



Wechselwirkung zwischen Erosion und Vegetation auf der Brandfläche II Fuorn

Bachelorarbeit von Mirjam Bader

Betreuung: Sabine Güsewell

2012

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	2
2	Einleitung	2
3	Beschreibung des Untersuchungsgebietes	4
4	Material und Methoden	6
4.1	Vegetationsaufnahmen	6
4.2	Erosion und Topographie	6
4.2.1	Erosionsklassen	6
4.2.2	Topographie	11
4.2.3	Verteilung der Untersuchungsflächen	13
4.3	Bodenproben	13
4.4	Statistische Datenauswertung	14
5	Resultate	15
5.1	Häufigste Arten	15
5.2	Artenzahl, Deckungsgrad und Erosion	16
5.3	Clusteranalyse	17
5.4	Hauptkoordinatenanalyse	18
5.5	Kanonische Korrespondenzanalyse	19
5.6	Boden	19
6	Diskussion	23
6.1	Allgemeine Überlegungen	23
6.2	Unterschiede zwischen Wald/Waldrand und Brandfläche	23
6.3	Unterschiede innerhalb der Brandfläche	24
6.4	Einfluss von Erosion und Vegetation auf den C- und N-Gehalt	25
7	Schlussfolgerungen	27
8	Dank	28
9	Literatur	28
10	Abbildungsverzeichnis	29

1 Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht den Zusammenhang zwischen Erosion, Vegetation und Bodeneigenschaften auf der Brandfläche Il Fuorn im Schweizerischen Nationalpark. Es wird auf die Frage eingegangen, wie sich unterschiedlich stabile Bereiche auf der Brandfläche und im angrenzenden Bergföhrenwald bezüglich Vegetation und Bodeneigenschaften unterscheiden. Dazu wurden auf der Brandfläche und im angrenzenden Wald Vegetationsaufnahmen durchgeführt sowie Bodenproben entnommen. Die Bodenproben wurden im Labor auf ihren Gehalt an organischem Kohlenstoff und Stickstoff analysiert. Ausserdem wurde die Stärke der Erosion abgeschätzt und klassiert.

Die Resultate zeigen, dass sich die stabilen Waldflächen in der Bodenvegetation deutlich von der offenen, instabilen Brandfläche unterscheiden. 23% der Varianz in den Vegetationsdaten kann durch den Unterschied Wald/Waldrand vs. Brandfläche erklärt werden. Innerhalb der Brandfläche ist die Differenzierung durch verschiedene Erosionsstärken deutlich schwächer (11% erklärte Varianz). Grossräumig kann die Erosion die unterschiedlichen Vegetationsverhältnisse folglich gut erklären, kleinflächige Muster sind dadurch allerdings nur schwer zu erfassen. Die Gehalte an organischem Kohlenstoff und Stickstoff sind positiv mit dem Deckungsgrad und der Bodenstabilität korreliert. Daraus kann geschlossen werden, dass die Vegetation bei der Akkumulation von Nährstoffen und der Verminderung der Erosion eine wichtige Rolle spielt.

2 Einleitung

In den subalpinen Nadelwäldern der nördlichen Zentralalpen sind Waldbrände und Bodenbewegungen zwei wichtige Störfaktoren. Obwohl Waldbrände vor allem in der mediterranen Klimazone untersucht werden, sind alte Brandflächen auch in den Zentralalpen an Südhängen verbreitet (Sass et al. 2012). Durch das Feuer wird oft sowohl die Vegetation als auch die Humusaufgabe zerstört (Geissler & Hartmann 2000), wodurch an Steilhängen verstärkte Erosion auftritt (Sass et al. 2012). Die Vegetation erholt sich oft nur langsam, manche Flächen bleiben jahrhundertlang waldfrei (Sass et al. 2012). Dies hängt auch mit der gehemmten Bodenbildung auf den lockeren Karbonatgesteinen zusammen, welche im Gebiet der Brandfläche vorherrschen (Zoller 1995).

Im Jahr 1951 wurde der Bergföhrenwald bei Il Fuorn auf einer Fläche von 6 ha durch einen Waldbrand zerstört (Geissler & Hartmann 2000). Das intensive Feuer verbrannte auch die Humusschicht, wodurch die oberen Bodenschichten auf der steilen Brandfläche instabiler wurden (Ochsner 1986). Seit dem Brand ist jede Wiederbewaldung ausgeblieben, und grosse Teile der Fläche befinden sich immer noch in einem Pionierstadium (Geissler & Hartmann 2000). Dadurch unterscheidet sie sich deutlich von anderen Brandflächen in der Schweiz. So weist die Brandfläche in Leuk bereits neun Jahre nach dem Waldbrand wieder viele Jungbäume auf, obwohl auch hier der Brand sehr intensiv war (Wohlgemuth et al. 2010).

Die fehlende Wiederbewaldung wird einerseits auf die Beweidung und andererseits auf die Erosion zurückgeführt (Geissler & Hartmann 2000). Die Bedeutung der Beweidung ist daran zu erkennen, dass typische Pflanzenarten von Wiesen und Weiden zugenommen haben, besonders in den Bereichen, wo die Humusschicht erhalten blieb. Diese Entwicklung unterscheidet sich von früheren Waldbränden im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks, bei denen gemäss Pollenuntersuchungen vor allem *Salix*-Arten, *Alnus viridis* und verschiedene *Cyperaceae* gefördert wurden (Tinner et al. 2005, Stähli et al. 2006). Der Einfluss der Erosion wurde auf der Brandfläche noch nicht näher untersucht. Dieser Arbeit liegt deshalb die folgende Hypothese zugrunde:

Die Erosion verhindert die Wiederbewaldung auf der Brandfläche oder verzögert sie zumindest.

Auf insgesamt 105 Flächen von je 4 m² wurden Vegetationsaufnahmen durchgeführt und die Stärke der Erosion abgeschätzt. Zusätzlich werden Bodenparameter (Gehalt an organischem Kohlenstoff und Stickstoff) in die Untersuchung mit einbezogen. Die Vegetation trägt durch verschiedene Mechanismen zur Stabilisierung der Böden bei. Sie hält Sedimente zurück, verbessert die Interzeption des Niederschlages und erhöht die Transpiration (Zuazo & Pleguezuelo 2008, Merz et al. 2009). Zudem ist auch die unterirdische Biomasse wichtig (Gyssels & Poesen 2003). Die Wurzeln binden lose Bodenpartikel und tragen durch die Bildung von Makroporen zur besseren Infiltrationsfähigkeit der Böden bei (Pohl et al. 2012). Dabei spielt die Artenzahl eine wichtige Rolle: Durch die erhöhte Vielfalt an Wurzeltypen kann Artenvielfalt positiv auf die Stabilität von Böden wirken (Pohl et al. 2009). Der Gehalt an organischem Material und Stickstoff ist positiv mit der Stabilität von Bodenaggregaten korreliert (Chaney & Swift 1984, Pohl et al. 2012). In der vorliegenden Arbeit sollen die folgenden Fragen untersucht werden:

- Wie unterscheiden sich Flächen im Bergföhrenwald bezüglich Artenzusammensetzung und Bodenstabilität von Flächen auf der Brandfläche?
- Können auch innerhalb der Brandfläche Unterschiede in der Vegetationsbedeckung festgestellt werden? Können diese auf die Erosion zurückgeführt werden, oder gibt es noch andere relevante Parameter (z.B. Meereshöhe, Topographie)?
- Hängt der Gehalt an organischem Kohlenstoff und Stickstoff in den obersten Bodenschichten von der Erosion ab? Welchen Einfluss hat die Vegetationsbedeckung auf die C- und N-Gehalte?

3 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Die Brandfläche oberhalb des Hotels Il Fuorn im Schweizerischen Nationalpark stellt das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit dar. Die südexponierte Fläche reicht von 1820 m.ü.M. bis auf 2140 m.ü.M.. Gegen unten (Richtung Süden) wird sie von einer Fettwiese begrenzt, auf der Ost- und Westseite grenzt sie an geschlossenen Bergföhrenwald. Entstanden ist die Brandfläche im Jahr 1951. Im Winter ging in diesem Gebiet eine Lawine nieder, die eine Schneise im Bergföhrenwald verursachte und viel Fallholz hinterliess. Bei den darauf folgenden Aufräumarbeiten gerieten das Fallholz sowie Teile des übrig gebliebenen Waldes in Brand, wodurch die Bodenvegetation und teilweise auch die Humusschicht vollständig verbrannten (Geissler & Hartmann 2000).

