

Einfluss verschiedener Heide-Pflegeverfahren auf die Ernährungssituation von *Calluna vulgaris*

Werner Härdtle & Goddert v. Oheimb, Lüneburg

Abstract. In the face of ongoing atmospheric nutrient loads the employment of management measures to remove nutrients from heathland ecosystems has increased in importance. The present study is the first to analyse whether *Calluna vulgaris* is a suitable bio-monitor of management-mediated nutrient pools in heathland ecosystems. If *Calluna vulgaris* proves to be an appropriate indicator, its bio-indicative usage may prove to be a helpful tool for an assessment of management success in heathland ecosystems. In the Lüneburger Heide nature reserve (NW Germany) we analysed the impacts of grazing, mowing, prescribed burning, chopping and sod-cutting on the nutritional status of *Calluna vulgaris* by measuring nutrient contents (N, P, Ca, Mg, K) of current year's shoots one and five years after application of management measures. Results were related to management-induced nutrient flows and nutrient pools at the focal heath sites. Our results indicate that the less the physical environment of a heath site was affected by management measures the better the nutrient contents of current year's shoots of *Calluna vulgaris* mirrored changes in nutrient pools. For low-intensity measures (i.e. grazing, mowing, prescribed burning), shoot nutrient contents were a suitable indicator for changes in nutrient pools, particularly for nutrients with conservative cycles such as P. At grazed and mown sites high output rates of P caused by these measures were well reflected by decreased shoot P content. At burned sites, *Calluna vulgaris* proved to be a good indicator of changes in nutrient pools of the organic layer, mainly attributable to the deposition of nutrients with ash. In contrast, at sites subjected to high-intensity measures, shoot nutrient contents did not reflect management-mediated shifts in nutrient pools, despite the high nutrient losses caused by chopping and sod-cutting. At these sites, shoot nutrient contents mirrored only the effects of altered mineralisation rates attributable to changes in the physical environment following high-intensity measures. As plant growth and competition in heathlands is considered to be controlled by N or P, shoot N:P ratios are recommended as a tool to indicate whether plant growth tends to be limited by N, by P or by N and P. This, in turn, allows for an assessment of long-term effects of both atmospheric nutrient loads and management-mediated shifts in N and P pools at a focal heath site.

1 Einleitung

Heiden sind nährstoffarme Ökosysteme und typisch für saure, meist podsolierte Böden im nordwestlichen Europa (AERTS & CHAPIN 2000). Trophisch nicht oder wenig gestörte Heiden zeichnen sich durch konservative Nährstoffkreisläufe und hohe Nährstoff-Umsatzzeiten in Pflanzen und Böden aus (NIELSEN et al. 1999). Anthropogene Nährstoffeinträge, insbesondere von Stickstoff (nachfolgend als N bezeichnet), beeinträchtigen langfristig die Stabilität und die typische Artenzusammensetzung der Heiden (BOBBINK et al. 1998). Heidemanagement, das primär auf eine Offenhaltung der Landschaft zielt, ist heute zugleich um einen effizienten Austrag von Nährstoffen aus

Heiden bemüht, um somit zumindest teilweise atmogene Nährstoffeinträge zu kompensieren (BARKER et al. 2004).

In den vergangenen Jahren haben mehrere Studien den Einfluss atmogener Nährstoffeinträge und verschiedener Managementmaßnahmen auf die Artenzusammensetzung und die bodenchemischen Eigenschaften von Heiden untersucht (u. a. MITCHELL et al. 2000, HÄRDTLE et al. 2006). Allerdings ist ein auf bodenchemischen Analysen fußendes Monitoring der durch Nährstoffeinträge und Management bewirkten Änderungen im Nährstoffhaushalt kosten- und zeitintensiv. Als Alternative wurden in den vergangenen Jahren zunehmend Nährstoffgehalte der Biomasse oder der Blätter sowie Elementverhältnisse (z. B. N:P-Verhältnisse) in Pflanzen herangezogen, um Trophieänderungen der Standorte als Folge von Nährstoffeinträgen zu verfolgen (GOMBERT et al. 2006, WALKER et al. 2006). Der bioindikative Wert solcher Analysen von Pflanzengeweben fußt darauf, dass pflanzliche Aufnahmearten mit zunehmender Nährstoffverfügbarkeit ansteigen (PITCAIRN et al. 2003). Besonders in Ökosystemen mit konservativen Nährstoffkreisläufen sind Nährstoffgehalte in Pflanzen vielfach eng korreliert mit den Nährstoffvorräten im Boden, da diese Vorräte die durch Mineralisationsprozesse freigesetzten Mengen an Nährelementen maßgeblich mitbestimmen (BARDGETT et al. 2002). Zudem hat die Messung der Nährelemente in der Biomasse und den Blättern von Pflanzen und ihre bioindikative Auswertung gegenüber der Messung von Nährstoffkonzentrationen im Boden verschiedene Vorteile. So können die Elementgehalte in der Biomasse als integrative Werte interpretiert werden, die einen mittel- bis langfristigen Aufnahmeprozess von Nährstoffen in die Pflanze widerspiegeln, wo hingegen klassische Bodenanalysen lediglich die augenblickliche Nährstoffverfügbarkeit widerspiegeln. Diese kann aber räumlich und zeitlich erheblichen Schwankungen unterliegen (GÜSEWELL & KOERSELMAN 2002). Besonders in jüngerer Zeit wurden Analysen der Elementgehalte in Pflanzengewebe zum Monitoring der Trophiesituation entsprechender Standorte herangezogen. Dabei ließ sich zeigen, dass der Stickstoffgehalt von höheren Pflanzen und Moosen mit der Stickstoffdeposition in Heiden korreliert ist (PITCAIRN et al. 2003, BRITTON & FISHER 2007).

Bislang wurde die Eignung von *Calluna vulgaris* (nachfolgend als *Calluna* bezeichnet) als Biomonitor zur Beurteilung von Änderungen von Nährstoffvorräten infolge von Managementmaßnahmen nicht untersucht. Sollte sich *Calluna* diesbezüglich als ein geeigneter Bioindikator erweisen, so ließe sich damit – auf relativ einfache Weise – der Erfolg eines Heidemanagements in Bezug auf die Erhaltung ausgeglichener Nährstoffbilanzen beurteilen. Die vorliegende Studie untersucht erstmalig, inwieweit *Calluna* als Bioindikator zur Dokumentation der auf Managementmaßnahmen rückführbaren Änderungen der Nährstoffvorräte in Heide-Ökosystemen verwendbar ist. Im Untersuchungsgebiet Lüneburger Heide sind Beweidung, Mahd, Winterbrand, Schopern und Plaggen häufig angewandte Managementverfahren. Wir gehen davon aus, dass sich der Einfluss dieser Maßnahmen auf die Nährstoffvorräte der Systeme in den Nährstoffkonzentrationen einjähriger *Calluna*-Zweige widerspiegelt. Zu diesem Zweck untersuchten wir die N-, P-, Ca-, Mg- und K-Gehalte sowie die N:P-Verhältnisse in *Calluna*-Zweigen ein Jahr und fünf Jahre nach der Anwendung der oben genannten Maßnahmen (im Fall des Beweidungsexperimentes nach einem bzw. fünf Jahren kontinuierlicher Beweidung) und verglichen die Ergebnisse mit der Ernährungssituation der Besenheide auf nicht gepflegten Standorten. Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können,

wurden die gemessenen Blatt-Nährstoffgehalte in Beziehung zu den durch diese Maßnahmen verursachten Nährstoffflüssen gesetzt (unter Einbeziehung der atmosphärischen Einträge, der Nährstoffauswaschung und des Nährstoffaustrages durch Biomassen- und Bodenentfernung). Die Daten hierzu wurden begleitend durchgeführten und bereits publizierten Untersuchungen an den gleichen Heidestandorten entnommen (HÄRDTLE et al. 2006, 2007, FÖTTNER et al. 2007, NIEMEYER et al. 2007). Folgende Fragen wurden untersucht:

1. Unterscheidet sich der bioindikative Wert von *Calluna* im Hinblick auf die fünf untersuchten Nährelemente?
2. Welche Auswirkungen haben kurzfristig veränderliche Nährstoffkonzentrationen im Boden (als Folge veränderter Mineralisationsraten) und langfristig wirksame Änderungen der Gesamt-Nährstoffvorräte (infolge einer Biomassen- oder Bodenentnahme) auf die Ernährungssituation von *Calluna*?

