schwach signifikante Änderungen der Populationsstruktur zu Tage (Tab. 9). Wie im Vorhinein anzunehmen war, weist die eine anuelle Art, *Euphrasia minima*, die größte räumliche und auch zahlenmäßige Fluktuation auf. Es waren hierbei durchwegs Abnahmen zu beobachten. Am Transekt UN2 traten dabei sehr auffällige und höchst signifikante Unterschiede auf. Keine Trends waren bei der ausdauernden und auch klonalen Art *Gnaphalium supinum* zu beobachten. Hierbei war vielfach eine zweifelsfreie Verfolgung von Einzelindividuen (Teil-Rosetten) möglich. Gleiches gilt für *Primula glutinosa*, welche ebenso ihre Populationen an den Transekten behauptete. Am Transekt SE2, welches von einem windgefügten Krummseggenrasen geprägt ist, war eine leicht verringerte Zahl der konkurrenzschwachen Zwergrosetten von *Primula minima* zu verzeichnen. Es liegt jedoch nur eine schwache statistische Unterstützung vor.

Unter den charakteristischen und hoch angepassten Arten der Schneeböden waren fallweise schwach signifikante Unterschiede zu erkennen. Auffällig war eine leichte Zunahme der Sprosse von *Salix herbacea* am Transekt IN1, dessen Teil zwischen 0–2 m ganzheitlich den klassischen Schneeböden zuzuordnen ist. Hierbei ist zu bedenken, dass zwar die Anzahl der Sprosse gestiegen ist, die summative Blattfläche dabei jedoch unverändert geblieben sein kann. In dieser Hinsicht würden eine gesteigerte Anzahl kleinerer Blätter (Blattgruppen am Trieb) auf eine geschwächte Fitness der Art hinweisen; dies war jedoch augenscheinlich nicht der Fall (vgl. Abb. 15). Weitere Zunahmen waren in einem Fall auch für *Soldanella pusilla* gegeben; jedoch ebenfalls nur auf niedrigstem Signifikanz-Niveau. Zwei weitere schwachsignifikante Tests (IN4 und UN1) legen leichte Abnahmen nahe. 7 von 43 Test waren in Summe signifikant. 13 weitere Vergleiche wurden aufgrund zu geringem Stichprobenumfangs (kleiner 4) nicht angestellt.

#### ii. Generelle Validierung der Methode

Es kann gezeigt werden, dass eine auf »Individuen« bezogene Analyse mit vertretbarem Aufwand durchführbar ist. Auf Basis der ausgewählten Indikator-Arten, welche auch stellvertretend für eine Gruppe an

damit assoziierten Arten sind, können feinskalige und auch detaillierte Aussagen reproduzierbar getroffen werden. Durch Hinzufügen weiterer Attribute, wie z. B. Fruchtbildung und Größe, kann der Datenpool 1:1 erweitert werden, womit dann Kovariablen berücksichtigbar und komplexe Hypothesen und statistische Modelle möglich werden. Ferner können durch räumliche Verschneidung parallele Datenebenen eingebunden werden – insbesondere die vegetationskundliche Kategorisierung (Grenzlinien). Somit können Auswertungen auch differenziert nach den statistischen Strata der Vegetationstypen getätigt werden. Letztlich sind die statistischen Eigenschaften von Zählraten als sehr günstig hervorzuheben.

### iii. Fazit

Die getätigte Auswertung des Bildmaterials für einzelne »Individuen« erbrachte sensitive und statistisch valide Tests der Populationsstruktur. Bei einer künftig gegebenen »langen« Zeitreihe können daraus Trends über die Jahre mit einfachen Mitteln errechnet werden. Falls zukünftig wünschenswert, lässt sich die Liste an auszuwertenden Arten noch erweitern (z. B. *Leucanthemopsis alpina* und *Potentilla aurea*), da beliebig auf die Basisdaten zurückgegriffen werden kann. Gleichfalls kann die Stichprobe uneingeschränkt vergrößert werden. Insgesamt steht ein sehr breites Feld an (zukünftig) möglichen Auswertungsstrategien offen.

Erste Schritte zur Auswertung des Bildmaterials mit Hilfe von maschinellem Lernen (»*deep convolutional neural networks*«) ließen durchaus brauchbare Ergebnisse erkennen, die jedoch gegenüber einer Expertenmeinung deutliche Defizite zeigten. Es stellte sich ferner heraus, dass der erforderliche Entwicklungsaufwand weit über die Projektzielsetzung hinausgeht und somit ein eigenes Projekt gerechtfertigt wäre. Ein Solches kann bzw. sollte zu einem späteren Zeitpunkt (in 10 bis 20 Jahren) angegangen werden. Die für derartige Modelle nötige Trainingsdatensätze liegen jedenfalls bereits jetzt vor.

### d. Generelle Machbarkeit

Die Auswahl von Standorten mit ausreichend großen und für die Untersuchung verschiedener Organismengruppen geeigneten Lokalitäten mit 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 (Burg et al. 2015). Andererseits sind die Anforderungen an Faktoren wie z. B. Bodentiefe derart umfangreich, dass wohl kaum ein Standort von sämtlichen Bearbeitern der verschiedenen Module als optimal bezeichnet werden wird.

Die nachfolgende Methodenkritik zur generellen Machbarkeit, zu Eignung und Grenzen der Methodik sowie zur Eignung der Probestellen erfolgt vom Standpunkt des vegetationsökologischen Monitorings und in dem Wissen, dass unsere als ideal zu bezeichnenden Vorstellungen für andere Module nicht (so) ausschlaggebend sind.

### i. Zu- und Abstieg

In Anbetracht der zeitaufwändigen Arbeit vor Ort sollte aus unserer Sicht die Wegzeit zu einer Fläche im optimalen Fall unter zwei Stunden liegen (3,5 bis 4 Stunden für Auf- und Abstieg). 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. Um das Zeitbudget

am Standort Untersulzbachtal zu vergrößern, fand im Rahmen der Wiederholungsaufnahme 2018 die Untersuchung an zwei Tagen mit Biwak vor Ort statt. Am Tag des Anstiegs wurden drei Transekte und am Folgetag die restlichen drei Transekte bearbeitet, sodass im zweiten Jahr auch das Transekt UN6 dokumentiert werden konnte – 2017 stand dazu kein Zeitbudget zur Verfügung. An den anderen Standorten konnte die Bearbeitung in beiden Jahren an einem Geländetag bewerkstelligt werden.

## ii. Markierung der Transekte

Das fotografische Monitoring erfordert eine möglichst präzise Vermarkung sämtlicher Transekte, da nur dadurch eine exakte Wieder-Positionierung des Probenahme-Rasters – und folglich der 50 × 50 cm Rasterzellen – gewährleistet werden kann. Allfällige Ungenauigkeiten haben eine Reduktion 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 ausreichend geeignet. Für die Zwecke des Fotomonitorings 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) punktuell vereiteln, kann das Rechteck beliebig verschoben oder ein Bohranker gesetzt werden. Durch Anhalten eines rechten Winkels ist neben präzisen Entfernungen auch ein Höchstmaß an Orthogonalität gewährleistet.

Wie eingangs dargelegt, ist für unsere Zwecke eine höhere Präzision der Strecken und Winkel zum wiederholten Auslegen des Probenahme-Rasters generell gewünscht. Zu unserer positiven Überraschung konnte der Probenahme-Raster im Wiederholungsdurchgang jedoch sehr genau wieder in gleicher Weise ausgelegt werden, wobei sich die Dokumentationsfotos aus dem Vorjahr als besonders hilfreich erwiesen. Als absichernde Redundanz wurden zusätzlich zu den bestehenden Holzpflocken dauerhafte Unterflurmarkierungen gesetzt. Dadurch wird die Genauigkeit und langfristige Repositionierung zwar gesteigert, dies jedoch auf Kosten der Produktivität und Komplexität des Vorgehens. Wir möchten an dieser Stelle nochmals festhalten, dass wir uns an die vorgegebene Situation mit Präzision im Dezimeter-Bereich anzupassen hatten, und, dass aus unserer Sicht von Beginn weg eine präzisere Einrichtung der Flächen ratsam gewesen wäre. Nichts desto trotz wurde eine befriedigende und den Ansprüchen genügende Lösung gefunden, welche sich durch Redundanz und damit durch hohe Sicherheit auszeichnet. Um eine fallweise stattfindende Frosthebung – welche die teils nur kurzen Eisenrohre (10 cm) aus dem Boden drücken kann – zu überwachen, sollten in den Folgejahren Kontrollbegehungen durchgeführt und die Unterflurmarkierungen ggf. durch abermaliges Eindrücken der Rohre nachgebessert werden.

## iii. Zeitaufwand

Basierend auf den Aufnahmedaten der Fotos konnte das aufgewandte Zeitbudget im Gelände genau errechnet werden. Im Jahr 2017 betrug der Zeitaufwand für die reine Fotografie inkl. Bewegen des Kamera-Aufbaus zwischen 25 und 60 Minuten pro Transekt. Die Unterschiede resultieren aus der jeweiligen Transekt-Länge. Im Durchschnitt wurde 1 Minute und 30 Sekunden für ein einzelnes Bild benötigt. Im Folgejahr 2018 konnte diese Statistik verbessert und die Zeit auf 19 bis 44 Minuten pro Transekt verkürzt werden, womit im Schnitt ein Bild jede Minute und 11 Sekunden aufgenommen wurde. Zur zu-

sätzlichen Dokumentation wurde eine Zeitrafferaufnahme eines 8 m langen Transekts (IN4) angefertigt. Die Zeit zum Auslegen des Probenahme-Rasters wurde nicht notiert, bewegt sich aber in der Spanne von 15 bis 30 Minuten. Die Bearbeitung eines einzelnen, bis 8 m langen Transekts an einem Standort (vier Bilder pro m<sup>2</sup>) ist in maximal eineinhalb Stunden möglich und realistisch – hoch konzentriertes Arbeiten und gute Wetterbedingungen sind dabei Grundvoraussetzung. In Summe ist jeweils ein »voller« 12-Stunden Personentag für alle Arbeiten inkl. An- und Abstieg pro Standort zu kalkulieren. Für den Standort Untersulzbachtal sind diesbezüglich zwei Arbeitstage einzuplanen (vgl. Abschnitt »Zu- und Abstieg«). Der Standort Seebachtal lässt am raschesten bearbeiten.

### **e. Eignung und Grenzen der Methodik**

Bei der Durchführung der Erst- und Zweitbefundung traten in der Regel keine Probleme auf. Lediglich am ersten Transekt am Standort Untersulzbachtal (UN1) 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. Die Arbeiten konnten durch Ausführung der richtigen Handgriffe problemlos bewerkstelligt werden. Auf Basis dieser Erfahrungen kann ein maximaler Neigungswinkel von etwa 20 Grad als Machbarkeitsschwelle für die Methode angesetzt werden.

#### **i. Bildqualität und Informationsgehalt**

Eine bildliche Dokumentation der beprobten Transekte ist in Abb. 5 dargestellt. Eine Übersicht der verarbeiteten Bilder gibt die Abb. 10. Die Bildqualität kann als sehr gut bezeichnet werden, womit nun für mannigfaltige (zukünftige) Auswertungen wertvolle Rohdaten 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 Hochgräser (*Festuca picturata*) mit bis zu 30 cm langen Blütenständen (UN4); 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 eher vertikal strukturierten Grasländer sind ärmer an leicht auswertbaren Details, differenzieren sich als solche jedoch ausgezeichnet. Eine Reihe an Organismen kann sehr gut auf Art-Niveau angesprochen werden (vgl. Tab. 4). Für eine signifikante Anzahl an Arten können Populationszahlen und räumliche Verteilungsmuster ermittelt werden (vgl. Abschnitt »Auswertung auf Populationsebene«).

#### **ii. Passgenauigkeit zweier Bildserien**

Wie aus der Tab. 10 hervorgeht, liegt die mittlere, an den Umrissen von Steinen gemessene Passgenauigkeit zwischen 0,3 (±0,30 SD) und 1,1 (±0,74 SD) cm. Dies rückt den Wiederholungsfehler in eine Größenordnung bis rund 2 cm. Größere Fehler traten besonders am Transekt SE1 auf, was aus einer leichten Verwindung (Verletzung der Linearität) des wiederangelegten Transekts zwischen 0 und 4 m resultierte. Durch nochmalige Rektifizierung könnten derartige Diskrepanzen nahezu gänzlich ausgeglichen werden. Für die Analyse von 10 cm Teil-Rasterzellen spielen die Passungenauigkeiten bei Wiederholungsbeobachtungen eine Rolle, die nicht ganz zu vernachlässigen ist (vgl. auch Abb. 8).