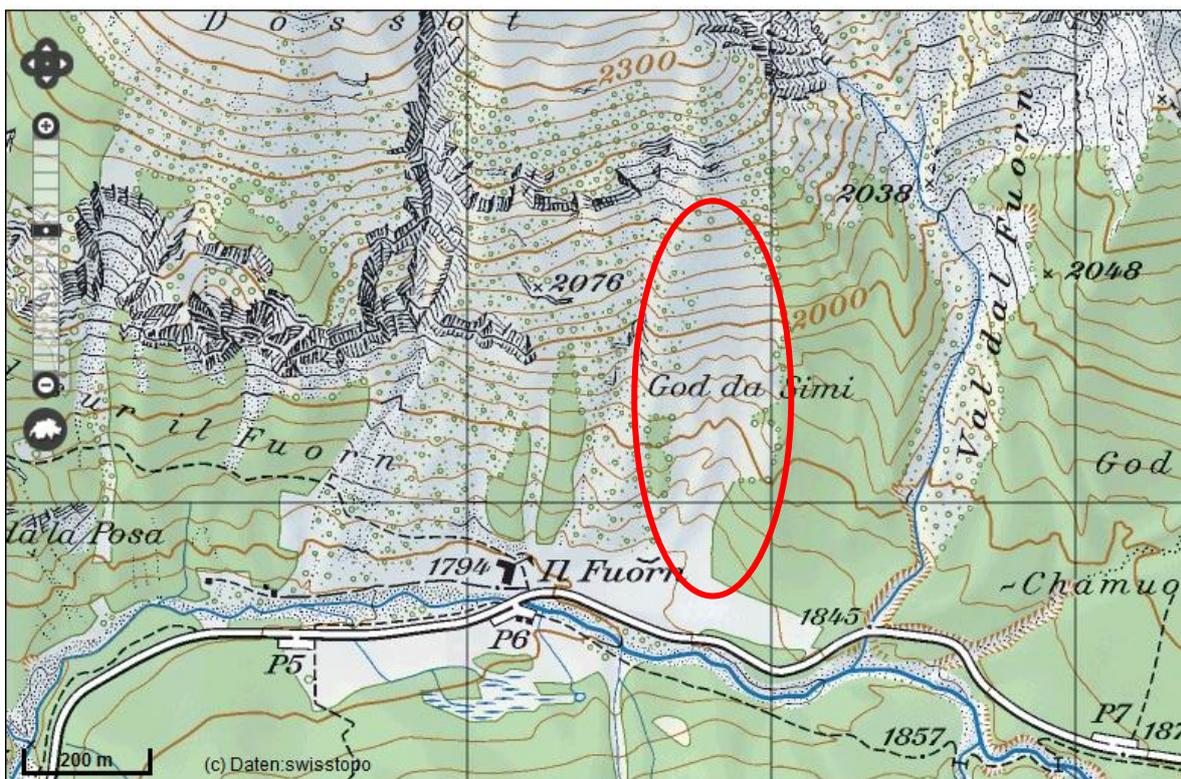


Abb. 3.1: Karte des Untersuchungsgebietes, die Brandfläche ist rot markiert. (Quelle: map.geo.admin.ch)



Abb. 3.2: Überblick über die Brandfläche von der Wiese beim Hotel Il Fuorn aus

Abbildung 3.2 zeigt einen Überblick über die ganze Brandfläche, aufgenommen 61 Jahre nach dem Waldbrand. Trotzdem ist die Fläche nach wie vor nur spärlich bewachsen, vor allem im oberen Teil. Auch die verkohlten Baumstämme sind bei einer Begehung noch sehr gut sichtbar. Etwas dichter bewachsen scheint nur der untere Teil der Fläche zu sein, wo vermutlich Pflanzen aus der angrenzenden Wiese eingewandert sind.

4 Material und Methoden

4.1 Vegetationsaufnahmen

Auf insgesamt 15 Transekten entlang von Höhenlinien mit einer Äquidistanz von 20 m wurden auf der Brandfläche bei Il Fuorn Vegetationsaufnahmen durchgeführt. 14 Transekte wurden Anfang Juli, ein Transekt Mitte August aufgenommen. Auf jeder Höhenlinie befanden sich dabei zwei Transekte, wobei jeweils der erste Transekt auf der West- und der zweite Transekt auf der Ostseite der Brandfläche lag. Es wurde auch versucht, die Koordinaten und Meereshöhen der Transekte mit GPS zu bestimmen. Die Meereshöhe konnte dabei auf 10 bis 20 m genau bestimmt werden. Auf den Transekten wurden im Abstand von 10 m quadratische Untersuchungsflächen eingemessen. Jede Untersuchungsfläche hatte eine Grösse von 2x2 m. Gestartet wurde auf beiden Seiten am Rand der Brandfläche, die erste Untersuchungsfläche lag also immer am Waldrand. Dabei wurden folgende Bezeichnungen verwendet:

- - 10 m: Untersuchungsflächen innerhalb des angrenzenden Waldes
- 0 m: Untersuchungsflächen am Waldrand
- + 10 bis + 50 m: Untersuchungsflächen auf der Brandfläche

Auf jeder Untersuchungsfläche wurden alle Gefässpflanzenarten aufgenommen und ihr Deckungsgrad in Prozent geschätzt. Die Nomenklatur wurde aus der *Flora Helvetica* (2007) übernommen. Die Daten wurden anschliessend in eine Vegetationstabelle übertragen.

4.2 Erosion und Topographie

4.2.1 Erosionsklassen

Für jede Aufnahmefläche wurde die Stärke der Erosion abgeschätzt. Dazu wurden vier Erosionsklassen gebildet (vgl. Tabelle 4.1):

Tab. 4.1: Erosionsklassen und Einteilungskriterien

Klasse	Bezeichnung	Kriterien
1	stabil	Boden durchgehend fest
2	relativ stabil	im Allgemeinen stabiler Boden mit einzelnen lockeren Stellen
3	aktiv, mit lockerer Feinerde	Boden rutscht leicht ab, bei Begehung deutliche Fussspuren sichtbar
4	aktiv, schuttig	Boden rutscht leicht ab, viel grober, instabiler Schutt

Diese sollen im Anschluss mithilfe eigener Fotos beschrieben werden.

Klasse 1



Abb. 4.1: stabile Waldfläche mit *Erica carnea*, *Euphorbia cyparissias* und *Hieracium murorum/bifidum*

Flächen der Klasse 1 sind sehr stabil und oftmals dicht bewachsen. Am häufigsten wurde dieser Fall im Wald und am Waldrand angetroffen. Dabei handelt es sich um Flächen, welche durch den Waldbrand nicht oder nur schwach beeinflusst wurden. Sie können daher als „ursprünglichen“ Zustand vor dem Brand angesehen werden. Stabile Flächen finden sich ausserdem in Mulden, vor allem im unteren Teil der Brandfläche.



Abb. 4.2: stabile Verhältnisse in einer Mulde



Abb. 4.3: vernässte, aber stabile Fläche

Klasse 2



Abb. 4.4: nur schwach durch die Erosion beeinflusste Fläche

Flächen, welche der Klasse 2 zugeteilt wurden, sind immer noch relativ schwach von der Erosion beeinflusst. Allerdings sind hier im Gegensatz zur Klasse 1 bereits einzelne Spuren der Erosion sichtbar. Dies äussert sich beispielsweise in unbewachsenen, schuttigen oder lockeren Stellen. Die Vegetationsdecke ist hier bereits nicht mehr geschlossen. Flächen dieser Kategorie wurden auf allen Höhenstufen gefunden, sie liegen aber oft relativ nahe am Rand der Brandfläche. Daraus kann geschlossen werden, dass der Wald einen stabilisierenden Einfluss auf die Randbereiche der Brandfläche hat.



Abb. 4.5: relativ stabile Fläche in der grossen Ausbuchtung



Abb. 4.6: relativ stabile Fläche auf einer Kuppe

Klasse 3



Abb. 4.7: aktive Fläche mit *Campanula cochleariifolia*

In Klasse 3 befinden sich aktive Flächen, auf welchen sich aber noch relativ viel Feinerde findet. Bei der Begehung dieser Flächen rutschte oft viel Feinerde ab, ausserdem blieben deutliche Fussspuren zurück. Eine typische Pflanzenart an diesen Stellen ist *Campanula cochleariifolia* (vgl. auch Abbildung 4.7). Flächen dieser Kategorie finden sich vermehrt im oberen Teil und auf der Westseite der Brandfläche.



