



Zusammenhang zwischen Schattentoleranz und Ernährung von Buche und Bergahorn bei ihrer Einbringung in nährstoffarme, sekundäre Nadelreinbestände



Laufzeit:

1.10.2003 - 31.3.2006 (30 Monate)

Forschungsstelle / Auftragnehmer:

Universität Ulm,
Abteilung Systematische Botanik und Ökologie
Prof. Dr. M. Kazda
Dipl.Biol. Kordula Heinen

Projektleiter:

Bearbeitung:

Telefon: +49/731/50-22702, bzw. -22285 (Frau Heinen)

Telefax: +49/731/50-22720

E-mail: Marian.Kazda@uni-ulm.de

E-mail: Kordula.Heinen@uni-ulm.de

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG	3
1.1 AUSGANGSLAGE, PROBLEMSTELLUNG UND STAND DER KENNNTNISSE	3
1.2 ZIELSETZUNG	5
2 MATERIAL UND METHODEN	7
2.1 GEOGRAPHISCHE LAGE, GEOLOGIE, BODEN, KLIMA UND VEGETATION	7
2.2 VERSUCHSAUFBAU	8
2.2.1 FLÄCHENEINRICHTUNG UND PFLANZMATERIAL	8
2.2.2 DÜNGUNG DER VERSUCHSPFLANZEN	9
2.2.3 AUSFÄLLE	9
2.3 AUFNAHME DER BIOMETRISCHEN PARAMETER	10
2.4 NÄHRSTOFFANALYSEN DER BLÄTTER	11
2.4.1 AAS	11
2.4.2 STICKSTOFF	11
2.5 LICHTVERHÄLTNISSE	11
2.6 PHOTOSYNTHESEMESSUNGEN	12
2.8 STATISTISCHE AUSWERTUNG	12
3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	14
3.1 NÄHRSTOFFGEHALTE DER BLÄTTER	14
3.2 PHOTOSYNTHESEMESSUNGEN	16
3.2.1 UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEN ARTEN	16
3.2.2 EINFLUSS DER DÜNGUNG	18
3.2.3 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN PHOTOSYNTHESELEISTUNG UND BLATTPARAMETERN	19
3.3 BONITIERUNG DER BLÄTTER	22
3.3.1 KATEGORISIERUNG DER FRAßSPUREN	22
3.3.2 KATEGORISIERUNG DER NEKROSEN	25
3.4 BIOMETRISCHE PARAMETER	28
3.4.1 WACHSTUM UND BIOMASSE	28
3.4.2 BLATTFLÄCHE, BLATTZAHL UND LMA	35
4 SCHLUßFOLGERUNG	37
5 HINWEISE FÜR DIE PRAXIS	38
6 LITERATUR	40
7 FOTODOKUMENTATION	45
8 PRÄSENTATION DER ERGEBNISSE AUF TAGUNGEN	48

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage, Problemstellung und Stand der Kenntnisse

Fichtenmonokulturen wurden bereits seit Mitte des 18. Jahrhunderts verstärkt angebaut, um den wachsenden Holzbedarf decken zu können (Leder 2002). Die Fichte (*Picea abies*) ist heute die in Europa am häufigsten vertretene Baumart ist. Allerdings kommt sie dadurch oft außerhalb ihrer natürlichen Verbreitung vor. Natürliche Fichtenreinbestände finden sich nur auf ausgesprochen extremen Standorten bzw. in Gebirgslagen. Natürlich regenerierte Fichtenwälder entwickeln sich meist zu Mischwäldern (Mielikäinen 1980). Die Böden in Nadelreinbestände zeichnen sich häufig durch Rohhumusakkumulation, Versauerung und verminderte Nährstoffverfügbarkeit aus (e.g. Emmer et al. 1998). Aufgrund geringer Pflanz- und Pflegekosten und der relativ schnellen Holzproduktion sind Fichtenmonokulturen auch heute noch von hoher ökonomischer Bedeutung. Nachteilig wirken sich die relativ hohe Anfälligkeit von Fichtenmonokulturen gegenüber Schnee, Eis, Sturm, Trockenheit und Schädlingsbefall aus. Die wirtschaftlichen Schäden durch Windwurf nach den Sturmereignissen „Wiebke“ und „Vivienne“ im Jahre 1990 oder „Lothar“ im Jahre 1999 waren immens. Allein durch „Lothar“ kam es zu einem Windwurf von 200 Mio. Fm in ganz Europa (Deffner 2000), so dass in der Fachliteratur ein Waldumbau zu strukturreichen Mischwäldern gefordert wird (siehe z.B. Hatzfeldt 1996, Leder 2002 oder Weilharter 1991). Ziel des Waldumbaus ist es, standortgerechte und naturnahe Wälder zu schaffen.

Eine Möglichkeit, um Fichtenreinbestände in stabilere, produktive Mischwälder umzuwandeln, ist der Voranbau (e.g. Leder 2002, Vonhoff 1997, Fleder 1991, Sauter 1988). Bei dem auf der Versuchsfläche dieses Projektes in Weitra durchgeführten Voranbau handelte es sich um einen aktiven Voranbau. Die Zielbaumarten werden hierbei nach einem Durchlichtungshieb im fast schlagreifen Fichtenbestand unter den Fichtenschirm gepflanzt. Diese Methode vermindert gegenüber einem Kahlschlag die Nährstoffauswaschung und Konkurrenz durch die Schlagflora (Nykvist 1977, Mayer 1980).

Der potentielle Kohlenstoffgewinn einer Pflanze ist durch das Lichtangebot begrenzt. Die Fähigkeit mit dem limitierenden Faktor Licht zu Recht zu kommen, ist bei verschiedenen Baumarten unterschiedlich ausgeprägt und spiegelt sich in der Blatteigenschaft LMA (Blattmasse pro Blattfläche) wieder. Lichtbedürftige Arten weisen höhere LMA-Werte auf als schattentolerante Arten (Abrams und Mostoller 1995, Cramer et al. 2000, Niinemets 1996, Walter und Reich 1999). Ein höherer LMA bedeutet mehr

Assimilataufwand für den Aufbau der Blattfläche, wodurch es bei Lichtmangel langfristig zu einer negativen Kohlenstoffbilanz kommen kann und die Überlebenschancen der lichtbedürftigen Arten im lichtarmen Unterwuchs sinken (Kazda et al. 2005). Schattentolerante Pflanzen verfügen auf ihre gesamte Biomasse bezogen über eine größere Gesamtblattfläche als lichtbedürftige Arten (Walter und Reich 1999). Die Schattentoleranz der unter den Fichtenschirm gepflanzten Arten ist eine wichtige Voraussetzung für einen erfolgreichen Voranbau. Häufig werden als schattentolerant geltende Arten wie *Fagus sylvatica* oder *Abies alba* für den Voranbau verwendet (Wagner und Müller-Using 1997, Weidenbach 1985).

Für die Naturverjüngung von schattentoleranten Buchen werden relative Anteile an photosynthetisch aktiver Strahlung zwischen 4 und 50 % des Freilandwertes als optimal angesehen (Paci und Ciambelli 1996). Unter gegenüber Freiflächen leicht reduziertem Lichtangebot, zeigten Eichen- und Buchenjungpflanzen einen größeren Höhenzuwachs verbunden mit einer geringeren Durchmesserzunahme als Pflanzen, die mehr photosynthetisch aktive Strahlung erhielten (Ammer 2003). Eine hohe Plastizität lässt die Wachstumsdynamik von *Acer pseudoplatanus* erwarten (Röhrig 1967). Auf optimal nährstoffversorgtem Substrat überlebten selbst bei 1 % der Freilandstrahlung noch die meisten der Versuchspflanzen, allerdings nahmen die Wachstumskennzahlen um 78 bis 8 % gegenüber denen unter Freilandstrahlung wachsenden ab.

Die herrschenden Lichtbedingungen beeinflussen nicht nur die Blattmorphologie (LMA) sondern führen auch zur Anpassung des Photosyntheseapparates an die herrschenden Lichtbedingungen (Brooks et al. 1994, Hikosaka und Terashima 1995). Um im Schatten eine effizientere Lichtausbeute durch das Chlorophyll zu erreichen, wird der investierte Stickstoff auf eine größere Blattfläche verteilt (Niinemets 1997). Die Mineralnährstoffe Stickstoff und Magnesium sind für die Herstellung von Chlorophyll und somit für die Fixierung von Kohlenstoff von großer Bedeutung. Eine unzureichende Magnesiumversorgung führt über die Abnahme der Photosyntheseleistung zu einer Reduzierung des Zuwachses (Küppers et al. 1985, Sun und Payn 1999). Darüber hinaus ist die Magnesiumversorgung auch bei der Schattentoleranz von Bedeutung. Bei erhöhtem Magnesiumangebot konnten Kiwi-Pflanzen bei geringen Lichtintensitäten höhere Photosyntheseleistungen erzielen (Dimassi-Theriu und Bosabalidis 1997). Die Stickstoffversorgung wirkt sich ebenfalls auf die Biomasseproduktion aus (Reich et al. 1995). Entscheidend ist vor allem die Stickstoffverfügbarkeit und daraus resultierend der Blattstickstoffgehalt. Dieser bestimmt über die Photosyntheseleistung die relativen Wachstumsraten (Abrams und Mostoller 1995, Cornelissen et al. 1997). Pflanzen, die bei

einem höheren Stickstoffangebot wachsen, weisen bei gleicher Beleuchtungsstärke eine höhere maximale Nettophotosyntheseleistung auf (Osmond 1983, Reich et al. 1990).

Obwohl der Buchenvoranbau in Westeuropa teilweise bestandesweise durchgeführt wird, sind begleitende Untersuchungen zum Nährstoffbedarf in Verbindung mit Schattentoleranz bisher nur auf wenigen Standorten vorgenommen worden (Büttner und Wagner 1996, Pichler et al. 2001). Langzeitbeobachtungen der Voranbauten auf der Versuchsfläche der Forstverwaltung Castell-Castell in Oberösterreich (Kazda et al. 2004) haben gezeigt, dass auf nährstoffarmen Standorten die Nährstoffversorgung eine Schlüsselrolle für das Wachstum spielt. Auch Galinski et al. (1994) haben festgestellt, dass der Einfluss der Pflanzdichte auf das Höhenwachstum durch eingeschränkte Nährstoffversorgung unterdrückt wird.

Die Bedeutung der Nährstoffversorgung für den Erfolg der Voranbauten wird noch gravierender, wenn zur Buche der anspruchsvollere Bergahorn hinzukommt. Auf den Versuchsflächen in Weitra zeigen die Blätter des Ahorns ab Juni/Juli Vergilbungen und vorzeitigen Blattabwurf, dies hat den Ausschlag für die durchgeführten Begleituntersuchungen gegeben. In der Literatur fehlt es an klassifizierbaren Aussagen über den Nährstoffbedarf im Zusammenhang mit der Schattentoleranz dieser wichtigen Wirtschaftsbaumart.

1.2 Zielsetzung

Die erfolgreiche Einbringung von Ziellaubhölzer über den Voranbau in nährstoffarme Fichtenaltbestände hat eine ausreichende Nährstoffversorgung als Voraussetzung. Im Rahmen des Vorhabens sollte geprüft werden, ob in solchen sekundären Nadelwäldern die Nährstoffversorgung ausreicht, um Buche und Bergahorn erfolgreich unter dem bestehenden Albestandesschirm zu verjüngen. Ist darüber hinaus eine begleitende Nährstoffzufuhr erforderlich? Des Weiteren sollte gezeigt werden, welche Unterschiede bezüglich ihrer Schattentoleranz und des damit verbundenen Nährstoffbedarfs zwischen Buche und Ahorn auftreten. Für diese Ermittlung wurden ökophysiologische Messungen (photosynthetische Leistungskapazität) als Schnelldiagnose eingesetzt und mit Wachstumsparametern verknüpft. Zusätzlich wurde als Eigenleistung des Auftragnehmers die Effizienz der eingesetzten Stickstoffdüngung durch die Verwendung stabiler Stickstoffisotope überprüft.

In diesem Abschlussbericht werden die Ergebnisse der drei Vegetationsperioden zusammenfassend dargestellt. Für die allgemeinen Ergebnisse der einzelnen Jahre sei auf

die Zwischenberichte verwiesen. Falls es von Jahr zu Jahr zu gravierenden Veränderungen gekommen ist, wird hier darauf explizit hingewiesen.

2 Material und Methoden

2.1 Geographische Lage, Geologie, Boden, Klima und Vegetation

Die Versuchsfläche liegt im Waldviertel (Niederösterreich) circa 15 km südöstlich von Weitra in der Nähe des Dorfes Hirschenwies auf einer Höhe zwischen 850 und 910 m über NN. Der Wald ist im Besitz der Familie Fürstenberg und wird von der Fürstenberg'schen Forst- und Güterdirektion Weitra verwaltet. Beim geologischen Ausgangsmaterial des Standortes handelt es sich um einen feinkörnigen Granit. Die Kationen-Austauschkapazität bzw. die Basensättigung des Mineralbodens liegen in einer Tiefe zwischen 0 und 5 cm bei $111 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ bzw. 6 % und in einer Tiefe von 20 bis 40 cm bei $32 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ bzw. 4 % (Kazda et al. 2005). Generell ist der Boden der Untersuchungsfläche nährstoffarm und stark versauert (Tab. 2.1.1). Dies liegt nicht nur im Ausgangsgestein sondern auch in der historischen Nutzung des Waldes (Streunutzung, Quarzabbau und Holzkohleproduktion) begründet und hat Auswirkungen auf die gegenwärtige Bewirtschaftung mit *Picea abies*.

Tabelle 2.1.1 Mittelwerte und Standardabweichung des pH-Wertes und der austauschbaren Bodennährstoffgehalte (Kazda et al. 2005)

Tiefe Probennahme	pH CaCl ₂	P [g kg ⁻¹]	K [g kg ⁻¹]	Ca [g kg ⁻¹]	Mg [g kg ⁻¹]	Fe [g kg ⁻¹]	Mn [mg kg ⁻¹]
Waldboden	2,9 ± 0,1	1,1 ± 0,1	0,7 ± 0,2	1,4 ± 0,5	0,5 ± 0,1	4,4 ± 1,1	102 ± 31
0 – 5 cm	3,0 ± 0,2	0,6 ± 0,2	1,1 ± 0,3	0,2 ± 0,1	1,0 ± 0,5	10 ± 4,4	56 ± 38
20 – 40 cm	4,2 ± 0,1	0,6 ± 0,1	1,3 ± 0,2	0,2 ± 0,1	1,9 ± 0,4	17 ± 1,5	194 ± 63

Der Jahresniederschlag beträgt circa 700 mm bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von sieben Grad Celsius (Abb. 2.1.1). Klimatisch wird der Standort dem kontinentalen Klima zugeordnet, das durch verstärkte Niederschläge in den Sommermonaten und deutliche Temperaturunterschiede zwischen der im Sommer und im Winter gemessenen Lufttemperatur gekennzeichnet ist. Die Vegetationsperiode erstreckt sich über circa fünfeinhalb Monate, wobei mit dem ersten Frost im Oktober zu rechnen ist. Bis in den Mai hinein können Temperaturen unter null Grad Celsius erreicht werden.

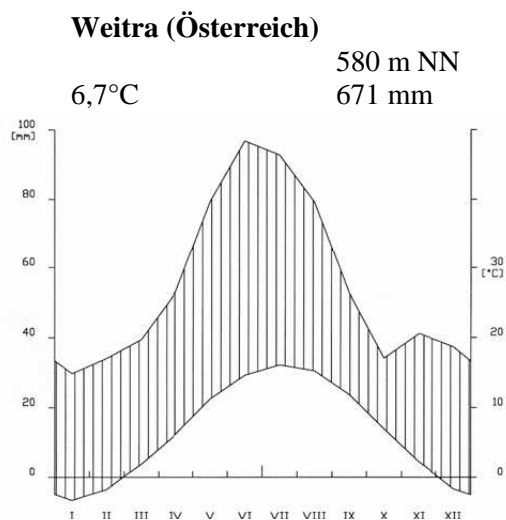


Abbildung 2.1.1 Klimadiagramm nach WALTER & LIETH (abgeändert nach Reiter et al. 2003)

Der Fichtenaltbestand auf der Versuchsfläche weist ein Alter von 110 Jahren auf. Vor der Auflichtung im Jahre 1999 konnte die Vegetation als *Galio harcynici-Piceetum* beschrieben werden (Sustman – Biodiversity Report). Als Folge der Auflichtung kamen Arten wie *Salix caprea*, *Betula sp.*, *Rubus idaeus*, *Epilobium angustifolium* und *Juncus effusus* hinzu.

2.2 Versuchsaufbau

2.2.1 Flächeneinrichtung und Pflanzmaterial

Die Versuchspflanzen *Fagus sylvatica* und *Acer pseudoplatanus* wurden im Jahr 1999 in Parzellen (nach Arten getrennt) gepflanzt und sind doppelt gezäunt. Für die Buchenpflanzen wurden Wildlinge (circa 5 – 10 cm hoch) verwendet. Der Ahorn hingegen stammte aus einer Baumschule.

Für die Untersuchungen des Vorhabens wurden im Frühjahr 2003 vier Parzellen (2x Buche, 2x Ahorn) ausgewählt, auf denen eine ausreichende Anzahl an geeigneten Jungpflanzen zu finden war. Aus den vorhandenen Pflanzen wurden pro Parzelle 30 Pflanzen d. h. insgesamt 60 Buchen und 60 Ahorne ausgewählt. Für die Untersuchung mussten die Buchen eine Höhe zwischen 45 und 60 cm und die Ahorne eine Höhe zwischen 80 und 110 cm aufweisen. Die Pflanzen durften weder Fraßschäden noch Wipfelbruch zeigen.

Um einen Einfluss der Lage der Parzellen innerhalb der Versuchsfläche ausschließen zu können, wurde der Versuch zweimal wiederholt. Die statistische Überprüfung ergab, dass keiner der untersuchten Parameter Höhe, Wurzelhalsdurchmesser, LMA, Blattfläche oder -zahl durch die Lage in der Untersuchungsfläche sprich durch die Parzelle signifikant beeinflusst wurde.