### iii. Statistische Anforderungen

Der Stichprobenplan ist durch die Verwendung unterschiedlicher Transekt-Längen und -Anzahlen pro Standort (vgl. Abb. 10) als nicht ausgewogen zu bezeichnen, was tolerierbare statistische Nachteile bei Vergleichen zwischen den Transekten – sowie speziell zwischen den Standorten – mit sich bringt (Legendre & Legendre 2012). Diese Umstände sind für Zeitvergleiche jedoch nicht primär ausschlaggebend. In jedem Fall kann durch Zufallsunterauswahl, am Besten in stratifizierter Form, eine statistisch valide Population eines betrachteten Parameters extrahiert werden (van der Maarel & Franklin, 2013). Letztlich wird durch Anwendung hochentwickelter statistischer Modelle (*»mixed error-component models«*, siehe z. B. Bolker et al 2009) eine Korrektur der Defizite im Stichprobenplan möglich, womit die einzelnen Effekt-Terme voneinander separiert werden können. Diese Modelle sind vorzugsweise für wiederholte Stichprobenahmen (*»repeated measurements«*), wie im gegebenen Fall, nützlich.

Für die Lokalität Untersulzbachtal stellt das Transekt UN6 eine nicht notwendige Replikation am Standort dar, welche keinen signifikanten Mehrwert verspricht und deshalb nicht ausgewertet wurde. Dies insbesondere auch deshalb, da keine Referenzdaten aus dem Jahr 2017 vorliegen. In diesem Sinne kann auf Basis der statistischen Anforderungen durchaus mit fünf Transekten das Auslangen gefunden werden.

### f. Eignung der Probeflächen

Abschließend wird die Auswahl der Standorte aus vegetationsökologischer Sicht beurteilt. Diese gründet auf den oben geschilderten Erkenntnissen und den daraus zu erwartenden zukünftigen Signalen.

#### i. Befund

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 (*Caricetum curvulae* i.w.S.) vertreten. Schneeböden (*Salicetum herbaceae* i.w.S.) sind nur an einem Standort (Innerschlöss) wirklich typisch bzw. großflächig ausgebildet. Steile ökologische Gradienten treten mehrheitlich auf. Die Situation an einer bestimmten Lokalität wird durch Replikation gut approximiert.

Wie in der Einleitung 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 Anteile an artenarmen Schneeböden beherbergen, welche die Anforderung eines einfachen Systems erfüllen. Ein Großteil der 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 (Moose und Flechten) reiche Schneeböden sind lediglich am Standort Innerschlöss in größerem Maßstab anzutreffen. Diese als einfache Systeme anzusprechenden Schneeböden wurden teils nur zu geringen aber ausreichendem Umfang in die Transektflächen implementiert. Die beiden anderen Standorte – Seebachtal und Untersulzbachtal – weisen vergleichsweise kleinflächig entwickelte Schneeböden i. e. S. auf, sodass ein überwiegender Anteil der Transekte dort auf Krummseggenrasen entfällt, welche die Matrixvegetation der Silikat-Hochalpen repräsentieren.





## ii. Fazit

Die fotografische Auswertung des Bildmaterials ist auch in 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. Die entwickelte Methode lässt nichtsdestotrotz eine sehr gute Reproduzierbarkeit erwarten. Das Transekt UN6 liefert keinen wesentlichen Mehrwert in Relation zu den restlichen fünf Transekten am Standort Untersulzbachtal, da damit prinzipiell keine (Vegetations-)Strukturen umfasst sind, die nicht nicht schon mit den restlichen Transekten mehr als ausreichend abgedeckt sind.

In Hinblick auf das Untersuchungsdesign ist abschließend nochmals festzuhalten, dass nur am Standort Innergschlöss das Auswahlkriterium »einfache Systeme« im gewünschten/geforderten Ausmaß erfüllt wird. Damit sind die Auswertemöglichkeiten, vor allem zwischen der Nord- und Süd-Abdachung der Hohen Tauern, eingeschränkt. Langjährige Beobachtungen von Helmut Wittmann und Robert Lindner sowie auch die Mitteilung von Liftbetreibern deuten an, dass im maßgeblichen Zeitraum der Winter später beginnt und dafür länger mit geschlossener Schneedecke andauert, wobei sich besonders in den letzten Jahren zunehmende Unterschiede zwischen Nord- und Südseite bemerkbar machen. Um derartige klimatische Phänomene vergleichend indizieren zu können, wäre es gefordert, »identische« Lebensräume im Norden und Süden des Alpenhauptkammes zu untersuchen. Dies war unserer Meinung nach auch ursprünglich vorgesehen, konnte jedoch bei der Auswahl der Probestellen nicht umfänglich Berücksichtigung finden. Für ein auf sehr lange Zeit ausgelegtes Monitoringprogramm könnte deshalb einerseits die Wahl der Dauerflächen nochmals überdacht werden, andererseits – was definitiv zu bevorzugen ist – könnte ein weiterer Standort an einer leicht erreichbaren Lokalität im Untersuchungsdesign ergänzt werden, beispielsweise entlang der Glockner Hochalpenstraße. Damit wäre dann zum Standort Innergschlöss an der Süd-Seite des Alpenhauptkammes ein entsprechendes Pendant installiert.

## 4. Schlussbemerkung und Ausblick

Mit dem vorgelegten Monitoringansatz wird eine hohe, mit keiner anderen bisher bekannten Monitoringtechnik für alpine Ökosysteme realisierbare Präzision erreicht. Schon im einfachen Bildvergleich kann einzelnen Pflanzen sprichwörtlich »beim Wachsen zugesehen werden«. Die Dynamik an der Bodenoberfläche lässt sich im Detail beobachten und dokumentieren, so z. B. die Lageveränderung von kleinen mobilen Steinen, sich zersetzender Tierkot oder die Regeneration an Bestandeslücken. Letztlich wird ein Erkennen und Quantifizieren von Unschärfen ermöglicht (Repositionierung des Probenahme-Rasters). Durch vielfältige Formen des »digitalen Nachjustierens« kann die Exaktheit der Befunde abermals erhöht werden.

Überall dort, wo »einfache Systeme« außerhalb der Rasen vorliegen, sind neben der Feststellung (zukünftiger) Vegetationsverschiebungen auch individuenbezogene Populationsstudien realisierbar. Beispielsweise ist eine auf Einzelindividuen bezogene Beobachtung in einer künftigen Zeitreihe möglich und vielversprechend. Ein wesentlicher Vorteil des Forschungsansatzes ist, dass ein Zurückgreifen auf die Basisdaten und ein (Wieder-)Auswerten derselben auch nach vielen Jahren möglich ist. Zudem können die in diesem Bericht ausgewählten Stichproben beliebig erweitert werden, was bei konventionellen Geländedaten in keinsten Weise gegeben ist. Letztlich wird durch die exakte Dokumentation in Programmskripten und die Verwendung von Open-Source-Software die Erweiterung der bestehenden Ansätze so-



wie ihre stringente Fortführung unterstützt bzw. überhaupt erst sinnvoll und effizient möglich gemacht. In Summe werden mit dem umgesetzten Monitoringansatz alle Erwartungen an die Methode umfänglich erfüllt. Der Aussagewert für das Testgebiet kann dabei als sehr hoch eingeschätzt werden. In Bezug zum gesamten Schutzgebiet steht eine durchaus hohe Übertragbarkeit der Feststellungen in Aussicht.

Vielversprechende Querverbindungen zu anderen Modulen betreffen vorrangig das Thema »Mikroklima und Biomasse«. Einerseits stellen die mikroklimatischen Messwerte sowie die Schneeverweildauer wichtige Kovariablen dar, andererseits besteht die Möglichkeit die Biomassewerte auf korrespondierende Bereiche des zentralen, unbeeinflussten Transektstreifens zu übertragen. In Bezug zum Modul »Großherbivoren« stellt die gegenständliche Untersuchung Daten bereit, namentlich auf den Bildern erkennlicher Tierkot. Unter Umständen ist auch eine Herstellung von sinnvollen Beziehungen zu den Materien »Bodenmikrobiologie« und »Bodenmesofauna« möglich; dies beispielsweise durch Vergleich von Diversitäts-Indizes.

## Kosten-Analyse

Wie geplant, ermöglicht die ausgearbeitete Methodik die Erhebung der Geländedaten durch wissenschaftliche Hilfskräfte (Nationalpark-Ranger), womit der Kostenfaktor Personal entscheidend verringert wird. In Summe sind für die Aufnahmen im Gelände pro Jahr 9 bis maximal 12 Personentage á 12 Stunden zu veranschlagen. Das benötigte Team besteht dabei aus 3 Personen. In der Maximalvariante ist ein Biwak am Standort Untersulzbachtal inkludiert.

Die Nachbereitung der Daten bis hin zu den fertig rektifizierten Bildern erfordert Fachwissen aus den Feldern Photographie, Fernerkundung sowie nicht zuletzt auch Bioinformatik. Da in diesen Schritten sinnvollerweise auch eine Qualitätssicherung durchgeführt werden sollte, ist in der Daten-Aufbereitung eine wissenschaftliche Fachkraft mit der genannten Qualifizierung sowie mit einer vegetationskundlichen Expertise die Untersuchungsflächen betreffend zu empfehlen. Der Aufwand ist bei gegebener Handfertigkeit mit ungefähr 2 Personentagen á 8 Stunden zu beziffern.

Die Auswertungen und Interpretationen sollten stets von ausgewiesenen Fachkräften getätigt werden. Teilweise können aber auch Einzel-Arbeiten, wie z. B. das Zählen von Individuen, an wissenschaftliche Hilfskräfte abgestellt werden.

## 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 im Jahr 2017 war Stefan Pfeiffer maßgeblich beteiligt. Bei der Umsetzung vor Ort im Jahr 2018 war Bernhard Kratzer als geschickte Hilfskraft dabei. Den genannten Personen gilt unser herzlichster Dank!



## Abbildungsverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.  | Patentzeichnung Kameraaufbau                       | 22 |
| 2.  | Bildtafel Kameraaufbau                             | 23 |
| 3.  | Bild Probenahme-Raster                             | 24 |
| 4.  | Bildtafel Kameraaufbau                             | 25 |
| 5.  | Übersichten  | 26 |
| 6.  | Beispiel rektifiziertes Bild                       | 27 |
| 7.  | Beispiel Ausschnitt rektifiziertes Bild            | 28 |
| 8.  | Vergleich der Bildserien                           | 29 |
| 9.  | Bildbeispiele Interpretationsschlüssel Grenzlinien | 30 |
| 10. | Bildmosaik aller Einzelbilder                      | 31 |
| 11. | Tabellenbild Häufigkeiten der Bildkategorien       | 32 |
| 12. | Gradienten für 4 Arten                             | 33 |
| 13. | Verteilung der Cluster                             | 34 |
| 14. | Grenzlinien aller Transekte 2017                   | 35 |
| 15. | Beispiel Individuen 2017 vs. 2018                  | 36 |
| 16. | Antransport der Ausrüstung                         | 37 |