Abb. 4.8: aktive Fläche mit viel Feinerde



Abb. 4.9: deutliche Erosionsrinne im oberen Teil

Klasse 4



Abb. 4.10: durch groben Schutt bedeckte Fläche, mit *Thymus polytrichus*

Klasse 4 beinhaltet aktive Flächen, welche im Gegensatz zu Flächen der Klasse 3 stark von grobem Schutt bedeckt sind. Solche Fläche befinden sich vor allem im oberen Teil der Brandfläche sowie in Rinnen im unteren Teil, wo der Schutt vermutlich von oben her abgelagert wird.



Abb. 4.11: Rinne mit Schutt im oberen Teil



Abb. 4.12: schuttige Rinne im unteren Teil

4.2.2 Topographie

Zusätzlich zu den Erosionsklassen wurde für jede Untersuchungsfläche ihre topographische Lage aufgenommen. Dabei wurden fünf verschiedene Lagekategorien gebildet.

- Wald
- Waldrand
- Hang
- Kuppe
- Mulde

Diese sollen im Anschluss näher beschrieben und mit Bildern dokumentiert werden.

Wald

Diese Flächen liegen innerhalb des Bergföhrenwaldes, welcher die Brandfläche auf beiden Seiten begrenzt. Charakteristisch für diese Flächen sind die Stabilität des Untergrundes und die typische Waldvegetation, welche oft durch *Erica carnea* dominiert wird.



Abb. 4.13: Typischer Bergföhrenwald



Abb. 4.14: Waldvegetation

Waldrand

Flächen am Waldrand bilden den Übergang vom geschlossenen Baumbestand zur offenen Brandfläche. Auch hier ist der Boden stabil, meist wurden noch relativ viele Waldpflanzen gefunden.



Abb. 4.15: Waldrand



Abb. 4.16: Bodenvegetation am Waldrand

Hang

Der grösste Teil der aufgenommenen Flächen befindet sich an Hanglagen. Diese sind bezüglich Stabilität sehr divers. Dies ist vermutlich eine Folge der unterschiedlichen Hangneigungen, Expositionen und Höhenstufen.



Abb. 4.17: relativ stabiler Hang auf der Ostseite



Abb. 4.18: instabiler Steilhang auf der Westseite

Mulde

Flächen in Mulden zeichnen sich durch gute Bodenstabilität aus. Oft wurden hier Pflanzen gefunden, welche für Wiesen- oder Feuchtstandorte typisch sind.



Abb. 4.19: Mulde mit Wiesenvegetation



Abb. 4.20: vernässte Mulde

Kuppe

Im Zentrum der Brandfläche finden sich einige ausgeprägte Kuppen. Diese Standorte sind noch exponierter als der Rest der Brandfläche.



Abb. 4.21: lückige Vegetation auf einer Kuppe



Abb. 4.22: Kuppe im unteren Teil

4.2.3 Verteilung der Untersuchungsflächen

Tabelle 4.2 zeigt die Verteilung der Aufnahmeflächen auf die verschiedenen Erosionsklassen und ihre topographische Lage. In der letzten Spalte ist die mittlere Meereshöhe der vier Erosionsklassen angegeben. Die Streuung um den Mittelwert der gesamten Aufnahme (1889 m.ü.M.) ist allerdings sehr klein. Alle Erosionsklassen kommen über die gesamte Brandfläche verteilt vor.

Tab. 4.2: Verteilung der Untersuchungsflächen auf die Erosionsklassen und die topographische Lage

Erosion (Klasse)	Wald/Waldrand	Hang	Mulde	Kuppe	mittl. Meereshöhe [m.ü.M.]
1	32	2	3	1	1882
2	0	27	0	5	1902
3	0	22	1	1	1877
4	0	11	0	0	1895

4.3 Bodenproben

Mitte August wurden auf der Brandfläche und im angrenzenden Wald insgesamt 68 Bodenproben zur Analyse der Gehalte an organischem Kohlenstoff und Stickstoff entnommen. Die Probeflächen befanden sich auf vier verschiedenen Höhenstufen: ca. 1980 m.ü.M., 1975 m.ü.M., 1945 m.ü.M. und 1915 m.ü.M.. Auch hier erfasste ich jeweils Koordinaten und Höhe mit dem GPS-Gerät. Auf jeder Probefläche von ca. 4 m² wurden zwei Proben entnommen, wobei die erste von einer unbewachsenen, die zweite von einer mit Seggen oder Gräsern (wenn vorhanden) bewachsenen Stelle stammte. Polster von Seggen und Gräsern akkumulieren besonders viele Sedimente

und damit auch organisches Material (Isselin-Nondedeu & Bédécarrats 2007, Martin et al. 2010). Dadurch ergaben sich gepaarte Proben: für jede Probefläche schätzte ich zuerst den gesamten Deckungsgrad und die Stärke der Erosion ab und entnahm dann die beiden Bodenproben. Die Probeflächen wurden so ausgewählt, dass alle Erosionsklassen etwa zu gleichen Anteilen vertreten waren. Mithilfe eines Tulpenstechers entnahm ich Bodenmaterial aus den obersten 15 cm. Die Probe wurde dann in einem Plastikbeutel gut gemischt und grobes Wurzelmaterial entfernt. Drei Viertel der Probe wurden aus Gewichtsgründen jeweils wieder verworfen. Im Labor wurden die Proben gesiebt, wodurch Steine und grobe Pflanzen- und Wurzelreste entfernt wurden. Feine Wurzeln, die das Sieb passieren konnten, verblieben in den Proben. Anschliessend wurden die Proben in Papiercouverts abgefüllt und während 48 Stunden im Trockenschrank bei 80°C getrocknet. Die Analyse der Proben erfolgte mit einem C/N Analyzer (Typ Leco CNS-2000). Nach der Kalibration des Geräts mit EDTA wurden jeweils etwa 0.5 g der Bodenproben eingewogen, in Tontiegel abgefüllt und in den Analyzer gegeben.

4.4 Statistische Datenauswertung

Um die Signifikanz der Zusammenhänge zwischen den aufgenommenen Vegetations- und Bodendaten und den verschiedenen Umweltparametern zu prüfen, wurde jeweils eine ANOVA (*Analysis of Variance*) durchgeführt. Dadurch konnten sowohl kategoriale (z.B. die Erosionsklassen) als auch kontinuierliche erklärende Variablen (als Kovariablen, z.B. die Meereshöhe) in die Analyse mit einbezogen werden (vgl. Dormann & Kühn 2009). Nicht normalverteilte Daten wurden vor der Analyse wurzel- bzw. log-transformiert. Um Unterschiede zwischen den Erosionsklassen abzuklären, wurde jeweils ein Tukey-Test durchgeführt. Die Auswertung der Vegetationsdaten erfolgte mithilfe multivariater Statistik. Um den Einfluss sehr häufiger Arten zu vermindern, wurden die Artdaten zuerst log-transformiert ($\log(\text{artmatrix}+1)$). Die Vegetationsaufnahmen wurden zunächst durch eine Distanzmatrix miteinander verglichen. Dazu wurde das Bray-Curtis-Distanzmass verwendet. Dieser Index berücksichtigt Unterschiede zwischen seltenen Arten gleich wie solche zwischen häufigen Arten (Dormann & Kühn 2009). Durch eine Clusteranalyse konnten die Vegetationsaufnahmen dann aufgrund ihrer Ähnlichkeit gruppiert werden. Ausserdem wurden verschiedene Ordinationsdiagramme erstellt. Dabei kamen sowohl indirekte (Hauptkoordinatenanalyse) als auch direkte (Kanonische Korrespondenzanalyse) Verfahren zur Anwendung. Bei den Bodenanalysen ergaben sich gepaarte Proben (vgl. Kapitel 4.3). Diese wurden durch die Verhältnisse der aufgenommenen Werte charakterisiert. Das Verhältnis berechnete sich jeweils wie folgt: $\frac{\text{Wert mit Vegetation}}{\text{Wert ohne Vegetation}}$. Alle Auswertungen wurden mit der Statistiksoftware R (Version 2.15.1) durchgeführt.