2.2.2 Düngung der Versuchspflanzen

Aus den ausgewählten Pflanzen wurden auf jeder Parzelle zufallsverteilt (Losverfahren) die Pflanzen für die Düngung bestimmt. Von den 30 markierten Pflanzen pro Parzelle wurden je 10 als Kontrolle genommen bzw. je 10 mit einem Stickstoff oder einem Ca/Mg-Dünger gedüngt. Die Düngung erfolgte einmalig vor Beginn der Vegetationsperiode 2003.

Als Stickstoffdünger wurde Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) mit einer Düngevorschrift von 50 kg/ha eingesetzt. Pro Pflanze sollte ein halber Quadratmeter gedüngt werden, so dass sich ein Bedarf von 2,5 g Stickstoff pro Pflanze ergibt. Insgesamt waren für die Düngung der 40 Pflanzen 100 g Stickstoff nötig. Das Ammoniumnitrat wurde zur Feststellung der Düngeeffizienz und der Stickstoffumverteilung innerhalb der Pflanze zu 5 % mit ^{15}N markiert. Hierzu wurde unmarkiertes, hochreines Ammoniumnitrat (Reinheit 98,8 %) mit 10 %igem, an beiden Stickstoffatomen markiertem Ammoniumnitrat ($^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$, Reinheit 99,3 %) im Verhältnis 1:1 versetzt. Das Ausbringen des Düngers erfolgte oberirdisch mittels eines Feinstreuers, um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten. Die zu düngende Fläche ($0,5 \text{ m}^2$) wurde durch einen Metallring mit einem Durchmesser von 79,79 cm abgegrenzt.

Für die Ca/Mg-Düngung wurde der gängige Dünger der Fürstenberg'schen Forst- und Güterdirektion Weitra eingesetzt. Es handelt sich um ein Granulat mit folgender Zusammensetzung: 60 % Calciumcarbonat, 30 % Magnesiumcarbonat und 10 % sonstige Bestandteile. Da pro halben Quadratmeter 100 g oberirdisch ausgebracht wurden, entspricht dies einer Calciumdüngung von 480 kg/ha und einer Magnesiumdüngung von 123 kg/ha.

2.2.3 Ausfälle

Der Hitzesommer 2003 führte zu verstärktem Borkenkäferbefall auf der Untersuchungsfläche, so dass im Jahr 2004 Baumfällarbeiten durchgeführt werden mussten. Hierbei kam es beim Ahorn in der Parzelle 1 zu drei Totalausfällen. Die drei zerstörten Bäume gehörten jeweils einer Behandlungsvariante an. Darüber hinaus ist eine Buche in Parzelle 1 wegen Mäuseverbiß im Winter 2004/05 abgestorben.

2.3 Aufnahme der biometrischen Parameter

An den 120 Versuchspflanzen wurden vor Beginn der Vegetationsperiode 2003 sowie am Ende der Vegetationsperioden der Jahre 2003, 2004 und 2005 die Astanzahl sowie die Gesamthöhe und die Länge des Terminaltriebes bestimmt. Des Weiteren wurde die Kronenhöhe, -breite und -tiefe gemessen, um das Kronenvolumen zu errechnen. Der Wurzelhalsdurchmesser wurde bei 0 cm und 10 cm mit einer Schieblehre gemessen.

Aus den erhobenen biometrischen Parametern ließen sich relative Zuwächse in Prozent errechnen. Der prozentuale Höhenzuwachs über den gesamten Untersuchungszeitraum berechnet sich zum Beispiel wie folgt: Der Ausgangswert nach Ende der Vegetationsperiode 2002 wird als 100 % gesetzt, d.h.

$\text{prozentualer Höhenzuwachs}_{2002-2005} = \frac{y}{x} * 100$	$x = H_{2002}$ $y = \text{Zuwachs}_{2002-2005}$ $= H_{2005} - H_{2002}$
--------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------

Wobei H die Höhe der Pflanzen im angegebenen Messjahr ist. Die prozentualen Zuwächse für die einzelnen Jahre errechnen sich analog, ebenso die Zuwächse der anderen Parameter.

Anhand einer fünfstufigen Skala wurden Nekrose bzw. Fraß an den Blättern in Kategorien unterteilt. Es gilt: **1** = keine Blätter mit Fraß/Nekrose, **2** = < 1/3, **3** = < 2/3 und **4** = > 2/3 der Blätter mit Fraß/Nekrose und **5** = alle Blätter mit Fraß/Nekrose.

Während der Vegetationsperiode wurde außerdem die Gesamtblattzahl bestimmt. Zur Berechnung der Blattflächen wurden zwischen 5 - 10 Ahorn- und 15 - 25 Buchenblätter eingescannt und deren Fläche mittels des Programms Dt-Scan (DELTA-T Devices Ltd, Cambridge, GB) berechnet. Anschließend wurden die Blattproben bei 60° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und danach gewogen. Die spezifische Blattmasse (LMA [g m⁻²]) errechnet sich aus der Blattmasse dividiert durch die Blattfläche. Die Gesamtblattfläche ergibt sich aus dem Produkt der Blattzahl und der mittleren Blattfläche, analog errechnet sich die in den Blättern festgelegte Gesamtbiomasse der Bäume aus der Blattzahl und der mittleren Blattmasse.

Am Ende der Vegetationsperiode 2005 wurden in jeder Ahornparzelle pro Düngewarriante vier Pflanzen per Losverfahren zur Ernte ermittelt. Die Ernte der unterirdischen Biomasse der 24 Ahorne erfolgte mit der sogenannten Air-Spade-Methode. Mit Hilfe eines Kompressors wird hierbei mit Hochdruckluft das Erdreich um die Pflanzen entfernt. Diese Methode ermöglicht es, sowohl die Grob- als auch Feinwurzeln ohne größere Verluste freizulegen. Das Wurzelmaterial der geernteten Pflanzen wurde in

Tiefenstufen (0 – 20 cm und 20 – 40 cm) unterteilt und bis zur weiteren Analyse tief gefroren. Die oberirdische Biomasse der geernteten Ahorne wurde bis zur Gewichtskonstanz bei 60° C getrocknet und anschließend gewogen.

2.4 Nährstoffanalysen der Blätter

2.4.1 AAS

Um die Nährstoffgehalte in den Blattproben zu bestimmen, wurden diese nach dem Trocknen gemahlen und mit einem Säureaufschlussverfahren für Biomasse bearbeitet (100 mg Blattprobe, 2,5 ml HNO₃ 65 %ig, 160° C 2 h, filtrieren, mit Bidest ad 50 ml auffüllen). Die Kalium- (K), Magnesium- (Mg) und Calciumgehalte (Ca) in den Blättern wurden anschließend mit dem AAS vario 6 Spektrometer in Verbindung mit einem AS52 Autosampler (Analytik Jena AG, Jena, Deutschland) bestimmt.

2.4.2 Stickstoff

Die Bestimmung des Gesamtstickstoffgehalts im Blattmaterial erfolgte nach Kjeldahl in einer Mikro-Kjeldahl-Anlage. Nach dem Aufschluss von jeweils 100 mg Probe wurde mit der Destilling Unit (KJELTEC Systems, Högaris, Schweden) destilliert und mit dem Metrohm 665 Dosimat in Kombination mit dem Metrohm 605pH-Meter (Metrohm AG, Herisau, Schweiz) titriert. Bei diesem Verfahren wird das in den Blättern enthaltene Nitrat nicht mitbestimmt.

Die Analyse der Stickstoffisotope (¹⁵N/¹⁴N) in den Blattproben der mit Stickstoff gedüngten Pflanzen sowie der Kontrollen wurde am Lehrstuhl für Grünlandlehre der Technischen Universität München an einem Massenspektrometer (Delta plus, Finnigan MAT) mit kombiniertem Element Analyser durchgeführt. Diese Analysekosten wurden vom Auftragnehmer als Eigenleistung getragen.

2.5 Lichtverhältnisse

Um das Lichtangebot der Jungpflanzen zu charakterisieren, wurden der Blattflächenindex (LAI) und der Lückenanteil (DIFN = diffuse non-interceptance) in der Baumkrone der Fichten mit dem LAI 2000 Plant Canopy Analyzern (LICOR Inc., Lincoln, Nebraska, USA) direkt über den Buchen- bzw. Ahornpflanzen bestimmt. Die Referenzkonsole des LAI 2000 Gerätes wurde auf der freiliegenden Referenzfläche aufgestellt. Der Lückenanteil ist linear mit der Lichtverfügbarkeit am jeweiligen Messpunkt korreliert. Die Bestimmung des LAI und DIFN mittels LAI 2000 ist ein

elektro-optisches Verfahren und beruht auf der Strahlungsextinktion im Bereich von 490 nm. Die Messungen setzen diffuse Strahlung d.h. eine gleichmäßige Bewölkung oder die Lichtverhältnisse in der Morgen- oder Abenddämmerung voraus. Mit Hilfe der Auswertesoftware C2000 von LICOR Inc. können die Messwerte des Bestandes mit denen der Freifläche verrechnet und so der LAI und DIFN errechnet werden.

Zur Messung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR = photosynthetically active radiation [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$]) d. h. der zur Photosynthese genutzten Strahlung (Wellenlängenbereich 380 - 710 nm) wurden LI-190SZ Quantum Sensoren am LAI 2000 angebracht. Dies ermöglichte die parallele Messung von LAI, DIFN und PAR über der jeweiligen Versuchspflanze.

2.6 Photosynthesemessungen

An den Versuchspflanzen beider Arten wurden mit dem LI-6400 (LI-COR Portable Photosynthesis System; LICOR Inc., Lincoln, Nebraska, USA) Gaswechsellparameter (z.B. maximale Photosyntheseleistung und Transpiration) gemessen. Die Messungen erfolgten an voll entwickelten Blättern im Wipfelbereich. Die Temperatur des Messblattes wurde über die Blocktemperatur des Messkopfes auf 20°C eingestellt. Aus den Daten der Lichtkurven kann die photosynthetische Kapazität (maximale Photosyntheseleistung, A_{max}), der Lichtkompensationspunkt und die Transpiration abgelesen bzw. errechnet werden. Aus A_{max} und der Gesamtblattfläche der Pflanzen wird die theoretische Maximalphotosyntheseleistung (A_{max} Gesamtpflanze) berechnet.

Aufgrund der vor August einsetzenden Seneszenz der Ahornblätter wurden die Photosynthesemessungen der Vegetationsperioden 2004 und 2005 gegenüber den Messungen des Jahres 2003 auf Juni und Juli vorgezogen. Darüber hinaus wurden die Messungen der Lichtkurven (2003 Photonenflussdichten von 0, 50 und 800 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$) um zwei weitere Messpunkte bei 250 und 1200 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ erweitert. Aufgrund der frühzeitigen Seneszenz kam es 2003 zu Ausfällen bei der Photosynthesemessung. Eine Auswertung der Photosynthesedaten ist daher nur für die Jahre 2004 und 2005 sinnvoll.

2.8 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit Statistica (Version 6, StatSoft Inc., Tulsa, USA). Unterschiede der untersuchten Parameter zwischen den Arten, den Düngevarianten und den Parzellen wurden im Modul „Basic Statistics/Tables“ mit einer

faktoriellen ANOVA mit anschließendem „unequal N-HSD“ Posthoc-Test (für ungleichen Stichprobenumfang) getestet. Die Darstellung der Box-Plots erfolgt ebenfalls mit Statistica unter dem Modul „Categorized Graphs“. Für die Erstellung der 3D-Grafiken für die Einteilung in Kategorien bei Fraß und Seneszenz wurde ebenfalls das Modul „Basic Statistics/Tables“ genutzt. Um den Einfluss der Covariate „Licht“ (= Photonenflussdichte) auf die oberirdische Ahornbiomasse zu bestimmen, wurde im Model „Advanced Linear Models/Nonlinear Models“ unter der Rubrik „General linear Models“ eine „Analysis of Covariance“ durchgeführt. Hier bei wurde die Biomasse als „Dependent Variable“, die Art der Düngung als „Categorical Predictor“ und die relative Photonenflussdichte als „Continuos Predictor“ geführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Nährstoffgehalte der Blätter

Die Gehalte der untersuchten Nährstoffe (Calcium, Magnesium, Kalium und Stickstoff) unterscheiden sich signifikant zwischen den Arten (Tab. 3.1.1). So liegen die Calciumgehalte der Ahornpflanzen mit 7,14 mg g⁻¹ signifikant über den Gehalten der Buchen mit 4,82 mg g⁻¹ (p<0,001). Die Calciumgehalte der Buchen getrennt nach den drei Düngevarianten unterschieden sich nicht signifikant, d.h. die Düngungen hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Calciumgehalte in den Buchenblättern. Der Calciumgehalt in den Blättern der Ca/Mg gedüngten Ahornpflanzen hingegen war signifikant größer als der in den mit Stickstoff gedüngten und ungedüngten Bäumen. Dies zeigt, dass die Ahornpflanzen auf dem nährstoffarmen Standort in Weitra von einer Düngung mit Calcium profitierten und die Düngergabe in höhere Blattcalciumgehalte umsetzten. Die Buchen hingegen waren ausreichend mit Nährstoffen versorgt und setzten das zugeführte Calcium nicht in höhere Blattcalciumgehalte um.

Tabelle 3.1.1 Mittelwerte der Blattnährstoffgehalte [mg g⁻¹] - signifikante Unterschiede zwischen den Arten sind rot und Unterschiede zwischen den Arten in Abhängigkeit von den Düngevarianten mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben markiert.

Art	Dünger	Ca [mg g ⁻¹]	Mg [mg g ⁻¹]	K [mg g ⁻¹]	N [mg g ⁻¹]
<i>Fagus</i>		4,82	1,56	8,68	21,1
<i>Acer</i>		7,14	1,25	11,16	17,3
<i>Fagus</i>	Ca/Mg	4,72 a	2,83 b	7,01 a	21,5 c
<i>Fagus</i>	N	4,74 a	0,873 a	9,54 b	20,8 c
<i>Fagus</i>	Kontrolle	5,00 a	1,05 a	9,42 b	21,0 c
<i>Acer</i>	Ca/Mg	9,45 b	2,43 b	10,4 bc	15,9 a
<i>Acer</i>	N	5,59 a	0,604 a	11,3 c	16,9 ab
<i>Acer</i>	Kontrolle	6,16 a	0,614 a	11,7 c	19,0 bc

Die Magnesiumgehalte in den Buchenblättern lagen signifikant über den Gehalten in den Ahornblättern (Tab. 3.1.1). Die Untersuchung der Werte getrennt nach Düngung macht einen positiven Einfluss der Ca/Mg-Düngung auf die Magnesiumgehalte in den Blättern beider Arten deutlich. Sowohl die Gehalte der mit Ca/Mg gedüngten Buchen als auch der Ahorne lagen um ein Mehrfaches über denen der Kontrollen. Die Gehalte der mit Stickstoff gedüngten und ungedüngten Pflanzen beider Arten waren im Vergleich mit einer

Studie auf einem verarmten Standort in Oberösterreich deutlich geringer. Hier fanden sich folgende Magnesiumgehalte in den Blättern: Ahorn: 2,14 mg g⁻¹, ungedüngte Buche: 2,16 mg g⁻¹ und gedüngte Buche: 2,55 mg g⁻¹ (Hager et al. 1998). Dies und die signifikante Erhöhung der Blattmagnesiumgehalte nach der Düngung zeigte eine Unterversorgung beider Arten mit Magnesium auf der nährstoffarmen Fläche in Weitra.

Im Vergleich der Arten liegen die Kaliumgehalte der Buchen signifikant unter denen der Ahorne. Unterscheidet man zwischen den Behandlungsvarianten zeigte sich, dass die mit Ca/Mg gedüngten Buchen signifikant geringere Kaliumgehalte aufwiesen als die Bäume der beiden anderen Varianten (Tab. 3.1.1). Diese Verschiebung nach der Düngung mit Ca/Mg ist Folge des Kalium-Calcium-Antagonismus im Boden. Auch Burke und Raynal (1998) und von Wrangell (2005) konnten geringere massenbezogene Kaliumgehalte für *Acer saccherum* bzw. *Fagus sylvatica* nach einer Kalkung nachweisen. Die niedrigeren Kaliumgehalte nach der Ca/Mg-Düngung zeigten in der vorliegenden Studie keine negativen Effekte auf die untersuchten Parameter. Bei beiden Arten überwiegen die positiven Effekte durch der Düngergabe wie verspätete Nekrose (vgl. Kap. 3.3) oder größere Wurzelhalsdurchmesser. Bei den Buchen kommt als positiver Effekt der Düngung das größere prozentuale Höhenwachstum hinzu (Kap. 3.4.1).

Die massenbezogenen Stickstoffgehalte der Buchen lagen signifikant über denen der Ahornpflanzen (Tab. 3.1.1). Die Werte sind vergleichbar mit denen von Hager et al. (1998) (Ahorn 17,7 mg g⁻¹, Buche ungedüngt 22,6 mg g⁻¹ und gedüngt 22,6 mg g⁻¹). Um den Erfolg der Stickstoffdüngung, d.h. die Aufnahme des ausgebrachten Stickstoffs (15N markiertes Ammoniumnitrat) zu überprüfen, wurde die Signatur δ 15N/14N in den Blättern analysiert. Es zeigte sich, dass sowohl 2004 als auch 2005 von beiden Arten 15N-markierter Stickstoff aufgenommen bzw. umverteilt und in die Blätter investiert wurde. In beiden Jahren lagen die δ -Werte der gedüngten Pflanzen signifikant höher als die der ungedüngten Bäume (Abb. 3.1.1). Auffällig ist bei beiden Arten die Abnahme des stabilen Isotops 15N von 2004 bis 2005. Diese Abnahme entspricht in der Größenordnung der Zunahme der Blattfläche von 2004 bis 2005 (vgl. Tab. 3.2.1). Beide Arten investieren somit den Vorjahresstickstoff in die aktuelle Blattflächenproduktion, so dass der Anteil an 15N Isotopen gegenüber dem Vorjahr abnimmt. Die prozentuale Zunahme der Blattfläche der Buchen zwischen den Jahren ist größer als die der Ahornpflanzen, d. h. die 2004 aufgenommenen 15N-Isotope werden bei den Buchen im Jahr 2005 stärker durch neu aufgenommene 14N-Isotope verdünnt als bei den Ahornpflanzen. Hierdurch ist die Veränderung der Reihenfolge der δ 15N/14N-Werte zu erklären (Abb. 3.1.1).