2 Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Naturschutzgebiet Lüneburger Heide in Niedersachsen repräsentiert mit etwa 5500 ha den größten Komplex heute noch vorhandener Heidelandschaften im Nordwestdeutschen Tiefland. Das Gebiet ist charakterisiert durch pleistozäne Ablagerungen, in dem nährstoffarme und podsolierte Böden vorherrschen. Die $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte liegen im Oberboden zwischen 3,0 und 3,5. Das subozeanische Klima ist gekennzeichnet durch mittlere Jahresniederschläge von 811 mm und einer mittleren Jahrestemperatur von 8,4°C.

2.2 Managementmaßnahmen

In dieser Studie wurde der Ernährungszustand von *Calluna* in Beziehung zu den Auswirkungen von Beweidung, Mahd, Winterbrand, Schopern und Plaggen auf die Nährstoffvorräte in Heide-Ökosystemen gesetzt. Alle Managementmaßnahmen wurden im Winterhalbjahr 2001/2002 durchgeführt, wobei das Beweidungsexperiment im Mai 2001 startete. Nachfolgend werden die untersuchten Managementverfahren kurz beschrieben:

- Für das Beweidungsexperiment diente eine Schafherde mit 541 Schafen („Grau gehörnte Heidschnucke“), die auf einer Fläche von 486 ha geführt wurde (Beweidungsdichte: 1,1 Schafe ha^{-1}). Die Schafe blieben ganzjährig auf der Fläche und wurden durch einen Schäfer geführt. Die Schafe verweilten im Durchschnitt acht Stunden pro Tag auf den Beweidungsflächen. Die übrige Zeit (also vor allem nachts) waren die Tiere im Stall untergebracht. Alle Schafe wurden, mit Ausnahme der Lammzeit, nicht zusätzlich gefüttert.
- Gemäht wurde nur in *Calluna*-dominierten Beständen, um deren vegetative Regeneration einzuleiten. In unserem Experiment wurde die Vegetation etwa 10 cm über dem Oberboden abgeschnitten („low-intensity mow“). Bei dieser Maßnahme wurden daher die organischen Auflagen nicht beeinflusst. Die Mahd wird maschinell durchgeführt und das Mahdgut entfernt.
- Brand wird in der Lüneburger Heide im Winter durchgeführt („low-temperature fire“). Hierfür werden Schönwetterperioden und Tage mit nur mäßigen Windgeschwindig-

keiten benötigt, um ein weitgehendes Abbrennen der oberirdischen Biomasse und ein langsames Vorschreiten des Feuers sicher zu stellen. Wie die Mahd greift auch diese Maßnahme die organischen Auflagen nicht an.

- Schopfern und Plaggen sind intensive Maßnahmen, bei denen die Biomasse wie auch die organischen Auflagen (Schopfern) sowie Teile des A-Horizontes (Plaggen) entfernt werden. Beide Maßnahmen werden nur dort angewandt, wo Gräser bereits erhebliche Dominanzanteile erlangt haben.

2.3 Untersuchungsflächen

In einem Gebiet von 2100 ha Größe wurden insgesamt 20 Untersuchungsflächen zufallsverteilt ausgewählt (vier Replikate pro Managementmaßnahme). Jede Untersuchungsfläche war 20m x 10m groß und wurde in zwei Teilflächen mit einer Größe von jeweils 10m x 10m unterteilt. Eine Teilfläche diente zur Durchführung der Managementmaßnahme, die zweite Teilfläche als Kontrollfläche. Im Beweidungsexperiment wurden vier Untersuchungsflächen in vier verschiedenen Heidegebieten (jedes etwa 500 ha groß und durch eine eigene Schafherde beweidet) zufallsverteilt ausgewählt. Auch hier wurden die Untersuchungsflächen in zwei Teilflächen von 10m x 10m Größe unterteilt, wobei eine Teilfläche für die Schafe zugänglich und die andere eingezäunt war („exclosure“). Alle Untersuchungsflächen waren vor Durchführung der Maßnahmen für etwa zehn Jahre unbewirtschaftet. Nach Auskunft des „Vereins Naturschutzpark“, der für das Flächenmanagement verantwortlich ist, betrug das Alter der Besenheide auf den Untersuchungsflächen 10-15 Jahre. Die Artenzusammensetzung der Untersuchungsflächen ist aus Tabelle 1 ersichtlich.

In begleitend durchgeführten Arbeiten von HÄRDTLE et al. (2006, 2007), FOTTNER et al. (2007) und NIEMEYER et al. (2007) wurden die Auswirkungen der oben genannten Managementmaßnahmen auf Nährstoffflüsse und Nährstoffvorräte in der oberirdischen Biomasse und im Boden untersucht (inkl. der atmosphärischen Nährstoffeinträge, der Nährstoffverluste mit dem Sickerwasser und der durch Biomassen- und Bodenentfernung bewirkten Nährstoffausträge). Um die Ergebnisse dieser Untersuchungen mit jenen der vorliegenden Studie in Beziehung setzen zu können, wurden die hierfür wichtigen Ergebnisse der oben genannten Arbeiten in Tabelle 2 zusammengestellt.

2.4 Beerntung der *Calluna*-Zweige

Einjährige Zweige von *Calluna* wurden ein Jahr (Oktober 2002) und fünf Jahre (Oktober 2006) nach der Durchführung der oben genannten Managementmaßnahmen beerntet (im Beweidungsexperiment: nach einem Jahr und fünf Jahren kontinuierlicher Beweidung). In jeder Teilfläche (Maßnahmenfläche und Kontrolle) wurden jeweils fünf einjährige Zweige von 20 zufällig ausgewählten Pflanzen abgeschnitten und zu einer Probe (pro Teilfläche) zusammengefasst. Da sich die Nährstoffgehalte der *Calluna*-Zweige im Jahresverlauf ändern, wurden alle Zweige jeweils im Oktober geerntet. Zu dieser Zeit spiegelt der Blattnährstoffgehalt die Ernährungssituation der Besenheide am Besten wider (UREN et al. 1997).

Tab. 1: Artenzusammensetzung der Untersuchungsflächen vor Durchführung der Managementmaßnahmen (nach Angaben von HÄRDTLE et al. 2006, FOTTNER et al. 2007, NIEMEYER et al. 2007; Zahl der Vegetationsaufnahmen pro Managementmaßnahme: 6; aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit werden nur Arten mit einem Deckungsanteil von >1 % angegeben).

Tab. 1: Species composition of sample plots prior to treatment (vegetation data from HÄRDTLE et al. 2006, FOTTNER et al. 2007, NIEMEYER et al. 2007; n of relevés = 6 per management measure; mean cover of species in %; species covering >1 % of the sample plots are listed).

	Beweidung	Mahd	Winterbrand	Schopfern	Plaggen
Mittlere Artenzahl	9	12	10	10	11
Vorherrschende Arten	Mittlere Deckung (%)				
<i>Calluna vulgaris</i>	89	80	56	40	38
<i>Deschampsia flexuosa</i>	3	10	19	66	26
<i>Vaccinium myrtillus</i>	2	< 1	< 1	< 1	< 1
<i>Molinia caerulea</i>	< 1	0	0	< 1	36
<i>Pleurozium schreberi</i>	5	3	18	3	4
<i>Hypnum cupressiforme</i>	95	40	22	30	49
<i>Dicranum scoparium</i>	3	23	20	23	6

2.5 Chemische Analysen

Das geerntete Pflanzenmaterial wurde luftgetrocknet, gemahlen, erneut bei 105°C getrocknet und danach gewogen (Bestimmung des Ofen-Trockengewichtes = dw). Die N-Gehalte wurden mit einem C:N-Analyser (Elementar, Hanau, Deutschland) untersucht. Proben zur Bestimmung der Ca-, K-, Mg- und P-Gehalte wurden mit einer HNO₃-HCL-H₂O₂-Lösung versetzt (WONG et al. 1997, LAMBLE & HILL 1998) und anschließend in einer Mikrowelle aufgeschlossen (MLS-GmbH, Leutkirch, Deutschland). Die so erhaltenen Lösungen wurden mit Hilfe eines ICP-OES auf die entsprechenden Elementkonzentrationen untersucht (Perkin Elmer, Burladingen, Deutschland). Aus den Ergebnissen wurden die N-, P-, Ca-, Mg- und K-Gehalte (in mg 100 g⁻¹ dw) sowie die N:P-Verhältnisse der einjährigen *Calluna*-Zweige berechnet.

