

HOCHSCHULE WÄDENSWIL  
ZÜRCHER FACHHOCHSCHULE

**DIE ROLLE DER PHOSPHOR-KOLIMITIERUNG IN DER REAKTION ALPINER WEIDEN  
AUF ATMOSPHERISCHEN STICKSTOFFEINTRAG**



Diplomarbeit

von

**Matthias Riesen**

Diplomstudiengang 2003

Umweltingenieurwesen / Naturmanagement

Fachkorrektoren

**Matthias Volk**  
Biologe, Agroscope Reckenholz-Tänikon ART  
Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich

**Rolf Krebs**  
Dozent für Bodenökologie  
Hochschule Wädenswil



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-  
departement EVD  
Forschungsanstalt  
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

**[H<sup>S</sup>W]** •  
HOCHSCHULE WÄDENSWIL

Die Zunahme der Stickstoffdeposition spielt in den letzten Jahren eine immer grössere Rolle. Naturnahe Ökosysteme werden durch den zusätzlichen Nährstoffeintrag beeinflusst und verändert. Alpine Pflanzengesellschaften wachsen unter rauen klimatischen Bedingungen auf oft nährstoffarmen Böden. Ihr Wachstum und die Zusammensetzung der Arten werden stark durch die Verfügbarkeit der Nährstoffe bestimmt. In dieser Diplomarbeit wurde während einer Vegetationsperiode die Rolle des Phosphors in Kombination mit Stickstoff auf einer alpinen Weide der Alp Flix (Schweiz, Gemeinde Sur GR) auf rund 2000 m.ü.M. untersucht. Die Ferkelkraut-Borstgras-Weide (*Hypochoero-Nardetum*) wurde mit Stickstoff (N), Phosphor (P) und der Kombination Stickstoff + Phosphor (N+P) behandelt, mit  $50 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  als N-Düngung und  $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  als P-Düngung. Es wurden Messungen der Produktivität, der N-P-Konzentrationen, der Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation und des NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) durchgeführt. Die oberirdische Pflanzenbiomasse wurde bei Vegetationshöchststand geerntet, in die funktionellen Gruppen Gräser, Kräuter, Seggen und Leguminosen unterteilt und getrocknet. In allen Behandlungen (N, P und N+P) wurde im Vergleich zur Kontrolle ein Zuwachs festgestellt mit einem signifikanten Maximum von +47% bei N+P. N und P als Einzelbehandlungen bewirkten einen Zuwachs von +20% bei N und +25% bei P. Der prozentuale Grasanteil war mit ~60% in allen Behandlungen ähnlich hoch. Der Gewichtsanteil der Gräser, Kräuter und Seggen nahm in allen gedüngten Behandlungen zu. Parallel dazu wurde bei der Gruppe der Leguminosen eine Abnahme um über die Hälfte der Pflanzenbiomasse festgestellt. Die Behandlungen N, P und N+P erhöhten gegenüber der Kontrolle die Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation und den NDVI. Die chemische Analyse der Pflanzenbiomasse zeigte, dass im Mittel bei den Behandlungen P und N+P etwa die doppelte Menge an Phosphor von den Pflanzen aufgenommen wurde. Der Stickstoffgehalt blieb im Mittel bei allen Behandlungen auf gleichem Niveau. Diese Studie zeigt, dass die Produktivität der Weide auf der Alp Flix durch Phosphor limitiert ist und die Kombination von Stickstoff und Phosphor eine additive Wirkung auf die Produktivität der Vegetation hatte.

Nitrogen deposition plays a more and more still increasing role in the last years. Natural ecological systems are affected and changed by the additional nutrient entry. Alpine plant communities are exposed to rough climatic conditions and often grow on nutrient-poor soils. Their growth and the composition of the species are determined strongly by the availability of the nutrients. This diploma-thesis examined during one vegetation period the role of phosphorus in combination with nitrogen on an alpine pasture of the Alp Flix, Switzerland, community Sur GR, 2000 m a.s.l. The *Hypochoero-Nardetum* was treated with nitrogen ( $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ), phosphorus ( $60 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) and the combination nitrogen + phosphorus (N+P). Measurements of the productivity, the N-P-concentration, the net-CO<sub>2</sub>-assimilation and the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) were performed. The aboveground plant biomass was harvested at the time of highest level of vegetation, divided into the functional groups of grasses, herbs, sedges and legumes and dried afterwards. All treatments (N, P and N+P) showed additional growth in comparison to control with a significant maximum of +47% for N+P. N and P as single treatments caused an increase of +20% for N and +25% for P. The relation amount of grasses in the harvest was approximately 60% and was about the same for all treatments and control. The dry masses of the grasses, herbs and sedges increased in all treatments, whereas the legumes decreased more than 50%. The treatments N, P and N+P increased the net-CO<sub>2</sub>-assimilation and the NDVI in relation to the control. The chemical analysis of the plant biomass showed that the uptake of phosphorus doubled in average in the treatments P and N+P. The nitrogen content of all treatments remained on the average at the same level. This study shows that the productivity of the Alp Flix pasture is limited by phosphorus and that the combination of nitrogen and phosphorus had an additive effect on the productivity of the vegetation.

1	EINLEITUNG	1
2	MATERIAL UND METHODEN	3
2.1	Untersuchungsgebiet .....	3
2.2	Versuchsaufbau .....	3
2.3	Behandlung .....	4
2.4	Oberirdische Pflanzenbiomasse .....	4
2.5	Netto-CO <sub>2</sub> -Assimilation .....	5
2.6	NDVI .....	5
2.7	Statistische Auswertung .....	5
3	ERGEBNISSE	6
3.1	Produktivität der oberirdischen Pflanzenbiomasse .....	6
3.2	Netto-CO <sub>2</sub> -Assimilation .....	7
3.3	NDVI .....	8
3.4	Biomasse-Inhaltsanalyse von N und P .....	9
4	DISKUSSION	12
4.1	Produktivität .....	12
4.2	Netto-CO <sub>2</sub> -Assimilation .....	13
4.3	NDVI .....	14
4.4	Biomasse-Inhaltsanalyse von N und P .....	14
4.5	Critical Load .....	15
4.6	Limitierung des N-P-Experimentes .....	15
5	FAZIT	17
6	DANKSAGUNG	18
7	LITERATURVERZEICHNIS	19
	ANHANG	

Alpine Ökosysteme sind fragil (Rusek, 1993) und werden stark durch abiotische Faktoren wie Wind, Temperatur, Exposition, Feuchtigkeit und Schneedecke geprägt. Die menschlichen Einflüsse wie Nährstoffeinträge, Klimaerwärmung oder saurer Regen haben ebenfalls immer grössere Auswirkungen auf die Zusammensetzung einer Gemeinschaft und auf die Funktion des Ökosystems (Tilman & Lehmann, 2001). Sowohl die Intensivierung wie auch die Nutzungsaufgabe von extensiv bewirtschafteten Flächen führen zu einer Abnahme der Anzahl Arten (Tasser & Tappeiner, 2002). So sind zum Beispiel allein in den vergangenen 60 Jahren rund 90% der Trockenwiesen und -weiden in der Schweiz verschwunden (Eggenberg et al., 2001). Diese unterschiedlichen Grünland-Biotope wachsen auf relativ trockenen und nährstoffarmen Böden, enthalten häufig seltene Pflanzen und sind insgesamt sehr artenreich. Nach Tilman (1982) sind Pflanzengesellschaften auf nährstoffarmen Böden stärker gefährdet durch Nährstoffeinträge als jene auf nährstoffreichen Böden.

Stickstoffhaltige Emissionen (überwiegend  $\text{NH}_3$  und  $\text{NO}_x$ ) werden über unterschiedliche Distanzen verfrachtet, umgewandelt und fernab der Quelle abgelagert. Dort beeinträchtigen sie naturnahe Ökosysteme, die an stickstoffarme Standorte gebunden sind. Der Hauptanteil der Emissionen entsteht in der Landwirtschaft als Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). In der Schweiz haben sich die  $\text{NH}_3$ -Emissionen seit Beginn des 20. Jahrhunderts bis um 1980 etwa verdoppelt. Seither haben sie vor allem aufgrund des Rückganges der Nutztierzahlen um ca. 19% abgenommen. Die Stickoxid-Emissionen stammen hauptsächlich aus dem Verkehr, der seit 1950 stark zugenommen hat (ELK, 2005). Die Folgen der langjährigen Stickstoff-Deposition (N-Deposition) sind Eutrophierung und Versauerung mit Langzeitauswirkungen auf Vegetation und Fauna. Mehr als 90% der Waldstandorte und rund 55% der Flächen der übrigen naturnahen Ökosysteme sind anhand national und international festgelegter Kriterien (Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalteverordnung, «Critical Loads and Levels» der UNECE) mit übermässigen Stickstoffeinträgen belastet (ELK, 2005). Im Schweizer Mittelland werden N-Depositionswerte von über  $40 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  erreicht (Rihm & Kurz, 2001).

Der Phosphor (P) spielt bei den Pflanzen eine wichtige Rolle in zahlreichen biologischen Prozessen wie dem Wachstum, der Photosynthese und der symbiotischen Fixierung von atmosphärischem Stickstoff (Marschner, 1995). Newman (1995) beziffert den jährlichen P-Eintrag aus der Atmosphäre in die terrestrischen Ökosysteme zwischen  $0.01$  und  $2 \text{ kg P ha}^{-1}$ . Etwa die gleiche P-Menge verlässt das Ökosystem wieder auf atmosphärischem Weg (in Pollen und als Staub). Durch die Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion stieg der P-Gehalt in den Böden durch den Düngereintrag stark an. Der Phosphor wurde durch Auswaschung, Abschwemmung oder Erosion in aquatische Ökosysteme übergeführt (Braun et al., 1994). Dies hatte beträchtliche Auswirkungen auf die biologischen Funktionen der Gewässer, obwohl die Konzentration im Wasser wesentlich geringer als im Boden war (Stadelmann et al., 2002). Die Böden enthalten  $0.1$  bis  $3 \text{ g P kg}^{-1}$  Boden, der fast

ausschliesslich in zahlreichen organischen und mineralischen Verbindungsformen vorliegt (Frossard et al., 2004).

Experimente in der natürlichen Vegetation und die Beeinflussung durch Nährstoffeinträge sind in der Literatur zahlreich beschrieben und teilweise gut bekannt. So zum Beispiel die Untersuchungen der alpinen Tundra auf Stickstoff- und Phosphoreinträge in Niwot Ridge (Colorado, USA) durch Bowman et al. (1993) oder die Düngeversuche auf Kalk-Grasland in Limburg (Niederlande) durch Willems et al. (1993). Der Effekt einer Düngung wirkt sich unterschiedlich aus und hängt ab von der Art, der Lebensform und den Boden-Habitatseigenschaften und kann erst nach Jahren sichtbar werden (Bowman, 1993; Theodose & Bowman, 1997). Erste Düngeversuche auf alpinen Flächen in der Schweiz wurden erstmals im Jahr 1930 von Werner Lüdi auf der Schynigen Platte oberhalb Grindelwald BE mit Kalk und Stickstoff-Phosphor-Kalium (NPK) durchgeführt. Die Kalkung (2 – 4 Jahre, 400 kg Ca ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) zeigte auch noch rund 70 Jahre später eine starke Veränderung in der Zusammensetzung der Vegetation, während sich dies bei der NPK-Düngung (80 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) weniger zeigte (Spiegelberger et al., 2006). Die Erhöhung des pH im Boden durch die Kalkung erhöhte die Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen und veränderte die mikrobiologische Fauna.