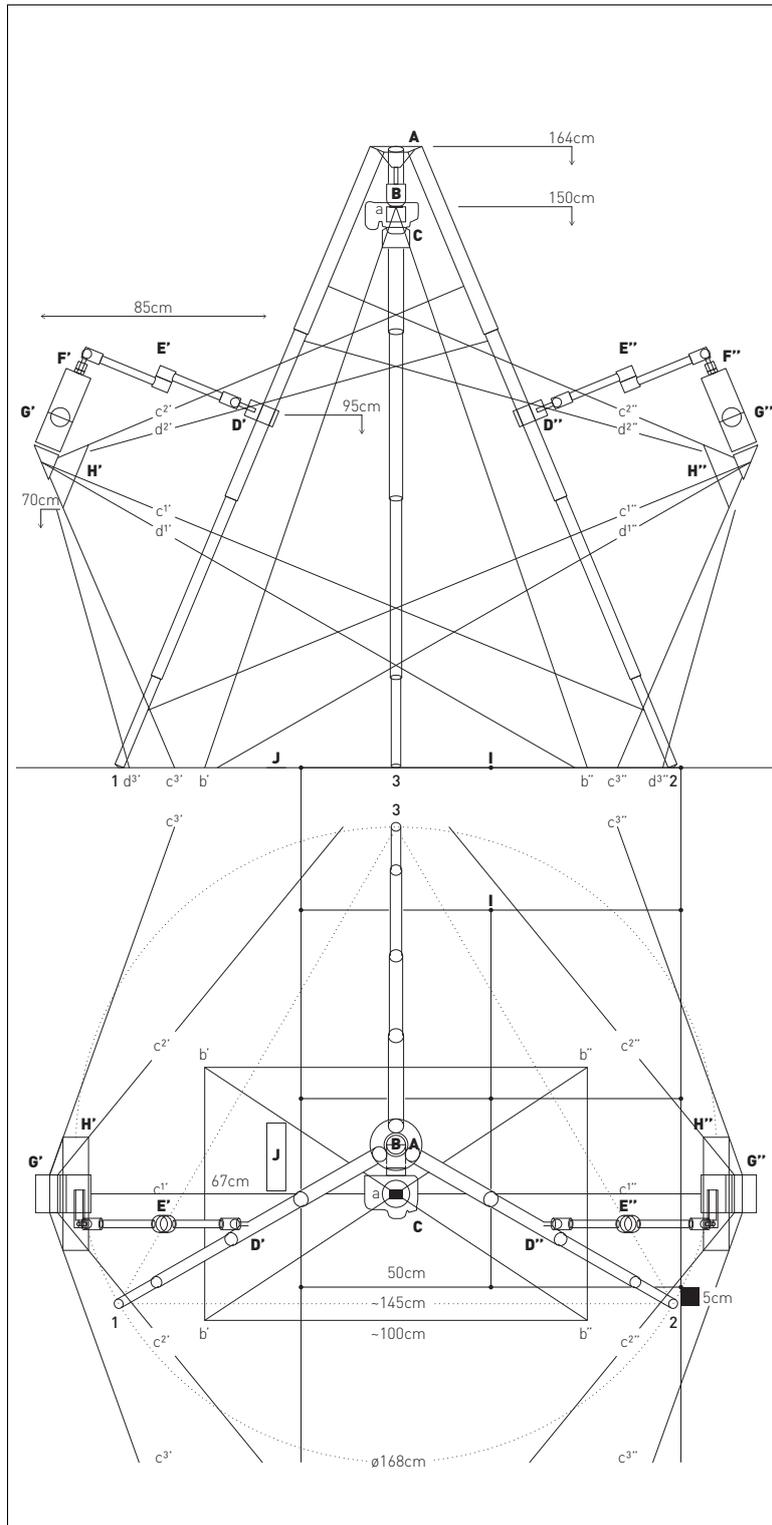
## Tabellenverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.  | Termini des Probenahmedesigns                                      | 38 |
| 2.  | Untersuchungszeitpunkte  | 38 |
| 4.  | Ausgewertete Bildkategorien  | 40 |
| 5.  | Interpretationsschlüssel Grenzlinien                               | 41 |
| 6.  | Auf Basis von Individuen ausgewertete Arten                        | 42 |
| 7.  | Flächenanteile der Vegetationsstrukturen auf Basis der Grenzlinien | 43 |
| 8.  | Anzahl der total gezählten Individuen                              | 43 |
| 9.  | Wilcoxn Test für alle Arten und Transekte                          | 44 |
| 10. | Abweichungen der Bildserien 2017 und 2018                          | 45 |

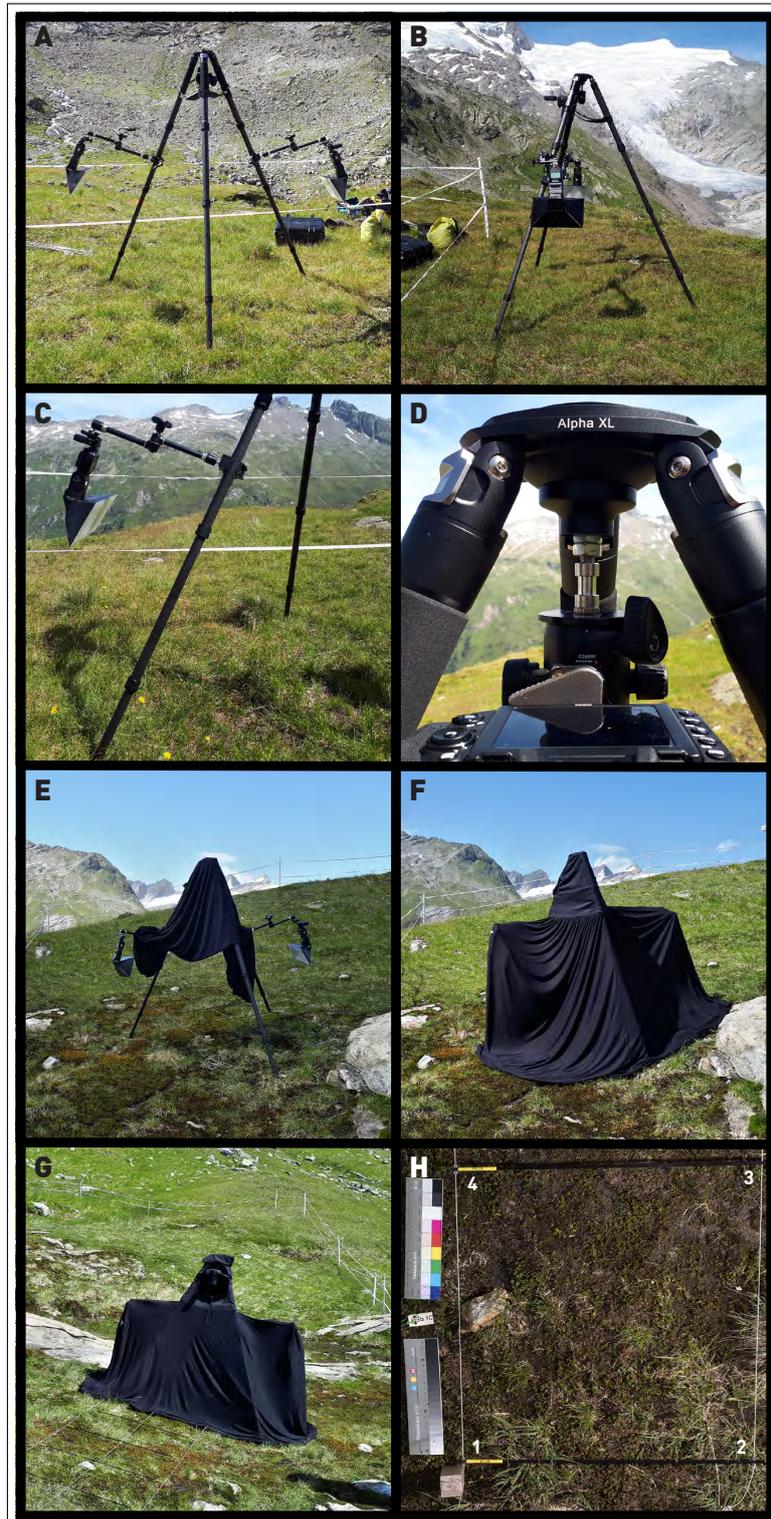


## Literaturverzeichnis

- Amagai, Y., Kudo, G. & K. Sato (2018). Changes in alpine plant communities under climate change: Dynamics of snow-meadow vegetation in northern Japan over the last 40 years. *Applied Vegetation Science* 21:561-571.
- Anderson, M.J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26: 32–46.
- Bolker, B.M., Brooks, M.E., Clark, C.J., Geange, S.W., Poulsen, J.R., Stevens, M.H. and J.S. (2009). Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology and Evolution*, 24:127-135.
- Burg, S. and Rixen, C. and Stöckli, V. & 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.
- Grabherr, G. (ed.) (1993). *Die Pflanzengesellschaften Österreichs, Teil 2: Natürliche waldfreie Vegetation*. Fischer.
- Hastie TJ, & R.J. Tibshirani (1990). *Generalized Additive Models*. Chapman and Hall.
- Legendre, P. & L. Legendre (2012). Numerical ecology. *Developments in Environmental Modelling*, 24:1-990.
- Lord, J.M., Alan F.M., Humar-Maegli T., Halloy S.R.P., Bannister P., Knight A., & K.J.M. Dickinson (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*, 30:51-61.
- van der Maarel E. & J. Franklin (eds) (2013). *Vegetation ecology*. Wiley-Blackwell.
- 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.
- Minchin, P.R. (1987): An evaluation of relative robustness of techniques for ecological ordinations. *Vegetatio* 69, 89–107.
- Morrison, L.W. (2016). Observer error in vegetation surveys: a review. *Journal of Plant Ecology*: 367–379.
- Neteler, M. & H. Mitasova (2008). *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, 3 Auflage. Springer.
- Prakash, V. (2005). An efficient g-centroid location algorithm for cographs. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences* 9:1405-1413.
- QGIS Development Team (2018). *QGIS Geographic Information System Version 3.2*. Open Source Geospatial Foundation
- R Core Team (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 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.



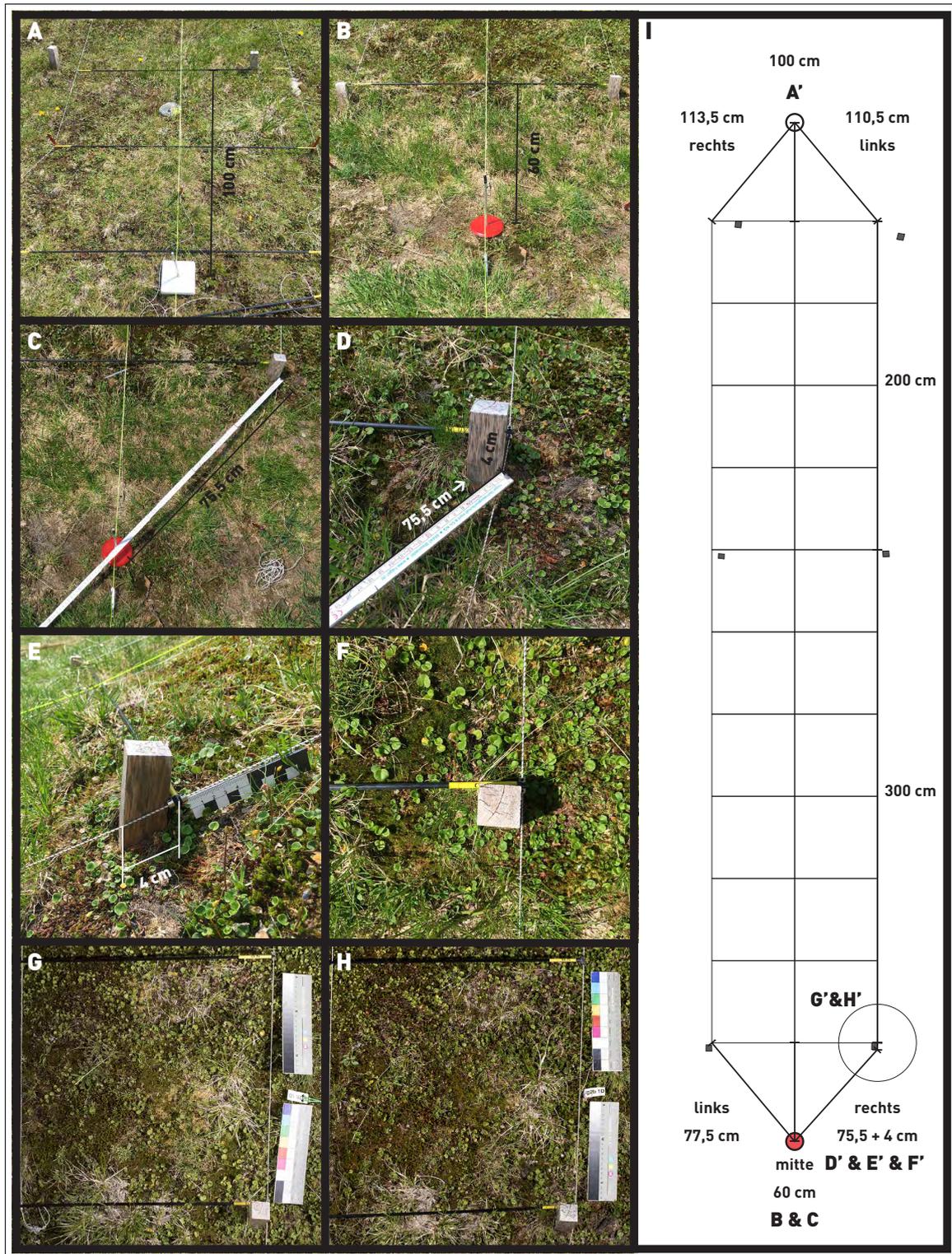
**Abbildung 1:** Patentzeichnung Kameraaufbau (M 1:20). **A:** Dreibein-Stativ, **B:** Stativ-Kugelkopf mit Schnellwechsellplatte (vgl. Abb. 2 D), **C:** Kameragehäuse mit 50 mm Objektiv, **D:** Klemme zum Befestigen der Friktionsarme (im Grundriss nicht dargestellt), **E:** Friktionsarm (*Blitz-Arm*), **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 (<sup>1</sup> Mitte, <sup>2</sup> oben, <sup>3</sup> unten) bei Blitz Neigung  $23^\circ$  (Maximum), *d:* Strahlengang Blitz bei Neigung  $30^\circ$  (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.