2.6 Datenauswertung und Statistik

Die Messungen der Nährstoffgehalte der Zweige wurden mit Hilfe einer einfaktoriellen ANOVA ausgewertet (Maßnahmen als fester Faktor). Die Nährstoffgehalte der *Calluna*-Zweige in 2002 und 2006 wurden zu den Nährstoffflüssen bzw. Nährstoffvorräten

mittels einer schrittweisen multiplen Regression in Beziehung gesetzt. Die Nährstoffgehalte wurden dabei als abhängige Variable betrachtet, und die Nährstoffausträge (infolge von Biomassen- und Bodenaustrag), Sickerwasserverluste (in den Kontroll- und Maßnahmenflächen in 2002 und 2006), Exkrementeinträge (im Beweidungsexperiment), Nährstoffeinträge durch Asche-Deposition (Brandexperiment), Vegetationsbedeckung, die mittleren Niederschläge (von Juni – Oktober in 2002 und 2006) und die mittlere Temperatur (von Juni – Oktober in 2002 und 2006) als Prädiktoren betrachtet (gemäß der Daten in Tabelle 2). Die Vegetationsbedeckung wurde in das Regressionsmodell einbezogen, da sie mit der Bodenoberflächentemperatur gut korreliert ist, und diese wiederum Mineralisationsprozesse und somit die Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden mit beeinflusst (MOHAMED et al. 2007). Die beiden zuletzt genannten Prädiktoren wurden aufgenommen, um Unterschiede in den Witterungsverläufen zwischen den Jahren 2002 und 2006 zu beschreiben, da diese möglicherweise die Nährstoffverfügbarkeit und damit die Aufnahme von Nährstoffen durch *Calluna* beeinflussen. In der schrittweisen Regression wurde die Auswahl von Prädiktoren gestoppt, wenn keiner der verbleibenden Prädiktoren das Modell auf dem Niveau von $P = 0,01$ verbesserte. Alle statistischen Analysen wurden mit dem Programm SPSS 15.0 durchgeführt.

3 Ergebnisse

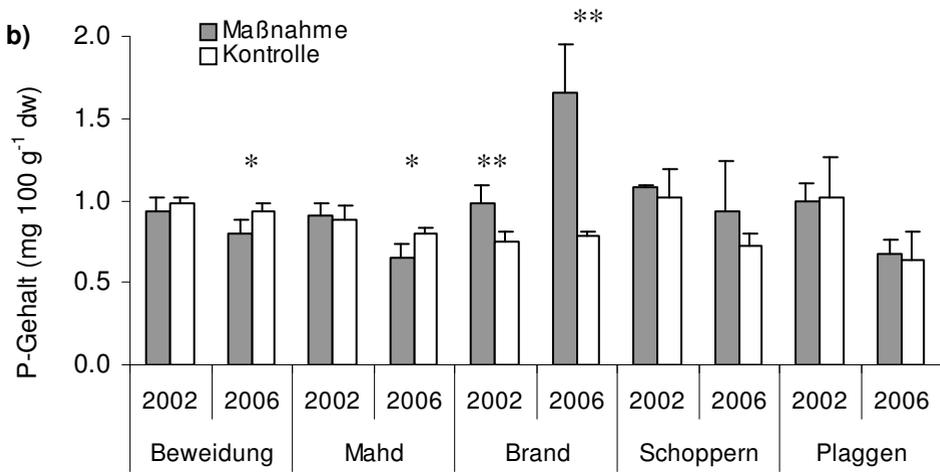
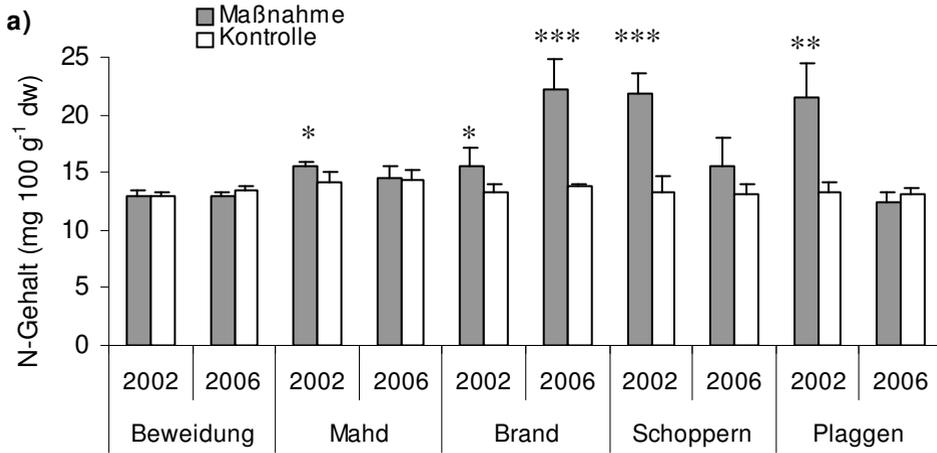
3.1 Änderungen der Nährstoffgehalte in den *Calluna*-Zweigen nach den Maßnahmen

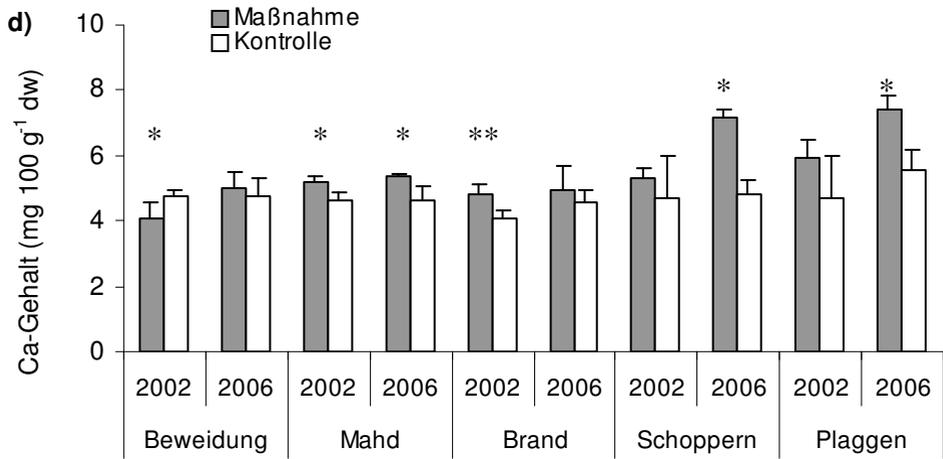
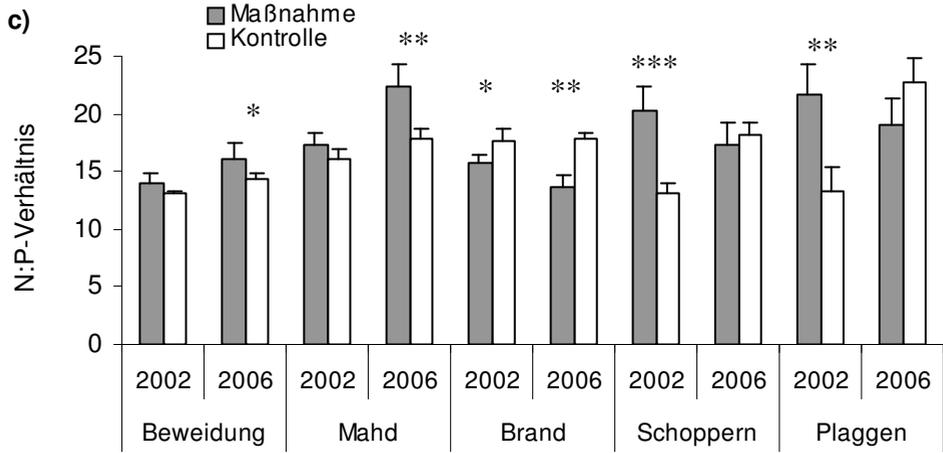
Die Nährstoffgehalte der einjährigen *Calluna*-Zweige (in 2002 und 2006) änderten sich sehr unterschiedlich im Hinblick auf die fünf verglichenen Maßnahmen (Abb. 1). Die N-Gehalte nahmen besonders deutlich in den geschoppten und geplaggtten Flächen ein Jahr nach Durchführung dieser Maßnahmen zu (Abb. 1a). Die N-Gehalte waren ebenso in den Brandflächen (in 2002 und 2006) und in den gemähten Flächen (in 2002) im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollflächen erhöht.