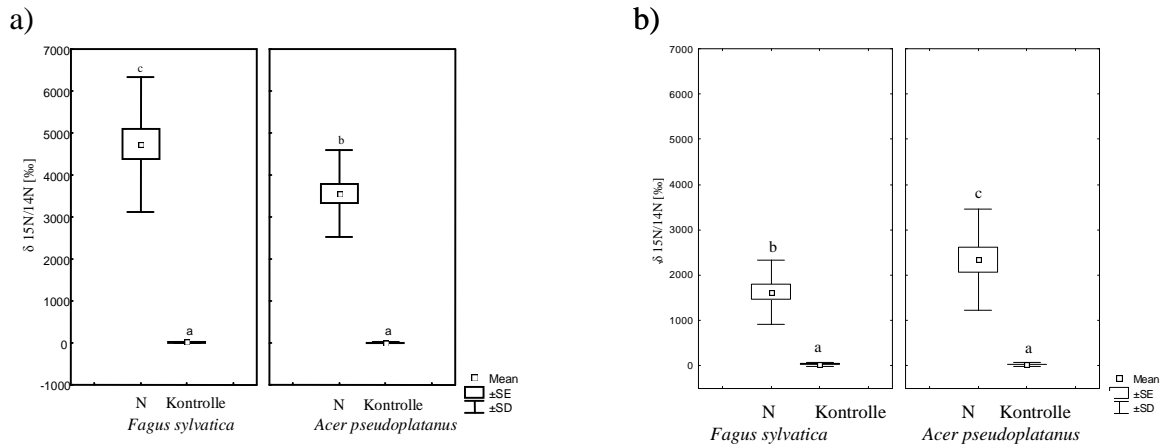


Abbildung 3.1.1 $\delta^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ [‰] im Jahr 2004 (a) und im Jahr 2005 (b)- Mittelwerte, Standardfehler und Standardabweichung, unterteilt nach Arten und Düngevarianten (Stickstoff (N) und ungedüngt (Kontrolle)), signifikante Unterschiede für das jeweilige Jahr (Unequal N HSD-Posthoc Test, $p < 0,01$) über alle Varianten sind mit Kleinbuchstaben dargestellt.

Betrachtet man die Stickstoffgehalte in den Blättern der beiden Arten getrennt nach den Düngevarianten, zeigte sich dass die Düngung beim Ahorn einen signifikanten Einfluss auf die Blattstickstoffgehalte hat. Hier lagen die Stickstoffgehalte der mit Ca/Mg gedüngten Pflanzen signifikant unter denen der Kontrollpflanzen. Durch die Düngung mit Calcium und Magnesium wurde der Magnesiumgehalt in den Blättern signifikant erhöht (Tab. 3.1.1), gleichzeitig war eine tendenziell größere Gesamtblattfläche (Tab. 3.2.1) der mit Ca/Mg gedüngten Ahornpflanzen zu verzeichnen. Wenn sich folglich annähernd die gleiche Menge Stickstoff auf eine größere Blattgesamtblattfläche verteilt, resultiert der signifikant niedrigere Stickstoffgehalt in den Ca/Mg gedüngten Ahornblätter aus der größeren Blattfläche des Ahorns bei gleich bleibendem Stickstoffangebot.

3.2 Photosynthesemessungen

3.2.1 Unterschiede zwischen den Arten

Die gemessene maximale Photosyntheseleistung (A_{max}) der Buchen lag in beiden Untersuchungsjahren signifikant höher als die der Ahornpflanzen, wobei die Gesamtblattfläche der Buchen nur im Untersuchungsjahr 2005 signifikant größer war als die der Ahorne. Die prozentuale Zunahme der Blattfläche (Blattflächenzuwachs) von 2004 bis 2005 zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Arten. Hier sind die Unterschiede der Individuen innerhalb einer Art zu groß. Im Jahr 2005 ist die theoretische Maximalphotosyntheseleistung (A_{max} Gesamtpflanze), berechnet aus A_{max} und der

Gesamtblattfläche, der Buchen gegenüber den Ahornpflanzen signifikant größer (Tab. 3.2.1).

Tabelle 3.2.1 Mittelwerte der theoretische Maximalphotosyntheseleistung der Gesamtpflanze errechnet aus gemessener Maximalphotosyntheseleistung, Gesamtblattfläche der Pflanze und Blattflächenzuwachs von 2004 bis 2005. Signifikante Unterschiede zwischen den Arten sind rot, Unterschiede zwischen den Arten in Abhängigkeit von den Düngevarianten mit Kleinbuchstaben und Unterschiede zwischen den Jahren innerhalb einer Art mit Stern markiert: ***: $p < 0,001$, **: $p < 0,01$, *: $p < 0,05$, n.s. = nicht signifikant

Art	Dünger	Amax		Gesamtblattfläche			Amax Gesamtpflanze			Blattflächenzuwachs
		[$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$]		[m^2]			[$\mu\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1}$]			[%]
		2004	2005	2004	2005	2004	2005	2004	2005	2004-2005
<i>Fagus</i>		6,46	*** 8,27	0,22	*** 0,42	1,49	*** 3,55		83,8	
<i>Acer</i>		5,81	* 4,81	0,21	n.s. 0,29	1,37	n.s. 1,67		57,8	
<i>Fagus</i>	Ca/Mg	6,71	*** 8,91	0,24	*** 0,51	1,68	*** 4,68		110,8	
		a	b	a	b	a	b		a	
<i>Fagus</i>	N	6,24	n.s. 7,77	0,21	n.s. 0,35	1,32	n.s. 2,78		66,0	
		a	b	a	ab	a	ab		a	
<i>Fagus</i>	Kontrolle	6,44	n.s. 8,17	0,22	n.s. 0,40	1,46	n.s. 3,22		75,2	
		a	b	a	ab	a	b		a	
<i>Acer</i>	Ca/Mg	5,59	n.s. 5,62	0,24	n.s. 0,42	1,55	n.s. 2,78		91,4	
		a	a	a	ab	a	ab		a	
<i>Acer</i>	N	5,47	n.s. 4,32	0,21	n.s. 0,19	1,25	n.s. 0,92		43,0	
		a	a	a	a	a	a		a	
<i>Acer</i>	Kontrolle	6,52	n.s. 4,51	0,18	n.s. 0,25	1,27	n.s. 1,34		37,5	
		a	a	a	a	a	a		a	

Die signifikante Steigerung der photosynthetischen Kapazität (Amax) der Buchen im Jahr 2005 im Vergleich zum Vorjahr aber auch gegenüber den Ahornen bedeutet eine Steigerung der Kohlenstofffixierung. Dieser Anstieg der Kohlenstofffixierung und die damit verbundene Investition in Biomasse spiegeln sich in der vergrößerten Gesamtblattfläche der Buchen wieder. Die Gesamtpflanze kann durch die vergrößerte Blattfläche in Kombination mit der gesteigerten Amax deutlich mehr Kohlenstoff pro Zeiteinheit fixieren (Tab 3.2.1).

Die Amax-Werte des Ahorns zeigten im Vergleich der Jahre einen signifikanten Rückgang. Allerdings war eine Zunahme der Blattfläche von $0,21 \text{ m}^2$ im Jahr 2004 auf $0,29 \text{ m}^2$ im Jahr 2005 zu verzeichnen, so dass die Gesamtpflanze trotz verminderter Photosyntheseleistung mehr Kohlenstoff fixierte als im Vorjahr (Tab 3.2.1).

3.2.2 Einfluss der Düngung

Die Behandlungsvarianten zeigten durch die starke Streuung weder bei den Buchen noch bei den Ahornen signifikante Einflüsse auf die Werte von Amax, Gesamtblattfläche, Blattflächenzuwachs und Amax Gesamtpflanze. Trotzdem waren deutliche Tendenzen erkennbar (Tab. 3.2.1). Die Ca/Mg-gedüngten Pflanzen beider Arten wiesen sowohl für Amax als auch für die Gesamtblattfläche, Amax Gesamtpflanze und den Blattflächenzuwachs die höchsten Werte auf. Die mit Stickstoff gedüngten Bäume erreichten die niedrigsten Werte der hier dargestellten Parameter. Eine Stickstoffdüngung wirkt folglich negativ auf diese Parameter. Eine Düngung mit Calcium und Magnesium auf einem nährstoffarmen Standort wie in Weitra erzielte bei beiden Arten positive Effekte in Bezug auf die photosynthetische Leistungsfähigkeit. Die mit Ca/Mg gedüngten Buchen hatten im Jahr 2005 verglichen mit 2004 signifikant höhere Amax-Werte, das heißt die photosynthetische Leistungsfähigkeit wurde verbessert. Von Wrangell (2005) konnte zeigen, dass mit Ca/Mg gedüngte Buchen vom zweiten bis zum vierten Jahr nach der einmaligen Düngung signifikant höhere Amax-Werte als die ungedüngten Buchen erreichten. Es ist zu erwarten, dass sich die gezeigte Erhöhung der Amax-Werte der Ca/Mg gedüngten Buchen von 2004 bis 2005 in den kommenden Jahren auf die Unterschiede zwischen den Düngevarianten auswirkt, so dass die Ca/Mg gedüngten Pflanzen einen deutlichen und signifikanten Wachstumsvorteil gegenüber den mit Stickstoff gedüngten bzw. ungedüngten Pflanzen haben werden.

Eine Vielzahl von Untersuchungen konnte Zusammenhänge zwischen Photosyntheseparametern und verfügbarem Licht bei verschiedenen Laubböhlzern nachweisen (z. B. Ellsworth und Reich 1992, Gill et al. 1998, Kamaluddin und Grace 1993, Lei und Lechowicz 1997). Der positive Effekt der Düngung mit Calcium und Magnesium wird im Jahr 2004 auch an einer optimalen Nutzung des zur Verfügung stehenden Lichts deutlich (Abb. 3.2.1). Die mit Ca/Mg-gedüngten Pflanzen beider Arten zeigten eine positive Korrelation zwischen Amax und PFDrel (Buchen $r^2 = 0,28$, $p < 0,05$; Ahorn $r^2 = 0,25$, $p < 0,05$), d.h. das zur Verfügung stehende Licht kann deutlich besser genutzt werden. Die ungedüngten Buchen weisen ebenfalls eine positive Korrelation ($r^2 = 0,27$, $p < 0,05$) zwischen Amax und PFDrel auf. Für die Buchen reichen die verfügbaren Nährstoffe aus, um den Photosyntheseapparat optimal an die herrschenden Lichtbedingungen anzupassen. Die ungedüngten Ahornpflanzen sind nicht in der Lage dieselben Anpassungen zu erbringen. Bei ihnen zeigte sich deshalb keine Korrelation zwischen Amax und der Photonenflussdichte. Es ist zu vermuten, dass Nährstoffversorgung der ungedüngten Ahornpflanzen auf dem untersuchten Standort in

Weitra nicht ausreicht, um den Photosyntheseapparat optimal an die herrschenden Lichtbedingungen anzupassen. Dass die ungedüngte Buche im Gegensatz zum ungedüngten Ahorn einen Zusammenhang zwischen PFDrel und Amax aufwies, zeigt unter anderem ihre bessere Eignung zum Voranbau auf nährstoffarmen Standorten.

Die mit Stickstoff gedüngten Bäume beider Arten zeigten ebenfalls keine Korrelation zwischen Amax und PFDrel, d.h. gute Lichtverfügbarkeit am Standort wird nicht in eine Steigerung des Amax umgesetzt (Abb. 3.2.1). Die Stickstoffgabe stört das Nährstoffgleichgewicht, so dass eine Anpassung an das Lichtangebot verhindert wird.

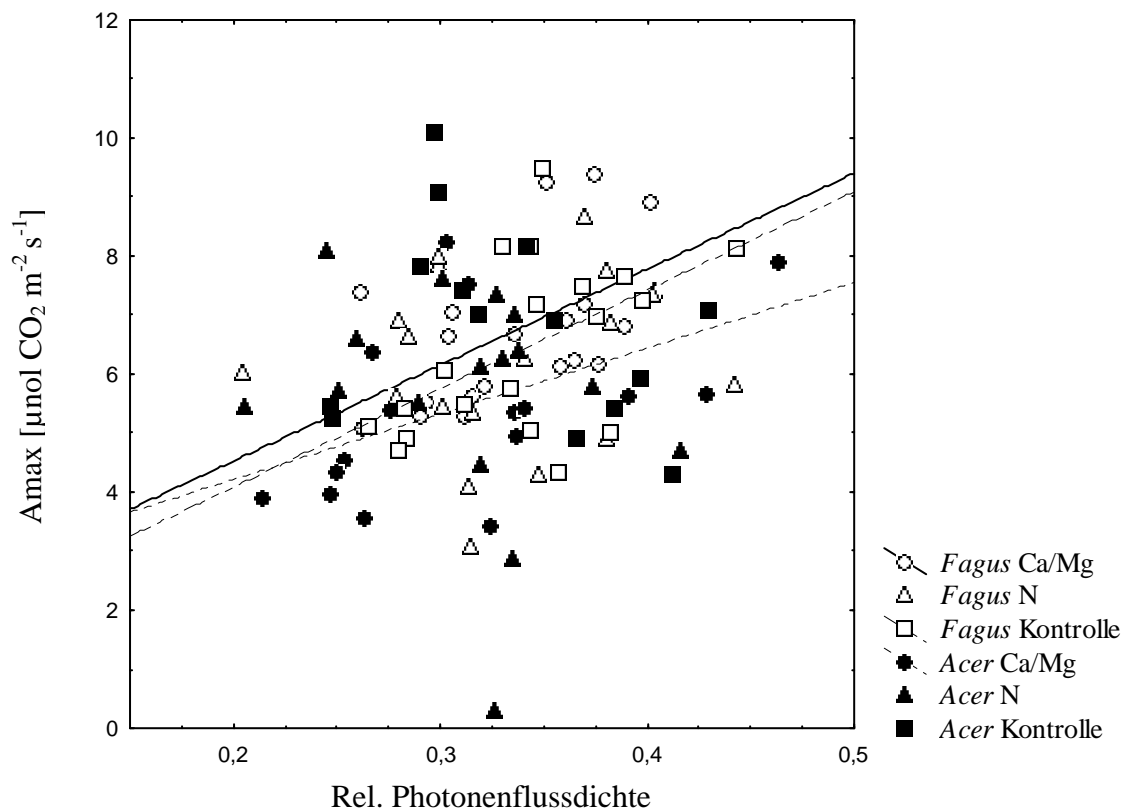


Abbildung 3.2.1 Beziehung zwischen maximaler Photosyntheseleistung [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] und der relativen Photonendichte im Jahr 2004. Signifikante Regressionsgeraden wurden eingezeichnet.
 Buche Ca/Mg: $y = 1,28 + 16,3 \cdot x$; $r^2 = 0,28$, $p < 0,05$; Kontrolle: $y = 0,75 + 16,7 \cdot x$; $r^2 = 0,27$; $p < 0,05$;
 Ahorn Ca/Mg: $y = 1,99 + 11,1 \cdot x$; $r^2 = 0,25$; $p < 0,05$

3.2.3 Zusammenhang zwischen Photosyntheseleistung und Blattparametern

Die Düngergabe auf dem nährstoffarmen Standort Weitra führt bei beiden Arten zu einer Akkumulation von Magnesium in den Blättern verglichen mit den ungedüngten Kontrollen. Eine Erhöhung der Photosyntheseleistung wurde dabei nicht erzielt (Abb. 3.2.2). Die mit Ca/Mg gedüngten Pflanzen beider Arten weisen keine Korrelation zwischen Magnesiumgehalt in den Blättern und Amax auf. Eine positive Korrelation ist hingegen für die mit Stickstoff gedüngten Buchen zu finden (Abb. 3.2.2). Verschiedene

Untersuchungen zeigten Zusammenhänge zwischen photosynthetischer Leistungsfähigkeit und Magnesiumdüngung bzw. Magnesiumgehalten in Blättern auf (Küppers et al. 1985, Niinemets 1995, von Wrangell 2005). Die Buchen, die gut mit Magnesium versorgt sind, können somit die Stickstoffgabe in eine gesteigerte Photosyntheseleistung umsetzen. Beim Ahorn findet sich eine positive Korrelation zwischen Amax und Magnesiumgehalt für die ungedüngten Kontrollpflanzen, diese sind in ihrem Magnesium/Stickstoff-Verhältnis optimal für die Photosynthese ausgestattet. Für den Ahorn gilt somit in Bezug auf die Magnesiumversorgung ähnliches wie bei den Buchen. Eine Magnesiumakkumulation in den Blättern geht nicht zwangsläufig mit einer gesteigerten Photosyntheseleistung einher (Tab. 3.1.1, Abb. 3.2.2).