Über den Einfluss von Nährstoffen in alpinen Weiden und die Veränderung der Pflanzengemeinschaft ist jedoch noch wenig bekannt. In der vorliegenden Diplomarbeit (N-P-Experiment) wird die Rolle des Phosphors in der Kombination von Stickstoff auf einer alpinen Weide der Alp Flix (Schweiz, Gemeinde Sur GR) bearbeitet. Für diese Untersuchung während der Vegetationsperiode im Jahr 2006 wurden Flächen aus einer Ferkelkraut-Borstgras-Weide (*Hypochaeris-Nardetum*) ausgewählt und mit Stickstoff, Phosphor und der Kombination Stickstoff + Phosphor behandelt. Es wurden Messungen der Produktivität, der Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation und des NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) durchgeführt.

Auf der Alp Flix wird seit 2004 eine Freilanduntersuchung über die Auswirkungen der atmosphärischen Ozon- und Stickstoffdeposition auf eine artenreiche alpine Weide durchgeführt. Das Langzeitexperiment (im Folgenden als O<sub>3</sub>-N-Experiment bezeichnet) wird durch die Forschungsstation Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) organisiert und soll die in Zukunft erhöhte Ozon- und Stickstoffbelastung simulieren (Bassin & Volk, in Vorbereitung).

Folgende Hypothesen wurden für diese Untersuchung aufgestellt:

- Wegen der Kolimitation bewirkt die Düngekombination von Stickstoff und Phosphor (N+P) eine verstärkte Zunahme der oberirdischen Pflanzenbiomasse im Vergleich zu den Einzelbehandlungen (N und P).
- Die Stickstoffgabe wird im Vergleich zu der Düngung mit Phosphor eine leicht erhöhte Produktivität der Vegetation bewirken.
- Der jeweilige Anteil der funktionellen Gruppen (Gräser, Kräuter, Seggen und Leguminosen) wird sich in einer Vegetationsperiode nicht ändern.

## 2.1 Untersuchungsgebiet

Die Alp Flix liegt im Südosten der Schweiz im Kanton Graubünden auf einer Höhe von rund 2000 m.ü.M. Durch jahrhundertelange extensive Nutzung ist auf dem Hochplateau eine einmalige Moor- und Kulturlandschaft mit Hoch- und Flachmooren, Heuwiesen und Weiden entstanden. Als Teil des Naturpark «Ela» ist die Bergterrasse eine Moorlandschaft von nationaler Bedeutung. Ursprünglich war das Hochplateau mit subalpinem Nadelwald bedeckt. Vor rund 600 Jahren rodeten aus dem Avers eingewanderte Walser den Wald, bauten kleine Siedlungen und nutzten das Gebiet alpwirtschaftlich (Pronatura.ch, 2006). Die Obergrenze des geschlossenen Waldes verläuft an der Plateaukante zwischen 1900 und 1950 m.ü.M. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 1050 mm und die mittlere Jahrestemperatur 2.2 °C mit einer Vegetationszeit zwischen 20 und 24 Wochen (De Baan, 2006).

Der heterogene Bodenaufbau basiert auf Serpentin-Grundgestein. Die Bodentiefe variiert von 20 cm bis 40 cm mit einer Durchwurzelungstiefe von 15 cm bis 20 cm. Die Analyse der Bodenproben erfolgte nach den Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Agroscope ART & ACW, 2006 (Tab. 1).

pH	N g/kg	P mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg
5.3±0.05	5.0±0.24	6.7±0.62	92.0±6.25	449.2±43.2
Ca mg/kg	Humus%	Ton%	Schluff%	Sand%
1146.1±98.5	9.1±0.50	24.3±1.11	33.2±0.64	33.2±2.19

**Tabelle 1:** Bodeneigenschaften der Ferkelkraut-Borstgras-Weide (*Hypochoero-Nardetum*) auf der Alp Flix im Jahr 2004. Mittelwerte (n=40) und Standardfehler.

## 2.2 Versuchsaufbau

Im Rahmen des O<sub>3</sub>-N-Experimentes wurde aus einer über 60 Jahre alten Ferkelkraut-Borstgras-Weide (*Hypochoero-Nardetum*, OBERDORFER 1957) im Frühjahr 2004 38 Rasenziegel (L=40cm, B=30cm, H=20cm) ausgestochen und in Plastikboxen gegeben (Monolithen). Die Vielfalt der Rasenziegel mit rund 90 Pflanzenarten wird dominiert von Borstgras (*Nardus stricta* L., Fam. Poaceae), Violetter Schwingel (*Festuca violacea* GAUD. AGG., Fam. Poaceae), und Horst-Segge (*Carex sempervirens* VILL., Fam. Cyperaceae). Bei der Artenzusammensetzung überwiegen die Kräuter mit rund dreiviertel Anteil (De Baan, 2006). Die Monolithen wurden zur nahe liegenden Versuchsstation gebracht und mit den Plastikboxen wieder in der Erde versenkt. In der Vegetationsperiode 2004 wurden keine Versuche durchgeführt, während im August 2005 die oberirdische Pflanzenbiomasse auf 2 cm Höhe geschnitten wurde.

## 2.3 Behandlung

Den Monolithen wurden zufällig vier Behandlungen zugeteilt: «N» für Stickstoff, «P» für Phosphor, «N+P» für die Kombination von Stickstoff und Phosphor sowie die «Kontrolle», mit jeweils 9 bis 10 Monolithen. Stickstoff wurde als Ammoniumnitrat ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , Fluka #09890) und Phosphor als Phosphorpentoxid ( $\text{P}_2\text{O}_5$ , Merck #1.00570.0500) verabreicht. Phosphor und Stickstoff wurden für die Ausbringung in 400 ml Wasser pro Monolith gelöst und mit einer Spritze am 3.5.06, 18.5.06, 5.6.06 und 14.6.06 verteilt. Die Kontrollbehandlung erhielt 400 ml Wasser ohne Zusätze. Die Stickstoffkonzentration wurde vom  $\text{O}_3\text{-N}$ -Experiment übernommen und die Phosphormenge wurde aus Literaturangaben abgeleitet. Die Flüssigzugabe von total 1600 ml pro Monolith während der Saison ( $13.3 \text{ l m}^{-2}$ ) entspricht ca. 1.3% des mittleren Jahresniederschlages auf der Alp Flix.

<u>Behandlung:</u>	<u>Inhalt:</u>
Kontrolle (n=10)	Wasser
N (n=9)	$5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ( $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )
P (n=10)	$6 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ( $60 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )
N+P (n=9)	$5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1} + 6 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$

## 2.4 Oberirdische Pflanzenbiomasse

Die oberirdische Pflanzenbiomasse (im Folgenden als «Biomasse» bezeichnet) der Monolithen wurde am 1.8.06 geerntet. Der Schnitt erfolgte 2 cm über der Bodenoberfläche mit der Schere. Das frische Pflanzenmaterial wurde bis zur Aufbereitung bei 4 °C gelagert, in funktionelle Gruppen (Gräser, Kräuter, Seggen und Leguminosen) separiert und bei 60 °C für 24 Stunden getrocknet, sowie nach abkühlen und Erreichen von konstantem Gewicht gewogen. Für die Bestimmung des Stickstoff- und Phosphorgehaltes wurde das trockene Schnittgut (im Folgenden als «Trockenmasse» bezeichnet) mit einer Rotationsmühle gemahlen.

Die folgenden Analysen wurden gemäss den Grundlagen der Labormethoden nach Horwitz (1984) und Naumann (1997) durchgeführt. Die Stickstoffbestimmung wurde als Verbrennungsanalyse nach Dumas mit einem C-N-Analysator (vario MAX CN, Elementar Analysensysteme GmbH, Deutschland) ausgeführt. Dabei wird das Probenmaterial bei 900 °C verbrannt, die Stickoxide über heissem Wolfram zu  $\text{N}_2$  reduziert und mit einem Wärmeleitdetektor gemessen. Bei der fotometrischen Bestimmung des Phosphors wurde die Vanado-Molybdat-Methode angewendet. Der gelbe Farbkomplex wurde bei 420 nm mit dem Fotometer (Spekol 1100, Analytik Jena AG, Deutschland) gemessen.



## 2.5 Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation

Die Netto-Assimilationsrate der Vegetation wurde mit einer selbstgebauten Plexiglasküvette durchgeführt (L=39cm, B=29cm, H=35cm; Matthias Volk, Agroscope ART und Daniel Obrist, Universität Basel und Desert Research Institute, Reno, NV, USA). Die Küvette aus transparentem Acrylglas war mit einer CO<sub>2</sub>-Sonde (GMP343, Vaisala, Finnland) und einem Anzeigegerät (HM70, Vaisala, Finnland) ausgerüstet. Mit einer Schaumstoffabdichtung wurde die Küvette auf den Monolithen platziert und während zwei Minuten die CO<sub>2</sub>-Abnahme gemessen. Während der Vegetationsperiode wurden an zwei wolkenlosen Tagen (8.6.06, 3.7.06) die Messungen vorgenommen und die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe festgehalten.

## 2.6 NDVI

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), entwickelt durch Rouse (1974), bildet ein dimensionsloses Mass für die „Grünheit“ der Vegetation und ist stark mit der Entwicklung des Bestandes korreliert. Er wird als nützliches Instrument eingesetzt, um grossräumige Veränderungen in Ökosystemen mit Satelliten zu beobachten (Boelman et al., 2003). Der Multispektralradiometer (MSRSYS16R System, Cropsan Inc., Rochester, USA) wurde 90 cm über dem Monolithen befestigt und misst die Vegetations-Absorption bei einer Wellenlänge von 810 nm (nahes Infrarot) und 680 nm (rot). Die einfallende Sonnenstrahlung wird im Rot-Bereich vor allem durch das Chlorophyll absorbiert und im nahen Infrarot wird der Grossteil der Strahlung durch das Blattgewebe reflektiert. Daraus lässt sich der NDVI berechnen:  $NDVI = (\rho_{810} - \rho_{680}) / (\rho_{810} + \rho_{680})$  mit der Strahlungsintensität  $\rho$  bei den entsprechenden Wellenlängen. Um die Beeinflussung durch die Umgebungsvegetation zu minimieren wurde um den Monolith ein schwarzes Tuch platziert. Die Messungen wurden am 3.5.06, 30.6.06 und 6.7.06 vorgenommen.

