

**STREUABBAU IN VERSCHIEDENEN  
STADIEN DER HEIDE - WALDSUKZESSION**

**Diplomarbeit  
vorgelegt von  
Dietrich Hertel  
aus Karlsruhe**

**angefertigt  
im Systematisch-Geobotanischen Institut  
der Georg-August-Universität Göttingen  
1995**

**Systematisch-Geobotanisches Institut  
der Universität Göttingen**

**Referent: Prof. Dr. M. Runge**

**Korreferent: PD Dr. C. Leuschner**

**Mündliche Prüfungen: 26. - 29.10.1993**

**Tag der Abgabe der Arbeit: 9.3.1995**

## Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. M. Runge für die Bereitstellung des Themas dieser Diplomarbeit, für seine ständige Diskussionsbereitschaft und seine Hilfe bei der Planung und Durchführung der Untersuchung.

Besonderer Dank gilt Michael Rode für sein Interesse und seine Hilfsbereitschaft in allen Belangen sowie in gleicher Weise Christoph Leuschner für seine Unterstützung und für seine Hilfe in der Endphase der Arbeit.

Herzlich bedanken möchte ich mich außerdem bei Mathias Weitemeier für die tatkräftige Unterstützung der statistischen Auswertung mit SAS und bei Dr. Stefan Scheu für die Bestimmung der Regenwürmer.

Bei Gundula Günter und Ulf Mehlig möchte ich mich nicht nur für das Korrekturlesen der Arbeit und die Hilfe in Sachen soft- und hardware bedanken, sondern auch für die lustigen musikalischen Stunden (zusammen mit In-Jeong Ko) in der Klimakabine.

Ein herzliches Dankeschön gilt daneben allen Angehörigen des Institutes und insbesondere des Neuen Botanischen Gartens für die angenehme, freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, die dazu beigetragen hat, daß die Arbeit nicht nur interessant war, sondern auch Spaß gemacht hat.

# INHALTSVERZEICHNIS

|  | Seite |
|--|-------|
| <b>Kapitel 1: Einleitung</b>   | 1     |
| <b>Kapitel 2: Untersuchungsgebiet</b>  | 3     |
| 2.1 Topographische Lage  | 3     |
| 2.2 Klima  | 4     |
| 2.3 Geologie   | 5     |
| 2.4 Vegetation   | 6     |
| 2.5 Böden  | 8     |
| <b>Kapitel 3: Material und Methoden</b>  | 11    |
| 3.1 Versuchsdurchführung im Gelände ( <i>litter bag</i> - Methode)   | 11    |
| 3.2 Analyseverfahren   | 13    |
| 3.2.1 Bestimmung des Gewichtsverlustes   | 13    |
| 3.2.2 Bestimmung des Kohlenstoff- und Stickstoffgehaltes   | 14    |
| 3.2.3 Bestimmung des Phosphorgehaltes  | 15    |
| 3.2.4 Bestimmung der Kationengehalte   | 16    |
| 3.2.5 Bestimmung des Ligningehaltes  | 17    |
| 3.2.6 Bestimmung des Wassergehaltes der organischen Auflage  | 18    |
| 3.2.7 Statistische Auswertung  | 18    |
| 3.2.8 Berechnung der Veränderung der Substanzgehalte durch die Streuzersetzung   | 20    |
| <b>Kapitel 4: Ergebnisse</b>   | 21    |
| 4.1 Wassergehalt der organischen Auflage   | 21    |
| 4.2 Gewichtsverlust und Kohlenstoffveratmung   | 22    |
| 4.2.1 Gewichtsverlust  | 22    |
| 4.2.2 Kohlenstoffveratmung   | 25    |
| 4.3 Veränderung der Kationengehalte  | 28    |
| 4.3.1 Kalium   | 28    |
| 4.3.2 Magnesium  | 33    |
| 4.3.3 Calcium  | 38    |
| 4.3.4 Mangan   | 42    |
| 4.3.5 Eisen  | 46    |
| 4.4 Veränderung des Phosphorgehaltes   | 53    |
| 4.5 Veränderung des Stickstoffgehaltes   | 56    |
| 4.6 Veränderung des Ligningehaltes   | 65    |
| <b>Kapitel 5: Diskussion</b>   | 69    |
| 5.1 Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen Streuarten  | 69    |
| 5.2 Veränderung der Substanzgehalte in der Streu: Unterschiede zwischen den Inhaltsstoffen und zwischen den vier Baumarten | 72    |
| 5.3 Der Einfluß der Streuqualität und des Standortes auf den Abbau der vier Streuarten                                     | 81    |
| 5.3.1 Der Einfluß der Streuzusammensetzung auf den Abbau der vier Streuarten   | 83    |
| 5.3.2 Der Einfluß des Standortes auf den Abbau der vier Streuarten   | 86    |

|  |    |
|--|----|
| 5.4 Nährstoffnachlieferung durch die Streuzersetzung im Verlauf des Untersuchungszeitraumes    | 90 |
| 5.5 Die Rolle der Nährstoffnachlieferung durch die Streuzersetzung in der Heide-Waldsukzession | 94 |
| <b>Zusammenfassung</b>   | 97 |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | 99 |
| <b>Anhang</b>  |    |

# VERZEICHNIS DER TABELLEN UND ABBILDUNGEN IM TEXT

|  | Seite |
|--|-------|
| <b>Verzeichnis der Tabellen im Text</b>  |       |
| Tab. 1: pH-Werte der organischen Auflage und des angrenzenden Mineralbodens der Untersuchungsflächen   | 9     |
| Tab. 2: Mischungsverhältnisse, eingewogene Trocken- und Frischgewichte sowie Wassergehalte der vier Streugrundproben                           | 12    |
| Tab. 3: Probetermine, Untersuchungsdauer und Art der Streuproben   | 13    |
| Tab. 4: Meßbedingungen am AAS  | 16    |
| Tab. 5: Kohlenstoffkonzentration der vier Streuarten vor und nach 246 Tagen Lagerung am Herkunftsort   | 25    |
| Tab. 6: C/K-, C/Mg- und C/Ca-Verhältnisse der vier Streuarten vor und nach dem Streuabbau  | 30    |
| Tab. 7: Nährstoffgehalte der frischen Streu der vier Baumarten nach Angaben von RODE (1993) und nach Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung | 70    |
| Tab. 8: Nährstoffgehalte der frischen Streu der vier Baumarten nach Angaben anderer Autoren und nach Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung | 71    |
| Tab. 9: Vergleich linearer Regressionen des Kohlenstoffverlustes mit denen der Calciumfreisetzung  | 74    |
| Tab. 10: Gewichtsverlust der $O_L$ -Streu der vier Baumarten in der vorliegenden Untersuchung und nach Untersuchungen anderer Autoren          | 84    |
| Tab. 11: Freisetzung bzw. Akkumulation von Nährstoffen durch die einjährige Streumenge der vier Baumarten und der beiden Waldgesellschaften    | 91    |
| Tab. 12: Freisetzung bzw. Akkumulation der Nährstoffe durch die obere $O_F$ -Schicht (Fr) im Eichen-Buchenwald von November '93 bis Juli '94   | 92    |
| <b>Verzeichnis der Abbildungen im Text</b>   |       |
| Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes   | 3     |
| Abb. 2: Vergleich der Monatsmittel von Temperatur und Niederschlag im Untersuchungszeitraum und im langjährigen Mittel der Station Uelzen      | 4     |
| Abb. 3: Jahreszeitlicher Verlauf der Wassergehalte der organischen Auflage   | 21    |
| Abb. 4: Veränderung des Trockengewichtes der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort        | 23    |
| Abb. 5: Veränderung des Trockengewichtes der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort        | 23    |
| Abb. 6: Trockengewichte der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                  | 24    |
| Abb. 7: Veränderung des Kohlenstoffvorrates der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort     | 26    |
| Abb. 8: Veränderung des Kohlenstoffvorrates der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort     | 26    |
| Abb. 9: Kohlenstoffvorrat der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                | 27    |
| Abb. 10: Veränderung der Kaliumkonzentration der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort    | 29    |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Abb. 11: | Veränderung der Kaliumkonzentration der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort    | 29 |
| Abb. 12: | Veränderung des Kaliumvorrates der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort         | 31 |
| Abb. 13: | Veränderung des Kaliumvorrates der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort         | 31 |
| Abb. 14: | Kaliumvorrat der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                    | 32 |
| Abb. 15: | Veränderung der Magnesiumkonzentration der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort | 34 |
| Abb. 16: | Veränderung der Magnesiumkonzentration der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort | 34 |
| Abb. 17: | Veränderung des Magnesiumvorrates der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort      | 36 |
| Abb. 18: | Veränderung des Magnesiumvorrates der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort      | 36 |
| Abb. 19: | Magnesiumvorrat der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                 | 37 |
| Abb. 20: | Veränderung der Calciumkonzentration der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort   | 39 |
| Abb. 21: | Veränderung der Calciumkonzentration der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort   | 39 |
| Abb. 22: | Veränderung des Calciumvorrates der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort        | 40 |
| Abb. 23: | Veränderung des Calciumvorrates der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort        | 40 |
| Abb. 24: | Calciumvorrat der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                   | 41 |
| Abb. 25: | Veränderung der Mangankonzentration der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort    | 43 |
| Abb. 26: | Veränderung der Mangankonzentration der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort    | 43 |
| Abb. 27: | Veränderung des Manganvorrates der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort         | 44 |
| Abb. 28: | Veränderung des Manganvorrates der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort         | 44 |
| Abb. 29: | Manganvorrat der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                    | 45 |
| Abb. 30: | Veränderung der Eisenkonzentration der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort     | 47 |
| Abb. 31: | Veränderung der Eisenkonzentration der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort     | 47 |
| Abb. 32: | Veränderung des Eisenvorrates der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort          | 48 |
| Abb. 33: | Veränderung des Eisenvorrates der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort          | 48 |
| Abb. 34: | Eisenvorrat der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                     | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Abb. 35: Veränderung der Phosphorkonzentration der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort   | 51 |
| Abb. 36: Veränderung der Phosphorkonzentration der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort   | 51 |
| Abb. 37: Veränderung des C/P-Verhältnisses der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort       | 52 |
| Abb. 38: Veränderung des C/P-Verhältnisses der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort       | 52 |
| Abb. 39: Veränderung des Phosphorvorrates der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort        | 54 |
| Abb. 40: Veränderung des Phosphorvorrates der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort        | 54 |
| Abb. 41: Phosphorvorrat der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                   | 55 |
| Abb. 42: Veränderung der Stickstoffkonzentration der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort | 57 |
| Abb. 43: Veränderung der Stickstoffkonzentration der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort | 57 |
| Abb. 44: Veränderung des C/N-Verhältnisses der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort       | 58 |
| Abb. 45: Veränderung des C/N-Verhältnisses der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort       | 58 |
| Abb. 46: Veränderung des Stickstoffvorrates der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort      | 60 |
| Abb. 47: Veränderung des Stickstoffvorrates der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort      | 60 |
| Abb. 48: Stickstoffvorrat der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                 | 61 |
| Abb. 49: Veränderung der Ligninkonzentration der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort     | 63 |
| Abb. 50: Veränderung der Ligninkonzentration der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort     | 63 |
| Abb. 51: Veränderung des C/Lignin-Verhältnisses der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort  | 64 |
| Abb. 52: Veränderung des C/Lignin-Verhältnisses der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort  | 64 |
| Abb. 53: Veränderung des Ligninvorrates der $O_L$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort          | 66 |
| Abb. 54: Veränderung des Ligninvorrates der $O_F$ -Streu der vier Baumarten während der Untersuchungszeit bei Lagerung am Herkunftsort          | 66 |
| Abb. 55: Ligninvorrat der $O_L$ -Streu der vier Baumarten auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer                     | 67 |
| Abb. 56: Lineare Regression zwischen relativem Trockengewicht und Zersetzungszeit   | 82 |



## VERZEICHNIS DER TABELLEN UND ABBILDUNGEN IM ANHANG

- Tab. A 1: Gewicht der vier Streuart in g TG und in % der Anfangsmasse
- Tab. A 2: Kohlenstoffgehalt der vier Streuart in mmol/g TG und in % des Anfangsvorrates
- Tab. A 3: Kaliumgehalt der vier Streuart in  $\mu\text{mol/g}$  TG und in % des Anfangsvorrates
- Tab. A 4: Magnesiumgehalt der vier Streuart in  $\mu\text{mol/g}$  TG und in % des Anfangsvorrates
- Tab. A 5: Mangangehalt der vier Streuart in  $\mu\text{mol/g}$  TG und in % des Anfangsvorrates
- Tab. A 6: Eisengehalt der vier Streuart in  $\mu\text{mol/g}$  TG und in % des Anfangsvorrates
- Tab. A 7: Calciumgehalt der vier Streuart in  $\mu\text{mol/g}$  TG und in % des Anfangsvorrates
- Tab. A 8: Ligningehalt der vier Streuart in mg/g TG und in % des Anfangsvorrates
- Tab. A 9: Stickstoffgehalt der vier Streuart in  $\mu\text{mol/g}$  TG und in % des Anfangsvorrates
- Tab. A 10: Phosphorgehalt der vier Streuart in  $\mu\text{mol/g}$  TG und in % des Anfangsvorrates
- Tab. A 11: C/K- und C/Mg-Verhältnisse [g/g] der vier Streuart
- Tab. A 12: C/Ca- und C/Lignin-Verhältnisse [g/g] der vier Streuart
- Tab. A 13: C/N- und C/P-Verhältnisse [g/g] der vier Streuart
- Tab. A 14: Wassergehalt der organischen Auflage unter den vier Baumarten während des Untersuchungszeitraumes
- Tab. A 15a-d: Gewichtsverlust – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 16a-d: Kohlenstoff – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 17a-d: Kalium – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 18a-d: Magnesium – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 19a-d: Calcium – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 20a-d: Mangan – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 21a-d: Eisen – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 22a-d: Phosphor – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 23a-d: Stickstoff – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 24a-d: Lignin – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 25a-d: C/Mg, C/K – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 26a-d: C/Lignin, C/Ca – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Tab. A 27a-d: C/N, C/P – Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche
- Abb. A 1: *litter bags* mit Buchenstreu im Eichen-Buchenwald bei Unterlüß
- Abb. A 2: Probenahme von *litter bags* am Eichenstandort

## KAPITEL 1: EINLEITUNG

Das heutige Landschaftsbild der Lüneburger Heide stellt eine über Jahrhunderte hinweg von Menschen geprägte Kulturlandschaft dar, deren Entwicklung durch großflächige Waldzerstörung bestimmt wurde (VÖLKSEN 1984). Anstelle der natürlichen Waldgesellschaften breiteten sich anthropogen genutzte *Calluna*-Heiden auf den armen, nährstoffarmen Sandböden aus. Diese Zwergstrauchheiden sind nach Aufgabe der Nutzung durch den Menschen Ausgangspunkt für eine Sekundärsukzession hin zu Waldgesellschaften (ELLENBERG 1986).

Das Forschungsprojekt "Ursachen und Mechanismen der Heide-Waldsukzession" versucht, die kausalen Zusammenhänge dieses Sukzessionsprozesses aufzudecken. Dazu wurden mehrere Untersuchungsflächen ausgewählt, welche drei mutmaßliche Sukzessionsstadien repräsentieren: *Calluna*-Heide, Birken-Kiefern-Pionierwald und Eichen-Buchen-Schlußwald (LEUSCHNER et al. 1993). Auf diesen Forschungsflächen wurden in den letzten Jahren eingehende Untersuchungen der Stoff-, Wasser- und Energieumsätze durchgeführt. Da Sukzessionsprozesse wie im vorliegenden Fall mit einer Zunahme der oberirdischen Biomasse verbunden sind, ist besonders die Mobilisierung von Nährstoffen innerhalb der Sukzessionsstadien von großer Bedeutung.

Im Untersuchungsgebiet ist die Nährstoffversorgung der Pflanzenbestände aufgrund der sauren, nährstoffarmen Mineralböden stark eingeschränkt (ELLENBERG 1986); im Zuge dieser Einschränkung gewinnt die Nährstoffversorgung durch Remobilisierung pflanzeninterner Nährstoffe eine große Bedeutung (RODE & HEINKEN 1993). Abgesehen von Retranslokationen in lebenden Blättern, gelangen die Nährstoffe dabei über den Weg des Laubfalls zu Boden. Die Zersetzung des liegenden Streumaterials durch Bodenorganismen und die damit verbundene Mineralisation führt die Elemente der Bodenlösung zu; auf diese Weise werden die Nährstoffe den Pflanzen wieder verfügbar gemacht.

Eine zentrale Stelle in diesem Kreislauf stellt die Streuzersetzung dar: Als Bindeglied zwischen lebender Phytomasse und dem Boden bestimmt die Geschwindigkeit und das Ausmaß des Streuabbaus wesentlich den Grad der Nährstoffverfügbarkeit; deshalb setzen an dieser Stelle viele Mechanismen zur Steuerung des Nährstoffkreislaufes des Ökosystems an (FACELLI & PICKETT 1991).

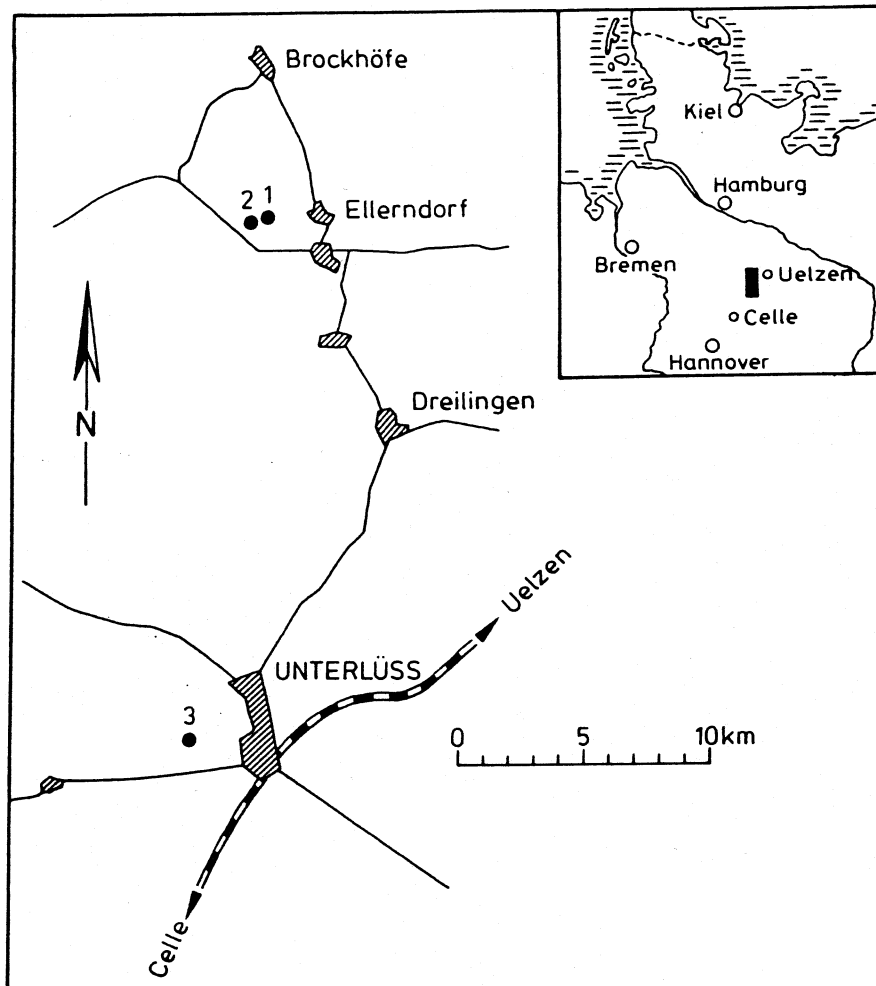
In der vorliegenden Arbeit wird die Streuzersetzung der vier auf den Untersuchungsflächen dominierenden Baumarten *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, *Betula pendula* und

*Pinus sylvestris* am natürlichen Standort untersucht. Dazu wurde vom Ende des Laubfalls an (Anfang November 1993) frischgefallene Streu sowie ältere Streu der O<sub>F</sub>-Lage mit der verbreiteten *litter bag*-Methode bis zum Juli 1994 ausgebracht. Durch Analyse der Abbaugeschwindigkeit und der chemischen Zusammensetzung des Streumaterials zu verschiedenen Zeitpunkten der Untersuchung soll das Abbauverhalten der einzelnen Streuarten charakterisiert werden. Daneben soll verdeutlicht werden, welche Faktoren die Streuzersetzung an den verschiedenen Standorten beeinflussen. Abschließend soll die Rolle der Streuzersetzung in der Heide-Waldsukzession diskutiert werden.

## KAPITEL 2: UNTERSUCHUNGSGEBIET

### 2.1 Topographische Lage

Die beiden Untersuchungsgebiete liegen im südlichen Teil der Lüneburger Heide zwischen Celle und Uelzen (Niedersachsen) und gehört dem forstlichen Wuchsbezirk der Hohen Heide an.



**Abb. 1:** Lage des Untersuchungsgebietes in der südlichen Lüneburger Heide (1: *Calluna*-Heide, 2: Birken-Kiefernwald, 3: Eichen-Buchenwald); nach LEUSCHNER (1994), verändert.

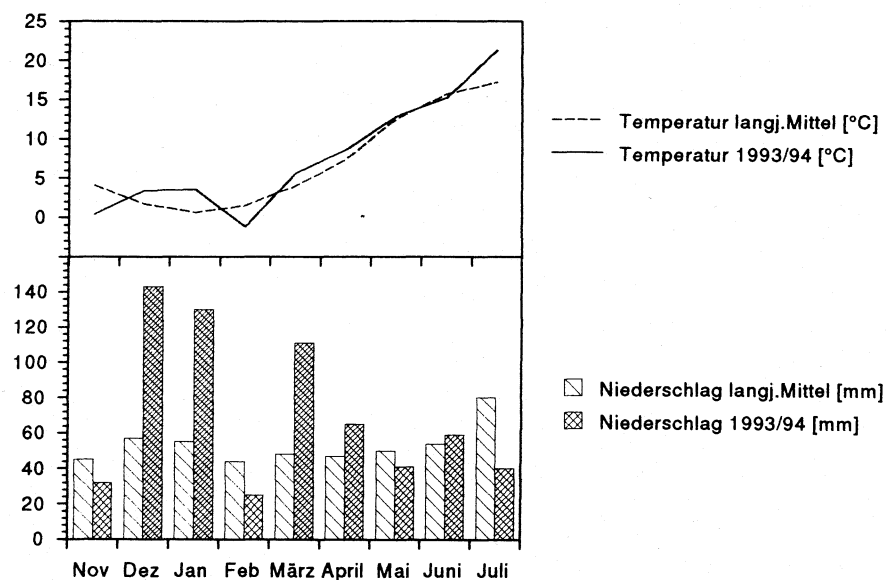
Der Eichen-Buchenwald befindet sich westlich von Unterlüß (Kr. Celle) im Staatsforst Lüß und gehört zum Forst Süll Abt. 349. Der Bestand ist von weiteren buchendominierten Wäldern sowie Fichtenaufforstungen unterschiedlichen Alters umgeben. Die Höhenlage beträgt ca. 115 m ü.M. bei geringer Hangneigung nach NO.

Der Birken-Kiefernwald mit angrenzender *Calluna*-Heide liegt nordwestlich der Ortschaft

Eimke (Kr.Uelzen), ca. 20 km nördl. von Unterlüß am Rande des Rahberges (98,6 m ü.M.). Im Westen grenzen neben kleinen Heiden landwirtschaftliche Nutzflächen (vor allem im Bereich der in der Nähe verlaufenden B 71) an die Untersuchungsfläche; im Süden, Osten und Norden erstrecken sich weitere Kiefernwälder sowie *Calluna*-Heiden. Heidefläche und Birken-Kiefernwald liegen in einer Höhe von ca. 95 m ü.M., wobei der Wald gering nach Süden, die Heidefläche etwas nach Osten geneigt ist.

## 2.2 Klima

Das Klima der Lüneburger Heide ist subozeanisch und kühl-gemäßigt, wobei sich der atlantische Einfluß von Westen nach Osten hin abschwächt. Das Gebiet des Haupthöhenzuges (mit Erhebungen bis 169 m ü.M.), in dessen Bereich auch die beiden Untersuchungsflächen liegen, unterscheidet sich jedoch von den angrenzenden Gebieten durch höhere Niederschlagsmengen, niedrigere Sommertemperaturen und eine längere Frostdauer (OTTO 1972). Abbildung 2 zeigt den Vergleich der mittleren monatlichen Temperaturen und Niederschläge des Untersuchungszeitraumes November 1993 bis Juli 1994 mit den langjährigen Mittelwerten der Station Uelzen (40 m ü.M.). Die langjährigen jährlichen Temperatur- und Niederschlagsmittelwerte der Station liegen bei 8,7°C und 653mm.



**Abb. 2:** Vergleich der mittleren Monatsmittel von Temperatur und Niederschlag im Untersuchungszeitraum und im langjährigen Mittel der Station Uelzen (Werte nach dem DEUTSCHEN WETTERDIENST 1993/94 und WALTER & LIETH 1967).

Verglichen mit den langjährigen Mittelwerten war der November des Untersuchungsjahres deutlich kühler und etwas trockener, ebenso wie der Februar, der einzige Monat mit mittleren Temperaturen unter 0°C. Die Monate Dezember, Januar und März waren dagegen deutlich wärmer und feuchter (>100% mehr Niederschlag!) als im langjährigen Mittel. Die folgenden Monate unterschieden sich hinsichtlich ihrer Witterungsdaten nur wenig von den langjährigen Mittelwerten; einzig der Juli war deutlich wärmer und trockener.

Aktuelle Klimadaten, die im Rahmen des Forschungsprojektes auf den einzelnen Forschungsflächen erhoben wurden, stehen für den Untersuchungszeitraum der vorliegenden Arbeit (November 1993 bis Juli 1994) leider nicht zur Verfügung. Auf den Untersuchungsflächen wurden jedoch die Wassergehalte der organischen Auflageschicht ermittelt, die Aussagen über Veränderungen und Unterschiede im Feuchtegrad der Streuschicht ermöglichen (Kap. 4.1).

## 2.3 Geologie

Weite Teile der Lüneburger Heide sind geomorphologisch gesehen pleistozäne Altmoränenlandschaften, die vor allem durch Ablagerungen und Formungsprozesse der Saale-Eiszeit geprägt sind (WOLDSTEDT & DUPHORN 1974). Die beiden Untersuchungsflächen bei Eimke bzw. Unterlüß liegen dabei in einem Übergangsbereich zwischen Endmoränen und sich südlich daran anschließende Sanderflächen, die jeweils aus dem Drenthe-(2)-Stadial der Saaleeiszeit stammen (MEYER 1983, zit.n. LEUSCHNER 1994). Die Sander bestehen aus ausgedehnten Schmelzwassersanden, die mit dem Schmelzwasser in großen Mengen abtransportiert wurden und an anderer Stelle sedimentierten.

In späteren periglazialen Stadien der Weichsel-Eiszeit bildeten sich durch Solifluktions- und Kryoturbationsprozesse Geschiebedecksande, teilweise liegen zwischen Geschiebedecksand und Schmelzwassersand auch lokale Steinsohlen aus dieser Phase (WOLDSTEDT & DUPHORN 1974). Aus dieser und späterer Zeit können auch bis zu einigen Dezimetern mächtige Flugsanddecken vorhanden sein.

Die Untersuchungsfläche im Eichen-Buchenwald zeigt eine Abfolge von Flugsandschicht (wenige Zentimeter), Geschiebedecksand (50-70 cm), Schmelzwasserkies (bis 50 cm) und geschichtetem Schmelzwassersand (ohne Mächtigkeitsangabe) (LÜBBE 1989).

Unter dem Birken-Kiefernwald und der *Calluna*-Heide liegen eine ungeschichtete

Geschiebedecksandschicht (bis 40 cm), darunter Schmelzwassersande mit Einlagerungen von Feinsand und Kies (LEUSCHNER et al. 1991).

## 2.4 Vegetation

Das heutige Landschaftsbild der Lüneburger Heide ist ein Ergebnis jahrhundertelanger menschlicher Aktivitäten (ELLENBERG 1986). Beginnend in der Bronzezeit (ca. 3000 v. Chr.) wurden die ursprünglich vorhandenen Laubwälder durch Holzschlag, Brand und Beweidung vernichtet. Diese fortlaufende Waldverwüstung erreichte ihren Höhepunkt um 1800 n. Chr.; als anthropogene Ersatzvegetation breiteten sich großflächig *Calluna*-Heiden aus, die als Schafweide, Bienenweide sowie zur Streugewinnung durch Plaggenhieb genutzt wurden (VÖLKSEN 1984, ELLENBERG 1986). Erst mit dem Einsetzen der planmäßigen Forstwirtschaft im 19. Jahrhundert erhöhte sich der Waldanteil wieder. Dabei wurden insbesondere die unrentablen Heideflächen durch Kiefernauaufforstungen ersetzt. Heute weisen Heiden nur noch einen Flächenanteil von etwa 6% auf, während der Anteil der Kiefernwälder bei ca. 43% liegt; Laubwälder bedecken ebenfalls nur eine Fläche von weniger als 6% (LEUSCHNER 1993).

Die *Calluna*-Heide bei Eimke existiert seit mehreren Jahrhunderten, wobei die traditionelle Plaggenwirtschaft von Mitte dieses Jahrhunderts an nicht mehr angewendet wurde, die Heide aber durch regelmäßige Beweidung und Entfernen von Sträuchern und Bäumen ("Entkuselung") erhalten wurde (SCHMITT 1990).

Die Vegetation dieser Fläche ist nach RODE & HEINKEN (1993) als *Genisto-Callunetum cladonietosum* Schwick. anzusehen und wird geprägt durch die starke Dominanz von *Calluna vulgaris*. Daneben treten *Juniperus communis*, *Genista anglica* und *Genista pilosa* als Sträucher auf. In der Krautschicht sind *Erica tetralix*, *Festuca ovina*, *Nardus stricta*, *Avenella flexuosa*, *Agrostis tenuis*, *Molinia caerulea*, *Danthonia decumbens*, *Carex pilulifera* sowie *Potentilla erecta* vertreten. Aus der reichen Moos- und Flechtenschicht sind unter anderem *Hypnum cupressiforme*, *Dicranum scoparium*, *Pleurozium schreberi*, *Cladonia portentosa*, *Cladonia gracilis* und *Cladonia chlorophaea* zu nennen (nach LEUSCHNER 1994).

Der angrenzende Birken-Kiefernwald stockt auf einer ehemaligen Heidefläche und hat sich nach der Abholzung eines danach entstandenen Anflugwaldes 1966 wiederum durch

natürliche Ausbreitung von Birken und Kiefern entwickelt (SCHMITT 1990). Der Bestand ist demnach maximal 29 Jahre alt.

RODE & HEINKEN (1993) ordnen diese Fläche dem *Leucobryo-Pinetum Matusz.* zu. In der Baumschicht dominiert *Pinus sylvestris* gegenüber *Betula pendula* (Verhältnis ca. 3 : 1, s. RODE 1993, LEUSCHNER 1994).

In der Strauchschicht sind neben *Pinus sylvestris* und *Betula pendula* auch *Quercus robur*, *Prunus serotina*, *Sorbus aucuparia*, *Alnus frangula* sowie in geringer Anzahl auch *Fagus sylvatica* vertreten.

Aus der Krautschicht sind neben der dominanten *Avenella flexuosa* *Calluna vulgaris*, *Vaccinium myrtillus* und *Festuca ovina* zu nennen.

Von den wiederum zahlreichen Kryptogamen müssen hier vor allem *Hypnum cupressiforme*, *Leucobryum glaucum*, *Pleurozium schreberi*, *Dicranum polysetum* sowie *Dicranum scoparium* angeführt werden (nach LEUSCHNER 1994).

Im Gegensatz zu den beiden Untersuchungsflächen bei Eimke ist das Gebiet des Eichen-Buchenwaldes bei Unterlüß wohl nie völlig entwaldet oder gar zur Heidewirtschaft herangezogen worden, was durch seine Funktion als landesherrliches Jagdgebiet bedingt ist. Nutzungsformen wie Waldweide, Streunutzung sowie Holzschlag dürften jedoch auch hier die Regel gewesen sein (LEUSCHNER, RODE, DANNER et al. 1993). HEINKEN (1993) ordnet diesen Wald einer Tieflandform des *Luzulo-Fagetum Meusel* zu. Weitaus dominierende Baumart ist *Fagus sylvatica* gegenüber *Quercus petraea* (Verhältnis ca. 9 : 1), wobei die Buchen etwa 85-105 Jahre, die Eichen etwa 180-200 Jahre alt sind. Die maximale Baumhöhe beträgt 32 m. Unter den alten Eichen steht eine zweite Baumschicht aus bis zu 20 m hohen Buchen.

Eine flächenhafte Krautschicht fehlt fast vollständig; einzig *Avenella flexuosa* und *Carex pilulifera* sind vereinzelt anzutreffen; teilweise finden sich auch Moospolster von *Polytrichum formosum*, *Hypnum cupressiforme* oder *Dicranella heteromalla* (nach LEUSCHNER 1994).



## 2.5. Böden

Für die Entwicklung der verschiedenen Bodentypen der Untersuchungsflächen haben insbesondere zwei Faktoren eine wesentliche Rolle gespielt: zum einen das Ausgangsmaterial, das (wie beschrieben) auf allen drei Flächen den glazifluvialen Formungen des Pleistozäns entstammt, zum anderen die menschlichen Nutzung der Landschaft mit ihrer Vernichtung der Wälder. Vor allem letzteres hat zu unterschiedlicher Bodenentwicklung auf der Heide- bzw. Birken-Kiefernfläche und der Eichen-Buchenfläche geführt. Alle Flächen sind grundwasserfern und frei von tonreichen Zwischenschichten, die zu einer Stauung von Sickerwasser geeignet wären.

Die intensive Bewirtschaftung der Heide und Birken-Kiefernfläche in den vergangenen Jahrhunderten, besonders die Nährstoffentnahme durch Plaggenhieb, hat eine starke Bodenversauerung bewirkt und führte (begünstigt durch das basenarme Ausgangsmaterial) zur Podsolierung (ROESCHMANN 1971, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992). Die Streu von *Calluna vulgaris* soll selbst ebenfalls die Podsolierung fördern (WOOLHOUSE 1981, zit. n. RODE & HEINKEN 1993).

Infolgedessen liegen sowohl unter der *Calluna*-Heide als auch unter dem Birken-Kiefernwald typische Eisen-Humus-Podsole mit deutlich ausgeprägten Eluvial- und Illuvial-Horizonten vor, teilweise mit Orterde- oder Ortsteinvorkommen. Sowohl in den unterschiedlichen A-Horizonten als auch in den B-Horizonten herrscht schwach schluffiger Sand mit überwiegend Einzelkorngefüge vor (HELLWIG 1994, HÖNES 1994).

Größere Unterschiede sind vor allem in den organischen Auflagehorizonten zu erkennen. Die Auflage der Heidefläche ist nur ca. 1,5 cm mächtig und besteht aus einer lockeren  $O_L$ -Lage und kaum differenzierbarer  $O_F$ - und  $O_H$ -Lage (LEUSCHNER, RODE, DANNER et al. (1993) bezeichnen sie nach KLINKA (1981) als Xero-Moder). Die Birken-Kiefernfläche weist dagegen einen rohhumusartigen Moder von weitaus größerer Mächtigkeit auf: Unter einer bis zu 1,5 cm dicken  $O_L$ -Schicht befindet sich eine bis zu 7 cm hohe  $O_F$ -Schicht; die darunter anschließende  $O_H$ -Lage ist ca. 1 cm dick (HELLWIG 1994, HÖNES 1994). Die Mächtigkeit der organischen Auflage variiert dabei an den Kiefernstandorten stärker als an den Birkenstandorten. Auffallend ist überall, daß der überwiegende Teil der Feinwurzeln in der organischen Auflage und dort besonders in der  $O_F$ -Schicht zu finden ist.

Die Bodenmorphologie der Eichen-Buchenfläche sieht demgegenüber deutlich anders aus. Bedingt durch die unterschiedliche Nutzungsgeschichte haben hier keine so starken Podsolierungsprozesse einsetzen können wie auf den Flächen bei Eimke. Es haben sich statt dessen mäßig bis stark podsolige Braunerden gebildet. Je nach Podsolierungsgrad können unterschiedlich gut ausgebildete Eluvial- und Iluvialhorizonte unterschieden werden; die Grenzen zwischen den einzelnen Horizonten (auch zwischen A- und B-Horizont) sind oft undeutlich. Die Bodenart ist durch schwach lehmige Mittel- bis Grobsande bestimmt, im C-Horizont schließt sich Feinsand an (HELLWIG 1994).

Die Humusform der organischen Auflage kann als rohhumusartiger Moder bezeichnet werden. Aus der Streu der beiden bestandesbildenden Baumarten *Fagus sylvatica* und *Quercus petraea* wird die bis zu 4 cm mächtige O<sub>L</sub>-Lage gebildet. Die darunterliegende O<sub>F</sub>-Schicht ist bis zu 6 cm mächtig und stark durchwurzelt. Die anschließende O<sub>H</sub>-Lage ist bis zu 4 cm stark und deutlich geringer durchwurzelt als die O<sub>F</sub>-Lage. Die Auflage ist unter den Eichen zumeist mächtiger ausgebildet als unter den Buchen.

Ebenso wie im Birken-Kiefernwald befinden sich der überwiegende Teil der Feinwurzeln in der O<sub>F</sub>-Lage der Auflage.

**Tab. 1:** pH-Werte der organischen Auflage und des angrenzenden Mineralbodens der Untersuchungsflächen (nach MARGRAF 1989 und CLAUB 1990), gemessen in H<sub>2</sub>O bzw. KCl (Werte in Klammern).

| Bodenhorizont  | <i>Calluna</i> -Heide | Birken-Kiefernwald | Eichen-Buchenwald |
|----------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| O <sub>L</sub> | 4,8 (3,5)             | 4,4 (4,0)          | 5,0 (4,2)         |
| O <sub>F</sub> | 4,2 (3,0)             | 3,8 (3,3)          | 4,2 (3,6)         |
| O <sub>H</sub> | 4,2 (3,0)             | 3,6 (2,9)          | 3,9 (3,2)         |
| A1             | 4,1 (3,0)             | 3,8 (3,0)          | 3,8 (3,1)         |
| A2             | 4,4 (3,3)             | 3,8 (3,1)          | 4,0 (3,4)         |

Trotz der morphologischen Unterschiede der Böden von *Calluna*-Heide, Birken-Kiefernwald einerseits und Eichen-Buchenwald andererseits sind die Differenzen im Bezug auf bodenchemische Parameter unerwartet gering. In allen Fällen zeigen die Profilsommen der effektiven Austauschkapazität (AK<sub>e</sub>) weniger Abhängigkeit vom Substrat als vom Humusgehalt der einzelnen Horizonte; der Anteil basischer Kationen (Ca, K, Mg) ist dabei sehr klein (Basensättigung < 10%); umgekehrt sind die Konzentrationen der potentiell

toxischen  $H^+$ - und Al-Ionen sehr hoch (DANNER 1990, LEUSCHNER, RODE & HEINKEN 1993). Auch die pH-Werte der Bodenhorizonte auf den drei Flächen verdeutlichen die extremen Bedingungen, wobei die niedrigsten Werte um  $pH(KCl) = 3,0$  in den  $O_H$ - und angrenzenden  $A_e$ -Horizonten erreicht werden. Eine Übersicht über die pH-Werte der organischen Auflage und des angrenzenden Mineralbodens gibt Tabelle 1 wieder.

## KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN

### 3.1 Versuchsdurchführung im Gelände (*litter bag* - Methode)

Untersuchungen zur Streuzersetzung reichen bis zum Beginn dieses Jahrhunderts zurück (HILL 1926, WAKSMAN & TENNEY 1927, MELIN 1928). Es wurden verschiedene Methoden für Labor und Freiland entwickelt, welche es erlauben, die Prozesse der Streuzersetzung zu beobachten: Kennzeichnung der Blattstreu mit Plastikmarkierungen (FRANKLAND 1966, zit. n. HOWARD & HOWARD 1974), Befestigung der Streu an Stöcken, Draht oder Schnur (HAYES 1965, zit. n. HOWARD & HOWARD 1974), radioaktive Markierung (MURPHY 1958, zit. n. HOWARD & HOWARD 1974) oder Platzierung der Streu in offenen Gefäßen auf dem Boden (JENNY et al. 1949, HOWARD & HOWARD 1974, JOERGENSEN & MEYER 1990). Am häufigsten wurde (und wird) eine Methode angewendet, bei der die Streu in Neylon-Netzen, sogenannte "*litter bags*", ausgebracht wird (BOCOCK & GILBERT 1957, zit.n. MELILLO et al. 1982, FOGEL & CROMACK 1977, BERG & STAAF 1980, MELILLO et al. 1982, YAVITT & FAHEY 1986 u.v.a.). Diese *litter bags* ermöglichen es, die Streu am Herkunftsort selbst unter den Bedingungen des natürlichen Standortes wieder auszulegen, wo die verschiedenen Zersetzer (je nach Maschenweite der *litter bags*) ungehinderten Zutritt zur Streu haben. Zu beliebigem Zeitpunkt können sie eingesammelt und die verbliebene Streu auf chemisch-physikalische Veränderungen untersucht werden.

Zielsetzung dieser Arbeit war, die Vorgänge der Streuzersetzung in den beiden Waldgesellschaften unter möglichst natürlichen Bedingungen zu verfolgen; deshalb wurde die beschriebene *litter bag*-Methode angewendet. Im Spätsommer 1993 wurden auf den Untersuchungsflächen große Kunststoffnetze zum Auffangen der Streu unter den vier bestandesbildenden Baumarten *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, *Betula pendula* und *Pinus sylvestris* ausgelegt. Die danach gefallenen Blätter bzw. Nadeln der genannten Arten wurden Anfang November 1993 eingesammelt; zusätzlich wurden Proben an gleicher Stelle von den  $O_F$ -Horizonten unter den vier Baumarten genommen (im Folgenden wird analog zum Begriff " $O_F$ -Streu" für die frische Streu der Begriff " $O_L$ -Streu" gebraucht, obwohl damit nicht die gesamte mehrjährige  $O_L$ -Lage gemeint ist). Die Streu wurde getrennt in großen Plastiksäcken 1-2 Tage bei ca. 8°C gelagert, um einen gleichmäßigen Wassergehalt innerhalb einer Streuart zu gewährleisten (was für die spätere

Berechnung des Gewichtsverlustes von Bedeutung war). Die Streu wurde anschließend nach Bestimmung des Frischgewichtes in die *litter bags* eingnäht, wobei die Blätter und Nadeln nicht nach Arten sortiert verarbeitet wurden, sondern in den am natürlichen Standort vorgefundenen Mischungsverhältnissen (s. Tab. 2). Die eingewogene Streumenge sollte einerseits für die Analysen ausreichen, andererseits durfte nur so viel Blattmaterial in den *litter bags* vorhanden sein, daß diese wieder problemlos in der entsprechenden  $O_L$ - oder  $O_F$ -Lage der Probeflächen unterzubringen waren (insbesondere sollte sich in den *litter bags* kein eigenes "Mikroklima" bilden können).

**Tab. 2:** Mischungsverhältnisse, eingewogene Trocken- u. Frischgewichte sowie Anfangswassergehalte der vier Streugrundproben (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; F=Buche, Q=Eiche, B=Birke, P=Kiefer).

| $O_L$ -Streu: | Verhältnis der Streuarten:   | Frischgew. [g]   | Trockengew. [g]  | H <sub>2</sub> O-Gehalt [%FG] |
|---------------|------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>Buche</b>  | F : Q = 9 : 1 ( $\pm 5\%$ )  | 10,07 $\pm$ 0,05 | 5,29 $\pm$ 0,13  | 90,2 $\pm$ 2,8                |
| <b>Eiche</b>  | Q : F = 3 : 2 ( $\pm 6\%$ )  | 12,06 $\pm$ 0,04 | 5,40 $\pm$ 0,24  | 123,3 $\pm$ 0,9               |
| <b>Birke</b>  | B : P = 9 : 1 ( $\pm 3\%$ )  | 12,07 $\pm$ 0,02 | 6,31 $\pm$ 0,07  | 91,3 $\pm$ 0,9                |
| <b>Kiefer</b> | P : B = 10 : 0 ( $\pm 0\%$ ) | 20,06 $\pm$ 0,03 | 12,51 $\pm$ 0,26 | 60,4 $\pm$ 2,2                |
| $O_F$ -Streu: |                              |                  |                  |                               |
| <b>Buche</b>  | —                            | 12,34 $\pm$ 0,24 | 3,16 $\pm$ 0,14  | 290,7 $\pm$ 6,9               |
| <b>Eiche</b>  | —                            | 12,23 $\pm$ 0,19 | 3,18 $\pm$ 0,09  | 285,2 $\pm$ 5,2               |
| <b>Birke</b>  | —                            | 6,46 $\pm$ 0,49  | 1,96 $\pm$ 0,16  | 229,3 $\pm$ 18,2              |
| <b>Kiefer</b> | —                            | 15,37 $\pm$ 0,32 | 5,09 $\pm$ 0,16  | 201,9 $\pm$ 4,6               |

Die verwendeten *litter bags* waren ca. 20 x 20 cm groß mit einer Maschenweite von 4 x 4 mm. Damit war die Maschenweite klein genug, um Verluste von Blattbruchstücken oder einzelnen Kiefernadeln zu verhindern, aber doch groß genug, um nicht nur Mikroorganismen Zutritt zur Streu zu gewähren, sondern auch der Makrofauna (Arthropoden, Anneliden usw.).

Anfang November wurden die *litter bags* auf den Versuchsflächen am Herkunftsort ausgebracht, indem sie (durch Holzstöckchen markiert) im zugehörigen Auflagehorizont abgelegt und mit der umliegenden Streu zugedeckt wurden (um eventuelle Austrocknungseffekte zu verhindern). Ein Teil der Streuproben wurde zurückbehalten, um chemisch-physikalischen Ausgangswerte zu ermitteln. Von den im Gelände ausgebrachten Proben wurden an fünf Terminen je 10 Parallelen jeden Streutyps entnommen und im

Labor analysiert. Von der ebenfalls gesammelten  $O_F$ -Streu wurde nur zu Beginn und am Schluß der Untersuchung Analysen aus jeweils 10 Parallelen vorgenommen, da hier keine kurzfristigen Veränderungen durch die Zersetzung zu erwarten waren (einzig bei der  $O_F$ -Streu der Birke wurde wegen des geringen Trockengewichtes nur mit 5 Parallelen gearbeitet).

Um den Einfluß der jeweiligen Streuart auf den Zersetzungsprozeß von den Auswirkungen der Standortbedingungen (durch Vegetation, Boden, Zersetzerfauna, Mikroklima usw.) unterscheiden zu können, wurden *litter bags* mit  $O_L$ -Streu zwischen den Flächen ausgetauscht: Buchen- und Eichenstreu wurden unter Kiefern und unter *Calluna* gebracht, Birken- und Kiefernstreu unter Buchen und unter *Calluna*. Diese Proben wurden ebenfalls am Ende der Untersuchungszeit analysiert. In Tabelle 3 sind die einzelnen Probetermine und die Art der analysierten Streuproben dargestellt.

**Tab. 3:** Probetermine, Untersuchungsdauer und Art der Streuprobe (F=Buche, Q=Eiche, B=Birke, P=Kiefer).

|                              |                                 |                         |                         |                         |                         |  |
|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| <b>Probetermin:</b>          | 4.11.93                         | 11.1.94                 | 2.3.94                  | 6.4.94                  | 17.5.94                 | 8.7.94   |
| <b>Versuchsdauer [Tage]:</b> | 0                               | 68                      | 118                     | 153                     | 194                     | 246  |
| <b>Probenart:</b>            | F, Q, B, P<br>( $O_L$ , $O_F$ ) | F, Q, B, P<br>( $O_L$ ) | F, Q, B, P<br>( $O_L$ ) | F, Q, B, P<br>( $O_L$ ) | F, Q, B, P<br>( $O_L$ ) | F, Q, B, P,<br>( $O_L$ , $O_F$ ,<br>Austausch) |

## 3.2 Analyseverfahren

### 3.2.1 Bestimmung des Gewichtsverlustes

Grundlage zur Bestimmung des Gewichtsverlustes der einzelnen Streuproben während der Zersetzung waren die vor Versuchsbeginn ermittelten Frisch- und Trockengewichte der Ausgangsproben und die daraus resultierenden Wassergehalte. Auf Grund der zweitägigen Lagerung der Proben in Plastiksäcken war ein einheitlicher Wassergehalt innerhalb der Proben gewährleistet, so daß ein mittlerer Anfangswassergehalt für jede Streuart ermittelt werden konnte. Nach Abzug des Anfangswassergehaltes vom jeweils in die *litter bags* eingewogenen Frischgewicht ergab sich für jede Streuprobe ein

Anfangstrockengewicht. Die Differenz von Anfangstrockengewicht und Trockengewicht zum jeweiligen Probenahmetermin ergab den Gewichtsverlust während der Zersetzung in g TG. Daraus konnte der prozentuale Anteil der übriggebliebenen Masse bestimmt werden, wobei das Trockengewicht der Ausgangsproben vor Versuchsbeginn gleich 100% gesetzt wurde.

Zur Bestimmung der Trockengewichte wurden die Proben generell von anorganischen Bestandteilen, eingewachsenen Wurzeln und gegebenenfalls vorhandenen Tieren befreit, 24 Stunden bei 50°C und anschließend 24 Stunden bei 105°C getrocknet.

Für alle weiteren Analysen wurden die Streuproben in einer Schwing-Scheiben-Mühle (Fa. Siebtechnik) staubfein zermahlen.

### **3.2.2 Bestimmung des Kohlenstoff- und Stickstoffgehaltes**

Die Bestimmung der Gehalte an Kohlenstoff und Stickstoff wurde an einem C/N-Analyser durchgeführt (Na-1500, Fa. Carlo Erba Strumentazione), der die Bestimmung beider Parameter im gleichen Arbeitsgang erlaubt. Dabei werden 2-3 mg der gemahlten Proben in Reinzinnkapseln eingewogen. Je Probendurchgang werden außerdem eine Leerkapsel als Blindwert, sowie je eine Kapsel mit  $\text{CaCO}_3$  (als C-Standard) und Atropin (als C- und N-Standard) mitanalysiert. Im C/N-Analyser werden die Proben unter Sauerstoff-Zufuhr bei 1020°C verbrannt, wobei nur die Gase  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{H}_2\text{O}$  übrigbleiben. Diese Gase werden über ein Kupfer-Reduktionsrohr geleitet, wobei die Stickoxide  $\text{NO}_x$  zu  $\text{N}_2$  reduziert werden. In einer Wasserfalle aus hygroskopischem Magnesiumperchlorat wird entstandenes  $\text{H}_2\text{O}$  entfernt. Die verbliebenen Gase  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  werden schließlich in einer Gaschromatographiesäule durch das Trägergas Helium getrennt ( $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  besitzen unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten); über einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor wird die Differenz zwischen reinem Trägergas (Helium) und dem Meßgas ermittelt und ergibt die relativen Mengen an  $\text{N}_2$  und  $\text{CO}_2$ . Ein angeschlossener Integrator gibt diese Mengen als Peaks aus und berechnet deren Flächeninhalt. Die absoluten C- bzw. N-Gehalte werden über einen Berechnungsfaktor relativ zu den Standards und in Bezug zur Einwaagemenge bestimmt.

Die so erhaltenen C- und N-Gehalte (in %) wurden in mmol C / g TG bzw.  $\mu\text{mol N} / \text{g TG}$  umgerechnet; das C/N-Verhältnis wurde jedoch aus Gründen der Vergleichbarkeit der Daten mit Angaben anderer Autoren in g / g berechnet.

### 3.2.3 Bestimmung des Phosphorgehaltes

Der Phosphorgehalt der Proben wurde nach der modifizierten Methode von GERICKE & KURMIES (1952) bestimmt. Zuvor mußten die gemahlene Proben in einem Druckaufschlußverfahren vollständig in Lösung überführt werden. Dazu wurden 100 mg des gemahlene Probenmaterials in 50ml-PTFE-Gefäße eingewogen und zusammen mit 5 ml 65%iger  $\text{HNO}_3$  in einer Druckaufschlußapparatur (Fa. Berghoff) über eine Dauer von 3,5 Stunden bei  $175^\circ\text{C}$  naß verascht. Die so gewonnene Aufschlußlösung wurde anschließend in Meßkolben überführt und mit demin. Wasser auf 25 ml aufgefüllt. Je Aufschlußserie wurden zur Kontrolle zwei Blindproben (reine  $\text{HNO}_3$ ) mitverarbeitet.

Die Bestimmung des Phosphorgehaltes erfolgt durch kolorimetrische Messung eines Molybdat-Phosphat-Komplexes am Spektralphotometer. Dazu wurden 5 ml der Aufschlußlösung, 5 ml 0,5n  $\text{HNO}_3$  und 3 ml Molybdat-Vanadat-Lösung in ein Reagenzglas pipettiert. Zur Bildung des gelbgefärbten Komplexes wurden die Proben nach kräftigem Schütteln mindestens eine Stunde stehengelassen. Anschließend wurde nach erneutem Schütteln die Extinktion des Komplexes am Durchfluß-Spektralphotometer (UV-120-02, Fa. Shimadzu) bei einer Wellenlänge von 440 nm gegen demin. Wasser gemessen.

Reagenzien: - Molybdat-Vanadat-Lösung: 0,25%ige  $\text{NH}_4\text{VO}_3$ - und 5%ige  $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ -Lösung im Verhältnis 1:1  
- 0,5n  $\text{HNO}_3$   
- Phosphor-Eichlösung: 1000ppm  $\text{KHPO}_4$ -Lösung (4,394g getrocknetes  $\text{KHPO}_4$  in 1 l bidest. Wasser); verdünnt zu einer Eichreihe aus 0, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 u. 30 ppm (mit einer  $\text{HNO}_3$ -Konz. von 1:5).

Die Berechnung der Phosphorgehalte erfolgte über die Geradengleichung einer Eichreihe (s.o.), von der ebenfalls je 5 ml mit 5 ml 0,5n  $\text{HNO}_3$  und 3 ml Molybdat-Vanadat versetzt und am Spektralphotometer gemessen wurden.

Die Messungen wurden zusätzlich dadurch kompliziert, daß die Druckaufschlüsse selbst schon eine gelbe Eigenfärbung besaßen, die im gleichen Wellenlängenbereich zu einer Extinktion führten. Deshalb wurde jede Probe nochmals im gleichen Verfahren analysiert, jedoch ohne Zusatz des Komplexbildners; das entsprechende Volumen (3 ml) wurde in diesem Fall durch bidest. Wasser ersetzt.

Der endgültige Phosphorgehalt in der Aufschlußlösung ergab sich also nach Umrechnung der Extinktion über die Eichreihe in ppm durch Abzug der Blindprobe und der Eigen-



färbung vom Probenwert. Um den endgültigen Phosphorgehalt der jeweiligen Streuprobe zu erhalten, mußte danach noch die Verdünnung und die Einwaagemenge des Druckaufschlusses berücksichtigt werden. Die so erhaltenen Analysewerte (mg P / g TG) wurden in  $\mu\text{mol} / \text{g TG}$  umgerechnet; C/P-Verhältnisse werden analog zu den C/N-Verhältnissen jedoch in g / g angegeben.