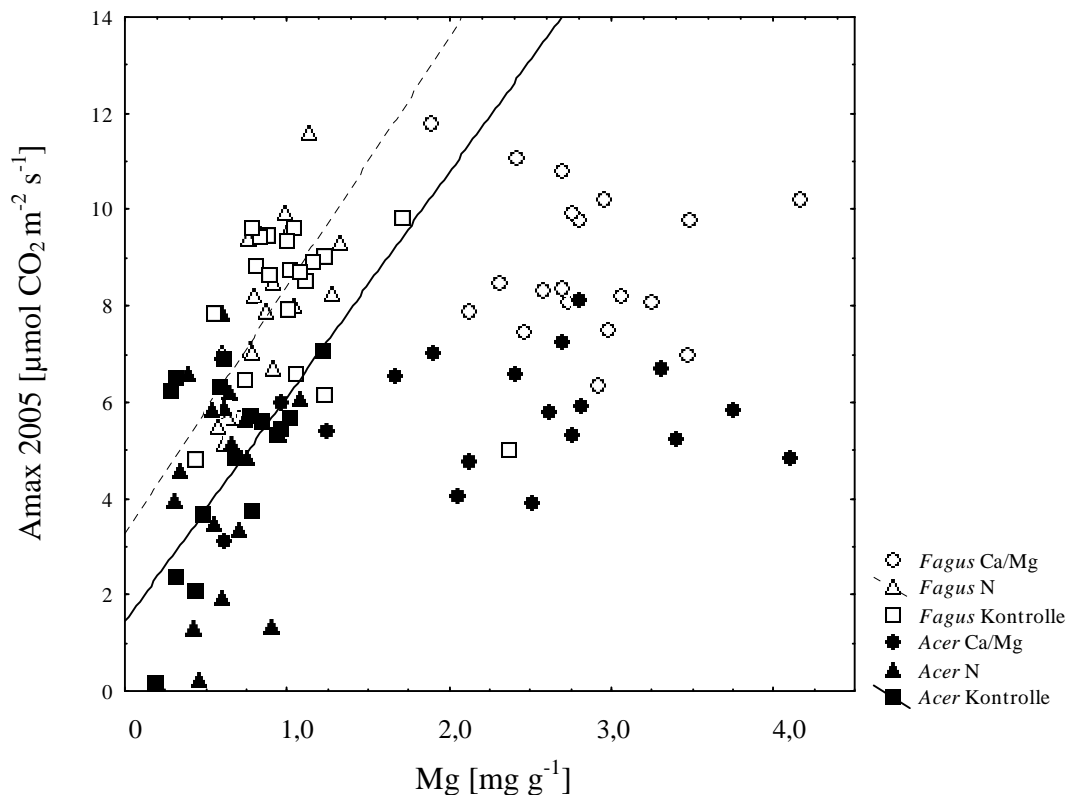


Abbildung 3.2.2 Beziehung zwischen maximaler Photosyntheseleistung (Amax) und Blattmagnesiumgehalten. Signifikante Regressionsgeraden wurden eingezeichnet.
Fagus N: $y = 3,27 + 0,01 \cdot x$, $r^2 = 0,37$, $p < 0,01$; *Acer Kontrolle*: $y = 1,45 + 0,01 \cdot x$, $r^2 = 0,36$, $p < 0,01$

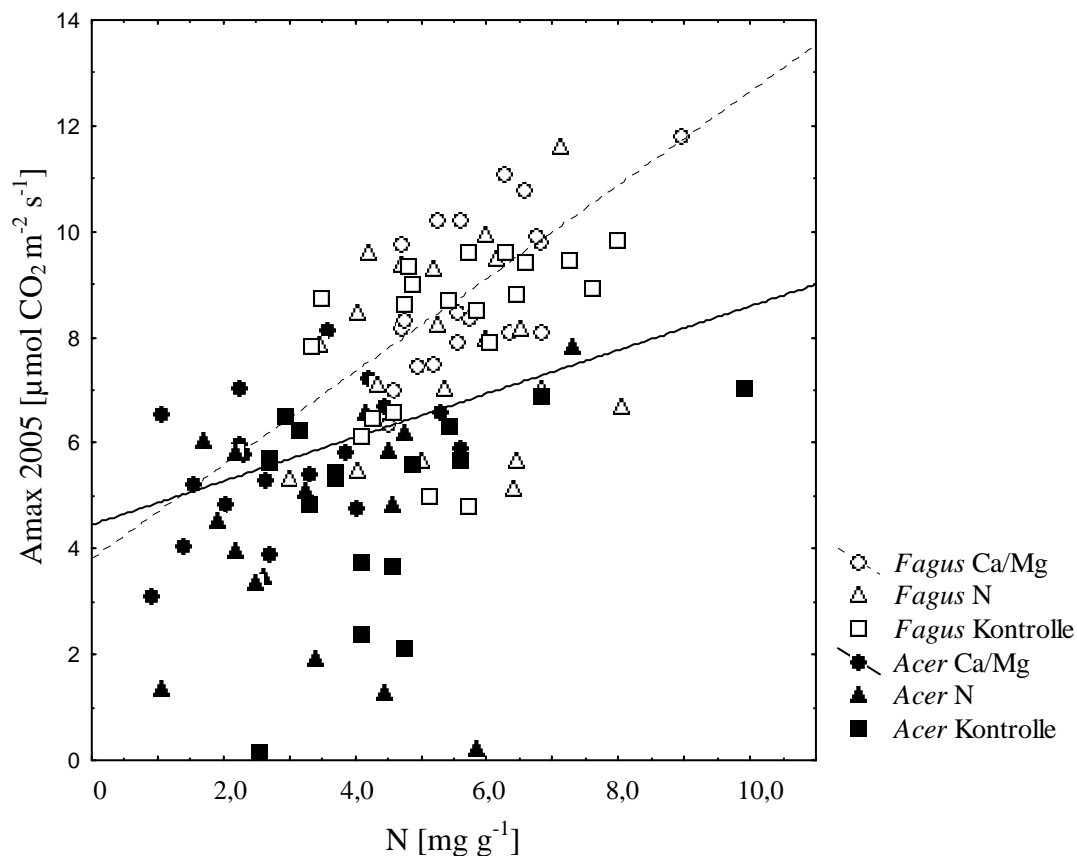


Abbildung 3.2.3 Beziehung zwischen maximaler Photosyntheseleistung (A_{max}) und Blattstickstoffgehalten. Signifikante Regressionsgeraden wurden eingezeichnet. *Fagus* Ca/Mg: $y = -0,61 + 4,42*x$; $r^2 = 0,43$, $p < 0,001$; *Acer* Ca/Mg: $y = 2,39 + 2,07*x$, $r^2 = 0,21$, $p < 0,05$.

Eine Korrelation zwischen dem Stickstoffgehalt eines Blattes und dessen maximaler Photosyntheseleistung konnte in verschiedenen Untersuchungen nachwiesen werden (vgl. Abrams & Mostoller 1995, Chen & Klinka 1997, Evans 1989, Field & Mooney 1986). Da sich ein Großteil des Blattstickstoffs in den Chloroplasten und somit in den photosynthetisch aktiven Bereichen eines Blattes befindet, beeinflusst der Stickstoffgehalt eines Blattes dessen mögliche Photosyntheseaktivität.

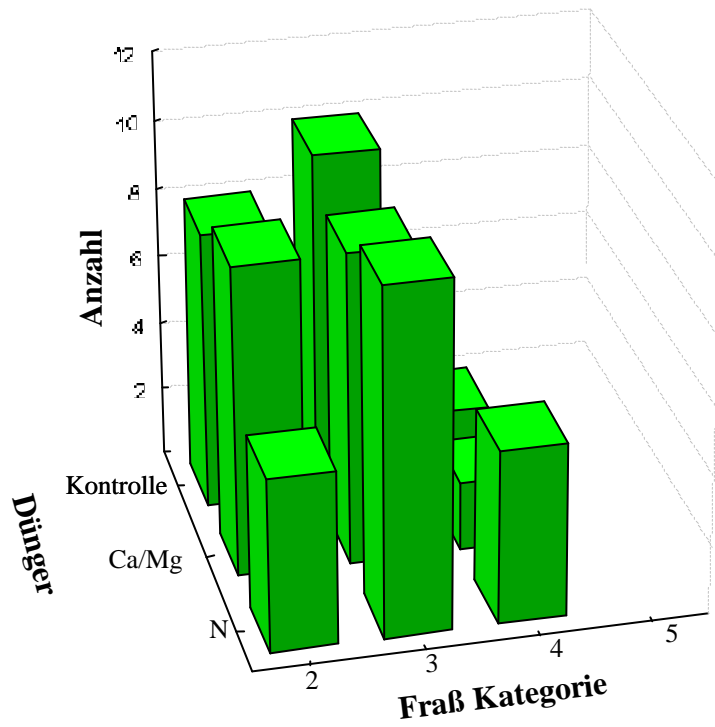
In der vorliegenden Untersuchung konnte dieser Zusammenhang bei beiden Arten nur für die jeweils mit Calcium und Magnesium gedüngten Bäume gefunden werden (Abb. 3.2.3). Eine reine Stickstoffdüngung ohne zusätzliche Gabe von Magnesium kann von den Pflanzen nicht in eine erhöhte Photosyntheseleistung, somit Kohlenstofffixierung und Biomasseproduktion umgesetzt werden. Erst bei ausreichender Magnesiumverfügbarkeit durch die Ca/Mg-Gaben kann die beschriebene Beziehung zwischen Stickstoff und Photosyntheseleistung nachgewiesen werden.

3.3 Bonitierung der Blätter

3.3.1 Kategorisierung der Fraßspuren

Die Gruppierung der Untersuchungsbäume in die jeweilige Kategorien je nach Anzahl der Blätter mit Fraßspuren zeigte, dass die meisten Buchen in den Untersuchungsjahren 2004 (Abb. 3.3.1a) und 2005 (Abb. 3.3.2a) in die Kategorien »zwei« und »drei« fallen. Die meisten Buchen zeigten somit an weniger als einem Drittel (Kategorie 2) bzw. an weniger als zwei Dritteln (Kategorie 3) ihrer Blätter Fraßspuren. Die meisten Ahornpflanzen fielen in beiden Untersuchungsjahren in die Fraß-Kategorien »vier« und »fünf« (Abb. 3.3.1b & Abb. 3.3.2b), somit werden die Buchen auf der Untersuchungsfläche weniger stark befallen und durch Fraß an den Blättern geschädigt als die Ahornpflanzen. Daraus ergibt sich, dass die Buchen weniger Gesamtblattfläche durch Fraß verloren haben als die Ahornpflanzen. In beiden Jahren hat die Art der Düngung bei beiden Arten keinen Einfluss auf die Anzahl der befallenen Blätter und somit auf die Zuordnung zur jeweiligen Kategorie. Der Verlust an Blattfläche durch Fraß an den Blättern wird durch die unterschiedlichen Düngevarianten weder positiv noch negativ beeinflusst.

a)



b)

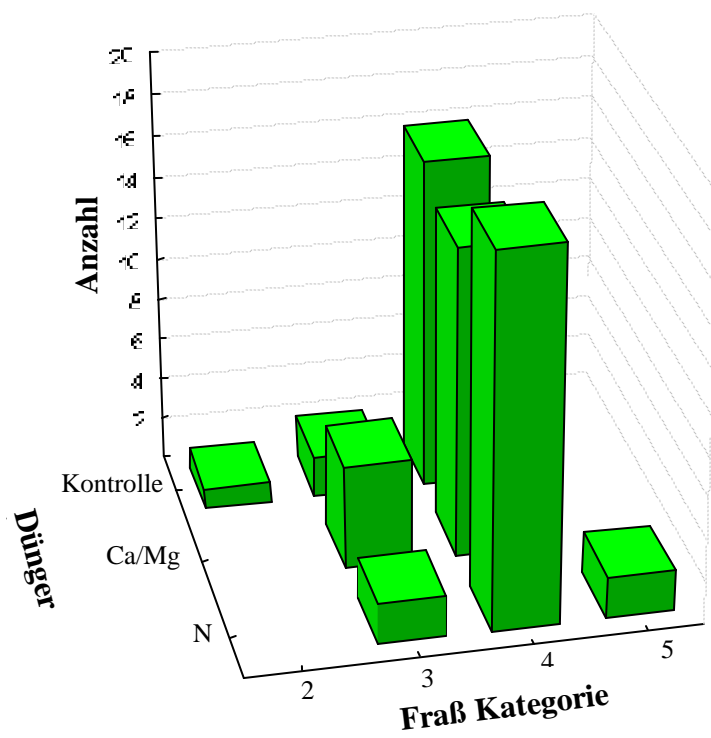
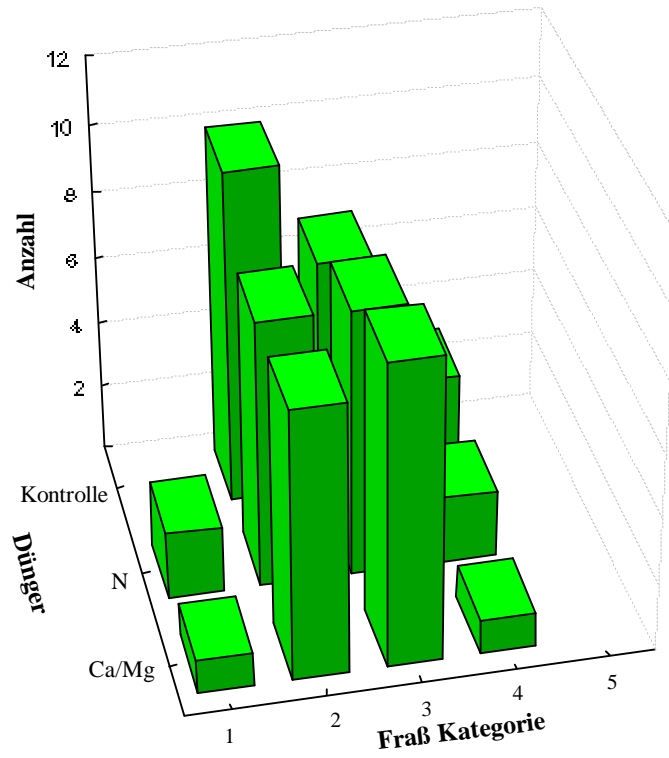


Abbildung 3.3.1 Anzahl von *F. sylvatica* (a) & *A. pseudoplatanus* (b) Bäumen in der jeweiligen Fraß-Kategorie getrennt nach Art der Düngung (Calcium/Magnesium (Ca/Mg), Stickstoff (N) und ungedüngt (Kontrolle)) im Jahr 2004.

a)



b)

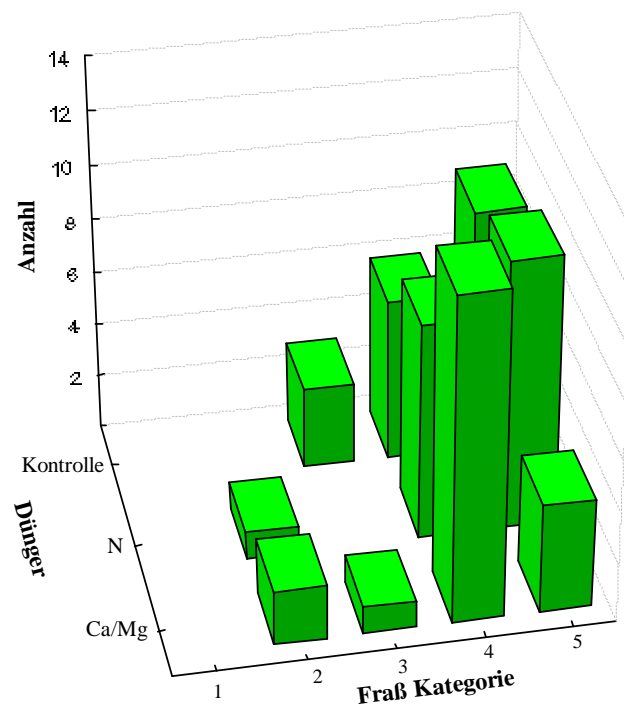


Abbildung 3.3.2 Anzahl von *F. sylvatica* (a) & *A. pseudoplatanus* (b) Bäumen in der jeweiligen Fraß-Kategorie getrennt nach Art der Düngung (Calcium/Magnesium (Ca/Mg), Stickstoff (N) und ungedüngt (Kontrolle)) im Jahr 2005.

3.3.2 Kategorisierung der Nekrosen

Die Buchen zeigten an deutlich weniger Blättern Spuren von Braunfärbung als die Ahorne und wurden somit vermehrt in die intakteren Kategorien eingeordnet. Bei den Buchen ist Mitte Juli 2004 Kategorie »fünf« bzw. sind Anfang Juli 2005 die Kategorien »vier« und »fünf« noch nicht verzeichnet worden (Abb. 3.3.3a & Abb. 3.3.4a). Ein Großteil der Blätter der Buchen kann somit voll Photosynthese betreiben, so dass Kohlenstoff weiterhin assimiliert und für Wachstumsprozesse investiert werden kann.

Beim Ahorn fanden sich Bäume mit Nekrosen aller vier bzw. fünf Nekrosekategorien (Abb. 3.3.3b & 3.3.4b). Auffällig ist, dass die Bäume der Kontrolle im Jahr 2004 in allen Kategorien etwa gleich stark vertreten waren. Die Düngung mit Ca/Mg-Dünger zögerte den Beginn der Nekrose deutlich heraus, so dass zum Zeitpunkt der Datenerhebung Mitte Juli 2004 in der stark nekrotischen Kategorie »vier« kein Baum und in Kategorie »drei« nur ein Baum zu finden war. Das Gros der mit Calcium und Magnesium gedüngten Ahornpflanzen befand sich in der fast voll vitalen Kategorie »zwei«. Der gegenteilige Sachverhalt zeigte sich für die Stickstoffdüngung des Ahorns, die dazu führte, dass 2004 ein Baum in Kategorie »eins« und 17 Bäume in Kategorie »vier« eingeordnet wurden (Abb. 3.3.3b). Eine zusätzliche Stickstoffzufuhr wirkt sich somit negativ auf die zur Photosynthese zur Verfügung stehende Gesamtblattfläche aus, da die Nekrose früher als bei den mit Ca/Mg gedüngten Ahornpflanzen einsetzte.

Im Jahr 2005 zeigten sich im Bezug auf die Zuordnung der Ahornpflanzen in die Nekrosekategorien ähnliche Ergebnisse wie im Jahr 2004. Anfang Juli 2005 war die Verteilung der ungedüngten Ahornkontrollbäume auf die Nekrosekategorien im Vergleich zum Vorjahr etwas in Richtung niedrigerer Kategorien verschoben (Abb. 3.3.4b). Die Ca/Mg gedüngten Ahornpflanzen wurden 2005 alle der Kategorie »eins« zugeordnet und wiesen folglich keine Nekrosen auf. Es wird deutlich, dass der Ahorn auf den nährstoffarmen Versuchsfeldern von der Düngung mit Calcium und Magnesium stark profitierte. Durch die Düngung steht mehr Blattmaterial zur Photosynthese und somit zur Kohlenstoffassimilation zur Verfügung. Die Ahornbäume der mit Stickstoff gedüngten Variante waren zum Aufnahmezeitpunkt auf alle Kategorien verteilt, trotzdem war wie im Jahr 2004 ein Trend hin zu den höheren Kategorien und somit zu mehr nekrotischen Blättern pro Baum erkennbar.