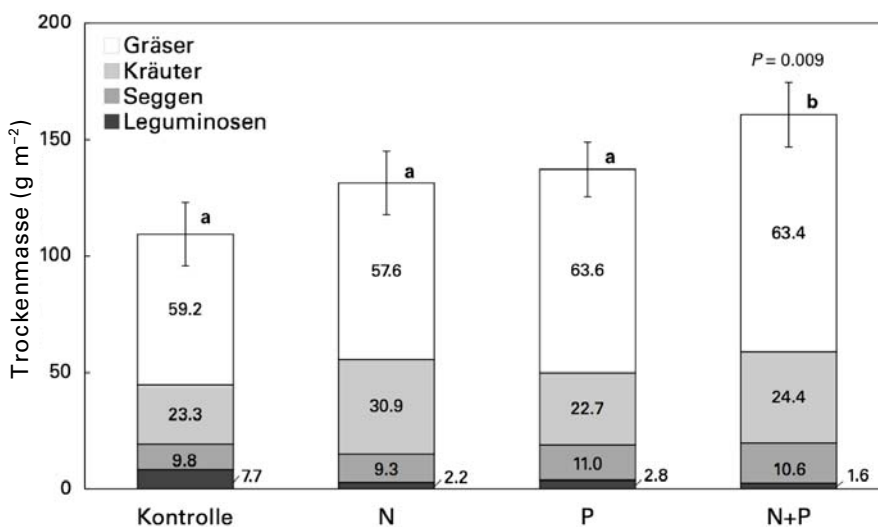
## 2.7 Statistische Auswertung

Um die signifikanten Unterschiede unter den einzelnen Behandlungen und innerhalb der funktionellen Gruppen aufzuzeigen, wurde der Student'sche t-Test (einseitig) in MS Excel angewendet und das übliche Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0.05$  eingesetzt. Die Berechnungen der Produktivität wurden mit den Trockengewichten der oberirdischen Pflanzenbiomasse durchgeführt. Aus der Analyse der Produktivitätsdaten wurde ein Monolith der N-Behandlung ausgeschlossen, der durch Pracht-Nelke (*Dianthus superbus* L., Fam. Caryophyllaceae) dominiert wurde (53% der Trockenmasse). Somit betrug die Stichprobengrösse in den Behandlungen bei der Kontrolle und bei P jeweils 10, bei N 8 und bei N+P 9.

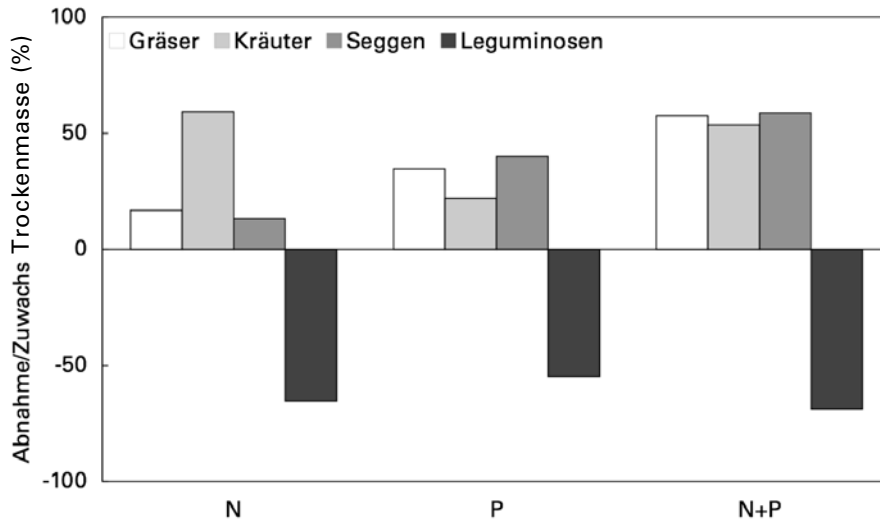
### 3.1 Produktivität der oberirdischen Pflanzenbiomasse

Die Zugabe von Nährstoffen in Form von Stickstoff oder Phosphor bewirkte einen starken Biomassezuwachs (Abb. 1 und Tab. 2) der Vegetation. Die maximale Produktivität wurde bei der Kombination von Stickstoff und Phosphor (N+P) erreicht, mit einem signifikanten ( $P = 0.009$ ) Zuwachs der gesamten Trockenmasse von +47% gegenüber der Kontrolle. Bei der Behandlung mit Stickstoff (N) konnte eine Zunahme der Trockenmasse von +20% (n.s.,  $P = 0.137$ ) und bei der Behandlung mit Phosphor (P) eine Zunahme von +25% (n.s.,  $P = 0.070$ ) beobachtet werden. Der Unterschied zwischen den Einzelbehandlungen N und P ist gering und nicht signifikant ( $P = 0.373$ ).

Die Veränderung der Trockenmasse der funktionellen Gruppen (Abb. 2 und Tab. 2) zeigte sowohl Zuwächse als auch Abnahmen in den behandelten Flächen (N, P und N+P) gegenüber der Kontrolle. Der stärkste Einfluss konnte durch die N+P-Behandlung verzeichnet werden mit einem signifikanten ( $P = 0.025$ ) Zuwachs bei den Gräsern um +57%, bei den Kräutern um +54% (n.s.,  $P = 0.068$ ) und bei den Seggen um +59% (n.s.,  $P = 0.165$ ). Bei der N-Behandlung nahmen die Kräuter (+59%, n.s.,  $P = 0.131$ ) im Vergleich zu den Gräsern (+17%, n.s.,  $P = 0.245$ ) und Seggen (+13%, n.s.,  $P = 0.354$ ) viel deutlicher zu. Im Gegensatz dazu überwiegt bei der P-Behandlung der Zuwachs der Seggen (+40%, n.s.,  $P = 0.189$ ) und der Gräser (+35%, n.s.,  $P = 0.096$ ) dem Zuwachs der Kräuter (+22%, n.s.,  $P = 0.257$ ). Die Gruppe der Leguminosen nahm in allen Behandlungen deutlich ab mit -65% bei N, -55% bei P und -69% bei N+P. Dabei ist der geringe Anteil der Leguminosen an der gesamten Trockenmasse zu berücksichtigen, der dazu führt, dass bereits kleine Änderungen bei den anderen, konkurrierenden funktionellen Gruppen eine grosse Wirkung auf die Leguminosen haben.



**Abbildung 1:** Produktivität (Mittelwerte) der alpinen Weide auf der Alp Flix in Abhängigkeit der Behandlungen N, P und N+P. Die prozentuale Verteilung der funktionellen Gruppen innerhalb einer Behandlung wird durch die Zahlen in den Balken dargestellt. Die Standardfehler beziehen sich auf die gesamte Trockenmasse. Unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Balken zeigen einen signifikanten Unterschied. Die  $P$ -Zahl zeigt den signifikanten Unterschied zur Kontrolle. Anzahl Stichproben (Monolithen): Kontrolle  $n=10$ , N  $n=8$ , P  $n=10$ , N+P  $n=9$ .



**Abbildung 2:** Relative Veränderungen (Abnahme und Zuwachs) der oberirdischen Trockenmasse der funktionellen Gruppen in Bezug auf die Kontrolle (Grundlinie  $\approx$  Anteil der funktionellen Gruppen in der Kontrolle) und in Abhängigkeit der Behandlungen N, P und N+P. Deutlich ist die Abnahme der Leguminosen in allen Behandlungen und die Zunahme der Gräser, Kräuter und Seggen bei N+P, sowie die überproportionale Förderung der Kräuter in der N-Behandlung.

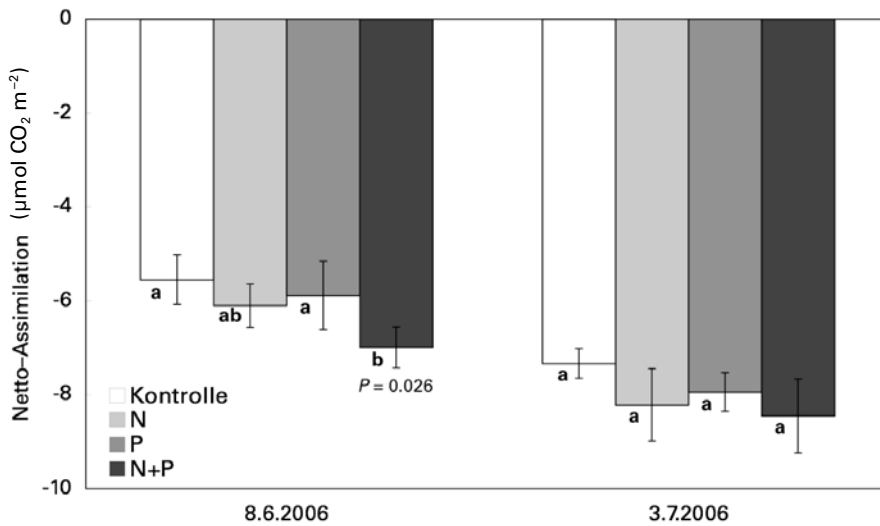
Behandlung	Total	Funktionelle Gruppen			
		Gräser	Kräuter	Seggen	Leguminosen
Kontrolle	109.4±13.6	64.8±11.1	25.5±5.4	10.7±2.5	8.5±4.1
N	131.3±13.7	75.6±10.7	40.6±11.5	12.2±2.7	2.9±1.9
P	137.2±11.8	87.3±12.3	31.1±6.5	15.0±4.0	3.8±0.8
N+P	160.7±13.9 <sup>a)</sup>	101.9±13.6 <sup>b)</sup>	39.2±6.8	17.0±5.6	2.6±0.8

**Tabelle 2:** Mittelwerte und Standardfehler der oberirdischen Trockenmasse ( $\text{g m}^{-2}$ ) der funktionellen Gruppen (Gräser, Kräuter, Seggen und Leguminosen) in Abhängigkeit der Behandlungen N, P und N+P. Signifikanter Zuwachs der totalen Trockenmasse (<sup>a)</sup>  $P = 0.009$  und der Gräser (<sup>b)</sup>  $P = 0.025$  in N+P.