### 3.2.4 Bestimmung der Kationengehalte

Alle Streuproben wurden auf ihre Gehalte an K, Mg, Ca, Mn und Fe untersucht. Die Bestimmung erfolgte dabei aus den Aufschlußlösungen (s. Kap. 3.2.3) mit einem Flammen-Atomabsorption-Spektrometer (AAS). Je nach Konzentration des zu messenden Elementes wurden die Proben entsprechend mit bidest. Wasser verdünnt, um in den optimalen Meßbereich des AAS zu gelangen; zusätzlich wurde je nach Element ein Ionenpuffer bzw. Befreiungsganz zugesetzt (s. Tab. 4). Die jeweiligen Meßbedingungen wurden dem "Methods Manual" des AAS (SpectrAA-30, Fa. Varian) entnommen. Die ermittelten Kationengehalte wurden in  $\mu\text{mol} / \text{g TG}$  umgerechnet, C/Kationen-Verhältnisse jedoch in g / g angegeben (s. Kap. 3.2.2).

Tab. 4: Meßbedingungen am AAS zur Bestimmung der Gehalte an K, Mg, Ca, Mn und Fe.

|                  | Lichtquelle                    | Wellenlänge [nm] | Brenngas                  | Lösungszusatz                            | Meßbereich [ $\mu\text{g/ml}$ ] |
|------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|--|---------------------------------|
| <b>Kalium</b>    | Singlelement-Hohlkathodenlampe | 766,5            | Luft/Acetylen             | CsCl (0,1%)                              | 0-1,0                           |
| <b>Magnesium</b> | Multielement-Hohlkathodenlampe | 285,2            | Luft/Acetylen             | La(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (0,1%) | 0-0,4                           |
| <b>Calcium</b>   | Multielement-Hohlkathodenlampe | 422,7            | N <sub>2</sub> O/Acetylen | KCl (0,2%)                               | 0-3,0                           |
| <b>Mangan</b>    | Singlelement-Hohlkathodenlampe | 279,5            | Luft/Acetylen             | —  | 0-3,0                           |
| <b>Eisen</b>     | Singlelement-Hohlkathodenlampe | 248,3            | Luft/Acetylen             | —  | 0-5,0                           |

### 3.2.5 Bestimmung des Ligningehaltes

Lignin gilt als zersetzungshemmender Inhaltsstoff der Streu und wird daher oft bei entsprechenden Untersuchungen mitgemessen (COLDWELL & DELONG 1950, FOGEL & CROMACK 1977, MEENTEMEYER 1978, BERG & STAAF 1980, MELILLO et al. 1982, ZIEGLER et al. 1986, TAYLOR et al. 1989). Da Lignin als chemisch genau definierte Substanz nicht existiert, sondern ein Polymer aus Polyphenolen wie Sinapyl-, Cumaryl- und Coniferylalkohol ist, deren genaue chemische Zusammensetzung dabei von Pflanzenart zu Pflanzenart variiert, ist die Entwicklung allgemein anwendbarer Extraktionsmethoden schwierig. Bei der Untersuchung der Ligningehalte im Laufe von Zersetzungsprozessen kommt hinzu, daß die hochmolekularen Polyphenole während des Streuabbaus durch Umlagerungs- und Umbauprozesse gravierenden Veränderungen unterworfen sind (ZIEGLER et al. 1986).

Bei den meisten Untersuchungen hat sich eine Bestimmungsmethode durchgesetzt, bei der die Streu zuerst einer Extraktion (mit verschiedenen Extraktionsmitteln) unterworfen und anschließend durch Schwefelsäure hydrolysiert wird. Nach dieser Prozedur bleiben nur noch wenige hochmolekulare Substanzen übrig, die im wesentlichen die Lignin-Polyphenole, aber auch einige andere phenolische Stoffe darstellen. Die so extrahierte Fraktion wird als "Klason-Lignin" bezeichnet (BOCOCK & GILBERT 1957, zit.n. MELILLO et al. 1982, BERG, HANNUS et al. 1982, YAVITT & FAHEY 1986, TAYLOR et al. 1989). Bei der vorliegenden Untersuchung wurde diese Methode zur Bestimmung des "Klason-Lignins" nach den Angaben von ALLEN et al. (1974) angewendet, wobei allerdings die beschriebenen Extraktionsschritte vor der sauren Hydrolyse in Ermangelung der dazu notwendigen Laborausstattung nicht durchgeführt werden konnten. Von den gemahlene Streuproben wurden 500 mg in 2000ml-Bechergläser eingewogen und jeweils mit 18 ml 72%iger Schwefelsäure versetzt. Nach gründlichem Rühren wurden die Proben zwei Stunden stehen gelassen. Danach wurde die Konzentration durch Auffüllen auf 400 ml mit demin. Wasser auf ca. 3% verringert und die Proben vier Stunden gekocht. Die Volumenverringerung durch verdampfendes Wasser wurde dabei von Zeit zu Zeit durch Wasserzugabe ausgeglichen. Nach dem Abkühlen der Proben wurden diese über aschefreie Schwarzbandfilter abfiltriert und zweimal mit heißem demin. Wasser nachgespült. Die Filterpapiere mit der übriggebliebenen Streusubstanz wurden dann mindestens 12 Stunden bei 105°C getrocknet. Der prozentuale Gehalt an "Klason-Lignin" konnte somit aus der Differenz des Gewichtes des getrockneten Filterpapiers (inkl. verbliebener Streusubstanz) und des Gewichtes des Filterpapiers vor der Filtrierung im Verhältnis zur jeweils eingewogenen Streumenge errechnet werden. Zusätzlich mußte

jedoch dieser Wert mit einem Faktor korrigiert werden (3,5% des Filterpapiergewichtes), da das Filterpapier beim Abfiltrieren der aufgekochten Proben durch die 3%ige Säure selbst auch angegriffen wurde. Die prozentuale Gehalte an Lignin wurden in mg / g TG umgerechnet.

### 3.2.6 Bestimmung des Wassergehaltes der organischen Auflage

Neben der Temperatur ist der Wasserhaushalt des Mediums ein entscheidender mikroklimatischer Faktor bei der Streuzersetzung. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zu den laufenden Beprobungen der litter bags in jeder dritten Woche des Untersuchungszeitraumes der Wassergehalt der organischen Auflagehorizonte unter den vier untersuchten Baumarten Buche, Eiche, Birke und Kiefer bestimmt. Dazu wurden mit einem Wurzelbohrer ( $\varnothing = 5,5$  cm) in jeweils acht Parallelen die  $O_L$ -,  $O_F$ - und  $O_H$ -Schichten beprobt, wobei eventuell vorhandene Moospolster entfernt wurden. Diese Proben wurden in Gläsern verschlossen und im Labor auf ihr Frisch- und Trockengewicht untersucht und der daraus resultierende Wassergehalt in % des Trockengewichtes berechnet.

### 3.2.7 Statistische Auswertung

Wie oben erwähnt wurden je Probetermin und Streuvariante 10 Parallelen untersucht. Aus diesen wurde das arithmetische Mittel  $\bar{x}$  und die Standardabweichung  $s$  der Stichprobe gemäß folgender Formeln berechnet:

$$\bar{x} = \sum(x_i) / n, \quad s = [ \sum(x_i - \bar{x})^2 / (n-1) ]^{1/2},$$

wobei  $x_i$  = Einzelbeobachtung und  $n$  = Stichprobenumfang.

In wenigen Einzelfällen fielen Meßwerte durch ihre starke Abweichung von den restlichen Parallelen auf (sogenannte "Ausreißer"); hier schien es teilweise gerechtfertigt, diese Werte bei der Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung nicht zu berücksichtigen. Dies war der Fall, wenn

- (a) es sich um einen einzelnen Wert innerhalb der 10 Parallelen handelte,
- (b) der Wert mindestens 100% größer als der Mittelwert war,
- (c) die Stichprobe womöglich bei mehreren Meßparametern in dieser Weise auffiel.

In diesem speziellen Fall konnte davon ausgegangen werden, daß die Stichprobe nicht

derselben Grundgesamtheit wie der Rest der Parallelen angehört. Übertragen auf die Probenbehandlung kann dies insbesondere durch das Übersehen von in die *litter bags* eingewanderten Tieren der Fall sein, was seinen Niederschlag besonders deutlich in einem erhöhten Kationengehalt findet.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen aller ermittelten Meßparameter sind im Anhang dargestellt (Tab. A 1 - A 14).

Da zur Interpretation von Unterschieden in den gemessenen Parametern zwischen den verschiedenen Streuproben die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen nicht ausreichend sind, wurden die Meßwerte mit statistischen Testverfahren geprüft, die mit dem Computerprogramm SAS durchgeführt wurden. Zuerst mußte dabei getestet werden, ob die erfaßten Meßdaten normalverteilt waren oder nicht. Dazu wurde ein Anpassungstest von SHAPIRO & WILK angewendet. Dieser Test prüft, welche Stichprobenreihen nicht normalverteilt sind. Danach ergab sich ein Anteil an nicht normalverteilten Stichprobenreihen von 11%, das heißt ein Anteil von 89%, für den eine Normalverteilung angenommen werden durfte. Um die restlichen 11% nicht-normalverteilter Stichprobenreihen ebenfalls in die Testverfahren einbeziehen zu können, wurde eine Transformation der Meßwerte durch einfache Logarithmierung zur Basis  $e$  durchgeführt.

Bei der vorliegenden Untersuchung galt es, sowohl Unterschiede zwischen den Streuart an demselben Probetermin, als auch Unterschiede innerhalb einer Art zu verschiedenen Probeterminen zu erfassen; die Meßwerte sind demnach abhängig von den beiden Faktoren *Art* und *Zeit*. Zum Testen signifikanter Unterschiede wurde deshalb zunächst eine zweifaktorielle Varianzanalyse (für unverbundene balancierte Stichproben) durchgeführt. Diese berechnet den durch die beiden Faktoren *Art* und *Zeit* erklärbaren Varianzanteil an der gesamten Varianz der Meßwerte eines Parameters. Außerdem wird der einzelne Anteil jeder der beiden Faktoren an der Gesamtvarianz, sowie der Anteil von sogenannten "Kreuzeffekten", also von Effekten durch gegenseitige Beeinflussung der Faktoren errechnet.

Aus den Ergebnissen der zweifaktoriellen Varianzanalyse wird ersichtlich, ob ein ermittelter signifikanter Unterschied zwischen zwei gemessenen Mittelwerten tatsächlich statistisch aussagekräftig oder nur zufällig ist.

Anschließend wurde zur Ermittlung der signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Mittelwerten der Meßwerte ein Test zum paarweisen Vergleich von Mittelwerten nach SCHEFFÉ durchgeführt. Dabei wurden zum einen je Streuart paarweise die Probeterminen gegeneinander getestet, zum anderen je Probetermin die Streuart paarweise vergli-

chen. Der Test wurde für alle Mittelwertsvergleiche einheitlich auf dem Signifikanzniveau  $p < 0,05$  durchgeführt. Zusätzlich wurde durch eine einfaktorielle Varianzanalyse die Irrtumswahrscheinlichkeit für den Einfluß des paarweise verglichenen Faktors auf den jeweils anderen Faktor innerhalb eines Meßparameters berechnet.

Die Ergebnisse der zweifaktoriellen und einfaktoriellen Varianzanalysen sowie der Mittelwertsvergleiche sind im Anhang angegeben (Tab. A 15 - A 27). Auf die Kennzeichnung statistisch signifikanter Unterschiede in den Grafiken des Kapitels 4 (Ergebnisse) wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet; statt dessen sind dort die Standardabweichungen der Mittelwerte dargestellt. Auf statistisch nachgewiesene Unterschiede wird deshalb im Text eingegangen.

### **3.2.8 Berechnung der Veränderung der Substanzgehalte durch die Streuzersetzung**

Die durch chemischen Analysen im Labor ermittelten Substanzgehalte der Streuproben wurden in mg/g TG und  $\mu\text{mol/g TG}$  berechnet. Damit waren Angaben über die Konzentration der jeweiligen Substanz zu einem bestimmten Probetermin gegeben. Diese konnten jedoch nicht als Parameter für die Veränderung der Nährstoffgehalte in der Streu während der Untersuchungszeit dienen, da sich durch den Zersetzungsprozess naturgemäß die Bezugsgröße *Trockengewicht* mitverändert. Deshalb wurde die ermittelte Nährstoffkonzentration mit den zum jeweiligen Zeitpunkt im *litter bag* vorhandenen Trockengewichten multipliziert und ergab damit eine Angabe des gesamten Substanzvorrates in  $\mu\text{mol/litter bag}$ , was dadurch ermöglicht wurde, daß vor Versuchsbeginn in jedem *litter bag* das gleiche Trockengewicht vorhanden war (je Streuart). Auf diese Weise konnte die tatsächliche Veränderung der Elementvorräte während des Zersetzungsprozesses betrachtet werden. Zur übersichtlicheren Darstellung wurden die Elementvorräte ( $\mu\text{mol/litter bag}$ ) zu Versuchsbeginn gleich 100% gesetzt und die Veränderung der Vorräte an den darauffolgenden Probeterminen prozentual zu diesem Anfangsvorräten angegeben. Um Mißverständnissen vorzubeugen, muß betont werden, daß der Begriff "Vorrat" in der beschriebenen Weise bei der Darstellung der Ergebnisse dient, um die Gesamtmenge der jeweiligen Inhaltsstoffe in den *litter bags* zu beschreiben. Er ist nicht identisch mit dem Begriff "Nährstoffvorräte" beispielsweise der gesamten organischen Auflage oder einzelner Horizonte, wie er in der Diskussion (Kap. 5) im Zusammenhang mit der Nährstoffnachlieferung innerhalb des Ökosystems verwendet wird.

## KAPITEL 4: ERGEBNISSE

### 4.1 Wassergehalt der organischen Auflage

Abbildung 3 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf des Wassergehaltes in den organischen Auflage-schichten auf der Eichen-Buchenfläche und der Birken-Kiefernfläche. Von November bis Anfang April sind die organischen Horizonte gut mit Wasser versorgt. Ab Mai machen sich die steigenden Temperaturen und die geringeren Niederschläge (s. Kap. 2.2, Abb. 2) in einer deutlichen Abnahme der Wassergehalte bemerkbar; zwar tritt Ende Mai / Anfang Juni eine kurzzeitige Verbesserung der Situation ein, zum Juli hin nehmen die Gehalte allerdings wieder stark ab. Die Werte sind mit den in den vorhergehenden Jahren ermittelten Gehalten (siehe LEUSCHNER 1994) vergleichbar. Während der Jahreszeiten mit guter Wasserversorgung liegen die Gehalte um 200% des Trockengewichtes oder darüber, während in den trockeneren Jahresabschnitten die Gehalte auf ca. 100% oder darunter absinken.

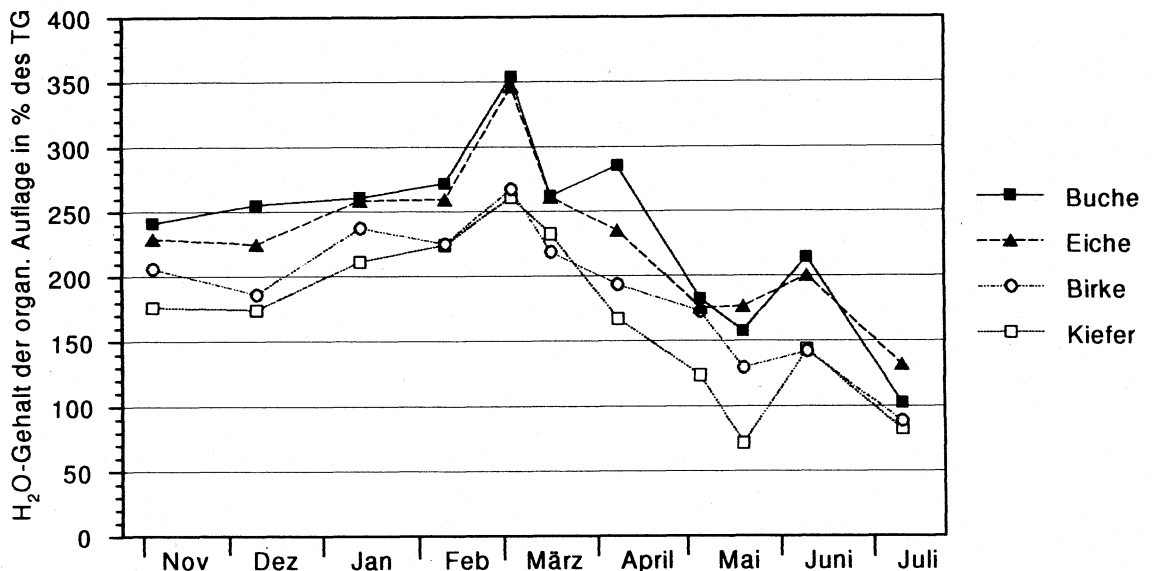


Abb. 3: Jahreszeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der organischen Auflage ( $O_L$ -,  $O_F$ - u.  $O_H$ -Lage) unter Buche, Eiche, Birke und Kiefer von November '93 bis Juli '94

Der Wassergehalt in der organischen Auflage der beiden Waldtypen unterscheidet sich deutlich: im Eichen-Buchenwald besitzt die organische Auflage zu allen Jahreszeiten höhere Wassergehalte im Birken-Kiefernwald; in letztgenanntem wird der Extremwert von ~70% im Mai bei der Kiefernstreu gemessen.

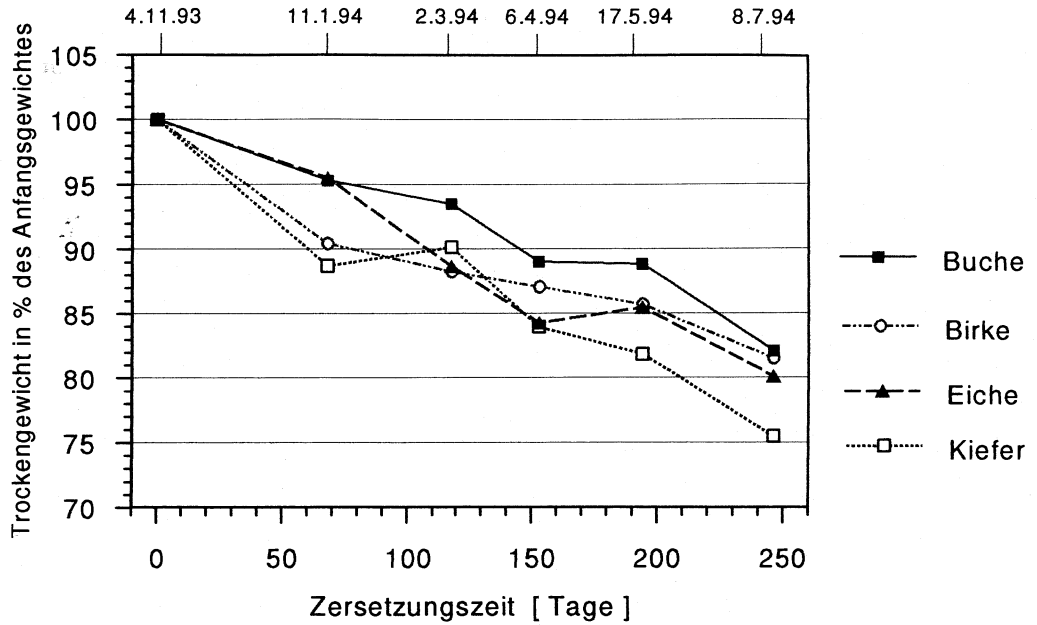
## 4.2 Gewichtsverlust und Kohlenstoffveratmung

### 4.2.1 Gewichtsverlust

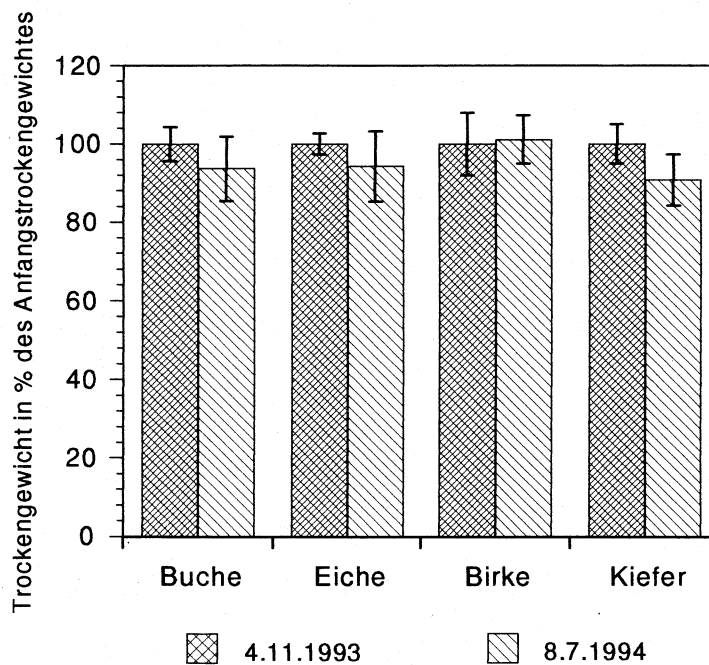
Der Verlauf von Zersetzungsprozessen zeigt sich am unmittelbarsten in der Geschwindigkeit und dem Ausmaß der Gewichtsabnahme des organischen Materials. In den Abbildungen 4 und 5 ist die Veränderung des Gewichtes der  $O_L$ - und  $O_F$ -Streu der vier Arten relativ zum Anfangsgewicht dargestellt. Nach der Untersuchungsdauer von 246 Tagen zeigt bei der  **$O_L$ -Lage** die Kiefernstreu den stärksten Abbau, die drei Laubstreuarten wurden demgegenüber um 5-7% weniger abgebaut. Die Abbauraten von Buchen- und Birkenstreu einerseits und der Kiefernstreu andererseits unterscheiden sich dabei signifikant. Der Zersetzungsprozeß setzt schon während der ersten Untersuchungsphase bei allen vier Streuarten ein, wobei der Unterschied zum Anfangsgewicht bei Birke und Kiefer signifikant ist. Bei allen vier Streuarten ist der Verlauf des Gewichtsverlustes während des gesamten Untersuchungszeitraums auffallend gleichmäßig.

Gegenüber der  $O_L$ -Streu zeigt die  **$O_F$ -Streu** deutlich geringere Gewichtsverluste nach 246 Tagen (Abb. 5). Die Unterschiede zum Anfangsgewicht sind bei Buchen-, Eichen- und Kiefernstreu gesichert, bei der Birkenstreu ist dagegen eine Gewichtsabnahme statistisch nicht belegbar. Ebenfalls sind Unterschiede zwischen den vier Arten am Ende der Untersuchung nicht abzusichern.

Der **Austausch** von  $O_L$ -Streu zwischen den drei Untersuchungsflächen läßt ebenfalls signifikante Unterschiede im Gewichtsverlust der vier Streuarten feststellen (Abb. 6): Die drei Laubstreuarten zeigen eine Tendenz zu verringertem Abbau vom Buchen- über den Kiefernstandort zur *Calluna*-Heide. Bei der Eichenstreu läßt sich diese Tendenz anders als bei der Buchen- und Birkenstreu nicht absichern. Deutlich anders sehen die Verhältnisse bei der Kiefernstreu aus. Hier hat die größte Gewichtsabnahme am Kiefernstandort selbst stattgefunden: auf dem Buchen- und *Calluna*-Standort verlor die Kiefernstreu mit 25% bzw. 31% signifikant weniger an Gewicht als am Kiefernstandort.

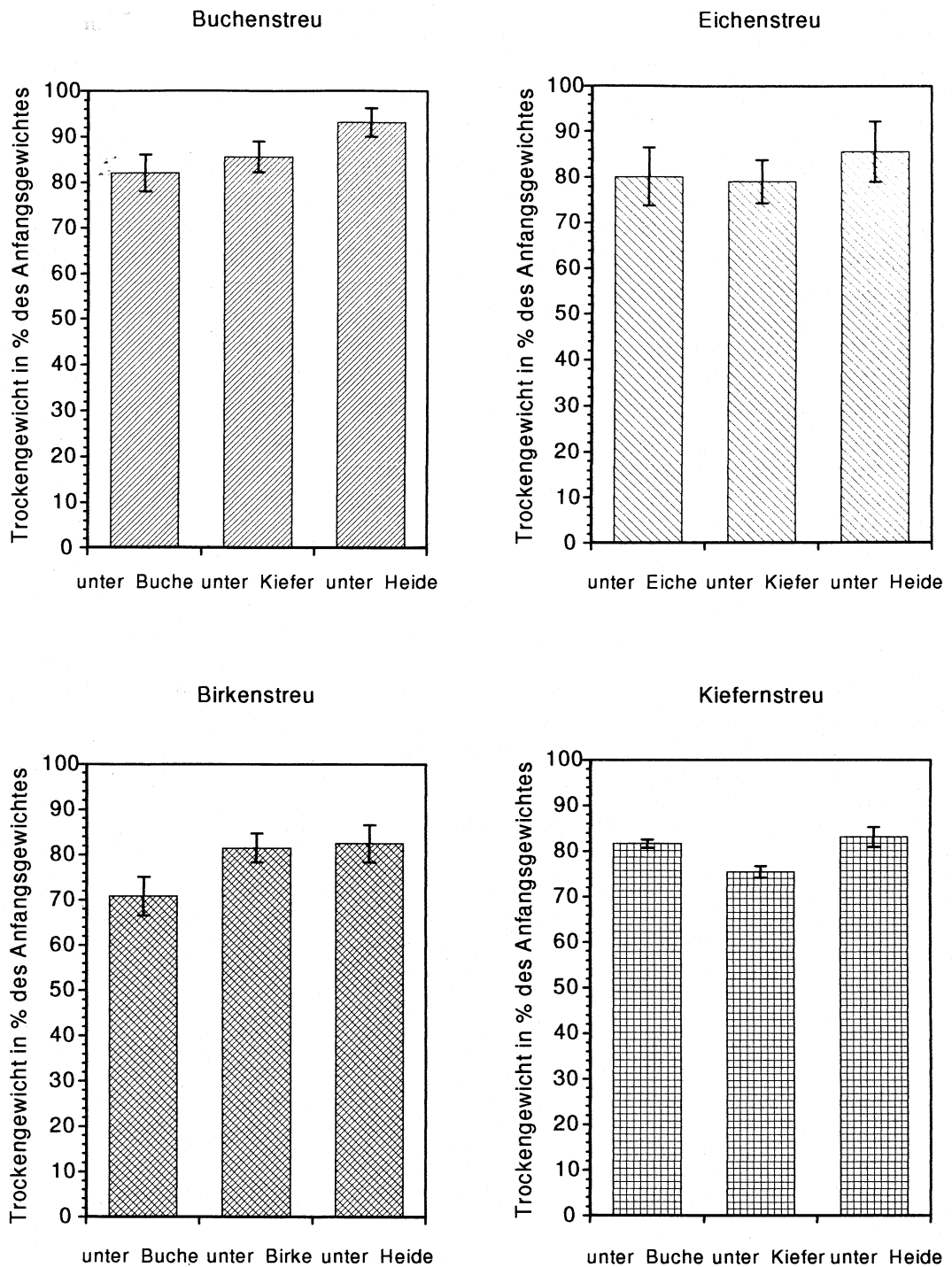


**Abb. 4:** Veränderung des Trockengewichtes der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsgewicht; bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 5:** Veränderung des Trockengewichtes der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsgewicht; bei Lagerung am Herkunftsort





**Abb. 6:** Trockengewicht der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsgewicht (Austauschversuche)

## 4.2.2 Kohlenstoffveratmung

Kohlenstoff besitzt von allen Inhaltsstoffen der Streu den größten prozentualen Anteil am Trockengewicht. In Tabelle 5 sind die Kohlenstoffkonzentrationen der  $O_L$ - und  $O_F$ -Streu aller vier Arten vor und nach 246 Tagen Inkubation am Herkunftsort wiedergegeben.

Tab. 5: Kohlenstoffkonzentration der vier Streuarten ( $O_L$ - und  $O_F$ -Lage) vor und nach 246 Tagen Lagerung am Herkunftsort (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, in mmol / g TG).

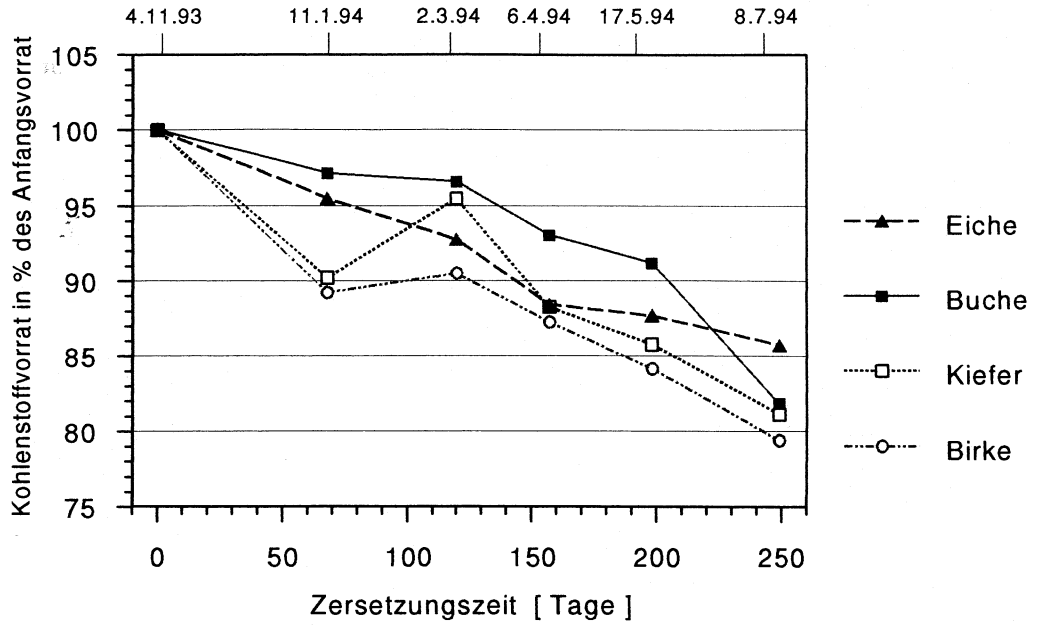
| Streuart | $O_L$ : vor Abbau | $O_L$ : nach Abbau | $O_F$ : vor Abbau | $O_F$ : nach Abbau |
|----------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| Buche    | 41,08 $\pm$ 0,37  | 41,02 $\pm$ 0,38   | 40,53 $\pm$ 0,36  | 40,43 $\pm$ 0,53   |
| Eiche    | 41,86 $\pm$ 0,80  | 43,04 $\pm$ 0,54   | 40,01 $\pm$ 0,42  | 41,34 $\pm$ 1,23   |
| Birke    | 45,64 $\pm$ 0,18  | 44,66 $\pm$ 0,68   | 42,52 $\pm$ 1,23  | 43,42 $\pm$ 1,15   |
| Kiefer   | 44,01 $\pm$ 0,68  | 47,33 $\pm$ 0,27   | 44,27 $\pm$ 0,73  | 45,26 $\pm$ 0,29   |

Die angegebenen Werten zeigen deutliche Unterschiede zwischen den vier Arten: Kiefern- und Birkenstreu der  $O_L$ -Lage weisen dabei signifikant höhere Konzentrationen als Buchen- und Eichenstreu auf. Eine auffällige Veränderung der C-Konzentration nach 246 Tagen ist bei keiner der Streuarten festzustellen, was darauf hindeutet, daß während der Zersetzung Kohlenstoffschwund und Gewichtsverlust proportional zueinander verlaufen sind. Die Veränderungen im C-Gehalt schwanken zwischen 0,8% (Buche) und 7,0% (Kiefer).

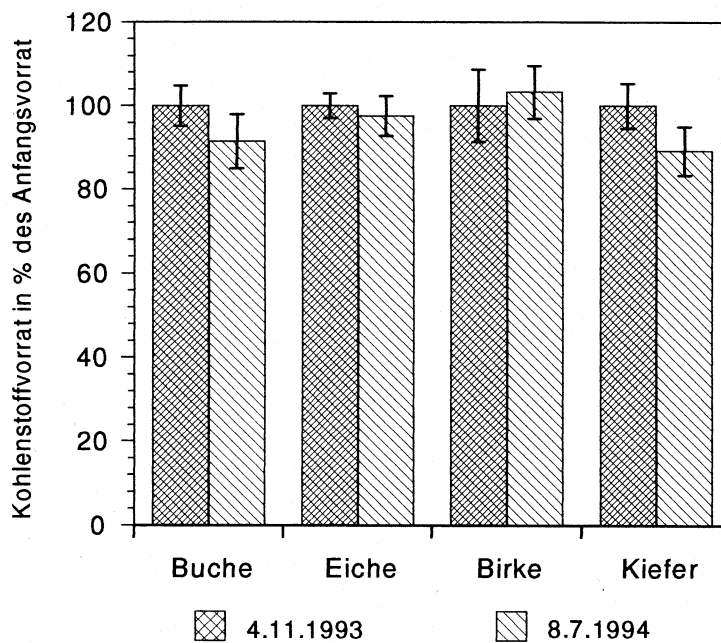
Bei der  $O_F$ -Streu zeigt sich ein ganz ähnliches Bild. Wiederum treten signifikante artspezifische Unterschiede in den Kohlenstoffkonzentrationen auf (außer zwischen Buche und Eiche), während die zeitlichen Veränderung im Zersetzungsverlauf gering sind: maximale Veränderung von 3,2% weist die Eichenstreu auf.

Die Veränderung der prozentualen Kohlenstoffvorräte verläuft dementsprechend ähnlich wie der Gewichtsabbau (Abb. 7 und 8). Kennzeichnend sind bei allen vier Streuarten der  $O_L$ -Lage eine gleichmäßige Abgabe während der Untersuchungszeit. Ebenso wie beim Gewichtsverlust zeigen Birken- und Kiefernstreu während der ersten Monate einen signifikant größeren Kohlenstoffschwund als Buchen-/Eichenstreu (der Unterschied zwischen Eiche und Kiefer ist nicht abgesichert). Am Ende der Inkubationszeit weist die Eichenstreu den geringsten C-Verlust aller vier Arten auf, wobei nur der Unterschied zwischen Eiche und Birke statistisch abgesichert ist.

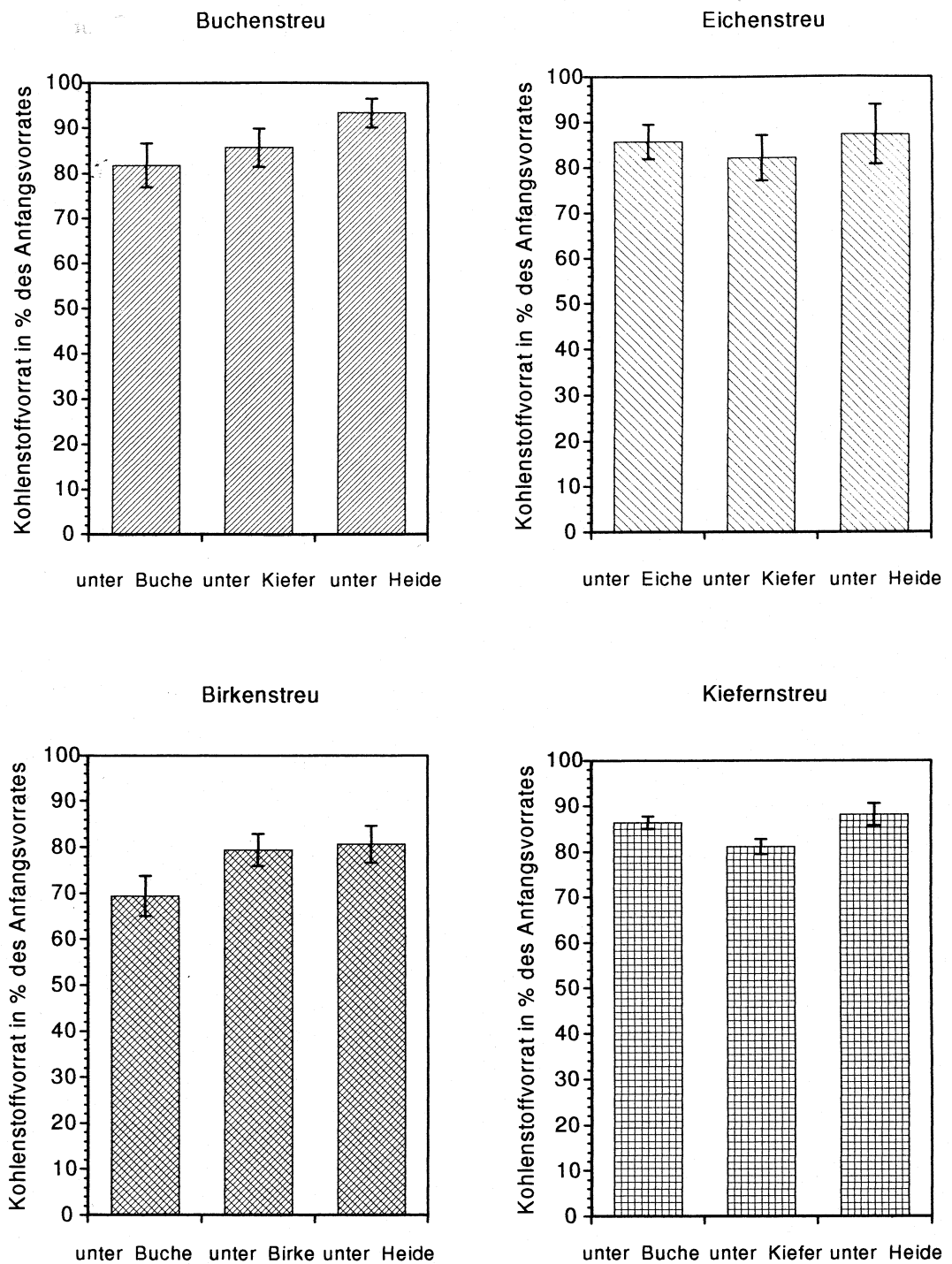
Die  $O_F$ -Streu zeigt analog zum Gewichtsverlust nur noch geringe Veränderungen der prozentualen Kohlenstoffvorräte innerhalb der 246tägigen Untersuchungszeit, die nur bei



**Abb. 7:** Veränderung des Kohlenstoffvorrates der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 8:** Veränderung des Kohlenstoffvorrates der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 9:** Kohlenstoffvorrat der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat (Austauschversuche)

Buchen- und Kiefernstreu abgesichert sind. Unterschiede zwischen den einzelnen Arten sind ebenfalls schwach ausgeprägt und nur zwischen Birken- und Buchenstreu, Kiefern- und Eichenstreu sowie zwischen Kiefern- und Birkenstreu signifikant.

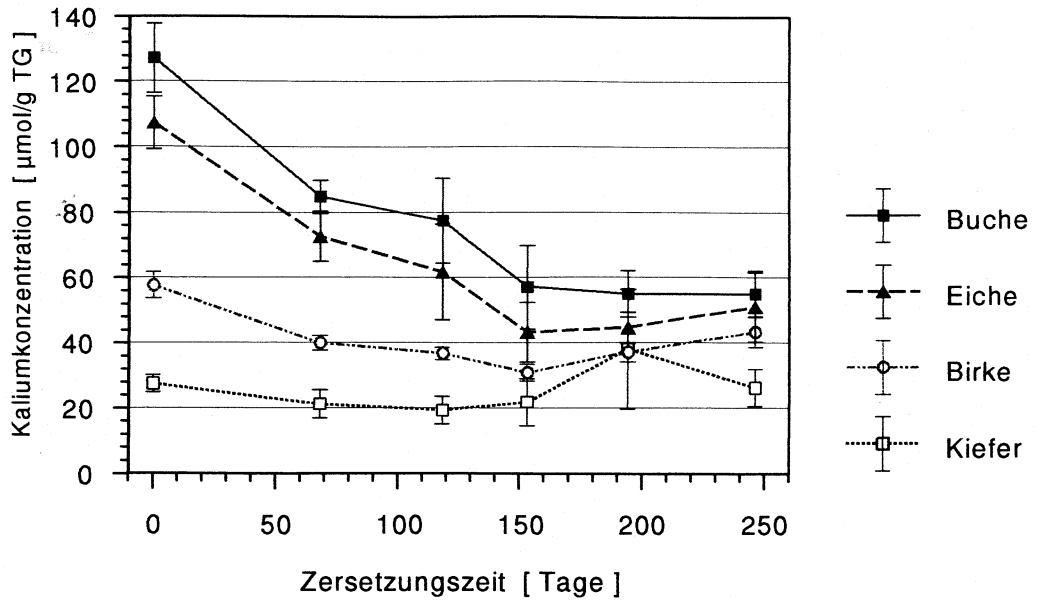
Auch der Vergleich der Untersuchungsflächen durch die **Austauschversuche** (Abb. 9) ergibt das gleiche Bild wie für den Gewichtsabbau: die Buchen- und Birkenstreu zeigt vom Buchen- über den Kiefern- zum Heidestandort eine signifikant verringerte C-Freisetzung; bei der Eichenstreu kann eine Tendenz nicht abgesichert werden. Die Kiefernstreu weist am eigenen Herkunftsort einen signifikant größeren Kohlenstoffverlust auf als am Buchenstandort und auf der Heide.

### **4.3 Veränderung der Kationengehalte**

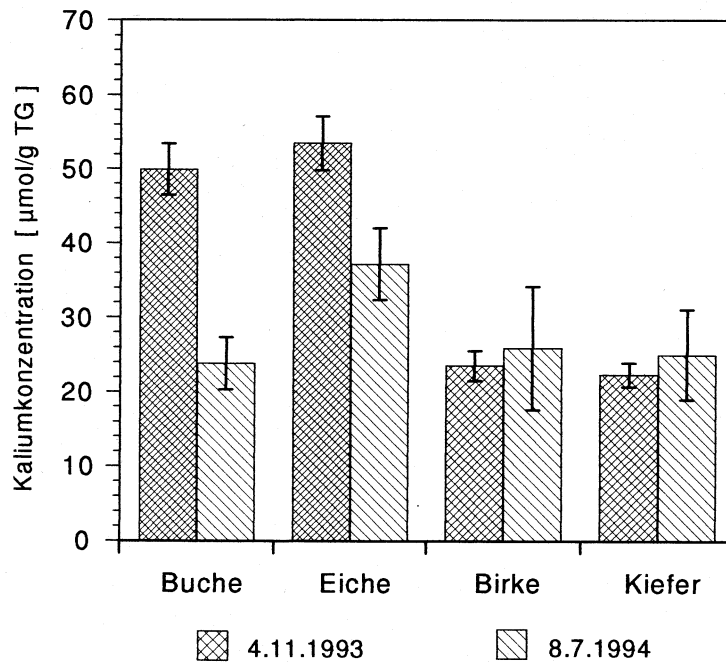
#### **4.3.1 Kalium**

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Veränderung der Kaliumkonzentrationen von  $O_L$ - und  $O_F$ -Streu der vier Baumarten während des Untersuchungszeitraumes. Bei der  **$O_L$ -Streu** fallen die großen, statistisch signifikanten Unterschiede in der Anfangskonzentration zwischen den vier Streuarten auf, wobei sich der Birken-Kiefernwald deutlich vom Eichen-Buchenwald unterscheidet. Während sich die Konzentrationen der Birken- und Kiefernstreu während des Zersetzungsprozesses kaum verändern, verringern sich die Konzentrationen in der Buchen- und Eichenstreu auf etwa die Hälfte der Anfangskonzentration und nähern sich dementsprechend den Endkonzentrationen der Birken- und Kiefernstreu an. Die Konzentration der drei Laubstreuarten ist zum Ende der Untersuchungszeit immer noch signifikant höher als die der Kiefernstreu. Der Zusammenhang zwischen Gewichtsabbau und Verringerung der Kaliumkonzentration geht direkt aus der Veränderung der C/K-Verhältnisse hervor (Tab. 6): Bei Buchen- und Eichenstreu nehmen die C/K-Werte bis zum Versuchsende um mehr als das Doppelte zu und auch bei der Birkenstreu vergrößern sich die Werte deutlich; im Gegensatz zu den Laubstreuarten ist bei der Kiefernstreu die Veränderung der C/K-Werte nicht abgesichert.

Bei der  **$O_F$ -Streu** weisen die Anfangsgehalte ebenfalls noch signifikante Unterschiede zwischen Buchen-/Eichenstreu einerseits und Birken-/Kiefernstreu andererseits auf. Auch hier ist eine Angleichung der Werte durch die Zersetzung wie in der  $O_L$ -Lage zu



**Abb. 10:** Veränderung der Kaliumkonzentration der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 11:** Veränderung der Kaliumkonzentration der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

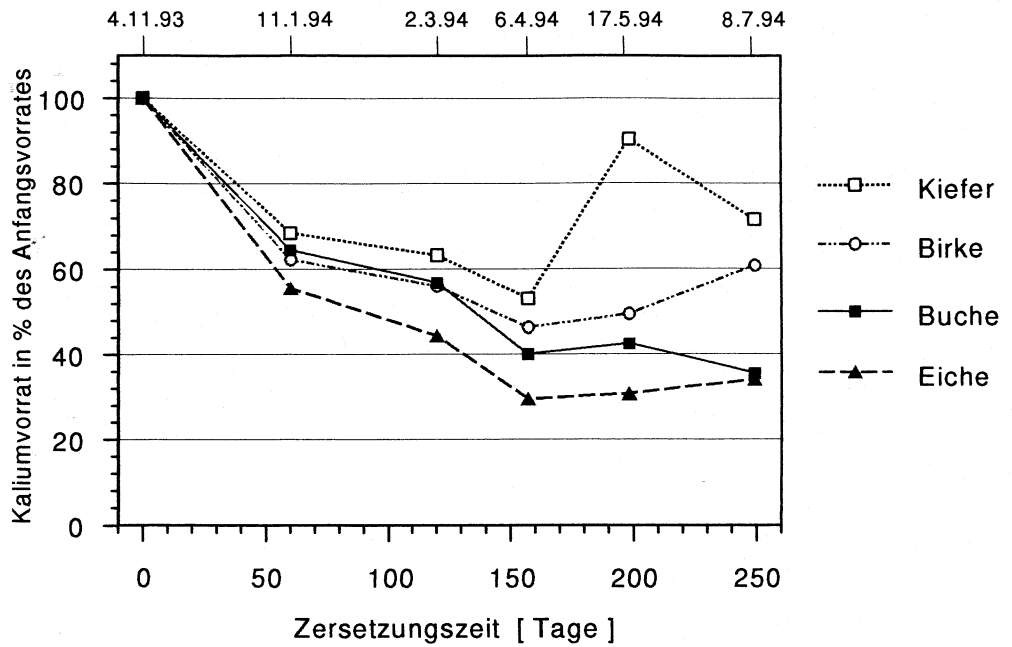
erkennen, während sich die Gehalte der Birken- und Kiefernstreu nicht mehr ändern. Allerdings erreicht die Eichenstreu nicht das niedrige Konzentrationsniveau der drei anderen Baumarten, sondern behält weiterhin eine signifikant höhere Kaliumkonzentration. Auch die C/K-Verhältnisse (Tab. 6) zeigen bei Buchen- und Eichenstreu nach 246 Tagen eine signifikante Erhöhung, während bei Birken- und Kiefernstreu kein Unterschied zwischen Anfangs- und Endwert absicherbar ist.

**Tab. 6:** C/K-, C/Mg- u. C/Ca-Verhältnisse der vier Streuarten ( $O_L$ - und  $O_F$ -Lage) vor und nach dem Streuabbau; in g/g (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung).

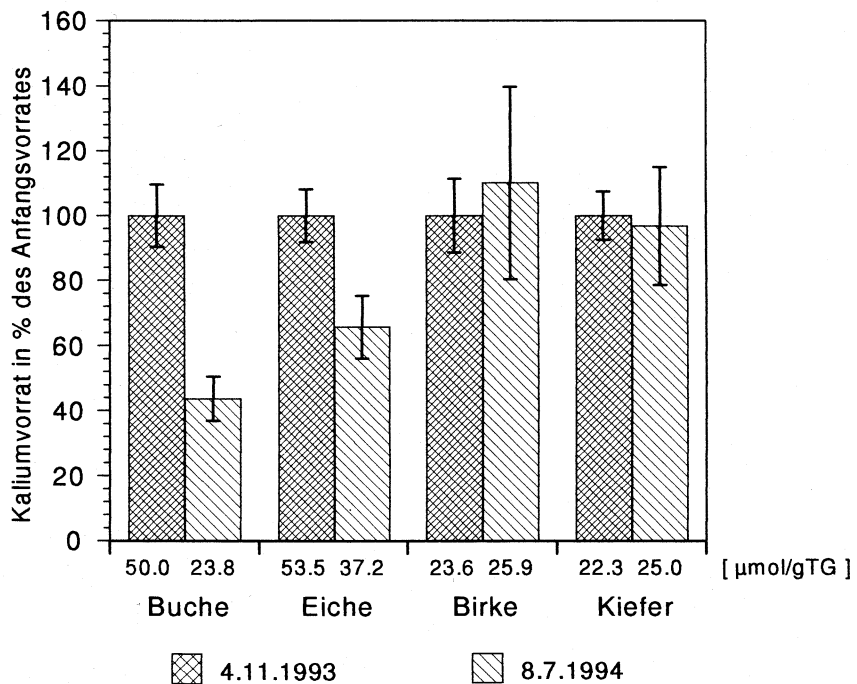
| Streuart      | C/K              |                   | C/Mg               |                    | C/Ca             |                  |
|---------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|
|               | vor Abbau        | nach Abbau        | vor Abbau          | nach Abbau         | vor Abbau        | nach Abbau       |
| $O_L$ -Streu: |                  |                   |                    |                    |                  |                  |
| <b>Buche</b>  | 100,0 $\pm$ 9,4  | 232,9 $\pm$ 30,2  | 739,4 $\pm$ 46,0   | 614,5 $\pm$ 50,6   | 53,0 $\pm$ 2,1   | 49,2 $\pm$ 1,0   |
| <b>Eiche</b>  | 120,3 $\pm$ 10,4 | 250,3 $\pm$ 84,3  | 444,3 $\pm$ 34,5   | 464,7 $\pm$ 39,2   | 61,0 $\pm$ 2,4   | 62,8 $\pm$ 6,5   |
| <b>Birke</b>  | 244,2 $\pm$ 17,2 | 320,1 $\pm$ 32,7  | 286,4 $\pm$ 5,9    | 327,6 $\pm$ 19,2   | 73,2 $\pm$ 2,7   | 69,8 $\pm$ 3,5   |
| <b>Kiefer</b> | 496,5 $\pm$ 51,3 | 581,9 $\pm$ 133,8 | 923,5 $\pm$ 61,2   | 1121,1 $\pm$ 107,4 | 105,4 $\pm$ 3,0  | 111,0 $\pm$ 13,7 |
| $O_F$ -Streu: |                  |                   |                    |                    |                  |                  |
| <b>Buche</b>  | 250,1 $\pm$ 17,8 | 531,7 $\pm$ 122,9 | 640,7 $\pm$ 23,7   | 678,0 $\pm$ 68,7   | 56,4 $\pm$ 2,5   | 62,3 $\pm$ 5,3   |
| <b>Eiche</b>  | 230,6 $\pm$ 16,5 | 345,9 $\pm$ 42,8  | 648,6 $\pm$ 22,9   | 617,3 $\pm$ 47,1   | 54,7 $\pm$ 2,1   | 65,6 $\pm$ 8,4   |
| <b>Birke</b>  | 558,0 $\pm$ 56,0 | 545,7 $\pm$ 122,9 | 1079,7 $\pm$ 116,5 | 736,9 $\pm$ 137,9  | 130,2 $\pm$ 7,2  | 155,9 $\pm$ 20,0 |
| <b>Kiefer</b> | 611,1 $\pm$ 42,3 | 579,5 $\pm$ 110,7 | 1377,8 $\pm$ 272,3 | 1452,7 $\pm$ 240,4 | 238,6 $\pm$ 31,2 | 277,8 $\pm$ 53,0 |

Die in Abbildung 12 dargestellten Veränderungen der relativen Kaliumvorräte in den *litter bags* verlaufen in der  $O_L$ -Streu bei allen vier Arten ähnlich: der Hauptanteil an Kalium wird in der ersten Phase des Zersetzungszeitraumes freigesetzt (30 und 45% des ursprünglichen Vorrates). Je länger der Zersetzungsprozeß andauert, desto mehr stagniert die Kaliumabgabe. Zur Mitte der Untersuchungszeit hin divergieren die Verläufe allmählich dahingehend, daß Buchen- und Eichenstreu signifikant mehr Kalium freisetzen als Birken- und Kiefernstreu, was die anhand der Konzentrationsveränderungen getroffenen Feststellungen bestätigt. Der am 5. Analysetermin erkennbare hohe Kaliumwert der Kiefernstreu weist eine sehr große Standardabweichung auf (s. Tab. A 3) und ist statistisch nicht abgesichert, so daß diesem keine zu große Bedeutung beizumessen ist.

Auch bei der  $O_F$ -Streu (Abb. 13) zeigen die prozentualen Veränderungen das nach den Konzentrationsangaben zu erwartende Bild: Bei Birken- und Kiefernstreu tritt keine signifikante Kaliumfreisetzung in dieser älteren Streufraktion mehr ein. Bei Buchen- und Eichenstreu ist dagegen eine Kaliumfreisetzung von mehr als 55% bzw. 30% des Anfangsvorrates statistisch abgesichert.