Die P-Gehalte der einjährigen Zweige waren in den beweideten und gemähten Flächen fünf Jahre nach Maßnahmenbeginn signifikant verringert, in den gebrannten Flächen in beiden Untersuchungsjahren hingegen erhöht (Abb. 1b). Die N:P-Verhältnisse waren in den beweideten und gemähten (in 2006) sowie in den geschoppten und geplaggtten Teilflächen (in 2002) erhöht (Abb. 1c). Demgegenüber waren die N:P-Verhältnisse der Zweige in den gebrannten Flächen ein Jahr und fünf Jahre nach Maßnahmenbeginn deutlich erniedrigt.

Die Ca-Gehalte waren fünf Jahre nach Durchführung des Schopptens und Plaggens erhöht (Abb. 1d). Zudem war eine geringe, aber signifikante Erhöhung der Ca-Gehalte in Pflanzen auf den gemähten und gebrannten Flächen nachweisbar (in 2002 und 2006). In den beweideten Flächen nahmen die Ca-Gehalte dagegen ab.

Die Mg-Gehalte waren in den gemähten (2006), gebrannten (2006) und geschoppten (2002) Flächen erhöht (Abb. 1e). Die K-Gehalte stiegen nach Brand (beide Jahre), nach Schoppten und Plaggen an (2002), nahmen aber in den beweideten Flächen ab (2002; Abb. 1f).





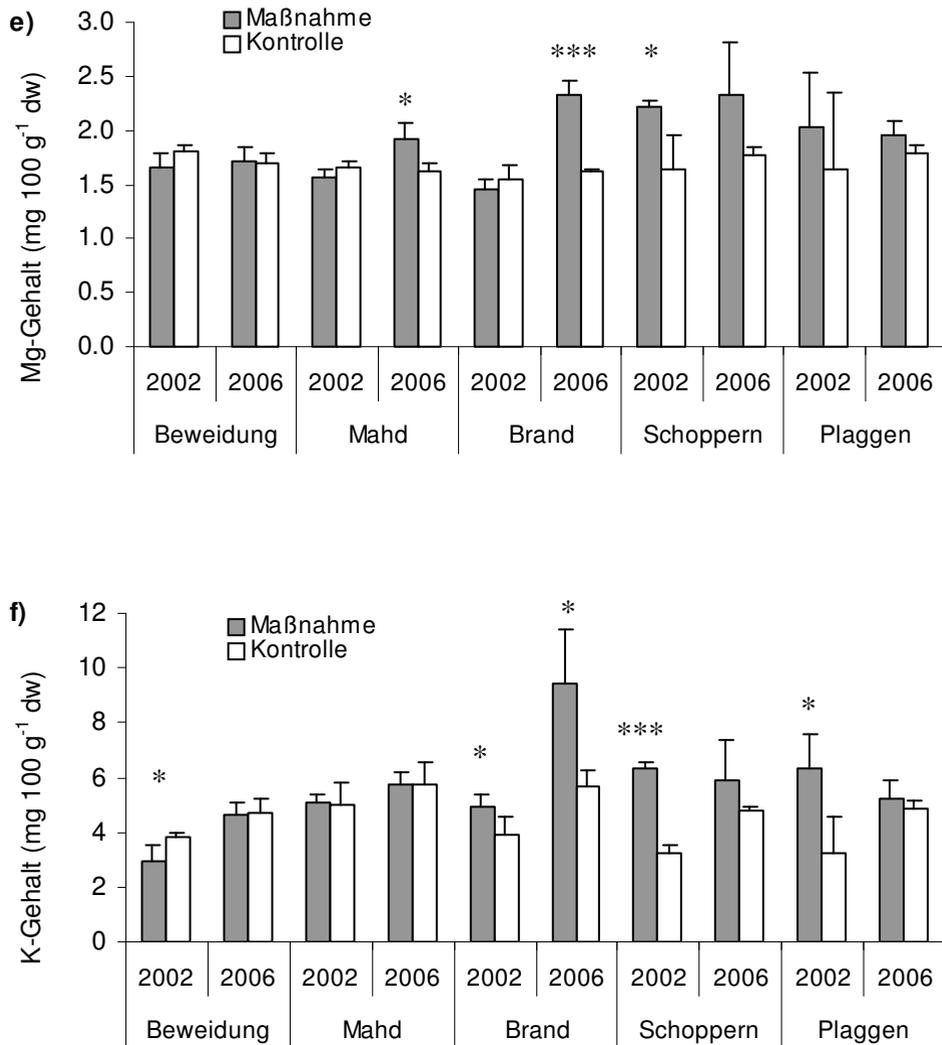


Abb. 1: Nährstoffgehalt einjähriger *Calluna vulgaris*-Zweige (in % Trockengewicht = dw) in den Kontroll- und Maßnahmenflächen ein Jahr (Oktober 2002) und fünf Jahre (Oktober 2006) nach Durchführung der Maßnahmen (im Beweidungsexperiment: nach einem Jahr und fünf Jahren kontinuierlicher Beweidung); a) N-Gehalt, b) P-Gehalt, c) N:P-Verhältnis der Zweige, d) Ca-Gehalt, e) Mg-Gehalt, f) K-Gehalt (angegeben sind Mittelwerte von n = 4 Messungen + 1SD; * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$).

Fig. 1: Current year's shoot nutrient contents of *Calluna vulgaris* (in % dry weight = dw) in the controls and treatments one year (October 2002) and five years (October 2006) after application of management measures (for the grazing experiment: one year and five years after continuous grazing); a) N content, b) P content, c) Shoot N:P ratio, d) Ca content, e) Mg content, f) K content (means of n = 4 + 1SD; * = $P < 0.05$, ** = $P < 0.01$, *** = $P < 0.001$).

3.2 Nährstoffgehalte der *Calluna*-Zweige in Beziehung zu Nährstoffflüssen und -vorräten

Beziehungen der Nährstoffgehalte in den *Calluna*-Zweigen zu den durch Management induzierten Nährstoffflüssen und Nährstoffvorräten (Tab. 2) wurden mit Hilfe einer multiplen Regression untersucht (Tab. 3). Für das Beweidungs- und Mahd-Experiment wurde lediglich ein signifikantes Modell errechnet, das den P-Gehalt der *Calluna*-Zweige beschreibt (Tab. 3, Modell a und b). In beiden Modellen ergab sich nur ein signifikanter Prädiktor für den P-Gehalt, nämlich der Austrag an P infolge des Biomassenaustrags. Im Beweidungsexperiment betrug der P-Austrag $1,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, und Mahd verursachte einen P-Verlust von $7,1 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tab. 2). Im Vergleich dazu waren die P-Flüsse, die durch atmogene Depositionen ($0,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und durch Sickerwasserverluste ($0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in der Kontrolle) verursacht wurden, gering. Der P-Eintrag durch Exkremate (Beweidungsexperiment) war von ähnlicher Größenordnung und betrug $0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Für das Brandexperiment wurden vier Regressionsmodelle berechnet, die den N-, P-, Ca- und Mg-Gehalt der *Calluna*-Zweige vorhersagten (Tab. 3, Modelle c – f). Für den N-Gehalt ergaben sich zwei Prädiktoren, der N-Eintrag mit Asche (während des Brandes) und die Deckung der Vegetation. Auch die P-, Ca- und Mg-Gehalte wurden durch die Deposition dieser Nährelemente mit der Asche signifikant beeinflusst. Zudem war der Sickerwasseraustrag ein signifikanter Prädiktor für den P-Gehalt der *Calluna*-Zweige. Wie Tab. 2 zeigt, ist der Eintrag der genannten Nährstoffe im Verlauf des Brandexperimentes beträchtlich (5,2, 6,4, 35,5, 10,9, 18,1 kg pro Hektar für N, P, Ca, Mg bzw. K). Der durch das Verbrennen der oberirdischen Biomasse verursachte Verlust an P, Ca und Mg wurde zu über 80% durch die Rückfuhr dieser Elemente mit der Asche kompensiert.