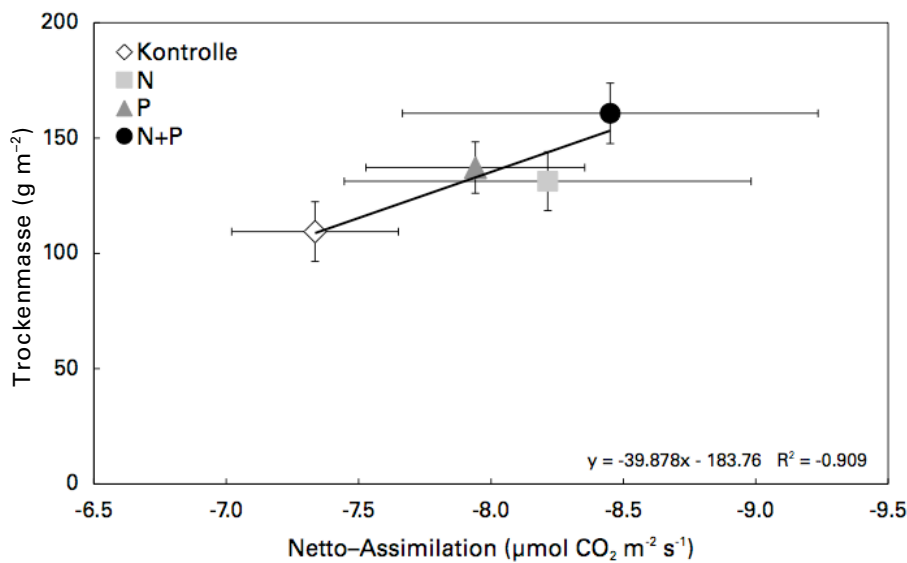
### 3.2 Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation

Die Netto-Assimilation (als Abnahme der CO<sub>2</sub>-Luftkonzentration in  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) stieg im Verlauf der Vegetationsperiode mit Zunahme der Biomasse, der erhöhten Boden- und Lufttemperaturen und der grösseren Strahlungsintensität an (Abb. 3). Bei den Behandlungen N, P und N+P nahm die CO<sub>2</sub>-Aufnahme der Vegetation in beiden Messungen im Vergleich zur Kontrolle zu. In der ersten Messung vom 8.6.06 zeigte N+P eine signifikant ( $P = 0.026$ ) erhöhte Netto-Assimilation um +21% (Kontrolle = -5.55, N+P = -6.99), die sich nach rund einem Monat auf +13% (Kontrolle = -7.34, N+P = -8.45; n.s.,  $P = 0.120$ ) verringerte. Die Behandlungen N und P zeigten zu Beginn eine Netto-Assimilationsdifferenz zur Kontrolle von +9% (N = -6.10; n.s.,  $P = 0.275$ ) und +6% (P = -5.88; n.s.,  $P = 0.321$ ), die sich bei der Messung vom 3.7.06 auf +11% (N = -8.21; n.s.,  $P = 0.173$ ) und +8% (P = -7.94; n.s.,  $P = 0.142$ ) erhöhte.

Die Netto-Assimilation und die Produktivität (Trockenmasse) des Bestandes standen in direktem Zusammenhang (Korrelationskoeffizient  $R^2 = -0.909$ ). Durch das erhöhte Wachstum in der Behandlung N+P stieg auch die Netto-Assimilation an, jedoch nicht signifikant.



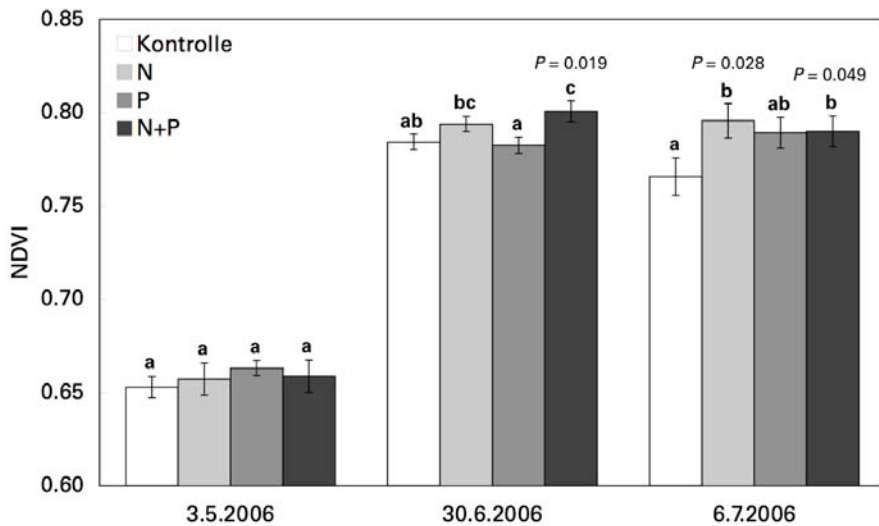
**Abbildung 3:** Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation (Mittelwerte) der Vegetation mit Standardfehler. Erhöhte Aktivität in beiden Messungen bei den Behandlungen N, P und N+P mit signifikant erhöhter Assimilation bei N+P am 8.6.06. Unterschiedliche Buchstaben unterhalb der Balken zeigen einen signifikanten Unterschied. Die *P*-Zahl zeigt den signifikanten Unterschied zur Kontrolle.



**Abbildung 4:** Korrelation der oberirdischen Trockenmasse (Ernte vom 1.8.06) und der Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation vom 3.7.06. Mittelwerte und Standardfehler.

### 3.3 NDVI

Der NDVI zeigte in der Messung vom 3.5.06 (vor den Behandlungen) einen Mittelwert um 0.658, ohne grosse Unterschiede zwischen den Behandlungen (Abb. 5). Das Maximum wurde am 30.6.06 mit einem um +20.1% höheren Index (Mittelwert aller Behandlungen) im Vergleich zu der Messung vom 3.5.06 erreicht. Bereits nach einer Woche (Messung vom 6.7.06) nahm der Index wieder um -0.8% auf +19.3% leicht ab. Der deutlichste Unterschied des Indexes in den Behandlungen gegenüber der Kontrolle zeigte sich am 6.7.06, der bei N um +3.9% (signifikant,  $P = 0.028$ ), P um +3.1% (n.s.,  $P = 0.054$ ) und N+P um +3.2% (signifikant,  $P = 0.049$ ) zunahm. N+P war in der Messung vom 30.6.06 signifikant ( $P = 0.019$ ) um +2.1% grösser als die Kontrolle.

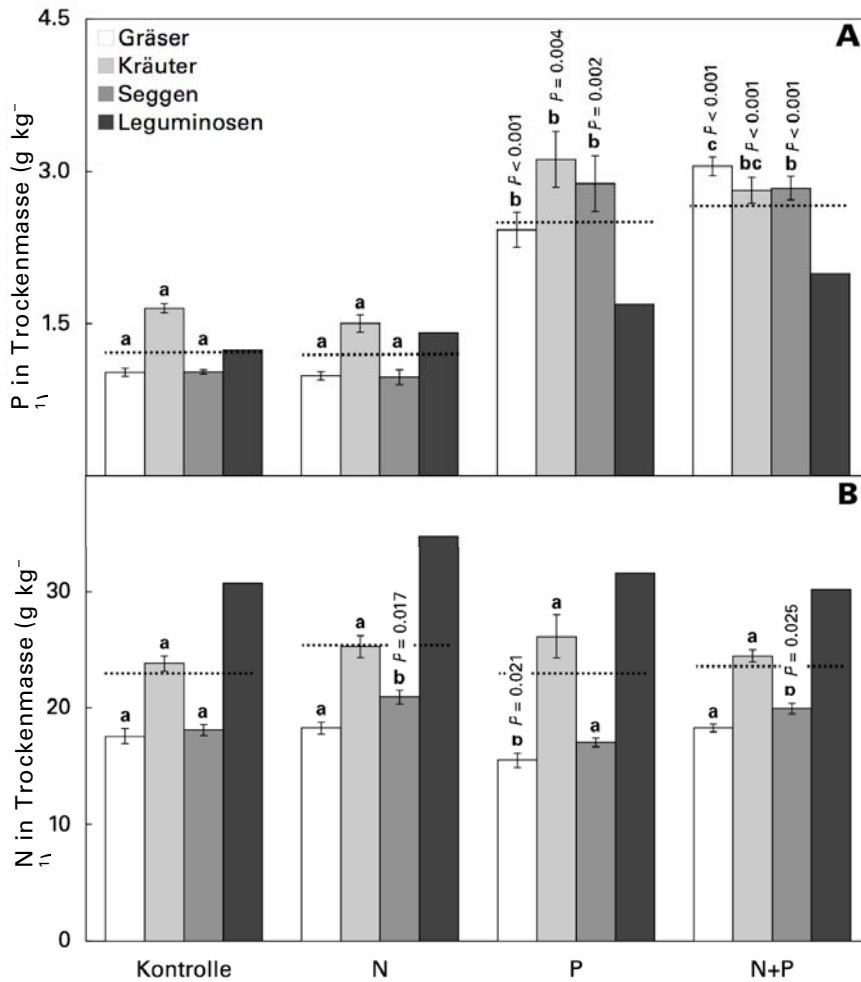


**Abbildung 5:** NDVI (Mittelwerte und Standardfehler) des Bestandes. Deutlicher Unterschied im Vergleich zur Kontrolle gegen Ende der Vegetationsperiode in den Behandlungen N (signifikant), P (n.s.) und N+P (signifikant). Ausgehend von der noch unbehandelten Messung vom 3.5.06. Unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Balken zeigen einen signifikanten Unterschied. Die *P*-Daten zeigen den signifikanten Unterschied zur Kontrolle.

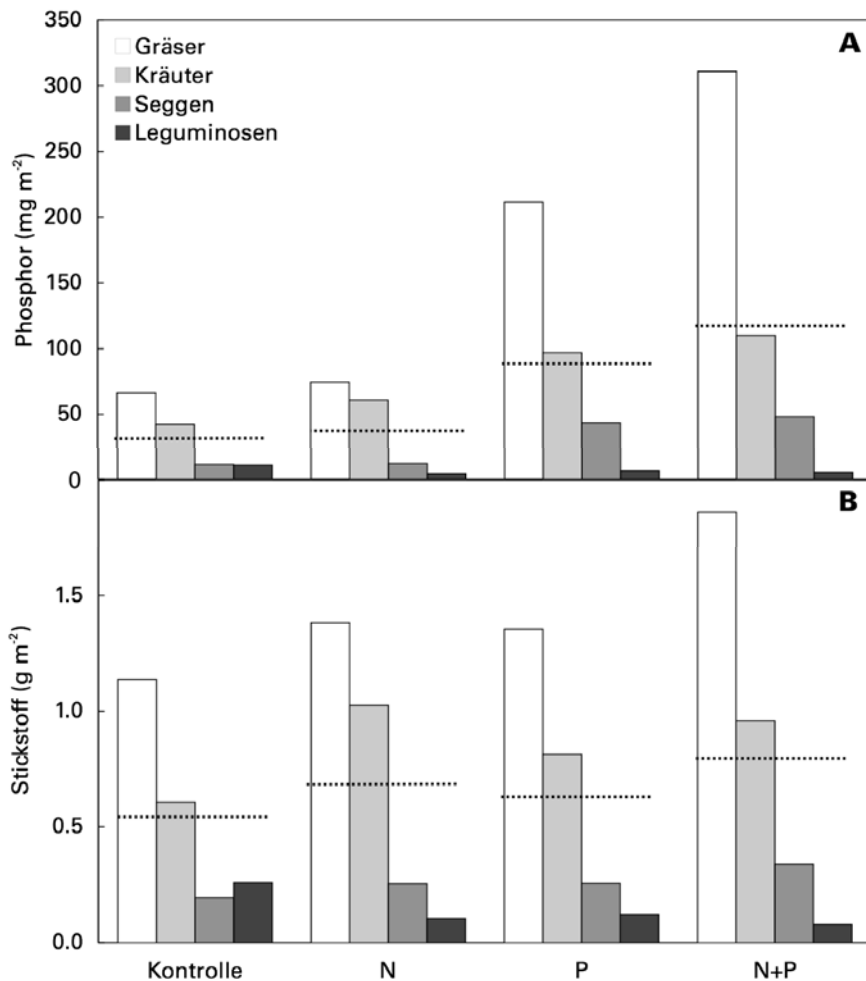
### 3.4 Biomasse-Inhaltsanalyse von N und P

Die Analyse von Phosphor und Stickstoff in der Trockenmasse zeigte ein heterogenes Bild. Der Phosphor wurde bei den Behandlungen P und N+P deutlich aufgenommen und wurde mit durchschnittlich  $2.5 \text{ g kg}^{-1}$  und  $2.7 \text{ g kg}^{-1}$  in der Trockenmasse gemessen (Abb. 6A). Die Unterschiede zwischen den funktionellen Gruppen zeigten eine Sonderstellung der Leguminosen. Ihre zusätzliche P-Aufnahme betrug lediglich 36% bei P und 60% bei N+P. Besonders die Gräser (+138% bei P [signifikant,  $P < 0.001$ ]) und Seggen (+181% bei P [signifikant,  $P < 0.001$ ]) profitierten von der P-Düngung.