5 Resultate

5.1 Häufigste Arten

Tab. 5.1: Häufigste Arten, Anteile ihres Vorkommens und pflanzensoziologische Zuordnung

Art	total %	Wald/Waldrand %	Brandfläche %	pflanzensoziologische Zuordnung
<i>Carex humilis</i>	82	91	78	<i>Erico-Mugetum caricetosum humilis</i>
<i>Hieracium staticifolium</i>	81	63	89	
<i>Leontodon hispidus</i>	79	47	93	<i>Carici-Pinetum engadinensis</i>
<i>Galium anisophyllum</i>	69	38	82	
<i>Thymus polytrichus</i>	64	47	71	
<i>Festuca ovina</i>	60	9	82	
<i>Cirsium acaule</i>	59	22	75	
<i>Campanula cochleariifolia</i>	56	44	62	
<i>Lotus corniculatus alpinus</i>	54	47	58	
<i>Calamagrostis varia</i>	50	56	47	
<i>Euphorbia cyparissias</i>	44	28	51	<i>Carici-Pinetum engadinensis</i>
<i>Erica carnea</i>	35	88	12	<i>Erico-Mugetum caricetosum humilis</i>
<i>Saponaria ocymoides</i>	35	16	44	<i>Carici-Pinetum engadinensis</i>
<i>Polygala chamaebuxus</i>	34	50	27	
<i>Hieracium murorum/bifidum</i>	29	66	12	

In Tabelle 5.1 werden die am häufigsten angetroffenen Arten in absteigender Reihenfolge aufgelistet. Ausserdem werden die Anteile ihres Vorkommens auf den Wald- und Waldrandflächen und auf der offenen Brandfläche dargestellt. Die

pflanzensoziologische Zuordnung in der letzten Spalte bezieht sich auf die Arbeiten von Trepp (1968).

Insgesamt wurden auf den untersuchten Flächen 99 verschiedene Gefäßpflanzenarten gefunden. Die häufigste Art war *Carex humilis*. Diese Art kam auf 82 % der 105 Untersuchungsflächen vor. *Hieracium staticifolium*, *Campanula cochleariifolia*, *Galium anisophyllum*, *Festuca ovina* und *Leontodon hispidus* wurden auch auf stark gestörten Pionierstandorten auf der Brandfläche häufig gefunden, während sie auf den Flächen im Wald und am Waldrand etwas seltener waren. Umgekehrt fanden sich *Hieracium murorum/bifidum*, *Erica carnea* und *Polygala chamaebuxus* viel häufiger auf Wald- und Waldrandflächen.

5.2 Artenzahl, Deckungsgrad und Erosion

Im Durchschnitt wurden auf jeder Fläche 15 verschiedene Gefäßpflanzenarten bei einem durchschnittlichen Deckungsgrad von 19.7% gefunden. Die Artenzahl ist in den mittleren Bereichen der Brandfläche am höchsten.

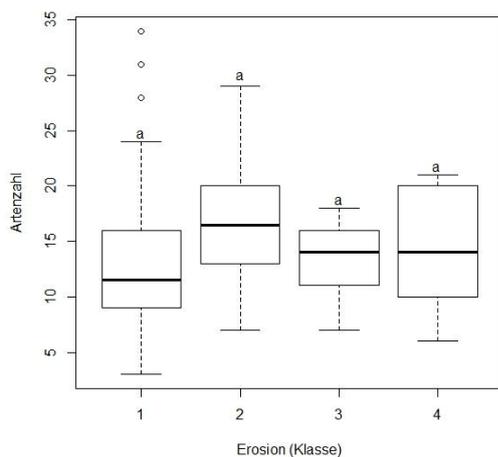


Abb. 5.1: Erosionsklasse und Artenzahl

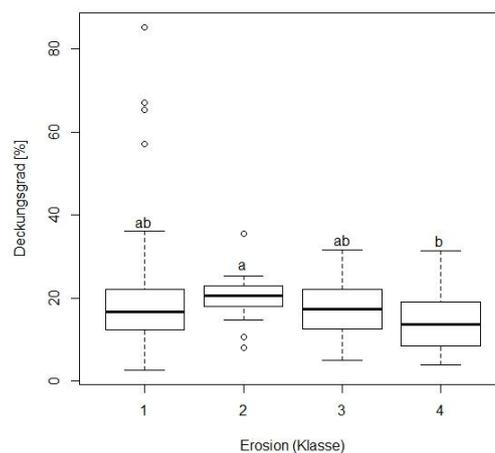


Abb. 5.2: Erosionsklasse und Deckungsgrad

Zwischen der Erosionsklasse und der Artenzahl konnte ein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden ($P < 0.05$) (Abbildung 5.1). Im Tukey-Test zeigt sich allerdings, dass sich die einzelnen Erosionsklassen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Nur schwach signifikant ist der Zusammenhang zwischen Erosionsklasse und Deckungsgrad ($P < 0.1$) (Abbildung 5.2). Der Tukey-Test ergibt einen signifikanten Unterschied zwischen den Erosionsklassen 2 und 4.

5.3 Clusteranalyse

Mithilfe einer Clusteranalyse konnten die 105 aufgenommenen Flächen in vier grössere Gruppen unterteilt werden. Tabelle 5.2 zeigt die Verteilung der Flächen auf die vier Erosionsklassen. Die erste Gruppe scheint sich besonders stark von den drei anderen Gruppen zu unterscheiden. Hierbei handelt es sich um die stabilsten Flächen im Wald und am Waldrand mit typischer Waldvegetation, zum Beispiel *Erica carnea*, *Sesleria caerulea*, *Gymnadenia odoratissima* und *Hieracium murorum/bifidum*. In der zweiten Gruppe befinden sich ebenfalls relativ viele stabile Flächen, welche sich vor allem im unteren Teil der Brandfläche befinden. Dort wurden neben den Pionierarten häufig auch Wiesenpflanzen, zum Beispiel *Trifolium repens* und *Prunella vulgaris*, gefunden. Die dritte Gruppe beinhaltet Flächen aus dem oberen Teil der Brandfläche, die fast ausschliesslich von Pionierarten wie *Campanula cochleariifolia* besiedelt sind. Die vierte Gruppe schliesslich umfasst sehr instabile Flächen, welche oft von losem Geröll geprägt waren.