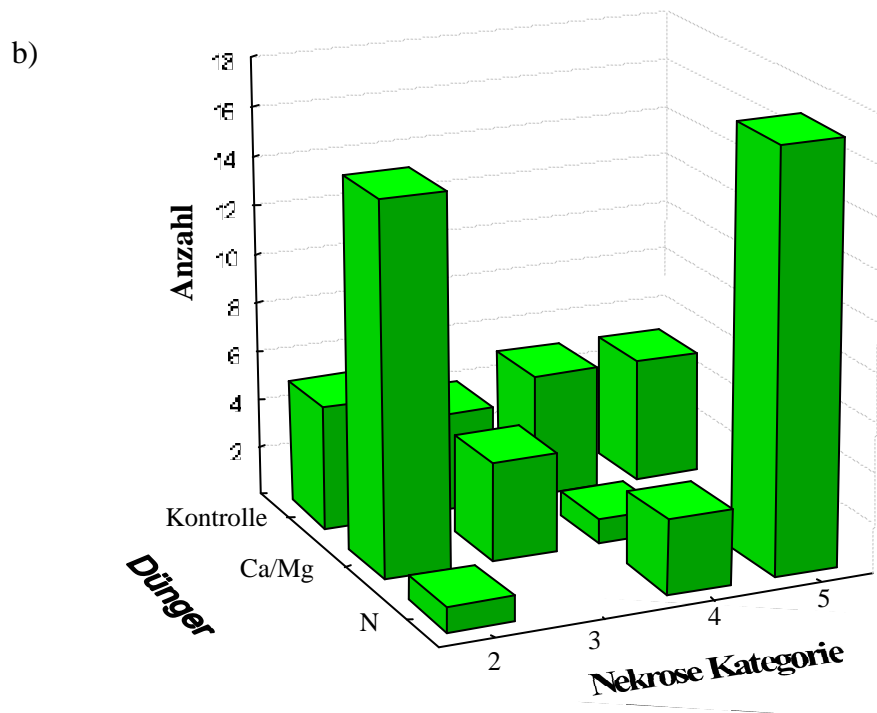
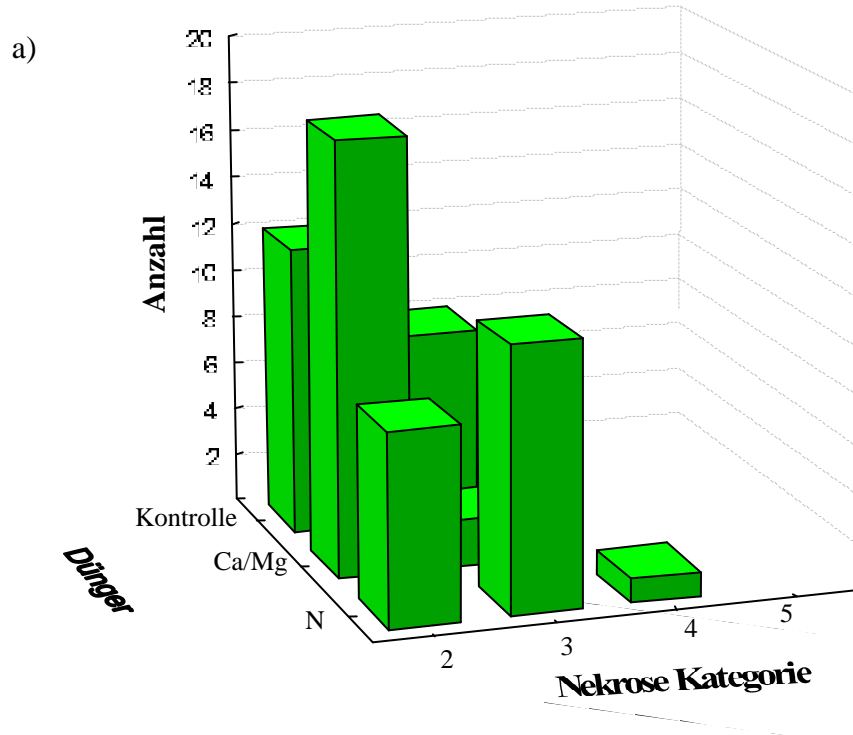
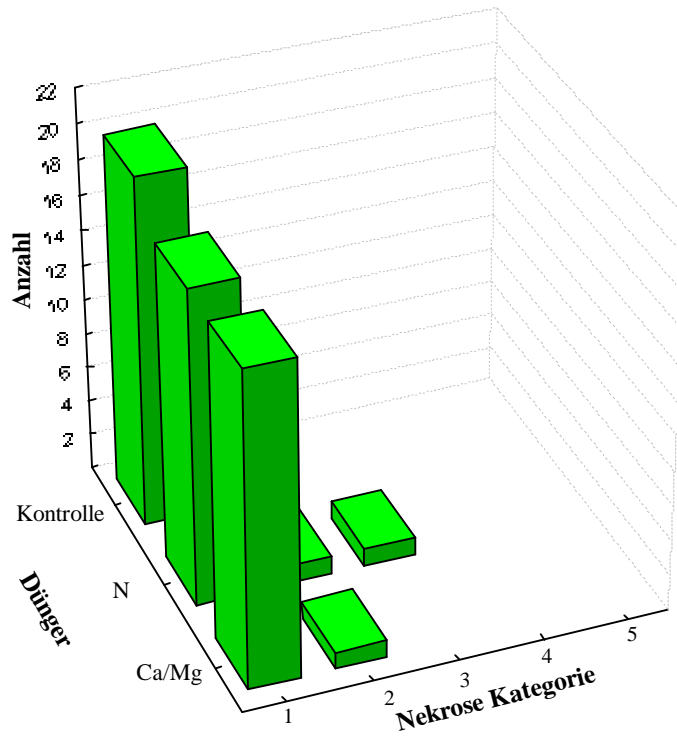


Abbildung 3.3.3 Anzahl von *F. sylvatica* (a) & *A. pseudoplatanus* (b) Bäumen in der jeweiligen Nekrose-Kategorie getrennt nach Art der Düngung (Calcium/Magnesium (Ca/Mg), Stickstoff (N) und ungedüngt (Kontrolle)) im Jahr 2004.

a)



b)

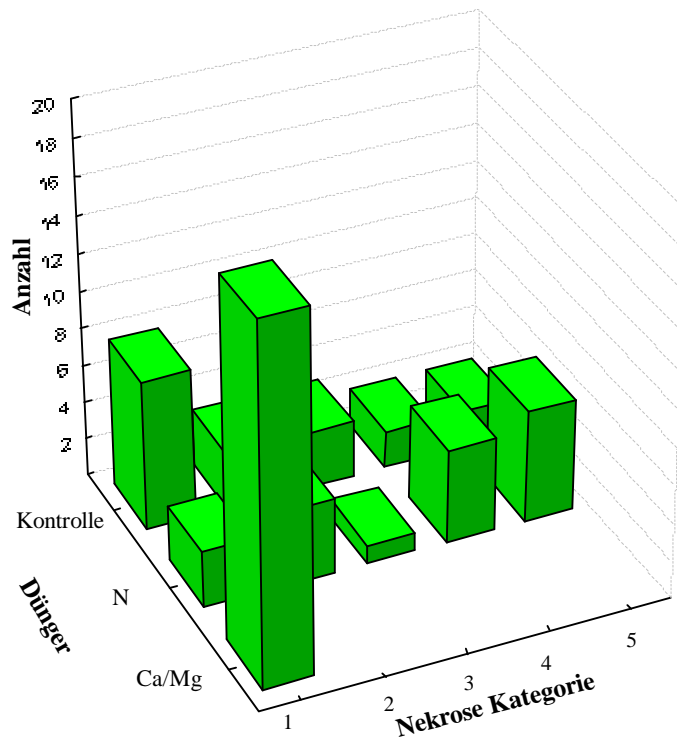


Abbildung 3.3.4 Anzahl von *F. sylvatica* (a) & *A. pseudoplatanus* (b) Bäumen in der jeweiligen Nekrose-Kategorie getrennt nach Art der Düngung (Calcium/Magnesium (Ca/Mg), Stickstoff (N) und ungedüngt (Kontrolle)) im Jahr 2005.

3.4 Biometrische Parameter

3.4.1 Wachstum und Biomasse

Höhenzuwachs

Beide Arten unterschieden sich signifikant in ihrem prozentualen Höhenzuwachs (Tab. 3.4.1). Dies erklärt sich durch die Verdopplung der Gesamthöhe der Buchen innerhalb der drei untersuchten Vegetationsperioden bezogen auf ihre Gesamthöhe im Jahr 2002. Die Ahornpflanzen hingegen stagnierten im Vergleich der Jahre in ihrem Wachstum bzw. wiesen nur geringe Zuwächse auf, so dass die Buchen bereits drei Vegetationsperioden nach der Düngung die gleiche Höhe wie die Ahornpflanzen erreicht haben (Tab. 3.4.2). Die Zunahme der Standardabweichung von Jahr zu Jahr spiegelt den Einfluss der Düngung, d.h. das unterschiedlich starke Wachstum entsprechend der Düngevariante, wieder.

Tabelle 3.4.1 Ergebnisse der faktoriellen ANOVA – Einfluß der Faktoren Art und Dünger auf die prozentuale Höhenzunahme von 2002 bis 2005. Signifikante Effekte sind rot markiert.

Effekt	df	MS	F	p
Intercept	1	339063	247	< 0,001
Art	1	293653	214	< 0,001
Dünger	2	10029	7,29	< 0,001
Art*Dünger	2	1128	0,82	n.s.
Error	110	1375		

Tabelle 3.4.2 Mittelwerte und Standardabweichung der Gesamthöhe [cm] von *Fagus sylvatica* und *Acer pseudoplatanus* in den Jahren 2002 bis 2005. Signifikante Unterschiede sind mit Sternchen gekennzeichnet: *: p < 0,05; **: p < 0,01; ***: p < 0,001.

	Höhe 2002 [cm]	Höhe 2003 [cm]	Höhe 2004 [cm]	Höhe 2005 [cm]
<i>F. sylvatica</i>	48,5 ± 6,4 ***	66,0 ± 12,4 ***	81,4 ± 19,0 ***	98,2 ± 23,4 n.s.
<i>A. pseudoplatanus</i>	96,2 ± 9,7	98,1 ± 14,2	96,8 ± 22,5	99,7 ± 26,7

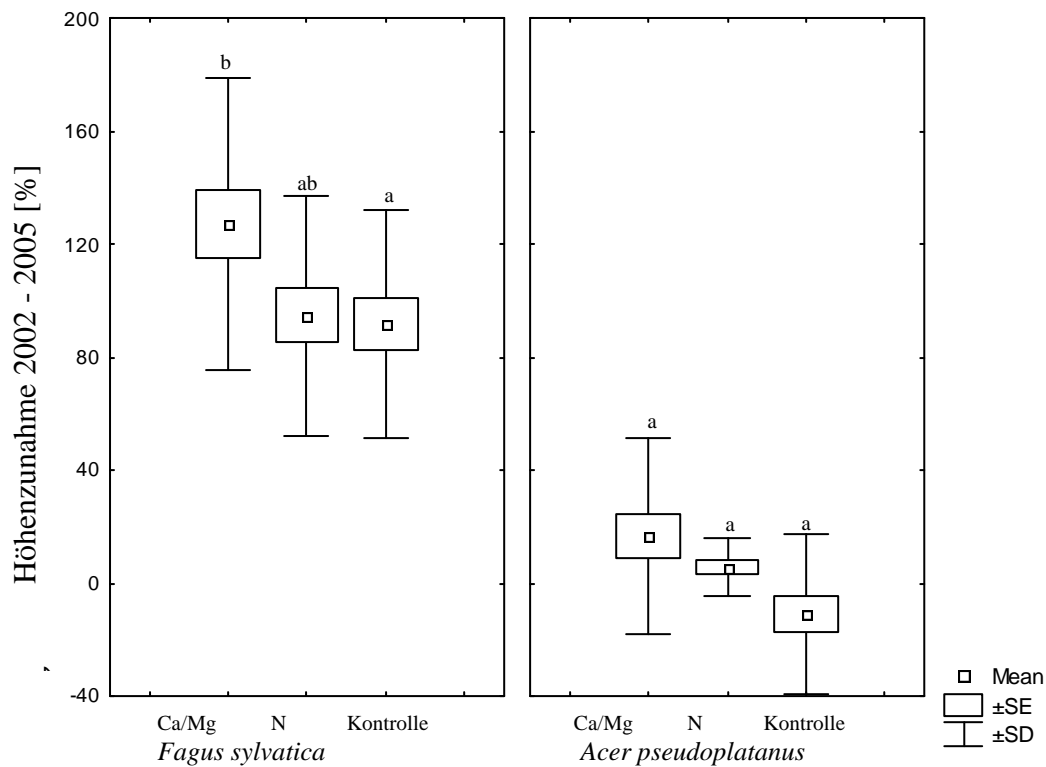


Abbildung 3.4.1 Prozentuale Zu- bzw. Abnahme der Pflanzenhöhe von Versuchsbeginn bis ins Jahr 2005. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Arten (getestet mit „Unequal N HSD“).

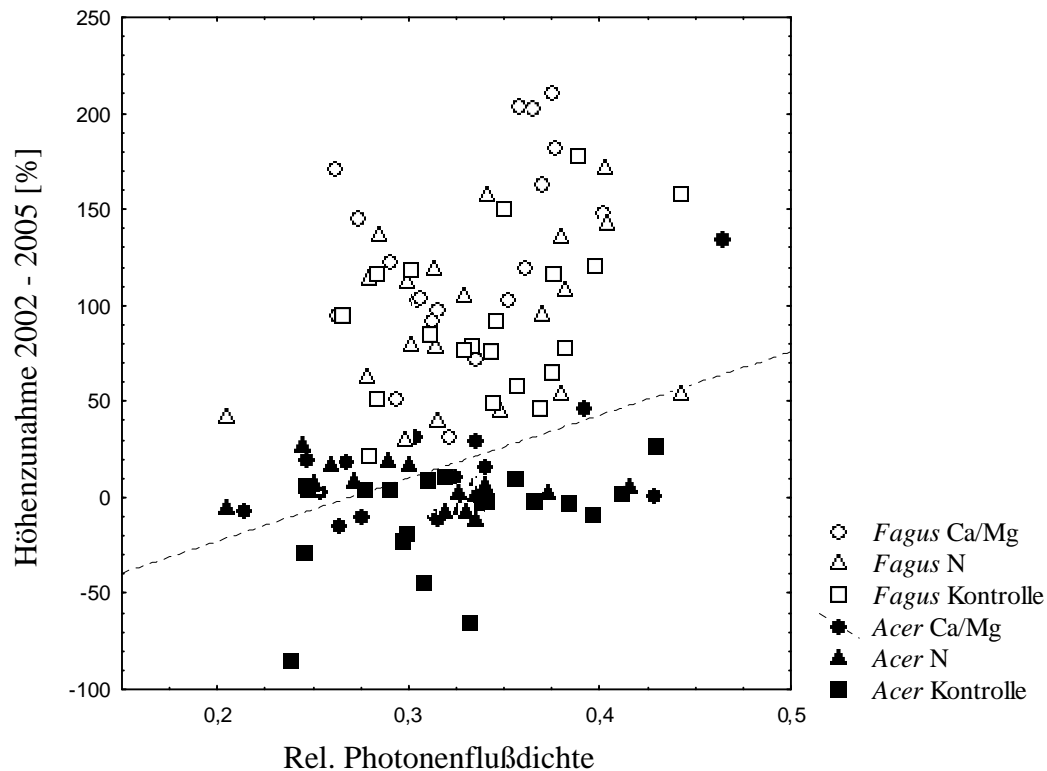


Abbildung 3.4.2 Beziehung zwischen prozentualer Höhenzunahme von 2002 bis 2005 und der relativen Photonenflußdichte. Regressionsgrade für signifikante Korrelation eingezogen: $y = -88,4 + 328,2 \cdot x$; $r^2 = 0,39$; $p < 0,01$

Bei den Buchen wurde die relative Höhenzunahme über die Versuchsjahre hinweg durch die Düngung mit Calcium und Magnesium signifikant beeinflusst, so dass die Ca/Mg-gedüngten Pflanzen eine größere prozentuale Höhenzunahme aufwiesen als die ungedüngten (Abb. 3.4.1). Die durchgeführte faktorielle ANOVA zeigte einen signifikanten Einfluss des Faktors Dünger auf die prozentuale Höhenzunahme, jedoch keine artspezifische Reaktion auf die Düngebehandlungen (Tab.3.4.1). Hager et al. (1998) konnten bei Buchen im Voranbau im zweiten Jahr nach einer Magnosol-Düngung signifikant längere Terminaltriebe finden. V. Wrangell (2005) zeigte an den gleichen Pflanzen im siebten Jahr nach der Düngung eine signifikant größere Gesamthöhe der gedüngten gegenüber den ungedüngten Buchen. Darüber hinaus stellte Binder (1992) fest, dass sich eine Kalkung positiv auf das Sprosswachstum junger Buchen auswirkte.

Für den Ahorn konnten beim prozentualen Höhenzuwachs im Posthoc-Test keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngevarianten nachgewiesen werden. Tendenziell zeigte sich, dass sich eine Düngung mit Ca/Mg positiv auf den Zuwachs auswirkte. Für den ungedüngten Ahorn wurden im Mittel negative Zuwächse, als Folge des Absterbens der Terminaltriebe, verzeichnet. Die Düngung mit Ca/Mg reduzierte das Absterben der Terminaltriebe (s. Abb. 3.4.1). Darüber hinaus konnten die mit Ca/Mg-gedüngten Ahornpflanzen das verfügbare Licht besser nutzen und in einen Höhenzuwachs umsetzen, erkennbar an der signifikanten, positiven Korrelation zwischen Höhenzuwachs und Lichtangebot (Abb. 3.4.2).