Der Stickstoff in der Trockenmasse (Mittelwerte der funktionellen Gruppen) zeigte bei einer Zugabe in den Behandlungen N und N+P nur einen schwachen Effekt mit einer zusätzlichen Aufnahme von +10% (auf  $24.8 \text{ g kg}^{-1}$ ) bei N und +3% (auf  $23.2 \text{ g kg}^{-1}$ ) bei N+P (Abb. 6B). Der Vergleich zwischen den funktionellen Gruppen zeigte jedoch, dass die Kräuter und Leguminosen einen höheren Stickstoffanteil aufweisen als die Gräser und Seggen.



**Abbildung 6:** Mittelwerte und Standardfehler von Phosphor (A) und Stickstoff (B) in der oberirdischen Trockenmasse. In den P- und N+P-Behandlungen nimmt der Phosphor-Gehalt markant zu (= Aufnahme). Nur schwache zusätzliche Aufnahme von Stickstoff bei N und bei N+P (Abb. 6B). Bei den Leguminosen war nur jeweils eine chemische Analyse möglich. Mittelwerte der gesamten Vegetation als gestrichelte Linien. Unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Balken zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Behandlungen. Die P-Daten zeigen den signifikanten Unterschied zur Kontrolle.



**Abbildung 7:** Phosphor (A) und Stickstoff (B) in der oberirdischen Trockenmasse bezogen auf die Fläche. Erhöhte Werte bei N+P durch die Zunahme der Biomasse. Mittelwerte der gesamten Vegetation als gestrichelte Linien.

		Funktionelle Gruppen			
Behandlung		Gräser	Kräuter	Seggen	Leguminosen
%N	Kontrolle	1.76±0.06	2.38±0.07	1.81±0.05	3.07
	N	1.83±0.05	2.53±0.09	2.09±0.06	3.48
	P	1.55±0.06	2.61±0.18	1.70±0.04	3.16
	N+P	1.83±0.03	2.45±0.05	2.00±0.05	3.02
%P	Kontrolle	0.10±(0.00)	0.17±(0.00)	0.10±(0.00)	0.12
	N	0.10±(0.00)	0.15±0.01	0.10±0.01	0.14
	P	0.24±0.02	0.31±0.03	0.29±0.03	0.17
	N+P	0.31±0.01	0.28±0.01	0.28±0.01	0.20

**Tabelle 3:** Konzentration (in %) von Stickstoff und Phosphor in der oberirdischen Trockenmasse der funktionellen Gruppen (Mittelwerte und Standardfehler). Bei den Leguminosen war nur jeweils eine chemische Analyse möglich.

		Funktionelle Gruppen			
Behandlung		Gräser	Kräuter	Seggen	Leguminosen
	Kontrolle	17±0.7	14±0.4	18±0.4	25
	N	19±0.8	17±0.6	22±1.1	25
	P	6±0.3	8±0.9	6±0.6	19
	N+P	6±0.2	9±0.5	7±0.5	15

**Tabelle 4:** Stickstoff-Phosphor-Verhältnisse (N:P) der oberirdischen Trockenmasse in den funktionellen Gruppen (Mittelwerte und Standardfehler). Bei den Leguminosen war nur jeweils eine Analyse möglich. Deutliche Abnahme der Werte durch die Aufnahme von Phosphor in den Behandlungen P und N+P.

## 4.1 Produktivität

Die Biomasse hat sich durch die Zufuhr von Stickstoff und/oder Phosphor stark vergrößert. Solche ähnlich grossen Zuwächse wurden auch von Bowman et al. (1993) auf einer Feuchtwiese in der alpinen Tundra (Niwot Ridge, Colorado, USA) beobachtet. Die Zunahme konnte bereits während der ersten Vegetationsperiode beobachtet werden und lässt darauf schliessen, dass Stickstoff und Phosphor für die Pflanzen sofort verfügbar waren.

Bei den Einzelbehandlungen (N und P) betrug der mittlere Biomassezuwachs 20% (n.s.) und 25% (n.s.). Nach Marschner (2002) und Körner (2003) ist Stickstoff, wegen der tiefen Mineralisationsrate in hochgelegenen Standorten, der am stärksten limitierende Faktor für alpine Pflanzenarten. Das N-P-Experiment zeigte aber, dass Phosphor eine ebenso wichtige Rolle spielen kann. Das heisst Stickstoff und Phosphor sind in ähnlicher Weise bedeutend für die Produktivität der alpinen Weiden auf der Alp Flix, was annähernd einer Kolimitation entspricht. Jedoch zeigte sich kein synergetischer (überproportionaler) Wachstums-Effekt in der Düngekombination N+P, respektive war nicht feststellbar mit den angewandten Methoden. Die Wachstumsförderung durch Stickstoff und Phosphor wirkte stattdessen eher additiv – die Summe der Zuwächse in den Einzelbehandlungen N und P ergibt den Zuwachs von N+P. Bowman et al. (1993) stellten eine ähnliche Förderung der oberirdischen Biomasse in den Behandlungen (N, P und N+P) bei einer Feuchtwiese der alpinen Tundra fest. Die Feuchtwiese wie auch die Weide auf der Alp Flix sind in ähnlicher Weise vergleichbar und werden dominiert von Gräsern und als zweite dominierende Gruppe von den Kräutern. In der gleichen Untersuchung von Bowman et al. (1993) wurde bei einer Trockenwiese der alpinen Tundra eine N-Limitierung nachgewiesen.

Die Trockenmasse der Gräser nahm in den Behandlungen N, P und N+P zu, jedoch blieb der Anteil von etwa 60% gleich. Diese Resultate decken sich mit den Ergebnissen anderer Studien. Beispielsweise fanden Zoller & Wagner (1986) sowie Bobbink et al. (1998), dass insbesondere Gräser unter erhöhtem N-Eintrag rascher Biomasse produzierten und dabei andere funktionelle Gruppen verdrängten. Im Gegensatz dazu wurde im O<sub>3</sub>-N-Experiment auf der Alp Flix jedoch in den bisherigen drei Versuchsjahren eine Abnahme der Gräser (2004 -6%, 2005 -12% und 2006 -4%) in der N-Behandlung (50 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) im Vergleich zur Kontrolle festgestellt, obwohl die Monolithen vom gleichen Standort mit derselben Artenzusammensetzung verwendet wurden (Bassin & Volk, in Vorbereitung). Eine schlüssige Erklärung dieses Effekts steht noch aus.

Die Abhängigkeit der Produktivität durch die jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur und des Niederschlages zeigte sich im O<sub>3</sub>-N-Experiment bei der Ernte der Kontrolle mit den Mittelwerten 121.4 g m<sup>-2</sup> (2004), 122.2 g m<sup>-2</sup> (2005) und 86.3 g m<sup>-2</sup> (2006) (Bassin & Volk, in Vorbereitung). Die während dieser Diplomarbeit gemessenen 109.4 g m<sup>-2</sup> (Kontrolle) scheinen eher unterdurchschnittlich zu sein.



Die Anteile (Mittelwerte) der funktionellen Gruppen am Gesamtbestand des O<sub>3</sub>-N-Experimentes (2006) und des N-P-Experimentes korrelieren in der Kontrolle ( $R^2 = 0.985$ ) und in der N-Behandlung ( $R^2 = 0.738$ ). Die Leguminosen waren nur mit einem kleinen Gewichtsanteil an der totalen oberirdischen Biomasse vertreten. Sie nahmen jedoch in allen Behandlungen um über 50% ab. Eine Ursache könnte die Zunahme und Ausbreitung der Biomasse in allen weiteren, konkurrierenden funktionellen Gruppen (Gräser, Kräuter und Seggen) sein. In der N-Behandlung profitierten die Kräuter deutlich (+59%) von der zusätzlichen Düngung. Vegetationstypen in klimatisch rauer Umgebung welche von Kräutern dominiert werden, sind nach Bowman et al. (2006) stark empfindlich auf geringe N-Deposition. Nach Güsewell et al. (2004) werden die Kräuter jedoch hauptsächlich durch die P- oder N+P-Düngung gefördert. Die Seggen zeigten in der N-Behandlung einen geringeren Zuwachs als bei der P-Düngung (P und N+P). Sie sind nach Shaver et al. (1998) deutlich durch Phosphor limitiert. Der Zuwachs von +13% bei N ist vergleichbar mit der Steigerung von +20%, welche im ersten Jahr (2004) des O<sub>3</sub>-N-Experimentes erzielt wurde. Im Referenzexperiment steigerten die Seggen ihr Wachstum in der N-Behandlung im zweiten Versuchsjahr (2005) um +140% und im dritten Jahr (2006) um +207% (Bassin & Volk, in Vorbereitung).

## 4.2 Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation

Innerhalb von rund einem Monat stieg die Netto-Assimilationsrate im Durchschnitt um  $1.9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  respektive um 30% an. Die erhöhte Netto-Assimilation bei N+P in der ersten Messung vom 8.6.06 ist möglicherweise auf die Verfügbarkeit der N- und P-Kombination zurückzuführen. Zu diesem Zeitpunkt wurden bereits 75% der jährlichen Gesamtdüngemenge appliziert. Die CO<sub>2</sub>-Aufnahme der Vegetation verlief in Korrelation mit dem Wachstum des Bestandes. Das Verhältnis von Trockenmasse zu Netto-Assimilation nahm in der N+P-Behandlung (19.0) zu im Vergleich zur Kontrolle (14.9). In den Behandlungen nahm die Biomasse dadurch stärker zu als die CO<sub>2</sub>-Aufnahme. Vermutlich blieb der Anteil an assimilationsfähigem Pflanzenmaterial auf gleichem Niveau und der Anteil der Respiration stieg an. Alpine Pflanzengesellschaften sind nach Körner (2003) in erster Linie *nicht* durch CO<sub>2</sub> limitiert, denn die Aufnahme durch die Blätter ist relativ hoch. Der Nährstoffeintrag aus der Atmosphäre kann den gleichen oder grösseren Effekt erzeugen wie eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Diemer, 1994).