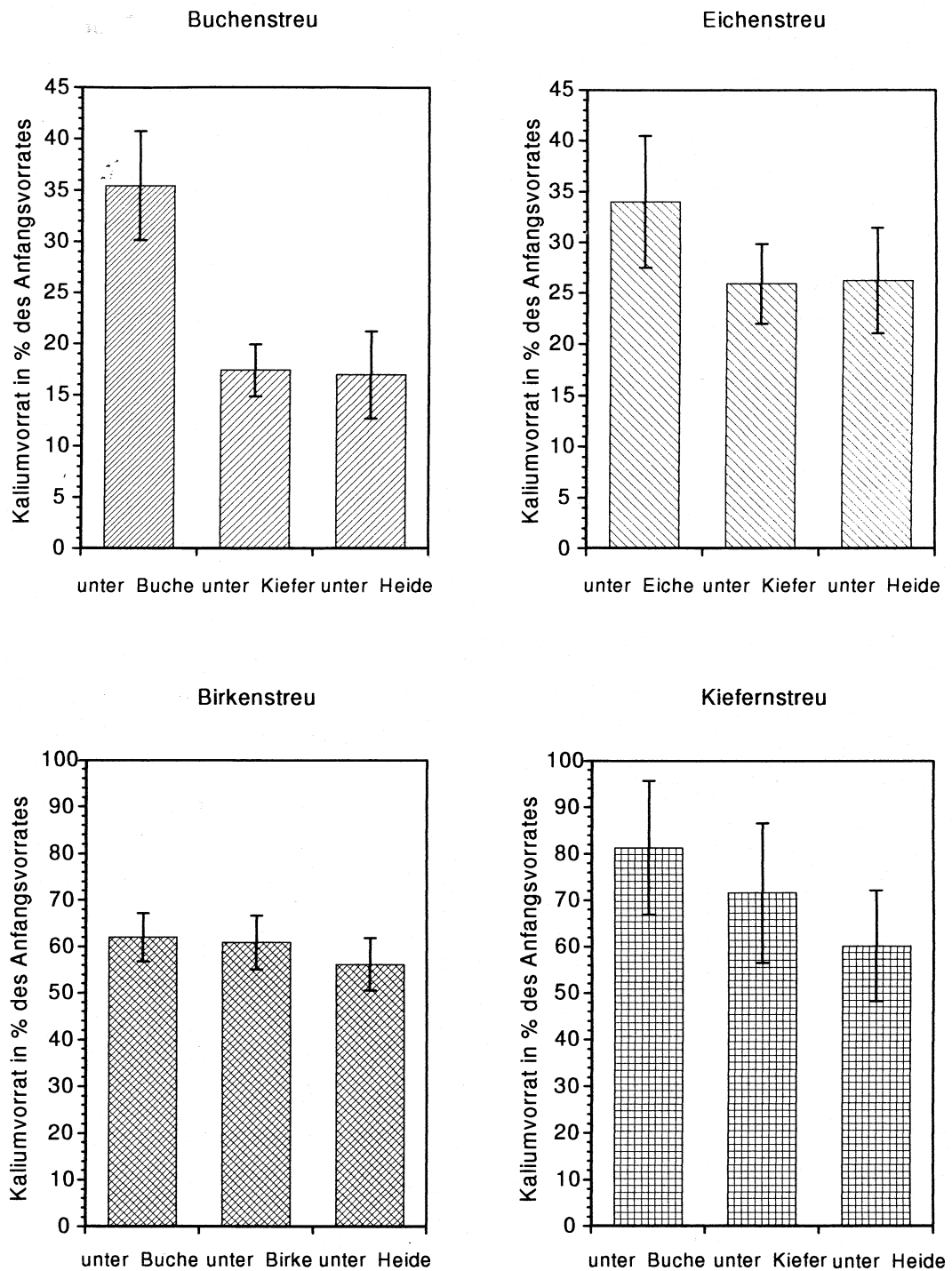


**Abb. 12:** Veränderung des Kaliumvorrates der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 13:** Veränderung des Kaliumvorrates der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort





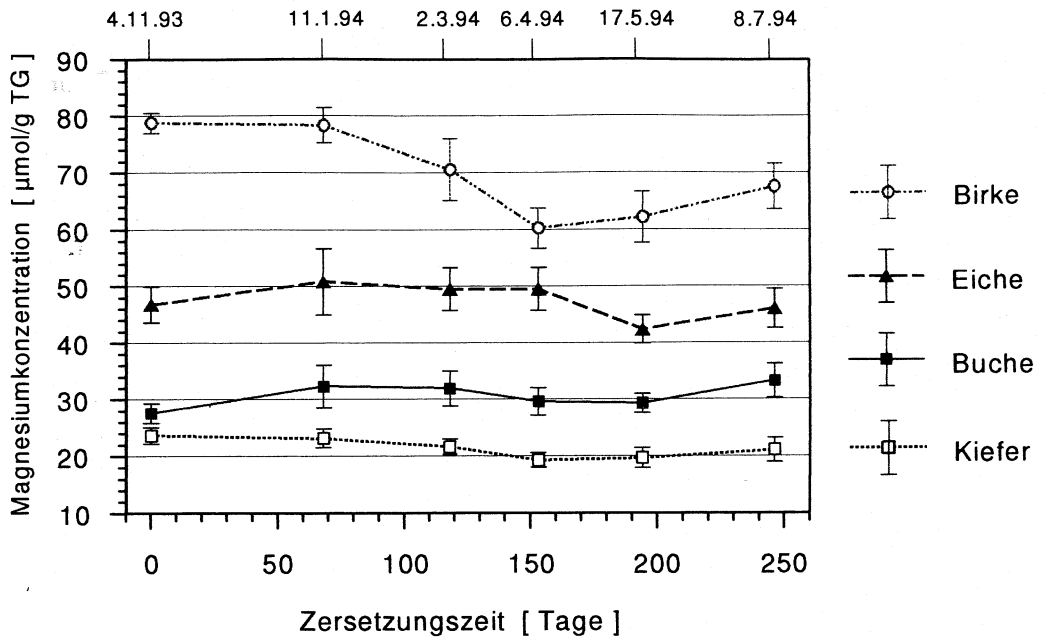
**Abb. 14:** Kaliumvorrat der  $O_e$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat (Austauschversuche)

Der Vergleich der **Versuchsflächen** (Abb. 14) verdeutlicht gravierende Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten im Hinblick auf die K-Freisetzung. Besonders fällt die stärkere Freisetzung aus der Buchen- und Eichenstreu auf dem Kiefern- und *Calluna*-Standort ins Auge, die bei der Buchenstreu um ~10% signifikant größer ist als bei der Eichenstreu. Die Birkenstreu zeigt demgegenüber keine absicherbaren Unterschiede auf den drei Versuchsflächen. Die Kiefernstreu läßt eine Tendenz zu höherer Freisetzung vom Buchen- über den Kiefernstandort hin zur Heide erkennen. Signifikant ist allerdings nur der Unterschied zwischen Buchen- und Heidefläche. Die Freisetzung erfolgt aber auf deutlich geringerem Niveau (19 und 40% des ursprünglichen Vorrates) als bei Buche und Eiche.

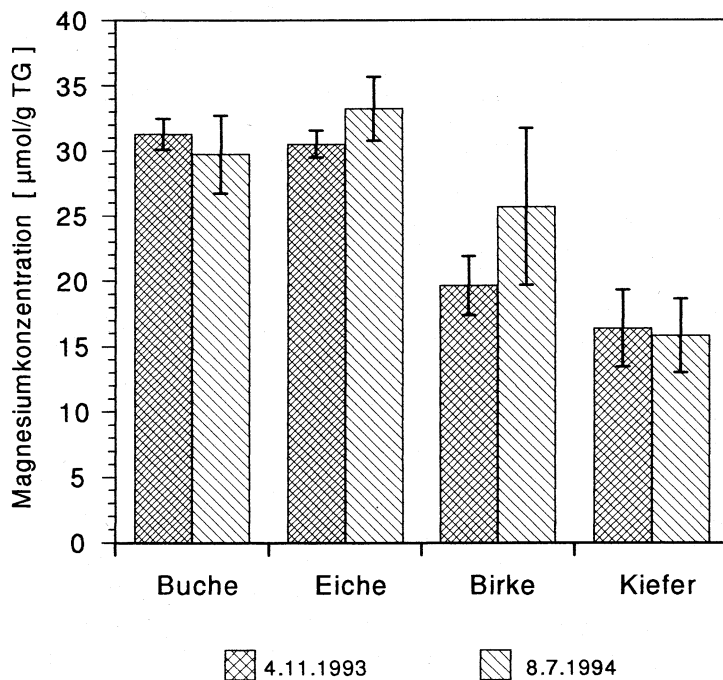
#### 4.3.2 Magnesium

Ähnlich wie bei den Kaliumgehalten zeigen sich bei der  $O_L$ -Streu große Unterschiede im Magnesiumgehalt zwischen den vier Arten (Abb. 15). Anders als dort besitzt aber nicht die Streu von Buche und Eiche die höchsten Konzentrationen, sondern die frische Birkenstreu fällt durch ihren besonders hohen Magnesiumgehalt auf. Die Eichenstreu nimmt eine Mittelstellung ein, während Buchen- und Kiefernstreu nur sehr geringe Konzentrationen aufweisen. Die Artunterschiede können im gesamten Versuchszeitraum abgesichert werden. Konzentrationsveränderungen während der Zersetzungszeit sind bei Eichen-, Buchen- und Kiefernstreu kaum zu erkennen und bei der Birkenstreu nur geringfügig; die Veränderungen verlaufen demnach weitgehend analog zum Gewichtsabbau. Die C/Mg-Verhältnisse (Tab. 6) weisen deshalb auch nur geringe Veränderungen nach Ende der Untersuchungsdauer auf (die außer bei der Eichenstreu abgesichert sind): Die Buchenstreu zeigt eine geringe Verengung des Verhältnisses, während sich die Werte vor allem bei Birken- und Kiefernstreu etwas erhöhen.

Bei der  $O_F$ -Streu sind ebenfalls keine nennenswerten Veränderungen der Konzentration während der 246 Tage Zersetzungszeit zu erkennen (Abb. 16). Die Zunahme bei Eiche und Birke ist zwar abgesichert, quantitativ aber nur bei der Birkenstreu bedeutungsvoll. Entsprechend können auch außer bei der Birke (wo sich das C/Mg-Verhältnis beträchtlich verkleinert) keine Veränderungen im C/Mg-Verhältnis statistisch abgesichert werden. Auffallend ist weiterhin die starke Verringerung der Konzentration (um ca. 75%) bei der Birkenstreu von den hohen Werten der  $O_L$ -Schicht zu den Werten der  $O_F$ -Schicht.



**Abb. 15:** Veränderung der Magnesiumkonzentration der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

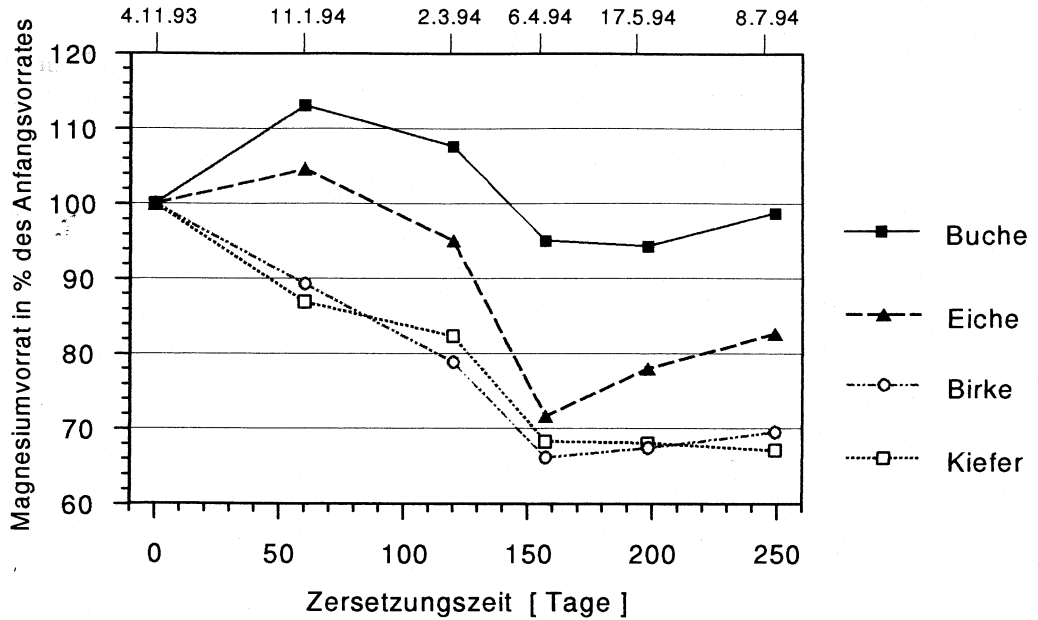


**Abb. 16:** Veränderung der Magnesiumkonzentration der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

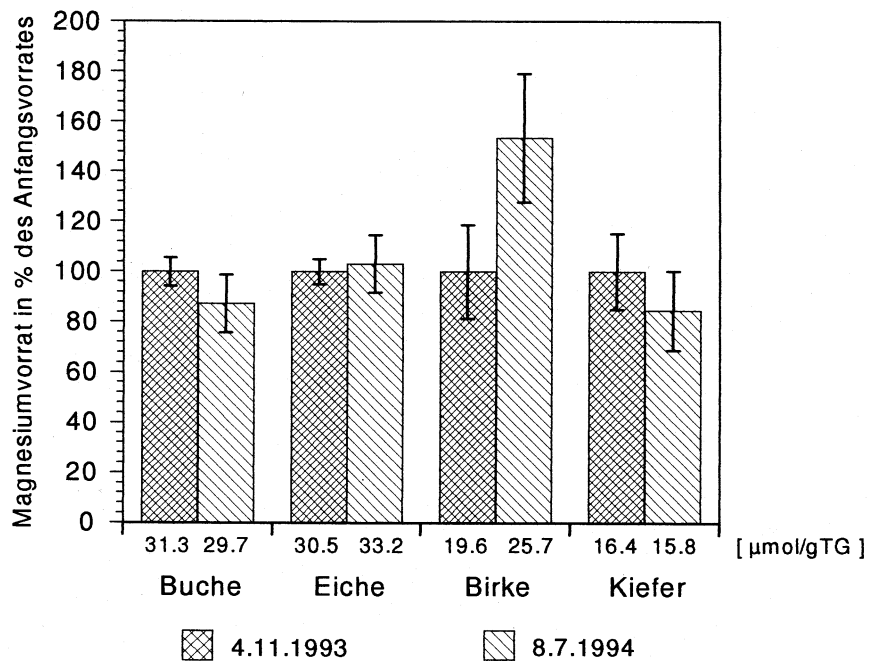
Bei der Betrachtung der prozentualen Veränderungen der Magnesiumvorräte der  $O_L$ -Streu (Abb. 17) fällt zunächst der von Art zu Art unterschiedliche Grad der Magnesiumabgabe nach 246 Tagen auf: Bei der Buchenstreu ist keine Veränderung nach Ende der Untersuchungszeit abzusichern, bei der Eichenstreu ist die Veränderung etwas deutlicher, während Birken- und Kiefernstreu in signifikanter Weise mehr als 30% des Anfangsgehaltes freisetzen. Durch ihre hohe Anfangskonzentration ist die Mg-Freisetzung deshalb besonders bei der Birkenstreu beträchtlich. Weiterhin auffällig sind die gleichsinnigen Verläufe innerhalb der beiden Waldgesellschaften. Birken- und Kiefernstreu geben in den ersten ~150 Tagen der Untersuchung relativ gleichmäßig Magnesium ab; danach stagniert die Freisetzung. Bei der Buchen- und Eichenstreu tritt anfänglich offenbar eine Akkumulation von Magnesium durch externe Quellen ein, die bei der Buche auch statistisch abgesichert ist. Nach einer Freisetzungsphase zur Mitte der Untersuchungszeit setzt dann wiederum eine leichte Akkumulation ein; da beide Streuart der Eichen-Buchenfläche diesen Verlauf analog zeigen, muß die Quelle für den Magnesiumeintrag in die *litter bags* wohl standortsabhängig sein.

Bei der  $O_F$ -Streu (Abb. 18) zeigt die Eiche keine signifikante Veränderung der Vorräte in den *litter bags* mehr; bei der Buchen- und Kiefernstreu ist eine geringfügige Mg-Freisetzung abgesichert. Anders sehen die Verhältnisse bei der Birkenstreu aus, welche eine sehr starke Akkumulation erkennen läßt, die auf externen Eintrag zurückgeführt werden muß.

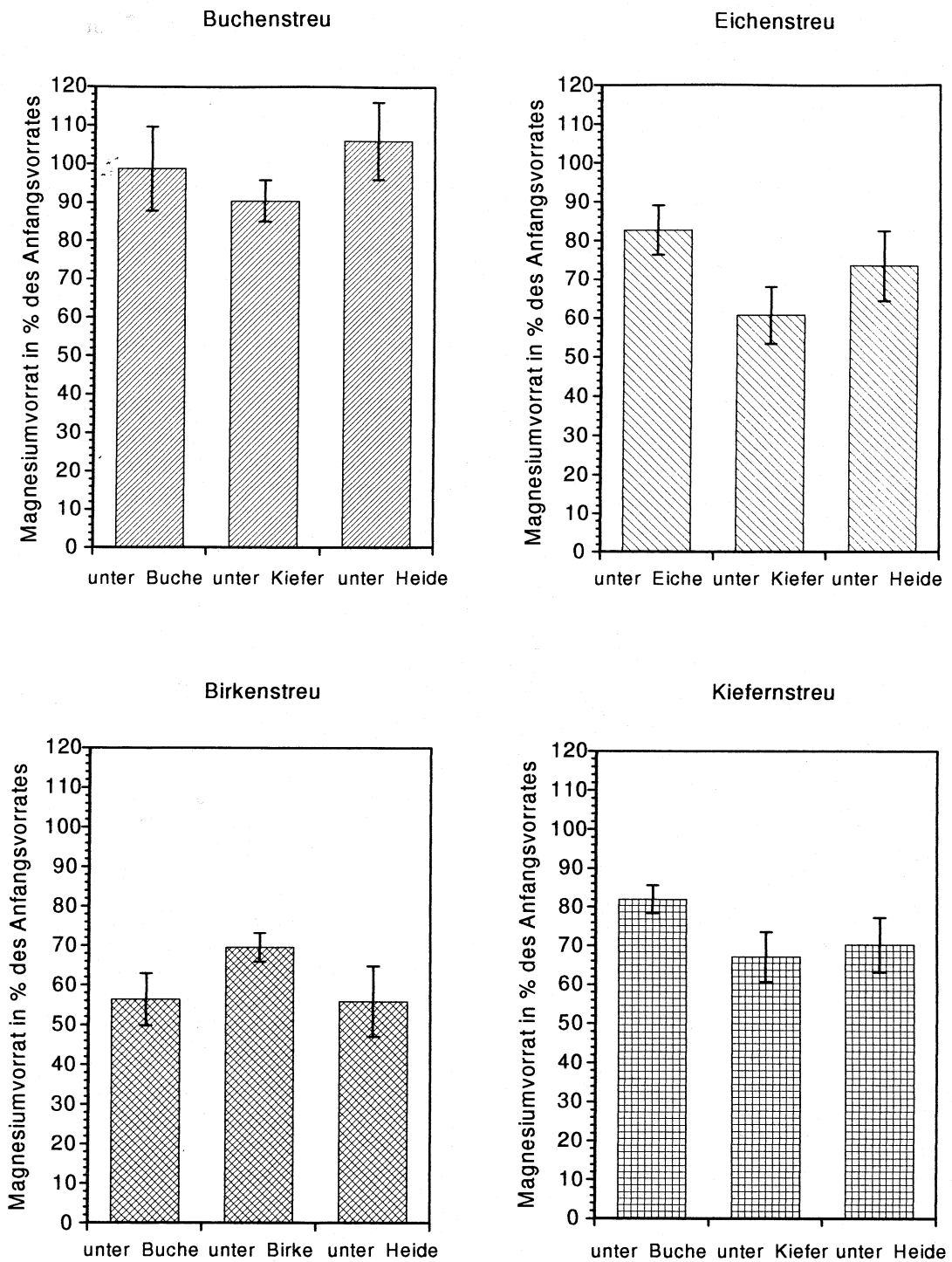
Der **Flächenvergleich** in Abbildung 19 zeigt zwar deutliche Unterschiede zwischen den Standorten, aber keine einheitlichen Tendenzen. Buchen- und Eichenstreu geben am meisten Magnesium am Kiefernstandort ab, die Eichenstreu allerdings in viel stärkerer und deshalb signifikanter Weise. Bei der Birkenstreu ergibt sich eine umgekehrte Reihenfolge: Am Buchen- und *Calluna*-Standort wird signifikant mehr Magnesium freigesetzt als am Standort im Birken-Kiefernwald. Die Kiefernstreu zeigt demgegenüber eine signifikant geringere Freisetzung auf der Buchenfläche. Aus diesem heterogenen Verhalten der einzelnen Streuart auf den drei Untersuchungsflächen läßt sich vermuten, daß die Magnesiumfreisetzung sehr stark von der jeweiligen Streuart geprägt wird.



**Abb. 17:** Veränderung des Magnesiumvorrates der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 18:** Veränderung des Magnesiumvorrates der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 19:** Magnesiumvorrat der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat (Austauschversuche)

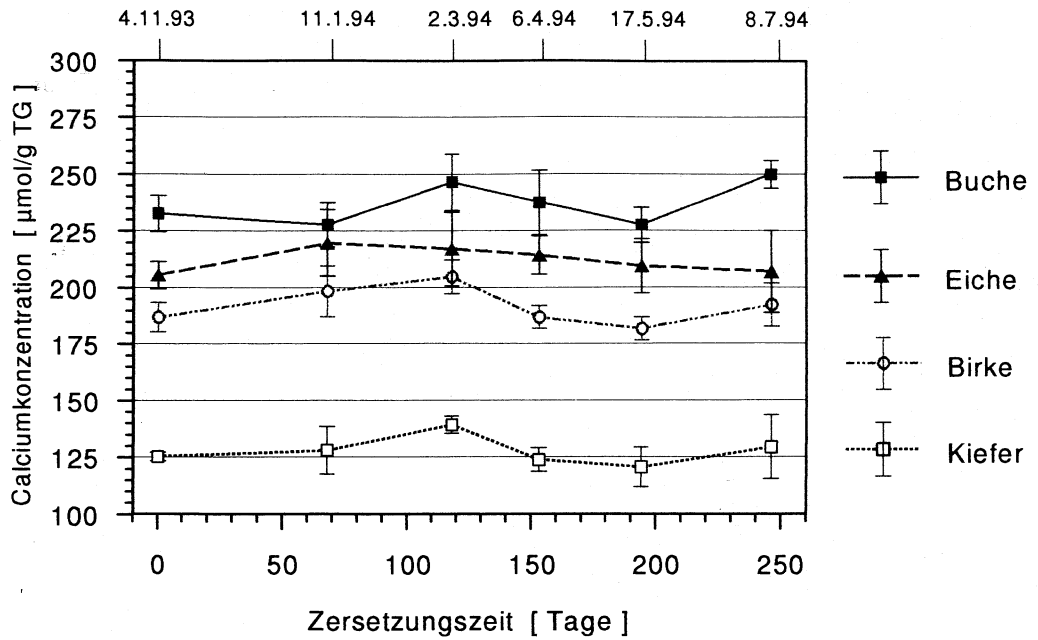
### 4.3.3 Calcium

Im Vergleich mit den beiden zuvor besprochenen Elementen zeigt sich, daß die Calciumgehalte der **O<sub>L</sub>-Streu** weitaus höher liegen als die Kalium- und insbesondere die Magnesiumgehalte. Ebenfalls auffällig sind die großen, signifikanten Unterschiede im Gehalt zwischen den einzelnen Arten, wobei die Kiefernstreu wie bei den beiden zuvor besprochenen Elementen auch die geringsten Gehalte an Calcium aufweist. Birken-, Eichen- und Buchenstreu besitzen dagegen deutlich höhere Mengen, die im Falle der Buche fast doppelt so hoch sind wie die der Kiefer (Abb. 20). Die Veränderung der Calciumkonzentrationen während der Versuchszeit ist noch geringer als die der Magnesiumkonzentrationen: nur bei der Buchenstreu ist eine Verringerung der Gehalte (um ~7,4%) statistisch nachweisbar. Die Calciumfreisetzung erfolgte demnach gleichzeitig mit dem Gewichtsverlust. Entsprechend können außer bei der Buchenstreu keinerlei Veränderungen im C/Ca-Verhältnis nach Ende der Versuchsdauer nachgewiesen werden, auch dort sind sie jedoch quantitativ unbedeutend (Tab. 6).

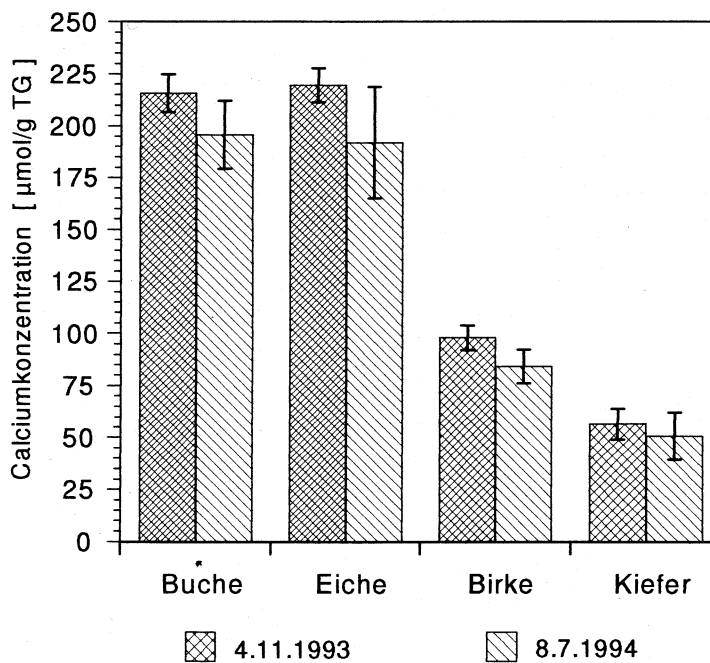
Auch in der **O<sub>F</sub>-Streu** verändern sich die Ca-Konzentrationen bei keiner der vier Arten nennenswert, wenngleich (außer bei der Kiefer) eine statistisch signifikante Abnahme festzustellen ist (Abb. 21). Deutlicher sind hier ebenso wie bei der **O<sub>L</sub>-Streu** die Unterschiede zwischen den Arten: Während Buche und Eiche ähnlich hohe Ca-Gehalte aufweisen, sind bei Birken- und vor allem bei der Kiefernstreu geringere Konzentrationen an Calcium statistisch signifikant. Beachtenswert ist außerdem, daß bei Buche und Eiche das gleiche Niveau wie in der **O<sub>L</sub>-Streu** besteht, während bei Birke und Kiefer die Konzentration erheblich niedriger als in der **O<sub>L</sub>-Lage** ist. Die C/Ca-Verhältnisse (Tab. 6) nehmen einheitlich bei allen vier Arten geringfügig zu, was außer bei der Kiefernstreu statistisch abgesichert ist.

Einheitlicher als die Konzentrationen verändern sich die Verläufe der relativen Calciumvorräte in den *litter bags* (Abb. 22 und 23). Die **O<sub>L</sub>-Streu** weist eine im ganzen gesehen gleichmäßige Freisetzung von Calcium auf (ähnlich dem Gewichtsverlust, Abb. 4); die Kiefer läßt dabei den größten Verlust (~22%) von Calcium erkennen, wobei nur der Unterschied zwischen Buche und Kiefer signifikant ist.

Bei der **O<sub>F</sub>-Streu** erkennt man bei allen Arten eine signifikante Freisetzung von Calcium, die nicht unter dem Niveau der **O<sub>L</sub>-Schicht** liegt (statistisch abgesichert); im Grad der Calciumfreisetzung sind dabei keine signifikanten Unterschiede zwischen den Arten zu beobachten.

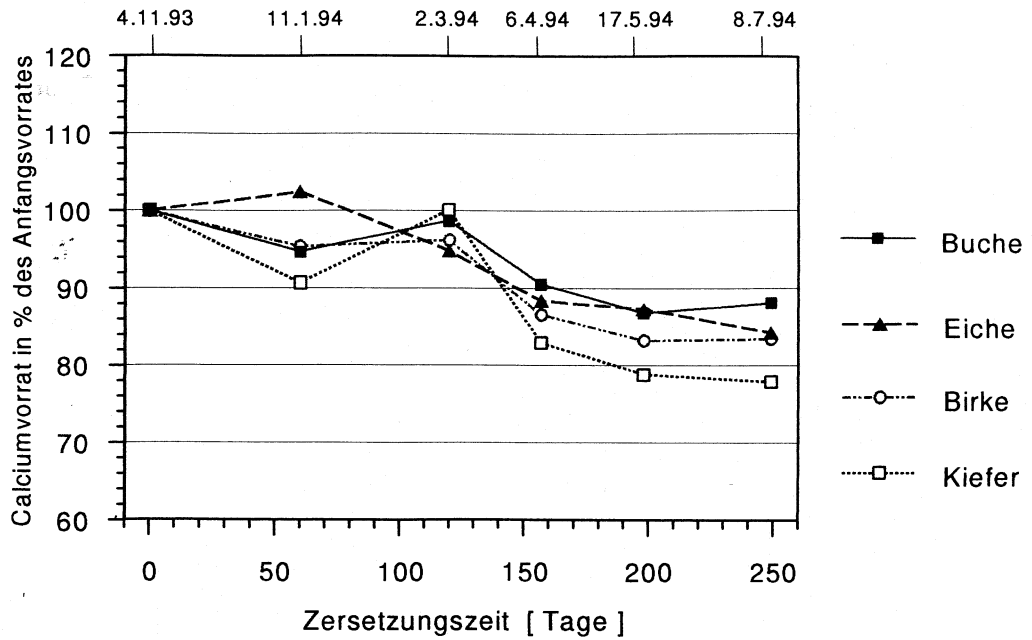


**Abb. 20:** Veränderung der Calciumkonzentration der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

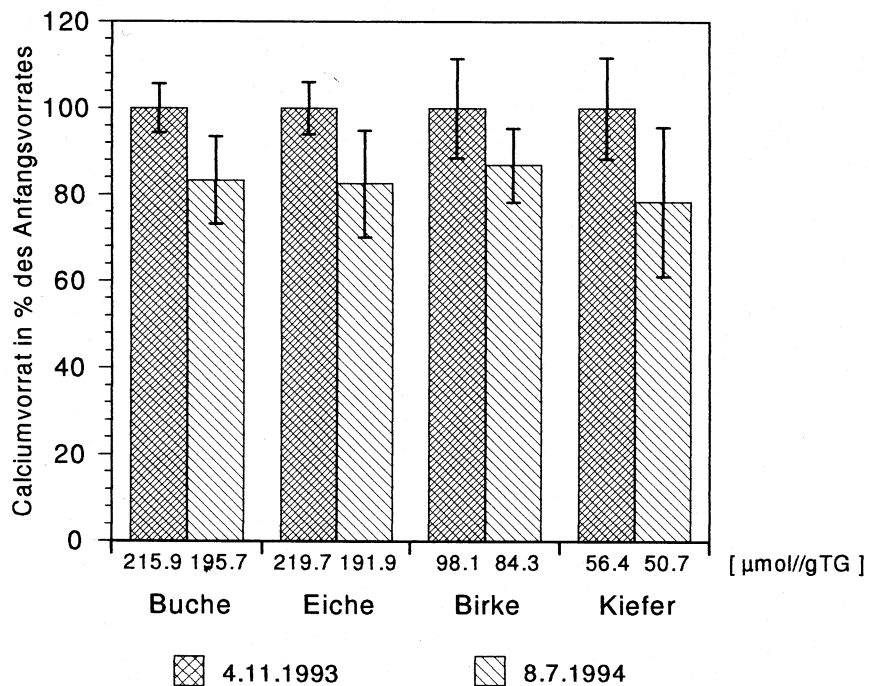


**Abb. 21:** Veränderung der Calciumkonzentration der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

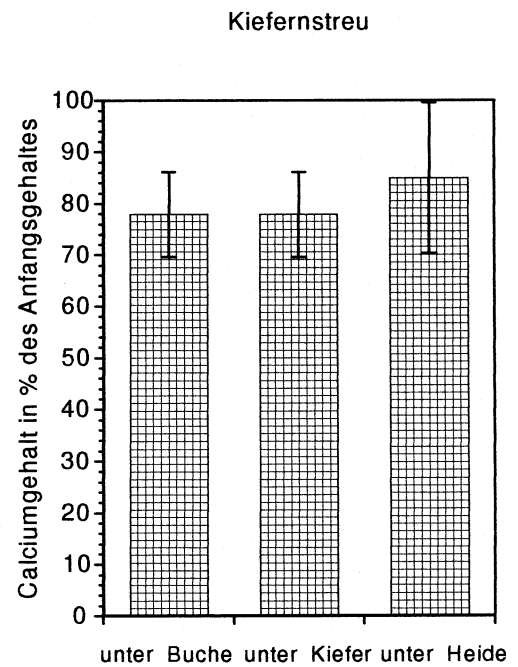
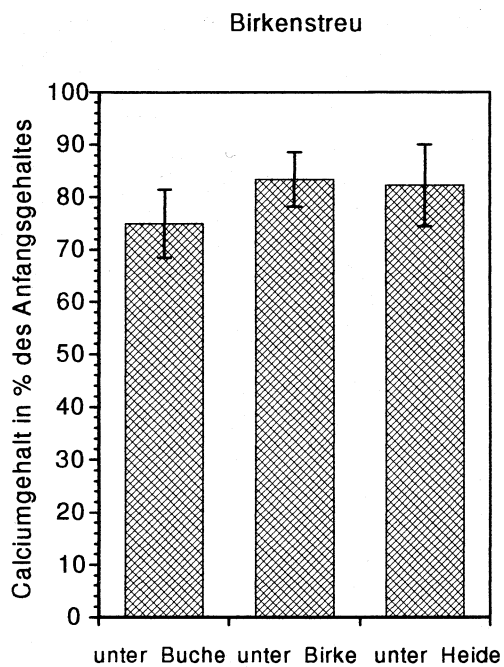
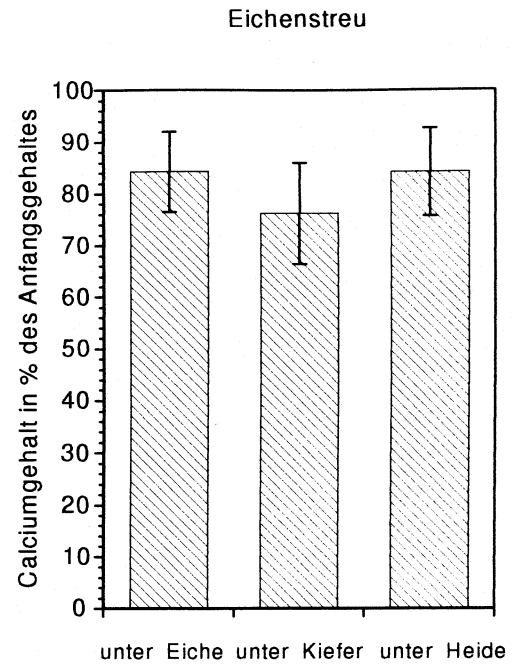
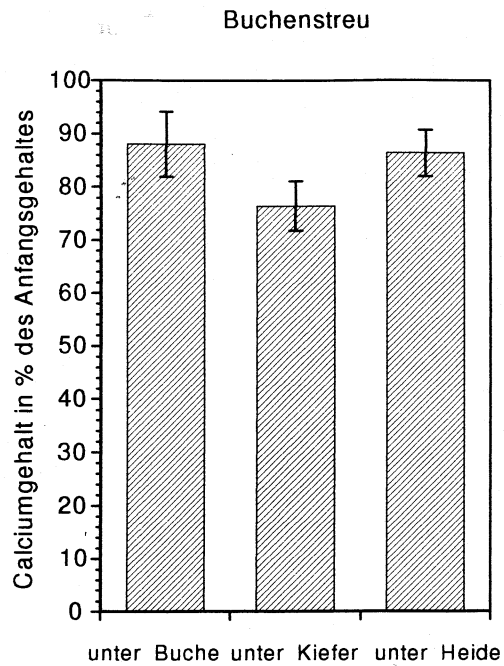




**Abb. 22:** Veränderung des Calciumvorrates der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 23:** Veränderung des Calciumvorrates der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 24:** Calciumvorrat der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat (Austauschversuche)

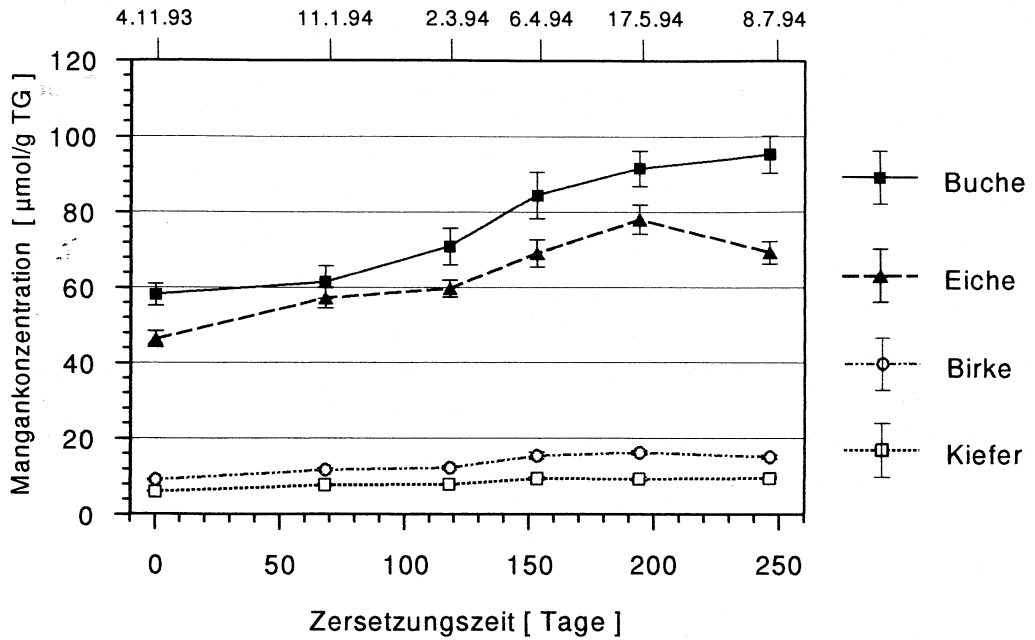
Im Vergleich der Versuchsflächen durch die **Austauschversuche** (Abb. 24) zeigt sich bei der Buchen- und Eichenstreu ein ähnliches Bild wie zuvor bei Magnesium: Es läßt die Tendenz zu einer höheren Freisetzung am Kiefernstandort erkennen, was allerdings nur im Falle der Buchenstreu absicherbar ist. Die Birkenstreu gibt dagegen am Buchenstandort signifikant mehr Calcium ab als am eigenen Herkunftsort oder auf der Heide, während bei der Kiefernstreu eine Tendenz nicht abzusichern ist.

#### 4.3.4 Mangan

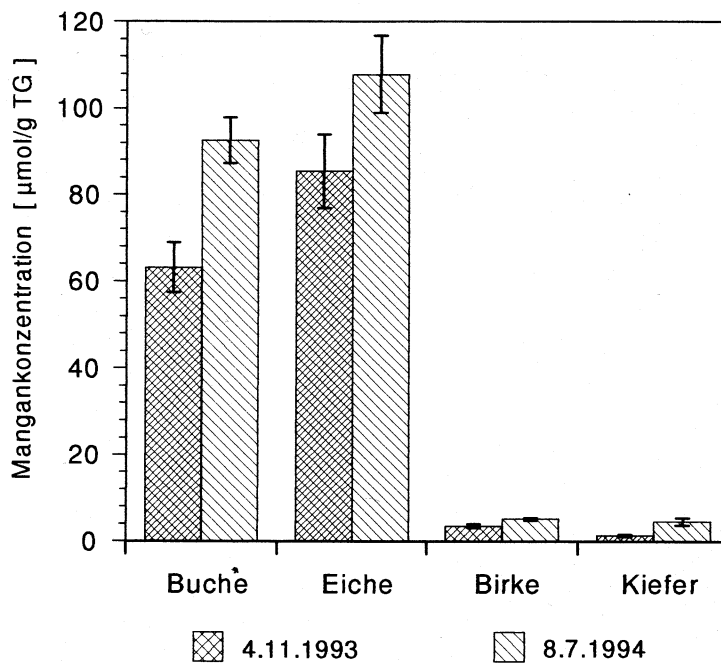
Die Veränderung der Mangankonzentration der **O<sub>L</sub>-Streu** zeigt im Vergleich zu den drei zuvor beschriebenen Elementen einen deutlich anderen Verlauf (Abb. 25). Die Konzentrationen werden im Verlauf der Untersuchung nicht geringer (wie bei Kalium) oder bleiben gleich (wie bei Magnesium und Calcium), sondern bei allen vier Arten nimmt die Mangankonzentration während der Zersetzung zu. Besonders auffällig sind die großen Unterschiede in der Höhe der Gehalte zwischen frischer Buchen-/Eichenstreu einerseits und Birken-/Kiefernstreu andererseits: Zu Versuchsbeginn besitzt die Birkenstreu nur ~15%, die Kiefernstreu gar nur ~10% der Mangangehalte der Buchenstreu. Die Buchenstreu weist nicht nur im Vergleich mit Birke und Kiefer, sondern auch im Vergleich mit der Eichenstreu über die gesamte Untersuchungsdauer hinweg die höchsten Gehalte auf; die Unterschiede in den Mn-Konzentrationen zwischen den vier Arten sind zu jedem Zeitpunkt statistisch signifikant.

Die Zunahme der Konzentrationen bei den vier Arten nimmt bemerkenswerte Ausmaße an, die statistisch abgesichert sind: bei der Buchen- und Birkenstreu beträgt sie jeweils über 60%, bei Eiche und Kiefer immerhin ca. 50% bzw. 58% der Anfangskonzentration.

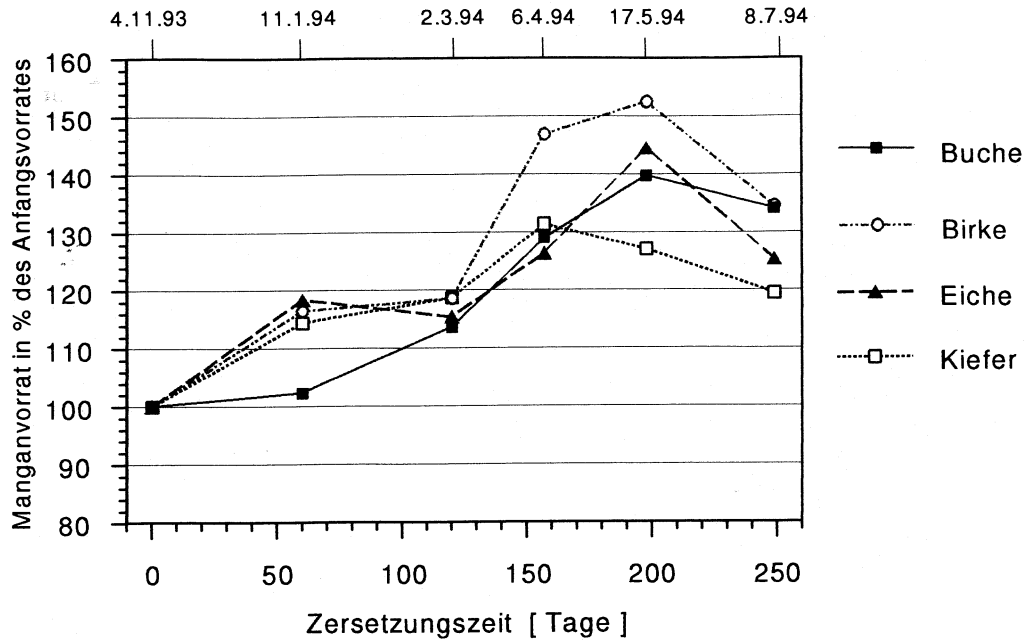
Ganz ähnlich sehen die Verhältnisse bei den Mn-Konzentrationen der **O<sub>F</sub>-Streu** aus (Abb. 26). Ins Auge fallen die krassen Unterschiede in der Höhe der Gehalte zwischen Buchen-/Eichenstreu und Birken-/Kiefernstreu sowie die bei allen vier Arten erkennbare Konzentrationszunahme nach 246 Tagen Untersuchungszeit. Im Unterschied zur O<sub>L</sub>-Streu weist aber hier die Eichenstreu jeweils die höchsten Anfangs- und Endkonzentrationen auf (die auch höher sind als die maximalen Konzentrationen der Buchenstreu in der O<sub>L</sub>-Lage). Die Gehalte der Buchenstreu liegen dagegen im gleichen Bereich wie bei der O<sub>L</sub>-Streu. Birken- und Kiefernstreu besitzen im Vergleich zu O<sub>L</sub>-Streu nochmals deutlich geringere Mangankonzentrationen. Bis auf die Endkonzentrationen der Birken- und Kiefernstreu



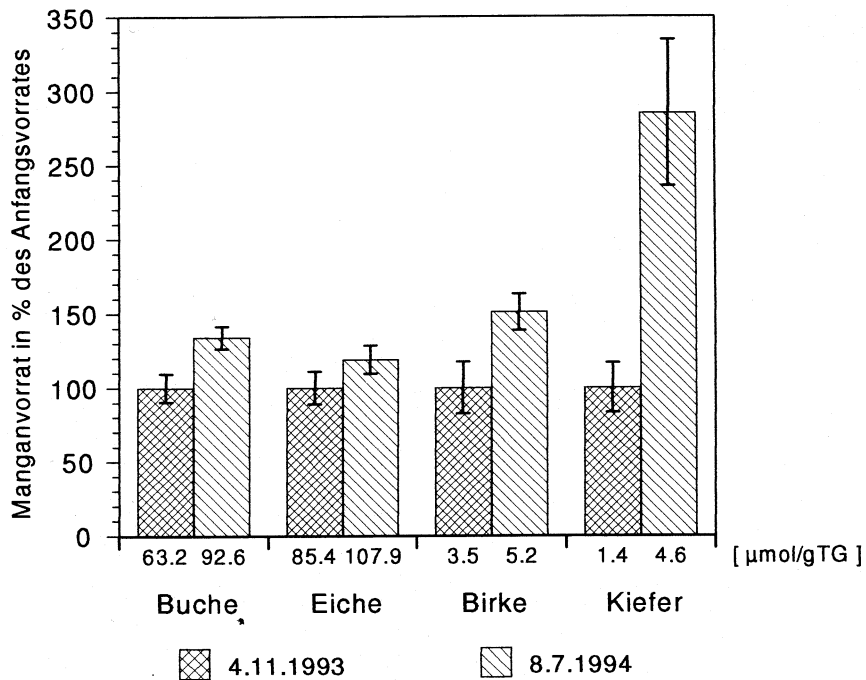
**Abb. 25:** Veränderung der Mangankonzentration der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



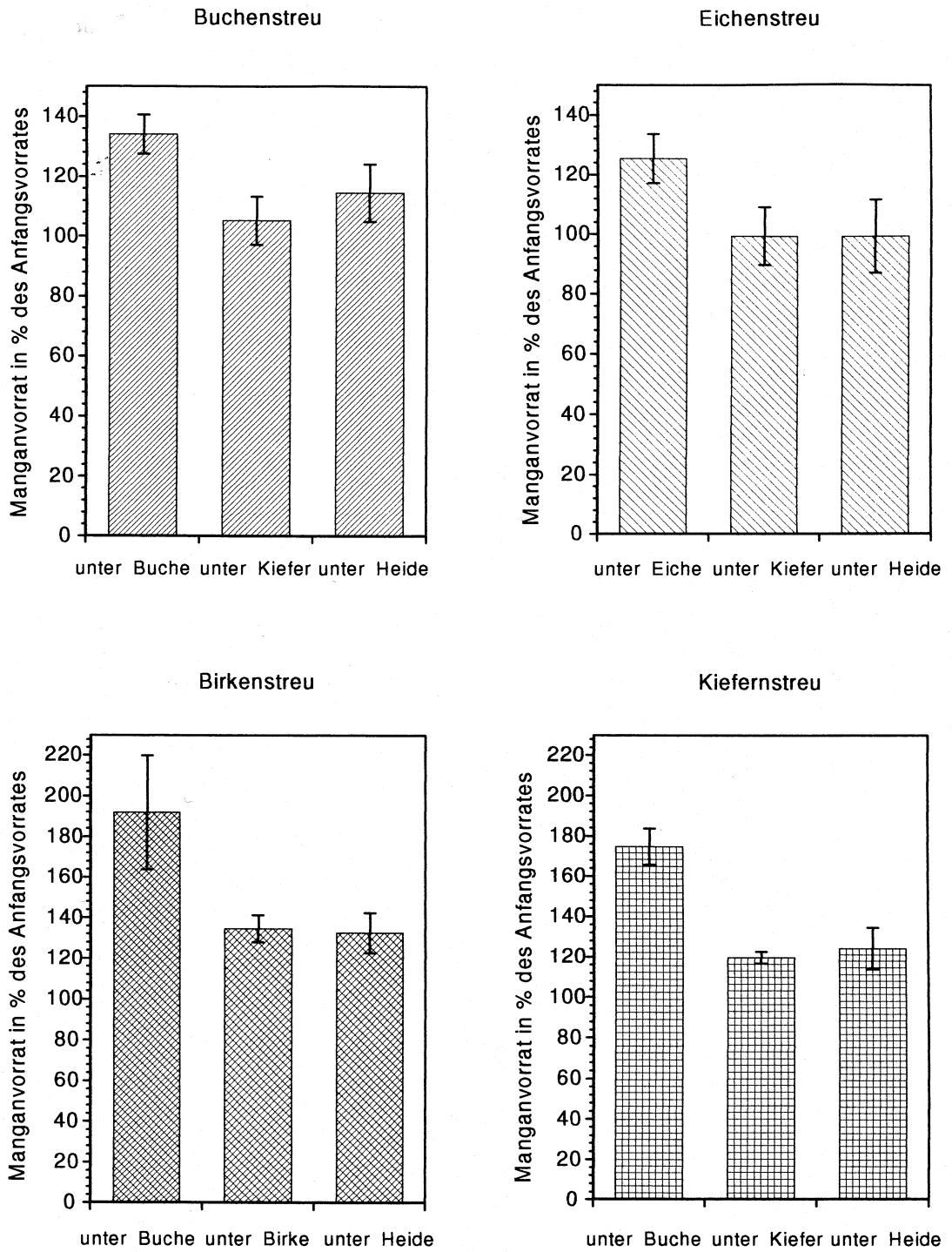
**Abb. 26:** Veränderung der Mangankonzentration der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 27:** Veränderung des Manganvorrates der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 28:** Veränderung des Manganvorrates der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 29:** Manganvorrat der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat (Austauschversuche)

sind alle Unterschiede zu jedem Termin statistisch signifikant.

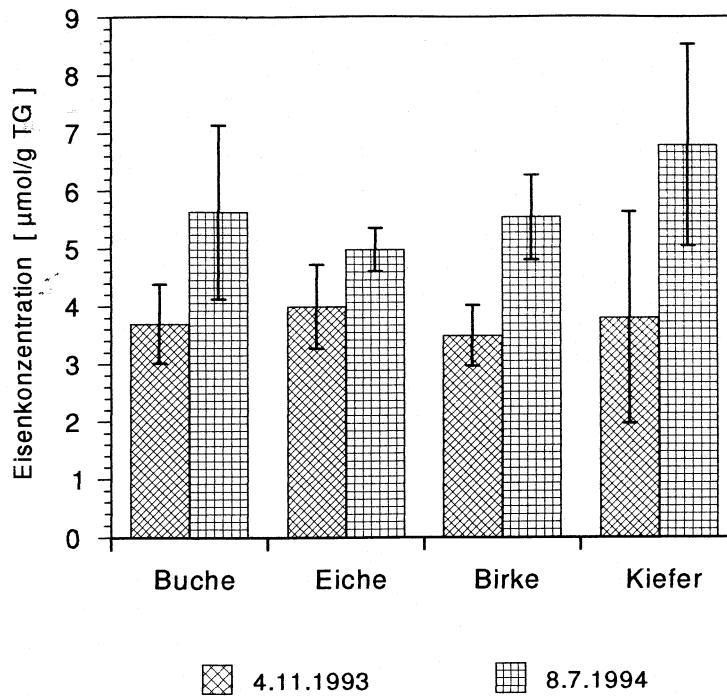
Bei der Betrachtung der Veränderung der Manganvorräte in den *litter bags* (Abb. 27 und 28) bestätigt sich, was die Verläufe der Konzentrationen während der Untersuchungsdauer andeuten: Die prozentualen Mn-Vorräte verändern sich nicht proportional zum Gewichtsabbau; vielmehr tritt bei der **O<sub>L</sub>-Streu** während der ersten 200 Tage eine erhebliche, statistisch signifikante Akkumulation von Mangan bei allen vier Streuarten ein; erst am Ende der Untersuchungszeit ist bei Eiche, Birke und Kiefer eine signifikante Manganfreisetzung zu beobachten.

Die **O<sub>F</sub>-Streu** zeigt wiederum ein ähnliches Bild: bei allen vier Arten ist eine signifikante Akkumulation zu verzeichnen, die bei Buchen- und Eichenstreu die höchsten Werte erreicht (siehe Konzentrationsangaben unter den Balken); prozentual tritt sie jedoch am deutlichsten bei der Kiefernstreu hervor. Während nach 246 Tagen Unterschiede in den relativen Mn-Vorräten bei Buchen- und Eichenstreu nicht abzuschließen sind, ist die erheblich stärkere Akkumulation bei der Kiefernstreu im Vergleich zu den drei Laubstreuarten signifikant.

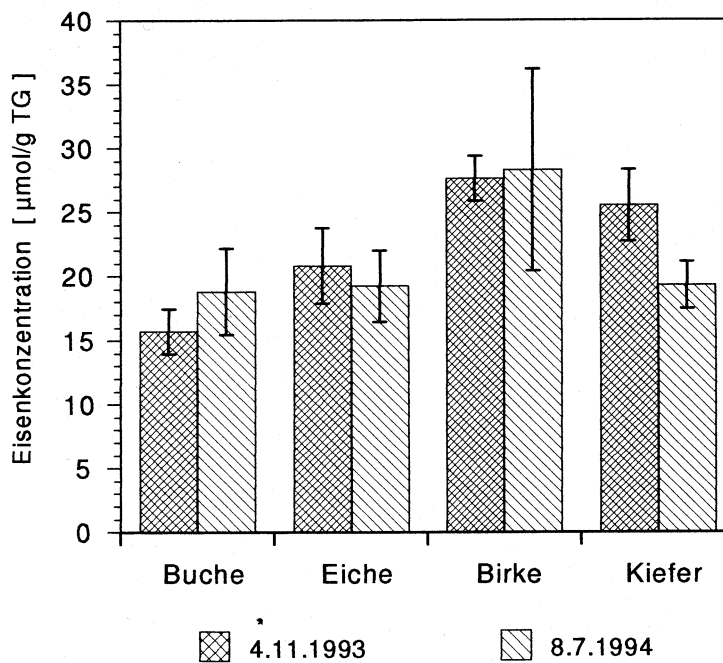
Der Vergleich der Untersuchungsflächen durch **Austausch** von O<sub>L</sub>-Streu zeigt ein einheitliches Bild (Abb.29): Bei allen vier Streuarten ist eine verstärkte Akkumulation am Eichen-Buchenstandort statistisch abgesichert. Unterschiedlich stellt sich allerdings der Grad der Akkumulation dar, der bei Buchen- und Eichenstreu viel geringer als bei der Kiefernstreu oder gar bei der Birkenstreu ist (unterschiedliche Skalierung der Grafiken!).

#### 4.3.5 Eisen

Die ermittelten Eisengehalte der frischen **O<sub>L</sub>-Streu** der vier Baumarten weisen sehr hohe Standardabweichungen auf (s. Tab. A 6), so daß Veränderungen zwischen den einzelnen Probeterminen kaum statistisch abzuschließen sind (Tab. A 21). Deshalb wird hier auf die Darstellung der Verläufe verzichtet und werden nur die Anfangs- und Endwerte verglichen (Abb. 30). Auffallend bei allen vier Arten sind die geringen Eisenkonzentrationen, die sich zwischen den Arten vor Versuchsbeginn praktisch nicht unterscheiden und nach 246 Tagen nur zwischen Kiefern- und Buchenstreu bzw. Kiefern- und Eichenstreu signifikant verschieden sind. Der Vergleich von Anfangs- und Endkonzentrationen läßt bei allen Arten einen leichten Konzentrationsanstieg während der Zersetzungsphase erkennen, der allerdings nur bei der Birken- und Kiefernstreu statistisch abgesichert ist.