Tab. 2: Übersicht über die Nährstoffeinträge und -austräge (d. h. atmogene Einträge, Management-induzierte Austräge, Sickerwasserverluste, Exkremeteinträge bei Beweidung, Ascheeinträge bei Brand) sowie resultierende Bilanzen (für N, P, Ca, Mg, K) in den untersuchten Heideflächen (nach Daten von HÄRDTLE et al. 2006, 2007, FOTTNER et al. 2007, NIEMEYER et al. 2007; angegeben sind Mittelwerte von n = 4 Messungen, Standardabweichung (SD) in Klammern, nb = nicht berechnet).

Tab. 2: Compilation of input/output flows (due to atmospheric nutrient deposition, management-related outputs via biomass/soil removal, leaching, excrement input in the grazing experiment, ash deposition in the burning experiment) and resulting nutrient balances (for N, P, Ca, Mg, K) for the heath sites investigated (according to data from HÄRDTLE et al., 2006, 2007, FOTTNER et al., 2007, and NIEMEYER et al., 2007; means of n = 4, SD in parentheses, nb = not calculated).

Maßnahme	Nährstoff (bzw. N:P- Verhältnis)	N	P	N:P	Ca	Mg	K
	Atmogene Einträge (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	22,8 (0,8)	0,3 (0,01)	76,0	5,1 (0,5)	2,8 (0,2)	3,3 (0,5)
Beweidung	Biomassenaustrag (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	25,6 (4,5)	1,9 (0,3)	13,5	11,1 (2,0)	3,8 (0,7)	8,4 (1,5)
	Sickerwasser- austrag (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	2,2 (0,30)	0,2 (<0,01)	11,0	1,8 (0,42)	0,4 (0,09)	1,2 (0,18)
	Exkrement- einträge (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	3,5 (nb)	0,2 (nb)	17,5	0,7 (nb)	0,3 (nb)	1,5 (nb)
	Jährliche Bilanzen (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	-1,5 (nb)	-1,6 (nb)	0,9	-7,1 (nb)	-1,1 (nb)	-4,5 (nb)
		Biomassenaustrag (kg ha ⁻¹)	96,8 (6,2)	7,1 (1,2)	13,6	29,4 (1,6)	8,5 (0,8)
Mahd	Sickerwasser- austrag (Kontrolle) (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	3,0 (0,10)	0,2 (<0,01)	15,0	1,1 (0,17)	1,1 (0,04)	2,5 (0,16)
	Sickerwasser- austrag (Maßnahme) (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	4,0 (0,04)	0,3 (0,02)	13,3	2,1 (0,39)	2,2 (0,06)	3,5 (0,36)
	Jährliche Bilanzen* (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	9,9 (nb)	-0,6 (nb)	nb	0,7 (nb)	0,5 (nb)	-2,9 (nb)
		Biomassenaustrag (kg ha ⁻¹)	104,2 (10,3)	8,0 (0,7)	13,0	39,2 (3,7)	12,0 (0,8)
Winterbrand	Aschedeposition (kg ha ⁻¹)	5,2 (0,7)	6,4 (1,4)	0,8	35,5 (7,0)	10,9 (2,2)	18,1 (3,0)
	Sickerwasser- austrag (Kontrolle) (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	2,0 (0,54)	0,2 (0,01)	10,0	2,0 (1,22)	0,6 (0,18)	1,7 (0,21)
	Sickerwasser- austrag (Maßnahme) (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	3,9 (1,19)	0,3 (0,02)	13,0	5,6 (2,79)	1,7 (0,59)	2,5 (0,60)
	Jährliche Bilanzen* (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	10,2 (nb)	-0,1 (nb)	nb	1,4 (nb)	1,7 (nb)	-0,9 (nb)

Schopfern	Biomassenaustrag (kg ha ⁻¹)	155,0 (9,1)	10,0 (1,5)	15,5	36,7 (2,1)	11,9 (1,1)	34,4 (7,2)
	Austrag mit O-Horizont (kg ha ⁻¹)	833,0 (161,0)	31,6 (6,7)	26,4	89,0 (37,5)	22,1 (6,3)	28,6 (7,2)
	Sickerwasser-austrag (Kontrolle) (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	6,1 (2,16)	0,2 (0,02)	30,5	4,9 (1,54)	0,7 (0,26)	1,5 (0,63)
	Sickerwasser-austrag (Maßnahme) (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	9,7 (3,85)	0,3 (0,05)	32,3	6,7 (3,39)	1,0 (0,30)	2,8 (1,59)
	Jährliche Bilanzen* (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	-33,8 (nb)	-2,0 (nb)	16,9	-6,4 (nb)	0,3 (nb)	-1,4 (nb)
	Plagen	Biomassenaustrag (kg ha ⁻¹)	121,6 (24,4)	7,4 (1,6)	16,4	34,8 (8,2)	10,8 (2,4)
Austrag mit O- + A-Horizont (kg ha ⁻¹)		1561,0 (166,7)	68,7 (5,4)	22,7	187,8 (52,6)	54,0 (12,8)	216,8 (18,9)
Sickerwasser-austrag (Kontrolle) (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)		3,7 (0,13)	0,3 (0,01)	12,3	3,4 (0,22)	0,9 (0,03)	2,1 (0,19)
Sickerwasser-austrag (Maßnahme) (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)		7,8 (1,39)	0,4 (0,02)	19,5	3,6 (0,43)	1,5 (0,12)	3,6 (0,47)
Jährliche Bilanzen* (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)		-38,1 (nb)	-2,5 (nb)	15,2	-5,8 (nb)	-0,4 (nb)	-7,3 (nb)

* Kalkuliert auf Basis der Annahme, dass gegenwärtig bestehende Einträge unverändert bleiben und folgende Managementzyklen bestehen: Beweidung: ganzjährig, Mahd und Winterbrand: 10 Jahre, Schopfern: 20 Jahre, Plagen: 30 Jahre.

* Calculated on the basis that deposition rates remain unchanged and the duration of management cycles are: grazing: throughout the year, mowing and prescribed burning: 10 years, choppers: 20 years, sod-cutting: 30 years.

Tab. 3: Ergebnisse der Regressionsanalysen, in denen der Nährstoffgehalt der *Calluna vulgaris*-Zweige (in 2002 und 2006) als abhängige Variable (= "Nährstoff"), und Nährstoffaus-
trag (aufgrund von Biomassen- und Bodenaustrag), Sickerwasseraustrag, Exkrementein-
trag (Beweidungsexperiment), Nährstoffeintrag mit Aschedeposition (Brandexperiment),
Vegetationsbedeckung, mittlerer monatlicher Niederschlag (von Juni bis Oktober in
2002 und 2006) und mittlere monatliche Temperatur (von Juni bis Oktober in 2002 und
2006) als Prädiktoren betrachtet wurden (d.f. = 15 für alle berechneten Modelle).

Tab. 3: Results of the stepwise linear regression analyses considering shoot nutrient contents of *Calluna vulgaris* (in 2002 and 2006) as dependent variables (= "Nutrient"), and nutrient output (due to biomass and soil removal), leaching, excrement input (grazing experiment), nutrient deposition with ash (burning experiment), vegetation cover, mean monthly precipitation (from June to October in 2002 and 2006), and mean monthly temperature (from June to October in 2002 and 2006) as predictors (d.f. = 15 for all the models calculated).