Oberirdische Biomasse Ahorn

Die oberirdische Biomassen der Ende der Vegetationsperiode 2005 geernteten Ahornpflanzen unterteilt nach den Düngevarianten unterschieden sich nicht signifikant von einander (Abb. 3.4.3). Auch die durchgeführte ANCOVA zeigt keinen signifikanten Einfluss der Düngung auf den Parameter Biomasse (Tab. 3.4.3). Die mit Ca/Mg-gedüngten Ahornpflanzen streuten stärker, bauten trotzdem tendenziell mehr Biomasse auf als die Ahornpflanzen der beiden anderen Düngevarianten (Abb. 3.4.3).

Tabelle 3.4.3 ANCOVA des Faktors Licht (PFDrel) und Dünger auf die oberirdische Biomasse [g] von *A. pseudoplatanus* im **Jahr 2005** geerntet. Signifikante Effekte sind rot markiert.

Effekt	df	MS	F	p
Intercept	1	1,65	0,016	n.s.
PFDrel_05	1	505	4,84	<0,05
Dünger	2	288	2,75	n.s.
Error	17	104		

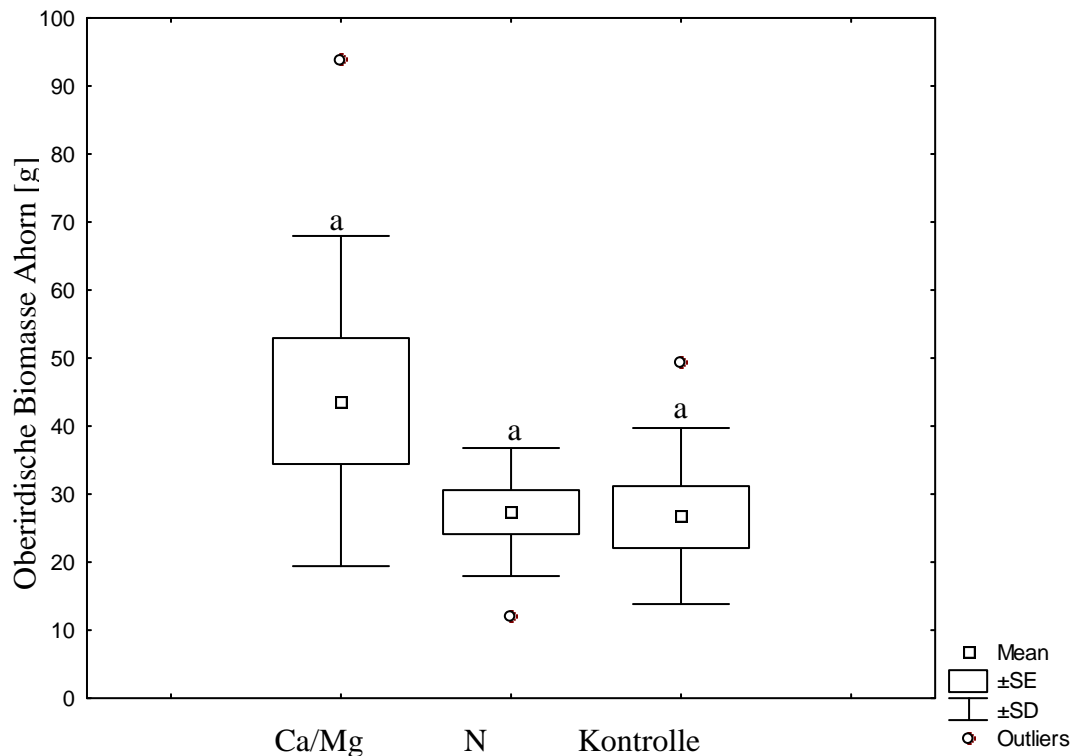


Abbildung 3.4.3 Oberirdische Biomasse [g] von *A. pseudoplatanus* getrennt nach Art der Düngung (Calcium/Magnesium (Ca/Mg), Stickstoff (N) und ungedüngt (Kontrolle)) im **Jahr 2005** geerntet. Signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten sind mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben markiert.

Da die ANCOVA einen signifikanten Einfluss des Faktors PFDrel ergab, wurde die oberirdische Biomasse in Abbildung 3.4.4 in Abhängigkeit der relativen Photonendichte dargestellt. Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen der PFDrel und der oberirdischen Biomasse der ungedüngten Pflanzen ($r^2 = 0,59$). Für die Ca/Mg-Düngung und die Stickstoffdüngung wurde kein signifikanter Zusammenhang festgestellt. Dies zeigt, dass die ungedüngten Ahornpflanzen bei Vermeidung zusätzlicher negativer Effekte durch Stickstoffzufuhr das zur Verfügung stehende Licht optimaler als die Stickstoff gedüngten Bäume nutzen und in Biomassezugewinn umsetzen können. Allerdings ist zu beachten, dass der Biomassezugewinn der ungedüngten (Oberirdische Biomasse 26,7 g) und der mit Stickstoff gedüngten Variante (Oberirdische Biomasse 27,3 g) deutlich niedriger ist als der der mit Ca/Mg-gedüngten Pflanzen (Oberirdische Biomasse 43,7 g). Dies zeigt, dass sich die Ca/Mg-Düngung positiv auf die oberirdische Gesamtbiomasse auswirkt. Die Düngung führt beim Ahorn zu einer erhöhten Biomasse (im Vergleich mit der Kontrolle) unabhängig vom Lichtangebot.

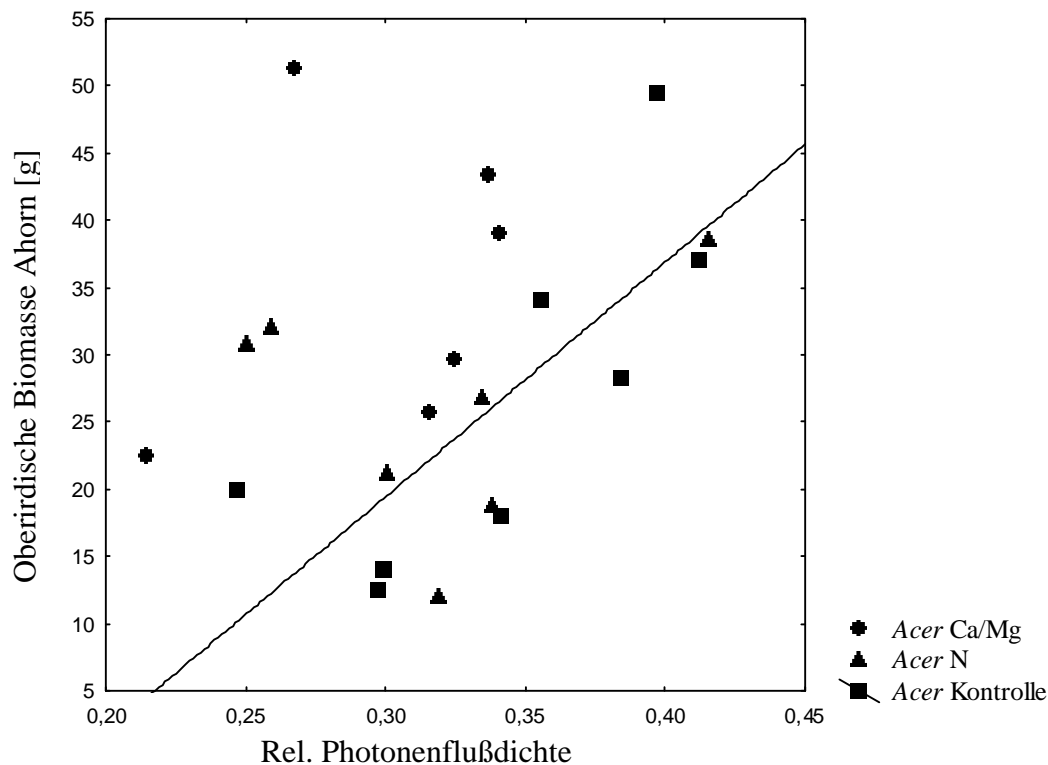


Abbildung 3.4.4 Beziehung zwischen Oberirdische Biomasse [g] von *A. pseudoplatanus* und der relativen Photonenflußdichte getrennt nach Art der Düngung (Calcium/Magnesium (Ca/Mg), Stickstoff (N) und ungedüngt (Kontrolle)) im **Jahr 2005** geerntet. Signifikante Regressionsgerade wurde eingezeichnet Kontrolle: $y = -33,0 + 174,8 * x$; $r^2 = 0,59$; $p < 0,05$)

Wurzelhalsdurchmesser

Im Bezug auf die Wurzelhalsdurchmesserzunahme unterschieden sich die untersuchten Arten signifikant (Tab. 3.4.4). Wie schon die Zunahme des Biomasseparameters Gesamthöhe ist die Zunahme des Wurzelhalsdurchmessers der Buchen größer als die der Ahornpflanzen. Bereits im zweiten Untersuchungsjahr haben die Buchen die Durchmesser der Ahorne erreicht (Tab. 3.4.5). Die prozentuale Zunahme des Wurzelhalsdurchmessers über den gesamten Untersuchungszeitraum zeigte, dass sich die einmalige Düngung mit Calcium und Magnesium positiv, die Stickstoffgabe jedoch negativ auf das Dickenwachstum beider Arten auswirkt. Sowohl bei der Buche als auch beim Ahorn lag der relative Zuwachs nach der Ca/Mg-Düngung signifikant über dem Zuwachs nach der Stickstoffdüngung (Abb. 3.4.5a). Einen ähnlichen Zusammenhang konnte für Ca/Mg-gedüngte und ungedüngte Buchen entlang eines Lichtgradienten aufgezeigt werden (v. Wrangell 2005). Sieben Jahre nach der Düngung hatten die gedüngten Buchen einen signifikant größeren Wurzelhalsdurchmesser als die ungedüngten Kontrollpflanzen.

Tabelle 3.4.4 Ergebnisse der faktoriellen ANOVA – Einfluß der Faktoren Art und Dünger auf die prozentuale Wurzelhalsdurchmesserzunahme von 2002 bis 2005. Signifikante Effekte sind rot markiert.

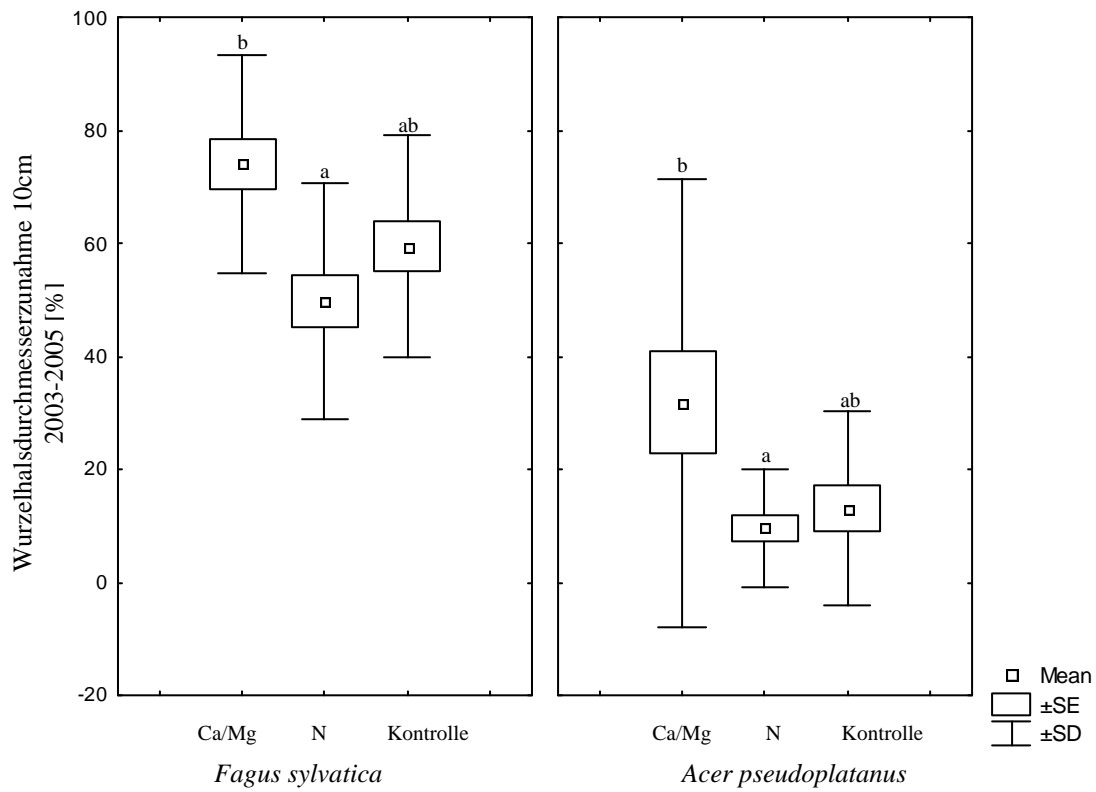
Effekt	df	MS	F	p
Intercept	1	182020	346	< 0,001
Art	1	53542	102	< 0,001
Dünger	2	5491	10,5	< 0,001
Art*Dünger	2	94,6	0,18	n.s.
Error	110	525		

Tabelle 3.4.5 Mittelwerte und Standardabweichung der Wurzelhalsdurchmesser auf einer Höhe von 10 cm von *Fagus sylvatica* und *Acer pseudoplatanus* in den Jahren 2002 bis 2005. Signifikante Unterschiede sind mit Sternchen gekennzeichnet: *: p < 0,05; **: p < 0,01; ***: p < 0,001.

	Wurzelhalsdurchmesser bei 10 cm - 2003 [cm]	Wurzelhalsdurchmesser bei 10 cm - 2004 [cm]	Wurzelhalsdurchmesser bei 10 cm - 2005 [cm]
<i>F. sylvatica</i>	0,83 ± 0,15 ***	1,1 ± 0,18 n.s.	1,3 ± 0,24 ***
<i>A. pseudoplatanus</i>	0,96 ± 0,17	1,0 ± 0,23	1,1 ± 0,30

Die Buchen zeigen in ihrem h/d-Verhältnissen keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Düngebehandlungen (Abb. 3.4.5b), d. h. das Verhältnis zwischen Höhe und Wurzelhalsdurchmesser bei 10cm bleibt trotz unterschiedlicher Düngung erhalten. Eine Wurzelhalsdurchmesserzunahme geht somit bei den Buchen mit einer Höhenzunahme einher. Die Ahornpflanzen zeigen signifikante Veränderungen des h/d-Verhältnisses nach den unterschiedlichen Düngergaben. Die mit Stickstoff gedüngten Ahornpflanzen zeigen im Vergleich mit den ungedüngten Kontrollpflanzen bei gleicher Höhe dünnere Wurzelhäse. Das Höhenwachstum der Stickstoff gedüngten Ahornpflanzen geht somit mit einem verminderten Dickzuwachs einher.

a)



b)

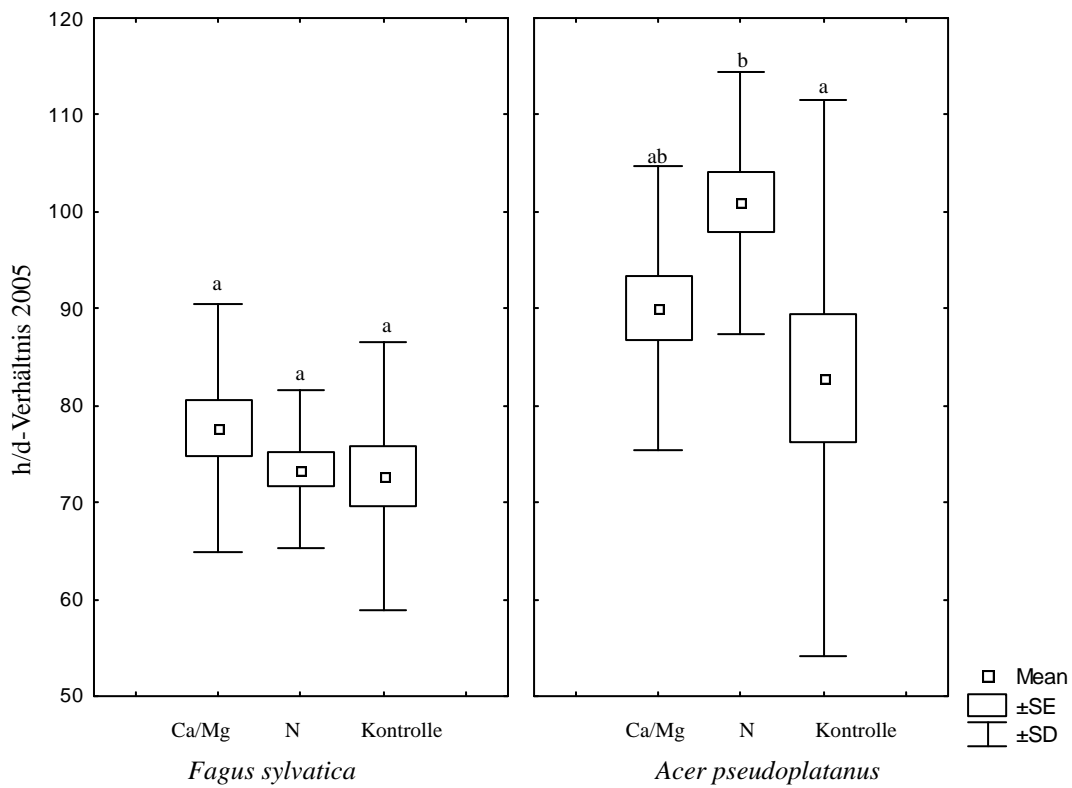


Abbildung 3.4.5 Prozentuale Zunahme des Wurzelhalsdurchmessers in 10 cm Höhe von Versuchsbeginn bis ins Jahr 2005 (a) und Höhe/Wurzelhalsdurchmesserverhältnis im Jahr 2005 (h/d-Verhältnis) (b). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Arten.