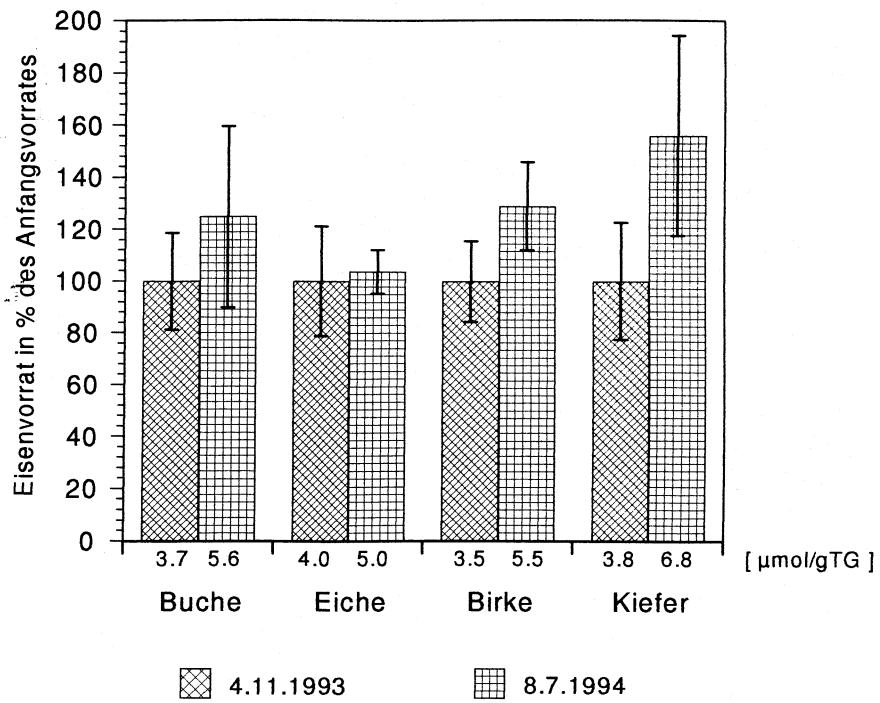


**Abb. 30:** Veränderung der Eisenkonzentration der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

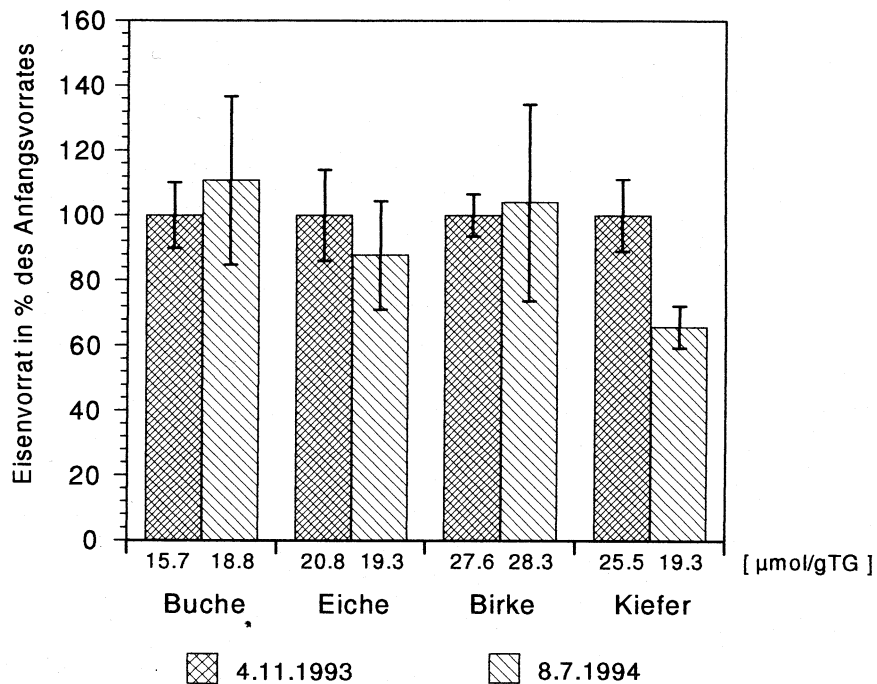


**Abb. 31:** Veränderung der Eisenkonzentration der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

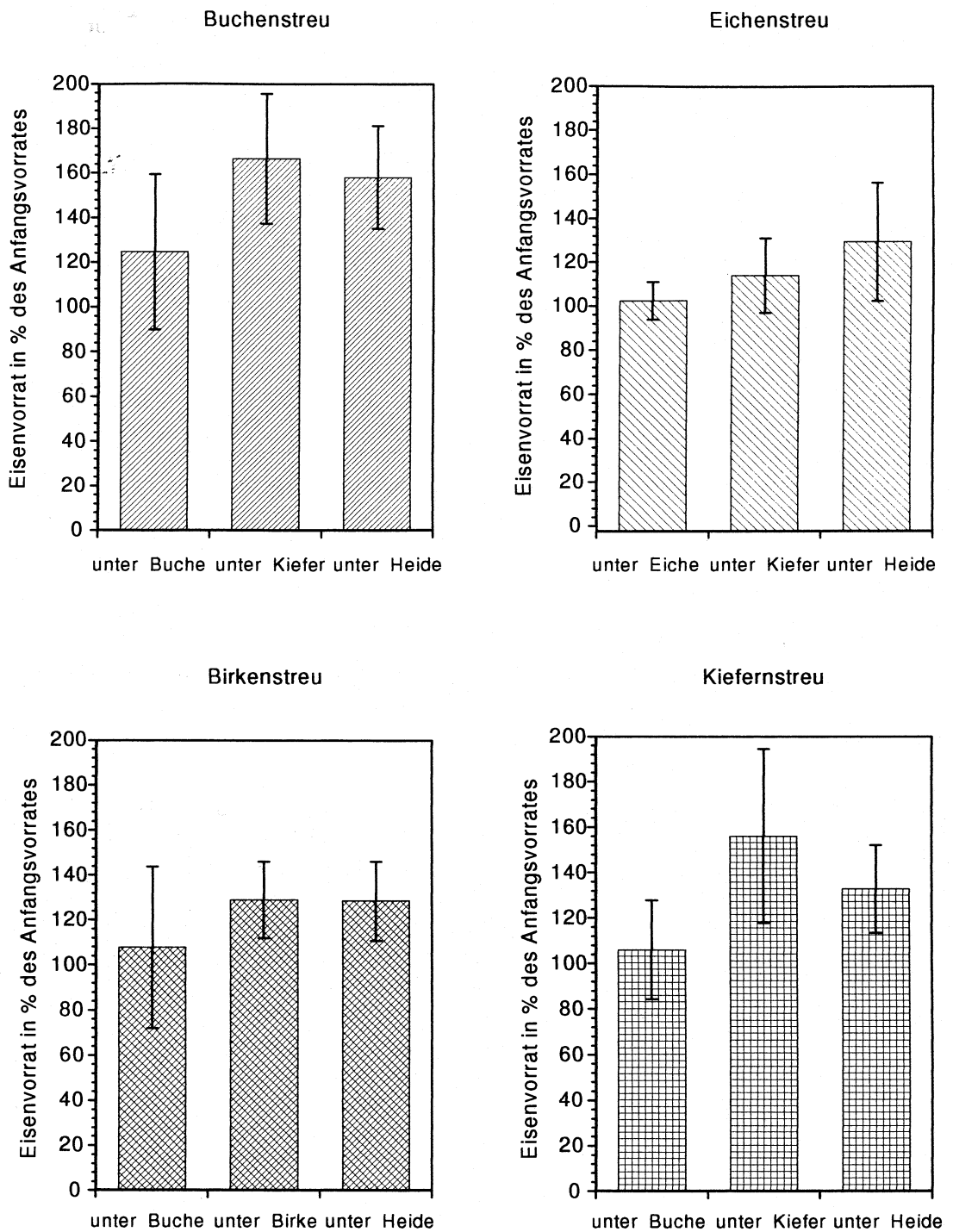




**Abb. 32:** Veränderung des Eisenvorrates der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 33:** Veränderung des Eisenvorrates der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



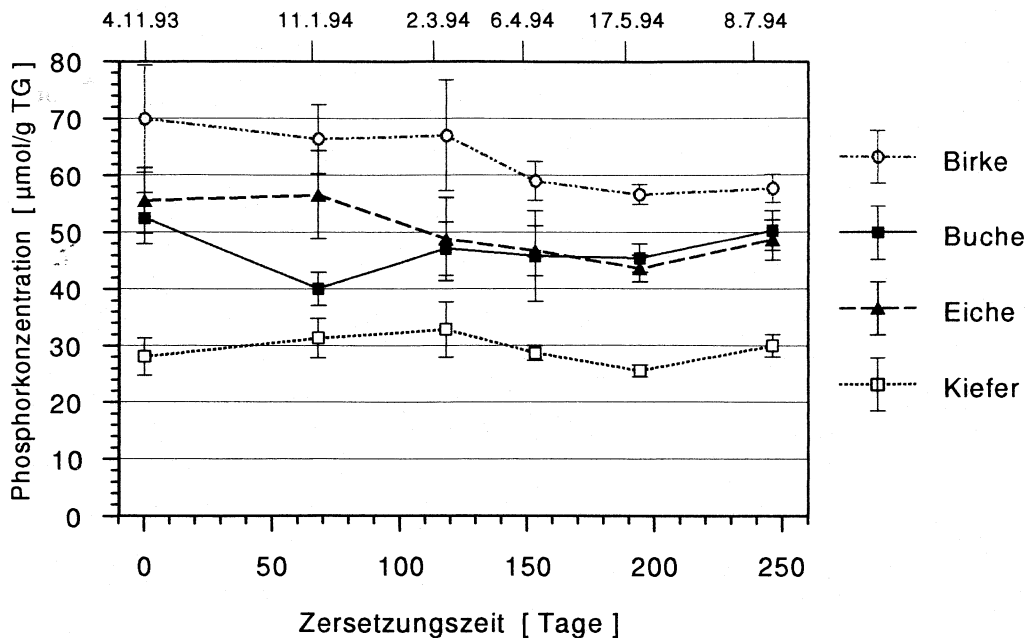
**Abb. 34:** Eisenvorrat der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat (Austauschversuche)

Bei der **O<sub>F</sub>-Lage** (Abb. 31) sind demgegenüber deutlichere Unterschiede in der Anfangskonzentration zwischen den Arten zu erkennen, die außer zwischen Birke und Kiefer signifikant sind. Die höchsten Konzentrationen weist dabei die Birkenstreu auf, nur etwas geringere zeigt die Kiefernstreu, deutlich niedrigere Gehalte besitzen Eichen- und Buchenstreu. Beachtenswert sind vor allem die im Vergleich zur O<sub>L</sub>-Streu beträchtlich höheren Konzentrationen aller vier Arten (im Falle der Birkenstreu ca. 8 mal so hoch). Die Veränderung der Gehalte durch den Zersetzungsprozeß bietet dagegen ein sehr uneinheitliches Bild: signifikante Unterschiede zwischen den Anfangs- und Endkonzentrationen sind nur bei der Buchen- und Kiefernstreu zu erkennen, wobei sich die Konzentration bei der Buchenstreu erhöht, bei der Kiefernstreu jedoch vermindert.

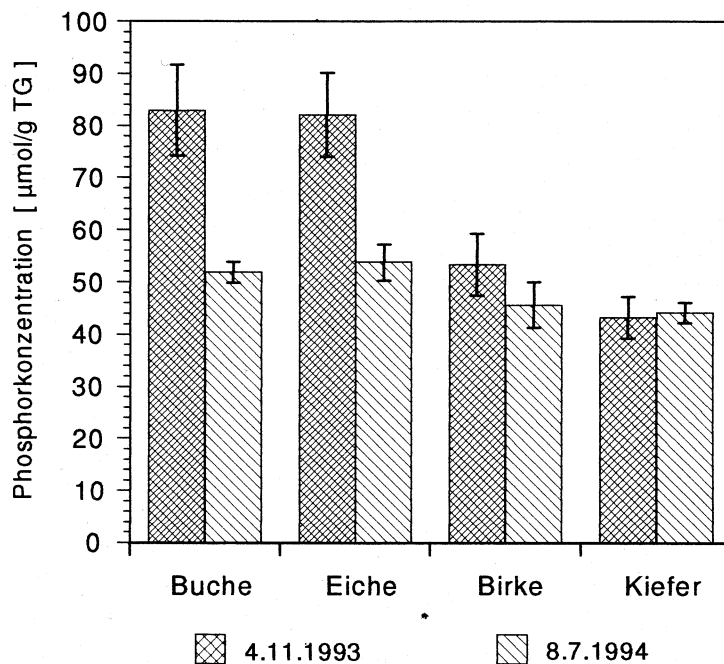
Die prozentuale Veränderung der Eisenvorräte der **O<sub>L</sub>-Streu** in Abbildung 32 läßt unmittelbar die Tendenz zur Eisenakkumulation bei allen vier Streuarten erkennen, die jedoch nur bei Birken- und Kiefernstreu statistisch nachgewiesen ist. Die Unterschiede im Grad der Akkumulation lassen sich aufgrund hoher Standardabweichungen ebenfalls nicht überall absichern; signifikant ist jedoch die höhere Akkumulation der Kiefernstreu gegenüber der Buchen- und Eichenstreu.

In der **O<sub>F</sub>-Streu** verändern sich die prozentualen Eisenvorräte ebenso uneinheitlich wie die Fe-Konzentrationen (Abb. 33): während bei Buchen- und Birkenstreu eine Tendenz zu weiterer Akkumulation zu sehen ist (die jedoch nicht abgesichert ist), setzten Eichen- und vor allem Kiefernstreu während der Untersuchungszeit in signifikanter Weise Eisen frei.

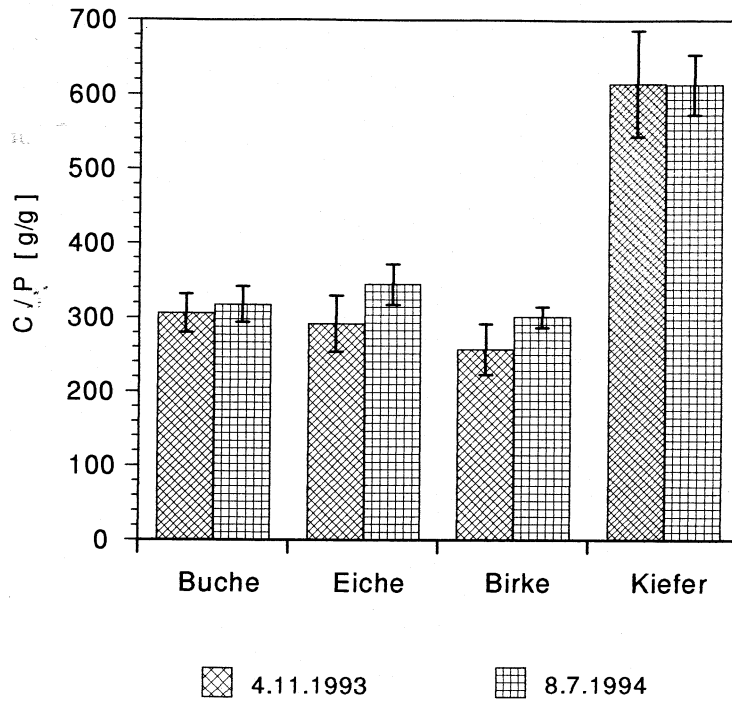
Der Vergleich der drei Untersuchungsflächen durch die **Austauschversuche** zeigt ebenfalls keinen einheitlichen Trend (Abb. 34). Während bei der Birkenstreu keinerlei Unterschiede zwischen den drei Standorten abzusichern sind, ist eine Tendenz geringerer Akkumulation von Eisen am Eichen-Buchenstandort gegenüber den anderen beiden Standorten bei der Buchen-, Eichen- und Kiefernstreu statistisch signifikant (bei der Eichenstreu nur im Vergleich zum Heidestandort). Bei der Birkenstreu verhindert die hohe Standardabweichung die Absicherung dieser Tendenz.



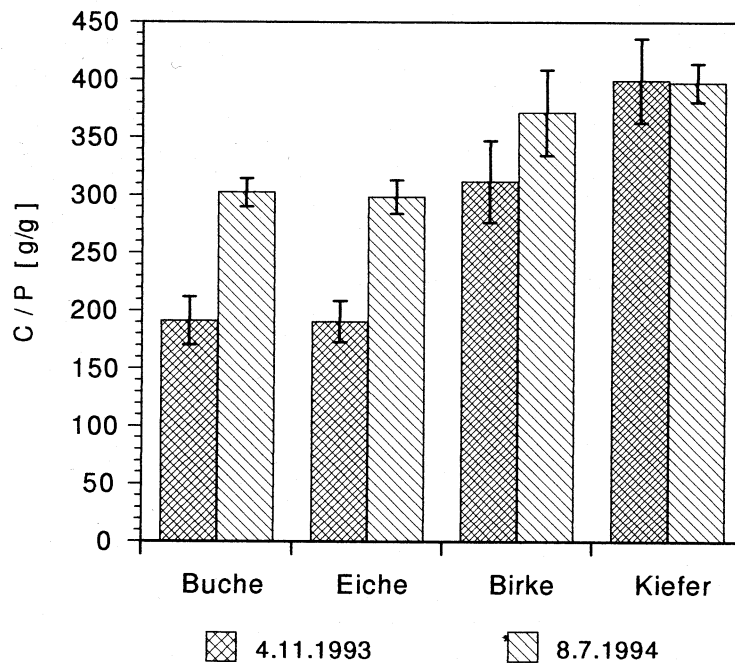
**Abb. 35:** Veränderung der Phosphorkonzentration der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 36:** Veränderung der Phosphorkonzentration der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 37:** Veränderung des C/P-Verhältnisses der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 38:** Veränderung des C/P-Verhältnisses der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

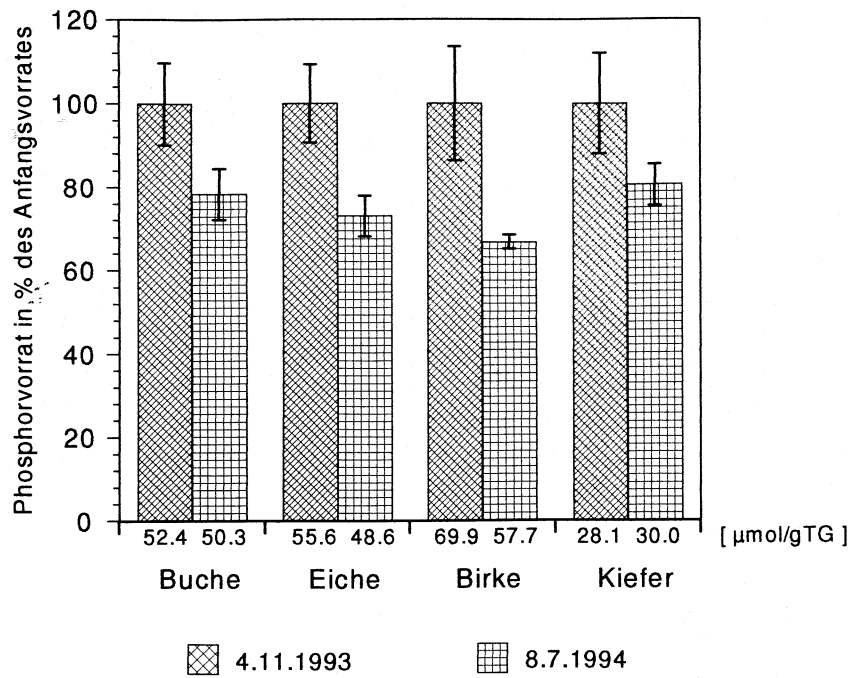
#### 4.4 Veränderung des Phosphorgehaltes

Aus Abbildung 35 werden die Phosphorkonzentrationen der  $O_L$ -Streu der vier Baumarten und ihre Veränderung während der 246 Tage Zersetzungszeit ersichtlich. Auffallend sind wie schon bei den meisten Kationen die deutlichen Unterschiede in den Anfangskonzentrationen, die zwischen den Arten bestehen. Wie bei Magnesium weist die Birkenstreu die höchsten P-Konzentrationen auf, während die Kiefernstreu in derselben Waldgesellschaft weitaus geringere Phosphorkonzentrationen besitzt (in der frischen Streu weniger als die Hälfte). Die Gehalte der Buchen- und Eichenstreu liegen etwa in der Mitte zwischen denjenigen der beiden anderen Arten bei nahezu identischen Werten. Dementsprechend sind die Unterschiede zwischen den Arten außer zwischen Buche und Eiche signifikant. Weiterhin auffallend sind die geringen Veränderungen der Gehalte während des Untersuchungszeitraumes; einzig bei der Birkenstreu ist die geringfügige Konzentrationsabnahme statistisch gesichert.

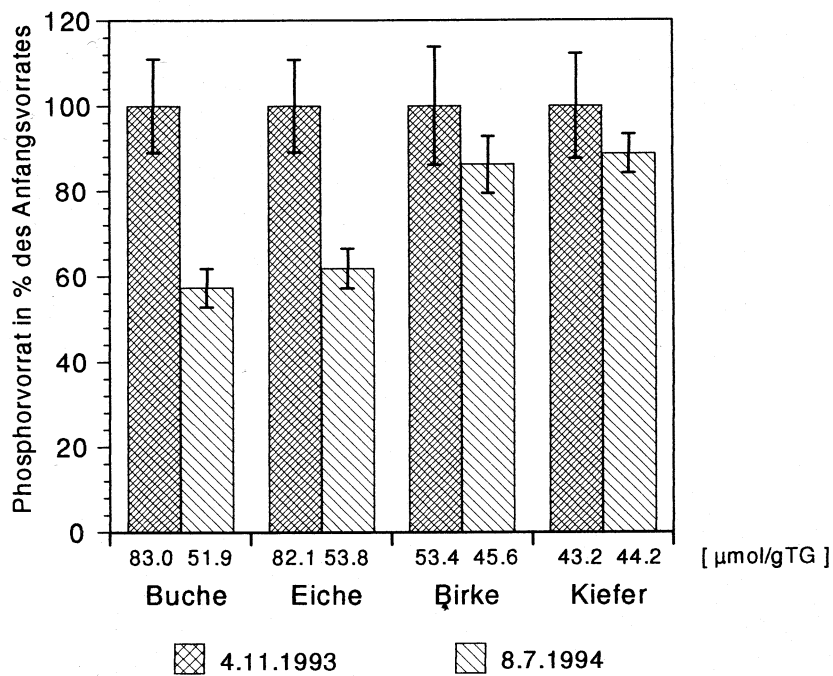
Bei der  $O_F$ -Streu (Abb. 36) fällt in erster Linie die signifikante Diskrepanz in den Anfangsgehalten zwischen Buchen-/Eichenstreu einerseits und der Birken-/Kiefernstreu andererseits auf, während zwischen Streuarten desselben Standortes keine (Buche und Eiche) oder nur geringe Unterschiede (Birke und Kiefer) signifikant sind. Bei allen Streuarten außer der Birkenstreu liegen die Anfangskonzentrationen dabei über den Endkonzentrationen der  $O_L$ -Streu. Nach Ablauf der Untersuchungszeit haben sich die Konzentration einander angeglichen, zum größten Teil durch die starke Konzentrationsverringerng in der Buchen- und Eichenstreu (um ca. 35% des Anfangsgehaltes). Bei allen Streuarten außer der Kiefernstreu sind signifikante Veränderungen zwischen Anfangs- und Endkonzentration festzustellen.

Der Zusammenhang zwischen Phosphorabgabe und Gewichtsverlust geht unmittelbar aus den Veränderungen der C/P-Verhältnisse in Abbildungen 37 und 38 hervor. Bei der  $O_L$ -Streu fällt das hohe C/P-Verhältnis der Kiefernstreu auf, das in den geringen Phosphorgehalten begründet liegt. Ansonsten sind die C/P-Verhältnisse unter den Arten ausgeglichen und unterscheiden sich auch kaum zwischen den beiden Probestimmen; allein bei der Birkenstreu ist der leichte Anstieg des C/P-Wertes signifikant. Die Phosphorfreisetzung erfolgte also weitgehend parallel zum Gewichtsverlust.

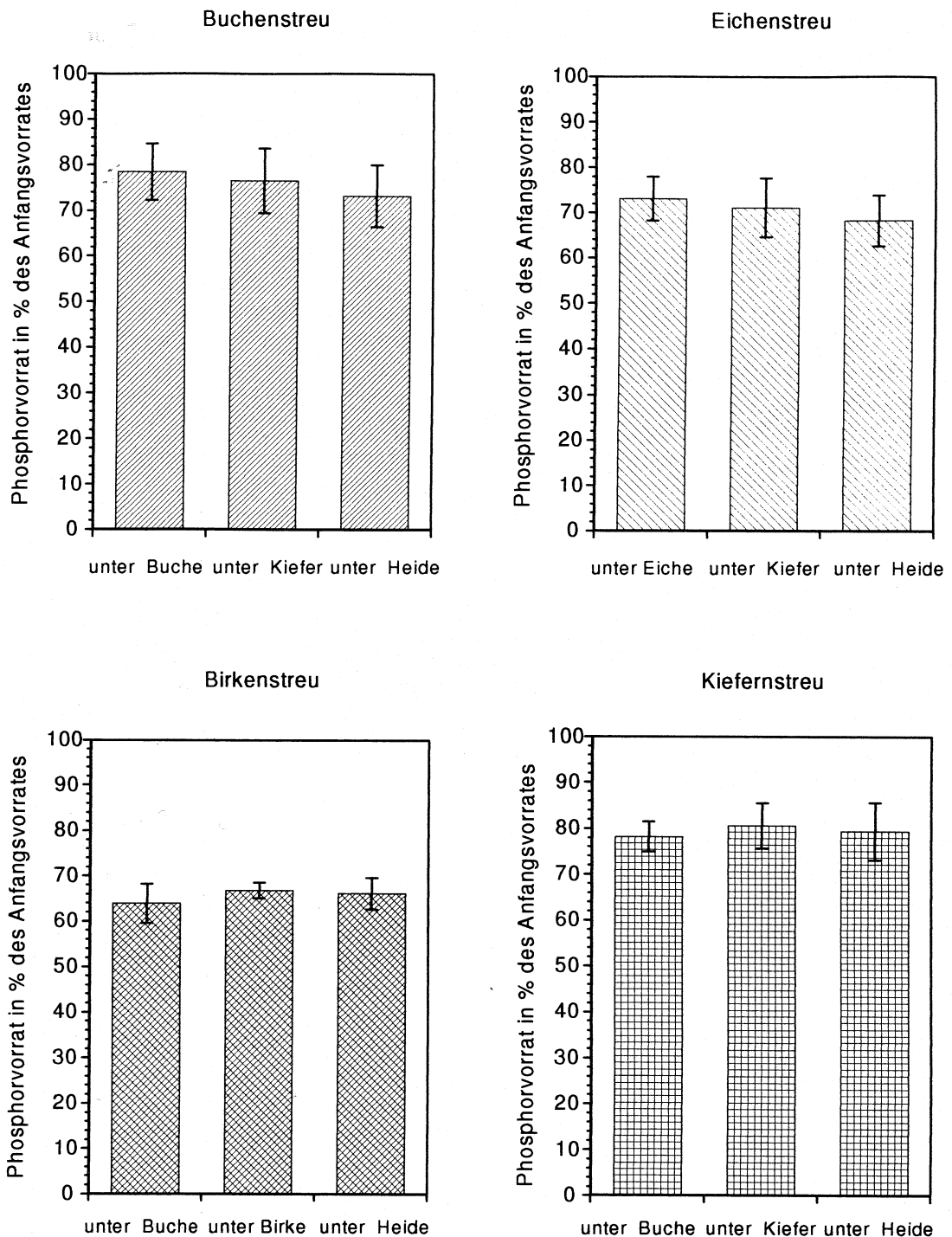
Bei der  $O_F$ -Streu sieht das Bild etwas anders aus: Während die Kiefernstreu keine Veränderung in ihrem hohen C/P-Verhältnis erkennen läßt, steigt dieses bei den anderen drei Arten während der Zersetzung signifikant an. Buchen- und Eichenstreu zeichnen sich



**Abb. 39:** Veränderung des Phosphorvorrates der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 40:** Veränderung des Phosphorvorrates der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 41:** Phosphorvorrat der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat (Austauschversuche)



dabei gegenüber der Birkenstreu durch eine deutlichere Erhöhung und ihre faktisch identischen Werte aus. Beachtenswert ist außerdem, daß die Anfangswerte von Buchen-, Eichen und Kiefernstreu weit niedriger liegen als die der  $O_L$ -Streu.

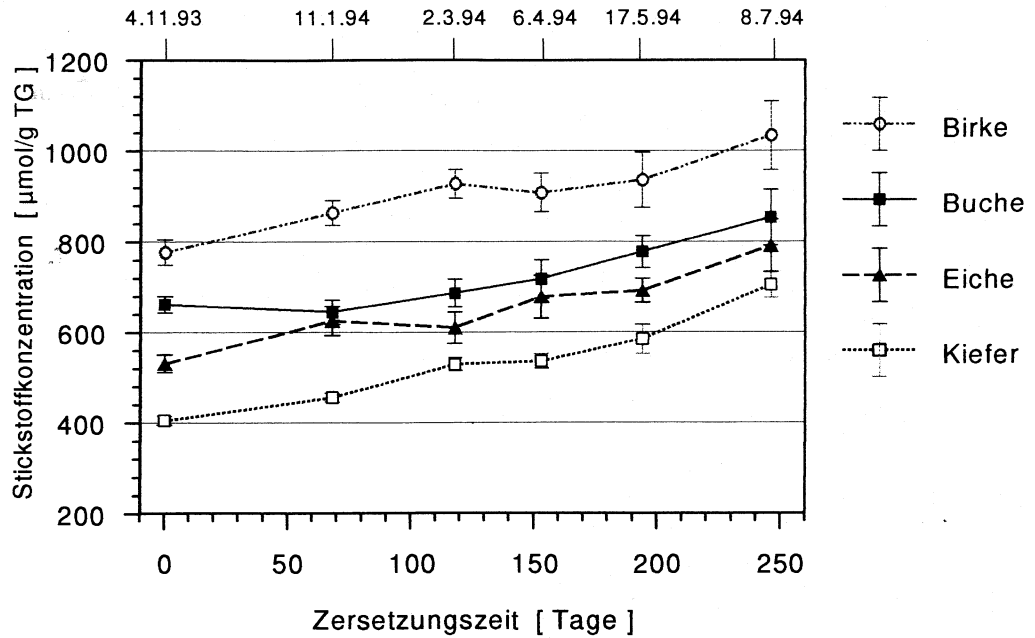
Die Verläufe der Veränderung im prozentualen Phosphorvorrat der  $O_L$ -Streu bieten keine einheitlichen Tendenzen (s. Tab. A 10), so daß in Abbildung 39 nur der Vergleich der Anfangs- und Endwerte dargestellt ist. Hier läßt sich bei allen Arten eine signifikante Freisetzung von Phosphor durch den Zersetzungsprozeß erkennen. Die größte P-Abgabe zeigt dabei in signifikanter Weise die Birkenstreu, die ja auch die höchsten Konzentrationen aufweist. Entsprechend ihrer Anfangskonzentration folgen danach Eichen-, Buchen und zuletzt die Kiefernstreu.

Bei der  $O_F$ -Streu zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Phosphorverlust nach 246 Tagen Zersetzung (Abb. 40). Bei der Birken- und Kiefernstreu ist diese Abgabe von Phosphor jedoch nur gering. Eine sehr hohe Freisetzung weisen dagegen Buchen- und Eichenstreu auf, wobei diese deutlich höher als in der  $O_L$ -Lage ausfällt. Zusammen mit der Tatsache, daß die Konzentrationen in der  $O_F$ -Lage ebenfalls deutlich höher als in der  $O_L$ -Lage sind, muß festgestellt werden, daß der Hauptanteil der Phosphormineralisation nicht aus der  $O_L$ -, sondern aus der  $O_F$ -Lage erfolgt.

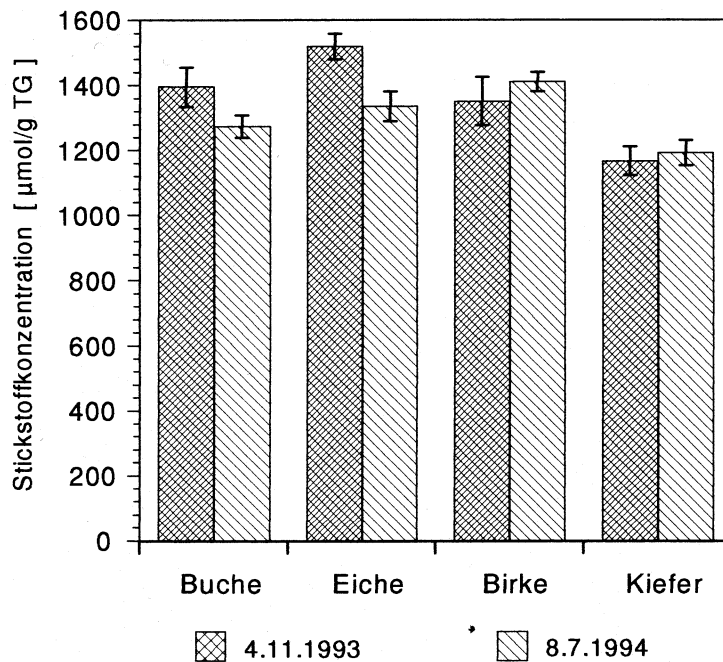
Im Vergleich der Untersuchungsflächen (Abb. 41) lassen sich außer den unterschiedlichen Freisetzungsniveaus zwischen den vier Arten keine Unterschiede zwischen den drei Standorten Buchen-Eichenwald, Birken-Kiefernwald und *Calluna*-Heide erkennen oder statistisch nachweisen. Die Phosphorfreisetzung erfolgt demnach offenbar unabhängig von den Standortsbedingungen.

#### 4.5 Veränderung des Stickstoffgehaltes

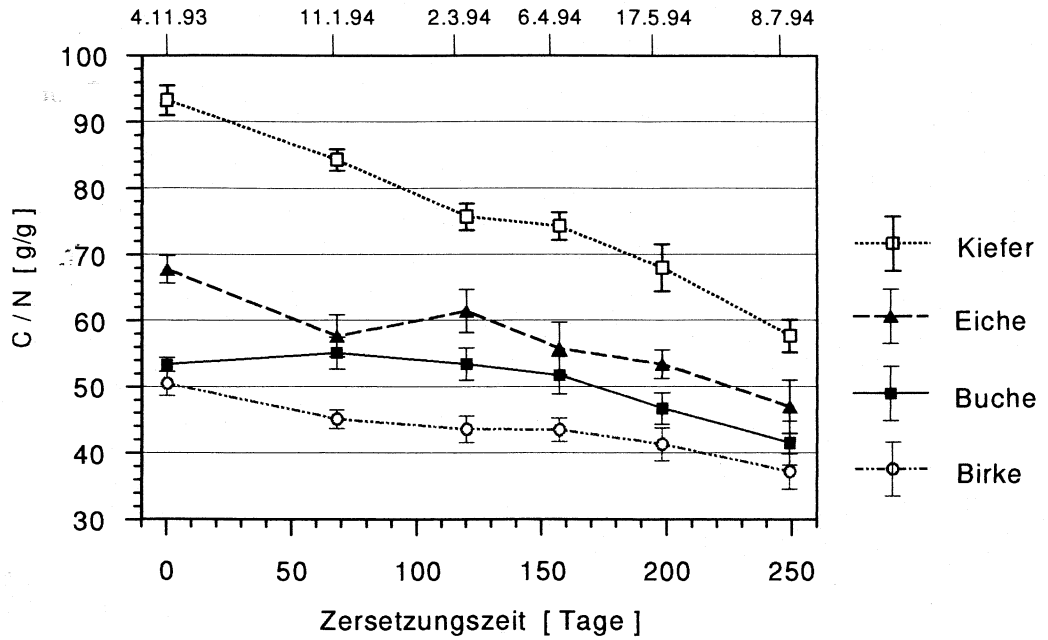
Unter den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Pflanzennährstoffen besitzt Stickstoff den mit Abstand größten prozentualen Anteil an der Phytomasse. In Abbildung 42 ist die Veränderung der Stickstoffkonzentrationen in der  $O_L$ -Streu während des Untersuchungszeitraumes dargestellt. Wie bei den meisten Nährstoffen sind auch hier deutliche Unterschiede zwischen den vier Baumarten zu erkennen. Dabei besteht die gleiche Reihenfolge wie bei den Magnesium- und Phosphorkonzentrationen: die Birkenstreu ist am stickstoffreichsten, während die Kiefernstreu die geringsten N-Konzentrationen besitzt.



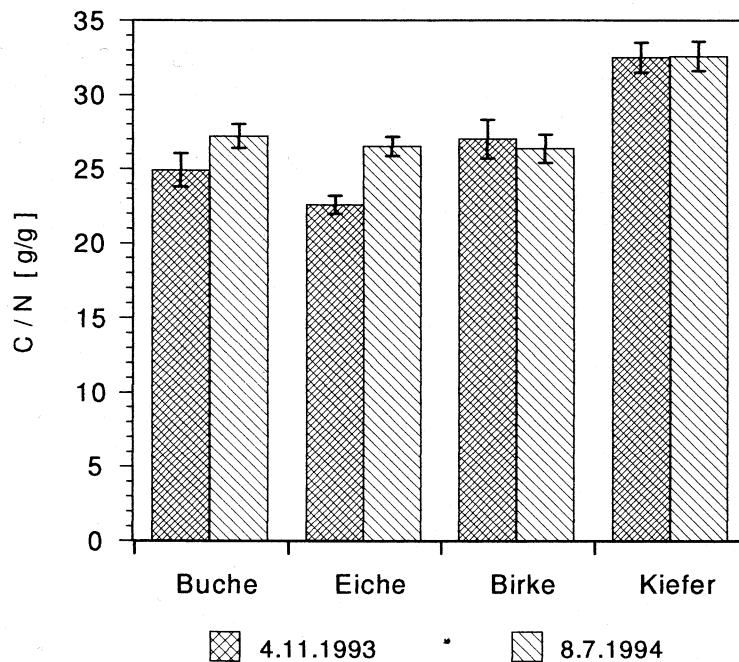
**Abb. 42:** Veränderung der Stickstoffkonzentration der  $O_L$ -Streus von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 43:** Veränderung der Stickstoffkonzentration der  $O_F$ -Streus von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 44:** Veränderung des C/N-Verhältnisses der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 45:** Veränderung des C/N-Verhältnisses der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

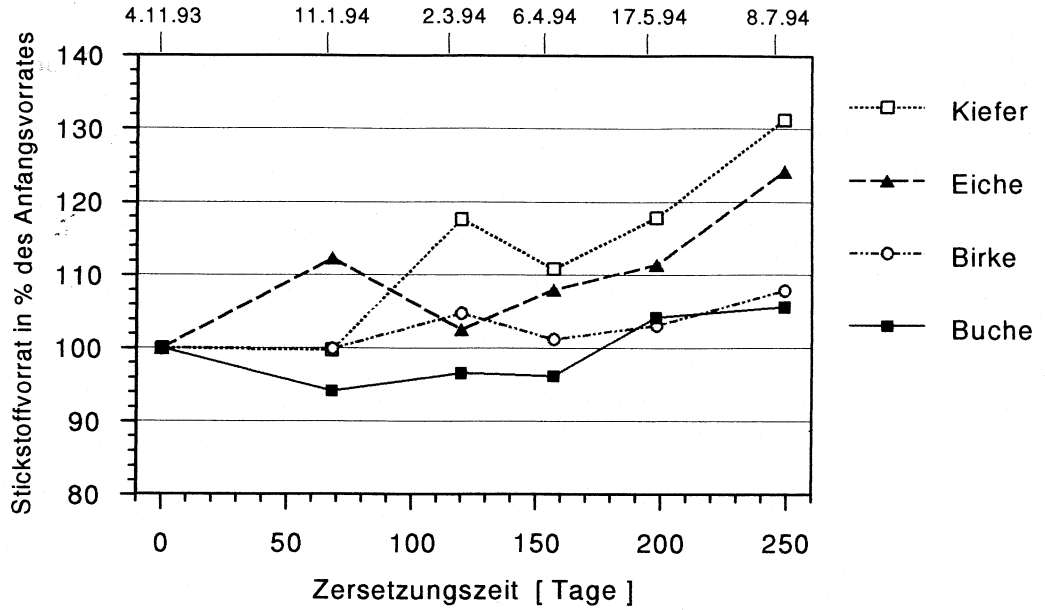
Buchen- und Eichenstreu liegen zwischen diesen beiden Arten und unterscheiden sich in ihrem Stickstoffgehalt weit weniger stark als die erstgenannten. Die Unterschiede zwischen den Arten sind an nahezu jedem Zeitpunkt statistisch signifikant. Bei allen vier Arten fällt die gleichmäßige Konzentrationszunahme über den gesamten Untersuchungszeitraum auf (zwischen 22,5% bei der Buchen- und 42,5% bei der Kiefernstreu), die bei allen vier Arten statistisch abgesichert ist.

Deutlich anders sieht das Bild bei der  $O_F$ -Streu aus (Abb. 43). Die Konzentrationen sind bei allen Arten noch höher als der Endwert der  $O_L$ -Streu; den Maximalwert erreicht die Eichenstreu, den niedrigsten die Kiefernstreu. Die Unterschiede zwischen den Arten sind sowohl im Anfangsgehalt als auch im Endgehalt signifikant (außer zwischen Buche und Birke zu Versuchsbeginn). Auch in der Veränderung der Gehalte durch den Zersetzungsprozeß sind unterschiedliche Tendenzen zwischen den Arten zu sehen. Während bei der Buchen- und Eichenstreu eine Konzentrationsabnahme signifikant ist, zeigen Birken- und Kiefernstreu tendenziell eine weitere Konzentrationszunahme, die jedoch statistisch nicht absicherbar ist.

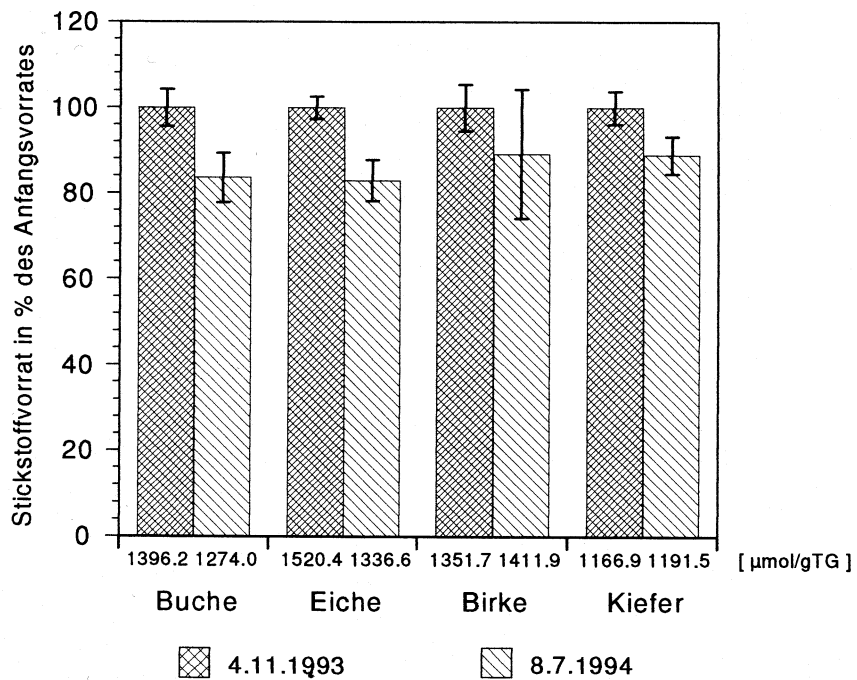
Die in den Abbildungen 44 dargestellten Veränderungen im C/N-Verhältnis der  $O_L$ -Streu zeigen deutlich, daß sich die Stickstoffgehalte keinesfalls analog zum Kohlenstoffschwund verändern. Die Stickstoffgehalte variieren unter den vier Streuarten stärker als die Kohlenstoffgehalte; dementsprechend weist die Kiefernstreu die mit Abstand höchsten C/N-Verhältnisse auf; Eichen- Buchen- und Birkenstreu folgen mit größerem Abstand. Die Unterschiede zwischen den Arten sind zu praktisch jedem Zeitpunkt abgesichert. Im Verlauf der Streuzersetzung ist jedoch eine stetige Annäherung der Werte infolge einer signifikanten Verringerung bei allen Arten zu beobachten; dabei nimmt das C/N-Verhältnis bei Buche und Kiefer stärker ab als bei Eiche und Birke, die von vornherein niedrigere C/N-Werte aufweisen.

Analog zu den Konzentrationsveränderungen verhalten sich auch die C/N-Werte der  $O_F$ -Lage (Abb. 45). Die Anfangswerte sind hier nochmals deutlich geringer als die Endwerte der  $O_L$ -Streu. Dabei unterscheiden sich die vier Streuarten auch hier signifikant in ihren Anfangswerten. Besonders fällt das deutlich höhere C/N-Verhältnis der Kiefernstreu im Vergleich zu den anderen drei Arten auf. Signifikante Veränderungen der C/N-Verhältnisse infolge des Zersetzungsprozesses sind nur bei der Buchen- und Eichenstreu zu beobachten. Birken- und Kiefernstreu behalten dagegen ihr Anfangsniveau bei.

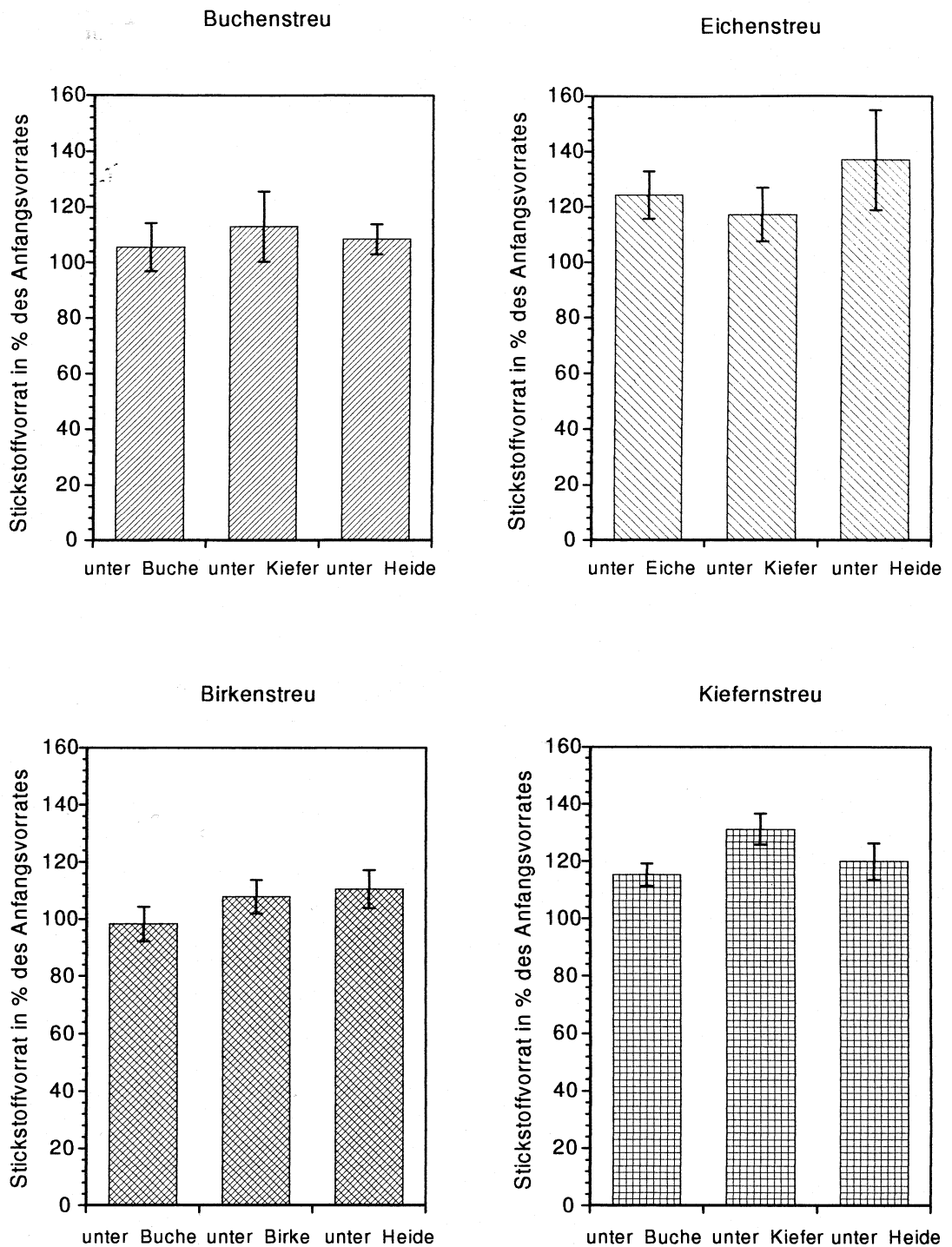
Die Veränderungen der prozentualen Stickstoffvorräte der  $O_L$ -Streu in den *litter bags* (Abb. 46) vermitteln den Eindruck eines restriktiven Stickstoffumsatzes während der



**Abb. 46:** Veränderung des Stickstoffvorrates der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 47:** Veränderung des Stickstoffvorrates der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort

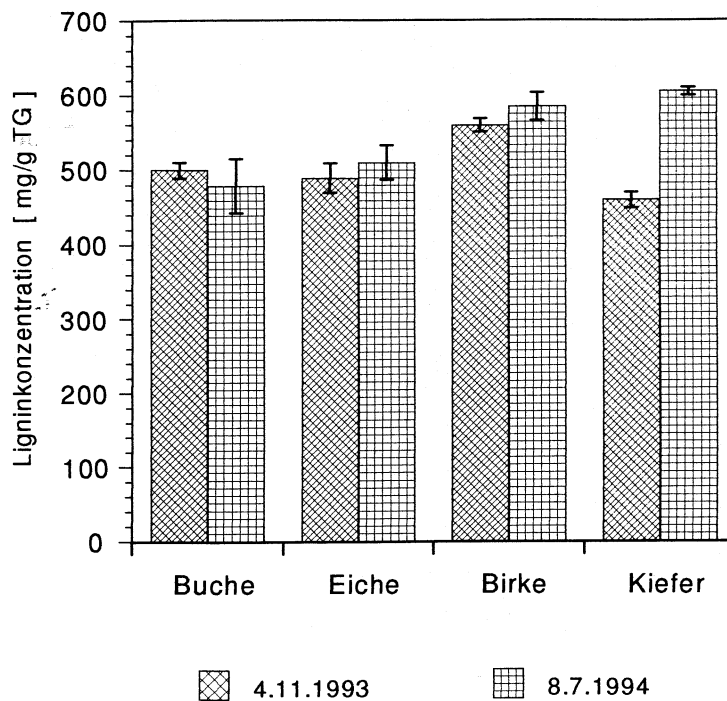


**Abb. 48:** Stickstoffvorrat der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat (Austauschversuche)

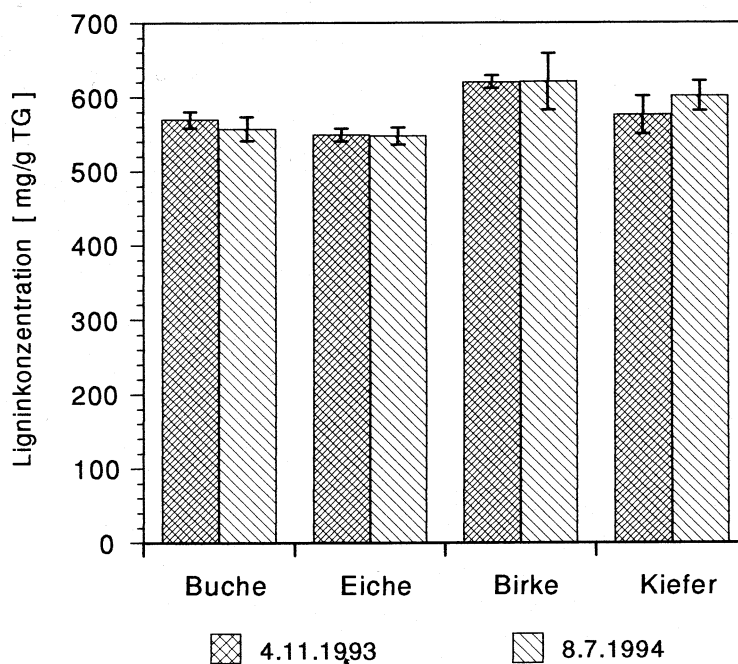
Streuzersetzung. Die einzelnen Verläufe der vier Arten sind untereinander relativ uneinheitlich, zumal Veränderungen zwischen aufeinanderfolgenden Probestritten nur selten statistisch absicherbar sind. Die Tendenz zu mehr oder minder starker Akkumulation von Stickstoff mit zunehmender Untersuchungsdauer ist jedoch bei allen Arten erkennbar, allerdings nur bei Kiefern- und Eichenstreu abgesichert. Diese beiden Arten zeigen die deutlichste N-Akkumulation, so daß ein signifikanter Unterschied im relativen Stickstoffvorrat zum Ende der Untersuchungszeit zwischen Kiefern- und Eichenstreu einerseits und Buchen- und Birkenstreu andererseits besteht.

Die Veränderungen der prozentualen N-Vorräte in der  $O_F$ -Streu (Abb. 47) verhalten sich demgegenüber umgekehrt (wie auch schon die Konzentrationsveränderungen): Bei allen Streuarten ist eine deutliche Freisetzung von Stickstoff zu erkennen, die mit Ausnahme der Birkenstreu auch statistisch signifikant ist. Eine scheinbare Tendenz zu stärkerer Stickstofffreisetzung bei der Buchen- und Eichenstreu im Verhältnis zu den anderen beiden Streuarten ist statistisch nicht abzusichern. Wie beim Phosphor ist also auch hier klar die  $O_F$ -Schicht und nicht etwa die  $O_L$ -Schicht als Ort der Stickstoffmineralisation zu identifizieren.

Der Vergleich der Untersuchungsflächen durch die **Austauschversuche** zeigt wie die Veränderungen in der  $O_L$ -Streu ebenfalls ein uneinheitliches Bild (Abb. 48). Bei der Buchenstreu ist zwar eine geringe Tendenz zu stärkerer Akkumulation von Stickstoff am Kiefernstandort zu sehen, jedoch sind die Unterschiede zwischen den drei Flächen nicht signifikant. Die Eichenstreu weist umgekehrt eine eher geringere Akkumulation am Kiefernstandort, dafür aber eine Zunahme am Heidestandort auf, wobei nur die unterschiedliche Akkumulation zwischen Kiefernwald und Heide signifikant ist. Die Birkenstreu läßt eine signifikante, wenngleich geringe N-Freisetzung am Buchenstandort erkennen. Bei der Kiefernstreu schließlich fällt die signifikante Akkumulation von Stickstoff am arteigenen Standort gegenüber Buchenwald und Heide auf. Festzuhalten aus diesen etwas unübersichtlichen Befunden ist, daß bei allen vier Streuarten am Buchenstandort eine geringere Stickstoffanreicherung (im Falle der Birken- und Kiefernstreu) oder zumindest keine stärkere Akkumulation (im Falle der Buchen- und Eichenstreu) als an den beiden anderen Standorten zu verzeichnen ist.