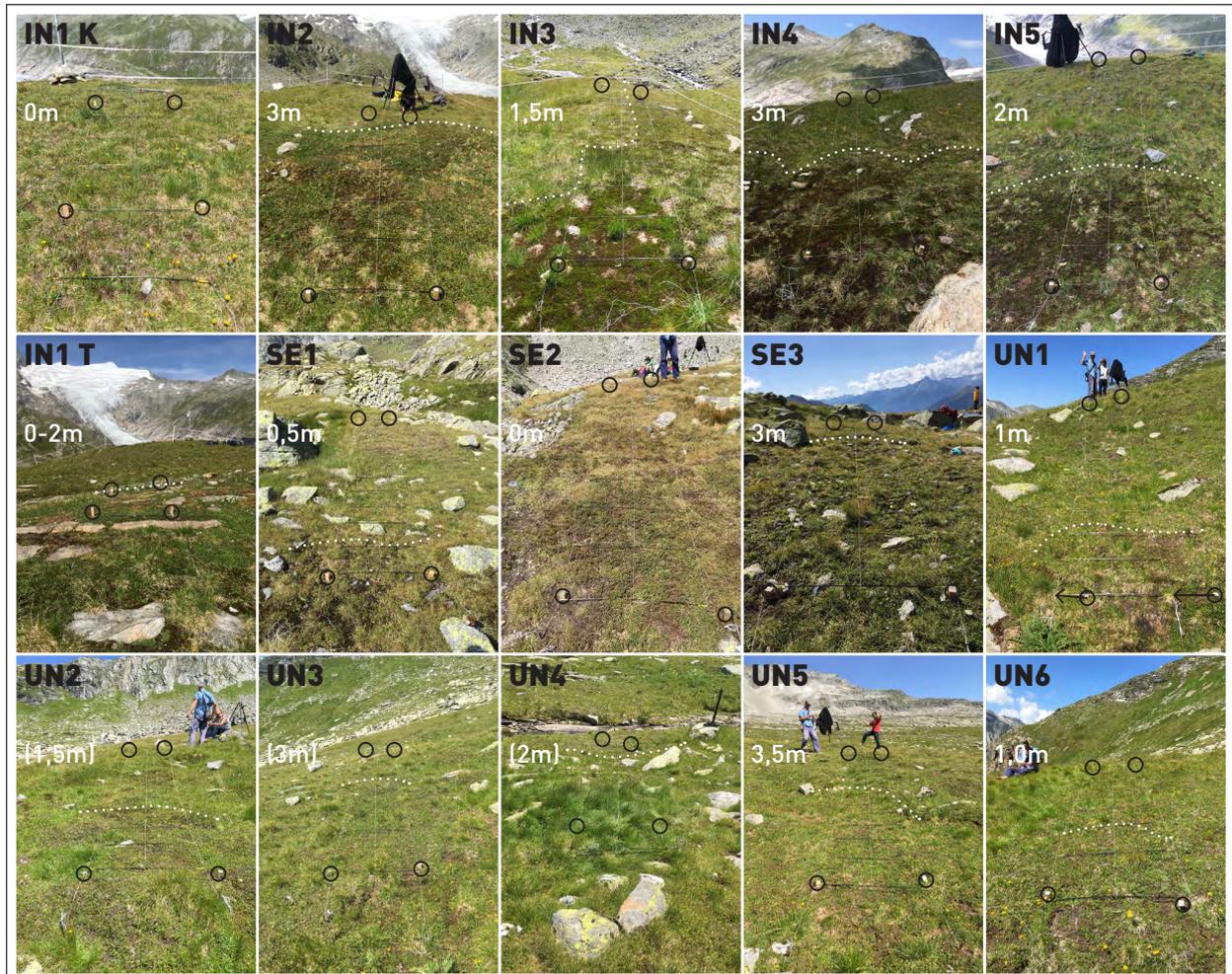
**Abbildung 2:** Bildtafel Kameraaufbau (zu den Richtungsangaben vgl. Abb.1). **A:** Ansicht von hinten, **B:** Ansicht von rechts, **C:** Blick auf den linksseitig montierten Blitz mit Friktionsarm und Klemme am Stativ, **D:** Stativ-Kugelkopf mit Schnellwechselplatte, **E:** nach oben geschlagener Schattenvorhang auf der Fläche UN5 am Quadrat 1c, **F:** wie E nur Vorhang am Boden, **G:** Blick von vorne auf F, **H:** quadratischer Ausschnitt des unverarbeiteten Originalbilds der Fläche UN5B 1c mit Nummerierung der Referenzierungspunkte 1 bis 4. Bilder A bis G, Stefan Pfeiffer (Salzburg).



**Abbildung 3:** Ausgelegtes Probenahme-Raster am Transekt IN5 von oben gesehen (vgl. Abb. 2 E bis H, dort Ansicht von unten). Unten im Bild *Carex curvula*-Windkantenrasen mit Strauchflechten und Ericaceen (Loiseleurio-Caricetum curvulae). Oben, im Hintergrund, *Polytrichum*-Schneeboden mit *Deschampsia cespitosa* und *Nardus stricta* (Polytrichetum sexangularis). Dazwischen *Carex curvula*-Rasen (Caricetum curvulae). Erkentlich sind die roten Zelt-Heringe zur Fixierung sowie der Weidezaun.

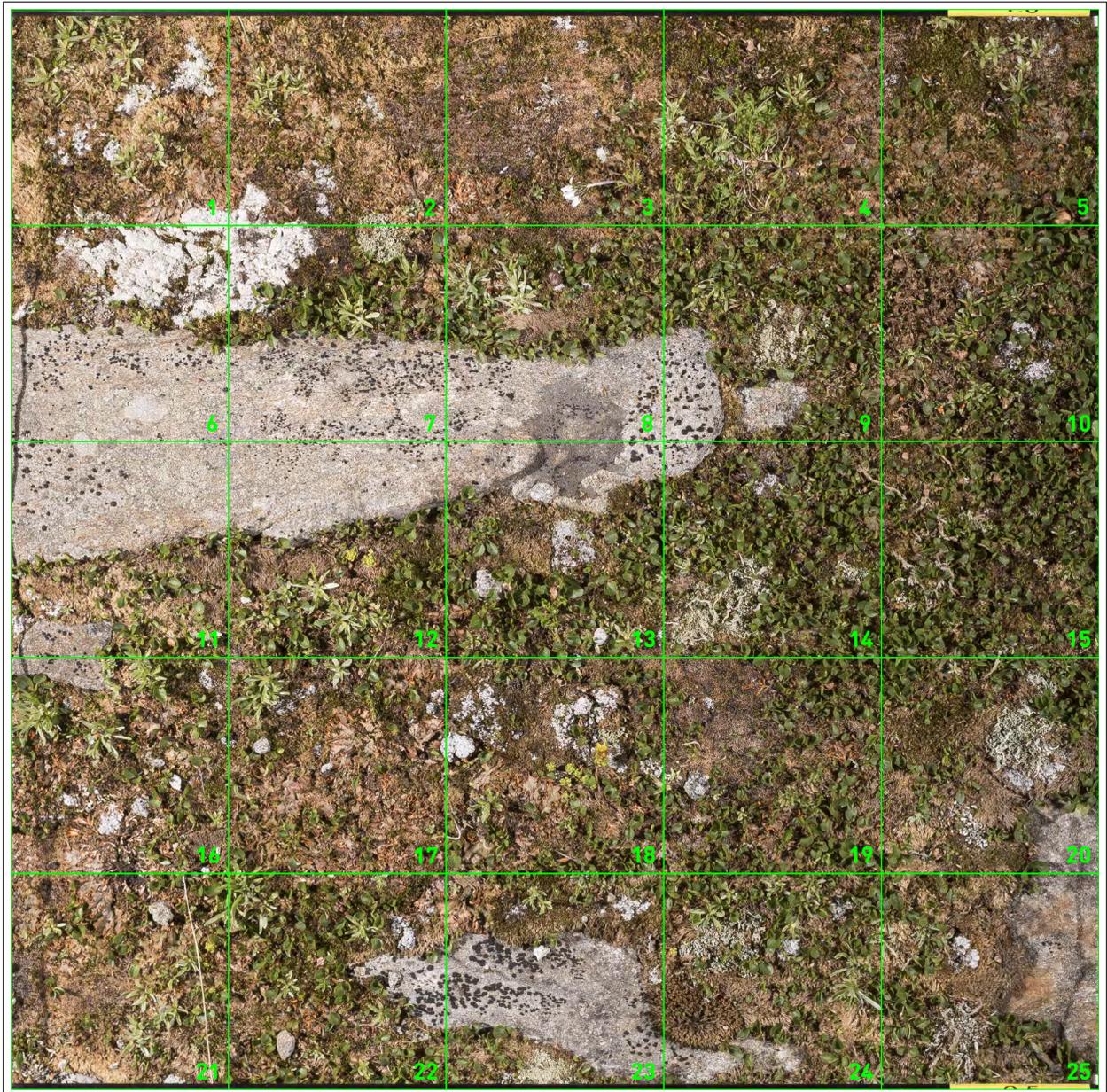


**Abbildung 4:** Bildtafel zur Dokumentation der gesetzten Unterflurmarkierungen, beispielhaft anhand des Transekts IN2. Alle Bilder stammen – sofern nicht explizit erwähnt – aus dem Jahr 2018. **A:** Setzen der Markierung am »Kopf«-Ende; **B:** Markierung am »Tal«-Ende; **C:** Messen des Schenkels nach rechts im Falle eines direkt anliegenden Pflockes (vgl. Tab. 3 für IN2 sowie großer Kreis in Bild I); **D:** Anlegen eines Meterstabes zur Ermittlung der Schenkellängen (im Bild Schenkel rechts am »Tal«-Ende, vgl. Bild B Pflock rechts); **E:** Teilmessstrecke am Pflock von 4 cm; **F:** Aufsicht auf den Pflock in Bild E aus dem Jahr 2017; **G:** quadratischer Ausschnitt des unverarbeiteten Originalbilds der Fläche IN2B 1d aus dem Jahr 2017; **H:** wie Bild G nur aus dem Jahr 2018; **I:** Lageplan Transekt IN2 mit Pflöcken (grau), Unterflurmarkierungen (rote und weiße Kreise) und Messstrecken laut Tab. 3.



**Abbildung 5:** Übersichten der Transekte mit Blick hangaufwärts (Ausnahme UN4 hier Blick hangabwärts). **Punktierte weiße Line:** approximierte Grenze von Krummseggenrasen zu Schneeböden (oder chinophilen Krummseggenrasen UN2, UN3, UN4). Beachte SE2 weist keine Bereiche mit Schneebodenvegetation auf. Das geteilte Transekt IN1 ist ganzheitlich den Schneeböden (IN1 T) bzw. Grasland zuzuordnen. Die Zusätze »T« und »K« bedeuten Tal und Kopf, sprich topographisch unten bzw. oben. **Schwarze Kreise:** Eckmarkierungen (Holzpflöcke). Abweichungen sind insbesondere bei UN1 (Pfeile) gegeben, da hier die Pflöcke nicht ausreichend genau in Linie gesetzt wurden. Alle Fotos stammen, bis auf Transekt UN6, das nur 2018 beprobt wurde, aus dem Jahr 2017.