Modell	Maßnahme	Nährstoff	R	Adj. R ²	F	Prädiktor	Beta	P
a	Beweidung	P	0,74	0,55	17,0	Austrag P	- 0,74	0,001
b	Mahd	P	0,79	0,57	110,2	Austrag P	- 0,79	0,002
c		N	0,94	0,80	45,8	N-Deposition mit Asche Vegetations- Bedeckung	0,87 - 0,73	< 0,001 < 0,001
d	Winter- brand	P	0,93	0,85	44,6	P-Deposition mit Asche Sickerwasser- austrag P	0,76 0,68	< 0,001 < 0,001
e		Ca	0,84	0,66	14,7	Ca-Deposition mit Asche	0,84	0,009
f		Mg	0,97	0,94	106,0	Mg- Deposition mit Asche	0,97	< 0,001
g		N	0,92	0,83	73,6	Vegetations- bedeckung	- 0,92	< 0,001
h	Schopfern	Ca	0,97	0,92	82,9	Vegetations- bedeckung	- 0,97	< 0,001
i		K	0,99	0,97	207,9	Vegetations- bedeckung	- 0,99	< 0,001
j		N	0,94	0,86	47,1	Vegetations- bedeckung	- 0,94	< 0,001
k	Plaggen	P	0,78	0,58	21,8	Niederschlag	0,78	< 0,001
l		Ca	0,90	0,77	24,9	Vegetations- bedeckung	- 0,90	0,002

Für das Schopper- und Plaggenexperiment wurden drei Regressionsmodelle berechnet, die den N-, Ca- und K-Gehalt bzw. den N-, P- und Ca-Gehalt der *Calluna*-Zweige erklären (Tab. 3, Modelle g – i bzw. j – l). Mit der Ausnahme von P erwies sich die

Vegetationsbedeckung als bester Prädiktor für die Konzentration dieser Nährelemente in den Zweigen. Trotz der hohen Nährstoffverluste, die bei diesen Maßnahmen durch Biomassen- und Bodenaustrag bewirkt wurden (vgl. Tab. 2), waren diese keine signifikanten Prädiktoren für die Elementgehalte der *Calluna*-Zweige.

4 Diskussion

Heidemanagement kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Weisen die Ernährungssituation von *Calluna* beeinflussen. Zum einen verändert Management das Mikroklima der Bestände, so dass durch eine stärkere Erwärmung des Oberbodens organische Auflagen mineralisiert und Nährstoffe unmittelbar mobilisiert werden können. Zum anderen beeinflusst Management die Nährstoffvorräte im System (durch Biomassen- bzw. Bodenaustrag), so dass sich interne Umsatzraten gleichermaßen ändern können (BARKER et al. 2004). In diesem Zusammenhang ist es wichtig, zwischen extensiven Maßnahmen (Beweidung, Mahd, Winterbrand) und intensiven Maßnahmen (Schopfern, Plaggen) zu unterscheiden. Extensive Maßnahmen beeinflussen lediglich die oberirdische Biomasse, während die Humushorizonte der Heiden (d. h. die organischen Auflagen und der A-Horizont) nicht beeinträchtigt werden. So haben diese Maßnahmen keinen unmittelbaren Einfluss auf die Nährstoffvorräte im Boden und das Mikroklima in den Beständen (z. B. im Beweidungsexperiment; AERTS & CHAPIN 2000). Ebenso beeinflussen extensive Maßnahmen nicht das Wurzelsystem von *Calluna*, so dass sich *Calluna* relativ rasch aus Knospen (Beweidung, Mahd) oder aus dem Wurzelstock (Winterbrand) regenerieren kann. Demgegenüber kann sich die Besenheide nach intensiven Maßnahmen nur durch eine Keimung aus Samen wieder etablieren (GIMINGHAM 1992). Dies hat wiederum Auswirkungen auf Nährstoffaufnahme- und Nährstoffverluste durch Auswaschung (HÄRDTLE et al. 2007). In der nachfolgenden Diskussion sollen deshalb die Auswirkungen extensiver und intensiver Maßnahmen auf die Nährstoffversorgung der Besenheide getrennt betrachtet werden.

4.1 Auswirkungen von extensiven Maßnahmen auf die Nährstoffgehalte der Zweige

Unter allen Managementmaßnahmen hat extensive Beweidung den geringsten Einfluss auf die Struktur und die Bodenverhältnisse von Heiden (FOTTNER et al. 2007). Änderungen der Ernährungssituation von *Calluna* sind demzufolge nicht auf Störungen der Heidestruktur oder der Humushorizonte zurückzuführen. Diese Schlussfolgerung wird durch die Regressionsanalysen bestätigt, wonach der abnehmende P-Gehalt der Zweige in den beweideten Flächen ausschließlich auf den durch den Biomassenaustrag verursachten P-Verlust zurückzuführen ist (Tab. 3). Da Schafe hauptsächlich einjährige Zweige mit vergleichsweise hohen P-Gehalten befressen, kann Beweidung zu einem besonders hohen und kontinuierlichen P-Austrag führen. In diesem Zusammenhang ist bedeutsam, dass Heideökosysteme ausgesprochen konservative P-Kreisläufe aufweisen (CHAPMAN et al. 1989). Dies wird deutlich durch die grundsätzlich geringen atmosphärischen P-Einträge, den geringen P-Verlusten mit dem Sickerwasser, die geringe Nachlieferung durch Bodenverwitterung sowie die hohe Immobilisierung von P in Heideböden

(PILKINGTON et al. 2007a; VAN MEETEREN et al. 2007; Tab. 2). Negative P-Bilanzen ($-1,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Tab. 2) führen demgemäß zu einer signifikant schlechteren P-Versorgung der Besenheide. Vergleichbare Ergebnisse schildern MOSS et al. (1981), wonach Beweidung zu einer Verschlechterung der P-Versorgung bei *Calluna* führte. Eine Abnahme der P-Gehalte koinzidiert mit einer Erhöhung der N:P-Verhältnisse in den Zweigen (Abb. 1c), da deren N-Gehalte unverändert blieben (Abb. 1a). Obgleich die gemessenen N:P-Verhältnisse (16,1 in 2006) an den beweideten Standorten keine klare P-Limitierung indizieren (GÜSEWELL 2004), kann doch der kontinuierliche und hohe P-Austrag bei Beweidung langfristig zu einer P-Limitierung in Heiden führen (FOTTNER et al. 2007).

Wie im Beweidungsexperiment ist auch im Mahdexperiment der P-Austrag durch Biomassenentnahme ein signifikanter Prädiktor für die P-Gehalte der *Calluna*-Zweige, da auch Mahd negative P-Bilanzen verursacht ($-0,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Tab. 2). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die oberirdische Biomasse im Vergleich zu den organischen Auflagen relativ niedrige N:P-Verhältnisse aufweist (13,0 – 16,4 gegenüber 24,5 – 31,3; Tab. 2, HÄRDTLE et al. 2007). Eine Entnahme der oberirdischen Biomasse führt somit stets zu einer Abnahme der P-Vorräte im System und demzufolge auch zu einer Verschlechterung der P-Versorgung von *Calluna*. Gleichwohl hat sich mit der Mahd die Versorgung mit N (in 2002), Ca (beide Jahre) und Mg (2006) verbessert. Wir führen dies darauf zurück, dass sich mit Entfernung der Zwergstrauchschicht die Oberbodentemperaturen erhöhten, und sich demzufolge Mineralisationsprozesse in den Humushorizonten verbesserten (MOHAMED et al. 2007). Zudem nehmen die Nährstoffaufnahmeleistungen von Pflanzen in gemähten Flächen ab. So lässt sich erklären, dass aufgrund der verbesserten Verfügbarkeit dieser Nährstoffe in den Humuslagen die Auswaschung von N, Ca und Mg nach Mahd zugenommen hat (Tab. 2). Das N:P-Verhältnis in 2006 (22,4) indiziert eine deutliche P-Limitierung der *Calluna*-Pflanzen. Dies koinzidiert mit einer Erhöhung der N- und einer Abnahme der P-Verfügbarkeit an den betreffenden Standorten.