3.4.2 Blattfläche, Blattzahl und LMA

Weder die in Abbildung 3.4.6 dargestellte prozentuale Zunahme der Blattzahl in der Vegetationsperiode 2005 noch die Zunahme der daraus resultierenden Blattfläche (nicht dargestellt) zeigt eine Abhängigkeit von der Düngergabe. Auffällig ist jedoch, dass beim Ahorn im Jahr 2005 sowohl an den Kontrollpflanzen als auch an den mit Stickstoff gedüngten Pflanzen im Mittel weniger Blätter ausgebildet wurden als im Vorjahr. Dies ist ein Hinweis auf eine schlechtere Nährstoffausstattung im Vergleich mit den Ca/Mg-gedüngten Ahornpflanzen. Es verdeutlicht zusammen mit dem geringen Zuwachs nach der Stickstoffdüngung bzw. dem Zurücksterben der Kontrollpflanzen (Abb. 3.4.1), dass der Ahorn auf dem untersuchten, extrem nährstoffarmen Standort dringend einer Düngung mit Calcium und Magnesium bedarf. Andernfalls zehrt der Ahorn von seinen Reserven, so dass die eingebrachten Pflanzen absterben oder bestenfalls ein stockendes Wachstum aufweisen.

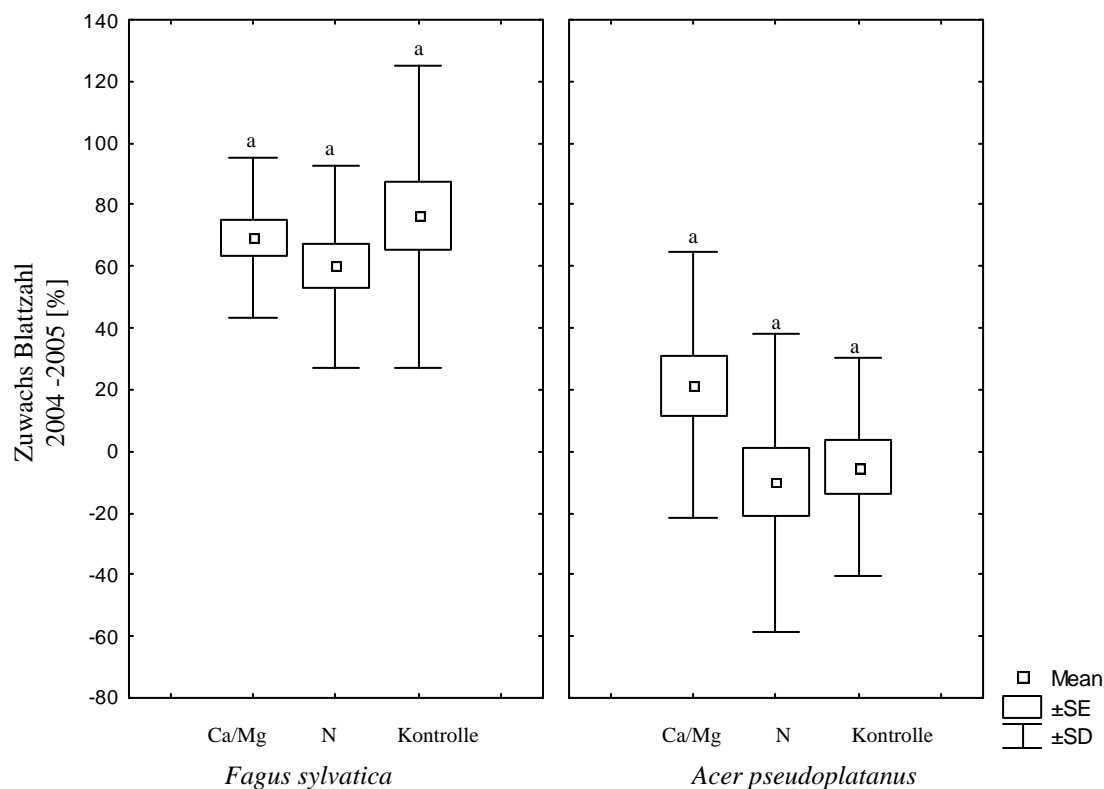


Abbildung 3.4.6 Prozentualer Zuwachs der Blattzahl im Jahr 2005. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Arten.

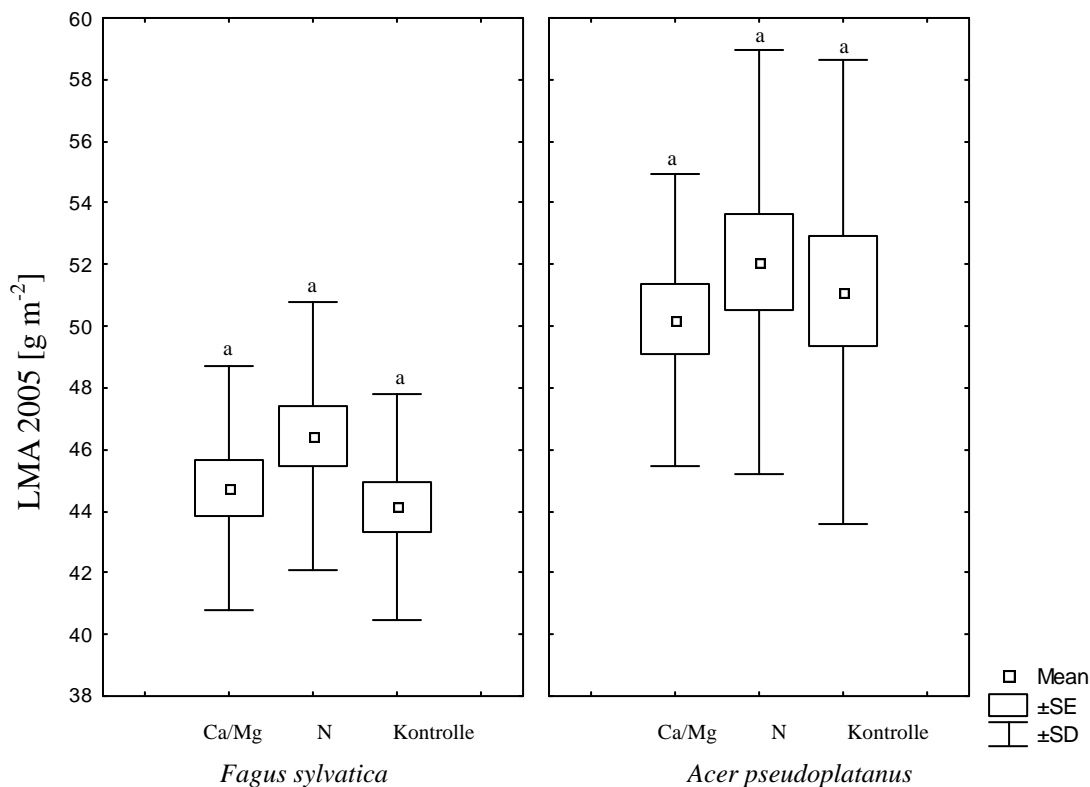


Abbildung 3.4.7 LMA-Werte im Jahr 2005. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Arten.

Die Blattmasse pro Flächeneinheit (LMA) ist ein Maß für die Dicke und Festigkeit eines Blattes (Witkowski & Lamont 1991) und spiegelt somit den investierten Kohlenstoff wieder. Die Ahornblätter wiesen unabhängig von der Art der Düngebehandlung signifikant höhere spezifische Blattmassen ($LMA = 51,2 \pm 6,4 \text{ g m}^{-2}$) auf als die Buchenblätter ($LMA = 45,1 \pm 4,0 \text{ g m}^{-2}$). Der Unterschied der LMA-Werte zwischen den Arten ist hoch signifikant ($F = 35,7, p < 0,001$). In Anlehnung an die Arbeiten von Abrams und Mostoller (1995), Cramer et al. (2000) oder Walter und Reich (1999) kann die Buche zumindest unter diesen extremen Standortsbedingungen als die schattentolerantere der beiden untersuchten Arten bezeichnet werden.

Die Art der Düngung hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ausprägung der spezifischen Blattmasse (LMA) der beiden Arten (Abb. 3.4.7). Die LMA-Werte der besser mit Calcium und Magnesium versorgten Buchen waren eng mit der relativen Photonenflussdichte korreliert ($r^2 = 0,38, p = 0,01$) (Abb. 3.4.8). Diese Beziehung zwischen LMA und relativer Photonenflussdichte konnte für die Buchen (Ca/Mg-gedüngt) auch schon in den Jahren 2003 ($r^2 = 0,25, p < 0,05$) und 2004 ($r^2 = 0,31, p < 0,01$) gezeigt werden. Die Ca/Mg-gedüngten Buchen sind in Bezug auf die LMA-Werte somit besser an die herrschenden Lichtbedingungen angepasst. Ist die Nährstoffversorgung für die

betreffende Pflanzenart auf einem Standort wie im Falle des Ahorns nicht ausreichend, so kann sich die Pflanze nicht optimal an das zur Verfügung stehende Lichtangebot anpassen.

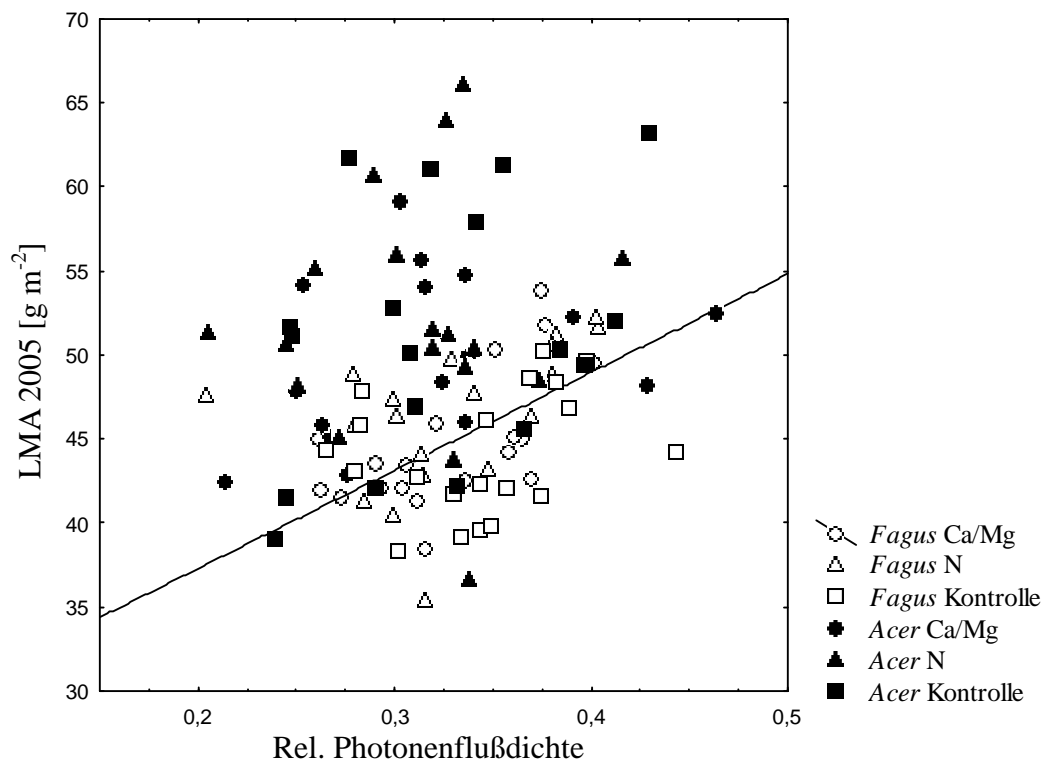


Abbildung 3.4.8 Beziehung zwischen LMA 2005 und der relativen Photonenflussdichte. Regressionsgrade für signifikante Korrelation eingezogen: Buche Ca/Mg: $r^2 = 0,38$; $r = 0,62$, $p = 0,0048$; $y = 25,6 + 58,4 \cdot x$.

4 Schlußfolgerung

Auf Böden mit niedriger Basensättigung wie in Weitra ist eine Ca/Mg-Düngung sinnvoll, da sie die einsetzende Nekrose der Ahornblätter hinausgezögert und somit die Vegetationsperiode des Ahorns verlängert wird. Die Buche kann darüber hinaus nach der Ca/Mg-Gabe den ausreichend vorhandenen Stickstoff besser nutzen. Von einer Stickstoffdüngung des Ahorns ist auf den Flächen in Weitra abzuraten, da sie zu einer frühzeitigen Nekrose des Ahorns führte und somit die photosynthetisch nutzbare Vegetationsperiode deutlich verkürzt.

Nach der Ca/Mg-Düngung zeigen beide Arten eine enge Korrelation zwischen Photosyntheseleistung und verfügbarem Licht. Eine einmalige Ca/Mg-Gabe verbessert die Anpassungsmöglichkeiten beider Arten an die herrschenden Lichtbedingungen. Der potentielle Kohlenstoffgewinn beider Arten wird somit am jeweiligen Standort optimiert.

Die Ca/Mg-Düngung steigert die prozentuale Wurzelhalsdurchmesserzunahme bei beiden Arten gegenüber der Stickstoffdüngung, diese setzt den Wurzelhalsdurchmesserzuwachs herab. Die Ca/Mg-Düngung führt bei den Buchen zu

einer größeren Höhenzunahme verglichen mit den Kontrollpflanzen. Der optimierte Kohlenstoffgewinn nach der Ca/Mg-Gabe resultiert somit in einem größeren Biomassezuwachs.

5 Hinweise für die Praxis

Viele Standorte in sekundären Fichtenbeständen zeichnen sich durch Nährstoffarmut und niedrige pH-Werte aus. Die Stickstoffeinträge haben diese Situation durch weitere Bodenversauerung und Nährstoffungleichgewichte zusätzlich verstärkt. Viele Forstbetriebe sowie die forstliche Beratung haben einen Bedarf an wissenschaftlich fundierter Information zur Einbringung von Laubholz in Nadelholzbestände sowie zum Umbau sekundärer, potentiell instabiler Fichtenwälder durch Laubholzvoranbau.

Das vorliegende Projekt zeigte eindeutig, dass das Wachstum der vorangebauten Buchen und Bergahorne deutlich anders verlief und die Reaktion auf die Düngergaben unterschiedlich war. Während die Buchenpflanzen ihre Gesamthöhe über den Zeitraum von 2002 - 2005 verdoppeln konnten, stagnierten die Ahornpflanzen. Die Gabe eines Ca/Mg-haltigen Düngers führte bei der Buche zu einer Zunahme des Höhenwachstums und verbesserte die Vitalität des Ahorns. Die Ca/Mg-gedüngten Pflanzen konnten das zur Verfügung stehende Licht besser nutzen. Die Stickstoffgaben hatten bei beiden Baumarten einer Verringerung des Durchmesserzuwachses zur Folge und verstärkten die Nekrosen der Ahornpflanzen.

Diese Befunde haben folgende Bedeutung für die Einbringung von Buche und Ahorn in nährstoffarme Nadelwälder:

- Vor der Einbringung sind Bodenanalysen durchzuführen, um die Calcium- und Magnesiumversorgung zu überprüfen. Dies ist an Standorten mit erhöhter Stickstoffdeposition besonders wichtig.
- Je nach Ergebnis der Bodenuntersuchung ist eine Zugabe eines Ca/Mg-haltigen Düngers empfehlenswert.
- Die Buche ist auf nährstoffarmen Standorten gegenüber dem Bergahorn eindeutig zu bevorzugen.
- Der Ahorn kann auf solchen Standorten nur bei entsprechend umfassender Verbesserung der Basenausstattung eingebracht werden.

- Verbesserte Nährstoffausstattung erhöht die Schattentoleranz und das Wachstum der eingebrachten Laubhölzer
- Eine Stickstoffdüngung - auch als handelsübliche Volldüngung - ist nicht zweckmäßig und kann bei einseitig erhöhtem Stickstoffangebot zu unerwünschten Effekten (Nekrosen, schlechtes h/d-Verhältnis, u.a.) führen.

Die Untersuchungen des vorliegenden Projektes haben die Befunde der vorangegangenen Untersuchungen in der Castell-Castell'schen Forstverwaltung Hochburg/Aach (Projekt GZ 56810/17-VA2b/95) bekräftigt. Die Auswirkungen einer Ca/Mg-Düngung auf die vorangebauten Buchen waren dort über mehr als sechs Jahre nachvollziehbar und führten im Durchschnitt zu größerem Höhen- und Durchmesserzuwachs. Auf Standorten, die über eine geringe Basenausstattung verfügen und wo eine Stickstoffsättigung anzunehmen ist, kann für den Waldumbau mit Laubholzeinbringung eine Ca/Mg-Düngung eindeutig empfohlen werden. Von einer Zugabe des Stickstoffs ist jedoch dringend abzuraten.