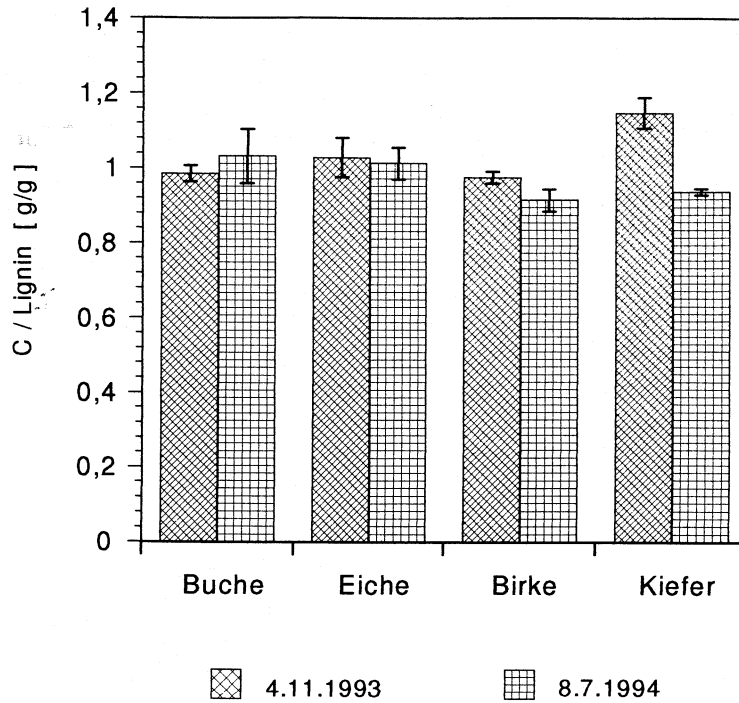


**Abb. 49:** Veränderung der Ligninkonzentration der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

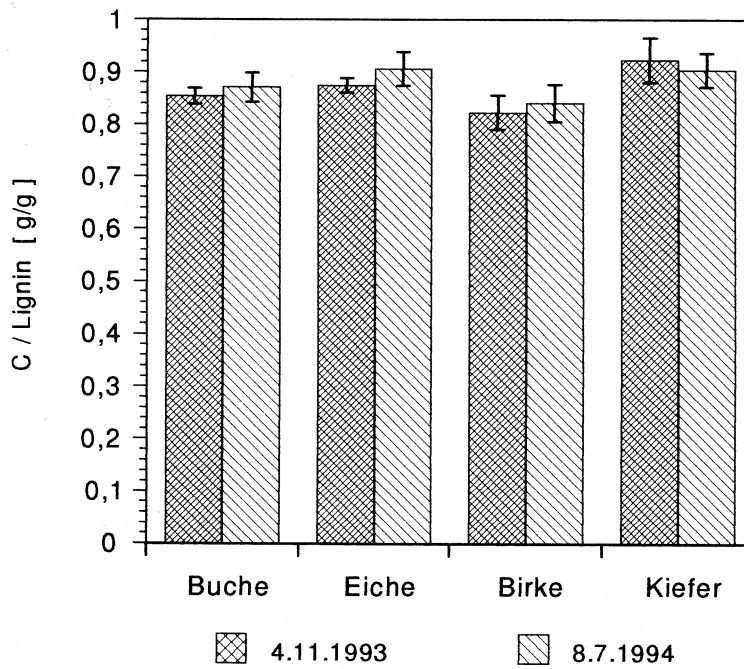


**Abb. 50:** Veränderung der Ligninkonzentration der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort





**Abb. 51:** Veränderung des C/Lignin-Verhältnisses der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort



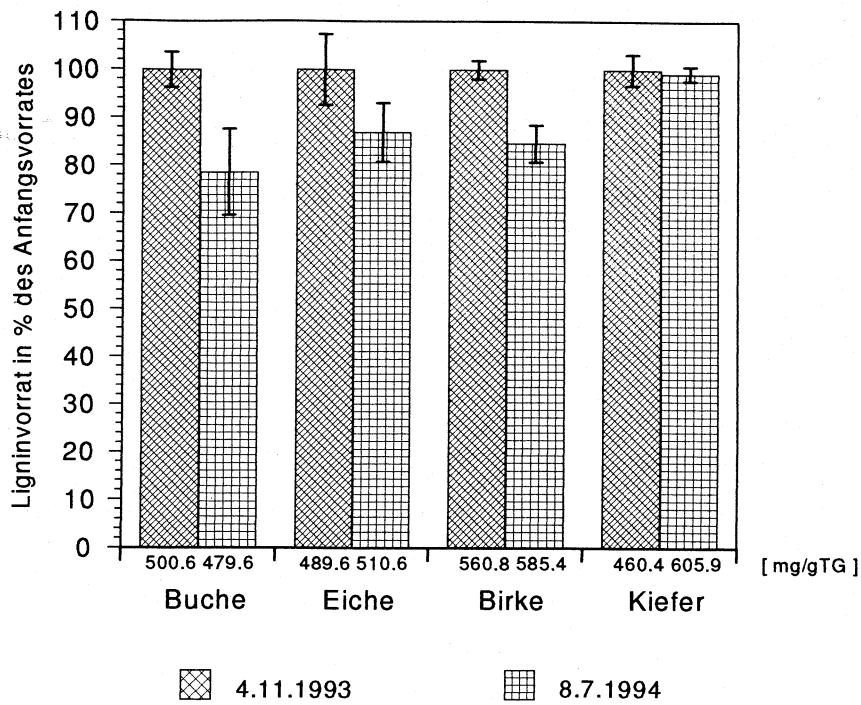
**Abb. 52:** Veränderung des C/Lignin-Verhältnisses der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer bei Lagerung am Herkunftsort

## 4.6 Veränderung des Ligningehaltes

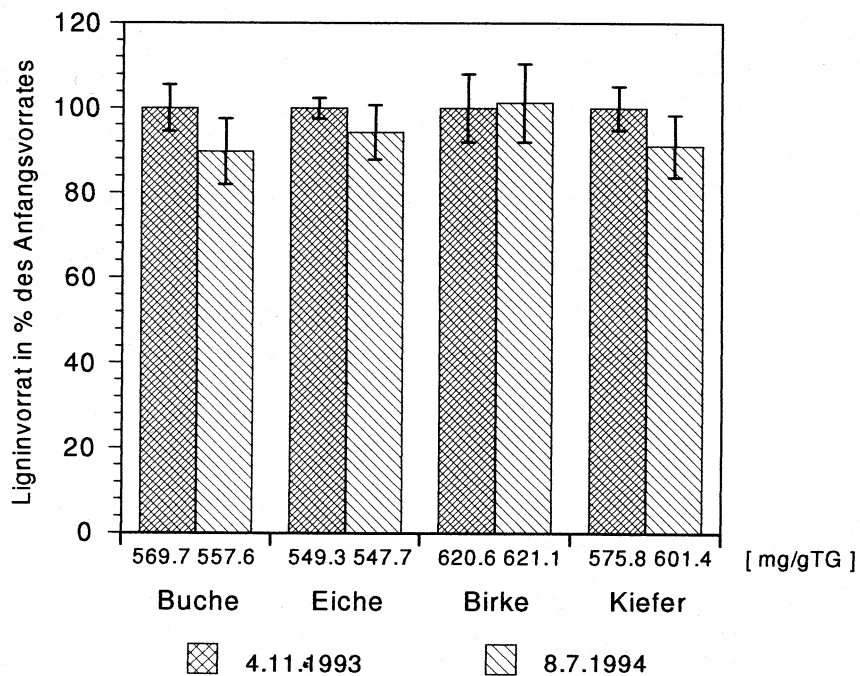
Als Parameter zersetzungshemmender Inhaltssubstanzen wurde in der vorliegenden Untersuchung der Ligningehalt der jeweiligen Streuart an den verschiedenen Probestritten bestimmt. Wenn im folgenden von "Lignin" gesprochen wird, ist damit der nach oben beschriebener Methode (Kap. 3.2.5) ermittelte Anteil von verschiedenen Polyphenolen, Lignocellulosen und auch Lignin selbst in der Streu ("Klason-Lignin" s.l.) gemeint. Die Veränderungen der Ligninkonzentration der  $O_L$ -Streu zwischen den einzelnen Probestritten bieten ein sehr uneinheitliches Bild (siehe Tab. A 8) und sind oft nicht statistisch absicherbar, so daß in den Abbildungen 49 und 53 nur die Anfangs- und Endwerte dargestellt sind. Die ermittelten Ligningehalte in der  $O_L$ -Lage (Abb. 49) liegen bei allen vier Streuarten sehr hoch (zwischen 46% und 56% der Trockenmasse). Dabei bestehen vor allem im Anfangsgehalt signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Arten: die Kiefernstreu weist die geringsten Ligningehalte auf, während bei der Birkenstreu die höchsten Konzentrationen zu erkennen sind; Buchen- und Eichenstreu liegen ohne signifikante Unterschiede in ihrem Anfangsgehalt zwischen den beiden erstgenannten. Nach Ablauf der Zersetzungszeit ist nur bei der Kiefernstreu eine signifikante Veränderung der Ligninkonzentration festzustellen; die leichte Konzentrationszunahme bei der Eichen- und Birkenstreu kann dagegen höchstens als Tendenz gewertet werden.

Die Ligninkonzentrationen der  $O_F$ -Streu (Abb. 50) liegen bei allen vier Arten über denen der  $O_L$ -Streu. Während auch hier die Birkenstreu eine signifikant höhere Ligninkonzentration besitzt als die anderen Streuarten, bestehen zwischen den anderen Arten praktisch keine gesicherten Unterschiede. Eine signifikante Veränderung der Ligninkonzentration infolge des Zersetzungsprozesses ist wie in der  $O_L$ -Streu nur bei der Kiefernstreu zu erkennen.

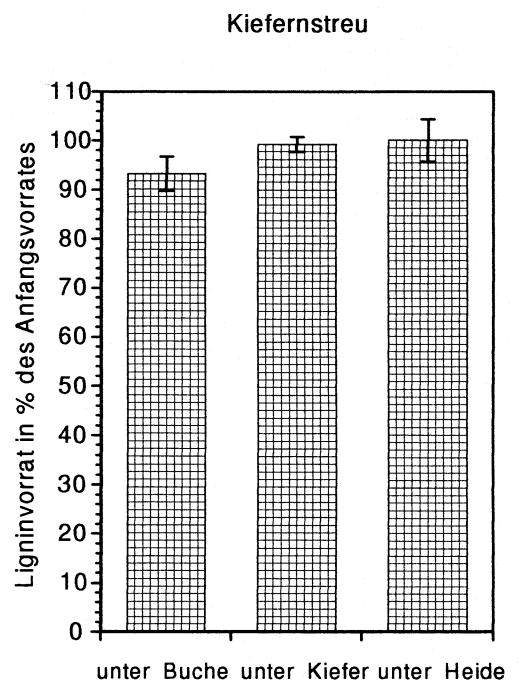
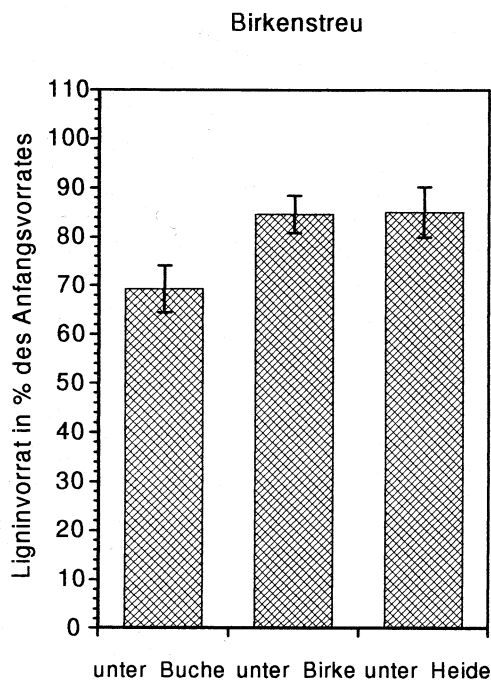
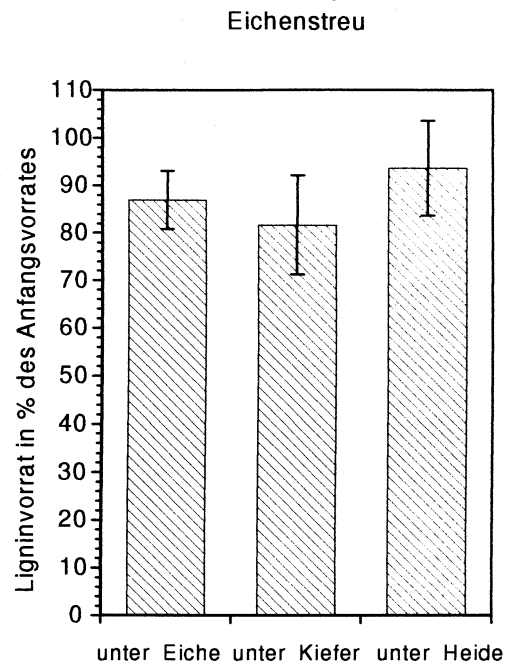
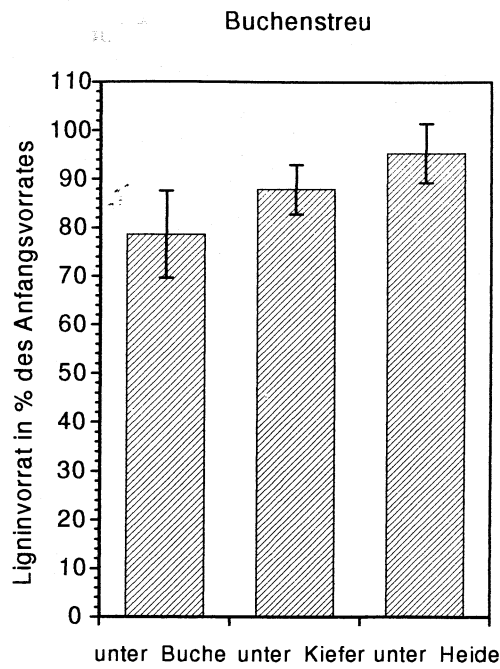
Beim Vergleich der C/Lignin-Verhältnisse der  $O_L$ -Streu (Abb. 51) sind zwischen den drei Laubstreuarten (Buche, Eiche und Birke) keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Signifikant unterschiedlich ist allerdings das weitere C/Lignin-Verhältnis der frischen Kiefernstreu gegenüber den drei anderen Streuarten. Wie schon die Konzentrationen erkennen lassen, ist der Ligninanteil an der Trockenmasse mit C/Lignin-Werten um 1,0 sehr hoch, wobei in Betracht gezogen werden muß, daß bei der Ligninfraktion auch lignifizierte Cellulosebestandteile enthalten sind. Veränderungen im C/Lignin-Verhältnis nach den 246 Tagen Untersuchungszeit sind unter den Laubstreuarten nur bei der Birken



**Abb. 53:** Veränderung des Ligninvorrates der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer während 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 54:** Veränderung des Ligninvorrates der  $O_F$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat bei Lagerung am Herkunftsort



**Abb. 55:** Ligninvorrat der  $O_L$ -Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer auf den drei Sukzessionsflächen nach 246 Tagen Untersuchungsdauer relativ zum Anfangsvorrat (Austauschversuche)

streu statistisch abgesichert, wenngleich nur gering. Bei der Kiefernstreu tritt dagegen eine deutlichere, signifikante Verengung des C/Lignin-Verhältnisses auf. Damit liegen die Werte bei der Birken- und Kiefernstreu nach Ende der Untersuchungszeit deutlich unter 1,0 und unterscheiden sich signifikant von denen der Buchen- und Eichenstreu, die über 1,0 liegen.

Die C/Lignin-Verhältnisse der **O<sub>F</sub>-Streu** (Abb. 52) zeigen sämtlich Werte unter 1,0 und liegen bei allen vier Streuarten unter den entsprechenden Werten der O<sub>L</sub>-Streu. Wiederum sind die Unterschiede zwischen den Arten gering und signifikante Veränderungen zwischen den beiden Probezeitpunkten sind nur bei der Birkenstreu festzustellen. Ebenso wie bei der O<sub>L</sub>-Lage besitzt in signifikanter Weise die Birkenstreu das engste und die Kiefernstreu das weiteste C/Lignin-Verhältnis.

Die prozentualen Ligninvorräte in der **O<sub>L</sub>-Streu** (Abb. 53) sehen bei den vier Arten unterschiedlich aus: während bei der Kiefer keine signifikante Veränderung zu erkennen ist, zeigen Buchen-, Eichen- und Birkenstreu eine statistisch nachgewiesene Verringerung des Ligningehaltes. Signifikante Unterschiede im Grad des Ligninschwundes existieren dabei nur zwischen Buchen- und Eichenstreu.

In der **O<sub>F</sub>-Streu** fallen die Veränderungen der prozentualen Vorräte geringer als in der O<sub>L</sub>-Streu aus (Abb. 54), wenngleich die geringe Abnahme bei allen Arten mit Ausnahme der Birkenstreu signifikant ist, wo keine Veränderung festzustellen ist. Scheinbare Unterschiede im Grad des Ligninabbaus zwischen den einzelnen Arten sind statistisch nicht abgesichert.

Der Vergleich der drei Untersuchungsflächen durch **Austausch** von O<sub>L</sub>-Streu (Abb. 55) zeigt wiederum deutliche Unterschiede im Zersetzungsverhalten der vier Streuarten. Bei der Buchen-, Birken- und Kiefernstreu läßt sich eine in signifikanter Weise stärkere Ligninfreisetzung am Buchenstandort erkennen. Die Eichenstreu zeigt dagegen einen tendenziell stärkeren Ligninverlust am Kiefernstandort und einen signifikant geringeren auf der Heide.

## KAPITEL 5: DISKUSSION

### 5.1 Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen Streuarten

Die drei Untersuchungsflächen der vorliegenden Arbeit werden von LEUSCHNER et al. (1991), LEUSCHNER (1993, 1994) und RODE et al. (1993) als Teile einer Sukzessionsreihe aufgefaßt. Die daran beteiligten Waldgesellschaften werden von den vier Baumarten *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, *Betula pendula* und *Pinus sylvestris* gebildet. Untersuchungen von RODE (1992 und 1993) zum Nährstoffgehalt lebender Blätter und der frischen Laubstreu auf denselben Untersuchungsflächen zeigten teilweise gravierende Unterschiede zwischen diesen Arten. Dabei wurde unter anderem deutlich, daß diese Unterschiede weniger auf unterschiedlichem Nährstoffangebot des Bodens der untersuchten Standorte als auf artspezifische Eigenheiten der vier Baumarten zurückzuführen sind. Auch in den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit sind diese arteigenen Unterschiede in den Nährstoffgehalten deutlich abzulesen (Kap. 4). Da es sich dabei sowohl um dieselben Baumarten als auch um dieselben Versuchsflächen wie in RODES Untersuchungen handelt, bietet sich der Vergleich der beiden unabhängig voneinander erhobenen Daten an (Tab. 7). Dabei soll vor allem folgenden Fragen nachgegangen werden:

- (a) Sind die vier Baumarten durch artspezifische Nährstoff-Verhältnisse in der Streu gekennzeichnet?
- (b) Sind artspezifischen Unterschiede über mehrere Jahre hinweg konstant beobachtbar?
- (c) Wie stark schwanken die Nährstoffgehalte einer Baumart zwischen unterschiedlichen Streujahrgängen?

An dieser Stelle muß nochmals darauf hingewiesen werden, daß die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Streu nicht wie bei RODE nach Arten getrennt analysiert wurde, sondern in den am Standort vorgefundenen Mischungsverhältnissen (s. Kap. 3.1). Dieses Verfahren kann zu einer Verwischung der artspezifischen Unterschiede führen; eine stichprobenhafte Untersuchung nach Arten sortierter Streuproben zu Beginn des

Versuches hat allerdings gezeigt, daß lediglich bei der Eichenstreu ein derartiger Effekt in Frage kommt, da hier ein Buchenstreuanteil von 40% vorliegt (s. Tab. 2).

Trotz dieser Einschränkung läßt der Vergleich der Daten aber eindeutige Aussagen zu. Die Buchen- und Eichenstreu unterscheiden sich kaum in ihren Nährstoffgehalten: Die Eichenstreu weist etwas höhere Magnesiumgehalte auf, während die Buchenstreu höhere Stickstoffgehalte und damit ein etwas niedrigeres C/N-Verhältnis hat. Diese beiden Streuarten besitzen deutlich höhere Kalium-, Calcium- und Mangangehalte als die Birken- und Kiefernstreu, wobei die Unterschiede im Mangangehalt standortsbedingt sind, wie in Kap. 5.3.2 gezeigt wird. Die Kiefernstreu fällt durch ihren relativ niedrigen Ligningehalt, vor allem aber durch ihre stetig niedrigeren Nährstoffgehalte auf. Dies findet seinen Niederschlag in den höchsten C/N- und C/P-Verhältnissen unter den vier Arten. Die Birkenstreu erscheint besonders interessant, denn sie besitzt zwar geringe Kalium-, Calcium- und Mangangehalte, dafür aber höhere Magnesiumgehalte als die anderen Arten und die höchsten Phosphor- und Stickstoffgehalte aller vier Arten mit entsprechend niedrigen C/N- und C/P-Verhältnissen; daneben weist sie auch den höchsten Ligningehalt auf.

**Tab. 7:** Nährstoffgehalte der frischen Streu (Okt./Nov.) von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach Angaben von RODE (1993) und nach Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung; Kohlenstoffgehalte in mmol/g TG, Ligningehalte in mg/g TG, C/N u. C/P in g/g, alle anderen Angaben in µmol/g TG (gerundete Mittelwerte).

|                        | K   | Mg | Ca  | Mn | Fe  | C  | N   | P  | Lign. | C/N | C/P |
|------------------------|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-------|-----|-----|
| <b>Buche:</b>          |     |    |     |    |     |    |     |    |       |     |     |
| <i>vorl.Arbeit '93</i> | 127 | 28 | 233 | 58 | 3,7 | 41 | 661 | 52 | 500   | 53  | 369 |
| RODE '89               | 160 | 30 | 190 | 65 | 3,8 | -  | 600 | 20 | -     | -   | -   |
| <b>Eiche:</b>          |     |    |     |    |     |    |     |    |       |     |     |
| <i>vorl.Arbeit '93</i> | 107 | 47 | 206 | 46 | 4,0 | 42 | 530 | 56 | 490   | 68  | 355 |
| RODE '89               | 120 | 35 | 170 | 56 | 2,9 | -  | 500 | 25 | -     | -   | -   |
| <b>Birke:</b>          |     |    |     |    |     |    |     |    |       |     |     |
| <i>vorl.Arbeit '93</i> | 58  | 79 | 187 | 9  | 3,5 | 46 | 777 | 70 | 561   | 51  | 296 |
| RODE '89               | 80  | 25 | 170 | 8  | 5,7 | -  | 543 | 25 | -     | -   | -   |
| <b>Kiefer:</b>         |     |    |     |    |     |    |     |    |       |     |     |
| <i>vorl.Arbeit '93</i> | 28  | 24 | 125 | 6  | 3,8 | 44 | 405 | 28 | 460   | 93  | 912 |
| RODE '89               | 20  | 25 | 100 | 4  | 4,2 | -  | 350 | 10 | -     | -   | -   |

Diese Unterschiede in den Nährstoffgehalten der Arten hat in gleicher Weise RODE (1992 und 1993) beschrieben; einzig die Birkenstreu zeigte bei ihm etwas geringere Unterschiede zu den anderen Streuarten in den einzelnen Elementgehalten.

Die Differenzen der Gehalte zwischen den beiden Untersuchungsjahren sind demgegenüber beträchtlich: die Calcium-, Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen sind im Jahr 1993 bei allen Arten höher als RODES Werte von 1989, dagegen wurden in der

vorliegenden Arbeit verglichen mit 1989 geringere Kalium- und Magnesiumkonzentrationen gemessen. Das sind jedoch diejenigen Kationen, die dem mikroklimatischen Einfluß am stärksten unterworfen sind (s. Kap. 5.2), so daß unterschiedliche Beprobungstermine leicht zu Differenzen in den Gehalten führen können. Eine solche Variabilität der Elementgehalte der Streu innerhalb verschiedener Jahre wurde in gleicher Weise von anderen Autoren festgestellt (MEENTEMEYER 1978, BERG & ÅGREN 1984).

Der Nährstoffgehalt der Blätter hängt entscheidend von den Standortsbedingungen ab (ARONSSON & ELOWSON 1980, BERG 1986, BERENDSE et al. 1989). Zur Beurteilung des Nährstoffzustandes der lebenden Blätter der vier Baumarten vergleicht RODE (1992 und 1993) die von ihm gemessenen Gehalte mit Werten anderer Autoren und stellt eine angespannte Versorgungslage insbesondere bei den Nährstoffen K, Mg, N sowie P (bei der Kiefer) fest. Um diese Einschätzung auch im Falle der frischen Blattstreu (also vor Beginn des Zersetzungsprozesses) zu überprüfen und ein Bild von der Variabilität dieser Gehalte zu gewinnen, ist in Tabelle 8 ein Vergleich der vorliegenden Arbeit ermittelten Daten mit Ergebnissen anderer Autoren aus ähnlichen Untersuchungen in Schweden, England und Deutschland dargestellt.

**Tab. 8:** Nährstoffgehalte der frischen Streu (Okt./Nov.) von Buche, Eiche, Birke und Kiefer nach Angaben anderer Autoren aus Untersuchungen in England, Schweden u. Deutschland und nach Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung; Kohlenstoffgehalte in mmol/g TG, Ligningehalte in mg/g TG, C/N und C/P in g/g, alle anderen Angaben in µmol/g TG (gerundete Mittelwerte).

|                            | K      | Mg    | Ca      | Mn   | Fe      | C     | N        | P      | Lign.   | C/N     | C/P       |
|----------------------------|--------|-------|---------|------|---------|-------|----------|--------|---------|---------|-----------|
| <b>Buche:</b>              |        |       |         |      |         |       |          |        |         |         |           |
| <i>vorl. Arbeit</i>        | 127    | 28    | 233     | 58   | 3,7     | 41    | 661      | 52     | 500     | 53      | 369       |
| and. Autoren <sup>1)</sup> | 59-160 | 17-49 | 105-431 | 7-65 | 3,6-9,0 | 40-45 | 400-1050 | 20-45  | -       | 45-86   | ~339      |
| <b>Eiche:</b>              |        |       |         |      |         |       |          |        |         |         |           |
| <i>vorl. Arbeit</i>        | 107    | 47    | 206     | 46   | 4,0     | 42    | 530      | 56     | 490     | 68      | 355       |
| and. Autoren <sup>2)</sup> | ~120   | ~35   | ~170    | ~56  | ~3      | ~42   | 500-1050 | ~25    | -       | ~38     | -         |
| <b>Birke:</b>              |        |       |         |      |         |       |          |        |         |         |           |
| <i>vorl. Arbeit</i>        | 58     | 79    | 187     | 9    | 3,5     | 46    | 777      | 70     | 561     | 51      | 296       |
| and. Autoren <sup>3)</sup> | ~80    | ~25   | ~170    | ~8   | ~6      | ~44   | 500-1207 | 25-78  | ~260    | ~33     | -         |
| <b>Kiefer:</b>             |        |       |         |      |         |       |          |        |         |         |           |
| <i>vorl. Arbeit</i>        | 28     | 24    | 125     | 6    | 3,8     | 44    | 405      | 28     | 460     | 93      | 912       |
| and. Autoren <sup>4)</sup> | 13-35  | 16-28 | 72-162  | 4-28 | 0,9-4,2 | 42-46 | 243-607  | 4,5-14 | 223-350 | 120-149 | 2295-2690 |

<sup>1)</sup> ANDERSON (1973), JOERGENSEN & MEYER (1990), MAYER (1972), RODE (1993), STAAF (1980)

<sup>2)</sup> BOCOCK (1963), HOWARD & HOWARD (1974), RODE (1993)

<sup>3)</sup> BERG & WESSÉN (1984), BOCOCK (1963), HOWARD & HOWARD (1974), RODE (1993)

<sup>4)</sup> BERG & ÅGREN (1984), BERG & WESSÉN (1984), MEENTEMEYER & BERG (1986), RODE (1993)

Der Vergleich der verschiedenen Daten läßt bei der Buchenstreu der vorliegenden Untersuchung geringe Eisen- und Stickstoffgehalte, jedoch relativ hohe Phosphorgehalte



und ein niedriges C/N-Verhältnis erkennen. Auch die Eichenstreu besitzt im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Autoren geringe Stickstoff- und hohe Phosphorgehalte, aber ein relativ hohes C/N-Verhältnis; gleiches gilt für die Birkenstreu, die außerdem relativ geringe Kalium-, dafür jedoch hohe Magnesiumgehalte aufweist. Bei der Kiefernstreu fallen relativ hohe Eisen-, Stickstoff- und Phosphorgehalte auf; entsprechend niedrig sind die C/N- und C/P-Werte. Die Gehalte der meisten anderen Inhaltsstoffe der vier Streuarten liegen in der vorliegenden Untersuchung ungefähr im Mittel der Werte anderer Untersuchungen. Die Ligningehalte sind aufgrund der vereinfachten Bestimmungsmethode (s. Kap. 3.2.5) nur eingeschränkt mit Untersuchungsergebnissen anderer Autoren zu vergleichen, und insbesondere die Ligningehalte der Laubstreu sind im Vergleich zu Literaturangaben ungewöhnlich hoch. Zum Vergleich wurden deshalb zusätzlich die Gehalte der O<sub>L</sub>-Streu von *Quercus petraea* aus dem Neuen Botanischen Garten der Universität Göttingen bestimmt. Diese lagen bei ~260 mg/g TG und damit bei Werten, die den in der Literatur angegebenen entsprechen; die angewendete Methode dürfte daher zuverlässig sein und die in der Lüneburger Heide ermittelten hohen Werte der Realität entsprechen.

Es fällt besonders auf, daß im Vergleich der Elementgehalte zwischen den Arten die Buchen- und Eichenstreu (teilweise auch die Birkenstreu) deutlich höhere Gehalte als die Kiefernstreu besitzen. Vergleicht man dagegen die Elementgehalte mit dem Variationsbereich der jeweiligen Art, weist die Kiefernstreu in der vorliegenden Untersuchung relativ hohe Gehalte auf.

## **5.2 Veränderungen der Substanzgehalte in der Streu: Unterschiede zwischen den Inhaltsstoffen und zwischen den vier Baumarten**

Die Freisetzung von Nährstoffen aus der Streu verläuft generell auf zwei unterschiedlichen Wegen: Zum einen über physikalisch-chemische Auswaschung, sogenanntes "leaching", zum anderen über den Abbau organischer Strukturelemente des Streumaterials durch Bodenorganismen (BERG & STAAF 1980, STAAF 1980). Diese beiden Freisetzungswege sind demnach primär unabhängig von der jeweiligen Streuart bzw. Pflanzenart. Vielmehr ist entscheidend, wo und in welcher Weise die entsprechenden Substanzen in der Streu (bzw. zuvor in den Blättern) lokalisiert sind (MAYER 1971,

STAAF 1980, JOERGENSEN & MEYER 1990). Schon WAKSMAN & TENNEY (1929) erkannten den Unterschied zwischen löslichen und fest gebundenen Bestandteilen beim Abbau von Streumaterial. KRUCERA (1959) unterstreicht in seinen Untersuchungen die starke Auswaschbarkeit von Kalium zu einem frühen Zeitpunkt der Streuverwitterung; BERG & STAAF (1980) und STAAF (1980) zeigten, daß dies auch für Natrium und zum Teil auch für Magnesium gilt. In Untersuchungen von FLANAGAN & BUNNEL (1976) verlor abgestorbenes Grasmaterial durch herbstliche Regenfälle 30% der Trockenmasse. Daß eine derartige Auswaschung nicht nur bei totem Pflanzenmaterial zu beobachten ist, sondern schon am lebenden Blatt des Baumes in erheblichem Umfang beginnt, wurde ebenfalls mehrfach nachgewiesen und wird auch durch die Untersuchungen von RODE (1992 und 1993) auf den Untersuchungsflächen der vorliegenden Arbeit gezeigt.

Andererseits zeigte sich in vielen der Untersuchungen, daß ein Teil der Inhaltsstoffe aus der Streu nur langsam herausgelöst wird oder sich eventuell sogar anreichert. Dies betrifft im ersten Fall Calcium, teilweise auch Phosphor, im zweiten Fall vor allem Stickstoff, Eisen, Mangan und komplexe organische Verbindungen wie Lignin (STAAF 1980, BERG 1986, YAVITT & FAHEY 1986, JOERGENSEN & MEYER 1990).

Auch in der vorliegenden Untersuchung sind elementspezifische Unterschiede in der Veränderung der Gehalte durch Zersetzung der Streu nach dem Laubfall zu erkennen, und zwar bei allen vier Baumarten in gleicher Weise. Es muß jedoch betont werden, daß die Ergebnisse dieser Freilanduntersuchung nicht nur den Elementumsatz allein des Streumaterials widerspiegeln, sondern die Summe aus Gehaltsveränderungen in der Streu, Elementeinträgen mit dem Bestandesniederschlag im Wald (von vor allem leichtlöslichen Kationen) sowie Inkorporation oder Freisetzung von Nährstoffen durch die abbauenden Mikroorganismen darstellen.

### ***Kalium und Magnesium***

Ebenso wie bei zahlreichen anderen Autoren zuvor läßt sich auch in der Lüneburger Heide eine sehr rasche Freisetzung von Kalium und Magnesium aus der  $O_L$ -Streu erkennen, wobei die Kaliumfreisetzung weitaus rascher als die von Magnesium erfolgt: Am Ende der Untersuchungszeit waren in der Eichen- und Buchenstreu weniger als 60% des anfänglichen Kaliumgehaltes vorhanden, dagegen noch mehr als 40% des ursprünglichen Magnesiumgehaltes. Ganz ähnliche Werte ermittelte STAAF (1980) bei der Untersuchung der Zersetzung von Buchenstreu in Südschweden. Daß Kalium wie erwähnt relativ schnell ausgewaschen wird, beruht auf dem überwiegenden Vorkommen als

wassergelöstes Ion in der Zelle (Osmotikum in der Vakuole); durch Zellzerstörung wird es sofort freigesetzt (STAAF 1980, KINZEL 1982, JOERGENSEN & MEYER 1990). Magnesium liegt demgegenüber nicht von vornherein in gelöster Form vor, sondern in Komplexbindungen vor allem der Chlorophyllmoleküle und in Enzymen oder anderen Proteinen (KINZEL 1982, JOERGENSEN & MEYER 1990). Es kann dort aber in der Regel leicht herausgelöst werden und wird deshalb relativ rasch freigesetzt (STAAF 1980, YAVITT & FAHEY 1986). Folglich sind in der vorliegenden Untersuchung die Kaliumkonzentrationen in der  $O_F$ -Streu deutlich geringer als in der  $O_L$ -Streu, und eine Freisetzung während der Untersuchungszeit ist nur noch bei Buchen- und Eichenstreu zu erkennen, deren Kaliumgehalte schon in der  $O_L$ -Streu höher als bei Birke und Kiefer liegen. Ähnliches ist bei Magnesium zu beobachten, mit Ausnahme der Birkenstreu, bei der in der  $O_F$ -Streu eine auffällige Magnesium-Akkumulation zu verzeichnen ist, deren Herkunft jedoch nicht geklärt ist.

### **Calcium**

Anders sehen die Verhältnisse bei den Calciumgehalten aus. Calciumionen sind wesentliche Strukturbestandteile von pflanzlichen Zellwänden und kommen ansonsten nur noch in geringeren Mengen als Membranstabilisatoren oder als unlösliche Salze (vor allem Oxalat) in der Vakuole vor (KINZEL 1982, JOERGENSEN & MEYER 1990). Der weitaus größte Teil liegt demnach nicht in ionischer Form, sondern kovalent gebunden vor und wird aus diesem Grund weniger durch *leaching* als durch Abbau des organischen Materials freigesetzt. In den meisten Untersuchungen wird deshalb eine Verringerung der Gehalte analog zum Gewichtsverlust bzw. zur Kohlenstoffveratmung festgestellt (BERG & STAAF 1980, STAAF 1980, YAVITT & FAHEY 1986, JOERGENSEN & MEYER 1990).

**Tab. 9:** Vergleich linearer Regressionen des Kohlenstoffverlustes (prozentualer Anteil des verbliebenen Trockengewichtes) mit denen der Calciumfreisetzung (prozentualer Anteil des Anfangsgehaltes) der vier Streuarten ( $O_L$ -Lage) über den Untersuchungszeitraum.

|               | <b>Kohlenstoff</b> |            | <b>Calcium</b>     |            |
|---------------|--------------------|------------|--------------------|------------|
| <b>Buche</b>  | $-0,067 x + 102,0$ | $r = 0,92$ | $-0,054 x + 100,1$ | $r = 0,86$ |
| <b>Eiche</b>  | $-0,060 x + 99,5$  | $r = 0,98$ | $-0,077 x + 102,9$ | $r = 0,92$ |
| <b>Birke</b>  | $-0,075 x + 98,2$  | $r = 0,96$ | $-0,077 x + 100,7$ | $r = 0,93$ |
| <b>Kiefer</b> | $-0,070 x + 99,2$  | $r = 0,91$ | $-0,096 x + 100,9$ | $r = 0,84$ |

Dies ist auch in der vorliegenden Arbeit festzustellen, und wird durch die geringen Veränderungen der C/Ca-Verhältnisse in der  $O_L$ -Streu unterstrichen (Kap. 4.3.3). Ein

Vergleich der Steigungen linearer Regressionsbeziehungen des Kohlenstoffschwundes mit denjenigen der Calciumfreisetzung der  $O_L$ -Streu aller vier Arten über den Untersuchungszeitraum verdeutlicht diese Tatsache ebenfalls (Tab. 9).

Auch in der  $O_F$ -Lage wird von der Streu der vier Baumarten Calcium freigesetzt; das Ausmaß der Freisetzung übertrifft dabei den gleichzeitig gemessene Kohlenstoffverlust. Ob der Grund dafür in der erhöhten Sterblichkeitsrate der Mikroorganismen in der  $O_F$ -Lage und einem damit verbundenen stärkeren Calciumaustrag liegt, kann an dieser Stelle nicht nachgewiesen werden. YAVITT & FAHEY (1986) berichten in diesem Zusammenhang von Ca-Akkumulation in Pilzhypen, die durch Calciumoxalat-Ausfällung zustandekommt und der Osmoregulation der Pilze dienen soll.

### ***Mangan und Eisen***

Mangan und Eisen verhalten sich während des Zersetzungsprozesses wiederum anders als die drei zuvor genannten Elemente: Hier ist in der  $O_L$ -Streu keinerlei Freisetzung zu erkennen, sondern eine Netto-Akkumulation während der Zersetzungszeit, insbesondere bei Mangan. Eisen und Mangan sind wichtige Spurenelemente der Pflanze und kommen dort als Proteinbestandteile vor allem der Elektronentransportkette in den Chloroplastenmembranen vor (KINZEL 1982). Insbesondere Eisen gilt als immobiles Element, kann jedoch durch niedermolekulare Polyphenole als Komplexverbindung mobilisiert werden (MALCOM & MCCrackEN 1968, zit. n. STAAF 1980). Auch in anderen Untersuchungen (STAAF 1980, JOERGENSEN & MEYER 1990) wurde wie hier keine Eisenfreisetzung durch die  $O_L$ -Streu, sondern eine Akkumulation festgestellt. STAAF (1980) vermutet als Quelle dieses Fe-Eintrags Mineralbodenpartikel, die in die *litter bags* gelangt sein könnten, zumal er große Standardabweichungen bei den ohnehin geringen Werten zwischen den einzelnen Proben feststellt. Dies scheint jedoch für die vorliegende Untersuchung nicht zuzutreffen, denn trotz hoher Standardabweichungen sind die Veränderungen der Gehalte zwischen den Probeterminen bei allen vier Streuarten gleichsinnig.

Von Mangan ist seit längerem bekannt, daß für die Mobilität in erster Linie die Redoxverhältnisse des jeweiligen Mediums maßgebend sind, die wiederum vom pH-Wert abhängen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992, STAAF 1980, NIHLGÅRD & LINDGREN 1987): Bei hohem pH-Wert liegt Mangan vorwiegend in immobilisierenden Oxiden vor (meist vierwertig), während es bei niedrigem pH-Wert vor allem als lösliches  $Mn^{2+}$ -Ion vorhanden ist. Wie im Falle von Eisen stellen auch andere Untersuchungen im Verlaufe der Streuzersetzung eine Manganakkumulation fest (STAAF 1980, JOERGENSEN & MEYER 1990). STAAF (1980) gibt

als mutmaßlichen Grund dafür den erhöhten pH-Wert in der O<sub>L</sub>-Streu im Vergleich zu O<sub>H</sub>- und Ah-Horizonten an, der zu einem höheren Anteil an oxidiertem Mangan und damit zu dessen Immobilität führen soll. Auch für die hier untersuchten Standorte trifft dies zu und könnte deshalb für die beobachtete Mangan-Immobilität eine Rolle spielen. Damit ist jedoch nicht erklärt, weshalb es zu einer solch starken Akkumulation kommt, die auf eine externe Mangan-Quelle zurückzuführen sein muß. Viele bodenkundliche Arbeiten haben gezeigt, daß organische Verbindungen durch Aluminium, Eisen und auch Mangan gebunden werden können (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992), und daß umgekehrt verschiedene organische Substanzen, vor allem Polyphenolverbindungen, diese drei Metallelemente durch Komplexbildung festlegen können (HAIDER 1991). Eine Erklärung für die Mn- und Fe-Akkumulation könnte somit sein, daß durch zunehmende Polyphenolkonzentrationen, wie sie im Zersetzungsverlauf auftreten, Eisen- und Manganionen komplexiert werden, die zuvor mit dem Bestandesniederschlag zum Boden gelangten (siehe Angaben von RODE in Kap. 5.3.2). Dies würde auch erklären, warum in der O<sub>F</sub>-Streu eine anhaltende Manganakkumulation zu beobachten ist (am stärksten in der besonders manganarmen Kiefernstreu). Daß dagegen keine weitere Akkumulation von Eisen zu beobachten ist, könnte am Erreichen eines Sättigungspunktes liegen, zum Beispiel durch die begrenzte Anzahl an Bindungsstellen der Komplexbildner.

### **Phosphor**

Phosphor liegt in der pflanzlichen Zelle als wesentlicher Bestandteil von Nucleinsäuren sowie in Form phosphorierter organischer Substanzen wie den Energieträgern ATP, ADP oder anderer Stoffe des Primärstoffwechsels vor (KINZEL 1982). Er ist fast ausschließlich kovalent gebunden und zählt darum zu den weniger mobilen Elementen.

Von verschiedenen Autoren wird ein unterschiedliches Verhalten von Phosphor während des Streuabbaus beschrieben. BERG & STAAF (1980) beobachteten bei Zersetzungsversuchen an Kiefernstreu eine mehr als ein Jahr andauernde Akkumulationsphase, bevor eine Nettofreisetzung einsetzte; STAAF (1980) stellte bei Buchenstreu ebenfalls eine kurzzeitige Akkumulation fest, der eine gleichmäßige Freisetzung folgte. YAVITT & FAHEY (1990) konnten im Verlaufe ihrer Untersuchungen an *Pinus contorta*-Streu keine Veränderung im prozentualen Phosphorvorrat erkennen; dagegen ergab sich bei Zersetzungsversuchen von BERENDSE et al. (1989) mit *Molinia caerulea* und *Erica tetralix* jeweils eine Phosphorfreisetzung von Beginn der Streuabbringung an. Auch in der vorliegenden Untersuchung wird bei der O<sub>L</sub>-Streu aller vier Baumarten von

Beginn an Phosphor freigesetzt, mit Ausnahme der Kiefernstreu, bei der die Freisetzung erst später beginnt; eine Phosphorakkumulation ist aber bei keiner der Arten zu erkennen. Ein Grund für diesen Unterschied zu anderen Untersuchungen mit Laubstreu verschiedener Baumarten ist im Kohlenstoff/Phosphor-Verhältnis zu suchen. Da Phosphor einen essentiellen Nährstoff für die Abbauorganismen darstellt, wird er von diesen beim Zersetzungsprozeß zuerst inkorporiert, bevor eine Nettofreisetzung erfolgt. Von BERG & STAAF (1980) und STAAF (1980) werden für Kiefernstreu bzw. Buchenstreu kritische C/P-Werte von ~2000 bzw. ~350 angegeben, nach deren Unterschreiten eine Phosphorfreisetzung einsetzen soll. Wie in Kap. 5.1 dargestellt, sind die Phosphorgehalte der frischen Streu in der vorliegenden Untersuchung bei allen Arten überdurchschnittlich hoch, und die C/P-Werte liegen von Anfang an unter oder zumindest im Bereich dieser kritischen Werte. Die abbauenden Mikroorganismen sind deshalb offenbar vom Beginn der Streuzersetzung an genügend mit Phosphor versorgt, so daß keine P-Immobilisierung eintritt. Auch in der  $O_F$ -Streu ist dieser mutmaßliche Zusammenhang zwischen Phosphorfreisetzung und C/P-Verhältnis zu erkennen: Alle vier Streuarten liegen in ihren C/P-Werten unter den genannten kritischen Werten, und bei allen vier Arten wird Phosphor freigesetzt. Der Grad der Freisetzung ist dabei bei Buchen- und Eichenstreu am größten, die beide erheblich engere C/P-Verhältnisse als Birken- und Kiefernstreu aufweisen.

### **Stickstoff**

Stickstoff ist der quantitativ bedeutendste Pflanzennährstoff. Der größte Teil findet sich als Baustein von Aminosäuren in Proteinenmolekülen; ein sehr viel kleinerer Anteil liegt in Aminozuckern oder auch als osmotisch wirksames Anion  $NO_3^-$  in der Zellvakuole vor (KINZEL 1982). Deshalb sind auch nur diese geringen ionischen Stickstoffanteile durch *leaching* auswaschbar; der restliche Großteil des Stickstoffes ist aufgrund der kovalenten Bindungsverhältnisse relativ immobil.

Von den meisten Autoren einschlägiger Veröffentlichungen wird das Verhalten von Stickstoff während des Zersetzungsverlaufes mit dem von Phosphor verglichen. Er stellt einen essentiellen Nährstoff für die abbauenden Mikroorganismen dar und dient wie Phosphor vor der Netto-Mineralisierung dem Aufbau der mikrobiellen Biomasse in der Streu. Viele Autoren führen darauf die Stickstoff-Nettoakkumulation zurück, die regelmäßig bei Untersuchungen der Streuzersetzung festgestellt wird (WAKSMAN & TENNEY 1927, STAAF 1980, MELILLO et al. 1982, BERG & THEANDER 1984).

Auch in der vorliegenden Untersuchung wird aus der  $O_L$ -Streu kein Stickstoff freigesetzt, sondern es ist bei allen vier Arten von Beginn an eine Zunahme der prozentualen Vorräte in den *litter bags* zu beobachten (bei der Eichen- und Kiefernstreu auf mehr als 120%). In diesbezüglichen Veröffentlichungen werden Werte für die maximale N-Akkumulation der untersuchten Streuarten von 130% (Kiefer), 160-170% (Buche) bzw. 140-260% (Eiche) angegeben (BOCOCK 1964, ANDERSON 1973, HOWARD & HOWARD 1974, BERG & STAAF 1980, STAAF 1980; eine Übersicht über maximale Akkumulationswerte auch anderer Pflanzenarten findet sich bei BERG & STAAF (1981).

Gerade in stickstoffarmen Ökosystemen (wie den Vegetationstypen der vorliegenden Untersuchung) ist der Stickstoffumsatz durch Streuzersetzung für den Nährstoffkreislauf von großer Bedeutung; deshalb widmen sich gerade dieser Thematik besonders viele Untersuchungen (ABER & MELILLO 1980, BERG & STAAF 1981, BOSATTA & STAAF 1982, BERENDSE et al. 1987, ABER et al. 1991 u.v.a.). Dabei zeigt sich, daß gerade die Stickstoff-mineralisation durch die Streuzersetzung ein komplexer Prozeß ist, an dem viele Faktoren beteiligt sind und dessen Ablauf von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein kann. Die sich teilweise widersprechenden Hypothesen verschiedener Wissenschaftler wurden von BERG & STAAF (1980 und 1981) bzw. BERG (1986 und 1991) in einem Modell vereinigt, das drei unterschiedliche Phasen der Veränderung im Stickstoffgehalt der Streu beschreibt: in der ersten Phase werden leicht lösliche Stickstofffraktionen ausgewaschen (quantitativ meist unbedeutend); in der zweiten Phase setzt eine mehr oder minder starke Stickstoff-Akkumulation ein, der in der dritten Phase eine sukzessive N-Freisetzung folgt. Der Grund für die Akkumulation und die Herkunft des dafür erforderlichen externen Stickstoffeintrags ist allerdings noch nicht restlos geklärt. BOCOCK (1963) sieht, wie ANDERSON (1973) und andere Autoren, vor allem in den atmosphärischen Stickstoffeinträgen die Quelle der N-Anreicherung. BERG (1986) stuft jedoch eine derartige Deposition für die von ihm ermittelten Stickstoff-Akkumulationen als zu geringfügig ein. So wie auch ABER & MELILLO (1980) macht er in erster Linie Immobilisierung durch Mikroorganismen für die Zunahme im Stickstoffgehalt verantwortlich. Dabei könnten besonders Pilze das frischgefallenen Streumaterial als Nährstoffquelle nutzen, gleichzeitig aber auch die darunterliegende, ältere Streu als Stickstoffquelle abbauen und so einen Netto-Eintrag über Hyphen in die frische Streu bewirken. Deshalb ist nicht nur das C/N-Verhältnis der Streu allein, sondern auch das C/N-Verhältnis der Abbauorganismen dafür entscheidend, ob eine Stickstoff-Mobilisierung stattfindet oder nicht (BERENDSE et al. 1987). Von vielen Autoren werden kritische C/N-Werte für die Streu angegeben, bei deren Unterschreiten eine Stickstofffreisetzung beobachtet wurde. Für Kiefernstreu liegen

diese Werte zwischen 80 und 125 (BERG & STAAF 1980), bei Eichenstreu zwischen 31 und 45 (BOCOCK 1964 bzw. HOWARD & HOWARD 1974) und für Buchenstreu bei 46 (STAAF 1980); für Birkenstreu konnten keine Literaturangaben über kritische C/N-Werte gefunden werden. Die C/N-Werte der O<sub>L</sub>-Streu in der vorliegenden Untersuchung liegen fast über den gesamten Untersuchungszeitraum höher als diese kritischen Werte oder zumindest in deren Bereich, so daß hier ein Grund für die Stickstoff-Immobilisierung in der O<sub>L</sub>-Streu liegen mag. WAKSMAN & TENNEY (1927) stellten in diesem Zusammenhang fest, daß auf Sandböden, wie sie im Untersuchungsgebiet dieser Arbeit vorliegen, der Anteil von Pilzen an den abbauenden Mikroorganismen gegenüber Bakterien dominiert; streuabbauende Pilze zeigen aber gegenüber Bakterien eine höhere Stickstoff-Immobilisierung, wie neben WAKSMAN & TENNEY (1927) auch HOLLAND & COLEMAN (1987) beschreiben. Weiterhin kommt dazu, daß hohe Ligningehalte der Streu zu einer zusätzlichen Immobilisierung von Stickstoff führen können, indem Stickstoff besonders in frühen Zersetzungsphasen an Lignin- oder Huminsäure-Komponenten gebunden wird – Lignin dient demnach als Speicherort (sog. "sink") für Stickstoff (BERG & STAAF 1981). Auch solche Effekte können bei der vorliegenden Untersuchung aufgrund der ermittelten hohen Ligningehalte nicht ausgeschlossen werden. Anders sehen dagegen die Verhältnisse in der O<sub>F</sub>-Streu aus: alle vier Streuarten zeigen eine deutliche Stickstoff-freisetzung (bei der Birke mit Einschränkungen), was gut damit übereinstimmt, daß bei allen Arten die kritischen C/N-Werte unterschritten sind. Ein Teil des freigesetzten Stickstoffs könnte dabei durch den Ligninabbau mobilisiert worden sein. Eine andere Quelle für die N-Freisetzung dürfte auch in durch das Absterben von Mikroorganismen abgegebenem Stickstoff zusehen sein (STAAF 1980).

### **Lignin**

Wie in Kap. 3.2.5 angesprochen, bezeichnet Lignin nicht eine eindeutig definierte Substanz, sondern stellt ein Polymer aus verschiedenen Polyphenolen dar, dessen Zusammensetzung von Pflanzenart zu Pflanzenart variieren kann. In jedem Falle sind diese zyklischen Polyphenolverbindungen für die abbauenden Mikroorganismen relativ schlecht angreifbar, wie schon WAKSMAN & TENNEY (1927) feststellten. Lignin gilt deshalb als besonders hemmend im Abbauprozess der Streu. Studien zu dieser Frage von FOGEL & CROMACK (1977), MEENTEMEYER (1978), MELILLO et al. (1982), BERENDSE et al. (1987), McCLAUGHERTY & BERG (1987) sowie TAYLOR et al. (1989) zeigten, daß der Ligninabbau ein komplizierter Prozess ist, der von vielen verschiedenen Faktoren



abhängt. Abgesehen von wenigen Bakterienarten sind vor allem Pilze (insbesondere Weißfäulepilze) für den Abbau von Lignin verantwortlich (ZIEGLER et al. 1986). Dabei genügt Lignin allein als Substrat jedoch nicht, sondern die Pilze benötigen zusätzlich einen gewissen Teil besser abbaubarer Kohlenhydrate als Energiequelle (BERENDSE et al. 1987). Ein entscheidender Parameter beim Abbau von Lignin ist deshalb im Kohlenstoff-Lignin-Verhältnis zum Zeitpunkt des Abbaubeginns zu sehen; dieses C/Lignin-Verhältnis kann sich zwischen der Streu verschiedener Pflanzenarten wesentlich unterscheiden (BERG & WESSÉN 1984). Bei frischer Streu werden jedoch trotz günstigem C/Lignin-Verhältnis zuerst die besser verfügbaren Kohlenhydrate durch die Mikroorganismen veratmet, bevor sich diese den lignifizierten Streubestandteilen zuwenden – von fast allen Autoren einschlägiger Untersuchungen wurde ein Ligninabbau erst in späteren Phasen der Streuzersetzung beobachtet (FOGEL & CROMACK 1977, BERG, HANNUS et al. 1982, BERG & ÅGREN 1984, YAVITT & FAHEY 1986). BERG & STAAF (1980) sowie McCLAUGHERTY & BERG (1987) stellten jedoch bei ihren Untersuchungen fest, daß bei ligninreicher Streu ein Ligninabbau schon in sehr frühen Stadien der Streuzersetzung eintreten kann.

Zusätzlich beeinflußt der Stickstoffgehalt den Ligninabbau. Wie BERG, WESSÉN & ECKBOHM (1982) feststellten, verläuft der Ligninschwund in der Streu um so langsamer, je höher der Stickstoffgehalt der Streu ist. BERG (1986) führt zur Begründung dieses Befundes eine Untersuchung von KEYSER (1978) an, der herausfand, daß Stickstoff, in Form von  $\text{NH}_4^+$  oder als Aminosäure, die lignolytischen Enzymkomplexe der Mikroorganismen hemmen kann.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen einen deutlichen Abbau von Lignin in der  $\text{O}_L$ -Streu mit Ausnahme der Kiefernstreu. Dies steht zwar im Widerspruch zu den meisten Untersuchungen auf diesem Gebiet (s.o.), deckt sich aber mit dem Befund von BERG & STAAF (1980) und McCLAUGHERTY & BERG (1987), wenn die sehr hohen gemessenen Ligningehalte bei allen vier Streuarten in Betracht gezogen werden. BERG & WESSÉN (1984) geben kritische C/Lignin-Verhältnisse für den Zeitpunkt des beginnenden Ligninabbaus an, die bei Birkenstreu 0,95 und bei Kiefernstreu 1,6 betragen. In der vorliegenden Arbeit weist die Birkenstreu von Beginn des Zersetzungsversuches an C/Lignin-Verhältnisse in diesem Bereich auf, während die Werte bei der Kiefernstreu unter diesem kritischen C/Lignin-Verhältnis liegen. Darin mag ein Grund liegen, warum bei der Birkenstreu von Beginn an ein Ligninabbau eintritt, nicht aber bei der Kiefernstreu (leider können Literaturwerte für Buchen- und Eichenstreu nicht angegeben werden). Eine Hemmung der Abbauorganismen durch erhöhten Stickstoffgehalt, die dem beobachteten

Ligninabbau entgegenstehen würde, ist angesichts der niedrigen Stickstoffkonzentrationen aller vier Streuarten nicht zu erwarten. In der  $O_F$ -Schicht fällt die Ligninfreisetzung geringer aus als in der  $O_L$ -Schicht (bei der Birkenstreu ist kein Ligninabbau festzustellen). Ob dies durch die engeren C/Lignin-Verhältnisse (im Vergleich zur  $O_L$ -Streu) oder auch durch eine Hemmung lignolytischer Enzyme der Abbauorganismen aufgrund der erhöhten Stickstoffmineralisation bewirkt wird, ist schwer einzuschätzen. Der Abbaugrad ist jedenfalls völlig analog zum Gewichtsverlust (Kap. 4.2.1), was sich mit Beobachtungen von BERG, HANNUS et al. (1982) deckt.