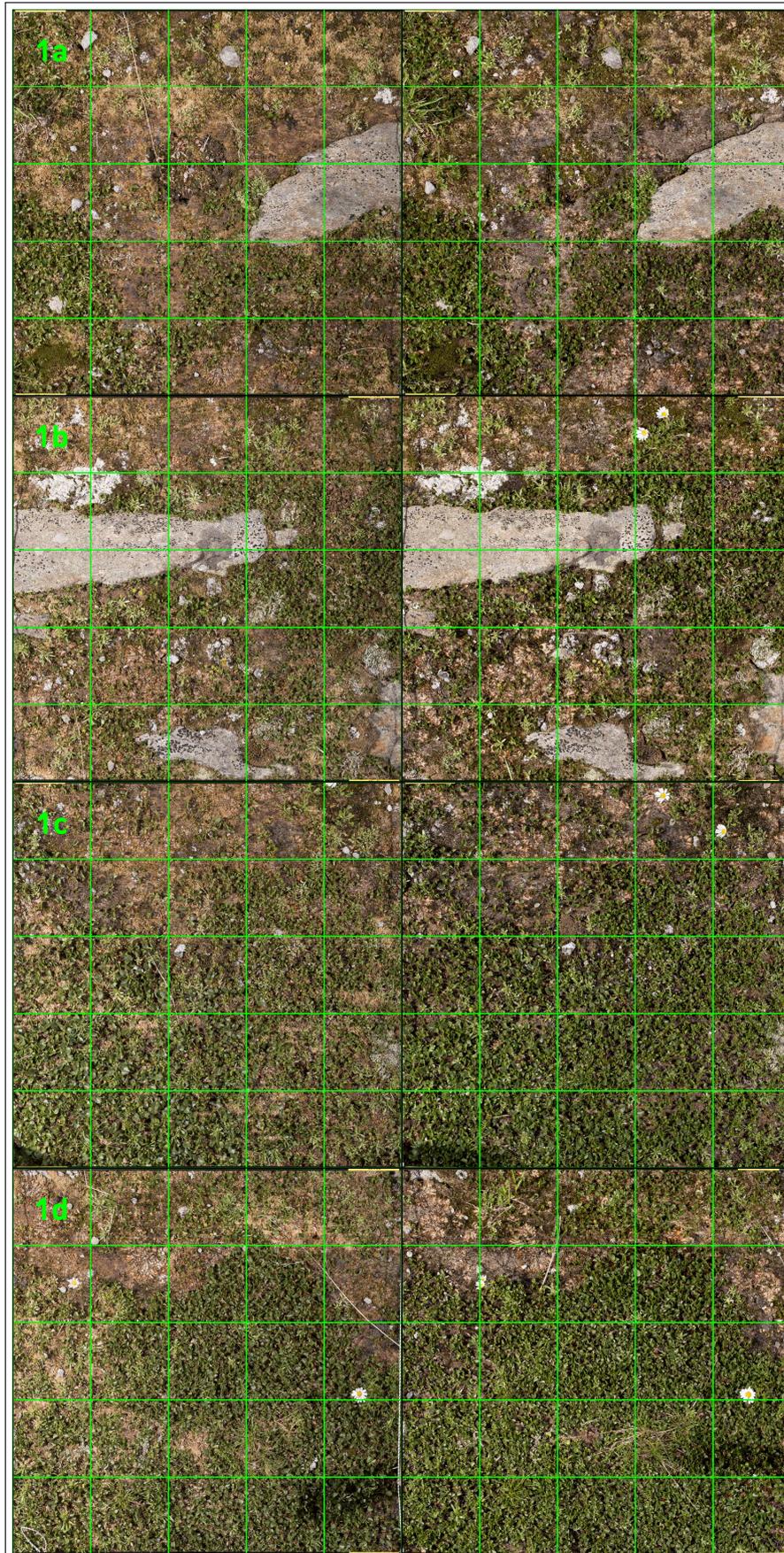




**Abbildung 6:** Beispiel eines rektifizierten Bildes von 50 cm Kantenlänge der Rasterfläche IN1 1b. Die grünen Linien teilen das Bild in 25 Teil-Rasterzellen á 10 × 10 cm (vgl. Abb. 7). Zu erkennen ist beispielsweise Kraut-Weide (*Salix herbacea*), Zwerg-Ruhrkraut (*Gnaphalium supinum*) und Kryptogamen-Synusien mit Safran-Flechte (*Solorina crocea*).



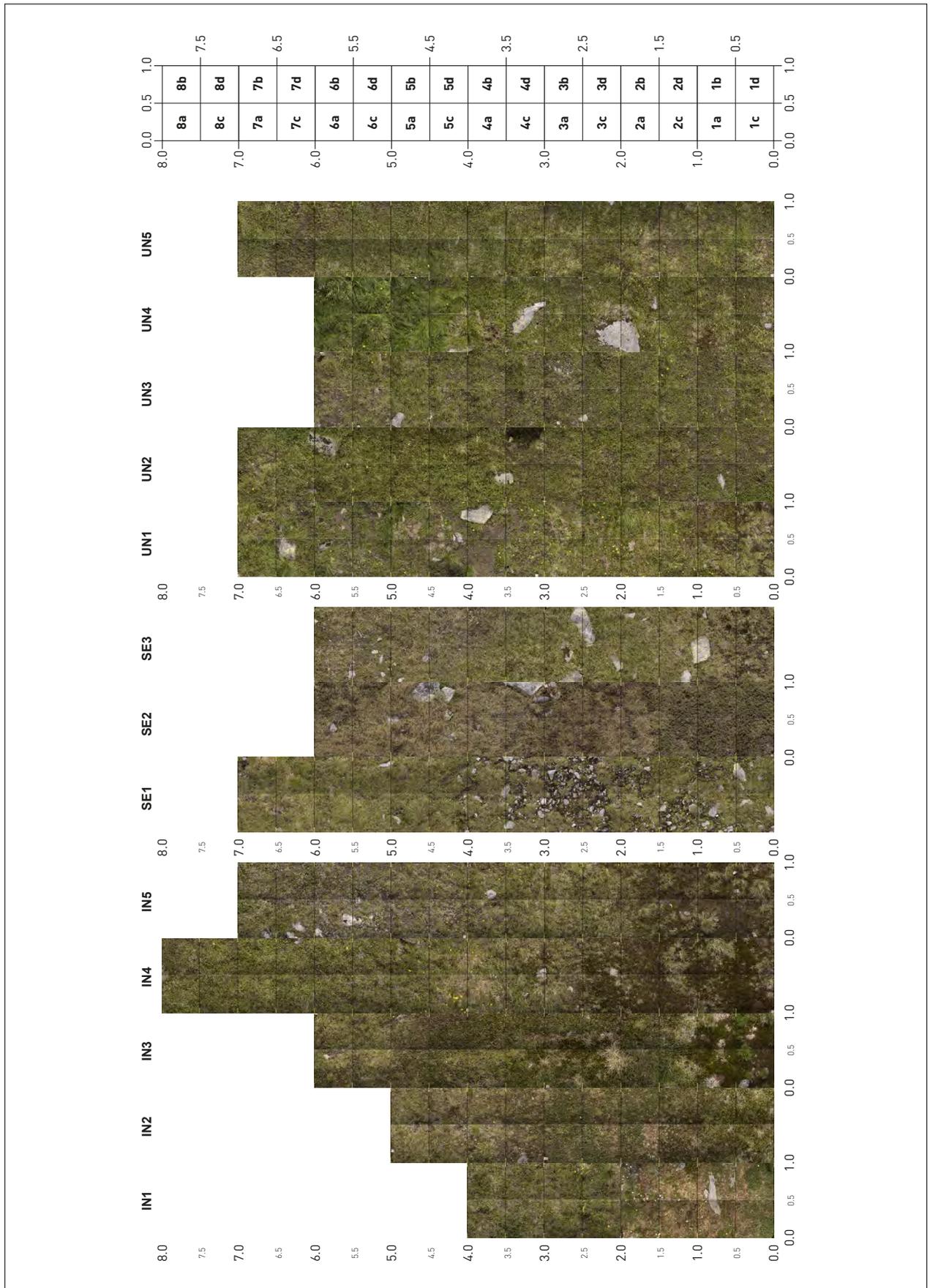
**Abbildung 7:** Beispiel einer Teil-Rasterzelle von 10 cm Kantenlänge aus der Abb. 6 (dritte Reihe, vierte Spalte, Nummer 14). Deutlich sind die einzelnen Blättchen der Kraut-Weide (*Salix herbacea*) und die Rosetten von Zwerg-Ruhrkraut (*Gnaphalium supinum*) zu identifizieren. Rechts neben dem Maßstabsbalken zeichnen sich die orangen Thallusunterseiten der Safran-Flechte (*Solorina crocea*) ab.



**Abbildung 8:** Exemplarischer Vergleich der Bildserien anhand des Transekts IN1. **Links:** rektifizierte Bilder aus 2017. **Rechts:** 2018. Die grünen Linien stellen einen Raster mit einer Zellgröße von 10 cm dar. Die Bezeichnung der jeweiligen Kachel ist links oben angegeben.



**Abbildung 9:** Bildbeispiele zum Interpretationsschlüssel zur Abgrenzung von Grenzlinien zwischen Vegetationsbeständen sowie Strukturen innerhalb dieser (Strukturmerkmal). Nummerierung gemäß Tab. 5 (Spalte Nr.).



**Abbildung 10:** Bildmosaik aller Einzelbilder aus dem Jahr 2017 (ohne UN6) sowie eindeutige Nummerierung der 0,5×0,5m Rasterflächen.

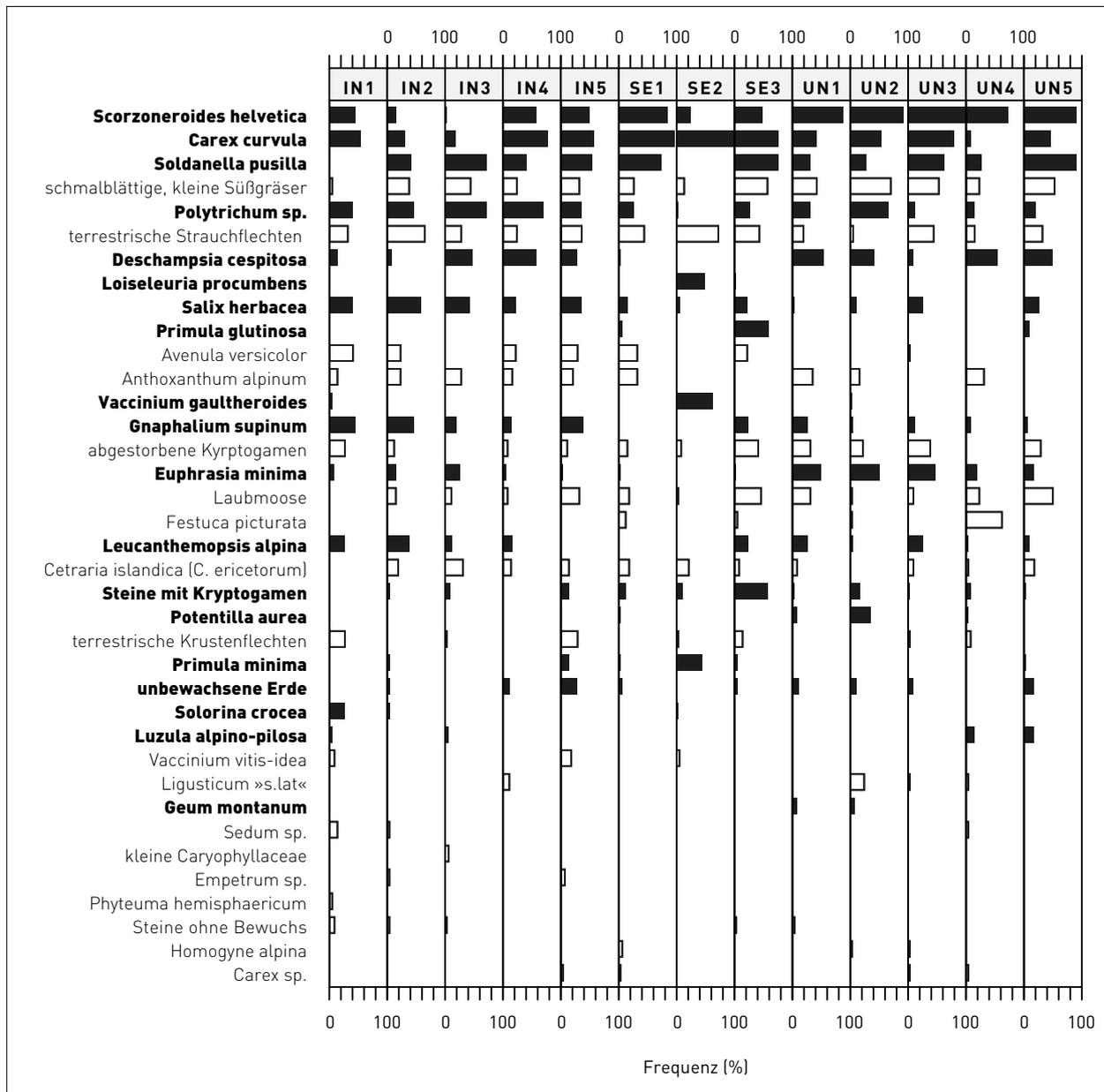
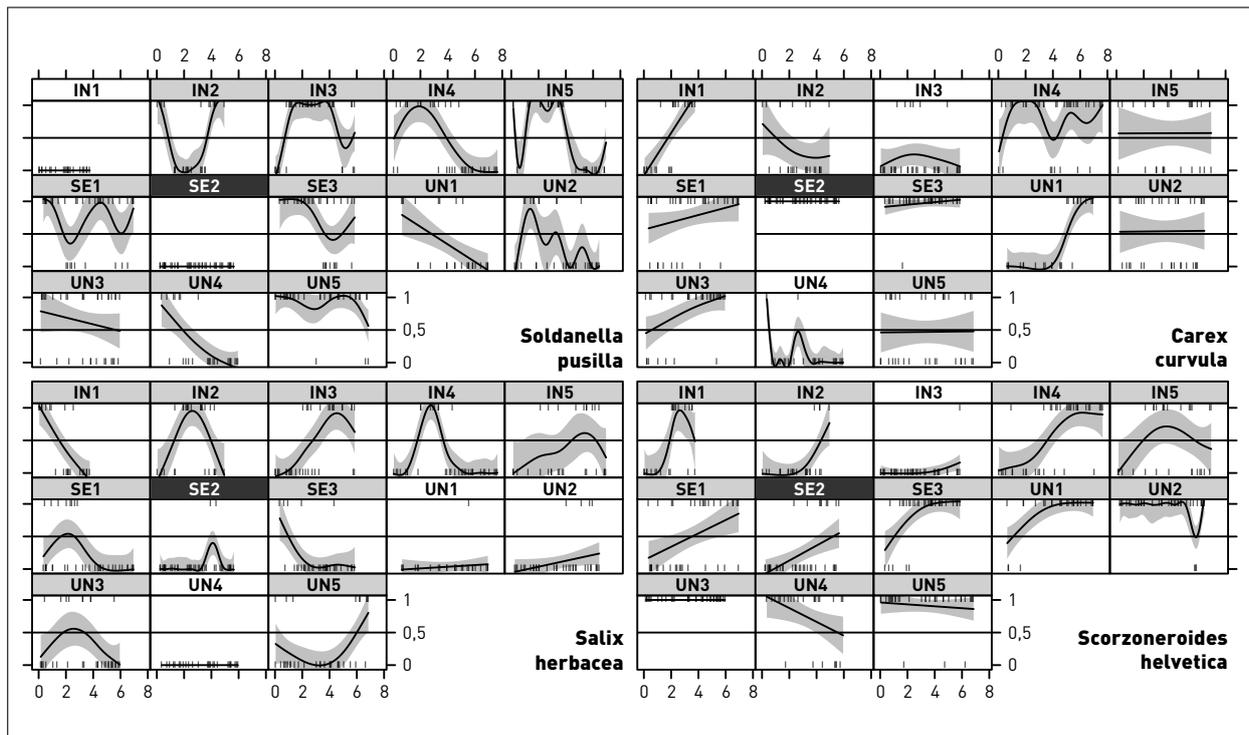