Tab. 5.2: Anzahl Flächen pro Gruppe und Erosionsklasse

Erosion (Klasse)	Gruppe			
	1	2	3	4
1	24	12	0	2
2	1	16	14	1
3	0	7	14	3
4	0	5	2	4

5.4 Hauptkoordinatenanalyse

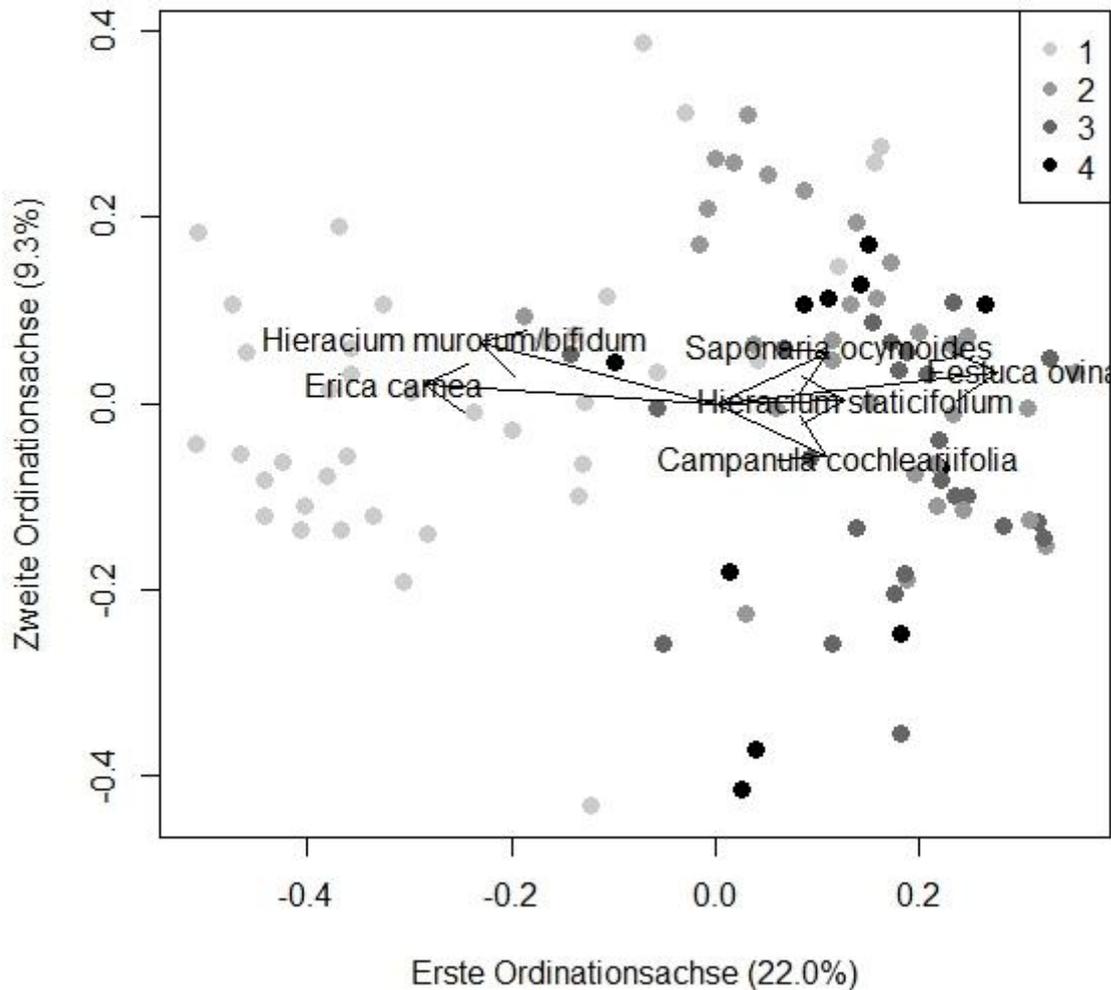


Abb. 5.3: Ordinationsdiagramm mit Erosionsklassen und ausgewählten Pflanzenarten

Nach der Durchführung einer Hauptkoordinatenanalyse wurden in einem Ordinationsdiagramm (Abbildung 5.3) alle aufgenommenen Flächen mit ihren jeweiligen Erosionsklassen aufgetragen. Ausserdem wurden Pfeile für einige wichtige Pflanzenarten (vgl. auch Kapitel 5.1) eingezeichnet. Flächen der Klasse 1 sind dabei relativ klar von den übrigen Flächen abgetrennt. Bei den anderen drei Erosionsklassen ist das Bild weniger deutlich. Das Diagramm zeigt allerdings sehr deutlich, dass Waldarten wie *Erica carnea* und *Hieracium murorum/bifidum* mit stabilen Verhältnissen verbunden sind, während sich Schutt- und Pionierarten wie *Saponaria ocymoides* und *Hieracium staticifolium* auf instabilen Flächen finden. Die erste Ordinationsachse erklärt 22% der Gesamtvarianz, während von der zweiten Achse noch 9.3% erklärt werden.

5.5 Kanonische Korrespondenzanalyse

Wie die Kanonische Korrespondenzanalyse zeigt, können durch die Standortfaktoren 23.2% der Gesamtvarianz der aufgenommenen Vegetationsdaten erklärt werden. Davon kann der grösste Anteil auf den Unterschied Wald/Waldrand vs. Brandfläche zurückgeführt werden (23% erklärte Varianz). In einem zweiten Schritt wurden nur noch Flächen auf der Brandfläche in die Analyse mit einbezogen. In Tabelle 5.3 werden die einzelnen Standortfaktoren und die von ihnen erklärte Varianz aufgelistet. Der grösste Anteil der Varianz wird von der Topographie erklärt, während Meereshöhe, Erosionsklasse und die Distanz vom Waldrand weniger wichtig zu sein scheinen.

Tab. 5.3: Standortfaktoren auf der Brandfläche und erklärte Varianz

Standortsfaktor	erklärte Varianz [%]
Topographische Lage	21.6
Meereshöhe	11.1
Erosionsklasse	11
Distanz vom Wald	7.1

5.6 Boden

Die Bodenproben wurden auf ihren Gehalt an organischem Kohlenstoff und Stickstoff untersucht. Für alle Proben wurde zunächst das C/N-Verhältnis berechnet, das ein guter Indikator für die Bodenfruchtbarkeit ist (Blume et al. 2010). Die Proben weisen im Allgemeinen sehr weite C/N-Verhältnisse auf: Die Werte liegen zwischen 21 und 52 und steigen mit zunehmender Meereshöhe an.

Um den Einfluss der Vegetation und der Erosion auf den C- und N-Gehalt zu untersuchen, wurden die gemessenen Gehalte gegen den Deckungsgrad und die Erosionsklassen aufgetragen (Abbildungen 5.4 und 5.5).