### **5.3 Der Einfluß der Streuqualität und des Standortes auf den Abbau der vier Streuarten**

Entsprechend der großen Bedeutung der Streuzersetzung für den Nährstoffhaushalt in Ökosystemen wurden viele Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, die entscheidenden Parameter herauszufinden, die den Ablauf der Zersetzungsprozesse steuern. Dabei wurde festgestellt, daß sowohl äußere Faktoren wie Feuchtigkeit, Temperatur, Bodenbeschaffenheit (insbesondere pH-Wert und Nährstoffverfügbarkeit) und Bodenfauna als auch die Eigenschaften der Streu selbst wie Nährstoffgehalt, Ligningehalt oder Blattstruktur Einfluß auf den Streuabbau nehmen (WAKSMAN & TENNEY 1927, JENNY et al. 1949, MEENTEMEYER 1978, BERG & WESSÉN 1984, FACELLI & PICKETT 1991). Mit wachsender Kenntnis ökosystemarer Zusammenhänge wurden auch verstärkt Versuche unternommen, die Zersetzungsprozesse mit mathematischen Modellen zu beschreiben, um damit Voraussagen über ihren Ablauf bei veränderten Umweltbedingungen treffen zu können. JENNY et al. (1949) haben versucht, den Streuabbau in verschiedenen klimatischen Regionen mit einer allgemeingültigen Abbaukonstante "k" zu charakterisieren – einer Differenz aus jährlicher Streuproduktion und dem Streuvorrat am Boden. OLSON (1963) führte eine negative Exponentialfunktion zur Beschreibung des Abbauvorgangs ein; MINDERMAN (1968) und HOWARD & HOWARD (1974) führten einen Vergleich der bis dahin veröffentlichten Modelle durch und kamen zu dem Ergebnis, daß die beste Darstellung des Massenverlustes durch quadratische Funktionen erreicht wird. Viele Autoren sehen im Streuabbau jedoch einen linearen Vorgang (FOGEL & CROMACK 1977, ABER & MELILLO 1980) oder geben wie YAVITT & FAHEY (1986) eine bilineare

Funktion für die verschiedenen Phasen der Streuzersetzung an.

Der Abbau der frischen Streu auf den Probeflächen der vorliegenden Untersuchung ist bei allen vier Arten relativ gleichmäßig (Kap. 4.2.1) und läßt sich durch lineare Funktionen gut beschreiben. Die Steigung der Funktionsgeraden unterscheidet sich je nach Zersetzungsgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Arten (Abb. 56). Da der Massenverlust der  $O_F$ -Streu deutlich geringer ausfällt als bei der  $O_L$ -Streu (Kap. 4.2.1), erscheint für den gesamten Zersetzungsverlauf eine bilineare Funktion wie sie YAVITT & FAHEY (1986) beschreiben plausibel.

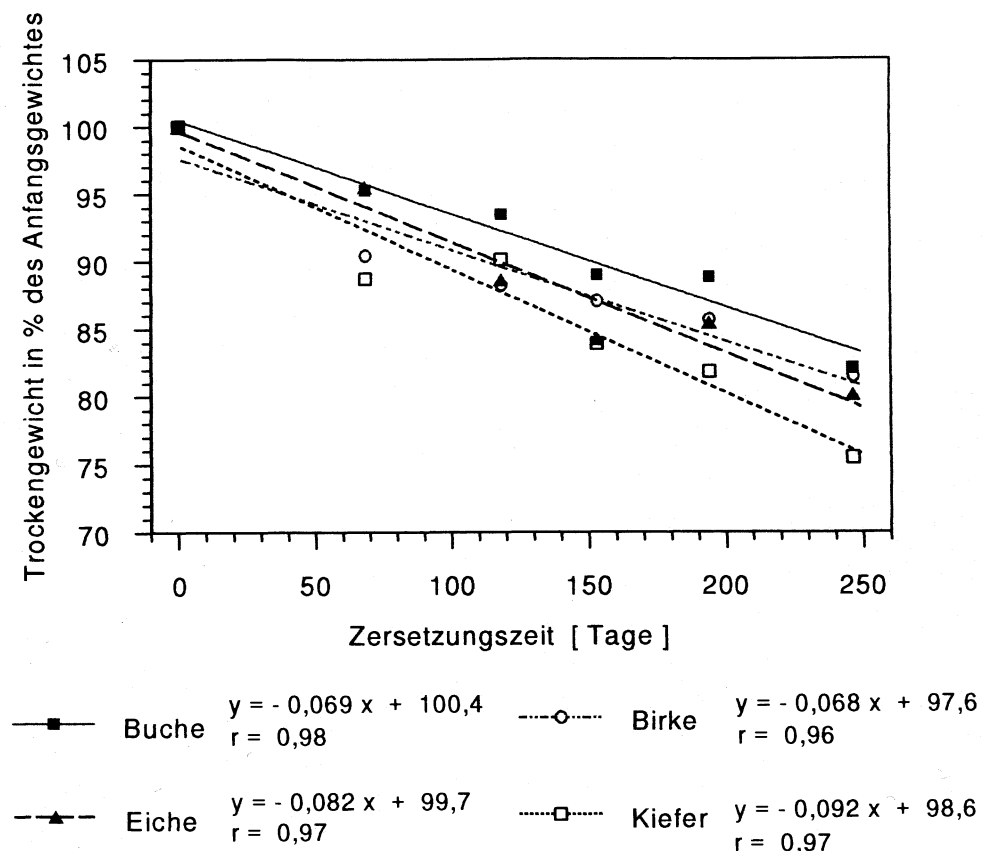


Abb. 56: Lineare Regression zwischen relativem Trockengewicht und der Zersetzungszeit der  $O_L$ -Streu der vier Baumarten über den Untersuchungszeitraum

Andere Autoren legen dagegen Wert auf die Beschreibung des Zersetzungsverlaufes anhand der steuernden Faktoren. PARNAS (1975) entwickelte ein Modell zur Beschreibung des Abbauvorgangs, das in erster Linie die Populationsdynamik der Mikroorganismen berücksichtigt. BERG und Mitarbeiter entwickelten ein Phasenmodell, in dem die Einflußnahme unterschiedlicher Faktoren zu bestimmten Zeiten während des

Zersetzungsprozesses allgemein beschrieben wird (BERG & STAAF 1980 und 1981, BERG 1986). Diese Faktoren sind, wie eingangs erwähnt, entweder in den chemisch-physikalischen Eigenschaften der Streu ("Streuqualität") oder in den Umweltbedingungen des Standortes zu suchen.

### **5.3.1 Der Einfluß der Streuzusammensetzung auf den Abbau der vier Streuarten**

Unter den Inhaltsstoffen der Streu werden immer wieder die Wirkung von drei verschiedenen Substanzgruppen auf den Zersetzungsverlauf diskutiert: Kalium und Magnesium als besonders mobile Nährelemente, Phosphor und Stickstoff als relativ immobile Nährelemente sowie Polyphenole (insbesondere Lignin) als zersetzungs-hemmende Substanzen. Die Beeinflussung des Zersetzungsprozesses durch diese drei Gruppen scheint jedoch sowohl zeitlich als auch von Standort zu Standort verschieden zu sein. WAKSMAN & TENNEY (1927) erkannten bei ihren Zersetzungsversuchen eine deutliche Abbauförderung durch hohe Kalium- und Magnesiumgehalte. Auch BERG & STAAF (1980) stellten bei vergleichenden Untersuchungen an Kiefernstreu einen positiven linearen Zusammenhang zwischen hohen Nährstoffgehalten und hohem Gewichtsverlust fest, jedoch nur in frühen Phasen der Streuzersetzung.

Der Einfluß von Phosphor und insbesondere Stickstoff ist dagegen weit komplexer. Während WAKSMAN & TENNEY (1929) und BOCK (1963) keinen Einfluß unterschiedlicher Stickstoffkonzentrationen auf den Streuabbau feststellten, fanden andere Autoren einen größeren Massenverlust bei höheren N- (und P-) Gehalten (ABER & MELILLO 1980, BERG & WESSÉN 1982, BERG 1991) bzw. bei niedrigerem C/N-Verhältnis (HILL 1926, TAYLOR et al. 1989). Ein positiv-linearer Zusammenhang scheint dabei vor allem unter Bedingungen zu bestehen, unter denen die Abbauorganismen stickstofflimitiert sind (BERENDSE et al. (1987). Aber auch unter diesen Bedingungen hält der positive Effekt hoher N-Konzentrationen nur in den ersten Stadien der Streuzersetzung an, in späteren Phasen wirkt ein hoher Stickstoffgehalt hemmend auf den Abbau (BERG, WESSÉN & ECKBOHM 1982, McCLAUGHERTY & BERG 1987).

Über die zersetzungshemmende Wirkung von Polyphenolen (vor allem Lignin) herrscht weitgehend Einigkeit. WAKSMAN & TENNEY (1927), COLDWELL & DeLONG (1950) und andere Autoren haben diese Wirkung in ihren Untersuchungen nachgewiesen. BERENDSE et al. (1987) beschreiben ein negativ-lineares Verhältnis zwischen Streuabbau und Anfangs-Ligningehalt; auch BERG & ÅGREN (1984) sehen hier einen linearen Zusammenhang,

allerdings erst in späteren Stadien der Zersetzung.

Geteilt sind die Meinungen der verschiedenen Autoren darüber, welche der genannten Substanzen den größten Einfluß auf den Streuabbau besitzt und sich demnach am besten zur Charakterisierung der Abbaubarkeit von Streu eignet.

HILL (1926) gibt als Parameter für Vorhersagen das C/N-Verhältnis an. Auch MELLILLO et al. (1982) sehen den Abbau eher vom Stickstoff- als vom Ligningehalt beeinflusst, meinen jedoch, daß das Lignin/N-Verhältnis aussagekräftiger als das C/N-Verhältnis ist. FOGEL & CROMACK (1977) halten dagegen die Ligninkonzentration gegenüber dem N-Gehalt für entscheidender. TAYLOR et al. (1989) kommen durch ihre Untersuchungen zu dem Schluß, daß bei geringen Anfangs-Ligningehalten der N-Gehalt maßgebend für den Zersetzungsverlauf ist, bei mittleren Ligningehalten das Lignin/N-Verhältnis und bei hohen Ligningehalten die Ligninkonzentration über den Abbauvorgang entscheidet. Diese Vorstellung steht auch in Einklang mit den Modellen von BERG & STAAF (1980 und 1981) bzw. BERG (1986), die in den ersten Abbaustadien die Nährstoffgehalte für besonders bestimmend halten, während in späteren Stadien die Zersetzungsgeschwindigkeit durch den Ligningehalt bestimmt wird und sich hohe N-Gehalte negativ bemerkbar machen.

Um die Rolle der genannten Faktoren auch bei den Abbauvorgängen in der vorliegenden Untersuchung zu bewerten, ist ein Vergleich dieser Zersetzungsverläufe mit denen anderer Untersuchungen notwendig (s. Tab. 10).

**Tab. 10:** Gewichtsverlust der O<sub>L</sub>-Streu von Buche, Eiche, Birke und Kiefer in der vorliegenden Untersuchung (*kursiv*) und nach Untersuchungen anderer Autoren<sup>1)</sup>; Angaben in % des Anfangstrockengewichtes, dahinter Angabe der Zersetzungszeit (Tage, in Klammern) und der Humusform des Standortes.

| Buche      |              |              | Eiche      |              |              | Birke      |              |              | Kiefer     |              |              |
|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| 24%        | (126)        | Mull         | 52%        | (267)        | Mull         | 82%        | (148)        | Mull         |            |              |              |
| 34%        | (267)        | Mull         | 36%        | (267)        | Moder        | 30%        | (148)        | Moder        | 17%        | (208)        | Moder        |
| 18%        | (267)        | Moder        | 47%        | (365)        | Moder        | 34%        | (208)        | Moder        | 21%        | (250)        | Moder        |
| 20%        | (240)        | Moder        | 32%        | (365)        | Mull         | 31%        | (365)        | Mull         | 27%        | (365)        | Moder        |
| <i>18%</i> | <i>(246)</i> | <i>Moder</i> | <i>20%</i> | <i>(246)</i> | <i>Moder</i> | <i>19%</i> | <i>(246)</i> | <i>Moder</i> | <i>25%</i> | <i>(246)</i> | <i>Moder</i> |

<sup>1)</sup>BOCOCK (1963), BOCOCC (1964), ANDERSON (1974), HOWARD & HOWARRD (1974), BERG, HANNUS et al. (1982), BERG & THEANDER (1984), BERG & WESSÉN (1984)

Es wird deutlich, daß der Gewichtsverlust der frischen Buchen- und Kiefernstreu an den Standorten der vorliegenden Untersuchung im Rahmen der Werte liegt, die auch von anderen Autoren ermittelt wurden. Eichen- und Birkenstreu fallen jedoch durch ihren vergleichsweise geringen Massenverlust auf. Wie oben gezeigt, ist der Verlauf der Streuzersetzung bei allen vier Arten linear; die verstärkte Kalium- und Magnesium-

freisetzung aller vier Streuarten zu Anfang des Abbauprozesses macht sich aufgrund der geringen prozentualen Anteile am Gesamtgewicht im Zersetzungsverlauf nicht bemerkbar. Auch ist eine Zersetzungsförderung durch höhere Nährstoffgehalte, wie BERG & STAAF (1980) sie beschreiben, in dieser frühen Abbauphase nicht zu erkennen: Von Beginn an weist die Kiefernstreu den höchsten Massenverlust auf, die jedoch andererseits die geringsten Nährstoffgehalte besitzt; umgekehrt fallen Eichen- und Birkenstreu, die relativ hohe Nährstoffkonzentrationen besitzen, durch geringeren Abbau auf.

Ebenso scheint der Abbau der  $O_L$ -Streu auf den Untersuchungsflächen nicht im oben beschriebenen Sinne vom N- oder P-Gehalt der jeweiligen Streuart bestimmt zu werden. Die drei Laubstreuarten mit relativ hohen Stickstoff- und Phosphorgehalten zeigen einen geringeren Abbau als die Kiefernstreu mit geringen N- und P-Gehalten sowie hohem C/N-Verhältnis.

Angesichts der auffallend hohen Ligningehalte aller vier Streuarten bestätigt sich offenbar die Vorstellung von TAYLOR et al. (1989), daß der Einfluß eines hohen Ligningehaltes auf den Zersetzungsverlauf den der anderen Faktoren überwiegt.

Ein etwas anderes Bild läßt der Vergleich mit Daten anderer Untersuchungen erkennen. Dabei fällt wie oben erwähnt auf, daß Buchen- und Kiefernstreu durchschnittlich stark abgebaut wurden, während Eichen- und Birkenstreu eher schlecht verwitterten (Tab. 10); gerade Buchen- und Kiefernstreu des vorliegenden Versuches zeigen aber verglichen mit Literaturwerten mittlere bis hohe Nährstoffgehalte und günstige C/N-Verhältnisse, während Eichen- und Birkenstreu insbesondere durch hohe C/N-Werte auffallen (Tab. 8). Offenbar können Faktoren wie Nährstoffgehalt oder C/N-Verhältnis eher zur Erklärung von unterschiedlichen Zersetzungsverläufen innerhalb einer Art dienen als zum Vergleich zwischen verschiedenen Arten. Um diesen artspezifischen Einfluß nachzuweisen, müßten jedoch noch mehr Daten anderer Untersuchungen verglichen werden, als es im Rahmen dieser Arbeit möglich ist.

Der Abbau der  $O_P$ -Streu in der vorliegenden Untersuchung steht dagegen im Einklang mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen. Der Abbau wird durch die erhöhten Ligninkonzentrationen verlangsamt; Gewichtsverlust und Ligninabbau verhalten sich proportional zueinander. In der Birkenstreu kommt jeglicher Abbau zum Erliegen (eventuell aufgrund nochmals höherer Ligninkonzentrationen).

### 5.3.2 Der Einfluß des Standortes auf den Abbau der vier Streuarten

Die Mehrzahl der Standortfaktoren kann direkt oder indirekt Einfluß auf den Abbauprozess der Streu nehmen: Nährstoffgehalt und -verfügbarkeit des Bodens bestimmen wesentlich die Streuqualität (ARONSSON & ELOWSON 1980, BERENDSE et al. 1989); pH-Wert und Zersetzerfauna stehen in enger Wechselwirkung (BOCOCK 1964, FACELLI & PICKET 1991); klimatische Faktoren, insbesondere Temperatur und Niederschlag, beeinflussen die mikrobielle Aktivität und steuern dadurch die Streuzersetzung (JENNY et al. 1949, FOGEL & CROMACK 1977, MEENTEMEYER 1977 und 1978, ANDERSON 1991). Außerdem bestimmt der Pflanzenbestand des Standortes durch sein Mikroklima selbst den Streuabbau, ebenso wirken sich mit dem Bestandesniederschlag eingetragene Nährstoffe aus (BOCOCK 1963); schließlich beeinflußt auch die Blattstruktur, Wasseraufnahmekapazität und Lagerungsdichte der Streu das Mikroklima der organischen Auflage (WALSH & VOIGHT 1977).

Die drei Untersuchungsflächen der vorliegenden Arbeit unterscheiden sich hinsichtlich ihrer bodenchemischen Parameter kaum: Die Sandböden sind extrem nährstoffarm und die pH-Werte sehr niedrig (Kap. 2.5). Solche Standorte sind für ihre relativ schlechten Streuabbaubedingungen bekannt – die gebräuchliche Unterscheidung der Humusform Moder bzw. Rohhumus gegenüber Mull bringt dies zum Ausdruck. Ein wichtiger Unterschied zu nährstoffreicheren Böden mit höherem pH-Wert besteht in der Zusammensetzung der Bodenfauna: in "besseren" Böden sorgen insbesondere große Regenwurmartenspezies für eine schnelle Zerkleinerung des Streumaterials und seine Einarbeitung in die Mineralbodenhorizonte; dies führt zu einem beschleunigten Abbau durch die Mikroorganismen (BOCOCK 1964, FACELLI & PICKET 1991, ZECH 1991). Diese großen Regenwurmartenspezies fehlen auf armen Böden wie denen der Versuchsflächen in der vorliegenden Arbeit. Immerhin konnten jedoch während der Versuchszeit regelmäßig kleinere Regenwurmartenspezies in der Buchen-, Eichen- und Birkenstreu gefunden werden. Nach SCHEU (mündl. Mitt. 1995) handelt es sich dabei um *Dendrobaena octaedra* (Sav.), eine verbreitete Art nährstoffarmer Böden, die sich ausschließlich in Humusschichten aufhält und deshalb nicht für eine Einarbeitung der Streu in den Mineralboden sorgt. Zumindest bewirkt *Dendrobaena* aber eine Zerkleinerung der Streu und schafft damit eine bessere Angriffsmöglichkeit für die Mikroorganismen. Anstelle der artenreichen Zersetzerfauna besserer Böden dominieren auf Sandböden unter den Abbauorganismen Pilzarten, die den Streuabbau verlangsamen und die Stickstoff-Immobilisierung fördern (WAKSMAN & TENNEY 1927, HOLLAND & COLEMAN 1987, FACELLI & PICKET 1991).

Gleichzeitig wirkt sich eine schlechte Nährstoffverfügbarkeit im Boden auf die Streuqualität aus (ARONSSON & ELOWSON 1980); dabei ist nicht nur der Nährstoffgehalt der Blätter geringer, sondern es tritt oft auch ein erhöhter Polyphenolgehalt auf (BERG, HANNUS et al. 1982, BERENDSE et al. 1989).

Sowohl eine deutliche Stickstoff-Immobilisierung als auch auffallend hohe Ligningehalte sind auch in der vorliegenden Untersuchung bei allen vier Streuarten zu erkennen und dürften auf die beschriebenen Faktoren zurückzuführen sein.

Neben diesen bodenchemischen Gegebenheiten haben vor allem klimatische Standortsfaktoren einen deutlichen Einfluß auf die Streuzersetzung. In erster Linie sind dies Temperatur sowie Luft- und Bodenfeuchte. Beide wirken über die Beeinflussung der mikrobiellen Aktivität auf die Streuzersetzung ein. Dabei führen erhöhte Temperaturen in gemäßigten Breiten zur Beschleunigung der Abbauprozesse, während bei niedrigen Temperaturen, besonders unter 0°C, die mikrobielle Aktivität sinkt und sogar zum Erliegen kommen kann (ANDERSON 1991). Die Rolle der Feuchte bei der Streuzersetzung wurde in vielen Untersuchungen nachgewiesen (FOGEL & CROMACK 1977, MEENTEMEYER 1977 und 1978, ANDERSON 1991). MEENTEMEYER (1977) faßt diese beiden klimatischen Faktoren in dem Parameter "tatsächliche Evapotranspiration" AET (actual evapotranspiration) zusammen, und MEENTEMEYER & BERG (1986) fanden bei der Untersuchung von Kiefernwald-Transekten entlang ganz Schwedens eine lineare Korrelation zwischen AET und dem Grad des Streuabbaus. Dies bedeutet, daß eine gute Wasserverfügbarkeit bei entsprechend hoher Temperatur die Streuzersetzung fördert.

In dieser Hinsicht waren die Bedingungen für den Streuabbau im Untersuchungszeitraum gut: die Temperaturen waren vor allem in der kälteren Jahreszeit (abgesehen vom Februar) überdurchschnittlich hoch, und die monatlichen Niederschlagssummen waren in dieser Zeit ebenfalls deutlich höher als im langjährigen Mittel (s. Kap. 2.2). Dies mag ebenfalls ein Grund dafür sein, daß der Zersetzungsprozeß auch in den kälteren Monaten zu beobachten ist und den beschriebenen linearen Verlauf nimmt.

Im Hinblick auf die Vergleichsmöglichkeit der drei verschiedenen Standorte Heide, Birken-Kiefernwald und Eichen-Buchenwald wurden zusätzlich zu den üblichen Zersetzungsversuchen die in Kap. 3.1 geschilderten Austauschversuche durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche spiegeln deutliche Unterschiede hinsichtlich des Mikroklimas der drei Standorte wieder. Dabei ist zu erkennen, daß im Gegensatz zur Kiefernstreu, deren frische Streu ja den größten Abbau aufwies, die besten Abbaubedingungen für die drei Laubstreuarten nicht im Birken-Kiefernwald herrschen, sondern im Eichen-



Buchenwald: Buchen-, Eichen- und Birkenstreu wurden am besten im Eichen-Buchenwald und am schlechtesten auf der *Calluna*-Heide abgebaut (s. Abb. 6). Der Grund dafür dürfte in der höheren Wasserverfügbarkeit der organischen Auflage liegen: wie in Kap. 4.1 dargestellt, ist der Wassergehalt in der gesamten Streuschicht im Eichen-Buchenwald stets deutlich höher als im Birken-Kiefernwald und sinkt selbst in den trockensten Phasen des Untersuchungszeitraumes nicht unter 100% des Trockengewichtes; gerade die Kiefernstreu ist für ihre geringe Wasser-Aufnahmekapazität bekannt (WALSH & VOIGHT 1977, LEUSCHNER 1994). Daß insbesondere dem Mikroklima der organischen Auflage eine bedeutende Rolle bei der Streuzersetzung zukommt, haben FOGEL & CROMACK (1977), WALSH & VOIGHT (1977) sowie ANDERSON (1991) gezeigt. Daneben ist eine Förderung der mikrobiellen Aktivität durch die höheren Nährstoffgehalte in der O<sub>L</sub>- und O<sub>F</sub>-Lage des Eichen-Buchenwaldes anzunehmen.

Über den Grund des abweichenden Verhaltens der Kiefernstreu (schlechterer Abbau im Eichen-Buchenwald) kann an dieser Stelle nur spekuliert werden, denn die angesprochenen schlechteren mikroklimatischen Bedingungen am Kiefernstandort bewirken auch eine weitere Einschränkung der Bodenfauna (wie erwähnt, wurden hier keine Regenwurmarten gefunden). Möglicherweise ist die mikrobielle Zersetzerfauna am Kiefernstandort besonders an die Bedingungen des Mikroklimas und der Streuzusammensetzung angepaßt, was angesichts der Nährstoffarmut und des hohen Anteils lipophiler Substanzen (wie Harz, Kutin u.s.w.) an der Streumasse nicht verwundern würde. Zugleich deutet der geringere Abbau der Kiefernstreu im Eichen-Buchenwald und am Heidestandort auf eine solche Anpassung hin. ELLENBERG (1986) weist auf generelle Unterschiede in der Pilzflora zwischen Laub- und Nadelwäldern hin.

Außer diesen Einflüssen auf den Abbau der organischen Substanz machen sich Standortunterschiede besonders in der Art der Veränderung der Elementgehalte bemerkbar. Daß Kaliumgehalte aufgrund der Mobilität dieses Elementes besonders stark von unterschiedlichen Klimabedingungen (vor allem untersch. Feuchtigkeit) betroffen sind, wurde bereits in Kap. 5.2 diskutiert. Auf diese Tatsache sind auch die deutlichen Unterschiede in diesem Verhalten zwischen den Standorten zurückzuführen: Bei Buchen-, Eichen- und Kiefernstreu ist die Kaliumfreisetzung nach Ablauf der Untersuchung am Eichen-Buchenstandort deutlich geringer als am Birken-Kiefernstandort und insbesondere auf der Heide (s. Abb. 14). Dafür kommen zwei Begründungen in Frage: Durch die weniger geschlossene Vegetation des Birken-Kiefernwaldes und der Heide könnte der Regen an diesen Standorten in größerem Umfang unmittelbaren Zutritt zur Streu haben

und so für eine effektivere Auswaschung von Kalium sorgen. Untersuchungen von LEUSCHNER (1994) haben jedoch erbracht, daß sich die Höhe des Bestandesniederschlages zwischen den drei Standorten im Jahresmittel nur wenig unterscheidet; zwar können saisonale Unterschiede auftreten, dies kann jedoch für den Untersuchungszeitraum nicht nachgeprüft werden. Zum anderen könnte mit dem Bestandesniederschlag Kalium, welches im Kronenraum ausgewaschen wurde, in die Streu eingetragen werden. Da die Kaliumgehalte der Buchen- und Eichenblätter bedeutend höher als die der Birkenblätter und Kiefernadeln sind, würde sich dies im Eichen-Buchenwald stärker als an den anderen Standorten bemerkbar machen. Tatsächlich haben Messungen von RODE (schriftl. Mitt. 1995) ergeben, daß der Kaliumfluß mit dem Bestandesniederschlag in der Jahressumme (1991) im Eichen-Buchenwald mehr als doppelt so hoch wie im Birken-Kiefernwald oder in der Heide ist. Darin mag der Hauptgrund für die geringeren Kaliumverluste aus der Streu im Eichen-Buchenwald liegen.

Es ist verwunderlich, daß sich dieser Effekt nicht auch bei der Birkenstreu zeigt; eventuell kompensiert hier der Eintrag durch den Bestandesniederschlag genau die Freisetzung durch den stärkeren Abbau am Eichen-Buchenstandort.

Der gleiche Effekt könnte auch für die unterschiedliche Veränderung der Mangangehalte zwischen den drei Flächen verantwortlich sein (s. Abb. 29). Der Mangangehalt ist einer der wenigen Faktoren, in denen sich die drei Untersuchungsflächen bodenchemisch unterscheiden: Durch Podsolierung der Böden der *Calluna*-Heide und des Birken-Kiefernwaldes wurde Mangan größtenteils ausgewaschen; auf der Eichen-Buchenfläche war dies in weit geringerem Maße der Fall. Die unterschiedlichen Gehalte in der Bodenlösung spiegeln sich in den Blattgehalten wieder: Birkenblätter bzw. Kiefernadeln besitzen weniger als 10% der Gehalte der Buchenblätter (RODE, schriftl. Mitt. 1995). Entsprechend geringer sind auch die Mn-Flüsse mit dem Bestandesniederschlag im Birken-Kiefernwald und der *Calluna*-Heide (~17% bzw. 14% der Jahressumme des Eichen-Buchenwaldes; RODE, schriftl. Mitt. 1995). Dies dürfte ein wichtiger Grund dafür sein, daß alle vier Streuarten in den Austauschversuchen die höchste Mangananreicherung am Eichen-Buchenstandort aufweisen.

Bei den anderen Inhaltsstoffen der Streu insbesondere bei Stickstoff, Magnesium und Calcium sind eindeutige Beeinflussungen durch den jeweiligen Standort nicht zu erkennen. Die Phosphorgehalte verändern sich offenbar völlig unabhängig vom Standort: Bei den Austauschversuchen ergaben sich einzig Unterschiede in der Freisetzung zwischen der Streu der vier Baumarten, die unabhängig vom Standort der Ausbringung waren (s. Abb. 41).

Einzig in der Veränderung der Ligningehalte ist eine einheitliche Tendenz wie bei Kalium und Mangan zu sehen: Bei allen Arten wurde Lignin im Eichen-Buchenwald am stärksten abgebaut (s. Abb. 55). Dies könnte an den allgemein günstigeren Nährstoff- und Klimabedingungen für die Abbauorganismen im Eichen-Buchenwald liegen. Eventuell sind die Mikroorganismen hier auch etwas weniger stickstofflimitiert als am Birken-Kiefernstandort, denn wie HELLWIG (1994) und HÖNES (1994) feststellten, ist die Stickstoff-Mineralisation im Eichen-Buchenwald weit höher als an den anderen zwei Standorten.

Es wird deutlich, daß sich die einzelnen Faktoren des Standortes und der chemischen Zusammensetzung der Streu nicht klar voneinander trennen lassen, sondern sich gegenseitig beeinflussen. Komplexe Prozesse wie Ligninabbau oder Stickstoffmineralisation machen dies besonders deutlich. Die Streuzersetzung stellt sich daher als ein polykausal bedingter Prozeß dar.

#### **5.4 Nährstoffnachlieferung durch die Streuzersetzung im Verlauf des Untersuchungszeitraumes**

In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, daß die Freisetzung von Nährstoffen durch die Streuzersetzung von der Bindungsart der Elemente in der Streu abhängt, daneben aber auch in hohem Maße von der Streuqualität, vom Standort und von den klimatischen Bedingungen beeinflusst wird. Infolgedessen ist die Nährstoffnachlieferung aus der Streu für die einzelnen Elementen unterschiedlich, aber auch art- und standortabhängig. Anhand von Mittelwerten der jährlich anfallenden Streumengen der vier Baumarten, die RODE (schriftl. Mitt. 1994) auf den Untersuchungsflächen der vorliegenden Untersuchung in den vorangehenden Jahren ermittelt hat, kann die Freisetzung bzw. Akkumulation von Nährstoffen durch die gesamte einjährige Streu berechnet werden, indem die jährliche Gesamtmenge an Streu mit den spezifischen Freisetzungsraten der  $O_L$ -Streu multipliziert werden. Hier muß auf Mittelwerte für den Streufall der Jahre '90 bis '92 zurückgegriffen werden, da für das Untersuchungsjahr dieser Arbeit derartige Erhebungen der Streumengen nicht vorliegen; die Schwankung der jährlichen Streuproduktion ist jedoch relativ gering, wie die Untersuchungen von RODE ergeben haben (mündl. Mitt. 1994), so daß die errechneten Werte realistisch sein dürften.

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse dieser Berechnung für die vier Baumarten und der beiden Waldbestände zusammen mit Angaben der relativen Veränderung in Bezug auf den gesamten Nährstoffvorrat der frischen Streu dargestellt.

**Tab. 11:** Freisetzung bzw. Akkumulation von Nährstoffen durch die einjährige Streumenge der vier Baumarten ( $O_L$ -Lage) und der beiden Waldgesellschaften nach 246 Tagen (Nov.'93-Juli '94); berechnet aus den jährlichen Streumengen (RODE, unveröff.) und den hier ermittelten spezifischen Freisetzungsraten; Angaben in mmol/m<sup>2</sup> und in % des Gesamtvorrates der frischen Streu (*kursiv*); Akkumulationswerte negativ.

|                   | Buche       | Eiche        | Eichen-<br>Buchenwald | Birke        | Kiefer       | Birken-<br>Kiefernwald |
|-------------------|-------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|------------------------|
| <b>Stickstoff</b> | -7,8 (5,6)  | -14,8 (24,2) | <b>-22,7 (11,2)</b>   | -2,7 (7,8)   | -24,3 (31,3) | <b>-27,0 (24,1)</b>    |
| <b>Phosphor</b>   | 2,4 (21,5)  | 1,7 (26,9)   | <b>4,1 (23,5)</b>     | 1,0 (33,2)   | 1,0 (19,4)   | <b>2,1 (24,4)</b>      |
| <b>Kalium</b>     | 17,5 (64,6) | 8,2 (66,0)   | <b>25,7 (65,0)</b>    | 1,0 (39,1)   | 1,5 (28,4)   | <b>2,5 (31,9)</b>      |
| <b>Magnesium</b>  | 0,1 (1,3)   | 0,9 (17,4)   | <b>1,0 (9,0)</b>      | 1,1 (30,5)   | 1,5 (32,9)   | <b>2,5 (31,8)</b>      |
| <b>Calcium</b>    | 5,9 (11,9)  | 3,7 (15,7)   | <b>9,6 (13,2)</b>     | 1,4 (16,6)   | 5,3 (22,1)   | <b>6,7 (20,7)</b>      |
| <b>Mangan</b>     | -4,2 (34,1) | -1,4 (25,4)  | <b>-5,6 (31,4)</b>    | -0,1 (34,6)  | -0,2 (19,5)  | <b>-0,4 (23,3)</b>     |
| <b>Eisen</b>      | -0,2 (24,8) | -0,02 (3,6)  | <b>-0,8 (16,9)</b>    | -0,04 (28,9) | -0,4 (56,0)  | <b>-0,5 (51,3)</b>     |

Unterschiede zwischen den Baumarten gehen in diesem Zusammenhang nicht nur auf den unterschiedlichen Grad der Freisetzung, sondern auch auf den unterschiedlichen Anteil der vier Baumarten an der Streuproduktion der beiden Mischbestände zurück (Buche : Eiche = 1,8 : 1; Kiefer : Birke = 4,4 : 1). Auffallend ist die Rolle der unterrepräsentierten Baumarten für die Nachlieferung einzelner Elemente in den Waldbeständen: So wird im Eichen-Buchenwald offenbar der weitaus größte Teil der Magnesiumabgabe aus der frischen Streu von der Eichenstreu geleistet, die jedoch auch für den Großteil der Stickstoffakkumulation verantwortlich ist. Im Birken-Kiefernwald hat die zahlen- und massenmäßig stark unterrepräsentierte Birke aufgrund ihrer hohen Nährstoffgehalte in der Streu sehr großen Anteil an der Freisetzung aller Elemente. Besonders interessant ist ein Vergleich der Nährstofffreisetzung zwischen beiden Waldgesellschaften: Während die Stickstoffakkumulation der frischen Streu in beiden Waldbeständen ähnlich ist, wird im Eichen-Buchenwald doppelt so viel Phosphor und 10mal so viel Kalium wie im Birken-Kiefernwald aus der einjährigen Streu freigesetzt. Im Birken-Kiefernwald wird dagegen mehr Magnesium im beschriebenen Zeitraum abgegeben. Die hier berechneten absoluten Freisetzungsmengen in den Beständen (in mmol/m<sup>2</sup>) müssen dabei nicht proportional zu den Gesamtvorräten der Elemente in der frischen Streu sein: obwohl im Eichen-Buchenwald doppelt so hohe Phosphormengen wie im Birken-Kiefernwald freigesetzt werden, ist der in 246 Tagen mobilisierte Anteil am Gesamtvorrat gleich (~24%). Die hohe Nährstoffnachlieferung im Eichen-Buchenwald

hängt deshalb auch unmittelbar mit den größtenteils höheren Elementkonzentrationen der Streu zusammen. Deutlich wird in diesem Vergleich auch, daß die frische O<sub>L</sub>-Streu (wie vermutlich der Großteil der O<sub>L</sub>-Schicht) nicht zur Stickstoffmineralisation beiträgt, sondern im Gegenteil Stickstoff akkumuliert (der Grund hierfür wurde in Kap. 5.2 diskutiert).

In diesem Zusammenhang erscheint die Frage nach dem Anteil der Streuzersetzung älterer Auflagehorizonte an der Nährstoffnachlieferung interessant. Dies soll hier beispielhaft am oberen Teil der O<sub>F</sub>-Lage des Eichen-Buchenwaldes erörtert werden (der sogenannten O<sub>Fr</sub>-Schicht). Dazu wurde der Humusvorrat dieser Schicht, der von LÜBBE (1989) ermittelt wurde, mit den Freisetzungsdaten der O<sub>F</sub>-Streu aus der vorliegenden Untersuchung verrechnet. Es muß an dieser Stelle betont werden, daß dies nur eine modellhafte Rechnung ist, deren Ergebnisse nur unter folgenden Einschränkungen gültig sind:

- (b) es wurden die Mittelwerte der Freisetzungen von Buche und Eiche verwendet (da der Humusvorrat von Lübbe nicht artenanteilig angegeben wurde)
- (c) die in dieser Arbeit gemessenen Freisetzungen sind für die gesamte O<sub>Fr</sub>-Schicht repräsentativ
- (a) der Humusvorrat hat sich in der Zeit zwischen beiden Untersuchungen nicht verändert.

Da die Veränderung der O<sub>F</sub>-Schicht innerhalb von 5 Jahren angesichts der geringen Abbaugeschwindigkeit klein sein dürfte, sich die Freisetzung der Elemente zwischen Buchen- und Eichenstreu in der O<sub>F</sub>-Lage kaum unterscheidet und die Streuproben der O<sub>F</sub>-Streu für die Versuche der vorliegenden Arbeit aus dieser oberen O<sub>F</sub>-Schicht stammen, dürften die Ergebnisse der Berechnung jedoch realistisch sein. Tabelle 12 gibt die Werte neben Angaben über den prozentualen Anteil der Freisetzung am Gesamtvorrat wieder.

**Tab. 12:** Freisetzung bzw. Akkumulation der Nährstoffe durch die obere O<sub>F</sub>-Schicht (Fr) im Eichen-Buchenwald von November '93 bis Juli '94 (246 Tage); berechnet aus dem Humusvorrat dieser Schicht nach Angaben von LÜBBE (1989) und den hier ermittelten spezifischen Freisetzungsraten; Angaben in mmol/m<sup>2</sup> und in % des Gesamtvorrats der O<sub>Fr</sub>-Schicht (*kursiv*); Akkumulationswerte negativ.

| Stickstoff | Phosphor | Kalium | Magnesium | Calcium | Mangan | Eisen |
|------------|----------|--------|-----------|---------|--------|-------|
| 574,0      | 78,7     | 54,9   | 3,6       | 88,0    | -44,6  | 1,0   |
| (16,7)     | (40,4)   | (44,9) | (5,0)     | (17,1)  | (25,4) | (2,3) |

Es wird insbesondere im Kontrast zur  $O_L$ -Lage deutlich, wie wichtig die Freisetzung von Elementen durch den Abbau dieses Streuhorizontes für die Nährstoffnachlieferung ist. In erster Linie betrifft dies die Stickstofffreisetzung, die zu überwiegendem Teil in dieser Schicht erfolgt; daneben werden aber auch bedeutende Mengen an Phosphor, Kalium und Calcium freigesetzt. Bei Phosphor und Kalium stellt diese Menge einen großen Teil des Gesamtvermögens der  $O_{Fr}$ -Schicht dar, während der Stickstoffvorrat offenbar langsamer verbraucht wird.

HELLWIG (1994) hat die Mineralstickstoff-Nachlieferung desselben Eichen-Buchenwaldes untersucht und dabei als Summe der Vegetationsperiode (30 Wochen) einen Wert von ca. 500 mmol N/m<sup>2</sup> berechnet. Dieser Wert entspricht ungefähr der oben berechneten Nachlieferung aus der  $O_{Fr}$ -Schicht. Das bedeutet nicht, daß die Stickstoff-Nettomineralisation allein aus dieser Schicht erfolgt. Da die N-Mineralisation aber zur  $O_H$ -Schicht hin stark abnimmt (HELLWIG 1994), könnte es sein, daß sich N-Mineralisation der darunterliegenden  $O_F$ - und  $O_H$ -Schichten und N-Immobilisierung der darüberliegenden  $O_L$ -Schicht rechnerisch ausgleichen. In jedem Fall unterstreichen diese modellhaft berechneten Ergebnisse die Bedeutung der  $O_{Fr}$ -Schicht für die Stickstoffnachlieferung und die Nachlieferung von Phosphor, Kalium und Calcium im Eichen-Buchenwald.

Leider liegen für den Birken-Kiefernwald keine nach Streuschichten differenzierten Erhebungen der Humusvorräte vor, die eine derartige Berechnung der Nachlieferung aus der  $O_{Fr}$ -Schicht erlauben würde. Trotzdem läßt sich der Unterschied zum Eichen-Buchenwald anhand von zwei Befunden abschätzen: zwar ist der Humusvorrat der  $O_{Fr}$ -Lage im Birken-Kiefernwald etwas größer als im Eichen-Buchenwald (9729 g/m<sup>2</sup> gegenüber 8911 g/m<sup>2</sup>, nach LEUSCHNER 1994), aber der Grad der Elementfreisetzung durch Birken- und Kiefernstreu ist bei allen Nährstoffen (mit Ausnahme von Calcium) deutlich kleiner (bei Phosphor zum Beispiel nur ein Drittel, bei Kalium sogar weniger als ein Zehntel), und die Nährstoffkonzentrationen (vor allem der Kiefernstreu) sind ebenfalls sehr gering. Daraus ergibt sich eine wesentlich geringere Nährstoffnachlieferung als im Eichen-Buchenwald: Wäre der Humusvorrat der oberen  $O_F$ -Schicht des Birken-Kiefernwaldes gleich groß wie im Eichen-Buchenwald (2363 g/m<sup>2</sup>, LÜBBE 1989), würde die Stickstoffnachlieferung verglichen mit der des Eichen-Buchenwaldes nur etwa die Hälfte betragen; die Phosphornachlieferung wäre nur etwa ein Fünftel so groß, und Kalium- und Magnesium würden aus dieser Schicht nicht mehr nachgeliefert:

Diese Berechnungen zeigen, daß im Eichen-Buchenwald nicht nur die Nährstoffnachlieferung durch die frische Streu größer ist, sondern daß auch die älteren Horizonte

der organischen Auflage noch als Ressourcenquelle bedeutungsvoll sind (insbesondere für Stickstoff); im Birken-Kiefernwald dienen diese Horizonte zwar in geringerem Umfang der Stickstoff- und Phosphormineralisation, sind aber als Kationenquelle (mit Ausnahme von Calcium) weitestgehend erschöpft.

## **5.5 Die Rolle der Nährstoffnachlieferung durch die Streuzersetzung in der Heide - Waldsukzession**

Innerhalb der drei postulierten Sukzessionsstadien *Calluna*-Heide, Birken-Kiefernwald und Eichen-Buchenwald kann eine deutliche Zunahme der Mächtigkeit der organischen Auflage beobachtet werden (LEUSCHNER, RODE & HEINKEN 1993). Dies scheint ein allgemeines Phänomen innerhalb von Sekundärsukzessionen zu sein und wurde auch in anderen Untersuchungen festgestellt (z.B. BERENDSE et al. 1989). Gerade auf sehr nährstoffarmen Böden gewinnt dadurch die organische Auflage stark an Bedeutung für die Nährstoffversorgung des Systems (BERENDSE et al. 1989, RODE & HEINKEN 1993, LEUSCHNER 1994) – der Vergleich mit den Verhältnissen in tropischen Feuchtwäldern (WALTER & BRECKLE 1986, LEUSCHNER, RODE & HEINKEN 1993) erscheint ungewöhnlich, trifft jedoch im Hinblick auf den Nährstoffkreislauf zu. Erst der größere Nährstoffvorrat durch die Zunahme der organischen Auflage ermöglicht offenbar das Aufkommen eines buchendominierten Laubwaldes (RODE 1993). Dies impliziert jedoch auch eine Freisetzung der Nährstoffe durch Streuzersetzung und erklärt die Bedeutung des Streuabbaus in diesen Sukzessionsstadien. Die vier vorherrschenden Baumarten zeigen dabei einige Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Bewältigung der ungünstigen Wuchsbedingungen. RODE (1992) zufolge könnte die Kiefer eine Wachstumsstrategie verfolgen, die durch geringe Blattgehalte und eine starke Retranslokation von Nährstoffen aus den Nadeln einen geringen Nährstoffumsatz im System bewirkt und so mit den schlechten Nährstoffbedingungen zurechtkommt. Die Birke soll dagegen eine effektivere Nährstoffaufnahme und damit einen höheren Umsatz im System betreiben; BERG & WESSÉN (1984) heben deshalb die Bedeutung der Birke in frühen Stadien von Kiefernwaldsukzessionen vor. Eiche und Buche profitieren dagegen vor allem durch die erhöhte Nährstoffnachlieferung im mikroklimatisch günstigeren Eichen-Buchenwald (RODE 1993, LEUSCHNER 1994).

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung können in einigen Fragen Strategie und Rolle der vier Baumarten in der Heide-Waldsukzession erhellen. Bei allen vier Arten kontrolliert der hohe Ligningehalt die Abbaugeschwindigkeit der Streu (Kap. 5.3.1) und könnte durch die gemäßigte Freisetzung der Nährstoffe für eine effektive Wiederaufnahme durch die Wurzeln sorgen. Diese Strategie wird in gleicher Weise von BERENDSE et al. (1989) als Anpassung an nährstoffarme Standorte beschrieben.

Wie die Ergebnisse dieser und RODES Untersuchung (1993) zeigt, besitzen Blätter und Streu von Eiche und Buche deutlich höhere Nährstoffgehalte als die der Kiefer (teilweise auch als die der Birke) (Kap. 5.1). Darin liegt der Hauptgrund für eine deutlich höhere Nährstoffnachlieferung im Eichen-Buchenwald gegenüber dem Birken-Kiefernwald, unabhängig von bestehenden Unterschieden im Grad der Streuzersetzung zwischen den Baumarten (Kap. 5.4). Dies betrifft außer der einjährigen  $O_L$ -Streu auch in hohem Maße die  $O_F$ -Schicht: Nicht nur die Stickstoff- und Phosphornachlieferung aus dieser Auflage-schicht ist im Birken-Kiefernwald eingeschränkt, sondern auch als Kationenquelle kann diese nicht mehr dienen (mit Ausnahme von Calcium). Die  $O_F$ -Schicht im Eichen-Buchenwald trägt dagegen beträchtlich zur Nährstoffnachlieferung namentlich von Phosphor und Stickstoff bei (Kap. 5.4.2).

Für den Nährstoffkreislauf in Ökosystemen ist neben der allgemeinen Nährstoffversorgung der Stickstoffkreislauf von großer Bedeutung. Insbesondere in nährstoffarmen Ökosystemen sind offenbar Mechanismen entwickelt, die dazu dienen, die Stickstoffressourcen effektiv zu nutzen und einen N-Verlust aus dem Systemkreislauf zu verhindern. Zu diesen Strategien zählen hohe Ligningehalte der Blätter und zeitweilige Stickstoff-Immobilisierung durch Mikroorganismen – Phänomene, die in der vorliegenden Untersuchung beobachtet wurden. In beiden Fällen spielt der Grad des Streuabbaus eine wichtige Rolle: Hohe Ligningehalte sorgen für eine verminderte Abbaugeschwindigkeit (BERENDSE et al. 1987), außerdem gilt Lignin als Speicherort für Stickstoff (BERG & STAAF 1981); je größer die Zersetzungsgeschwindigkeit ist, desto stärker ist die dabei auftretende Stickstoff-Immobilisierung (BOSATTA & STAAF 1982, BERENDSE et al. 1989). Der Grund hierfür liegt in der Stickstofflimitierung der Mikroorganismen begründet, die auf nährstoffarmen Böden die Regel ist: Gewichtsabbau der Streu und Wachstumsrate der Abbauorganismen verlaufen proportional zueinander (PARNAS 1975). Wachsende Populationen der Mikroorganismen benutzen deshalb im Zuge höherer Abbaugeschwindigkeiten den Großteil des freiwerdenden Stickstoffs zum Aufbau ihrer eigenen Biomasse (BOSATTA & STAAF 1982). Dies gilt in erster Linie für die frühen Stadien



der Streuzersetzung, und STAAF (1980) bzw. BERG & STAAF (1981) sehen allein schon darin eine Strategie zur Vermeidung von Stickstoffverlusten in Zeiten geringerer Wurzelaktivität. In den späteren Stadien ist der Anteil lignin gebundenen Stickstoffs größer und die N-Mineralisation verläuft analog zum langsamen Ligninabbau (BERG, HANNUS et al. 1982). Dieser Mechanismus ist in der vorliegenden Untersuchung an der Kiefernstreu zu erkennen: Durch den größeren Abbau der  $O_L$ -Streu im Vergleich zu den drei Laubstreuarten kommt es zur Stickstoff-Immobilisierung, und die C/N-Verhältnisse verengen sich rasch. In späteren Zersetzungsphasen ( $O_F$ -Streu) ist der Abbau deutlich gemindert. Bei den Laubstreuarten bewirkt der langsamere Abbau der frischen Streu eine geringere N-Immobilisierung und geringere Veränderungen des C/N-Verhältnisses; dies könnte mit einer effektiveren Stickstoffaufnahme der Wurzeln bei Birke, Eiche und Buche zusammenhängen, die somit nicht auf eine derartige Vermeidungsstrategie wie die der Kiefer angewiesen wären. Untersuchungen in beiden Wäldern zeigten, daß die drei Laubstreuarten eine deutlich größere Feinwurzel-Biomasse besitzen als die Kiefer (LEUSCHNER 1994).

Eine weitere Funktion für die Heide-Waldsukzession könnte im speziellen Mikroklima der Kiefernstreu bestehen. Wie die Austauschversuche der vorliegenden Arbeit zeigen, zersetzt sich die Laubstreu von Birke, Eiche und Buche am Kiefernstandort deutlich schlechter als im Eichen-Buchenwald. Ungeachtet der Frage, ob dies an einer speziellen Zersetzerfauna liegt (wie in Kap. 5.3.2 vermutet), bedeutet dies für ein hypothetisches Übergangsstadium "laubbaumreicher Kiefernwald" innerhalb der Sukzession, daß die Laubstreu dort langsamer abgebaut wird als in einem etablierten Buchen-Laubwald, und deshalb zu einer Streuakkumulation und Nährstoffanreicherung in der organischen Auflage führen würde. Genau dies kann beim Vergleich der drei Stadien Heide, Birken-Kiefernwald und Eichen-Buchenwald beobachtet werden (LEUSCHNER, RODE & HEINKEN 1993); möglicherweise liegt hier ein wichtiger Mechanismus zur Verlagerung des Nährstoffkreislaufes vom Mineralboden in die Auflagehorizonte vor.

## ZUSAMMENFASSUNG

In drei Stadien der Heide-Waldsukzession auf armen Sanden der Lüneburger Heide wurde im Zeitraum November 1993 bis Juli 1994 die Streuzersetzung frischgefallener und älterer Streu von *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, *Betula pendula* und *Pinus sylvestris* untersucht. Dabei wurde eine Freilandmethode mit "litter bags" angewendet.

Bei allen vier Arten verläuft die Zersetzung der frischen Streu über den Untersuchungszeitraum von 246 Tagen annähernd linear. Die frische Kiefernstreu besitzt dabei eine größere Abbaugeschwindigkeit als die drei Laubstreuarten. Die  $O_F$ -Streu wird erwartungsgemäß langsamer abgebaut als die frische  $O_L$ -Streu.

Der Austausch von  $O_L$ -Streu der vier Baumarten zwischen den drei Untersuchungsflächen zeigt, daß die Abbaubedingungen für Laubstreu (von Birke, Eiche und Buche) im Eichen-Buchenwald besser als im Birken-Kiefernwald oder auf der *Calluna*-Heide sind. Hauptgrund hierfür dürften die günstigeren mikroklimatischen Bedingungen für die Abbauorganismen in der feuchteren organischen Auflage des Laubwaldes sein. Die Kiefernstreu wird dagegen trotz größerer Trockenheit am Kiefernstandort hier besser als an den anderen Standorten (Eichen-Buchenwald, Heide) abgebaut, was auf eine an Kiefernstreu angepaßte Zersetzerfauna hindeutet.

Alle vier Streuarten besitzen sehr hohe Ligningehalte, die im Zusammenhang mit den nährstoffarmen Standortsverhältnissen zu sehen sind.

Die Freisetzung der Elemente durch den Abbau der frischen Streu erfolgt entsprechend ihrer chemischen Bindungsart in der Pflanzenzelle und ihrer Bedeutung als Nährstoff für die Abbauorganismen: K und Mg werden relativ rasch freigesetzt, die Ca- und P-Abgabe erfolgt analog zum Kohlenstoffverlust; Mn und Fe werden angereichert. Stickstoff wird dagegen durch den Aufbau mikrobieller Biomasse immobilisiert.

Erst in älteren Auflagehorizonten ( $O_F$ -Streu) findet eine Stickstoff-Nettomineralisation statt: Im Eichen-Buchenwald ist diese quantitativ bedeutender als im Birken-Kiefernwald. Daneben spielt die  $O_F$ -Streu im Eichen-Buchenwald eine große Rolle für die P-, K- und Ca-Nachlieferung, während modellhafte Berechnungen zeigen, daß die Nährstoffnachlieferung durch die  $O_F$ -Schicht im Birken-Kiefernwald viel geringer ist.

Hinsichtlich der Rolle der Streuzersetzung in der Heide-Waldsukzession könnten das Vorhandensein hoher Ligningehalte der Streu und die beobachtete anfängliche N-Immobilisierung Mechanismen eines effizienten Nährstoffhaushaltes sein. Die

ermittelten Unterschiede in der Zersetzungsgeschwindigkeit zwischen den vier Streuarten dürften für die Sukzession eine geringere Rolle spielen als die Unterschiede im Nährstoffgehalt der Blätter und die Bedeutung der älteren Auflageschichten für die Nährstoffnachlieferung.

## LITERATURVERZEICHNIS

- ABER, J.D. & J.M. MELILLO (1980): Litter decomposition: measuring relativ contributions of organic matter and nitrogen to forest soils. *Can. J. Bot.* 58, 416-421.
- ABER, J.D., J.M. MELILLO, K.J. NADELHOFFER, J. PASTOR & R.D. BOONE (1991): Factors controlling nitrogen cycling and nitrogen saturation in northern temperate forst ecosystems. *Ecological Applications* 1(3), 305-315.
- ALLEN, S.E., H.M. GRIMSHAW J.A. PARKINSON & C. QUARMBY (1974): Chemical analysis of ecological materials. S. 252-254. Blackwell, Oxford, England.
- ANDERSON, J.M. (1973): The breakdown and decomposition of sweet chestnut (*Castanea sativa*) and beech (*Fagus sylvatica*) leaf litter in two deciduous woodland soils. II. Changes in the carbon, hydrogen, nitrogen and polyphenol content. *Oecologia (Berl.)* 12, 275-288.
- ANDERSON, J.M. (1991): The effect of climate change on decomposition processes in grassland and coniferous forests. *Ecological Applications* 1 (3), 326-347.
- ARONSSON, A. & S. ELOWSON (1980): Effects of irrigation and fertilization on mineral nurtients in scots pine needles. In: PERSSON, T. (ed.): *Structure and Function of Northern Coniferous Forests - An Ecosystem Study*. *Ecol. Bull. (Stockholm)* 32, 373-390.
- BERENDSE, F., B. BERG & E. BOSATTA (1987): The effect of lignin and nitrogen on the decomposition of litter in nutrient poor ecosystems. A theoretical approach. *Canad. J. Bot.* 65, 1116-1121.
- BERENDSE, F., R. BOBBINK & G. ROUWENHORST (1989): A comparative study on nutrient mineralization. *Oecologia* 78, 338-348.
- BERG, B. (1986): Nutrient Release from Litter and Humus in Coniferous Forest Soils - a Mini Review. *Scan. J. For. Res.* 1, 359-369.