Winterbrand verbesserte signifikant die Ernährungssituation von *Calluna*, wie die erhöhten Nährelementgehalte in mindestens einem der Untersuchungsjahre, und für N, P und K sogar in beiden Untersuchungsjahren zeigten. Für vier der fünf untersuchten Elemente zeigten die Regressionsanalysen, dass die Depositionen dieser Nährelemente mit der Asche die verbesserte Ernährungssituation von *Calluna* am Besten erklärte (Tab. 3). Die Nährstoffeinträge mit der Asche waren besonders hoch für P, Ca und Mg, und das N:P-Verhältnis der Asche betrug 0,8 (Tab. 2). Dies mag die signifikante Abnahme der N:P-Verhältnisse der *Calluna*-Zweige erklären, obgleich sich die N-Gehalte erhöht haben. Wie DIEMONT (1996) zeigte, ist die Verfügbarkeit an Pflanzennährstoffen nach Brand über mehrere Jahre deutlich erhöht. Dies führt der Autor auf eine kontinuierliche Mineralisation der nach Brand auf den Flächen verbleibenden Zweige bzw. Biomassenreste zurück und erklärt, warum die Nährstoffgehalte für N, P, Mg und K im Jahre 2006 jene für das Jahr 2002 sogar noch überschritten. „Düngeeffekte“ durch Winterbrand können dementsprechend über mehrere Jahre andauern (NIEMEYER et al. 2005, PILKINGTON et al. 2007b). In unserem Experiment mögen die hohen Sommertemperaturen im Jahre 2006 zusätzlich den Abbau an organischem Material beschleunigt und so zu einer verbesserten Nährstoffverfügbarkeit beigetragen haben. Dies trifft auf jeden Fall für N zu, da sich die Vegetationsbedeckung zusätzlich als signifikanter Prädiktor für die Nährstoffgehalte der *Calluna*-Zweige erwies (Tab. 3). Auch die hohen Auswaschungs-

raten für N, Ca, Mg und K nach dem Brandexperiment indizieren eine erhöhte Verfügbarkeit dieser Nährstoffe im Oberboden (Tab. 2). Die Auswaschung von P mit dem Sickerwasser nach Brand erwies sich als signifikanter Prädiktor für erhöhte P-Gehalte der Zweige (Tab. 3). Dieses Ergebnis bedeutet wiederum, dass sich geringe negative Bilanzen für P ($-0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, ebenso auch für K mit $-0,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) nicht in der Ernährungssituation von *Calluna* widerspiegelten.

4.2 Auswirkungen der intensiven Maßnahmen auf die Nährstoffgehalte der *Calluna*-Zweige

Als ein Ergebnis unserer Untersuchungen erwarteten wir, dass die Ernährungssituation der Besenheide die durch intensive Pflegeverfahren bewirkten Nährstoffausträge aus Heideökosystemen anzeigte. Konträr zu dieser Erwartung wiesen aber Pflanzen, die sich auf den geschoppten und geplagten Flächen nach Durchführung der Maßnahmen wieder etabliert hatten, erhöhte N-, Mg-, K- und Ca-Gehalte im ersten oder zweiten Untersuchungsjahr auf. Die Regressionsanalysen zeigten zumindest für die Nähr-elemente N, Ca und K, dass die erhöhten Mineralisationsraten in Folge des Freilegens der Böden die durch die Maßnahmen bewirkten Nährstoffausträge mehr als kompensierten. Dieser Befund deckt sich mit der Beobachtung, dass das vollständige Entfernen einer schattenden Zwergstrauchschicht zu deutlich erhöhten Oberbodentemperaturen und, einhergehend damit, deutlich erhöhten Mineralisationsraten führt (BERENDSE 1990). DORLAND et al. (2004) konnten nachweisen, dass nach Plaggen sogar toxische Oberbodenkonzentrationen von Ammonium erreicht wurden, welche die Keimungsrate der *Calluna*-Samen verminderten. Die hohe Nährstoffverfügbarkeit in geschoppten und geplagten Flächen mag durch verschiedene Faktoren erklärt werden. Zum einen wird das tote, im Oberboden verbleibende organische Material nach Durchführung der Maßnahme besonders rasch zersetzt (DORLAND et al. 2004). Zudem sind aber die Nährstoff-Aufnahmeraten von Pflanzen auf diesen Flächen für mehrere Jahre stark reduziert. Letzteres wird besonders durch hohe Auswaschungsraten für N, Mg und K in den geschoppten und geplagten Flächen bestätigt (Tab. 2). In 2002 war die erhöhte N-Versorgung verantwortlich für eine beträchtliche Zunahme der N:P-Verhältnisse in den *Calluna*-Zweigen, die einen Grenzwert von 20 überschritten und damit eine P-Limitierung des Wuchses von *Calluna* anzeigten (GÜSEWELL 2004).

In den geplagten Flächen waren die P-Gehalte der Zweige offensichtlich durch die unterschiedlichen Niederschlagsmengen in beiden Untersuchungsjahren beeinflusst. Nach VAN MEETEREN et al. (2007) kann die mikrobiell gesteuerte P-Minieralisation besonders dann zusammenbrechen, wenn die Oberböden stark austrocknen. Es ist daher wahrscheinlich, dass besonders die Trockenphase im Juli 2006 die P-Versorgung der Besenheide auf den geplagten Flächen erheblich verschlechterte, da dort die Wasserkapazität der Oberböden infolge der kompletten Entfernung der organischen Auflagen und der teilweise entfernten A-Horizonte noch deutlich schlechter war als in den geschoppten Flächen.

Es bleibt zu diskutieren, inwieweit die Befunde zur Ernährungssituation von *Calluna* auf das unterschiedliche Alter der *Calluna*-Pflanzen zwischen den Maßnahmen- und Kontrollflächen zurückzuführen ist. Auf den Maßnahmeflächen wurden die Zweige von

Pflanzen der Pionier- und Aufbauphase gesammelt (in 2002 bzw. 2006), während in den Kontrollflächen *Calluna*-Zweige der Reifephase beerntet wurden. Studien von ROBERTSON & DAVIES (1965) und KIRKHAM (2001) zeigen, dass die Nährstoffgehalte von einjährigen Zweigen mit dem Gesamalter von *Calluna* zunehmen. KIRKHAM (2001) fand überdies, dass die N- und P-Gehalte der einjährigen Zweige mehr durch atmogene Nährstoffeinträge beeinflusst waren als durch das Entwicklungsstadium der *Calluna*-Pflanzen. Da wir die höchsten Nährstoffgehalte in jungen Pflanzen fanden, ist es unwahrscheinlich, dass die gefundenen Elementgehalte in den einjährigen Zweigen wesentlich durch das Gesamalter der untersuchten Individuen beeinflusst wurden.

5 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass *Calluna* auf der Basis der Elementgehalte einjähriger Zweige als Indikator für die Nährstoffverfügbarkeit in Heideböden herangezogen werden kann. Bei der Interpretation der Befunde muss allerdings unterschieden werden, inwieweit ein verändertes Nährstoffangebot auf veränderte Nährstoffvorräte im Gesamtsystem zurückzuführen ist (langfristig wirksame Veränderungen der Nährstoffverfügbarkeit) bzw. durch veränderte Mineralisationsraten beeinflusst wurde (aufgrund von Änderungen des Mikroklimas bzw. veränderten Bodentemperaturen, welche kurzfristige Veränderungen des Nährstoffangebotes hervorrufen können). In Bezug auf extensive Pflegemaßnahmen erwiesen sich die Nährstoffgehalte der einjährigen *Calluna*-Zweige als gute Indikatoren der Nährstoffvorräte im Boden, insbesondere für Nährelemente mit konservativen Kreisläufen (z. B. P). Je weniger also Pflegeverfahren die physischen Bedingungen des Lebensraumes Heide beeinflussen, desto besser werden langfristig wirksame Veränderungen der Nährstoffvorräte durch die Nährstoffgehalte der *Calluna*-Zweige indiziert. In den gebrannten Flächen erwies sich *Calluna* als ein guter Indikator für die Nährstoffvorräte in den organischen Auflagen, die hauptsächlich durch die Deposition von Asche beeinflusst wurden. An Standorten, die intensiven Pflegemaßnahmen unterlagen, spiegelten die Nährstoffgehalte der einjährigen Zweige nicht die durch diese Maßnahmen induzierten Änderungen der Nährstoffvorräte wider (zumindest nicht innerhalb der von uns untersuchten fünfjährigen Periode). An diesen Standorten koinzidierten die Nährstoffgehalte der Zweige in erster Linie mit veränderten Mineralisationsraten im Oberboden, die auf das vollständige Entfernen der Vegetationsdecke zurückzuführen waren. Da Pflanzenwuchs in Heiden in erster Linie durch die Verfügbarkeit an N oder P kontrolliert wird (BRITTON & FISHER 2007), sind die Auswirkungen des Managements auf die N- und P-Vorräte der Systeme von besonderem Interesse. In diesem Zusammenhang kann es hilfreich sein, die N:P-Verhältnisse der einjährigen *Calluna*-Zweige zu kennen, da diese in gewissen Grenzen anzeigen, ob betreffende Systeme durch N, P oder N und P limitiert sind (GÜSEWELL 2004). Damit ließe sich beurteilen, ob atmogene Einträge oder Managementmaßnahmen zu sichtbaren Veränderungen der N- oder P-Vorräte des Systems geführt haben.