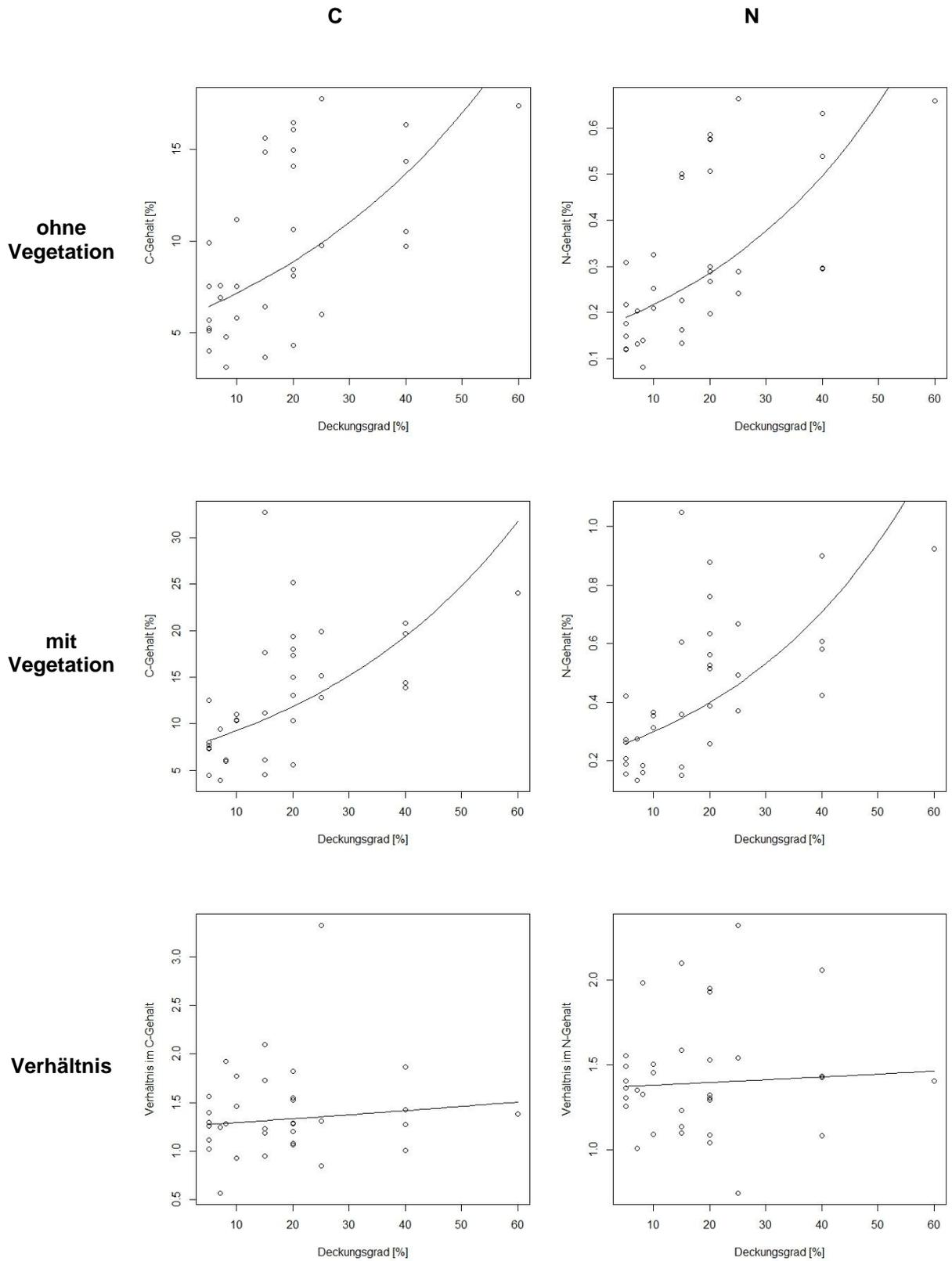


Abb. 5.4: C- und N-Gehalt in Abhängigkeit des Deckungsgrades

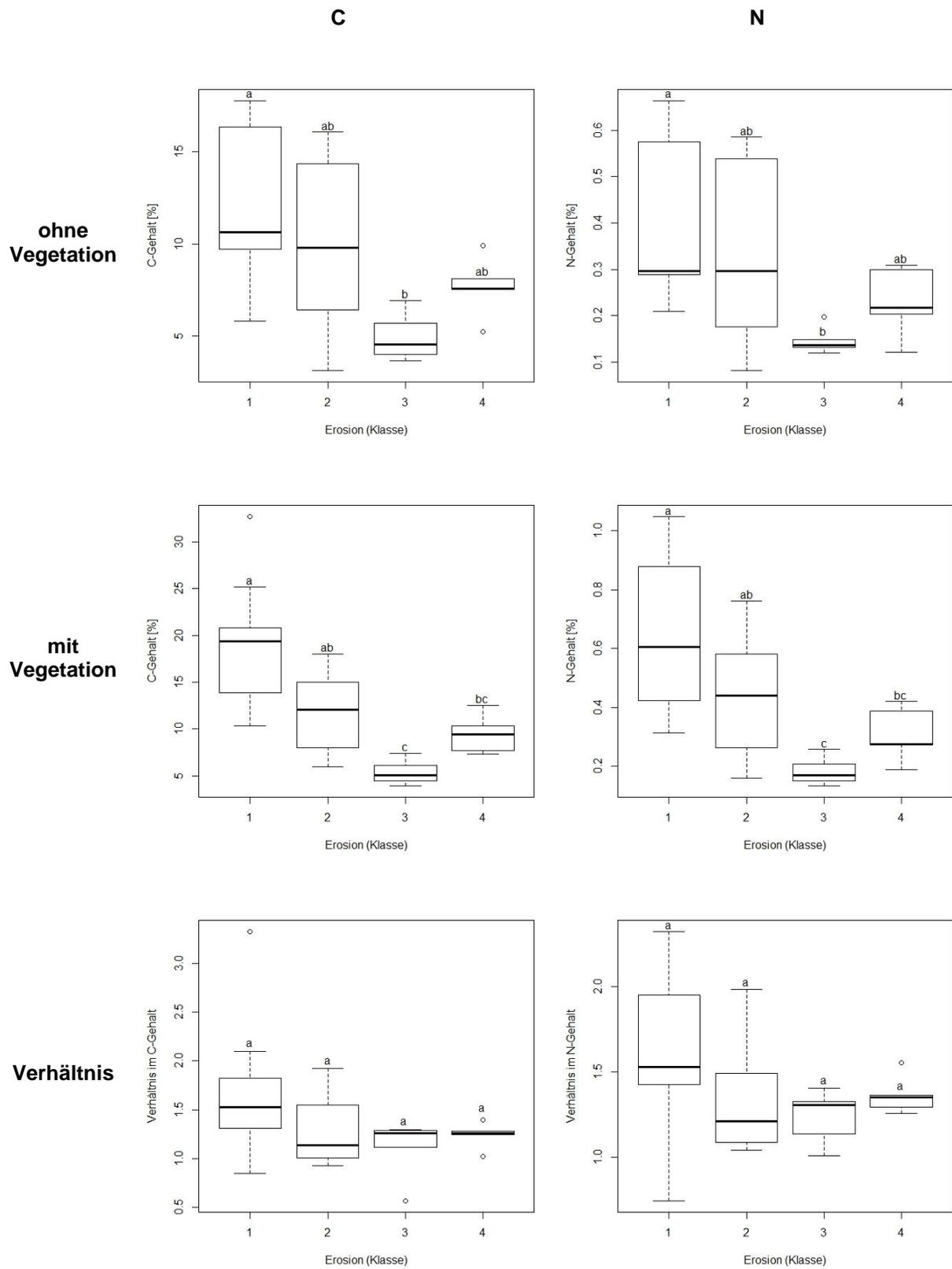


Abb. 5.5: C- und N-Gehalt in Abhängigkeit von der Erosionsklasse

Abbildung 5.4 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad der gesamten Probefläche und den gemessenen C- und N-Gehalten. Dabei wurden die Daten für bewachsene und unbewachsene Stellen zunächst separat ausgewertet. Hier zeigt sich ein sehr ähnliches Bild: Der Gehalt steigt mit dem Deckungsgrad stark an, alle Zusammenhänge sind hochsignifikant ($P < 0.001$). Aus den Grafiken wird ersichtlich, dass der Gehalt an organischem Kohlenstoff und Stickstoff auf unbewachsenen Stellen wesentlich tiefer ist. Die dritte Zeile in Abbildung 5.4 zeigt die gleiche Auswertung für die gepaarten Proben. Hier lässt sich kein signifikanter Zusammenhang mehr feststellen.

In Abbildung 5.5 wurden die gemessenen C- und N-Gehalte gegen die vier Erosionsklassen aufgetragen. Stabile Flächen der Klasse 1 weisen sowohl auf bewachsenen als auch auf unbewachsenen Stellen einen signifikant höheren C- resp. N-Gehalt als instabile Flächen der Klasse 3, während sich Klasse 2 nicht signifikant von Klasse 1 unterscheidet. Auf bewachsenen Flächen (vgl. zweite Zeile in Abbildung 5.5) unterscheidet sich auch die Erosionsklasse 4 signifikant von Klasse 1. Die dritte Zeile in Abbildung 5.5 zeigt wiederum die Auswertung für die gepaarten Proben. Der Zusammenhang sowie die Unterschiede zwischen den einzelnen Erosionsklassen sind hier nicht signifikant.

6 Diskussion

6.1 Allgemeine Überlegungen

Vergleicht man die am häufigsten gefundenen Pflanzenarten auf der Brandfläche mit der Beschreibung der Pflanzengesellschaften im SNP von Trepp (1968), wird klar, dass es sich hierbei nicht um Gemeinschaften handelt, die typisch für Schutt- und Geröllstandorte sind. Es handelt sich eher um Pflanzen, welche warme und trockene Standorte auf Kalkgestein mit viel Feinerde besiedeln und zur Waldgesellschaft *Carici-Pinetum engadinensis* (Höhenvariante mit *Pinus mugo*) gehören. Trepp sieht diese Assoziation als Dauergesellschaft auf felsigen Steilhängen und als Teil der Sukzession Richtung *Erico-Pinetum* nach menschlichen Eingriffen oder Naturkatastrophen. Daraus kann geschlossen werden, dass die heutige Vegetation auf der Brandfläche das erste Pionierstadium einer Sukzession darstellt. Gemäss Geissler & Hartmann (2000) gibt es in ihren Aufnahmen von 1995 nur wenige Arten, die auf mehreren Pionierflächen häufig sind. Als Ausnahme nennen sie *Hieracium staticifolium*. Dieser Eindruck konnte bestätigt werden: Auch bei den aktuellen Aufnahmen war *Hieracium staticifolium* die einzige Art, welche ohne Ausnahme auf allen Pionierflächen vorkam. Die mit der Meereshöhe abnehmende Artenzahl könnte einerseits mit der verstärkten Erosion im oberen Teil der Brandfläche zusammenhängen. Andererseits hat wohl auch die Wiese, die sich unten an die Brandfläche anschliesst, einen Einfluss. Vermutlich sind einige Wiesenarten von unten allmählich in die Brandfläche eingewandert, sodass sie jetzt zusätzlich in den unteren, stabileren Bereichen der Brandfläche gefunden werden können. Die leicht tiefere Artenzahl in den untersten Bereichen der Fläche hängt wahrscheinlich mit der erhöhten Konkurrenz auf den günstigen Standorten zusammen. Die Auswertungen zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Erosion und der Artenzahl, allerdings unterscheiden sich die Erosionsklassen nicht signifikant voneinander. Die Erosion hat also einen Einfluss auf die Artenzahl, die hier angewendeten Erosionsklassen differenzieren das Vegetationsmuster aber nicht genügend, um signifikante Ergebnisse zu erhalten. Der durchschnittliche Deckungsgrad von 19.7% stimmt gut mit den Untersuchungen von Geissler & Hartmann (2000) überein.