- BERG, B. (1991): Effects of plants and soil biota on soil organic matter turnover. In: BREEMEN, N. VAN (ed.): Commission of the European Communities - Ecosystem Research Report N°1: Decomposition and accumulation of organic matter in terrestrial ecosystems: research priorities and approaches, 81-88.
- BERG, B. & G.I. ÅGREN (1984): Decomposition of needle litter and its organic-chemical components: theory and field experiments. Longterm decomposition in a scots pine forest. III. *Canad. J. Bot.* 62, 2880-2890.
- BERG, B., K. HANNUS, T. POPOFF & O. THEANDER (1982): Changes in organic-chemical components of needle litter during decomposition. Long-term decomposition in a scots pine forest. I. *Canad. J. Bot.* 60, 1310-1319.
- BERG, B. & H. STAAF (1980): Decomposition rate and chemical changes of scots pine needle litter. II. Influence of chemical composition. In: PERSSON, T. (ed.) (1980): Structure and Function of Northern Coniferous Forests - An Ecosystem Study. *Ecol. Bull. (Stockholm)* 32, 373-390.
- BERG, B. & H. STAAF (1981): Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter. In: CLARK, F.E. & T. ROSSWALL (eds.) (1981): Terrestrial Nitrogen Cycles - Processes, Ecosystems strategies and Management Impacts. *Ecol. Bull. (Stockholm)* 33, 163-178.
- BERG, B. & O. THEANDER (1984): Dynamics of some nitrogen fractions in decomposing Scots pine needle litter. *Pedologia* 27, 261--267.
- BERG, B. & B. WESSÉN (1984): Changes in organic-chemical components and ingrowth of fungal mycelium in decomposing birch leaf litter as compared to pine needles. *Pedologia* 26, 285-298.
- BERG, B., B. WESSÉN & G. ECKBOHM (1982): Nitrogen level and decomposition in Scots pine needle litter. *Oikos* 38, 291-296.
- BOCOCK, K.L. (1963): Changes in the amount of nitrogen in decomposing leaf litter of sessile oak (*Quercus petraea*). *J. Ecol.* 51, 555-566.

- BOCOCK, K.L. (1964): Changes in the amounts of dry matter, nitrogen, carbon and energy in decomposing woodland leaf litter in relation to the activities of the soil fauna. *J. Ecol.* 52, 273-284.
- BOSATTA, E. & H. STAAF (1982): The control of nitrogen turn-over in forest litter. *Oikos* 39, 143-151.
- CLAUB, C. (1990): Räumliche Variabilität von morphologischen und chemischen Bodeneigenschaften in einer Calluna-Heide und einem Birken-Kiefern-Anflugwald. Unveröff. Diplomarbeit, Systemat.-Geobotan. Institut, Univ. Göttingen.
- COLDWELL, B.B. & W.A. DELONG (1950): Studies of the composition of deciduous forest tree leaves before and after partial decomposition. *Scientific Agriculture* 30, 456-466.
- DANNER, E. (1990): Untersuchung und Kartierung der räumlichen Variabilität der Böden einer Calluna-Heide, eines Kiefernbestandes und eines Eichen-Buchenwaldes auf Sanden der Lüneburger Heide. Unveröff. Diplomarbeit, Systemat.-Geobotan. Institut, Univ. Göttingen.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (1993/94): Monatlicher Witterungsbericht der Jahre 1993 und 1994. DWD, Offenbach.
- ELLENBERG, H. (1986): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. 4. Auflage. Verlag Ulmer, Stuttgart. 989 S.
- FACELL, M. & S.T.A. PICKETT (1991): Plant Litter: its Dynamics and Effects on Plant Community Structure. *The Botanical Review* 57 (1), 1-32.
- FLANAGAN, P. & F. BUNNEL (1976): Decomposition models based on climatic variables, substrate variables, microbial respiration and production. In: ANDERSON, J.M. & A. MACFADYN (eds.): *The role of terrestrial and aquatic organisms in decomposition processes*. Blackwell Scientific, Oxford, England, 437-457.
- FOGEL, R. & K. CROMACK, JR. (1977): Effects of habitat and substrate quality on Douglas fir litter decomposition in Western Oregon. *Can. J. Bot.* 55, 1632-1640.

- GERICKE, S. & B. KURMIES (1952): Colorimetrische Bestimmung der Phosphorsäure mit Vanadat-Molybdat. *Zeitschr. f. anal. Chemie* 137(1).
- HAIDER, K. (1991): Interactions between inorganic, organic compounds and microbes in soils - their impacts upon transformation processes. In: BREEMEN, N. VAN (ed.): Commission of the European Communities - Ecosystem Research Report N°1: Decomposition and accumulation of organic matter in terrestrial ecosystems: research priorities and approaches, 52-57.
- HEINKEN, T. (1993): Phytosociological and historical investigations in beech woods and birch-oak woods on pleistocene sandy soils without groundwater influence in Lower Saxony (NW Germany). *Scripta Geobotan.* (Göttingen).
- HELLWIG, F. (1994): Die Stickstoff-Mineralisation in einer podsoligen Braunerde unter Eichen-Buchenwald. Unveröff. Diplomarbeit, Systemat.-Geobotan. Institut, Univ. Göttingen.
- HILL, H.H. (1926): Decomposition of organic matter in soils. *Journal of Agricultural Research* 33, 77-79.
- HÖNES, D. (1994): Stickstoffmineralisation in den Böden eines Birken-Kiefernwaldes und einer Callunaheide auf nährstoffarmen Sanden. Unveröff. Diplomarbeit, Systemat.-Geobotan. Institut, Univ. Göttingen.
- HOLLAND, E.A. & D.C. COLEMAN (1987): Litter placement effect on microbial and organic matter dynamics in agroecosystems. *Ecology* 68,425-433.
- HOWARD, P.J.A. & D.M. HOWARD (1974): Microbial decomposition of tree and shrub leaf litter. I. Weight loss and chemical composition of decomposing litter. *Oikos* 25, 341-352.
- JENNY, H., S.P. GESSEL & F.T. BINGHAM (1949): Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science* 68, 419-432.
- JOERGENSEN, R.G. & B. MEYER (1990): Nutrient changes in decomposing beech leaf litter assessed using a solution flux approach. *J. Soil Science* 41, 279-293.

- KINZEL, H. (1982): Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- KUCERA, C. (1959): Weathering characteristics of deciduous leaf litter. *Ecology* 40, 485-487.
- LEUSCHNER, C. (1993): Forest dynamics on sandy soils in the Lüneburg Heide area, NW Germany. *Scripta Geobot.* 21. 53-60.
- LEUSCHNER, C. (1994): Walddynamik in der Lüneburger Heide: Ursachen, Mechanismen und die Rolle der Ressourcen. Unveröff. Habilitationsschrift, Systemat.-Geobotan. Institut, Univ. Göttingen.
- LEUSCHNER, C., M.W. RODE, U. SCHMITT & M. RUNGE (1991): Driving factors in longterm dynamics of forest ecosystems on sandy soils. Final report. Part II: Lüneburger Heide. University of Göttingen; Göttingen.
- LEUSCHNER, C., M.W. RODE & T. HEINKEN (1993): Gibt es eine Nährstoffmangel-Grenze der Buche im nordwestdeutschen Tiefland? *Flora* 188, 239-249.
- LEUSCHNER, C., M.W. RODE, E. DANNER, K. LÜBBE, C. CLAUB, S. MARGRAF & M. RUNGE (1993): Soil profile alteration and humus accumulation during heathland - forest succession in NW Germany. *Scripta Geobot.* 21, 73-84.
- LÜBBE, K. (1989): Vergleich der Humushorizonte einer Calluna-Heide, eines Birken-Kiefernwaldes und eines Eichen-Buchenwaldes auf Sanden der Lüneburger Heide. Unveröff. Diplomarbeit, Systemat.-Geobotan. Institut, Univ. Göttingen.
- MARGRAF, S. (1989): Vergleichende chemische und physikalische Charakterisierung von Bodenprofilen einer Calluna-Heide, eines Birken-Kiefernwaldes und eines Eichen-Buchenwaldes auf Sanden der Lüneburger Heide. Unveröff. Diplomarbeit, Systemat.-Geobotan. Institut, Univ. Göttingen.
- MAYER, R. (1971): Untersuchungen über die Freisetzung der Bioelemente aus der organischen Substanz der Humusaufgabe in einem Buchenbestand. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 131 (3), 261-273.



- McCLAUGHERTY, C. & B. BERG (1987): Cellulose, lignin, and nitrogen concentrations as regulating factors in late stages of forest litter decomposition. *Pedobiologia* 30, 101-112.
- MEENTEMEYER, V. (1977): Climatic regulation of decomposition rates of organic matter in terrestrial ecosystems. In: ADRIANS, D.C. & I.L. BRISBIN (eds.): *Environmental chemistry and cycling processes*. United States Department of Energy Symposium Series CONF-760429, Washington, District of Columbia, USA, 779-789.
- MEENTEMEYER, V. (1978): Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. *Ecology* 59, 465-472.
- MEENTEMEYER, V. & B. BERG (1986): Regional variation in rate of mass-loss of Scots pine needle litter in Swedish pine forests as influenced by climate and litter quality. *Scand. J. For. Res.* 1, 167-180.
- MELILLO, J.M., J.D. ABER & J.F. MURATORE (1982): Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63, 621-628.
- MELIN, E. (1928): Biological decomposition of some types of litter from North American Forests. *Ecology* 11, 72-101.
- MINDERMAN, G. (1968): Addition, decomposition and accumulation of organic matter in forests. *J. Ecol.* 56, 355-362.
- NIHLGÅRD, B. & L. LINDGREN (1977): Plant biomass, primary production and bioelements of three mature beech forests in South Sweden. *Oikos* 28, 55-104.
- OLSON, J.S. (1963): Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44, 322-331.
- OTTO, H.J. (1972): Die Ergebnisse der Standortskartierung im pleistozänen Flachland Niedersachsens: Grundlage waldbaulicher Leitvorstellungen. *Aus dem Walde. Mitt. a.d. Nds. Landesforstverwaltung* 19.

- PARNAS, H. (1975): Model for decomposition of organic material by microorganisms. *Soil Biol. Biochem.* 7, 161-169.
- RODE, M.W. (1992): Ökophysiologische Untersuchungen in einem Heide-Anflugwald: IV. Jahresverlauf des Blatt-Nährstoffstatus zweier konkurrierender Arten: *Pinus sylvestris* L. und *Betula pendula* Roth.. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* 21, 175-178.
- RODE, M.W. (1993): Leaf-nutrient accumulation and turnover at three stages of succession from heathland to forest. *J. Veg. Science* 4, 263-268.
- RODE, M.W. & T. HEINKEN (1993): Der Einfluß der Vegetation auf die Nährstoffverteilung in stark versauerten Böden der Lüneburger Heide. *Scripta Geobot.* 20, 21-38.
- RODE, M.W., C. LEUSCHNER, C. CLAUB, E. DANNER, V. GERDELMANN, S. MARGRAF & M. RUNGE (1993): Changes in nutrient availability and nutrient turnover during heathland - forest succession in NW Germany. *Scripta Geobot.* 21, 85-96.
- ROESCHMANN, G. (1971): Die Böden der nordwestdeutschen Geest-Landschaft. *Mitt. Dt. Bodenk. Ges.* 13, 151-231.
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (1992): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 12.Aufl.. Enke Verlag Stuttgart. 491 S.
- SCHMITT, U. (1990): Untersuchungen zur Bestandesstruktur von Kiefernflugwäldern. Unveröff. Diplomarbeit, Systemat.-Geobotan. Institut, Univ. Göttingen.
- STAAF, H. (1980): Release of plant nutrients from decomposing leaf litter in a South Swedish beech forest. *Holarctic Ecology* 3, 129-136.
- TAYLOR, B.R., D. PARKINSON & W.F.J. PARSONS (1989): Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: A microcosm test. *Ecology* 70, 97-104.
- WAKSMAN, S.E. & F.G. TENNEY (1927): The composition of natural organic materials and their decomposition in the soil: II. Influence of age of plant upon the rapidity and nature of its decomposition – Rye Plants. *Soil Science* 24, 317-334.

- WAKSMAN, S.E. & F.G. TENNEY (1929): The composition of natural organic materials and their decomposition in the soil: IV. The nature and rapidity of decomposition of the various organic complexes in different plant materials under aerobic conditions. *Soil Science* 26, 55-84.
- WALTER, H. & S.-W. BRECKLE (1986): *Ökologie der Erde*. Bd.3. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. 587 S.
- WALTER, H. & H. LIETH (1967): *Klimadiagramm-Weltatlas*, Teil I. G. Fischer Verlag, Jena.
- WALSH, R.P.D. & P.J. VOIGHT (1977): Vegetation litter: an underestimated variable in hydrology and geomorphology. *J. Biogeogr.* 4, 253-274.
- WOLDSTEDT, P. & K. DUPHORN (1974): *Norddeutschland und angrenzende Gebiete im Eiszeitalter*. 3.Aufl. Koehler Verlag, Stuttgart.
- YAVITT, J.B. & T. FAHEY (1986): Litter decay and leaching from the forest floor in *Pinus contorta* (Lodgepole pine) ecosystems. *J. Ecol.* 74, 525-545.
- ZECH, W. (1991): Litter decomposition and humification in forest soils. In: BREEMEN, N. VAN (ed.): Commission of the European Communities - Ecosystem Research Report N°1: Decomposition and accumulation of organic matter in terrestrial ecosystems: research priorities and approaches, 46-51.
- ZIEGLER, F., I. KOGEL & W. ZECH (1986): Veränderung des Lignin in Waldhumus im Laufe der Streuzersetzung. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 45, 181-186.

# ANHANG

**Tab. A 1:** Gewicht der vier Streuarten in g TG und in % der Anfangsmasse  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche, B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide)

| Probe-termin            | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                            |                                 | Eiche (OL-Streu) |                            |                                 |
|-------------------------|--------------|------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------|
|                         |              | Stand-ort        | g TG nach Zersetzungsdauer | Restmasse in % der Anfangsmasse | Stand-ort        | g TG nach Zersetzungsdauer | Restmasse in % der Anfangsmasse |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 5,29 $\pm$ 0,13            | 100,0 $\pm$ 2,5                 | Q                | 5,40 $\pm$ 0,24            | 100,0 $\pm$ 4,4                 |
| 11.1.94                 | 68           | F                | 5,12 $\pm$ 0,26            | 95,3 $\pm$ 4,6                  | Q                | 5,16 $\pm$ 0,28            | 95,5 $\pm$ 4,9                  |
| 2.3.94                  | 118          | F                | 4,93 $\pm$ 0,07            | 93,5 $\pm$ 2,0                  | Q                | 4,82 $\pm$ 0,18            | 88,7 $\pm$ 3,6                  |
| 6.4.94                  | 153          | F                | 4,70 $\pm$ 0,18            | 89,0 $\pm$ 3,4                  | Q                | 4,56 $\pm$ 0,26            | 84,3 $\pm$ 5,0                  |
| 17.5.94                 | 194          | F                | 4,70 $\pm$ 0,14            | 88,8 $\pm$ 3,2                  | Q                | 4,61 $\pm$ 0,16            | 85,4 $\pm$ 3,2                  |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 4,33 $\pm$ 0,23            | 82,1 $\pm$ 4,0                  | Q                | 4,32 $\pm$ 0,33            | 80,1 $\pm$ 6,4                  |
| 8.7.94                  | 246          | P                | 4,51 $\pm$ 0,19            | 85,6 $\pm$ 3,4                  | P                | 4,27 $\pm$ 0,25            | 79,0 $\pm$ 4,8                  |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 4,91 $\pm$ 0,16            | 93,2 $\pm$ 3,1                  | C                | 4,62 $\pm$ 0,33            | 85,7 $\pm$ 6,6                  |
| <i>Birke (OL-Streu)</i> |              |                  |                            | <i>Kiefer (OL-Streu)</i>        |                  |                            |                                 |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 6,31 $\pm$ 0,07            | 100,0 $\pm$ 1,2                 | P                | 12,51 $\pm$ 0,26           | 100,0 $\pm$ 2,1                 |
| 11.1.94                 | 68           | B                | 5,67 $\pm$ 0,13            | 90,4 $\pm$ 2,1                  | P                | 11,10 $\pm$ 0,39           | 88,7 $\pm$ 3,1                  |
| 2.3.94                  | 118          | B                | 5,55 $\pm$ 0,31            | 88,3 $\pm$ 5,0                  | P                | 11,27 $\pm$ 0,22           | 90,2 $\pm$ 1,9                  |
| 6.4.94                  | 153          | B                | 5,47 $\pm$ 0,11            | 87,1 $\pm$ 1,7                  | P                | 10,49 $\pm$ 0,31           | 83,9 $\pm$ 2,4                  |
| 17.5.94                 | 194          | B                | 5,41 $\pm$ 0,21            | 85,7 $\pm$ 3,1                  | P                | 10,23 $\pm$ 0,15           | 81,8 $\pm$ 1,2                  |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 5,12 $\pm$ 0,21            | 81,5 $\pm$ 3,2                  | P                | 9,44 $\pm$ 0,15            | 75,5 $\pm$ 1,3                  |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 4,44 $\pm$ 0,26            | 70,9 $\pm$ 4,2                  | F                | 10,20 $\pm$ 0,11           | 81,7 $\pm$ 0,9                  |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 5,19 $\pm$ 0,27            | 82,5 $\pm$ 4,1                  | C                | 10,40 $\pm$ 0,26           | 83,1 $\pm$ 2,1                  |
| <i>Buche (OF-Streu)</i> |              |                  |                            | <i>Eiche (OF-Streu)</i>         |                  |                            |                                 |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 3,16 $\pm$ 0,14            | 100,0 $\pm$ 4,4                 | Q                | 3,18 $\pm$ 0,09            | 100,0 $\pm$ 2,7                 |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 2,90 $\pm$ 0,22            | 93,7 $\pm$ 8,3                  | Q                | 3,00 $\pm$ 0,17            | 94,3 $\pm$ 8,9                  |
| <i>Birke (OF-Streu)</i> |              |                  |                            | <i>Kiefer (OF-Streu)</i>        |                  |                            |                                 |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 1,96 $\pm$ 0,16            | 100,0 $\pm$ 8,0                 | P                | 5,09 $\pm$ 0,09            | 100,0 $\pm$ 5,1                 |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 2,25 $\pm$ 0,32            | 101,2 $\pm$ 6,2                 | P                | 4,44 $\pm$ 0,17            | 94,3 $\pm$ 6,5                  |

**Tab. A 2:** Kohlenstoffgehalt in mmol/gTG und in % des Anfangsvorrates der vier Streuart  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche, B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide)

| Probe-termin            | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                  |                              | Eiche (OL-Streu) |                  |                              |
|-------------------------|--------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------------------|
|                         |              | Stand-ort        | mmolC/gTG        | [C] in % des Anfangsvorrates | Stand-ort        | mmolC/gTG        | [C] in % des Anfangsvorrates |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 41,08 $\pm$ 0,37 | 100,0 $\pm$ 3,1              | Q                | 41,86 $\pm$ 0,80 | 100,0 $\pm$ 5,2              |
| 11.1.94                 | 68           | F                | 41,27 $\pm$ 0,16 | 97,1 $\pm$ 4,8               | Q                | 41,88 $\pm$ 0,36 | 95,5 $\pm$ 5,5               |
| 2.3.94                  | 118          | F                | 42,62 $\pm$ 0,36 | 96,6 $\pm$ 1,3               | Q                | 43,53 $\pm$ 0,25 | 92,7 $\pm$ 3,5               |
| 6.4.94                  | 153          | F                | 43,07 $\pm$ 0,26 | 93,0 $\pm$ 3,9               | Q                | 43,86 $\pm$ 0,33 | 88,4 $\pm$ 5,1               |
| 17.5.94                 | 194          | F                | 42,19 $\pm$ 0,51 | 91,1 $\pm$ 3,5               | Q                | 43,00 $\pm$ 0,38 | 87,7 $\pm$ 3,1               |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 41,02 $\pm$ 0,38 | 81,8 $\pm$ 4,9               | Q                | 43,04 $\pm$ 0,54 | 85,7 $\pm$ 3,8               |
| 8.7.94                  | 246          | P                | 41,34 $\pm$ 0,65 | 85,7 $\pm$ 4,2               | P                | 41,34 $\pm$ 0,65 | 85,7 $\pm$ 4,2               |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 41,39 $\pm$ 0,40 | 93,4 $\pm$ 3,2               | C                | 41,39 $\pm$ 0,40 | 93,4 $\pm$ 3,2               |
| <i>Birke (OL-Streu)</i> |              |                  |                  | <i>Kiefer (OL-Streu)</i>     |                  |                  |                              |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 45,64 $\pm$ 0,18 | 100,0 $\pm$ 1,2              | P                | 44,01 $\pm$ 0,68 | 100,0 $\pm$ 2,6              |
| 11.1.94                 | 68           | B                | 45,31 $\pm$ 0,26 | 89,2 $\pm$ 2,2               | P                | 44,75 $\pm$ 0,38 | 90,2 $\pm$ 3,3               |
| 2.3.94                  | 118          | B                | 47,02 $\pm$ 0,32 | 90,5 $\pm$ 5,1               | P                | 46,64 $\pm$ 0,21 | 95,5 $\pm$ 2,0               |
| 6.4.94                  | 153          | B                | 45,97 $\pm$ 0,46 | 87,2 $\pm$ 1,9               | P                | 46,32 $\pm$ 0,21 | 88,2 $\pm$ 2,5               |
| 17.5.94                 | 194          | B                | 44,84 $\pm$ 0,22 | 84,1 $\pm$ 3,1               | P                | 46,17 $\pm$ 0,23 | 85,8 $\pm$ 1,2               |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 44,66 $\pm$ 0,68 | 79,4 $\pm$ 3,4               | P                | 47,33 $\pm$ 0,27 | 81,1 $\pm$ 1,6               |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 41,34 $\pm$ 0,65 | 85,7 $\pm$ 4,2               | F                | 46,63 $\pm$ 0,33 | 86,4 $\pm$ 1,3               |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 41,39 $\pm$ 0,40 | 93,4 $\pm$ 3,2               | C                | 46,67 $\pm$ 0,37 | 88,1 $\pm$ 2,4               |
| <i>Buche (OF-Streu)</i> |              |                  |                  | <i>Eiche (OF-Streu)</i>      |                  |                  |                              |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 40,53 $\pm$ 0,36 | 100,0 $\pm$ 4,8              | Q                | 40,01 $\pm$ 0,42 | 100,0 $\pm$ 2,9              |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 40,43 $\pm$ 0,53 | 91,5 $\pm$ 6,5               | Q                | 41,34 $\pm$ 1,23 | 97,6 $\pm$ 4,8               |
| <i>Birke (OF-Streu)</i> |              |                  |                  | <i>Kiefer (OF-Streu)</i>     |                  |                  |                              |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 42,52 $\pm$ 1,23 | 100,0 $\pm$ 8,6              | P                | 44,21 $\pm$ 0,73 | 100,0 $\pm$ 5,4              |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 43,42 $\pm$ 1,15 | 103,3 $\pm$ 6,3              | P                | 45,26 $\pm$ 0,29 | 89,2 $\pm$ 5,8               |

**Tab. A 3:** Kaliumgehalt in  $\mu\text{mol/gTG}$  und in % des Anfangsvorrates der vier Streuarten  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche, B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide )

| Probe-termin            | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                      |                              | Eiche (OL-Streu) |                      |                              |
|-------------------------|--------------|------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------------|------------------------------|
|                         |              | Stand-ort        | $\mu\text{molK/gTG}$ | [K] in % des Anfangsvorrates | Stand-ort        | $\mu\text{molK/gTG}$ | [K] in % des Anfangsvorrates |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 127,1 $\pm$ 10,6     | 100,0 $\pm$ 8,0              | Q                | 107,4 $\pm$ 8,1      | 100,0 $\pm$ 7,6              |
| 11.1.94                 | 68           | F                | 84,7 $\pm$ 5,1       | 64,5 $\pm$ 5,7               | Q                | 72,6 $\pm$ 7,6       | 55,6 $\pm$ 5,7               |
| 2.3.94                  | 118          | F                | 77,4 $\pm$ 12,9      | 56,8 $\pm$ 10,0              | Q                | 61,7 $\pm$ 14,7      | 44,4 $\pm$ 11,5              |
| 6.4.94                  | 153          | F                | 57,1 $\pm$ 12,8      | 40,0 $\pm$ 9,5               | Q                | 43,4 $\pm$ 9,1       | 29,5 $\pm$ 6,8               |
| 17.5.94                 | 194          | F                | 60,6 $\pm$ 11,9      | 42,4 $\pm$ 8,7               | Q                | 44,7 $\pm$ 4,7       | 30,7 $\pm$ 3,8               |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 54,9 $\pm$ 7,1       | 35,4 $\pm$ 5,3               | Q                | 50,9 $\pm$ 10,7      | 34,0 $\pm$ 6,5               |
| 8.7.94                  | 246          | P                | 25,9 $\pm$ 3,5       | 17,4 $\pm$ 2,5               | P                | 40,9 $\pm$ 6,8       | 25,9 $\pm$ 3,9               |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 23,3 $\pm$ 6,4       | 16,9 $\pm$ 4,2               | C                | 38,2 $\pm$ 7,4       | 26,2 $\pm$ 5,2               |
| <i>Birke (OL-Streu)</i> |              |                  |                      | <i>Kiefer (OL-Streu)</i>     |                  |                      |                              |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 57,7 $\pm$ 4,0       | 100,0 $\pm$ 7,2              | P                | 27,5 $\pm$ 2,7       | 100,0 $\pm$ 10,3             |
| 11.1.94                 | 68           | B                | 39,9 $\pm$ 2,3       | 62,3 $\pm$ 4,4               | P                | 21,2 $\pm$ 4,3       | 68,5 $\pm$ 14,9              |
| 2.3.94                  | 118          | B                | 36,7 $\pm$ 1,9       | 56,0 $\pm$ 4,8               | P                | 19,3 $\pm$ 4,2       | 63,3 $\pm$ 13,9              |
| 6.4.94                  | 153          | B                | 30,8 $\pm$ 2,6       | 46,4 $\pm$ 4,1               | P                | 21,8 $\pm$ 7,2       | 53,2 $\pm$ 33,5              |
| 17.5.94                 | 194          | B                | 37,2 $\pm$ 2,9       | 49,4 $\pm$ 17,9              | P                | 38,0 $\pm$ 18,3      | 90,4 $\pm$ 67,4              |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 43,3 $\pm$ 4,8       | 60,9 $\pm$ 5,8               | P                | 26,1 $\pm$ 5,7       | 71,6 $\pm$ 15,0              |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 38,1 $\pm$ 4,5       | 62,0 $\pm$ 5,2               | F                | 27,4 $\pm$ 4,8       | 81,3 $\pm$ 14,4              |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 39,4 $\pm$ 3,3       | 56,2 $\pm$ 5,6               | C                | 19,9 $\pm$ 4,0       | 60,2 $\pm$ 11,9              |
| <i>Buche (OF-Streu)</i> |              |                  |                      | <i>Eiche (OF-Streu)</i>      |                  |                      |                              |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 50,0 $\pm$ 3,5       | 100,0 $\pm$ 9,5              | Q                | 53,5 $\pm$ 3,6       | 100,0 $\pm$ 8,1              |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 23,8 $\pm$ 3,5       | 43,7 $\pm$ 6,8               | Q                | 37,2 $\pm$ 4,8       | 65,8 $\pm$ 9,6               |
| <i>Birke (OF-Streu)</i> |              |                  |                      | <i>Kiefer (OF-Streu)</i>     |                  |                      |                              |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 23,6 $\pm$ 2,0       | 100,0 $\pm$ 11,5             | P                | 22,3 $\pm$ 1,6       | 100,0 $\pm$ 7,5              |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 25,9 $\pm$ 8,3       | 110,1 $\pm$ 29,7             | P                | 25,0 $\pm$ 6,1       | 96,8 $\pm$ 18,2              |

**Tab. A 4:** Magnesiumgehalt in  $\mu\text{mol/gTG}$  und in % des Anfangsvorrates der vier Streuarten  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche, B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide )

| Probe-termin            | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                       |                               | Eiche (OL-Streu) |                       |                               |
|-------------------------|--------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|
|                         |              | Stand-ort        | $\mu\text{molMg/gTG}$ | [Mg] in % des Anfangsvorrates | Stand-ort        | $\mu\text{molMg/gTG}$ | [Mg] in % des Anfangsvorrates |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 27,5 $\pm$ 1,7        | 100,0 $\pm$ 7,3               | Q                | 46,7 $\pm$ 3,2        | 100,0 $\pm$ 5,1               |
| 11.1.94                 | 68           | F                | 32,3 $\pm$ 3,8        | 113,0 $\pm$ 12,5              | Q                | 50,8 $\pm$ 5,9        | 104,6 $\pm$ 14,1              |
| 2.3.94                  | 118          | F                | 31,9 $\pm$ 3,1        | 107,6 $\pm$ 9,8               | Q                | 49,5 $\pm$ 3,8        | 95,1 $\pm$ 6,5                |
| 6.4.94                  | 153          | F                | 29,6 $\pm$ 2,5        | 95,0 $\pm$ 6,1                | Q                | 39,4 $\pm$ 2,8        | 71,6 $\pm$ 6,0                |
| 17.5.94                 | 194          | F                | 29,3 $\pm$ 1,7        | 94,3 $\pm$ 4,6                | Q                | 42,3 $\pm$ 2,5        | 78,0 $\pm$ 6,4                |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 33,2 $\pm$ 3,0        | 98,7 $\pm$ 10,9               | Q                | 46,0 $\pm$ 3,5        | 82,6 $\pm$ 6,4                |
| 8.7.94                  | 246          | P                | 29,3 $\pm$ 2,0        | 90,3 $\pm$ 5,4                | P                | 35,7 $\pm$ 4,5        | 60,6 $\pm$ 7,3                |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 31,5 $\pm$ 3,1        | 105,9 $\pm$ 10,1              | C                | 39,9 $\pm$ 3,8        | 73,4 $\pm$ 9,0                |
| <i>Birke (OL-Streu)</i> |              |                  |                       | <i>Kiefer (OL-Streu)</i>      |                  |                       |                               |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 78,8 $\pm$ 1,8        | 100,0 $\pm$ 2,7               | P                | 23,6 $\pm$ 1,4        | 100,0 $\pm$ 6,9               |
| 11.1.94                 | 68           | B                | 78,3 $\pm$ 3,1        | 89,3 $\pm$ 4,3                | P                | 23,1 $\pm$ 1,6        | 86,9 $\pm$ 7,7                |
| 2.3.94                  | 118          | B                | 70,5 $\pm$ 5,4        | 78,8 $\pm$ 8,8                | P                | 21,6 $\pm$ 1,3        | 82,3 $\pm$ 4,4                |
| 6.4.94                  | 153          | B                | 60,2 $\pm$ 3,5        | 66,2 $\pm$ 3,7                | P                | 19,3 $\pm$ 1,3        | 68,3 $\pm$ 4,1                |
| 17.5.94                 | 194          | B                | 62,1 $\pm$ 4,5        | 67,5 $\pm$ 5,2                | P                | 19,7 $\pm$ 1,8        | 68,1 $\pm$ 6,5                |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 67,6 $\pm$ 4,0        | 69,5 $\pm$ 3,6                | P                | 21,0 $\pm$ 2,1        | 67,1 $\pm$ 6,5                |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 63,2 $\pm$ 13,7       | 56,4 $\pm$ 6,6                | F                | 23,8 $\pm$ 1,0        | 81,9 $\pm$ 3,6                |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 53,5 $\pm$ 7,4        | 55,9 $\pm$ 8,9                | C                | 20,0 $\pm$ 2,0        | 70,3 $\pm$ 7,1                |
| <i>Buche (OF-Streu)</i> |              |                  |                       | <i>Eiche (OF-Streu)</i>       |                  |                       |                               |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 31,3 $\pm$ 1,2        | 100,0 $\pm$ 5,6               | Q                | 30,5 $\pm$ 1,0        | 100,0 $\pm$ 5,0               |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 29,7 $\pm$ 3,0        | 87,2 $\pm$ 11,5               | Q                | 33,2 $\pm$ 2,5        | 103,1 $\pm$ 11,4              |
| <i>Birke (OF-Streu)</i> |              |                  |                       | <i>Kiefer (OF-Streu)</i>      |                  |                       |                               |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 19,6 $\pm$ 2,2        | 100,0 $\pm$ 18,5              | P                | 16,4 $\pm$ 3,0        | 100,0 $\pm$ 15,1              |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 25,7 $\pm$ 6,0        | 153,5 $\pm$ 25,7              | P                | 15,8 $\pm$ 2,8        | 84,6 $\pm$ 15,8               |

**Tab. A 5:** Mangengehalt in  $\mu\text{mol/gTG}$  und in % des Anfangsvorrates der vier Streuarten  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche,  
B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide )

| Probe-termin | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                       |                               | Eiche (OL-Streu)  |                       |                               |
|--------------|--------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------|
|              |              | Stand-ort        | $\mu\text{molMn/gTG}$ | [Mn] in % des Anfangsvorrates | Stand-ort         | $\mu\text{molMn/gTG}$ | [Mn] in % des Anfangsvorrates |
| 4.11.93      | 0            | F                | 58,1 $\pm$ 2,9        | 100,0 $\pm$ 5,7               | Q                 | 46,3 $\pm$ 2,1        | 100,0 $\pm$ 6,4               |
| 11.1.94      | 68           | F                | 61,4 $\pm$ 4,4        | 102,3 $\pm$ 8,9               | Q                 | 57,2 $\pm$ 2,7        | 118,4 $\pm$ 8,9               |
| 2.3.94       | 118          | F                | 70,9 $\pm$ 4,8        | 113,6 $\pm$ 7,3               | Q                 | 59,7 $\pm$ 2,3        | 115,4 $\pm$ 4,7               |
| 6.4.94       | 153          | F                | 84,5 $\pm$ 6,1        | 129,0 $\pm$ 10,3              | Q                 | 69,1 $\pm$ 3,6        | 126,3 $\pm$ 9,4               |
| 17.5.94      | 194          | F                | 91,5 $\pm$ 4,7        | 139,7 $\pm$ 5,2               | Q                 | 78,1 $\pm$ 3,9        | 144,5 $\pm$ 8,3               |
| 8.7.94       | 246          | F                | 95,2 $\pm$ 4,9        | 134,1 $\pm$ 6,5               | Q                 | 69,3 $\pm$ 3,0        | 125,4 $\pm$ 8,2               |
| 8.7.94       | 246          | P                | 71,7 $\pm$ 5,2        | 105,1 $\pm$ 8,1               | P                 | 58,2 $\pm$ 6,7        | 99,4 $\pm$ 9,8                |
| 8.7.94       | 246          | C                | 71,6 $\pm$ 5,0        | 114,4 $\pm$ 9,6               | C                 | 53,5 $\pm$ 4,2        | 99,4 $\pm$ 12,2               |
|              |              | Birke (OL-Streu) |                       |                               | Kiefer (OL-Streu) |                       |                               |
| 4.11.93      | 0            | B                | 9,1 $\pm$ 0,2         | 100,0 $\pm$ 6,4               | P                 | 6,0 $\pm$ 0,1         | 100,0 $\pm$ 2,6               |
| 11.1.94      | 68           | B                | 11,7 $\pm$ 0,3        | 116,5 $\pm$ 2,1               | P                 | 7,7 $\pm$ 0,3         | 114,4 $\pm$ 7,9               |
| 2.3.94       | 118          | B                | 12,2 $\pm$ 0,6        | 118,6 $\pm$ 7,9               | P                 | 7,9 $\pm$ 0,2         | 118,7 $\pm$ 3,7               |
| 6.4.94       | 153          | B                | 15,4 $\pm$ 1,0        | 146,8 $\pm$ 8,6               | P                 | 9,4 $\pm$ 0,4         | 131,4 $\pm$ 5,0               |
| 17.5.94      | 194          | B                | 16,1 $\pm$ 0,6        | 152,5 $\pm$ 4,6               | P                 | 9,3 $\pm$ 0,5         | 127,1 $\pm$ 6,8               |
| 8.7.94       | 246          | B                | 15,0 $\pm$ 0,5        | 134,6 $\pm$ 6,7               | P                 | 9,5 $\pm$ 0,3         | 119,5 $\pm$ 3,1               |
| 8.7.94       | 246          | F                | 24,7 $\pm$ 3,3        | 191,9 $\pm$ 27,9              | F                 | 12,8 $\pm$ 0,7        | 174,7 $\pm$ 8,9               |
| 8.7.94       | 246          | C                | 14,6 $\pm$ 0,7        | 132,5 $\pm$ 9,9               | C                 | 9,0 $\pm$ 0,8         | 124,1 $\pm$ 10,4              |
|              |              | Buche (OF-Streu) |                       |                               | Eiche (OF-Streu)  |                       |                               |
| 4.11.93      | 0            | F                | 63,2 $\pm$ 5,7        | 100,0 $\pm$ 9,4               | Q                 | 85,4 $\pm$ 8,4        | 100,0 $\pm$ 10,9              |
| 8.7.94       | 246          | F                | 92,6 $\pm$ 5,3        | 134,0 $\pm$ 7,4               | Q                 | 107,9 $\pm$ 8,9       | 119,1 $\pm$ 9,6               |
|              |              | Birke (OF-Streu) |                       |                               | Kiefer (OF-Streu) |                       |                               |
| 4.11.93      | 0            | B                | 3,5 $\pm$ 0,4         | 100,0 $\pm$ 17,6              | P                 | 1,4 $\pm$ 0,3         | 100,0 $\pm$ 16,7              |
| 8.7.94       | 246          | B                | 5,2 $\pm$ 0,3         | 150,8 $\pm$ 12,2              | P                 | 4,6 $\pm$ 0,9         | 285,2 $\pm$ 49,4              |

**Tab. A 6:** Eisengehalt in  $\mu\text{mol/gTG}$  und in % des Anfangsvorrates der vier Streuarten  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche,  
B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide )

| Probe-termin | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                       |                               | Eiche (OL-Streu)  |                       |                               |
|--------------|--------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------|
|              |              | Stand-ort        | $\mu\text{molFe/gTG}$ | [Fe] in % des Anfangsvorrates | Stand-ort         | $\mu\text{molFe/gTG}$ | [Fe] in % des Anfangsvorrates |
| 4.11.93      | 0            | F                | 3,7 $\pm$ 0,7         | 100,0 $\pm$ 18,7              | Q                 | 4,0 $\pm$ 0,7         | 100,0 $\pm$ 21,1              |
| 11.1.94      | 68           | F                | 3,4 $\pm$ 0,4         | 89,1 $\pm$ 12,0               | Q                 | 3,3 $\pm$ 0,4         | 79,0 $\pm$ 9,0                |
| 2.3.94       | 118          | F                | 6,5 $\pm$ 3,7         | 162,3 $\pm$ 93,8              | Q                 | 6,2 $\pm$ 2,9         | 120,2 $\pm$ 37,2              |
| 6.4.94       | 153          | F                | 5,1 $\pm$ 2,7         | 103,3 $\pm$ 12,5              | Q                 | 4,5 $\pm$ 0,6         | 94,9 $\pm$ 14,8               |
| 17.5.94      | 194          | F                | 4,8 $\pm$ 1,2         | 114,3 $\pm$ 30,3              | Q                 | 4,9 $\pm$ 0,9         | 104,3 $\pm$ 18,3              |
| 8.7.94       | 246          | F                | 5,6 $\pm$ 1,5         | 124,7 $\pm$ 34,8              | Q                 | 5,0 $\pm$ 0,4         | 103,6 $\pm$ 8,4               |
| 8.7.94       | 246          | P                | 7,2 $\pm$ 1,1         | 166,4 $\pm$ 29,1              | P                 | 6,6 $\pm$ 2,5         | 114,7 $\pm$ 16,7              |
| 8.7.94       | 246          | C                | 6,3 $\pm$ 1,0         | 158,0 $\pm$ 23,1              | C                 | 6,1 $\pm$ 1,1         | 129,9 $\pm$ 26,5              |
|              |              | Birke (OL-Streu) |                       |                               | Kiefer (OL-Streu) |                       |                               |
| 4.11.93      | 0            | B                | 3,5 $\pm$ 0,5         | 100,0 $\pm$ 15,6              | P                 | 3,8 $\pm$ 1,8         | 100,0 $\pm$ 22,6              |
| 11.1.94      | 68           | B                | 3,8 $\pm$ 0,4         | 97,2 $\pm$ 9,8                | P                 | 4,3 $\pm$ 0,5         | 116,6 $\pm$ 15,6              |
| 2.3.94       | 118          | B                | 5,6 $\pm$ 2,1         | 139,3 $\pm$ 52,9              | P                 | 5,8 $\pm$ 1,8         | 160,8 $\pm$ 49,4              |
| 6.4.94       | 153          | B                | 3,9 $\pm$ 0,4         | 97,4 $\pm$ 11,0               | P                 | 5,4 $\pm$ 2,3         | 97,4 $\pm$ 11,0               |
| 17.5.94      | 194          | B                | 4,5 $\pm$ 0,8         | 111,0 $\pm$ 20,0              | P                 | 4,3 $\pm$ 0,3         | 108,0 $\pm$ 7,8               |
| 8.7.94       | 246          | B                | 5,5 $\pm$ 0,7         | 128,9 $\pm$ 17,0              | P                 | 6,8 $\pm$ 1,7         | 156,0 $\pm$ 38,2              |
| 8.7.94       | 246          | F                | 5,3 $\pm$ 1,7         | 107,9 $\pm$ 35,9              | F                 | 4,3 $\pm$ 0,9         | 106,0 $\pm$ 21,7              |
| 8.7.94       | 246          | C                | 5,5 $\pm$ 0,7         | 128,4 $\pm$ 17,6              | C                 | 5,2 $\pm$ 0,7         | 132,9 $\pm$ 19,3              |
|              |              | Buche (OF-Streu) |                       |                               | Eiche (OF-Streu)  |                       |                               |
| 4.11.93      | 0            | F                | 15,7 $\pm$ 1,8        | 100,0 $\pm$ 10,1              | Q                 | 20,8 $\pm$ 2,9        | 100,0 $\pm$ 14,0              |
| 8.7.94       | 246          | F                | 18,8 $\pm$ 3,4        | 110,8 $\pm$ 25,9              | Q                 | 19,3 $\pm$ 2,8        | 87,8 $\pm$ 16,7               |
|              |              | Birke (OF-Streu) |                       |                               | Kiefer (OF-Streu) |                       |                               |
| 4.11.93      | 0            | B                | 27,6 $\pm$ 1,8        | 100,0 $\pm$ 6,5               | P                 | 25,5 $\pm$ 2,8        | 100,0 $\pm$ 11,1              |
| 8.7.94       | 246          | B                | 28,3 $\pm$ 7,9        | 104,0 $\pm$ 30,3              | P                 | 19,3 $\pm$ 1,8        | 65,8 $\pm$ 6,4                |

**Tab. A 7:** Calciumgehalt in  $\mu\text{mol/gTG}$  und in % des Anfangsvorrates der vier Streuarten  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche,  
B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide)

| Probe-termin | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                       |                               | Eiche (OL-Streu) |                          |                               |
|--------------|--------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------|-------------------------------|
|              |              | Stand-ort        | $\mu\text{molCa/gTG}$ | [Ca] in % des Anfangsvorrates | Stand-ort        | $\mu\text{molCa/gTG}$    | [Ca] in % des Anfangsvorrates |
| 4.11.93      | 0            | F                | 232,7 $\pm$ 7,9       | 100,0 $\pm$ 4,1               | Q                | 205,5 $\pm$ 5,9          | 100,0 $\pm$ 4,9               |
| 11.1.94      | 68           | F                | 227,8 $\pm$ 9,8       | 94,7 $\pm$ 5,6                | Q                | 219,8 $\pm$ 14,7         | 102,5 $\pm$ 7,7               |
| 2.3.94       | 118          | F                | 246,6 $\pm$ 12,4      | 98,7 $\pm$ 5,4                | Q                | 217,1 $\pm$ 16,3         | 94,8 $\pm$ 9,4                |
| 6.4.94       | 153          | F                | 237,4 $\pm$ 14,2      | 90,5 $\pm$ 4,9                | Q                | 214,3 $\pm$ 8,5          | 88,4 $\pm$ 5,3                |
| 17.5.94      | 194          | F                | 227,5 $\pm$ 7,7       | 86,8 $\pm$ 3,7                | Q                | 209,3 $\pm$ 12,0         | 87,3 $\pm$ 4,9                |
| 8.7.94       | 246          | F                | 250,0 $\pm$ 6,1       | 88,1 $\pm$ 6,1                | Q                | 206,9 $\pm$ 18,1         | 84,3 $\pm$ 7,8                |
| 8.7.94       | 246          | P                | 208,9 $\pm$ 13,1      | 76,4 $\pm$ 4,7                | P                | 197,4 $\pm$ 25,4         | 76,2 $\pm$ 9,8                |
| 8.7.94       | 246          | C                | 216,6 $\pm$ 9,7       | 86,3 $\pm$ 4,4                | C                | 201,8 $\pm$ 15,3         | 84,3 $\pm$ 8,5                |
|              |              |                  |                       | <i>Birke (OL-Streu)</i>       |                  | <i>Kiefer (OL-Streu)</i> |                               |
| 4.11.93      | 0            | B                | 187,0 $\pm$ 6,5       | 100,0 $\pm$ 4,1               | P                | 125,2 $\pm$ 1,9          | 100,0 $\pm$ 2,6               |
| 11.1.94      | 68           | B                | 198,4 $\pm$ 11,3      | 95,3 $\pm$ 6,2                | P                | 128,0 $\pm$ 10,3         | 90,7 $\pm$ 7,7                |
| 2.3.94       | 118          | B                | 204,7 $\pm$ 7,6       | 96,2 $\pm$ 6,6                | P                | 139,1 $\pm$ 3,7          | 100,1 $\pm$ 2,8               |
| 6.4.94       | 153          | B                | 186,9 $\pm$ 5,1       | 86,5 $\pm$ 2,4                | P                | 123,9 $\pm$ 5,1          | 82,9 $\pm$ 3,4                |
| 17.5.94      | 194          | B                | 181,7 $\pm$ 5,0       | 83,2 $\pm$ 3,9                | P                | 120,6 $\pm$ 8,7          | 78,8 $\pm$ 6,6                |
| 8.7.94       | 246          | B                | 192,3 $\pm$ 9,7       | 83,4 $\pm$ 5,2                | P                | 129,4 $\pm$ 14,0         | 77,9 $\pm$ 8,3                |
| 8.7.94       | 246          | F                | 199,2 $\pm$ 10,8      | 74,9 $\pm$ 6,4                | F                | 127,0 $\pm$ 11,8         | 77,9 $\pm$ 8,3                |
| 8.7.94       | 246          | C                | 187,2 $\pm$ 14,9      | 82,2 $\pm$ 7,8                | C                | 127,7 $\pm$ 19,8         | 85,0 $\pm$ 14,6               |
|              |              |                  |                       | <i>Buche (OF-Streu)</i>       |                  | <i>Eiche (OF-Streu)</i>  |                               |
| 4.11.93      | 0            | F                | 215,9 $\pm$ 9,1       | 100,0 $\pm$ 5,7               | Q                | 219,7 $\pm$ 8,3          | 100,0 $\pm$ 6,0               |
| 8.7.94       | 246          | F                | 195,7 $\pm$ 16,4      | 83,3 $\pm$ 10,2               | Q                | 191,9 $\pm$ 27,0         | 82,5 $\pm$ 12,4               |
|              |              |                  |                       | <i>Birke (OF-Streu)</i>       |                  | <i>Kiefer (OF-Streu)</i> |                               |
| 4.11.93      | 0            | B                | 98,1 $\pm$ 5,9        | 100,0 $\pm$ 11,5              | P                | 56,4 $\pm$ 7,4           | 100,0 $\pm$ 11,7              |
| 8.7.94       | 246          | B                | 84,3 $\pm$ 8,1        | 86,8 $\pm$ 8,5                | P                | 50,7 $\pm$ 11,4          | 78,4 $\pm$ 17,2               |

**Tab. A 8:** Ligningehalt in  $\text{mg/gTG}$  und in % des Anfangsvorrates der vier Streuarten  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche,  
B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide)

| Probe-termin | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                       |                                   | Eiche (OL-Streu) |                          |                                   |
|--------------|--------------|------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------------|
|              |              | Stand-ort        | $\text{mgLignin/gTG}$ | [Lignin] in % des Anfangsvorrates | Stand-ort        | $\text{mgLignin/gTG}$    | [Lignin] in % des Anfangsvorrates |
| 4.11.93      | 0            | F                | 500,6 $\pm$ 10,3      | 100,0 $\pm$ 3,7                   | Q                | 489,6 $\pm$ 19,7         | 100,0 $\pm$ 7,3                   |
| 11.1.94      | 68           | F                | 527,2 $\pm$ 13,0      | 101,9 $\pm$ 6,0                   | Q                | 427,3 $\pm$ 14,5         | 83,3 $\pm$ 6,3                    |
| 2.3.94       | 118          | F                | 513,0 $\pm$ 13,7      | 95,4 $\pm$ 3,1                    | Q                | 496,6 $\pm$ 20,9         | 90,3 $\pm$ 3,1                    |
| 6.4.94       | 153          | F                | 477,3 $\pm$ 16,0      | 84,7 $\pm$ 5,9                    | Q                | 453,3 $\pm$ 14,5         | 78,2 $\pm$ 6,5                    |
| 17.5.94      | 194          | F                | 516,1 $\pm$ 13,2      | 91,5 $\pm$ 3,7                    | Q                | 484,5 $\pm$ 4,9          | 84,4 $\pm$ 2,5                    |
| 8.7.94       | 246          | F                | 479,6 $\pm$ 36,3      | 78,6 $\pm$ 9,0                    | Q                | 510,6 $\pm$ 22,9         | 87,0 $\pm$ 6,1                    |
| 8.7.94       | 246          | P                | 516,9 $\pm$ 20,1      | 87,9 $\pm$ 5,1                    | P                | 535,8 $\pm$ 22,1         | 81,8 $\pm$ 10,5                   |
| 8.7.94       | 246          | C                | 514,4 $\pm$ 17,5      | 95,4 $\pm$ 6,1                    | C                | 505,8 $\pm$ 42,9         | 93,7 $\pm$ 9,9                    |
|              |              |                  |                       | <i>Birke (OL-Streu)</i>           |                  | <i>Kiefer (OL-Streu)</i> |                                   |
| 4.11.93      | 0            | B                | 560,8 $\pm$ 8,8       | 100,0 $\pm$ 1,8                   | P                | 460,4 $\pm$ 10,7         | 100,0 $\pm$ 3,3                   |
| 11.1.94      | 68           | B                | 515,1 $\pm$ 18,4      | 82,5 $\pm$ 3,3                    | P                | 462,2 $\pm$ 41,6         | 89,2 $\pm$ 9,9                    |
| 2.3.94       | 118          | B                | 530,4 $\pm$ 17,4      | 83,1 $\pm$ 5,5                    | P                | 450,4 $\pm$ 16,8         | 88,1 $\pm$ 3,9                    |
| 6.4.94       | 153          | B                | 504,0 $\pm$ 26,4      | 77,8 $\pm$ 3,8                    | P                | 463,8 $\pm$ 10,2         | 84,5 $\pm$ 3,1                    |
| 17.5.94      | 194          | B                | 573,0 $\pm$ 51,5      | 87,5 $\pm$ 9,0                    | P                | 570,6 $\pm$ 12,1         | 101,3 $\pm$ 1,6                   |
| 8.7.94       | 246          | B                | 585,4 $\pm$ 18,7      | 84,7 $\pm$ 3,8                    | P                | 605,9 $\pm$ 5,3          | 99,3 $\pm$ 1,5                    |
| 8.7.94       | 246          | F                | 552,2 $\pm$ 14,8      | 69,3 $\pm$ 4,8                    | F                | 526,7 $\pm$ 19,6         | 93,3 $\pm$ 3,5                    |
| 8.7.94       | 246          | C                | 580,7 $\pm$ 12,9      | 85,1 $\pm$ 5,1                    | C                | 554,6 $\pm$ 28,3         | 100,1 $\pm$ 4,3                   |
|              |              |                  |                       | <i>Buche (OF-Streu)</i>           |                  | <i>Eiche (OF-Streu)</i>  |                                   |
| 4.11.93      | 0            | F                | 569,7 $\pm$ 11,1      | 100,0 $\pm$ 5,5                   | Q                | 549,3 $\pm$ 8,3          | 100,0 $\pm$ 2,5                   |
| 8.7.94       | 246          | F                | 557,6 $\pm$ 16,3      | 89,8 $\pm$ 7,8                    | Q                | 547,7 $\pm$ 11,1         | 94,3 $\pm$ 6,4                    |
|              |              |                  |                       | <i>Birke (OF-Streu)</i>           |                  | <i>Kiefer (OF-Streu)</i> |                                   |
| 4.11.93      | 0            | B                | 620,6 $\pm$ 8,6       | 100,0 $\pm$ 8,0                   | P                | 575,8 $\pm$ 26,1         | 100,0 $\pm$ 5,2                   |
| 8.7.94       | 246          | B                | 621,1 $\pm$ 38,2      | 101,3 $\pm$ 9,2                   | P                | 601,4 $\pm$ 20,3         | 91,1 $\pm$ 7,3                    |

**Tab. A 9:** Stickstoffgehalt in  $\mu\text{mol/gTG}$  und in % des Anfangsvorrates der vier Streuarten  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche,  
B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide )

| Probe-termin            | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                      |                              | Eiche (OL-Streu) |                      |                              |
|-------------------------|--------------|------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------------|------------------------------|
|                         |              | Stand-ort        | $\mu\text{molN/gTG}$ | [N] in % des Anfangsvorrates | Stand-ort        | $\mu\text{molN/gTG}$ | [N] in % des Anfangsvorrates |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 661,4 $\pm$ 18,6     | 100,0 $\pm$ 4,4              | Q                | 530,8 $\pm$ 19,1     | 100,0 $\pm$ 4,6              |
| 11.1.94                 | 68           | F                | 644,1 $\pm$ 27,1     | 94,1 $\pm$ 5,1               | Q                | 625,0 $\pm$ 32,4     | 112,3 $\pm$ 5,8              |
| 2.3.94                  | 118          | F                | 686,3 $\pm$ 30,6     | 96,5 $\pm$ 3,4               | Q                | 609,7 $\pm$ 34,7     | 102,6 $\pm$ 7,2              |
| 6.4.94                  | 153          | F                | 717,1 $\pm$ 42,4     | 96,1 $\pm$ 5,9               | Q                | 678,2 $\pm$ 47,9     | 108,0 $\pm$ 11,0             |
| 17.5.94                 | 194          | F                | 777,4 $\pm$ 35,2     | 104,2 $\pm$ 3,3              | Q                | 692,0 $\pm$ 26,1     | 111,4 $\pm$ 5,2              |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 853,1 $\pm$ 61,9     | 105,6 $\pm$ 8,7              | Q                | 790,8 $\pm$ 58,4     | 124,2 $\pm$ 8,6              |
| 8.7.94                  | 246          | P                | 875,6 $\pm$ 81,4     | 112,8 $\pm$ 12,6             | P                | 785,8 $\pm$ 41,6     | 117,1 $\pm$ 9,8              |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 772,8 $\pm$ 39,5     | 108,3 $\pm$ 5,5              | C                | 848,3 $\pm$ 83,7     | 136,8 $\pm$ 18,0             |
| <i>Birke (OL-Streu)</i> |              |                  |                      | <i>Kiefer (OL-Streu)</i>     |                  |                      |                              |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 776,7 $\pm$ 28,1     | 100,0 $\pm$ 4,2              | P                | 405,1 $\pm$ 9,6      | 100,0 $\pm$ 2,3              |
| 11.1.94                 | 68           | B                | 863,6 $\pm$ 27,6     | 99,9 $\pm$ 4,1               | P                | 455,5 $\pm$ 9,5      | 99,8 $\pm$ 3,7               |
| 2.3.94                  | 118          | B                | 927,7 $\pm$ 32,0     | 104,8 $\pm$ 5,0              | P                | 529,0 $\pm$ 14,2     | 117,6 $\pm$ 3,1              |
| 6.4.94                  | 153          | B                | 908,4 $\pm$ 42,8     | 101,2 $\pm$ 4,5              | P                | 535,4 $\pm$ 15,8     | 110,8 $\pm$ 4,9              |
| 17.5.94                 | 194          | B                | 935,4 $\pm$ 61,1     | 103,1 $\pm$ 8,0              | P                | 584,3 $\pm$ 32,4     | 117,9 $\pm$ 5,5              |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 1034,1 $\pm$ 75,8    | 107,8 $\pm$ 5,9              | P                | 704,9 $\pm$ 29,0     | 131,3 $\pm$ 5,4              |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 1085,3 $\pm$ 35,4    | 98,2 $\pm$ 6,0               | F                | 572,9 $\pm$ 22,7     | 115,3 $\pm$ 4,0              |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 1044,7 $\pm$ 42,7    | 110,4 $\pm$ 6,6              | C                | 584,6 $\pm$ 26,5     | 120,0 $\pm$ 6,4              |
| <i>Buche (OF-Streu)</i> |              |                  |                      | <i>Eiche (OF-Streu)</i>      |                  |                      |                              |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 1396,2 $\pm$ 60,8    | 100,0 $\pm$ 4,9              | Q                | 1520,4 $\pm$ 39,6    | 100,0 $\pm$ 4,3              |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 1274,0 $\pm$ 34,0    | 83,7 $\pm$ 5,8               | Q                | 1336,4 $\pm$ 46,2    | 83,0 $\pm$ 4,8               |
| <i>Birke (OF-Streu)</i> |              |                  |                      | <i>Kiefer (OF-Streu)</i>     |                  |                      |                              |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 1351,7 $\pm$ 74,2    | 100,0 $\pm$ 10,4             | P                | 1166,9 $\pm$ 44,6    | 100,0 $\pm$ 5,3              |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 1411,9 $\pm$ 29,3    | 89,2 $\pm$ 15,1              | P                | 1191,5 $\pm$ 39,4    | 88,9 $\pm$ 4,4               |