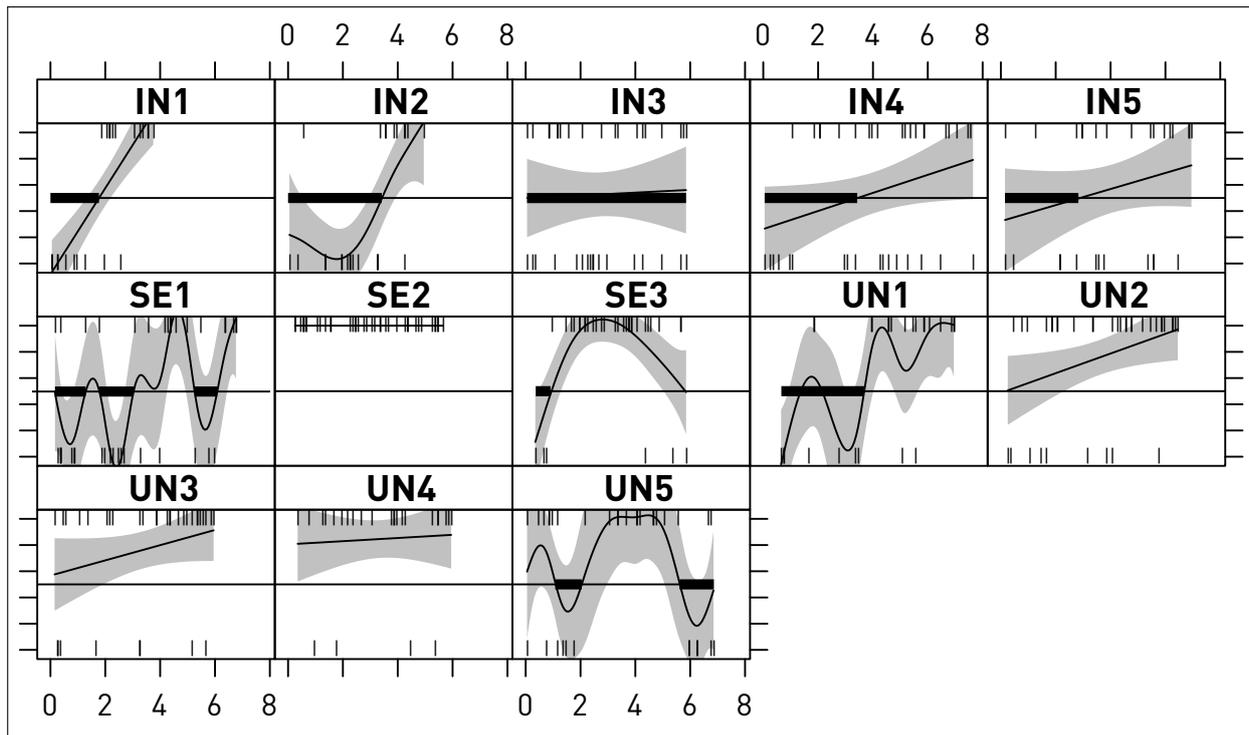
Abbildung 11: Graphische Häufigkeitstabelle der Bildkategorien mit Kennzeichnung (fett) von ausgewählten Arten (vgl. Tab. 4).





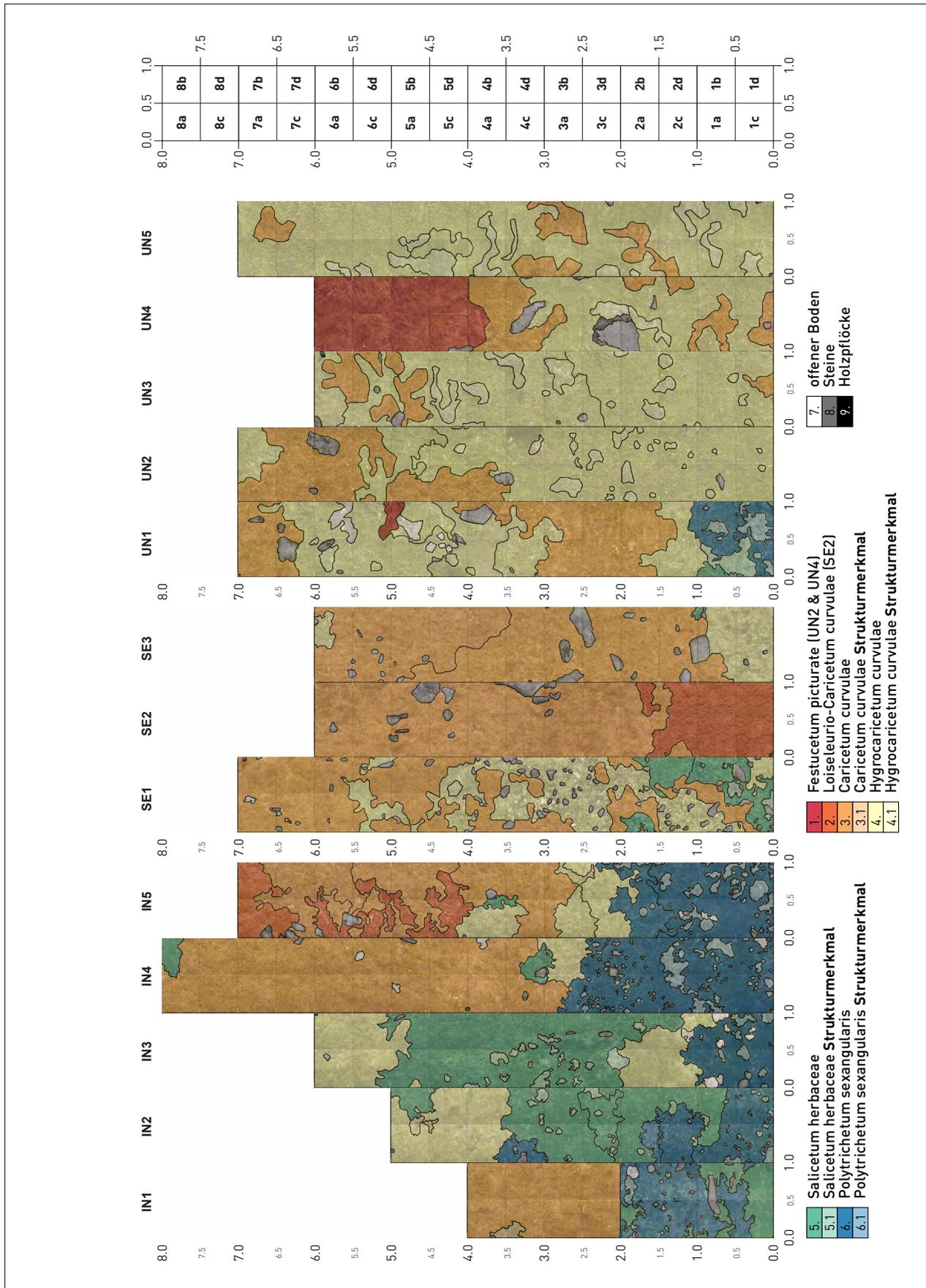
**Abbildung 12:** Präferenz-Muster für die häufigsten 4 Pflanzen-Arten entlang der Transekte von bis zu 8 m Länge (putative Produktivitäts-Gradienten). Graue Bänder sind Konfidenzintervalle der angepassten Kurven (GAM). Anteile der Kurve über der horizontalen Linie je Panel weisen auf ein modelliertes, 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 SE2 ist hervorgehoben (2 Arten fehlen). *Soldanella pusilla* meidet den eher extremen Schneeboden der Fläche IN1 (vgl. Abb. 6). Jede Art fehlt an 2 oder 3 Transekten.



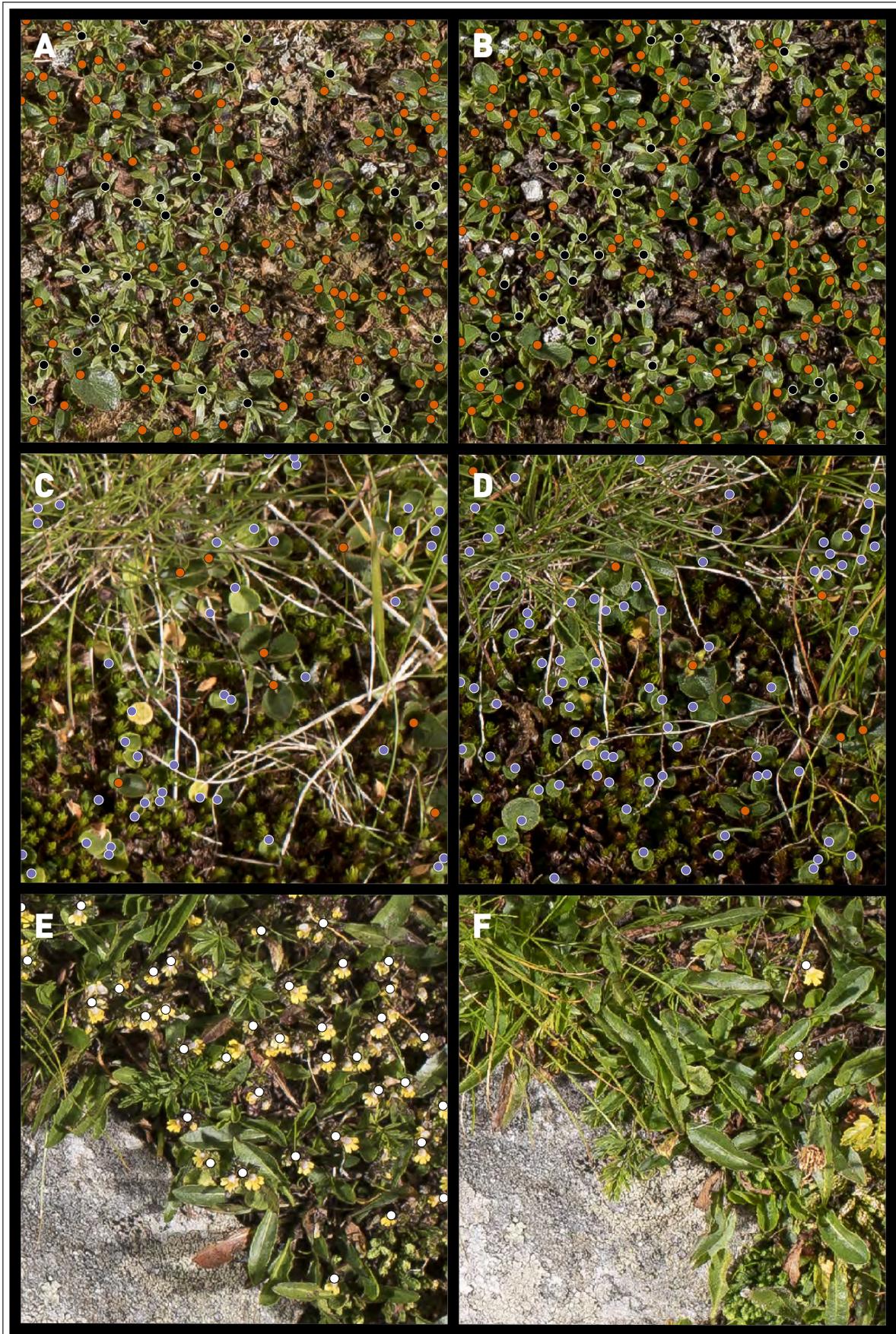


**Abbildung 13:** Verteilung der Cluster analog Abb. 12. Abschnitte am Transekt, die den Schneeböden zuzuordnen sind, sind mit dicker Linie gekennzeichnet. Der Erwartung entsprechend finden sich die Abschnitte mit Schneeböden links (zu Beginn des Transekts) und somit in der Regel in der konkaven Hangsituation des Pessimum; aber teils auch fleckig und dispers (z. B. SE1 und UN5).