### 4.3 NDVI

Nach der Schneeschmelze befand sich die Vegetation in einem ähnlichen Ausgangszustand mit einem durchschnittlichen Index von  $\sim 0.66$  und erreichte gegen Ende Juni ihr Dichte-Maximum in den gedüngten Monolithen (N, P und N+P). Die leichte Abnahme des NDVI der Kontrollflächen gegenüber den behandelten Flächen in der Messung vom 6.7.06 deutet darauf hin, dass die Düngung das Einsetzen der Seneszenz verzögert.

### 4.4 Biomasse-Inhaltsanalyse von N und P

Die Mittelwerte der Trockenmasse zeigten bei der N-Analyse eine gleich bleibende Verteilung in den Behandlungen P und N+P sowie der Kontrolle und eine leichte Erhöhung in N. Bei der Verteilung des N-Inhaltes auf die Fläche wird ein leichter Trend sichtbar, der auf eine grössere Aufnahme von Stickstoff in der Behandlung N und N+P durch die erhöhte Produktivität zurückzuführen war. Die Vegetation scheint im Mittel gesättigt zu sein und nur geringfügig Stickstoff aufzunehmen (Luxusaufnahme). Ein deutlicher Unterschied zeigte sich bei der Aufnahme von Phosphor in den Behandlungen P und N+P. Der P-Anteil in der Biomasse steigt um das Doppelte in den beiden Behandlungen an. Bowman (1994) konnte ebenfalls eine erhöhte P-Aufnahmefähigkeit in einer mit Phosphor gedüngten Feuchtwiese in der alpinen Tundra feststellen. Der Vergleich der P- und N+P-Behandlung zeigte, dass die P-Aufnahme nicht von der N-Verfügbarkeit abhängig ist. Zudem zeigte sich, dass innerhalb der funktionellen Gruppen die Kräuter und Leguminosen deutlich mehr Stickstoff in der Trockenmasse enthalten als Gräser und Seggen.

Die Verhältnisse von Stickstoff zu Phosphor (N:P) ergaben in der Kontrolle wie auch in den Behandlungen ähnliche Werte wie bei dem  $O_3$ -N-Experiment und den gesammelten N:P-Daten in Güsewell et al. (2004). In den Behandlungen P und N+P wurden die Verhältnisse bei den Gräsern, Kräutern und Seggen auf etwa einen Drittel reduziert. Bei der Behandlung N zeigte sich jedoch nur eine minimale Veränderung. Die Werte deuten auf eine P-Limitierung der Weide auf der Alp Flix. Die Aufhebung der Nährstofflimitation durch Phosphor ist anhand der tieferen N:P-Verhältnisse in den P- und N+P-Behandlungen möglicherweise erreicht worden. Tessier & Raynal (2003) und Koerselman & Meuleman (1996) untersuchten die N:P-Verhältnisse bei europäischen Pflanzen in Feuchtgebieten und fanden einen Schwellenwert von  $<14$  für eine N-Limitierung,  $>16$  für eine P-Limitierung und dazwischen eine Kolimitierung. Olde Venterink et al. (2003) weisen jedoch darauf hin, dass es schwierig ist, P-limitierte Vegetation von N-P-kolimitierter zu unterscheiden und zeigen in ihrer Arbeit, dass auch bei einem Verhältnis von  $>16$  eine Kolimitierung möglich ist. Für die Hochlandvegetation sind die N:P-Verhältnisse in Kombination mit einer experimentellen Düngung weniger bekannt. In der Arbeit von Bowman (1994) werden die N:P-Verhältnisse für eine alpine Trockenwiese mit 13 (N-limitiert) und für eine alpine Feuchtwiese mit 14 (P-limitiert) angegeben. Güsewell et al. (2005) geben für *Nardus* Grasland ein Verhältnis von  $>13$  an und bezeichnen dies als P-limitiert oder N-P-kolimitiert. In den funktionellen Gruppen zeigten die Kräuter bei der Kontrolle ein tieferes N:P-

Verhältnis als die Gräser. Dies wird auch von Güsewell et al. (2004) dadurch bestätigt, dass grasartige Pflanzen ein höheres N:P-Verhältnis haben und dass allgemein eine Vegetation mit einem hohen N:P-Wert mehr stresstolerante Arten aufweist.

## 4.5 Critical Load

Critical Loads (Grenzbelastungen) werden generell definiert als der minimale Input eines Schadstoffes, welcher eine Schädigung bei einem sensitiven, ökologischen Indikator bewirkt (OECD, 1997). Für alpine Rasengesellschaften wurde der Critical Load im Rahmen der Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (UNECE) bei  $10 - 15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  angesetzt (UNECE, 2003; Achermann & Bobbink, 2003). Bowman et al. (2006) untersuchten empirisch den Critical Load für eine artenreiche alpine Trockenwiese (Niwot Ridge, Colorado, USA). Sie fanden bei  $4 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  eine Veränderung bei den einzelnen Arten und bei  $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  eine Veränderung über die ganze Pflanzengemeinschaft. Die Ferkelkraut-Borstgras-Weide (*Hypochaero-Nardetum*) der Alp Flix ist den Borstengrasrasen (*Nardion*) sehr ähnlich. Sie gedeihen meist auf sauren Verhältnissen und weisen einige auffällige Arten wie Arnika, Purpurenzian, Koch'schen Enzian und Alpenklee auf (Hegg et al., 1993). Werden Borstengrasweiden gedüngt, so verschwinden die typischen Arten innert weniger Jahre (Hegg et al., 1993; Delarze et al., 1999) und Grasarten nehmen überhand (Bobbink et al., 1998). Englische Untersuchungen zeigten, dass der chronische Stickstoffeintrag die Artenvielfalt auf sauren Rasen deutlich vermindert, wobei zwischen dem Rückgang der Artenvielfalt und der N-Deposition eine lineare Beziehung festgestellt werden konnte. Pro  $2.5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  nahm die Artenvielfalt um eine Art auf  $4 \text{ m}^2$  ab (Stevens et al., 2004). Bowman et al. (2006) konnten in ihren Versuchen jedoch eine Zunahme der Diversität bei erhöhter N-Gabe feststellen. Die Autoren vermuten, dass die erhöhte N-Verfügbarkeit mehr Arten für eine kurze Zeit koexistieren lässt. Soudzilovskaia & Onipchenko (2005) erwarten keine Abnahme der Anzahl Arten bei einer Aufhebung der Nährstofflimitation in alpinen Pflanzengesellschaften. Ein klarer Zusammenhang zwischen der Biomassezunahme und dem Verschwinden von Arten sieht Grime (1973; 2001) in seinen Arbeiten. Generell besteht eine erhebliche Wissenslücke über die Auswirkung von erhöhter N-Deposition auf die oberhalb der Waldgrenze befindlichen Pflanzengesellschaften. Auf der Alp Flix wurde eine N-Deposition von  $< 5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  berechnet aus N-Konzentrationsmessungen der Luft, des Regenwassers und der Schneedecke (Bassin & Volk, in Vorbereitung). Um eine erhöhte N-Deposition zu simulieren wurde im N-P-Experiment eine 10-mal höhere Stickstoff-Dosis verabreicht als die berechnete N-Deposition.

## 4.6 Limitierung des N-P-Experimentes

Wasser, Stickstoff und Phosphor werden als wichtigste Wachstumselemente angesehen. In wie weit die  $13.3 \text{ l Wasser pro m}^2$  welche durch die Behandlungen verteilt wurde, einen Einfluss auf die Vegetation hatte wurde nicht ermittelt. Der Niederschlag nach der Schneeschmelze bis zur Ernte lag leicht unter dem Durchschnitt der letzten Jahre (Messstation Davos). Soudzilovskaia & Onipchenko

(2005) bezeichneten in ihrer Arbeit die alpinen Heidepflanzen als gut adaptiert an den natürlichen Wasserhaushalt und fanden bei den meisten Arten keine Veränderung bei einer Bewässerung. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Bowman et al. (1995) bei Pflanzengesellschaften der alpinen Tundra und auch Press et al. (1998) konnten keine Veränderung bei einer zusätzlichen Bewässerung finden. Shevtsova et al. (1997) zeigten jedoch in ihrer Arbeit eine erhöhte Wachstumsrate.

Die mit dem Schnitt der Biomasse wurden Nährstoffe entzogen, welche zu einem späteren Zeitpunkt der Vegetation wieder zur Verfügung stehen könnten. So wurde bei der Kontrolle  $\sim 0.550 \text{ g N m}^{-2}$  und  $\sim 0.032 \text{ g P m}^{-2}$  aus dem System entfernt. Der „N-Verlust“ wird jedoch von der N-Deposition aus der Atmosphäre überkompensiert.

Diese Diplomarbeit zeigt, dass die Produktivität der Weide auf der Alp Flix durch Phosphor limitiert ist und die Kombination von Stickstoff und Phosphor eine additive Wirkung auf die Produktivität der Vegetation hatte.

Die Studie war auf eine Vegetationsperiode beschränkt und Langzeiteffekte konnten somit nicht berücksichtigt werden. Folgeuntersuchungen wie die Weiterführung der Behandlungsmethode, die Messung der Biomasse zu einem späteren Zeitpunkt, die Messung der Bodenverhältnisse oder die Beobachtung der Vegetations-Veränderung würden weitere wichtige Aufschlüsse über den Einfluss von Phosphor und Stickstoff auf die alpine Weide der Alp Flix geben.

Ein grosses Dankeschön möchte ich Matthias Volk, Seraina Bassin, Laura De Baan, Ruedi Riesen, Hans-Ruedi Bosshard und seinem Team widmen. Sie haben mit ihren wertvollen Anregungen, der Hilfe bei der Feldarbeit und der Analyse im Labor einen wesentlichen Beitrag an diese Diplomarbeit geleistet. Der spezielle Dank geht an Matthias Volk – er hat mich als Betreuer und Korrektor von der Arbeit auf dem Feld über die Auswertung der erhobenen Daten bis zu der Niederschrift der Diplomarbeit stets begleitet.