6 Literatur

- Abrams, M. und Mostoller, S. 1995. Gas exchange, leaf structure and nitrogen in contrasting successional tree species growing in open and understory sites during drought. *Tree Physiol.* (15), 361-370
- Ammer, C. 2003. Growth and biomass partitioning of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. seedlings in response to shading and small changes in R/FR-ratios of radiation. *Ann. For. Sci.* (60), 163-171
- Binder, F. 1992. Aufforstung in Waldschadensgebieten. *Forstl. Forschungsber. München* Nr. 119
- Brooks, J. R., Hinckley, T. M. und Sprugel, D. G. Acclimation responses of mature *Abies amabilis* sun foliage to shading. *Oecologia* (100) 316-324
- Burke, M. K. und Raynal, D. J. 1998. Liming influences growth and nutrient balances in sugar maple (*Acer saccharum*) seedlings on an acidic forest soil. *Environ. Exp. Bot.* (39) 105-116
- Büttner, G. und Wagner, S. 1996. Auswirkung einer Volldüngergabe nach Pflanzlochkalkung im Rahmen von Buchen-Voranbauten unter Fichte. *AFZ* 14/1996: 798-801
- Chen, H. Y. H. und Klinka, K. 1997. Light availability and photosynthesis of *Pseudotsuga menziesii* seedlings grown in the open and forest understory. *Tree Physiol.* (17) 23-29
- Cornelissen, J. H. C., Werger, M. J. A., Castro-Diez, P., Van Rheeën, J. W. A. und Rowland, A. P. 1997. Foliar nutrients in relation to growth, allocation and leaf traits in seedlings of a wide range of woody plant species and types *Oecologia* (111) 460-469
- Cramer, J., Fahey, T. und Battles, J. 2000. Patterns of leaf mass, area and nitrogen in young northern hardwood forests. *Am. Midl. Nat.* (144) 253-264

- Deffner, G. 2000. Forstwirtschaft in stürmischen Zeiten. Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Bayerische Staatsforstverwaltung. *LWF aktuell* 26
- Dimassi-Theriu, K. und Bosabalidis, A. M. 1997. Effects of light, magnesium and sucrose on leaf anatomy, photosynthesis, starch and total sugar accumulation, in kiwifruit cultured in vitro. *Plant Cell Tissue & Organ Cult.* (47) 127-134
- Ellsworth, D. S. und Reich, P. B. 1992. Leaf mass per area nitrogen content and photosynthetic carbon gain in *Acer saccharum* seedlings in contrasting forest light environments. *Funct. Ecol.* (6) 423-435
- Emmer, I. M., Fanta, J., Kobus, A. T., Kooijman, A., Sevink, J. 1998. Reversing borealization as a means to restore biodiversity in central-European mountain forests: An example from the Krkonose Mountains, Czech Republic. *Biodiv. & Cons.* (7) 229-247
- Evans, J. R. 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants. *Oecologia* (78) 9-19
- Field, C. und Mooney, H. A., 1986. The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants. In: On the economy of plant form and function. (eds. Givnish, T. J. et al.) *Cambridge Univ. Press, Cambridge* 25-55
- Fleder, W. 1991. Erfahrungen mit Unterbau und Voranbau der Buche in Unterfranken. *AFZ* 6/1991: 307-309
- Galinski, W., Witowski, J. und Zwieniecki, M. 1994. Non-random height pattern formation in even aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Nelder plots as affected by spacing and site quality. *Forestry (Eynsham)* (67) 49-61
- Gill, D. S., Amthor, J. S. und Bormann, F. H. 1998. Leaf phenology, photosynthesis, and te persistence of saplings and shrubs in a mature northern hardwood forest. *Tree physiol.* (18) 281- 289
- Hager, H., Kazda, M., Pichler, M., Kraus, T., Schmid, I. und Wagner, C. 1998. Wachstum von Laubholzvoranbau in sekundären Nadelholzbeständen. GZ: 56810/17-VA2b/95

- Hatzfeldt, H. (Hrsg.) 1996. Ökologische Waldwirtschaft – Grundlagen – Aspekte – Beispiele. *Stiftung Ökologie & Landbau / C.F. Müller Verlag*
- Hikosaka, K. und Terashima, I. 1995. A model of the acclimation of photosynthesis in the leaves of C₃ plants to sun and shade with respect to nitrogen use. *Plant, Cell & Environ.* (18) 605-618
- Kamaluddin, M. und Grace, J. 1993. Growth and photosynthesis of tropical forest tree seedlings (*Bischofia javanica* Blume) as influenced by a change in light availability. *Tree Physiol.* (13) 189-201
- Kazda, M., Salzer, J., Schmid, I. und v. Wrangell, P. 2004. Importance of mineral nutrition for photosynthesis and growth of *Quercus petraea*, *Fagus sylvatica* and *Acer pseudoplatanus* planted under norway spruce canopy. *Plant and Soil* (264) 25-34
- Kazda, M., v. Lübke, B., Simoncic, P., Cermak, J., Leitgeb, E., Löf, M., Bernot, R., Mauer, P., Spellmann, H. und Breznikar, A. 2005. Introduction of broadleaf species for sustainable forest management – SUSTMAN. *Final Report- QLK5-CT-2002-00851*
- Küppers, M., Zech, W., Schulze, E. D. und Beck, E. 1985. CO₂-Assimilation, Transpiration und Wachstum von *Pinus silvestris* L. bei unterschiedlicher Magnesiumversorgung. *Forstwirtschaftliches Centralblatt* (104) 23-36
- Leder, B. 2002. Struktureiche Dauerwälder lösen Nadelbaum-Reinbestände ab. *LÖBF-Mitteilungen* (2) 25-33
- Lei, T. T. und Lechowicz, M. J. 1997. The photosynthetic response of eight species of *Acer* to simulate light regimes from the center and edges of gaps. *Funct. Ecol.* (11) 16-23
- Leitgeb, E., Mutsch, F., Englisch, M., Herzberger, E. und Reiter, R. 2003 Introduction of broadleaf species for sustainable forest management – SUSTMAN. *Workpackage 1 – Site report QLRT-2001-005851*
- Mayer, H. 1980. Waldbau. *Gustav Fischer Verlag - Stuttgart - New York*

- Mielikäinen, K. 1980. Structure and development of mixed pine and birch stands. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*
- Niinemets, Ü. 1995. Distribution of foliar carbon and nitrogen across the canopy of *Fagus sylvatica*: adaptation to a vertical light gradient. *Acta Oecologia* (16) 525-541
- Niinemets, Ü. 1996. Plant growth-form alters the relationship between foliar morphology and species shade-tolerance ranking in temperate woody taxa. *Vegetatio* (124) 145-153
- Niinemets, Ü. 1997. Role of foliar nitrogen in light harvesting and shade tolerance of four temperate deciduous woody species. *Funct. Ecol.* (11) 518-531
- Nykvist, N. 1977. Changes in the amounts of inorganic nutrients in the soil after clearfelling. *Silva fenica* (11) 201-257
- Osmond, C. B. 1983. Interactions between irradiance, nitrogen nutrition, and water stress in the sun-shade responses of *Solanum dulcamara*. *Oecologia* (57) 316-321
- Paci, M. und Ciambelli, F. 1996. Riposta della vegetazione all'apertura di ,gap' nella Riserva Naturale Integrale di Sasso Fratino. *Monti e Boschi* (47) 50-58
- Pichler, M., Hager, H. und Kazda, M. 2001. Beitrag zur Lichtökologie und zum Wachstum junger Voranbaupflanzen (*Quercus petraea*, *Fagus sylvatica* und *Acer pseudoplatanus*). *Cbl. Ges. Forstw.* (118) 175-192
- Reich, P. B., Abrams, M. D., Ellsworth, D. S., Kruger, E. L. und Tabone, T. J. 1990. Fire Affects Ecophysiology and Community Dynamics of Central Wisconsin Oak Forest Regeneration *Ecology* (71) 2179-2190
- Reich, P. B., Kloeppel, B. D., Ellsworth, D. S. und Walters, M. B. 1995. Different photosynthesis-nitrogen relations in deciduous hardwood and evergreen coniferous species. *Oecologia* (104) 24-30
- Röhrig, E. 1967. Wachstum junger Laubholzpflanzen bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 224-239

- Sauter, U. 1988. Ergebnisse aus einem fünfjährigen Versuch zum Voranbau der Douglasie mit Startdüngung. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* (159) 125-132
- Sun, O. J. und Payn, T. W. 1999. Magnesium nutrition and photosynthesis in *Pinus radiata*: clonal variation and influence of potassium. *Tree Physiology* (19) 535–540
- v. Wrangell, P. 2005. Entwicklung von gedüngten und ungedüngten Buchen entlang eines Lichtgradienten unter dem Schirm eines Kiefern – Fichten Altbestandes. *Dissertation Universität Ulm*
- Vonhoff, W. 1997. Buchen-Vorbau auf der Ostalb. *Allg. Forstztg.* (24) 1298-1299
- Wagner, S. und Müller-Using, B. 1997. Ergebnisse der Buchen-Voranbauversuche im Harz unter besonderer Berücksichtigung der lichtökologischen Verhältnisse. *Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten / Landesamt für Agrarordnung Nordrhein-Westfalen, LÖBF-Schriftenreihe 13*
- Walter, M. B. und Reich, P. B. 1999. Research review: Low-light carbon balance and shade tolerance in the seedlings of woody plants. Do winter deciduous and broad-leaved evergreen species differ? *New phytologist* (143) 143-154
- Weidenbach, P. 1985. Voranbau von Tanne und Buche – ein Weg zu besseren waldbaulichen Ergebnissen. *AFZ* (45) 1212-1216
- Weilharter, R. 1991. Wiederaufforstung auf Problemstandorten der Harzhochlagen. *Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme Univ. Göttingen A102*
- Witkowski, E. T. F. und Lamont, B. B. 1991. Leaf specific mass confounds leaf density and thickness. *Oecologia* (88) 486-493

7 Fotodokumentation



Foto 1 Photosynthesemessung mit LI-COR 6400 an einer Buche



Foto 2 Messkammer des LI-COR 6400 an Buche



Foto 3 Blick auf die Fläche, Ahorn im Vordergrund




Foto 4 Ring (1/2m²) um Buche zur Demonstration der Düngung



Foto 5-7 Ahorn mit Stickstoff gedüngt (5), Ahorn mit Calcium/Magnesium-Düngung (6), gesunde Buche (Kontrolle) (7) (die Fotos sind im Uhrzeigersinn angeordnet, beginnend oben links)

8 Präsentation der Ergebnisse auf Tagungen

1) Poster auf dem Joint European Stable Isotope User Meeting (Jesium 2004) in Wien



Effects of 15N-marked fertiliser on *Acer pseudoplatanus* grown in a nutrient poor coniferous forest

University of Ulm

Kordula Heinen*, Ernst Leitgeb* & Marian Kazda*
 *Systematic Botany and Ecology, University of Ulm, Germany; *Department of Forest Ecology, Federal Forest Research Centre, Vienna, Austria

Introduction

Planting of broadleaf species under the canopy of mature conifers is being used increasingly for the conversion of these stands. The soil status of old growth conifer stands is often nutrient poor and degraded due to historical land-use. Growth and performance of the planted broadleaf species might be limited because of low light intensities together with increased soil nutrient availability. The possibility of *Acer pseudoplatanus* to adapt under the prevailing light conditions and nutrient status can be expressed in photosynthetic capacity and leaf parameters. The aim of this study is to evaluate whether a nutrient depleted conifer stand with its specific light conditions is suitable for advanced planting of broadleaf species and how nutrient is utilized.

Material/Method

The study was conducted in the (mature) stand of 16.5m southeast of Ulm in an altitude of about 500 m. In total, four plantation groups have been selected: (1) *Pinus sylvestris*, (2) *Acer pseudoplatanus*, (3) within each group 10 plants have been fertilized with ammonium-nitrate (5% with 15N) at a rate of 50 kg/ha and another 10 plants with calcium-nitrate at a rate of 450 kg/ha for calcium and 123 kg/ha for nitrogen. On these 50 plants and 40 coniferous photosynthesis (Vmax), specific leaf mass and biomass parameters have been analysed. For comparison, data collected in 2003 by the Federal Forest Research Centre (Vienna) showed leaf nitrogen values of 16.5 ± 6.2 mg/kg in plants without fertilisation. The mean potassium concentration in these plants was 1260 ± 130 mg/kg, the calcium concentration 370 ± 80 mg/kg and the magnesium concentration 60 ± 30 mg/kg.

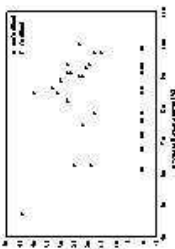
Results

The most pronounced effect of the nitrogen fertilisation was the earlier and more pronounced leaf senescence affecting a higher number of plants compared to the control (table 1, photo 1 & 3). Graph 1 shows a slight decrease in the uptake of 15N-marked fertilizer to the leaves with increasing *Acer pseudoplatanus* cover in the fertilised area. Within the first vegetation period, the nitrogen fertilisation had no significant influence on the leaf nitrogen concentration (table 2, 3 & 4). However, the maximum photosynthetic capacity did not differ between treatments (graph 2).

Conclusion

The *Acer pseudoplatanus* plants of the site have a sufficient supply with nitrogen as leaf nitrogen concentrations and photosynthesis rates did not differ between treatments although fertilizer uptake could be shown via the 15N signature in the leaves. Moreover, the results did not alter the analysed leaf nitrogen contents. At the current step of analysis the earlier occurrence of leaf senescence in fertilised plants cannot be explained by any of the analysed parameters. A shift in the balance of other macro- or micronutrients may be one explanation and further analysis and identification will be done.

Graph 1: Correlation between the leaf nitrogen content and the nitrogen uptake of *Acer pseudoplatanus* plants.



Graph 2: Correlation between the leaf nitrogen content and the maximum photosynthetic rate (Vmax).

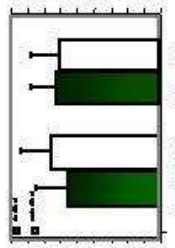
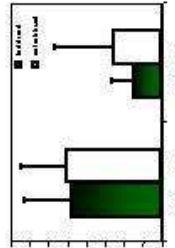


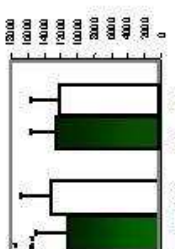
Table 1: Plant numbers with different senescence degrees per treatment.

Senescence	Control	15N	Ca
not senesced	5	3	11
senesced	10	3	3
total	15	6	14

Graph 3: Mean values of nitrogen and potassium concentration in leaves.



Graph 4: Mean values of nitrogen and potassium concentration in leaves.






Photo 1: *Acer pseudoplatanus* plants in a coniferous forest.




Photo 2: *Acer pseudoplatanus* plants in a coniferous forest.




Photo 3: *Acer pseudoplatanus* plants in a coniferous forest.




Photo 4: *Acer pseudoplatanus* plants in a coniferous forest.

CONTACT: Kordula Heinen, phone: +49-714622255, kordula.heinen@biologie.uni-ulm.de

2) Vortrag beim European Science Foundation Exploratory Workshop Isotopic microsampling in Earth, Environmental and Archaeological Sciences, University of Durham, UK

Shade tolerance and nutrition in *Acer pseudoplatanus* in a nutrient poor coniferous forest

Kordula Heinen and Marian Kazda

Systematic Botany and Ecology, University of Ulm, +49-(0)731-5022285 (phone),
+49-(0)731-5022720 (fax), k.heinen@gmx.de

The soil status of old growth conifer stands is often nutrient poor and degraded due to historical landuse. The aim of this study is to evaluate whether a nutrient deprived conifer stand under specific light conditions is suitable for advanced planting of broadleaf species and how fertilizing is utilized. Therefore the following questions are set to be answered: 1. How suitable are *Fagus sylvatica* and *Acer pseudoplatanus* for plantation in a nutrient poor conifer stand? 2. Is there an influence of fertilization on the shade tolerance and nitrogen allocation?

The study is conducted in the Waldviertel about 15 km southeast of Weitra at an altitude of about 900 m above sea level. Four plantation groups have been selected (2 x beech, 2 x maple) with 30 study plants each. Within each group 10 plants have been fertilised with ammoniumnitrate (5% marked with ¹⁵N) at a rate of 50 kg/ha and another 10 plants with Ca/Mg-fertilizer at a rate of 480 kg/ha for calcium and 123 kg/ha for magnesium. Photosynthesis (*A*_{max}), specific leaf mass and biometrical parameters (height, crown volume, stem diameter, leaf number, senescence and herbivory) have been measured.

Preliminary results show that fertilisation has an influence on leaf numbers, *A*_{max}, herbivory and specific leaf mass. The leaf numbers and specific leaf mass of maple are higher after nitrogen fertilisation. Herbivory of beech leaves is slightly higher after nitrogen than after Ca/Mg-fertilization. Therefore nitrogen fertilisation may increase survival rate and fitness of the saplings planted under an old conifer stand. Further analysis of nitrogen partitioning using stable isotopes will provide better insight into plant reaction.

Earlier senescence of *Acer pseudoplatanus* compared to *Fagus sylvatica* as a result of nitrogen fertilisation

K. Heinen, M. Kazda

Due to historical land-uses the soil status in old growth conifer stands is often nutrient poor and degraded. The aim of this study is to evaluate whether a nutrient deprived conifer stand is suitable for advanced planting of broadleaf species under specific light conditions. Therefore the following questions are set to be answered: 1. How suitable are *Acer pseudoplatanus* and *Fagus sylvatica* for being planted in conifer stand with low base saturation? 2. Is there an influence of fertilization on the shade tolerance and nitrogen allocation?

The study was conducted in the Waldviertel about 15 km southeast of Weitra at an altitude of about 900 m above sea level. Four plantation groups have been selected (2 x maple, 2 x beech) with 30 study plants each. Within each group 10 plants have been fertilised with ammoniumnitrate (5% marked with ^{15}N) at a rate of 50 kg N ha^{-1} and another 10 plants with Ca/Mg-fertilizer at a rate of 480 kg ha^{-1} for calcium and 123 kg ha^{-1} for magnesium. Photosynthesis (Amax), transpiration, specific leaf mass, $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, leaf nutrients and biometrical parameters (height, crown volume, stem diameter, leaf number and area, senescence and herbivory) have been measured during and after the second vegetation period after fertilisation.

Preliminary results showed no significant influence of fertilisation on transpiration, Amax, total leaf area, specific leaf mass, leaf nitrogen content and total nitrogen within the species within the time span of two years. Differences between the species due to different fertilisation treatments were found for $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, leaf nitrogen content, herbivory and most pronounced for leaf senescence. Herbivory of beech and maple leaves is slightly higher after nitrogen than after Ca/Mg-fertilization. Overall, maple seemed to be more susceptible to herbivory. Different fertilisation treatments produced striking different patterns of leaf senescence for beech and maple. While beech leaves (both fertilisation treatments) were not affected by senescence that much, Ca/Mg fertilisation had a positive and nitrogen fertilisation a negative effect on the senescence of maple leaves.

Concluding from the results *Fagus sylvatica* is more suitable for nutrient depleted sites as those in Weitra. On the other hand, Ca/Mg fertilisation may improve the situation for *Acer pseudoplatanus* as it prolongs its vegetation period. Due to the negative effects maple should not be fertilised with nitrogen on sites with low base saturation.