**Abbildung 14:** Grenzlinien aller im Jahr 2017 bearbeiteten Transekte (exkl. UN6) sowie Nummernschema der Rasterflächen. Vgl. dazu auch Abb. 10.



**Abbildung 15:** Beispiel des Datensatzes zur Auswertung auf Populationsebene für 2017 (linke Spalte) vs. 2018 (rechte Spalte). **Blau:** *Soldanella pusilla*, **Braun:** *Salix herbacea*, **Schwarz:** *Gnaphalium supinum*, **Weiß:** *Euphrasia minima*. **A & B:** IN1 1c 10 cm Zelle 14.; **C & D:** IN3 4c 10 cm Zelle 15; **E & F:** UN2 1a 10 cm Zelle 14.



**Abbildung 16:** Antransport der Ausrüstung (Bild Stefan Pfeiffer, Salzburg).



**Tabelle 1:** Termini des Probenahmedesigns.

| Statistische Einheit   | Bedeutung   |
|------------------------|---|
| core sites             | Stichproben (Standorte)   |
| sampling units (plots) | Stichprobeneinheiten (Tranekte)   |
| subplots               | Hierachische Gliederung der Tranekte in 1 × 1 m Flächen mit vier darin enthaltenden 50 × 50 cm Quadraten (Rasterzellen) |
| subsample              | Zufallsunterauswahl in einer bestimmten Skala (z. B. 2 cm, 5 cm, 10 cm) basierend auf einem gesamten Tranektstreifen    |

**Tabelle 2:** Vergleich der Untersuchungszeitpunkte für beide Jahre. 2018 wurde am Standort Untersulzbachtal vor Ort biwarkiert.

| Tranekt               | Erstbefundung (2017) | Zweitbefundung (2018) |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Innerschlöss (IN)     | 31. Juli             | 1. August             |
| Untersulzbachtal (UN) | 1. August            | 30. und 31. Juli      |
| Seebachtal (SE)       | 15. August           | 13. August            |





**Tabelle 3:** Abstände der Ecken des Probenahme-Rasters zu den zwei im Jahr 2018 gesetzten Unterflurmarkierungen. K = Kopf (Transektende) und T = Tal (Transektbeginn, 0 m). Die Richtung der drei Messstrecken sind mit Links, Mitte und Rechts angegeben, wobei als Blickrichtung jeweils das gegenüberliegende Transektende definiert ist (vgl. Abb. 4). Beachte, die räumliche Teilung des Transekts IN1 wird mit K (0-2 m und 2-4 m) ausgezeichnet. Für Maße, bei denen die Spannung der Messlinie um einen Holzpflock zu berücksichtigen ist, werden systematisch beide Teilstrecken angegeben (z. B. 4 + 75,5 cm bei IN2 T, Rechts).

| Transekt | Seite | Abstand (cm) |       |             |
|----------|-------|--------------|-------|-------------|
|          |       | Links        | Mitte | Rechts      |
| IN1 0-2m | K     | 111          | 100   | 113         |
| IN1 0-2m | T     | 4 + 108,5    | 100   | 111         |
| IN1 2-4m | K     | 140,5        | 130   | 138         |
| IN1 2-4m | T     | 111          | 100   | 113,5       |
| IN2      | K     | 110,5        | 100   | 113,5       |
| IN2      | T     | 77,5         | 60    | 4 + 75,5    |
| IN3      | K     | 110,5        | 100   | 114         |
| IN3      | T     | 113          | 100   | 5 + 106,5   |
| IN4      | K     | 109,5        | 100   | 113,5       |
| IN4      | T     | 86           | 70    | 85,5        |
| IN5      | K     | 121          | 110   | 120         |
| IN5      | T     | 111          | 100   | 5+107,5     |
| SE1      | K     | 154,5        | 141   | 150         |
| SE1      | T     | 99           | 85    | 98,5        |
| SE2      | K     | 113,5        | 100   | 3,5 + 105,5 |
| SE2      | T     | 59           | 31,5  | 58,5        |
| SE3      | K     | 4 + 107,5    | 100   | 111         |
| SE3      | T     | 85           | 70    | 4,5 + 83    |
| UN1      | K     | 108,5        | 100   | 112,5       |
| UN1      | T     | 94           | 80    | 93          |
| UN2      | K     | 64           | 43,5  | 68,5        |
| UN2      | T     | 71,5         | 50    | 70          |
| UN3      | K     | 110          | 100   | 112         |
| UN3      | T     | 114,5        | 100   | 110         |
| UN4      | K     | 123,5        | 115   | 126         |
| UN4      | T     | 112,5        | 100   | 111         |
| UN5      | K     | 111,5        | 100   | 110,5       |
| UN5      | T     | 83,5         | 67    | 82          |
| UN6      | K     | 111,5        | 100   | 110,5       |
| UN6      | T     | 55           | 25    | 56          |





**Tabelle 4:** 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. Klammersausdruck der fetten Zwischenüberschriften). †: Die Gruppe enthält die Arten *Agrostis rupestris*, *Nardus stricta*, *Oreochloa disticha* sowie (selten) Kümmerexemplare von *C. curvula* und *F. picturata*, die alle nicht zweifelsfrei zu attribuieren waren. ‡: Morphospezies.

| Code                                 |   | Kategorie   |
|--------------------------------------|---|---|
| <b>Steine (r)</b>                    |   |   |
| rcr                                  | × | Steine mit Kryptogamen  |
| ruv                                  |   | Steine ohne Bewuchs   |
| <b>Erde (s)</b>                      |   |   |
| sbs                                  | × | unbewachsene Erde   |
| sdc                                  |   | abgestorbene terrestrische Kryptogamen  |
| <b>Flechten (l)</b>                  |   |   |
| 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.)                                      |
| <b>Moose (b)</b>                     |   |   |
| bps                                  | × | <i>Polytrichum</i> sp. ( <i>P. sexangulare</i> , <i>P. juniperinum</i> )                          |
| bbr                                  |   | Laubmoose   |
| blw                                  |   | Lebermoose  |
| <b>Gräser, Seggen und Simsen (g)</b> |   |   |
| 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) †   |
| <b>Kräuter (h)</b>                   |   |   |
| 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>Scorzoneroideis helvetica</i>  |
| hsp                                  | × | <i>Soldanella pusilla</i> (ssp. <i>alpicola</i> )   |
| <b>Zwergsträucher (d)</b>            |   |   |
| 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>  |
| dw                                   |   | <i>Vaccinium vitis-idea</i>   |





**Tabelle 5:** Interpretationsschlüssel zur Abgrenzung von Grenzlinien zwischen Vegetationsbeständen sowie Strukturen innerhalb dieser (Strukturmerkmal). Vgl. dazu die Bildbeispiele in Abb. 9.

| Nr.  | Bezeichnung                                      | Kurzbeschreibung  |
|------|--|---|
| 1.   | <i>Festucetum picturatae</i>                     | <i>Festuca picturata</i> (Hochgras) dominiert.  |
| 2.   | <i>Loiseleurio-Caricetum curvulae</i>            | mit <i>Loiseleuria procumbens</i> und diagnostischen Strauchflechten.   |
| 3.   | <i>Caricetum curvulae</i>                        | mit dominierender <i>Carex curvula</i> .  |
| 3.1. | Strukturmerkmal <i>Caricetum curvulae</i>        | Flecken von Ericaceen-Sträuchern (insbesondere <i>Vaccinium gaultheroides</i> ) in <i>Caricetum curvulae</i> .  |
| 4.   | <i>Hygrocaricetum curvulae</i>                   | in der Regel schütterere Deckung von <i>Carex curvula</i> , oft mit dominierenden kleinen Kräutern ( <i>Scorzoneroides helvetica</i> , <i>Soldanella pusilla</i> , <i>Euphrasia minima</i> , <i>Leucanthemopsis alpina</i> ).   |
| 4.1. | Strukturmerkmal <i>Hygrocaricetum curvulae</i>   | geschlossene und auffällige Grasflecken $\geq 100 \text{ cm}^2$ (entsprechend fünfundzwanzig 2 cm Zellen) in <i>Hygrocaricetum curvulae</i> .   |
| 5.   | <i>Salicetum herbaceae</i>                       | deckende Krautweidenspaliere inklusive Bestände mit hoher Deckung von <i>Soldanella pusilla</i> und nur zerstreuten Individuen von <i>Salix herbacea</i> , teils mit vegetationsarmen Lücken (offener Boden und Bodenkrusten).  |
| 5.1. | Strukturmerkmal <i>Salicetum herbaceae</i>       | offensichtliche Grasflecken $\geq 48 \text{ cm}^2$ (entsprechend zwölf 2 cm Zellen) in <i>Salicetum herbaceae</i> .   |
| 6.   | <i>Polytrichetum sexangulare</i>                 | mit dominantem Vorkommen von <i>Polytrichum sexangulare</i> und/oder <i>Solorina crocea</i> , weiters mit zahlreichen vegetationsarmen Lücken (offener Boden und Bodenkrusten).   |
| 6.1. | Strukturmerkmal <i>Polytrichetum sexangulare</i> | kleinste Grasflecken $\geq 8 \text{ cm}^2$ (entsprechend zwei 2 cm Zellen) in <i>Polytrichetum sexangulare</i> .  |
| 7.   | offener Boden                                    | unbewachsener Boden, Bodenkrusten, auch abgestorbene Grashorste, Moosteppiche, Tierkot u. a.; weiters auch schütter bewachsene Lücken innerhalb von <i>Hygrocaricetum curvulae</i> oder <i>Caricetum curvulae</i> , nicht aber Lücken in <i>Polytrichetum sexangulare</i> , welches sich in Summe durch Lückenstrukturen auszeichnet. |
| 8.   | Steine   | Steine größer 5 cm im längsten Durchmesser, am Bildrand auch kleiner, wenn sich der Umriss des Steins darüberhinaus fortsetzt; falls der Stein mit Moosen bewachsen ist, löst eine Deckung von mehr als 10 % eine eigene Grenzlinie aus.  |
| 9.   | Holzpflöcke                                      | Transektmarkierungen aus Kanthölzern die auf den Bildern randlich angeschnitten sind.   |





**Tabelle 6:** Auf Basis von »Individuen« ausgewertete Arten, mit Angaben zu ökologischer Einnischung, wesentlichen vegetativen Merkmalen (nach Fischer et al. 2008) und Angabe der gezählten und verorteten Pflanzenteile (Referenzpunkt, vgl. dazu Abb. 15).