6 Literatur

- AERTS, R. & F. S. CHAPIN (2000): The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. – *Advances Ecol. Res.* **30**: 1-67.
- BARDGETT, R. D., T. C. STREETER, L. COLE & I. R. HARTLEY (2002): Linkages between soil biota, nitrogen availability, and plant nitrogen uptake in a mountain ecosystem in the Scottish Highlands. – *Appl. Soil Ecol.* **19**: 121-134.
- BARKER, C. G., S. A. POWER, J. N. B. BELL & C. D. L. ORME (2004): Effects of habitat management on heathland response to atmospheric nitrogen deposition. – *Biol. Conservation* **120**: 41-52.
- BERENDSE, F. (1990): Organic matter accumulation and nitrogen mineralization during secondary succession in heathland ecosystems. – *J. Ecol.* **78**: 413-427.
- BOBBINK, R., M. HORNUNG & G. M. ROELOFS (1998): The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation – a review. – *J. Ecol.* **86**: 717-738.
- BRITTON, A. & J. FISHER (2007): NP stoichiometry of low-alpine heathland: Usefulness for bio-monitoring and prediction of pollution impacts. – *Biol. Conservation* **138**: 100-108.
- CHAPMAN, S. B., R. J. ROSE & M. BASANTA (1989): Phosphorus adsorption by soils from heathlands in southern England in relation to successional change. – *J. Appl. Ecol.* **26**: 673-680.
- DIEMONT, W. H. (1996): Survival of Dutch heathlands. – *IBN Sci. Contr.* **1**.
- DORLAND, E., L. J. L. VAN DEN BERG, A. J. VAN DE BERG, M. L. VERMEER, R. BOBBINK & J. G. M. ROELOFS (2004): The effects of sod cutting and additional liming on potential net nitrification in heathland soils. – *Pl. & Soil* **265**: 267-277.
- FOTTNER, S., W. HÄRDTLE, M. NIEMEYER, T. NIEMEYER, G. VON OHEIMB, H. MEYER & M. MOCKENHAUPT (2007): Impact of sheep grazing on nutrient budgets of dry heathlands. – *Appl. Veg. Sci.* **10**: 391-398.
- GIMINGHAM, C. H. (1992): The lowland heathland management handbook. – *English Nature Science*.
- GOMBERT, S., J. ASTA & M. R. D. SEAWARD (2006): Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in the Grenoble area (Isere, southeast France). – *Ecol. Indicators* **6**: 429-443.
- GÜSEWELL, S. (2004): N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. – *New Phytol.* **164**: 243-266.
- GÜSEWELL, S. & M. KOERSELMAN (2002): Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants. – *Perspect. Pl. Ecol. Evol. Syst.* **5**: 37-61.
- HÄRDTLE, W., M. NIEMEYER, T. NIEMEYER, T. ASSMANN & S. FOTTNER (2006): Can management compensate for atmospheric nutrient deposition in heathland ecosystems? *J. Appl. Ecol.* **43**: 759-769.
- HÄRDTLE, W., G. VON OHEIMB, M. NIEMEYER, T. NIEMEYER, T. ASSMANN & H. MEYER (2007): Nutrient leaching in dry heathland ecosystems: effects of atmospheric deposition and management. – *Biogeochemistry* **86**: 201-215.
- KIRKHAM, F.W. (2001): Nitrogen uptake and nutrient limitation in six hill moorland species in relation to atmospheric nitrogen deposition in England and Wales. – *J. Ecol.* **89**: 1041-1053.
- LAMBLE, K. J. & S. J. HILL (1998): Microwave digestion procedures for environmental matrices. – *Analyst* (1877+) **123**: 103-133.
- MITCHELL, R. J., M. H. D. AULD, J. M. HUGHES & R. H. MARRS (2000): Estimates of nutrient removal during heathland restoration on successional sites in Dorset, southern England. – *Biol. Conservation* **95**: 233-246.
- MOHAMED, A., W. HÄRDTLE, B. JIRJAHN, T. NIEMEYER & G. VON OHEIMB (2007): Effects of prescribed burning on plant available nutrients in dry heathland ecosystems. – *Pl. Ecol.* **189**: 279-289.

- MOSS, R., D. WELCH & P. ROTHERY (1981): Effects of grazing by mountain hares and red deer on the production and chemical composition of heather. – *J. Appl. Ecol.* **18**: 487-496.
- NIELSEN, K. E., U. L. LADEKARL & P. NØRNBERG (1999): Dynamic soil processes on heathland due to changes in vegetation to oak and Sitka spruce. – *Forest Ecol. and Managem.* **114**: 107-116.
- NIEMEYER, M., T. NIEMEYER, S. FOTTNER, W. HÄRDTLE & A. MOHAMED (2007): Impact of sod-cutting and choppering on nutrient budgets of dry heathlands. – *Biol. Conservation* **134**: 344-353.
- NIEMEYER, T., M. NIEMEYER, A. MOHAMED, S. FOTTNER & W. HÄRDTLE (2005): Impact of prescribed burning on the nutrient balance of heathlands with particular reference to nitrogen and phosphorus. – *Appl. Veg. Sci.* **8**: 183-192.
- PILKINGTON, M. G., S. J. M. CAPORN, J. A. CARROLL, N. CRESSWELL, J. A. LEE, B. A. EMMETT & R. BAGCHI (2007a): Phosphorus supply influences heathland responses to atmospheric nitrogen deposition. – *Environm. Pollut., A.* **148**: 191-200.
- PILKINGTON, M.G., S. J. M. CAPORN, J. A. CARROLL, N. CRESSWELL, G. K. PHOENIX, J. A. LEE, B. A. EMMETT & T. SPARKS (2007b): Impacts of burning and increased nitrogen deposition on nitrogen pools and leaching in an upland moor. – *J. Ecol.* **95**: 1195-1207.
- PITCAIRN, C.E.R., D. FOWLER, I. D. LEITH, L. J. SHEPPARD, M. A. SUTTON, V. KENNEDY & E. OKELLO (2003): Bioindicators of enhanced nitrogen deposition. – *Environm. Pollut., A.* **126**: 353-361.
- ROBERTSON, R. A. & G. E. DAVIES (1965): Quantities of plant nutrients in heather ecosystem. – *J. Appl. Ecol.* **2**: 211-219.
- UREN, S. C., N. AINSWORTH, S. A. POWER, D. A. COUSINS, L. M. HUXEDURP & M. R. ASHMORE (1997): Long-term effects of ammonium sulphate on *Calluna vulgaris*. – *J. Appl. Ecol.* **34**: 208-216.
- VAN MEETEREN, M. J. M., A. TIETEMA & J.W. WESTERVELD (2007): Regulation of microbial carbon, nitrogen, and phosphorus transformations by temperature and moisture during decomposition of *Calluna vulgaris* litter. – *Biol. Fertil. Soils* **44**: 103-112.
- WALKER, T. R., P. D. CRITTENDEN, S. D. YOUNG & T. PRYSTINA (2006): An assessment of pollution impacts due to the oil and gas industries in the Pechora basin, north-eastern European Russia. – *Ecol. Indicators* **6**: 369-387.
- WONG, M.-K., W. GU & T. L. NG (1997): Sample preparation using microwave assisted digestion or extraction techniques. – *Analytical Sci.* **13**: 97-102.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Werner Härdtle
 PD Dr. Goddert v. Oheimb
 Universität Lüneburg
 Institut für Ökologie und Umweltchemie
 Scharnhorststr. 1
 21335 Lüneburg
 Germany

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Abhandlungen aus dem Westfälischen Provinzial-Museum für Naturkunde](#)

Jahr/Year: 2008

Band/Volume: [70_3-4_2008](#)

Autor(en)/Author(s): Härdtle Werner, Oheimb Goddert von

Artikel/Article: [Einfluss verschiedener Heide-Pflegeverfahren auf die Ernährungssituation von *Calluna vulgaris* 81-99](#)