- Achermann, B. and Bobbink, R., 2003: Empirical critical loads for nitrogen – expert workshop. *Environmental Documentation: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL)*, 20.
- Bobbink, R., Hornung, M., and Roelofs, J. G. M., 1998: The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. *Ecology*, 86: 717-738.
- Boelman, N. T., Stieglitz, M., Rueth, H. M., Sommerkorn, M., Griffin, K. L., Shaver, G. R., and Gamon, J. A., 2003: Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra. *Oecologia*, 135: 414-421.
- Bowman, W. D., Theodose, T. A., Schardt, J. C., and Conant, R. T., 1993: Constraints of nutrient availability on primary production in two alpine tundra communities. *Ecology*, 74: 2085-2097.
- Bowman, W. D., 1994: Accumulation and use of nitrogen and phosphorus following fertilization in two alpine tundra communities. *Oikos*, 70: 261-270.
- Bowman, W. D., Theodose, T. A., and Fisk, M. C., 1995: Physiological and production responses of plant growth forms to increases in limiting resources in alpine tundra: implications for differential community response to environmental change. *Oecologia*, 101: 217-227.
- Bowman, W. D., Gartner, J. R., Holland, K., and Wiedermann, M., 2006: Nitrogen critical loads for alpine vegetation and terrestrial ecosystem response: are we there yet? *Applied Ecology*, 16: 1183-1193.
- Braun, M., Hurni, P., and Spiess, E., 1994: Phosphor- und Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft und Para-Landwirtschaft. *Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, CH-3097 Liebefeld-Bern (Hrsg.)*.
- De Baan, L., 2006: Anthropogenic ozone and nitrogen deposition: Effects on flower production and flowering phenology of 12 alpine species. Diploma Thesis in Environmental Sciences, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zürich, Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Zürich, Switzerland.
- Delarze, R., Gonseth, Y., and Galland, P., 1999: *Lebensräume der Schweiz: Ökologie-Gefährdung-Kennarten*: Ott-Verlag, 413 pp.
- Diemer, M. W., 1994: Mid-season gas exchange of an alpine grassland under elevated CO<sub>2</sub>. *Oecologia*, 98: 429-435.
- Eggenberg, S., Dalang, T., Dipner, M., and Mayer, C., 2001: *Kartierung und Bewertung der Trockenwiesen und -weiden von nationaler Bedeutung*. Technischer Bericht. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

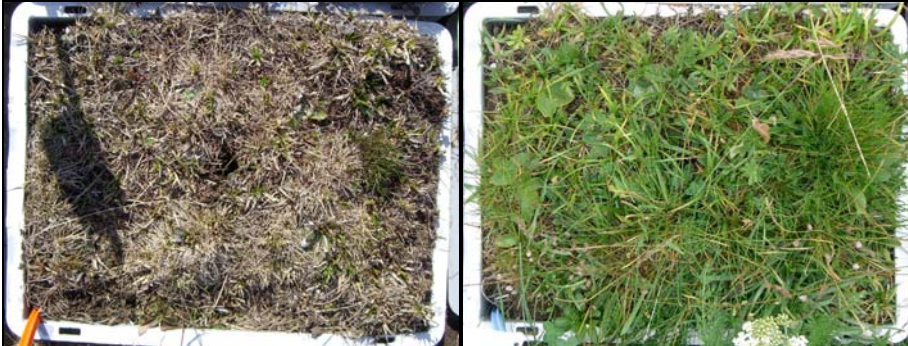
- ELK, 2005: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Luft- hygiene (EKL). Bundesamt für Umwelt, Wald und Land- schaft (BUWAL) *Schriftenreihe Umwelt*, 384: 168.
- Frossard, E., Julien, P., Neyroud, J. A., and Sinaj, S., 2004: Phosphor in Böden – Standortbestimmung Schweiz. *Schriftenreihe Umwelt*, 368: 174.
- Grime, J. P., 1973: Competitive exclusion in herbaceous vegetation. *Nature*, 242: 344-347.
- Grime, J. P., 2001: *Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties*. 2 ed. Chichester. John Wiley and Sons. 417 pp.
- Güsewell, S., 2004: Tansley review: N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 164: 243-266.
- Güsewell, S., Jewell, P. L., and Edwards, P. J., 2005: Effects of heterogeneous habitat use by cattle on nutrient availability and litter decomposition in soils of an Alpine pasture. *Plant and Soil*, 268: 135-149.
- Hegg, O., Béguin, C., and Zoller, H., 1993: *Atlas schutzwürdiger Vegetationstypen der Schweiz*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Horwitz, W., 1984: *Official methods of analysis of the association of analytical chemists*, 1141 pp.
- Koerselman, W. and Meuleman, A. F. M., 1996: The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Applied Ecology*, 33: 1441-1450.
- Körner, C., 2003: *Alpine plant life: functional plant ecology*. 2 ed: Springer.
- Marschner, H., 1995: *Mineral nutrition of higher plants*. 2 ed: Academic Press San Diego.
- Naumann, K. and Bassler, R., 1997: *Methodenbuch des Verbandes deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten*. BD, III: Die chemische Untersuchung von Futtermitteln: VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Newman, E. I., 1995: Phosphorus Inputs to terrestrial ecosystems. *Ecology*, 83: 713-726.
- OECD, 1997: *Glossary of environment statistics, studies in methods*. New York: United Nations.
- Press, M. C., Potter, J. A., Burke, M. J. W., Callaghan, T. V., and Lee, J. A., 1998: Responses of a subarctic dwarf shrub heath community to simulated environmental change. *Ecology*, 86: 315-327.
- Pronatura.ch, 2006: Schutzgebiete – Die Moorlandschaft der Alp Flix. URL <http://www.pronatura.ch/gr/index.php?lang=1&mz=3>
- Rihm, B. and Kurz, D., 2001: Deposition and critical loads of nitrogen in Switzerland. *Water, Air, & Soil Pollution*, 130: 1223-1228.
- Rouse, J. W., 1974: Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *NASA. Goddard Space Flight Center 3 d ERTS-1 Symp*, 1.
- Rusek, J., 1993: Air-pollution-mediated changes in alpine ecosystems and ecotones. *Ecological Applications*, 3: 409-416.



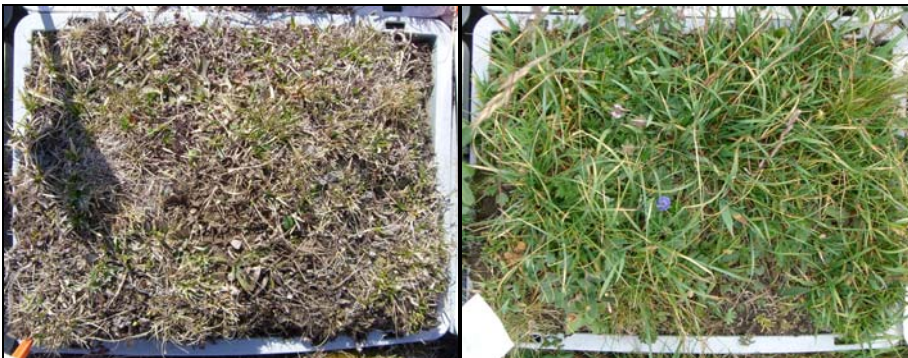
- Shaver, G. R., Johnson, L. C., Cades, D. H., Murray, G., Laundre, J. A., Rastetter, E. B., Nadelhoffer, K. J., and Giblin, A. E., 1998: Biomass and CO<sub>2</sub> flux in wet sedge tundras: responses to nutrients, temperature, and light. *Ecological Monographs*, 68: 75-97.
- Shevtsova, A., Haukioja, E., and Ojala, A., 1997: Growth response of subarctic dwarf shrubs, *Empetrum nigrum* and *Vaccinium vitis-idaea*, to manipulated environmental conditions and species removal. *Oikos*, 78: 440-458.
- Soudzilovskaia, N. A. and Onipchenko, V. G., 2005: Experimental investigation of fertilization and irrigation effects on an alpine heath, northwestern Caucasus, Russia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37: 602-610.
- Spiegelberger, T., Hegg, O., Matthies, D., Hedlund, K., and Schaffner, U., 2006: Long-term effects of short-term perturbation in a subalpine grassland. *Ecology*, 87: 1939-1944.
- Stadlemann, P., Lovas, R., and Butscher, E., 2002: 20 Jahre Sanierung und Überwachung des Baldeggersees. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern*: 115-164.
- Stevens, C. J., Dise, N. B., Mountford, J. O., and Gowing, D. J., 2004: Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science*, 303: 1876-1879.
- Tasser, E. and Tappeiner, U., 2002: The impact of land-use changes in time and space on vegetation distribution in mountain areas. *Applied Vegetation Science*, 5: 173-184.
- Tessier, J. T. and Raynal, D. J., 2003: Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Applied Ecology*, 40: 523-534.
- Theodose, T. A. and Bowman, W. D., 1997: Nutrient availability, plant abundance, and species diversity in two alpine tundra communities. *Ecology*, 78: 1861-1872.
- Tilman, D., 1982: *Resource Competition and Community Structure - Monographs in Population Biology*. New Jersey, USA: Princeton University Press.
- Tilman, D. and Lehman, C., 2001: Human-caused environmental change: Impacts on plant diversity and evolution: *The National Academy of Sciences*.
- UNECE, 2003: Expert workshop on empirical critical loads for nitrogen deposition on (semi-) natural ecosystems. *EB.AIR*, WG.1 2003.
- Venterink, H. O., Wassen, M. J., Verkroost, A. W. M., and de Ruiter, P. C., 2003: Species richness-productivity patterns differ between N-, P- and K-limited wetlands. *Ecology*, 84: 2191-2199.
- Willems, J. H., Peet, R. K., and Bik, L., 1993: Changes in chalk-grassland structure and species richness resulting from selective nutrient additions. *Vegetation Science*, 4: 203-212.
- Zoller, H. and Wagner, C., 1986: Rückgang und Gefährdung von Mesobromion-Arten im Schweizer Jura. *Veröffentlichungen Des Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rübel*, 87: 239-259.