6.2 Unterschiede zwischen Wald/Waldrand und Brandfläche

Die Kanonische Korrespondenzanalyse zeigt, dass 23% der Varianz in den Vegetationsdaten durch den Unterschied Wald/Waldrand vs. Brandfläche erklärt werden kann. Wie die Clusteranalyse und die Hauptkoordinatenanalyse zeigen, lassen sich vor allem Flächen der Erosionsklasse 1 von den übrigen Flächen abtrennen. Diese liegen vorwiegend im Wald und am Waldrand, während die Erosionsklassen 2 bis 4 auf der Brandfläche zu finden sind. Die Brandfläche ist der Erosion also deutlich stärker ausgesetzt als Flächen im Bergföhrenwald. Die Wald- und Waldrandflächen unterscheiden sich bezüglich Vegetation viel stärker von den übrigen Flächen als diejenigen innerhalb der Brandfläche untereinander. Die Flächen

auf der Brandfläche bieten den Pflanzen zwar leicht unterschiedliche Bedingungen bezüglich Bodenstabilität. Das ist aber nicht vergleichbar mit dem Waldklima, das sicher einen viel grösseren Einfluss hat. Die Bäume schützen die Bodenvegetation beispielsweise vor starken Frostereignissen, übermässiger Sonneneinstrahlung und Austrocknung. Diese Faktoren wurden in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht untersucht. Es konnte auch gezeigt werden, dass typische Waldarten wie *Erica carnea*, *Polygala chamaebuxus* und *Hieracium murorum/ bifidum* auf Wald- und Waldrandflächen wesentlich häufiger sind, während Pionierarten wie *Saponaria ocymoides*, *Festuca ovina* und *Leontodon hispidus* auf der Brandfläche dominieren. Die Arbeit zeigt also auch bezüglich Artenzusammensetzung einen deutlichen Unterschied zwischen dem Bergföhrenwald und der Brandfläche. Die vermehrt durch die Erosion beeinflussten Flächen auf der Brandfläche scheinen etwas artenreicher zu sein als die stabilen Flächen. Das ist auf den ersten Blick erstaunlich, da man erwarten könnte, dass auf den gestörten Standorten nur wenige, spezialisierte Arten überleben. Auch dieses Resultat lässt sich durch den Unterschied zwischen Wald/Waldrand und Brandfläche erklären. Die stabilen Flächen liegen oft im Wald oder am Waldrand, wo einzelne Arten, vor allem *Erica carnea*, sehr dominant werden können. Allerdings ist die Streuung innerhalb der Erosionsklasse 1 sehr gross: Stabile Flächen, die nicht durch einzelne Arten dominiert werden, wie zum Beispiel Wiesenstandorte in Mulden, sind im Allgemeinen sehr artenreich. Bezüglich des Deckungsgrades zeigen Wald- und Waldrandstandorte der Erosionsklasse 1 keine signifikant höheren Werte als die restlichen Erosionsklassen. Das ist zumindest teilweise dadurch zu erklären, dass die Deckungsgrade auf stabilen, stark bewachsenen Flächen vermutlich systematisch unterschätzt wurden. Der im Tukey-Test festgestellte signifikante Unterschied zwischen den Erosionsklassen 2 und 4 lässt daher dennoch den Schluss zu, dass es einen Unterschied im Deckungsgrad zwischen relativ wenig gestörten Flächen und stark durch die Erosion beeinflussten Flächen gibt.

6.3 Unterschiede innerhalb der Brandfläche

Innerhalb der Brandfläche konnten in der Cluster- und Hauptkoordinatenanalyse nur die Flächen des obersten Transekts relativ klar abgegrenzt werden. Diese liegen in einem sehr instabilen Felsband, sind artenarm und weisen einen niedrigen Deckungsgrad auf. Allerdings konnten keine neuen Arten, welche nicht auch auf den anderen Flächen gefunden wurden, nachgewiesen werden. Die Standorte auf der Brandfläche wurden in der Clusteranalyse mit wenigen Ausnahmen in die Gruppen 2 bis 4 eingeteilt. In der Gruppe 2 kommen im Unterschied zu den Gruppen 3 und 4 auch Wiesenpflanzen vor. Ihr Vorkommen kann aber nicht durch die Erosion erklärt werden, da in den Gruppen 2 bis 4 jeweils alle Erosionsklassen vertreten sind. Wahrscheinlicher ist, dass diese Arten einfach von der Wiese neben dem Hotel II Fuorn in die Brandfläche einwandern und mit zunehmender Höhe ausklingen. Hier haben wahrscheinlich auch die Huftiere, welche regelmässig auf der Wiese und der Brandfläche weiden, einen Einfluss. Sie können zusätzlich zur Verbreitung der

Wiesenpflanzen beitragen und diesen Prozess beschleunigen. Laut Wildi & Schütz (2000) ist die Beweidung der wichtigste Einflussfaktor auf die Vegetation im Schweizerischen Nationalpark. Auch die Kanonische Korrespondenzanalyse bestätigt den Eindruck, dass die unterschiedliche Vegetationsbedeckung auf der Brandfläche nicht ausschliesslich durch die Erosion erklärt werden kann. Die Topographie hat einen weitaus grösseren Einfluss auf die Vegetation als die Erosion. Bei der Begehung der Brandfläche zeigte sich bereits, dass sich die Artenzusammensetzung in Mulden und auf Kuppen von Hanglagen unterscheidet (vgl. auch die Fotos in Kapitel 4.2.2). In Mulden kann sich Feinmaterial ansammeln und der Boden trocknet weniger rasch aus. Das bietet den Pflanzen bessere Wachstumsbedingungen. Dementsprechend wurden in Mulden oft Wiesenpflanzen gefunden. Kuppen dagegen sind sehr exponierte Standorte. Sie sind kaum gegen Wind und hohe Sonneneinstrahlung geschützt. Ausserdem apert sie früher aus, was zu erhöhter Gefahr von Frostschäden führt. Deshalb sind Flächen auf Kuppen oft nicht sehr dicht bewachsen. Allerdings muss hier bemerkt werden, dass nur wenige Kuppen- und Muldenstandorte aufgenommen wurden, die meisten Aufnahmeflächen befanden sich an Hanglagen.

6.4 Einfluss von Erosion und Vegetation auf den C- und N-Gehalt

Bei der Analyse der Bodenproben wurden die prozentualen Anteile von organischem Kohlenstoff und Stickstoff bestimmt. Wie erwartet steigen diese mit zunehmendem Deckungsgrad an. Daran zeigt sich, dass spärlich bewachsene Stellen in der Brandfläche sehr nährstoffarm sind (niedrige N-Gehalte) und die C-Akkumulation vor allem dort erfolgt, wo der Boden relativ dicht bewachsen ist. Der Boden kann diese Stoffe also nur bei ausreichender Bedeckung mit Vegetation speichern. Die Auswertungen zeigen, dass auch auf kleinen unbewachsenen Stellen mehr Kohlenstoff und Stickstoff gespeichert werden kann, wenn die Vegetation in der nächsten Umgebung einen hohen Deckungsgrad erreicht.

In einem zweiten Schritt interessierte der Zusammenhang der Bodenparameter mit der Erosion. In der vorliegenden Arbeit konnten sowohl für bewachsene als auch für unbewachsene Flächen signifikante Zusammenhänge zwischen der Erosion und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff und Stickstoff festgestellt werden. Auf stabilen, vegetationsbedeckten Flächen sind die C- und N-Gehalte grösser als auf instabilen, unbewachsenen Flächen. Ausserdem sind die C- und N-Gehalte auf Flächen aller Erosionsklassen höher, wenn die Proben von bewachsenen Stellen stammten. Die Vegetation vermag also auch auf der instabilen Brandfläche einen gewissen Teil des organischen Kohlenstoffs und des Stickstoffs zurückzuhalten, der Effekt ist aber weniger stark als auf stabilen Flächen. Das liegt sicherlich auch daran, dass die einzelnen Vegetationspolster auf den instabilen Flächen viel kleiner waren als an stabileren Stellen. Allerdings muss bemerkt werden, dass auf den stabilen Flächen, die meist im Wald oder am Waldrand lagen, durch die Nadelstreu der Bergföhren mehr organisches Material anfällt, das ausserdem schwer abbaubar ist. Werden die gleichen Auswertungen für die Probenpaare durchgeführt, ergeben sich

keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den Verhältnissen im C- und N-Gehalt und der Erosionsklasse. Es zeigt sich aber deutlich, dass die Werte für die Verhältnisse von C- resp. N-Gehalt nur in Ausnahmefällen kleiner als 1 sind, was bedeutet, dass der Gehalt auf Flächen mit Vegetation grösser ist als auf solchen ohne Vegetation.