| Code | Art  | Merkmale   | Referenzpunkt  |
|------|--|--|--|
| 1    | <i>Euphrasia minima</i><br>( <i>Caricion curvulae</i> )                            | Therophyt, Halbparasit; (1)2-15(25) cm hoch, meist unverzweigt, kurz behaart, Blätter meist gleich lang wie breit, jederseits mit 1-4 nicht begrenzten Zähnen. Krone (5)6-7(8) mm lang, weiss oder gelb (bläulich oder bunt).  | Blühender oder abgeblühter Trieb   |
| 2    | <i>Gnaphalium supinum</i><br>( <i>Salicion herbaceae</i> )                         | Mehrjähriger Hemikryptophyt; (1)2-8(10) cm hoch, Rhizom kriechend, meist mehrere bis zahlreiche sterile Blattrosetten bildend, Blätter schmal-lanzettlich, weissfilzig, meist höchstens 3 cm lang und 1-2(3) mm breit. Blütenköpfchen einen kurzen, ährigen Gesamtblütenstand bildend.                           | Knospe der (Teil-)Rosette  |
| 3    | <i>Primula glutinosa</i><br>( <i>Caricion curvulae</i> )                           | Mehrjähriger Hemikryptophyt; 3-8 cm hoch, kahl, aber drüsig-klebrig, Blätter spatelförmig, in den breit geflügelten, kurzen Stiel verschmälert, gelblichgrün, vorn fein gezähnt, seltener ganzrandig.  | Knospe der Rosette   |
| 4    | <i>Primula minima</i><br>( <i>Caricion curvulae</i> )                              | Mehrjähriger Hemikryptophyt; 1-3 cm hoch, Blätter 0,5-1,5(3) cm lang, verkehrt dreieckig, Seiten ganzrandig, Vorderkante mit 3-9 groben Sägezähnen.  | Knospe der Rosette   |
| 5    | <i>Salix herbacea</i><br>( <i>Salicion herbaceae</i> )                             | Verholzter Chamaephyt (Geophyt); 2-3(8) cm hoch, niederliegender Spalierstrauch mit im Boden eingewachsenen Zweigen (unterirdisch kriechend) und krautigen, oberirdischen Trieben, Laubblattspreite rundlich 1-1½× so lang wie breit, ca. 0,5-3(8) cm lang, beiderseits grün, glänzend, kahl, Rand fein gezähnt. | Frucht oder Knospe mit 2 schüsseligen Blättchen bzw. (Teil-)Trieb mit 2 bis 3(4) Blättchen |
| 6    | <i>Soldanella pusilla</i> (ssp. <i>alpicola</i> )<br>( <i>Salicion herbaceae</i> ) | Mehrjähriger Hemikryptophyt; 2-10 cm hoch, Blätter kurz gestielt, dünn, kreisrund bis nierenförmig, mit deutlicher Basalbucht, Durchmesser meist weniger als 1 cm, (4)10(20) mm breit, Nerven oberseits deutlich hervortretend (runzelig), Blattoberseite punktiert erscheinend.                                 | Basalbucht eines Blättchens  |





**Tabelle 7:** Prozentuale Flächenanteile der abgegrenzten Vegetationsstrukturen (UN6 wurde nicht ausgewertet). **1:** Festucetum picturatae; **2:** Loiseleurio-Caricetum curvulae; **3:** Caricetum curvulae; **3.1:** Strukturmerkmal Ericaceen in Caricetum curvulae; **4:** Hygrocaricetum curvulae; **4.1:** Strukturmerkmal Grasflecken in Hygrocaricetum curvulae; **5.:** Salicetum herbaceae; **5.1:** Strukturmerkmal Grasflecken in Salicetum herbaceae; **6:** Polytrichetum sexangularis; **6.1:** Strukturmerkmal Grasflecken in Polytrichetum sexangularis; **7:** offener Boden, abgestorbene Moosteppe und Tierkot oder schütter bewachsene Lücken in Hygrocaricetum curvulae oder Caricetum curvulae; **8:** Steine  $\geq 5$  cm im längsten Durchmesser.

| Transekt | 1.   | 2.   | 3.   | 3.1 | 4.   | 4.1  | 5.   | 5.1 | 6.   | 6.1 | 7.  | 8.  |
|----------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|
| IN1      |      |      | 48.6 | 1.3 |      |      | 15.4 |     | 29.9 | 2.0 | 0.5 | 2.0 |
| IN2      |      |      |      |     | 26.6 |      | 43.3 | 2.7 | 24.8 | 2.1 |     | 0.2 |
| IN3      |      |      |      |     | 29.7 |      | 48.6 | 4.0 | 13.0 | 2.1 | 1.7 | 0.6 |
| IN4      |      |      | 60.3 |     | 3.6  |      | 2.9  |     | 26.1 | 5.5 | 0.7 | 0.6 |
| IN5      |      | 17.1 | 36.9 |     | 15.5 |      | 0.6  |     | 22.4 | 5.2 | 0.3 | 1.6 |
| SE1      |      |      | 49.2 |     | 33.8 | 0.3  | 10.4 | 0.9 |      |     | 0.2 | 4.8 |
| SE2      |      | 24.6 | 70.8 |     |      |      |      |     |      |     |     | 4.4 |
| SE3      |      |      | 79.1 |     | 14.4 |      | 0.3  |     |      |     |     | 6.1 |
| UN1      | 1.3  |      | 33.7 |     | 43.8 | 1.4  | 0.8  | 2.5 | 8.1  | 2.8 | 2.6 | 2.8 |
| UN2      |      |      | 28.1 |     | 65.1 | 4.7  |      |     |      |     |     | 1.9 |
| UN3      |      |      | 12.0 |     | 79.3 | 7.6  |      |     |      |     |     | 0.9 |
| UN4      | 35.3 |      | 19.9 |     | 36.1 | 2.7  |      |     |      |     |     | 5.7 |
| UN5      |      |      | 11.5 |     | 77.3 | 11.0 |      |     |      |     |     | 0.0 |

**Tabelle 8:** Anzahl der total gezählten Individuen bzw. Spross-Strukturen getrennt nach Jahren mit Angabe der Differenzen.

| Art                | Jahr |      | Differenz |
|--------------------|------|------|-----------|
|                    | 2017 | 2018 |           |
| Ephrasia minima    | 692  | 436  | -256      |
| Gnaphalium supinum | 682  | 680  | -2        |
| Primula glutinosa  | 130  | 137  | +7        |
| Primula minima     | 281  | 260  | -21       |
| Salix herbacea     | 2000 | 2202 | +202      |
| Soldanella pusilla | 5633 | 5880 | +247      |
| Summe              | 9418 | 9595 | +177      |





**Tabelle 9:** Wilcoxon Test für alle Arten und Transekte. Für signifikante Stichproben werden die summierten Individuenzahlen angegeben (**Total:** 2017/2018), wie auch die **Richtung** der Änderung. Stichproben (**N**) kleiner dem Schwellenwert von vier sind nicht dargestellt (*Ephrasia minima*: IN1, IN4, IN5 und SE3; *Gnaphalium supinum*: SE2, UN2 und UN4; *Primula minima*: IN2, SE1, SE3 und UN5; *Salix herbacea*: UN1 und UN4.), ebenso Transekte an denen eine Art nicht vorkommt.

| Transekt | Art                       | N                         | Statistik | P-Wert | Sig. | Richtung       | Total   |        |                |                |          |
|----------|---------------------------|---------------------------|-----------|--------|------|----------------|---------|--------|----------------|----------------|----------|
| IN2      | <i>Ephrasia minima</i>    | 5                         | 14        | 0.1025 | *    | <i>Abnahme</i> | 72/17   |        |                |                |          |
| IN3      |                           | 9                         | 41        | 0.0324 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN1      |                           | 17                        | 36        | 0.1023 | ***  | <i>Abnahme</i> | 303/118 |        |                |                |          |
| UN2      |                           | 28                        | 307       | 0.0001 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN3      |                           | 26                        | 214       | 0.1624 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN4      |                           | 4                         | 4,5       | 1      |      |                |         |        |                |                |          |
| UN5      |                           | 7                         | 6,5       | 0.4568 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN1      | <i>Gnaphalium supinum</i> | 10                        | 16,5      | 0.5113 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN2      |                           | 17                        | 90        | 0.2647 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN3      |                           | 16                        | 51,5      | 0.9748 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN4      |                           | 11                        | 23        | 1      |      |                |         |        |                |                |          |
| IN5      |                           | 12                        | 21,5      | 0.3208 |      |                |         |        |                |                |          |
| SE1      |                           | 15                        | 22,5      | 0.6385 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN1      |                           | 9                         | 13        | 0.5261 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN3      |                           | 9                         | 20,5      | 0.7737 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN5      |                           | 5                         | 3         | 1      |      |                |         |        |                |                |          |
| SE1      | <i>Primula glutinosa</i>  | 29                        | 96        | 0.1914 |      |                |         |        |                |                |          |
| SE3      |                           | 4                         | 1         | 1      |      |                |         |        |                |                |          |
| UN5      |                           | 6                         | 12        | 0.2785 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN5      | <i>Primula minima</i>     | 4                         | 0         | 0.0975 | *    | <i>Abnahme</i> | 241/207 |        |                |                |          |
| SE2      |                           | 19                        | 111       | 0.0270 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN1      | <i>Salix herbacea</i>     | 10                        | 3         | 0.0244 | *    | <i>Zunahme</i> | 541/666 |        |                |                |          |
| IN2      |                           | 17                        | 48,5      | 0.5317 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN3      |                           | 25                        | 85        | 0.1076 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN4      |                           | 10                        | 32        | 0.2777 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN5      |                           | 17                        | 22        | 0.0585 |      |                |         |        |                |                |          |
| SE1      |                           | 20                        | 49        | 0.3310 |      |                |         |        |                |                |          |
| SE2      |                           | 4                         | 8         | 0.3447 |      |                |         |        |                |                |          |
| SE3      |                           | 10                        | 18,5      | 0.6754 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN2      |                           | 11                        | 54,5      | 0.0596 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN3      |                           | 15                        | 64        | 0.4867 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN5      |                           | 12                        | 39,5      | 1      |      |                |         |        |                |                |          |
| IN2      |                           | <i>Soldanella pusilla</i> | 11        | 25     |      |                |         | 0.5047 | *              | <i>Zunahme</i> | 865/1054 |
| IN3      |                           |                           | 30        | 124,5  |      |                |         | 0.0269 |                |                |          |
| IN4      | 16                        |                           | 92,5      | 0.0128 |      |                |         |        |                |                |          |
| IN5      | 16                        |                           | 88        | 0.3122 |      |                |         | *      | <i>Abnahme</i> | 128/77         |          |
| SE1      | 35                        |                           | 199       | 0.0582 |      |                |         |        |                |                |          |
| SE3      | 28                        |                           | 177,5     | 0.9695 | *    | <i>Abnahme</i> | 185/110 |        |                |                |          |
| UN1      | 11                        |                           | 60        | 0.0182 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN2      | 12                        |                           | 50        | 0.4074 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN3      | 25                        |                           | 183,5     | 0.0657 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN4      | 11                        |                           | 25,5      | 0.8782 |      |                |         |        |                |                |          |
| UN5      | 33                        |                           | 229       | 0.3619 |      |                |         |        |                |                |          |





**Tabelle 10:** Abweichungen zwischen den Bildserien 2017 und 2018 auf Basis der Grenzlinien von Steinen  $\geq 5$  cm. **N:** Anzahl der Steine (komplette Stichprobe); **Distanz:** Median der Distanz der Zentroide (2017 vs. 2018) in cm  $\pm$  MAD (*»median absolute deviation«*); **Überlappung:** prozentuale Überlappung zweier Geometrien; **Differenz:** mittlere Flächendifferenz in Prozent. Am Transekt UN2 war einer von vier Steinen im Jahr 2018 nicht mehr vorhanden. Beachte, zu UN5 liegt nur eine Messung vor.

| Transekt | N  | Distanz        | Überlappung | Differenz |
|----------|----|----------------|-------------|-----------|
| IN1      | 13 | 0.7 $\pm$ 0.30 | 80          | 7         |
| IN2      | 2  | 0.5 $\pm$ 0.15 | 96          | 18        |
| IN3      | 7  | 0.5 $\pm$ 0.30 | 87          | 5         |
| IN4      | 7  | 0.4 $\pm$ 0.44 | 94          | 7         |
| IN5      | 13 | 0.4 $\pm$ 0.30 | 96          | 5         |
| SE1      | 82 | 1.1 $\pm$ 0.74 | 72          | -2        |
| SE2      | 13 | 0.3 $\pm$ 0.30 | 96          | 1         |
| SE3      | 26 | 0.5 $\pm$ 0.59 | 92          | 2         |
| UN1      | 10 | 0.4 $\pm$ 0.22 | 95          | 3         |
| UN2      | 3  | 0.6 $\pm$ 0.44 | 96          | 6         |
| UN3      | 7  | 0.5 $\pm$ 0.59 | 84          | -6        |
| UN4      | 8  | 0.6 $\pm$ 0.59 | 90          | 3         |
| UN5      | 1  | 0.3 $\pm$ 0.00 | 93          | -7        |





**Medieninhaber und Herausgeber, Verleger:**

Nationalparkrat Hohe Tauern

Kirchplatz 2, 9971 Matri

Tel.: +43 (0) 4875 / 5112 | E-Mail: [nationalparkrat@hohetauern.at](mailto:nationalparkrat@hohetauern.at)