3.5.2006

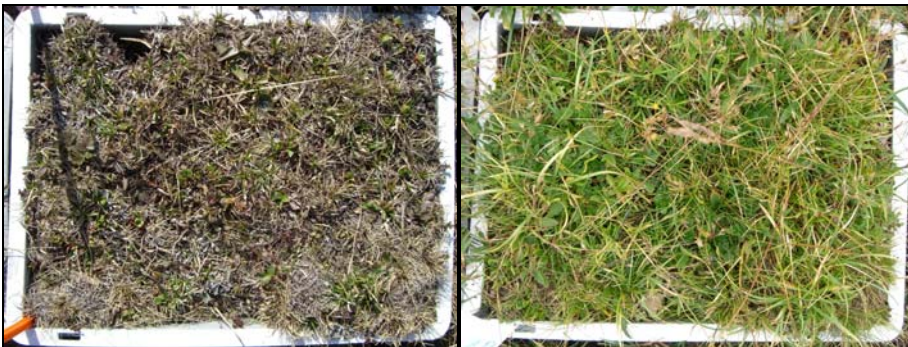
1.8.2006



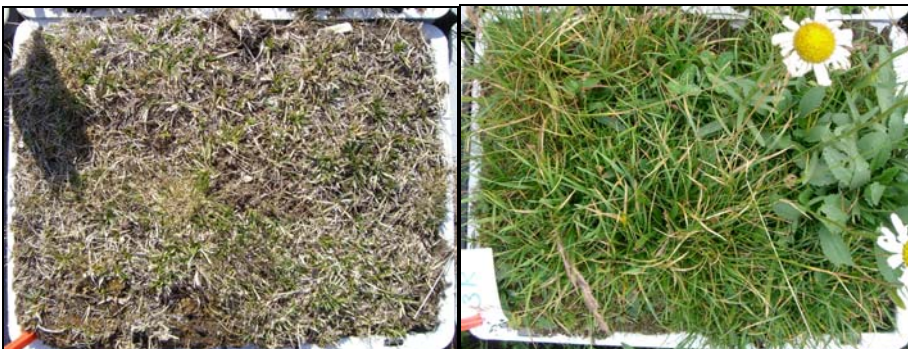
**Kontrolle**



**N**

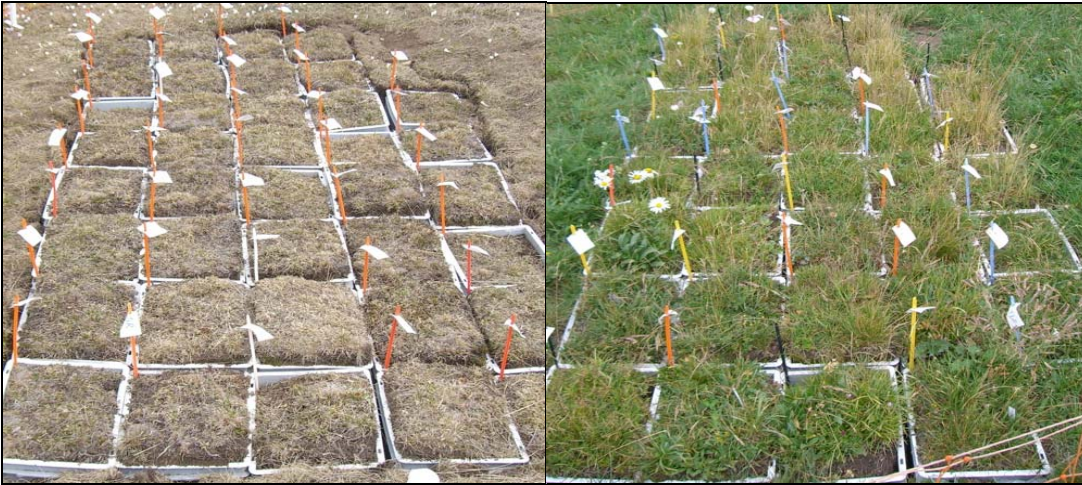


**P**



**N+P**

Veränderung der Monolithen (Beispiele) in Abhängigkeit der Behandlungen während der Vegetationsperiode bis zur Ernte.



Übersicht aller 38 Monolithen am 3.5.2006 und 1.8.2006 (Ernte-Datum).



Im Vordergrund das N-P-Experiment und im Hintergrund die Begasungsanlagen des O<sub>3</sub>-N-Experimentes.



Foto: L. De Baan

Messung des NDVI

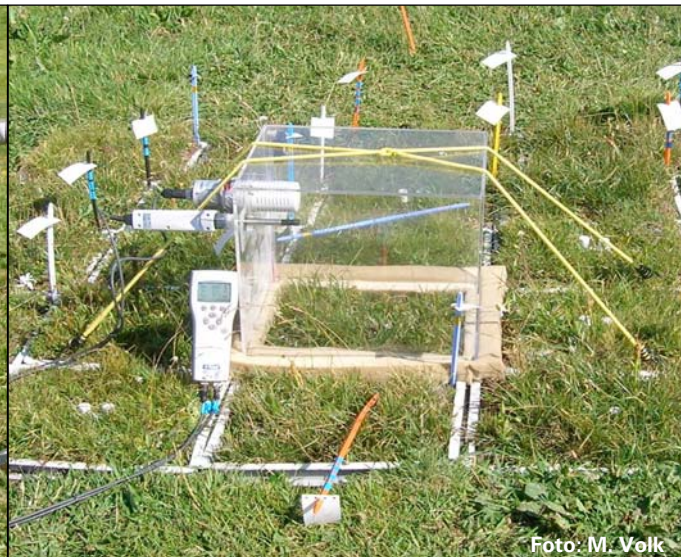


Foto: M. Volk

Messung der Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation

Zusammenfassung der Daten des N-P-Experimentes Alp Flix 2006 – Diplomarbeit Matthias Riesen

Monolith Nr.	Behandlung	Total TS g m <sup>-2</sup>	Gräser TS g m <sup>-2</sup>	Kräuter TS g m <sup>-2</sup>	Seggen TS g m <sup>-2</sup>	Leguminosen TS g m <sup>-2</sup>	Assimilationsrate in µmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> am 8.6.06	Assimilationsrate in µmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> am 3.7.06	NDVI 3.5.2006	NDVI 30.6.2006	NDVI 6.7.2006	Gräser g N kg <sup>-1</sup> TS	Gräser g P kg <sup>-1</sup> TS	Funkt. Gruppe	Behandlung	g N kg <sup>-1</sup> TS	g P kg <sup>-1</sup> TS	Mix der Monolith(en) Nr.
1	P	92.1	49.3	14.5	20.4	7.8	-4.92	-10.81	0.639	0.794	0.833	16.4	2.72	Kräuter	Kontrolle	25.6	1.81	19 30
2	N	104.7	63.5	16.5	23.8	0.9	-4.66	-9.85	0.686	0.803	0.797	20.8	1.07		Kontrolle	22.6	1.72	17 23
3	N+P	179.2	69.8	59.9	46.8	2.7	-8.63	-12.30	0.681	0.812	0.840	18.1	3.59		Kontrolle	23.9	1.59	4 16
4	Kontrolle	86.3	52.3	28.3	4.9	0.8	-4.60	-9.20	0.631	0.776	0.797	19.2	1.07		Kontrolle	21.8	1.55	29 37
5	N+P	120.7	46.4	42.8	23.1	8.4	-4.26	-9.32	0.649	0.795	0.799	17.8	3.25		Kontrolle	25.2	1.59	8 18
6	N	127.7	71.9	47.6	8.1	0.0	-5.04	-10.74	0.631	0.797	0.790	16.7	0.93		N	28.2	1.63	21
7	P	63.6	41.1	11.5	6.4	4.7	-3.53	-8.01	0.656	0.767	0.756	14.0	2.36		N	27.1	1.81	27 32
8	Kontrolle	69.4	35.8	22.1	10.8	0.7	-3.28	-7.65	0.637	0.764	0.740	18.0	0.89		N	24.6	1.41	2 6
9	P	139.6	42.7	56.2	35.3	5.4	-4.19	-8.44	0.672	0.788	0.780	17.9	3.33		N	22.4	1.38	11 13
10	N+P	85.2	77.0	6.3	1.9	0.0	-7.20	-6.61	0.599	0.773	0.746	20.3	2.78		N	24.0	1.28	20 36
11	N	89.6	58.4	17.8	13.4	0.0	-5.78	-9.29	0.646	0.785	0.768	17.0	0.90	P	27.3	2.38	22 28	
12	N+P	156.2	86.3	24.8	42.9	2.1	-7.66	-11.47	0.650	0.818	0.794	19.3	3.10	P	25.6	3.46	7 9	
14	N+P	174.2	88.2	75.6	7.2	3.3	-7.22	-9.81	0.652	0.815	0.795	17.6	3.22	P	33.4	3.32	1 38	
15	N+P	198.4	140.9	47.9	9.0	0.5	-8.04	-7.90	0.689	0.809	0.800	17.5	3.15	P	22.0	2.46	24 35	
16	Kontrolle	73.3	37.8	13.7	12.9	8.8	-4.44	-6.37	0.636	0.769	0.714	18.3	0.95	P	22.4	3.97	26 34	
17	Kontrolle	71.1	53.1	12.7	4.8	0.5	-3.06	-6.69	0.642	0.775	0.734	20.5	1.22	N+P	24.0	2.95	14	
18	Kontrolle	75.5	42.6	21.6	7.1	4.2	-7.26	-6.66	0.664	0.800	0.803	19.4	1.15	N+P	26.5	2.87	3 10	
19	Kontrolle	107.6	71.7	4.8	29.5	1.5	-5.30	-8.66	0.637	0.785	0.741	17.1	1.06	N+P	24.7	2.60	12 15	
20	N	101.4	61.4	35.1	4.8	0.0	-4.94	-5.89	0.629	0.787	0.827	18.3	0.88	N+P	24.2	2.42	5 31	
21	N	149.4	42.0	90.1	13.2	4.1	-7.35	-9.81	0.681	0.800	0.778	19.2	0.85	N+P	22.9	3.23	25 33	
22	P	116.1	68.2	10.5	30.9	6.5	-5.86	-7.38	0.661	0.788	0.742	17.7	3.09					
23	Kontrolle	149.6	92.5	45.2	4.8	7.1	-7.56	-8.30	0.689	0.796	0.778	14.2	1.00	Seggen	Kontrolle	19.6	1.05	19
24	P	134.5	91.2	34.8	4.1	4.4	-5.66	-9.28	0.655	0.778	0.770	12.7	1.67		Kontrolle	17.2	0.98	17 23 29
25	N+P	186.2	140.5	37.8	4.4	3.4	-6.71	-7.57	0.685	0.774	0.770	16.8	2.96		Kontrolle	17.6	0.99	4 16 37
26	P	152.2	127.0	25.2	0.0	0.0	-6.85	-8.21	0.663	0.751	0.788	17.2	2.34		Kontrolle	18.0	1.08	8 18 30
27	N	199.9	88.3	88.4	7.5	15.7	-10.38	-9.63	0.673	0.814	0.838	20.5	1.03		N	21.7	0.97	2 20 36
28	P	156.7	78.4	64.9	9.9	3.5	-8.57	-7.62	0.670	0.801	0.808	13.1	1.54		N	19.5	0.82	13 27 32
29	Kontrolle	108.5	48.3	22.1	18.6	19.4	-6.64	-6.23	0.662	0.795	0.765	17.0	0.80		N	21.6	1.13	6 11 21
30	Kontrolle	173.2	61.6	63.4	6.9	41.3	-7.31	-6.68	0.670	0.804	0.820	18.1	1.14		P	17.9	3.81	9
31	N+P	130.2	95.4	27.3	5.8	1.6	-5.65	-6.52	0.671	0.796	0.772	18.2	2.62		P	17.6	2.23	22
32	N	107.7	77.1	7.8	22.8	0.0	-3.93	-5.10	0.629	0.775	0.759	18.2	1.28		P	17.5	2.49	24 38
33	N+P	216.4	172.7	30.1	12.0	1.6	-7.55	-4.55	0.653	0.814	0.793	18.9	2.79	P	16.6	3.42	7 34	
34	P	161.6	115.2	23.0	21.5	1.8	-5.75	-6.19	0.692	0.789	0.812	14.8	2.67	P	15.6	2.45	1 28	
35	P	173.7	158.1	15.6	0.0	0.0	-6.48	-7.17	0.663	0.781	0.804	13.9	2.14	N+P	20.0	3.05	3	
36	N	170.0	142.6	21.2	3.5	2.8	-6.72	-5.40	0.684	0.790	0.808	16.6	1.03	N+P	18.8	2.91	12	
37	Kontrolle	179.8	151.9	20.9	6.8	0.2	-6.04	-6.92	0.661	0.777	0.764	13.8	0.92	N+P	21.4	2.44	5 10 25	
38	P	182.1	101.5	54.8	21.7	4.1	-6.99	-6.30	0.661	0.788	0.798	17.4	2.38	N+P	19.6	2.94	14 15 31 33	
														Leguminosen	Kontrolle	30.7	1.24	4 8 16 17 18 19 23 29 37
															N	34.8	1.41	2 13 21 27 36
															P	31.6	1.69	1 7 9 22 24 28 34 38
															N+P	30.2	1.99	3 5 12 14 15 25 31 33