Die berechneten C/N-Verhältnisse sind im Allgemeinen sehr weit. Verglichen mit den Untersuchungen von Egli et al. (2009) sind die Werte sehr hoch. Sie stellten auf südexponierten Hängen in der subalpinen Stufe C/N-Verhältnisse zwischen 15 und 25 in den obersten Bodenschichten fest. Fruchtbare Ackerböden zeigen im Allgemeinen Werte zwischen 10 und 15 (vgl. Blume et al. 2010). Die Werte steigen mit zunehmender Meereshöhe an, was bedeutet, dass die Bedingungen für das Pflanzenwachstum im oberen Teil der Brandfläche schlechter sind als im unteren Teil. Daher vermute ich, dass die Vegetationsentwicklung von unten nach oben verlaufen wird. Der untere Teil der Brandfläche wird sich, auch dank der einwandernden Wiesenpflanzen aus der anschliessenden Fettwiese und der geringeren Steilheit, vermutlich schneller erholen. Es zeigte sich ausserdem, dass Flächen mit höherem Deckungsgrad niedrigere C/N-Verhältnisse aufweisen, den Pflanzen also bessere Wachstumsbedingungen bieten. Die niedrigen C-Gehalte auf der Brandfläche könnten auch eine direkte Folge des Waldbrandes sein. Geissler & Hartmann (2000) schreiben, dass die Humusaufgabe durch den Waldbrand stellenweise vollständig zerstört wurde. Da es sehr lange dauert, bis sich Ökosysteme vergleichbar mit der Brandfläche Il Fuorn erholen (Sass et al. 2012), ist diese Interpretation plausibel.

Interessant wäre auch, den Zusammenhang der Bodenparameter mit der Artenzahl zu untersuchen. Da die Bodenproben jedoch nicht von denselben Flächen wie die Vegetationsaufnahmen stammten und die Artenzahlen nur dort bestimmt wurden, konnte dies hier nicht untersucht werden. Bei Pohl et al. (2009) wurde ein solcher Zusammenhang festgestellt. Die Artenvielfalt beeinflusst die Stabilität der Bodenaggregate durch die verschiedenen Wurzeltypen positiv.

7 Schlussfolgerungen

Die Auswertungen zeigen, dass es einen Zusammenhang zwischen der Erosion und der Vegetationsbedeckung auf der Brandfläche II Fuorn gibt. Insbesondere die intakten, stabilen Wald- und Waldrandflächen unterscheiden sich sowohl bezüglich der Vegetationsbedeckung als auch der Artenzusammensetzung klar von der instabilen Brandfläche. Innerhalb der Brandfläche sind die Unterschiede viel weniger deutlich, obwohl die Erosion nicht überall gleich stark ist. Andere Umweltfaktoren, vor allem die Topographie, aber auch die Meereshöhe, haben einen mindestens so starken Einfluss auf die Vegetation wie die Stärke der Erosion. Insbesondere ist wohl auch der Einfluss der Huftiere und des Mikroklimas nicht zu unterschätzen, welcher in dieser Arbeit nicht untersucht wurde. Daraus kann geschlossen werden, dass die Erosion die Vegetation zwar grossräumig beeinflusst, kleinräumige Muster dadurch aber nicht erklärt werden können.

Die Bodenuntersuchungen zeigen, dass die Gehalte an organischem Kohlenstoff und Stickstoff klar positiv mit dem Deckungsgrad korreliert sind. Auch die Stärke der Erosion hat einen deutlichen Einfluss die C- und N-Gehalte. Die Vegetation vermag also zur Akkumulation dieser Stoffe beizutragen, was zur Stabilisierung des Bodens beitragen kann. Deshalb werden sich die Nährstoffverhältnisse auf der Brandfläche mit zunehmender Bedeckung durch Vegetation vermutlich verbessern, wodurch die Besiedlung durch weitere Krautpflanzen gefördert und die Erosion vermindert wird. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich auf der Brandfläche wieder Bäume etablieren können. Die gegenwärtig auf der Brandfläche angetroffenen Verhältnisse entsprechen vermutlich einem ersten Pionierstadium einer Sukzession Richtung *Erico-Pinetum*, die aber wegen ungünstiger Verhältnisse nur sehr langsam fortschreitet.

8 Dank

Bedanken möchte ich mich in erster Linie bei meiner Betreuerin Frau Sabine Güsewell für ihre Unterstützung bei der Feldarbeit und der Auswertung der Daten. Weiter möchte ich Herrn Ruedi Haller für die erste Besprechung und die Bewilligung dieses Projekts danken. Nicht zuletzt gebührt auch meinen Eltern und meinem Partner ein herzlicher Dank für ihre moralische Unterstützung.

9 Literatur

Blume HP, Brümmer GW, et al. (2010). Lehrbuch der Bodenkunde / Scheffer, Schachtschabel. 16. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, S. 403-404

Chaney K, Swift RS (1984). The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil Science* 35: 223-230

Dormann CF, Kühn I (2009). *Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften*. 2. Aufl., Helmholtz Zentrum für Umweltforschung-UFZ

Egli M, Sartori G, Mirabella A, et al. (2009). Effect of north and south exposure on organic matter in high Alpine soils. *Geoderma* 149: 124-136

Geissler P, Hartmann J (2000). Vegetationsdynamik in einem 1951 abgebrannten Bergföhrenbestand. In: Schütz M, Krüsi BO, Edwards PJ (eds): *Succession research in the Swiss National Park*. *Nationalpark-Forschung in der Schweiz* 89: 107–129

Gyssels G, Poesen J (2003). The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 371-384

Isselin-Nondedeu F, Bédécarrats A (2007). Influence of alpine plants growing on steep slopes on sediment trapping and transport by runoff. *Catena* 71: 330-339

Lauber K, Wagner G (2007). *Flora Helvetica*. 4. Aufl., Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien

Martin C, Pohl M, Alewell C, et al. (2010). Interrill erosion at disturbed alpine sites: Effects of plant functional diversity and vegetation cover. *Basic and Applied Ecology* 11: 619-626

Merz A, Alewell C, Hiltbrunner E, et al. (2009). Plant-compositional effects on surface runoff and sediment yield in subalpine grassland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172: 777-788

Ochsner F (1986). Die Moosvegetation der Brandfläche II Fuorn (Schweizerischer Nationalpark). *Arbeitsberichte zu Nationalparkforschung* Nr. 3.

- Pohl M, Alig D, Körner C, Rixen C (2009). Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant and Soil* 324: 91-102
- Pohl M, Graf F, Buttler A, Rixen C (2012). The relationship between plant species richness and soil aggregate stability can depend on disturbance. *Plant and Soil* 355: 87-102
- Sass O, Heel M, Leistner I, et al. (2012). Disturbance, geomorphic processes and recovery of wildfire slopes in North Tyrol. *Earth Surface Processes and Landforms* 37: 883-894
- Stähli M, Finsinger W, Tinner W, Allgöwer B (2006). Wildfire history and fire ecology of the Swiss National Park Central Alps: new evidence from charcoal, pollen and plant macrofossils. *Holocene* 16: 805–817
- Tinner W, Allgöwer B, Ammann B, Conedera M, Gobet E, Lotter AF, Stähli M (2005). Ausmass und Auswirkungen der Waldbrände auf die Vegetation der Schweiz im Laufe der Jahrtausende. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 156: 325–330
- Trepp W (1968). Die Pflanzengesellschaften im Schweizerischen Nationalpark: Wegleitung zur Vegetationskarte von E. Campbell und W. Trepp. *Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen im Schweizerischen Nationalpark* 11: 19-42
- Wildi O, Schütz M (2000). Reconstruction of a long-term recovery process from pasture to forest. *Community Ecology* 1: 25-32
- Wohlgemuth T, Brigger A, Gerold P, et al. (2010). Leben mit Waldbrand. Merkblatt für die Praxis 46. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL: Birmensdorf
- Zoller H (1995). Vegetationskarte des Schweizerischen Nationalparks: Erläuterungen. *Nationalpark-Forschung in der Schweiz* 85: 13-18
- Zuazo VHD, Pleguezuelo CRR (2008). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28: 65–86

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: <http://map.geo.admin.ch/> (14.09.2012)

Die restlichen Fotos sind eigene Aufnahmen vom Juli 2012.