**Tab. A 10:** Phosphorgehalt in  $\mu\text{mol/gTG}$  und in % des Anfangsvorrates der vier Streuarten  
(Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche,  
B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide )

| Probe-termin            | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu) |                      |                              | Eiche (OL-Streu) |                      |                              |
|-------------------------|--------------|------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------------|------------------------------|
|                         |              | Stand-ort        | $\mu\text{molP/gTG}$ | [P] in % des Anfangsvorrates | Stand-ort        | $\mu\text{molP/gTG}$ | [P] in % des Anfangsvorrates |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 52,4 $\pm$ 4,5       | 100,0 $\pm$ 9,8              | Q                | 55,6 $\pm$ 5,8       | 100,0 $\pm$ 9,3              |
| 11.1.94                 | 68           | F                | 40,0 $\pm$ 2,9       | 73,7 $\pm$ 5,1               | Q                | 56,6 $\pm$ 7,8       | 97,3 $\pm$ 12,5              |
| 2.3.94                  | 118          | F                | 47,1 $\pm$ 4,7       | 83,6 $\pm$ 8,0               | Q                | 48,8 $\pm$ 7,3       | 78,6 $\pm$ 12,5              |
| 6.4.94                  | 153          | F                | 45,8 $\pm$ 8,0       | 77,7 $\pm$ 15,4              | Q                | 46,7 $\pm$ 4,4       | 71,1 $\pm$ 7,4               |
| 17.5.94                 | 194          | F                | 45,4 $\pm$ 2,5       | 76,8 $\pm$ 4,4               | Q                | 43,6 $\pm$ 2,4       | 67,3 $\pm$ 4,9               |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 50,3 $\pm$ 3,4       | 78,5 $\pm$ 6,2               | Q                | 48,6 $\pm$ 3,5       | 73,1 $\pm$ 4,9               |
| 8.7.94                  | 246          | P                | 47,1 $\pm$ 3,5       | 76,5 $\pm$ 7,1               | P                | 49,9 $\pm$ 3,9       | 71,2 $\pm$ 6,5               |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 41,4 $\pm$ 3,3       | 73,2 $\pm$ 6,8               | C                | 44,4 $\pm$ 3,3       | 68,3 $\pm$ 5,5               |
| <i>Birke (OL-Streu)</i> |              |                  |                      | <i>Kiefer (OL-Streu)</i>     |                  |                      |                              |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 69,9 $\pm$ 9,4       | 100,0 $\pm$ 13,6             | P                | 28,1 $\pm$ 3,3       | 100,0 $\pm$ 12,0             |
| 11.1.94                 | 68           | B                | 66,4 $\pm$ 6,1       | 85,3 $\pm$ 8,3               | P                | 31,3 $\pm$ 3,5       | 99,0 $\pm$ 11,3              |
| 2.3.94                  | 118          | B                | 67,0 $\pm$ 9,7       | 83,9 $\pm$ 11,2              | P                | 32,8 $\pm$ 4,9       | 105,5 $\pm$ 15,8             |
| 6.4.94                  | 153          | B                | 59,0 $\pm$ 3,4       | 73,1 $\pm$ 4,6               | P                | 28,7 $\pm$ 1,3       | 84,4 $\pm$ 3,9               |
| 17.5.94                 | 194          | B                | 56,7 $\pm$ 1,7       | 69,4 $\pm$ 2,3               | P                | 25,5 $\pm$ 1,0       | 74,3 $\pm$ 2,4               |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 57,7 $\pm$ 2,5       | 66,8 $\pm$ 1,7               | P                | 30,0 $\pm$ 2,0       | 80,6 $\pm$ 4,9               |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 63,5 $\pm$ 2,0       | 63,9 $\pm$ 4,3               | F                | 26,9 $\pm$ 1,2       | 78,2 $\pm$ 3,3               |
| 8.7.94                  | 246          | C                | 56,3 $\pm$ 1,8       | 66,1 $\pm$ 3,5               | C                | 26,8 $\pm$ 2,0       | 79,4 $\pm$ 6,2               |
| <i>Buche (OF-Streu)</i> |              |                  |                      | <i>Eiche (OF-Streu)</i>      |                  |                      |                              |
| 4.11.93                 | 0            | F                | 83,0 $\pm$ 8,7       | 100,0 $\pm$ 10,9             | Q                | 82,1 $\pm$ 8,1       | 100,0 $\pm$ 10,8             |
| 8.7.94                  | 246          | F                | 51,9 $\pm$ 2,0       | 57,4 $\pm$ 4,5               | Q                | 53,8 $\pm$ 3,5       | 61,9 $\pm$ 4,6               |
| <i>Birke (OF-Streu)</i> |              |                  |                      | <i>Kiefer (OF-Streu)</i>     |                  |                      |                              |
| 4.11.93                 | 0            | B                | 53,4 $\pm$ 5,9       | 100,0 $\pm$ 13,8             | P                | 43,2 $\pm$ 4,0       | 100,0 $\pm$ 12,3             |
| 8.7.94                  | 246          | B                | 45,6 $\pm$ 4,3       | 86,2 $\pm$ 6,7               | P                | 44,2 $\pm$ 1,9       | 88,8 $\pm$ 4,6               |



**Tab. A 11:** C/K- und C/Mg-Verhältnisse [g/g] der vier Streuarten

(Mittelwert ± Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche, B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide)

| Probe-termin | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu)        |               |                |      | Eiche (OL-Streu)         |                |     |  |
|--------------|--------------|-------------------------|---------------|----------------|------|--------------------------|----------------|-----|--|
|              |              | Stand-ort               | C/K           |                | C/Mg |                          | Stand-ort      | C/K |  |
| 4.11.93      | 0            | F                       | 100,0 ± 9,4   | 739,4 ± 46,0   | Q    | 120,3 ± 10,4             | 444,3 ± 34,5   |     |  |
| 11.1.94      | 68           | F                       | 150,1 ± 9,6   | 639,2 ± 68,8   | Q    | 179,0 ± 19,7             | 411,4 ± 42,5   |     |  |
| 2.3.94       | 118          | F                       | 173,8 ± 31,5  | 666,2 ± 62,7   | Q    | 226,9 ± 49,1             | 436,8 ± 34,0   |     |  |
| 6.4.94       | 153          | F                       | 244,0 ± 63,5  | 724,3 ± 62,2   | Q    | 322,9 ± 65,9             | 552,4 ± 40,5   |     |  |
| 17.5.94      | 194          | F                       | 223,5 ± 56,9  | 714,2 ± 51,1   | Q    | 298,7 ± 32,1             | 503,3 ± 29,0   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | F                       | 232,9 ± 30,2  | 614,5 ± 50,6   | Q    | 250,3 ± 84,3             | 464,7 ± 39,2   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | P                       | 499,1 ± 75,6  | 701,0 ± 54,6   | P    | 334,5 ± 55,9             | 611,4 ± 81,2   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | C                       | 575,4 ± 123,3 | 654,8 ± 61,1   | C    | 354,9 ± 69,3             | 533,6 ± 50,0   |     |  |
|              |              | <i>Birke (OL-Streu)</i> |               |                |      | <i>Kiefer (OL-Streu)</i> |                |     |  |
| 4.11.93      | 0            | B                       | 244,2 ± 17,2  | 286,4 ± 5,9    | P    | 496,5 ± 51,3             | 923,5 ± 61,2   |     |  |
| 11.1.94      | 68           | B                       | 349,8 ± 19,4  | 286,3 ± 10,6   | P    | 669,4 ± 115,3            | 960,1 ± 68,0   |     |  |
| 2.3.94       | 118          | B                       | 394,2 ± 18,2  | 331,5 ± 29,1   | P    | 771,4 ± 153,6            | 1070,5 ± 68,3  |     |  |
| 6.4.94       | 153          | B                       | 460,6 ± 37,5  | 378,5 ± 24,5   | P    | 698,2 ± 168,0            | 1192,6 ± 73,6  |     |  |
| 17.5.94      | 194          | B                       | 372,7 ± 30,9  | 358,7 ± 28,5   | P    | 471,1 ± 241,8            | 1168,1 ± 106,5 |     |  |
| 8.7.94       | 246          | B                       | 320,1 ± 32,7  | 327,6 ± 19,2   | P    | 581,9 ± 133,8            | 1121,1 ± 107,4 |     |  |
| 8.7.94       | 246          | F                       | 273,9 ± 25,8  | 355,4 ± 37,2   | F    | 535,8 ± 82,9             | 971,3 ± 39,1   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | C                       | 351,8 ± 28,6  | 421,9 ± 61,8   | C    | 747,1 ± 152,7            | 1164,4 ± 118,0 |     |  |
|              |              | <i>Buche (OF-Streu)</i> |               |                |      | <i>Eiche (OF-Streu)</i>  |                |     |  |
| 4.11.93      | 0            | F                       | 250,1 ± 17,8  | 640,7 ± 23,7   | Q    | 230,6 ± 16,5             | 648,6 ± 22,9   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | F                       | 531,7 ± 82,5  | 678,0 ± 68,7   | Q    | 345,9 ± 42,8             | 617,3 ± 47,1   |     |  |
|              |              | <i>Birke (OF-Streu)</i> |               |                |      | <i>Kiefer (OF-Streu)</i> |                |     |  |
| 4.11.93      | 0            | B                       | 558,0 ± 56,0  | 1079,7 ± 116,5 | P    | 611,1 ± 42,3             | 1377,8 ± 272,3 |     |  |
| 8.7.94       | 246          | B                       | 545,7 ± 122,9 | 736,9 ± 137,9  | P    | 579,5 ± 110,7            | 1452,7 ± 240,4 |     |  |

**Tab. A 12:** C/Ca- und C/Lignin-Verhältnisse [g/g] der vier Streuarten

(Mittelwert ± Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche, B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide)

| Probe-termin | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu)        |              |             |          | Eiche (OL-Streu)         |             |      |  |
|--------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------|----------|--------------------------|-------------|------|--|
|              |              | Stand-ort               | C/Ca         |             | C/Lignin |                          | Stand-ort   | C/Ca |  |
| 4.11.93      | 0            | F                       | 53,0 ± 2,1   | 0,99 ± 0,02 | Q        | 61,0 ± 2,4               | 1,03 ± 0,05 |      |  |
| 11.1.94      | 68           | F                       | 54,4 ± 2,3   | 0,94 ± 0,03 | Q        | 57,3 ± 3,7               | 1,18 ± 0,03 |      |  |
| 2.3.94       | 118          | F                       | 51,9 ± 2,9   | 1,00 ± 0,02 | Q        | 60,4 ± 4,4               | 1,05 ± 0,05 |      |  |
| 6.4.94       | 153          | F                       | 54,5 ± 3,4   | 1,08 ± 0,03 | Q        | 61,4 ± 2,7               | 1,16 ± 0,04 |      |  |
| 17.5.94      | 194          | F                       | 55,6 ± 2,3   | 0,98 ± 0,03 | Q        | 61,7 ± 3,8               | 1,07 ± 0,01 |      |  |
| 8.7.94       | 246          | F                       | 49,2 ± 1,0   | 1,03 ± 0,07 | Q        | 62,8 ± 6,5               | 1,01 ± 0,04 |      |  |
| 8.7.94       | 246          | P                       | 59,5 ± 3,8   | 0,96 ± 0,03 | P        | 66,9 ± 8,3               | 0,98 ± 0,04 |      |  |
| 8.7.94       | 246          | C                       | 57,4 ± 2,6   | 0,97 ± 0,03 | C        | 63,7 ± 4,6               | 1,02 ± 0,08 |      |  |
|              |              | <i>Birke (OL-Streu)</i> |              |             |          | <i>Kiefer (OL-Streu)</i> |             |      |  |
| 4.11.93      | 0            | B                       | 73,2 ± 2,7   | 0,98 ± 0,02 | P        | 105,4 ± 3,0              | 1,15 ± 0,04 |      |  |
| 11.1.94      | 68           | B                       | 68,7 ± 3,9   | 1,06 ± 0,04 | P        | 105,5 ± 9,8              | 1,17 ± 0,12 |      |  |
| 2.3.94       | 118          | B                       | 68,9 ± 2,5   | 1,07 ± 0,04 | P        | 100,5 ± 2,8              | 1,25 ± 0,05 |      |  |
| 6.4.94       | 153          | B                       | 68,9 ± 2,5   | 1,10 ± 0,05 | P        | 112,2 ± 4,3              | 1,20 ± 0,03 |      |  |
| 17.5.94      | 194          | B                       | 74,0 ± 2,0   | 0,95 ± 0,10 | P        | 115,3 ± 9,1              | 0,97 ± 0,02 |      |  |
| 8.7.94       | 246          | B                       | 69,8 ± 3,5   | 0,92 ± 0,03 | P        | 111,0 ± 13,7             | 0,94 ± 0,01 |      |  |
| 8.7.94       | 246          | F                       | 67,9 ± 3,5   | 0,98 ± 0,03 | F        | 110,8 ± 9,6              | 1,06 ± 0,04 |      |  |
| 8.7.94       | 246          | C                       | 72,1 ± 5,5   | 0,93 ± 0,02 | C        | 112,8 ± 23,9             | 1,06 ± 0,04 |      |  |
|              |              | <i>Buche (OF-Streu)</i> |              |             |          | <i>Eiche (OF-Streu)</i>  |             |      |  |
| 4.11.93      | 0            | F                       | 56,4 ± 2,5   | 0,85 ± 0,02 | Q        | 54,7 ± 2,1               | 0,88 ± 0,01 |      |  |
| 8.7.94       | 246          | F                       | 62,3 ± 5,3   | 0,87 ± 0,03 | Q        | 65,6 ± 8,4               | 0,91 ± 0,03 |      |  |
|              |              | <i>Birke (OF-Streu)</i> |              |             |          | <i>Kiefer (OF-Streu)</i> |             |      |  |
| 4.11.93      | 0            | B                       | 130,2 ± 7,2  | 0,82 ± 0,03 | P        | 238,6 ± 31,2             | 0,92 ± 0,04 |      |  |
| 8.7.94       | 246          | B                       | 155,9 ± 20,0 | 0,84 ± 0,04 | P        | 277,8 ± 53,0             | 0,90 ± 0,03 |      |  |

**Tab. A 13:** C/N- und C/P-Verhältnisse [g/g] der vier Streuarten

(Mittelwert ± Standardabweichung; Standortsabkürzungen: F=unter Buche, Q=unter Eiche, B=unter Birke, P=unter Kiefer, C=unter Heide)

| Probe-termin | Dauer [Tage] | Buche (OL-Streu)        |            |               |     | Eiche (OL-Streu)         |                |     |  |
|--------------|--------------|-------------------------|------------|---------------|-----|--------------------------|----------------|-----|--|
|              |              | Stand-ort               | C/N        |               | C/P |                          | Stand-ort      | C/N |  |
| 4.11.93      | 0            | F                       | 53,3 ± 1,1 | 368,8 ± 37,3  | Q   | 67,7 ± 2,1               | 355,0 ± 53,0   |     |  |
| 11.1.94      | 68           | F                       | 55,1 ± 2,4 | 518,2 ± 47,4  | Q   | 57,6 ± 3,2               | 348,2 ± 54,3   |     |  |
| 2.3.94       | 118          | F                       | 53,4 ± 2,5 | 439,7 ± 54,0  | Q   | 61,4 ± 3,3               | 433,7 ± 76,2   |     |  |
| 6.4.94       | 153          | F                       | 51,7 ± 2,9 | 471,2 ± 102,0 | Q   | 55,7 ± 3,9               | 452,4 ± 47,1   |     |  |
| 17.5.94      | 194          | F                       | 46,6 ± 2,4 | 448,9 ± 29,9  | Q   | 53,4 ± 2,2               | 481,3 ± 33,6   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | F                       | 41,5 ± 3,3 | 386,3 ± 34,2  | Q   | 47,0 ± 4,0               | 423,5 ± 40,4   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | P                       | 40,8 ± 3,9 | 422,6 ± 43,0  | P   | 47,6 ± 2,5               | 414,5 ± 43,8   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | C                       | 46,1 ± 2,9 | 496,9 ± 52,4  | C   | 43,5 ± 4,2               | 470,0 ± 45,1   |     |  |
|              |              | <i>Birke (OL-Streu)</i> |            |               |     | <i>Kiefer (OL-Streu)</i> |                |     |  |
| 4.11.93      | 0            | B                       | 50,5 ± 1,8 | 296,4 ± 45,2  | P   | 93,2 ± 2,2               | 912,0 ± 152,9  |     |  |
| 11.1.94      | 68           | B                       | 45,1 ± 1,4 | 309,0 ± 38,4  | P   | 84,3 ± 1,6               | 789,1 ± 122,8  |     |  |
| 2.3.94       | 118          | B                       | 43,5 ± 2,0 | 320,9 ± 53,3  | P   | 75,7 ± 2,0               | 778,5 ± 125,1  |     |  |
| 6.4.94       | 153          | B                       | 43,5 ± 1,8 | 355,7 ± 24,6  | P   | 74,3 ± 2,1               | 911,8 ± 57,2   |     |  |
| 17.5.94      | 194          | B                       | 41,3 ± 2,5 | 364,1 ± 12,4  | P   | 68,0 ± 3,5               | 1068,9 ± 62,2  |     |  |
| 8.7.94       | 246          | B                       | 37,2 ± 2,7 | 355,0 ± 19,8  | P   | 57,7 ± 2,4               | 871,5 ± 79,7   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | F                       | 35,6 ± 1,4 | 320,0 ± 14,5  | F   | 69,9 ± 2,9               | 1005,4 ± 62,5  |     |  |
| 8.7.94       | 246          | C                       | 36,9 ± 1,6 | 366,4 ± 13,4  | C   | 68,6 ± 3,0               | 1015,1 ± 100,8 |     |  |
|              |              | <i>Buche (OF-Streu)</i> |            |               |     | <i>Eiche (OF-Streu)</i>  |                |     |  |
| 4.11.93      | 0            | F                       | 24,9 ± 1,1 | 214,9 ± 26,5  | Q   | 22,6 ± 0,6               | 213,5 ± 22,4   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | F                       | 27,2 ± 0,8 | 363,0 ± 18,4  | Q   | 26,6 ± 0,6               | 356,2 ± 22,1   |     |  |
|              |              | <i>Birke (OF-Streu)</i> |            |               |     | <i>Kiefer (OF-Streu)</i> |                |     |  |
| 4.11.93      | 0            | B                       | 27,0 ± 1,3 | 376,1 ± 47,9  | P   | 32,5 ± 1,0               | 507,6 ± 58,2   |     |  |
| 8.7.94       | 246          | B                       | 26,4 ± 1,0 | 465,6 ± 61,6  | P   | 32,6 ± 1,0               | 499,9 ± 26,5   |     |  |

**Tab. A 14:** Wassergehalt der organischen Auflage (OL-, OF-, OH-Lage) unter den vier Baumarten während des Untersuchungszeitraums (in % des Trockengewichtes; Mittelwert ± Standardabweichung)

| Probe-termin | Buche        |              | Eiche         |              | Birke |  | Kiefer |  |
|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|-------|--|--------|--|
| 3.11.93      | 241,3 ± 25,3 | 229,4 ± 55,8 | 206,3 ± 30,8  | 176,1 ± 46,4 |       |  |        |  |
| 8.12.93      | 255,3 ± 84,9 | 225,1 ± 39,7 | 186,0 ± 103,4 | 174,2 ± 63,1 |       |  |        |  |
| 11.1.94      | 261,0 ± 59,4 | 259,0 ± 38,5 | 237,3 ± 46,4  | 211,5 ± 35,3 |       |  |        |  |
| 8.2.94       | 271,8 ± 18,5 | 259,6 ± 30,6 | 225,3 ± 42,5  | 224,3 ± 17,4 |       |  |        |  |
| 2.3.94       | 353,8 ± 36,4 | 346,0 ± 79,3 | 267,4 ± 54,6  | 261,2 ± 92,0 |       |  |        |  |
| 15.3.94      | 262,2 ± 66,7 | 261,1 ± 59,8 | 218,9 ± 38,7  | 232,9 ± 31,9 |       |  |        |  |
| 6.4.94       | 285,6 ± 40,0 | 235,5 ± 47,4 | 193,5 ± 66,9  | 167,3 ± 59,9 |       |  |        |  |
| 3.5.94       | 182,7 ± 22,4 | 175,5 ± 40,1 | 172,7 ± 23,8  | 123,8 ± 30,0 |       |  |        |  |
| 17.5.94      | 157,8 ± 27,2 | 176,6 ± 20,0 | 129,4 ± 58,3  | 71,7 ± 31,8  |       |  |        |  |
| 7.6.94       | 214,9 ± 44,5 | 200,4 ± 37,2 | 142,4 ± 23,0  | 143,5 ± 47,0 |       |  |        |  |
| 8.7.94       | 102,6 ± 23,5 | 131,9 ± 15,2 | 88,8 ± 34,8   | 82,4 ± 20,5  |       |  |        |  |



# Tab. A 16a-d: Kohlenstoff - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probestern an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\* : signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05) )

Tab. A 16a: Kohlenstoff - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | mmol C / g TG |             |                               | [C] in % des Anfangsvorrates |             |                               |
|--|---------------|-------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut       | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | absolut                      | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt                           | 0,93          |             |                               | 3,51                         |             |                               |
| b) erklärter Varianzanteil                     | 0,88          | 0,0001      | 94,62                         | 2,87                         | 0,0001      | 81,77                         |
| c) Varianzanteil Arten                         | 0,78          | 0,0001      | 83,87                         | 1,68                         | 0,0001      | 47,86                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 0,12          | 0,0001      | 12,04                         | 1,33                         | 0,0001      | 37,89                         |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 0,00          |             | 0,00                          | 0,00                         |             | 0,00                          |

Tab. A 16b: Kohlenstoff - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche : Terminvergleich je Art

| Probezeitpunkt (OL-Streu) | mmolC/gTG |        |        |        | [C] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |
|---------------------------|-----------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Buche     | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                        | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                    |           |        |        | ***    |                              |        |        | ***    |
| 1 <> 3                    | ***       | ***    | ***    | ***    |                              | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 4                    | ***       | ***    |        | ***    | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 5                    | ***       | ***    | ***    | ***    | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 6                    |           | ***    | ***    | ***    | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 3                    | ***       | ***    | ***    | ***    |                              |        |        | ***    |
| 2 <> 4                    | ***       | ***    | ***    | ***    |                              | ***    |        |        |
| 2 <> 5                    | ***       | ***    |        | ***    | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 6                    |           | ***    | ***    | ***    | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 3 <> 4                    |           |        | ***    |        |                              |        |        | ***    |
| 3 <> 5                    |           |        | ***    |        |                              |        | ***    | ***    |
| 3 <> 6                    | ***       |        | ***    | ***    | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 4 <> 5                    | ***       | ***    | ***    |        |                              |        |        |        |
| 4 <> 6                    | ***       | ***    | ***    | ***    | ***                          |        | ***    | ***    |
| 5 <> 6                    | ***       |        |        | ***    | ***                          |        | ***    | ***    |
| Signifikanz               | 0,0001    | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001                       | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                | Buche     | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                        | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                    |           | ***    |        | ***    | ***                          |        |        | ***    |
| Signifikanz               | 0,6340    | 0,0057 | 0,2673 | 0,0006 | 0,0008                       | 0,1177 | 0,2920 | 0,0001 |

Tab. A 16c: Kohlenstoff - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probestern

| OL-Streu\Probestern | mmolC/gTG |        |        |        |        |        | [C] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |        |        |
|---------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 1         | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1                            | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q              | ***       | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            |        |        |        |        |        |
| F <> B              | ***       | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| F <> P              | ***       | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            | ***    |        |        | ***    |        |
| Q <> B              | ***       | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            | ***    |        |        |        | ***    |
| Q <> P              | ***       | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            |        |        |        |        |        |
| B <> P              | ***       | ***    |        |        | ***    | ***    | —                            |        | ***    |        |        |        |
| Signifikanz         | 0,0001    | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | —                            | 0,0001 | 0,0011 | 0,0055 | 0,0001 | 0,0045 |
| OF-Streu\Probestern | 1         |        |        |        |        | 6      | 1                            |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q              |           |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        |        |
| F <> B              | ***       |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| F <> P              | ***       |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        |        |
| Q <> B              | ***       |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        |        |
| Q <> P              | ***       |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| B <> P              | ***       |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| Signifikanz         | 0,0001    |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | 0,0005 |

Tab. A 16d: Kohlenstoff - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | C mmol/gTG | [C] in % des Anf. vorrates | Art         | C mmol/gTG | [C] in % des Anf. vorrates |
|-------------|------------|----------------------------|-------------|------------|----------------------------|
| FF <> FP    |            |                            | QQ <> QP    |            |                            |
| FF <> FC    |            | ***                        | QQ <> QC    |            |                            |
| FP <> FC    |            | ***                        | QP <> QC    | ***        |                            |
| Signifikanz | 0,2024     | 0,0001                     | Signifikanz | 0,0013     | 0,1091                     |
| BB <> BF    |            | ***                        | PP <> PF    | ***        | ***                        |
| BB <> BC    |            |                            | PP <> PC    | ***        | ***                        |
| BF <> BC    |            | ***                        | PF <> PC    |            |                            |
| Signifikanz | 0,4288     | 0,0001                     | Signifikanz | 0,0001     | 0,0001                     |

# Tab. A 17a-d: Kalium - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probestern an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalyse angegeben; \*\*\* : signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05) )

Tab. A 17a: Kalium - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | $\mu\text{mol K / g TG}$ |             |                               | [K] in % des Anfangsvorrates |             |                               |
|--|--------------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut                  | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | absolut                      | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt                           | 95,21                    |             |                               | 104,55                       |             |                               |
| b) erklärter Varianzanteil                     | 87,91                    | 0,0001      | 92,33                         | 94,52                        | 0,0001      | 90,41                         |
| c) Varianzanteil Arten                         | 66,28                    | 0,0001      | 69,61                         | 65,55                        | 0,0001      | 62,70                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 11,96                    | 0,0001      | 12,56                         | 36,45                        | 0,0001      | 34,86                         |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 6,73                     | 0,0001      | 7,07                          | 0,00                         |             | 0,00                          |

Tab. A 17b: Kalium - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche : Terminvergleich je Art

| Probezeitpunkt (OL-Streu) | $\mu\text{molK/gTG}$ |        |        |        | [K] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |
|---------------------------|----------------------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Buche                | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                        | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                    | ***                  | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    |        |
| 1 <> 3                    | ***                  | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 4                    | ***                  | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 5                    | ***                  | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    |        |
| 1 <> 6                    | ***                  | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    |        |
| 2 <> 3                    |                      |        |        |        |                              |        |        |        |
| 2 <> 4                    | ***                  | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    |        |
| 2 <> 5                    | ***                  | ***    |        | ***    | ***                          | ***    | ***    |        |
| 2 <> 6                    | ***                  | ***    |        |        | ***                          | ***    |        |        |
| 3 <> 4                    | ***                  | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    |        |
| 3 <> 5                    |                      | ***    |        | ***    | ***                          | ***    |        | ***    |
| 3 <> 6                    | ***                  |        | ***    |        | ***                          |        |        |        |
| 4 <> 5                    |                      |        | ***    | ***    |                              |        | ***    |        |
| 4 <> 6                    |                      |        | ***    |        |                              |        | ***    |        |
| 5 <> 6                    |                      |        | ***    |        |                              |        |        |        |
| Signifikanz               | 0,0001               | 0,0001 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0001                       | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                | Buche                | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                        | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                    | ***                  | ***    |        |        | ***                          | ***    |        |        |
| Signifikanz               | 0,0001               | 0,0001 | 0,6283 | 0,2088 | 0,0001                       | 0,0001 | 0,1582 | 0,4128 |

Tab. A 17c: Kalium - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probestern

| OL-Streu\Probestern | $\mu\text{molK/gTG}$ |        |        |        |        |        | [K] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |        |        |
|---------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 1                    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1                            | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q              | ***                  | ***    | ***    |        |        |        | —                            |        | ***    | ***    |        |        |
| F <> B              | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            |        |        |        |        | ***    |
| F <> P              | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            |        |        |        |        | ***    |
| Q <> B              | ***                  | ***    | ***    | ***    |        |        | —                            |        | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Q <> P              | ***                  | ***    | ***    | ***    |        |        | —                            | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| B <> P              | ***                  | ***    | ***    | ***    |        |        | —                            |        |        | ***    | ***    |        |
| Signifikanz         | 0,0001               | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0007 | 0,0001 | —                            | 0,0084 | 0,0012 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| OF-Streu\Probestern | 1                    |        |        |        |        | 6      | 1                            |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q              |                      |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| F <> B              | ***                  |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| F <> P              | ***                  |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| Q <> B              | ***                  |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| Q <> P              | ***                  |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| B <> P              |                      |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        |        |
| Signifikanz         | 0,0001               |        |        |        |        | 0,0001 | —                            |        |        |        |        | 0,0001 |

Tab. A 17d: Kalium - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | K $\mu\text{mol/gTG}$ | [K] in % des Anf.vorrates | Art         | K $\mu\text{mol/gTG}$ | [K] in % des Anf.vorrates |
|-------------|-----------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|---------------------------|
| FF <> FP    | ***                   | ***                       | QQ <> QP    | ***                   | ***                       |
| FF <> FC    | ***                   | ***                       | QQ <> QC    | ***                   | ***                       |
| FP <> FC    |                       |                           | QP <> QC    |                       |                           |
| Signifikanz | 0,0001                | 0,0001                    | Signifikanz | 0,0093                | 0,0040                    |
| BB <> BF    | ***                   |                           | PP <> PF    |                       |                           |
| BB <> BC    |                       |                           | PP <> PC    | ***                   |                           |
| BF <> BC    | ***                   |                           | PF <> PC    | ***                   | ***                       |
| Signifikanz | 0,0001                | 0,0512                    | Signifikanz | 0,0021                | 0,0058                    |

# Tab. A 18a-d: Magnesium - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probestern an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\*: signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05))

Tab. A 18a: Magnesium - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | $\mu\text{mol Mg / g TG}$ |             |                               | [Mg] in % des Anfangsvorrates |             |                               |
|--|---------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut                   | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | absolut                       | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt                           | 77,76                     |             |                               | 19,48                         |             |                               |
| b) erklärter Varianzanteil                     | 74,86                     | 0,0001      | 96,27                         | 16,62                         | 0,0001      | 85,32                         |
| c) Varianzanteil Arten                         | 72,68                     | 0,0001      | 93,46                         | 11,46                         | 0,0001      | 58,83                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 3,08                      | 0,0001      | 3,96                          | 4,85                          | 0,0001      | 24,90                         |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 0,00                      |             | 0,00                          | 0,30                          | 0,0122      | 1,54                          |

Tab. A 18b: Magnesium - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Terminvergleich je Art

| Probezeitpunkt (OL-Streu) | $\mu\text{mol Mg/g TG}$ |        |        |        | [Mg] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |
|---------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Buche                   | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                         | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                    | ***                     |        |        |        |                               |        | ***    | ***    |
| 1 <> 3                    | ***                     |        | ***    |        |                               |        | ***    | ***    |
| 1 <> 4                    |                         | ***    | ***    | ***    |                               |        | ***    | ***    |
| 1 <> 5                    |                         |        | ***    | ***    |                               | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 6                    | ***                     |        | ***    | ***    |                               | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 3                    |                         |        | ***    |        |                               |        | ***    |        |
| 2 <> 4                    |                         | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 5                    |                         | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 6                    |                         |        | ***    |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 3 <> 4                    |                         | ***    | ***    |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 3 <> 5                    |                         | ***    | ***    |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 3 <> 6                    |                         |        |        |        |                               | ***    | ***    | ***    |
| 4 <> 5                    |                         |        |        |        |                               |        |        |        |
| 4 <> 6                    |                         | ***    | ***    |        |                               | ***    |        |        |
| 5 <> 6                    |                         |        | ***    |        |                               |        |        |        |
| Signifikanz               | 0,0001                  | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001                        | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                | Buche                   | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                         | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                    |                         | ***    | ***    |        | ***                           |        | ***    | ***    |
| Signifikanz               | 0,1226                  | 0,0042 | 0,0026 | 0,6883 | 0,0031                        | 0,4783 | 0,0003 | 0,0055 |

Tab. A 18c: Magnesium - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probestern

| OL-Streu\Probestern | $\mu\text{mol Mg/g TG}$ |        |        |        |        |        | [Mg] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |        |        |
|---------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 1                       | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1                             | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q              | ***                     | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             |        | ***    | ***    | ***    | ***    |
| F <> B              | ***                     | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| F <> P              | ***                     | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Q <> B              | ***                     | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             | ***    | ***    |        | ***    | ***    |
| Q <> P              | ***                     | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             | ***    | ***    |        | ***    | ***    |
| B <> P              | ***                     | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             |        |        |        |        |        |
| Signifikanz         | 0,0001                  | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |                               | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| OF-Streu\Probestern | 1                       |        |        |        |        | 6      | 1                             | 6      |        |        |        |        |
| F <> Q              |                         |        |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> B              |                         | ***    |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        | ***    |
| F <> P              |                         | ***    |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        | ***    |
| Q <> B              |                         | ***    |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        | ***    |
| Q <> P              |                         | ***    |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        | ***    |
| B <> P              |                         | ***    |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        | ***    |
| Signifikanz         | 0,0001                  |        |        |        |        |        | —                             | 0,0001 |        |        |        |        |

Tab. A 18d: Magnesium - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | Mg $\mu\text{mol/g TG}$ | [Mg] in % des Anf.vorrates | Art         | Mg $\mu\text{mol/g TG}$ | [Mg] in % des Anf.vorrates |
|-------------|-------------------------|----------------------------|-------------|-------------------------|----------------------------|
| FF <> FP    | ***                     |                            | QQ <> QP    | ***                     | ***                        |
| FF <> FC    |                         |                            | QQ <> QC    | ***                     |                            |
| FP <> FC    |                         | ***                        | QP <> QC    |                         |                            |
| Signifikanz | 0,0094                  | 0,0018                     | Signifikanz | 0,0001                  | 0,0001                     |
| BB <> BF    |                         | ***                        | PP <> PF    | ***                     | ***                        |
| BB <> BC    |                         | ***                        | PP <> PC    |                         |                            |
| BF <> BC    | ***                     |                            | PF <> PC    | ***                     | ***                        |
| Signifikanz | 0,0001                  | 0,0040                     | Signifikanz | 0,0002                  | 0,0001                     |

# Tab. A 19a-d: Calcium - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probetermin an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\*: signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05))

Tab. A 19a: Calcium - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | $\mu\text{mol Ca} / \text{g TG}$ |             |                               | [Ca] in % des Anfangsvorrates |             |                               |
|--|----------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut                          | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | absolut                       | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt erklärter Varianzanteil   | 54,37                            |             |                               | 6,16                          |             |                               |
| c) Varianzanteil Arten                         | 52,16                            | 0,0001      | 95,94                         | 3,58                          | 0,0001      | 58,12                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 2,35                             | 0,0001      | 4,32                          | 2,85                          | 0,0001      | 46,27                         |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 0,00                             |             | 0,00                          | 0,00                          |             | 0,00                          |

Tab. A 19b: Calcium - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Terminvergleich je Art

| Probezeitpunkt (OL-Streu) | $\mu\text{molCa/gTG}$ |        |        |        | [Ca] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |
|---------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Buche                 | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                         | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                    |                       |        |        |        |                               |        |        |        |
| 1 <> 3                    |                       |        | ***    |        |                               |        |        |        |
| 1 <> 4                    |                       |        |        |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 5                    |                       |        |        |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 6                    | ***                   |        |        |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 3                    | ***                   |        |        |        |                               |        |        |        |
| 2 <> 4                    |                       |        |        |        |                               | ***    | ***    |        |
| 2 <> 5                    |                       |        | ***    |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 6                    | ***                   |        |        |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 3 <> 4                    |                       |        | ***    | ***    | ***                           |        | ***    | ***    |
| 3 <> 5                    | ***                   |        | ***    | ***    | ***                           |        | ***    | ***    |
| 3 <> 6                    |                       |        | ***    |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 4 <> 5                    |                       |        |        |        |                               |        |        |        |
| 4 <> 6                    |                       |        |        |        |                               |        |        |        |
| 5 <> 6                    | ***                   |        |        |        |                               |        |        |        |
| Signifikanz               | 0,0001                | 0,1335 | 0,0001 | 0,0007 | 0,0001                        | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                | Buche                 | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                         | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                    | ***                   | ***    | ***    |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| Signifikanz               | 0,0036                | 0,0063 | 0,0191 | 0,1388 | 0,0002                        | 0,0006 | 0,0111 | 0,0008 |

Tab. A 19c: Calcium - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probetermin

| OL-Streu\Probetermin | $\mu\text{molCa/gTG}$ |        |        |        |        |        | [Ca] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |        |        |
|----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 1                     | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1                             | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q               | ***                   |        | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> B               | ***                   | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> P               | ***                   | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             |        |        | ***    | ***    | ***    |
| Q <> B               | ***                   | ***    |        | ***    | ***    | ***    | —                             |        |        |        |        |        |
| Q <> P               | ***                   | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             | ***    |        | ***    | ***    |        |
| B <> P               | ***                   | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             |        |        |        |        |        |
| Signifikanz          | 0,0001                | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | —                             | 0,0062 | 0,2436 | 0,0018 | 0,0012 | 0,0236 |
| OF-Streu\Probetermin | 1                     |        |        |        |        | 6      | 1                             |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q               |                       |        |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> B               | ***                   |        |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> P               | ***                   |        |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| Q <> B               | ***                   |        |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| Q <> P               | ***                   |        |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| B <> P               | ***                   |        |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| Signifikanz          | 0,0001                |        |        |        |        | 0,0001 | —                             |        |        |        |        | 0,5522 |

Tab. A 19d: Calcium - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | Ca $\mu\text{mol/gTG}$ | [Ca] in % des Anf.vorrates | Art         | Ca $\mu\text{mol/gTG}$ | [Ca] in % des Anf.vorrates |
|-------------|------------------------|----------------------------|-------------|------------------------|----------------------------|
| FF <> FP    | ***                    | ***                        | QQ <> QP    |                        |                            |
| FF <> FC    | ***                    |                            | QQ <> QC    |                        |                            |
| FP <> FC    |                        | ***                        | QP <> QC    |                        |                            |
| Signifikanz | 0,0001                 | 0,0001                     | Signifikanz | 0,5342                 | 0,0618                     |
| BB <> BF    |                        | ***                        | PP <> PF    |                        |                            |
| BB <> BC    |                        |                            | PP <> PC    |                        |                            |
| BF <> BC    |                        |                            | PF <> PC    |                        |                            |
| Signifikanz | 0,0914                 | 0,0131                     | Signifikanz | 0,9364                 | 0,4420                     |

# Tab. A 20a-d: Mangan - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probestern an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\*: signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05))

Tab. A 20a: Mangan - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | $\mu\text{mol Mn / g TG}$ |             |                               | [Mn] in % des Anfangsvorrates |             |                               |
|--|---------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut                   | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | absolut                       | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt                           | 491,51                    |             |                               | 18,77                         |             |                               |
| b) erklärter Varianzanteil                     | 489,61                    | 0,0001      | 99,61                         | 17,12                         | 0,0001      | 91,21                         |
| c) Varianzanteil Arten                         | 473,38                    | <0,0001     | 96,31                         | 7,03                          | 0,0001      | 37,45                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 18,34                     | 0,0001      | 3,73                          | 5,85                          | 0,0001      | 31,17                         |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 0,00                      |             | 0,00                          | 4,25                          | 0,0001      | 22,64                         |

Tab. A 20b: Mangan - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Terminvergleich je Art

| Probezeitpunkt (OL-Streu) | $\mu\text{mol Mn/gTG}$ |        |        |        | [Mn] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |
|---------------------------|------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Buche                  | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                         | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 3                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 4                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 5                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 6                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 3                    | ***                    |        |        |        | ***                           |        |        |        |
| 2 <> 4                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           |        | ***    | ***    |
| 2 <> 5                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 6                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           |        | ***    | ***    |
| 3 <> 4                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           |        | ***    | ***    |
| 3 <> 5                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 3 <> 6                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           |        | ***    | ***    |
| 4 <> 5                    |                        | ***    |        |        |                               | ***    |        |        |
| 4 <> 6                    | ***                    |        |        |        |                               |        | ***    | ***    |
| 5 <> 6                    |                        | ***    | ***    |        |                               | ***    | ***    |        |
| Signifikanz               | 0,0001                 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001                        | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                | Buche                  | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                         | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                    | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| Signifikanz               | 0,0001                 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001                        | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |

Tab. A 20c: Mangan - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probestern

| OL-Streu\Probestern | $\mu\text{mol Mn/gTG}$ |        |        |        |        |        | [Mn] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |        |        |
|---------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 1                      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1                             | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q              | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             | ***    |        |        |        | ***    |
| F <> B              | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             | ***    |        | ***    | ***    |        |
| F <> P              | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             | ***    |        |        | ***    | ***    |
| Q <> B              | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             |        |        | ***    |        | ***    |
| Q <> P              | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             |        |        |        | ***    |        |
| B <> P              | ***                    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                             |        |        | ***    | ***    | ***    |
| Signifikanz         | 0,0001                 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | —                             | 0,0001 | 0,1971 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| OF-Streu\Probestern | 1                      |        |        |        |        | 6      | 1                             |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q              | ***                    |        |        |        |        | ***    | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> B              | ***                    |        |        |        |        | ***    | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> P              | ***                    |        |        |        |        | ***    | —                             |        |        |        |        | ***    |
| Q <> B              | ***                    |        |        |        |        | ***    | —                             |        |        |        |        | ***    |
| Q <> P              | ***                    |        |        |        |        | ***    | —                             |        |        |        |        | ***    |
| B <> P              | ***                    |        |        |        |        | ***    | —                             |        |        |        |        | ***    |
| Signifikanz         | 0,0001                 |        |        |        |        | 0,0001 | —                             |        |        |        |        | 0,0001 |

Tab. A 20d: Mangan - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | Mn $\mu\text{mol/gTG}$ | [Mn] in % des Anf.vorrates | Art         | Mn $\mu\text{mol/gTG}$ | [Mn] in % des Anf.vorrates |
|-------------|------------------------|----------------------------|-------------|------------------------|----------------------------|
| FF <> FP    | ***                    | ***                        | QQ <> QP    | ***                    | ***                        |
| FF <> FC    | ***                    | ***                        | QQ <> QC    | ***                    | ***                        |
| FP <> FC    |                        | ***                        | QP <> QC    |                        |                            |
| Signifikanz | 0,0001                 | 0,0001                     | Signifikanz | 0,0001                 | 0,0001                     |
| BB <> BF    | ***                    | ***                        | PP <> PF    | ***                    | ***                        |
| BB <> BC    |                        |                            | PP <> PC    |                        |                            |
| BF <> BC    | ***                    | ***                        | PF <> PC    | ***                    | ***                        |
| Signifikanz | 0,0001                 | 0,0001                     | Signifikanz | 0,0001                 | 0,0001                     |



# Tab. A 21a-d: Eisen - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probestern an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\*: signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05) )

Tab. A 21a: Eisen - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | $\mu\text{mol Fe / g TG}$ |             |                               | [Fe] in % des Anfangsvorrates |             |                               |
|--|---------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut                   | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | absolut                       | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt                           | 154,4                     |             |                               | 25,17                         |             |                               |
| b) erklärter Varianzanteil                     |                           |             |                               |                               |             |                               |
| c) Varianzanteil Arten                         | 137,88                    | 0,0001      | 89,30                         | 13,64                         | 0,0001      | 54,19                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 128,92                    | 0,0001      | 83,50                         | 7,74                          | 0,0001      | 30,75                         |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 31,14                     | 0,0001      | 20,17                         | 4,22                          | 0,0001      | 16,77                         |
|  | 0,00                      |             | 0,00                          | 1,68                          | 0,0002      | 6,67                          |

Tab. A 21b: Eisen - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche : Terminvergleich je Art

| Probezeitpunkt (OL-Streu) | $\mu\text{mol Fe/gTG}$ |        |        |        | [Fe] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |
|---------------------------|------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Buche                  | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                         | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                    |                        |        |        |        |                               |        |        |        |
| 1 <> 3                    |                        | ***    | ***    | ***    |                               |        | ***    | ***    |
| 1 <> 4                    |                        |        |        |        |                               |        |        |        |
| 1 <> 5                    |                        |        |        |        |                               |        |        |        |
| 1 <> 6                    |                        |        | ***    | ***    |                               |        |        | ***    |
| 2 <> 3                    | ***                    | ***    | ***    |        | ***                           | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 4                    |                        |        |        |        |                               |        |        |        |
| 2 <> 5                    |                        | ***    |        |        |                               | ***    |        |        |
| 2 <> 6                    | ***                    | ***    | ***    | ***    |                               | ***    | ***    | ***    |
| 3 <> 4                    |                        |        | ***    |        |                               |        | ***    | ***    |
| 3 <> 5                    |                        |        |        |        |                               |        |        | ***    |
| 3 <> 6                    |                        |        |        |        |                               |        |        |        |
| 4 <> 5                    |                        |        |        |        |                               |        |        |        |
| 4 <> 6                    |                        |        | ***    |        |                               |        | ***    | ***    |
| 5 <> 6                    |                        |        |        | ***    |                               |        |        | ***    |
| Signifikanz               | 0,0011                 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0042                        | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                | Buche                  | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                         | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                    | ***                    |        |        | ***    |                               | ***    |        | ***    |
| Signifikanz               | 0,0186                 | 0,1938 | 0,9963 | 0,0001 | 0,2659                        | 0,0143 | 0,4059 | 0,0001 |

Tab. A 21c: Eisen - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probestern

| OL-Streu\Probestern | $\mu\text{mol Fe/gTG}$ |        |        |        |        |        | [Fe] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |        |        |
|---------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 1                      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1                             | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q              |                        |        |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> B              |                        |        |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> P              |                        | ***    |        |        |        | ***    | —                             | ***    |        |        |        | ***    |
| Q <> B              |                        |        |        |        |        |        | —                             | ***    |        |        |        |        |
| Q <> P              |                        | ***    |        |        |        | ***    | —                             | ***    | ***    |        |        | ***    |
| B <> P              |                        |        |        |        |        |        | —                             | ***    | ***    |        |        |        |
| Signifikanz         | 0,6187                 | 0,0001 | 0,9549 | 0,1629 | 0,5348 | 0,0072 | —                             | 0,0001 | 0,3525 | 0,0089 | 0,7874 | 0,0002 |
| OF-Streu\Probestern | 1                      |        |        |        |        | 6      | 1                             |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q              |                        | ***    |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> B              |                        | ***    |        |        |        | ***    | —                             |        |        |        |        |        |
| F <> P              |                        | ***    |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        | ***    |
| Q <> B              |                        | ***    |        |        |        | ***    | —                             |        |        |        |        |        |
| Q <> P              |                        | ***    |        |        |        |        | —                             |        |        |        |        | ***    |
| B <> P              |                        |        |        |        |        | ***    | —                             |        |        |        |        | ***    |
| Signifikanz         | 0,0001                 |        |        |        |        | 0,0004 | —                             |        |        |        |        | 0,0001 |

Tab. A 21d: Eisen - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | Fe $\mu\text{mol/gTG}$ | [Fe] in % des Anf. vorrates | Art         | Fe $\mu\text{mol/gTG}$ | [Fe] in % des Anf. vorrates |
|-------------|------------------------|-----------------------------|-------------|------------------------|-----------------------------|
| FF <> FP    | ***                    | ***                         | QQ <> QP    | ***                    | ***                         |
| FF <> FC    |                        | ***                         | QQ <> QC    |                        | ***                         |
| FP <> FC    |                        |                             | QP <> QC    |                        |                             |
| Signifikanz | 0,0106                 | 0,0022                      | Signifikanz | 0,0270                 | 0,0091                      |
| BB <> BF    |                        |                             | PP <> PF    | ***                    | ***                         |
| BB <> BC    |                        |                             | PP <> PC    | ***                    |                             |
| BF <> BC    |                        |                             | PF <> PC    | ***                    | ***                         |
| Signifikanz | 0,7286                 | 0,0314                      | Signifikanz | 0,0001                 | 0,0003                      |

# Tab. A 22a-d: Phosphor - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probetermin an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\*: signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05))

Tab. A 22a: Phosphor - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | $\mu\text{mol P / g TG}$ |             |                               | [P] in % des Anfangsvorrates |             |                               |
|--|--------------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut                  | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | absolut                      | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt                           | 37,5                     |             |                               | 12,48                        |             |                               |
| b) erklärter Varianzanteil                     |                          |             |                               |                              |             |                               |
| c) Varianzanteil Arten                         | 34,68                    | 0,0001      | 92,48                         | 10,17                        | 0,0001      | 81,49                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 3,52                     | 0,0001      | 9,39                          | 6,46                         | 0,0001      | 51,76                         |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 0,39                     | 0,0005      | 1,04                          | 0,45                         | 0,0001      | 3,61                          |

Tab. A 22b: Phosphor - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche : Terminvergleich je Art

| Probezeitpunkt (OL-Streu) | $\mu\text{molP/gTG}$ |        |        |        | [P] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |
|---------------------------|----------------------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Buche                | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                        | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                    | ***                  |        |        |        | ***                          |        |        | ***    |
| 1 <> 3                    |                      |        |        | ***    | ***                          | ***    | ***    |        |
| 1 <> 4                    |                      | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 5                    |                      | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 6                    |                      |        | ***    |        | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 3                    | ***                  |        |        |        |                              | ***    |        |        |
| 2 <> 4                    |                      | ***    |        |        |                              | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 5                    |                      | ***    | ***    | ***    |                              | ***    | ***    | ***    |
| 2 <> 6                    | ***                  |        |        |        |                              | ***    | ***    | ***    |
| 3 <> 4                    |                      |        |        |        |                              |        | ***    | ***    |
| 3 <> 5                    |                      |        | ***    | ***    |                              |        | ***    | ***    |
| 3 <> 6                    |                      |        |        |        |                              |        | ***    | ***    |
| 4 <> 5                    |                      |        |        |        |                              |        |        | ***    |
| 4 <> 6                    |                      |        |        |        |                              |        |        |        |
| 5 <> 6                    |                      |        |        | ***    |                              |        |        |        |
| Signifikanz               | 0,0001               | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001                       | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                | Buche                | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                        | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                    | ***                  | ***    | ***    |        | ***                          | ***    | ***    | ***    |
| Signifikanz               | 0,0001               | 0,0001 | 0,0444 | 0,4446 | 0,0001                       | 0,0001 | 0,0024 | 0,0001 |

Tab. A 22c: Phosphor - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probetermin

| OL-Streu\Probetermin | $\mu\text{molP/gTG}$ |        |        |        |        |        | [P] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |        |        |
|----------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 1                    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1                            | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q               |                      | ***    |        |        |        |        | —                            | ***    |        |        | ***    |        |
| F <> B               | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            | ***    |        |        | ***    | ***    |
| F <> P               | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            | ***    | ***    |        |        |        |
| Q <> B               | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            |        |        |        |        | ***    |
| Q <> P               | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            |        | ***    | ***    | ***    |        |
| B <> P               | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Signifikanz          | 0,0001               | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | —                            | 0,0001 | 0,0001 | 0,0044 | 0,0001 | 0,0001 |
| OF-Streu\Probetermin | 1                    |        |        |        |        | 6      | 1                            |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q               |                      |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        |        |
| F <> B               | ***                  |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| F <> P               | ***                  |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| Q <> B               | ***                  |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| Q <> P               | ***                  |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| B <> P               | ***                  |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | ***    |
| Signifikanz          | 0,0001               |        |        |        |        |        | —                            |        |        |        |        | 0,0001 |

Tab. A 22d: Phosphor - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | P $\mu\text{mol/gTG}$ | [P] in % des Anf.vorrates | Art         | P $\mu\text{mol/gTG}$ | [P] in % des Anf.vorrates |
|-------------|-----------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|---------------------------|
| FF <> FP    |                       |                           | QQ <> QP    |                       |                           |
| FF <> FC    | ***                   |                           | QQ <> QC    | ***                   |                           |
| FP <> FC    | ***                   |                           | QP <> QC    | ***                   |                           |
| Signifikanz | 0,0001                | 0,2030                    | Signifikanz | 0,0045                | 0,1777                    |
| BB <> BF    | ***                   |                           | PP <> PF    | ***                   |                           |
| BB <> BC    |                       |                           | PP <> PC    | ***                   |                           |
| BF <> BC    | ***                   |                           | PF <> PC    |                       |                           |
| Signifikanz | 0,0001                | 0,1239                    | Signifikanz | 0,0003                | 0,5603                    |

# Tab. A 23a-d: Stickstoff - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probestern an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\* : signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05) )

Tab. A 23a: Stickstoff - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | $\mu\text{mol N / g TG}$ |             |                               | [N] in % des Anfangsvorrates |             |                               |
|--|--------------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut                  | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | nominal                      | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt                           | 41,12                    |             |                               | 5,47                         |             |                               |
| b) erklärter Varianzanteil                     | 40,26                    | 0,0001      | 97,91                         | 4,28                         | 0,0001      | 78,24                         |
| c) Varianzanteil Arten                         | 36,37                    | 0,0001      | 88,45                         | 2,79                         | 0,0001      | 51,01                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 7,07                     | 0,0001      | 17,19                         | 0,46                         | 0,0001      | 8,41                          |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 0,00                     |             | 0,00                          | 1,03                         | 0,0001      | 18,83                         |

Tab. A 23b: Stickstoff - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche : Terminvergleich je Art

| Probesternpunkt (OL-Streu) | $\mu\text{molN/gTG}$ |        |        |        | [N] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |
|----------------------------|----------------------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|
|                            | Buche                | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                        | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                     |                      | ***    | ***    | ***    |                              | ***    |        |        |
| 1 <> 3                     |                      | ***    | ***    | ***    |                              |        |        | ***    |
| 1 <> 4                     | ***                  | ***    | ***    | ***    |                              |        |        | ***    |
| 1 <> 5                     | ***                  | ***    | ***    | ***    |                              | ***    |        | ***    |
| 1 <> 6                     | ***                  | ***    | ***    | ***    |                              | ***    |        | ***    |
| 2 <> 3                     |                      |        |        | ***    |                              |        |        | ***    |
| 2 <> 4                     | ***                  |        |        | ***    |                              |        |        | ***    |
| 2 <> 5                     | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***                          |        | ***    | ***    |
| 2 <> 6                     | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***                          |        |        | ***    |
| 3 <> 4                     |                      | ***    |        |        |                              |        |        | ***    |
| 3 <> 5                     | ***                  | ***    |        | ***    |                              |        |        | ***    |
| 3 <> 6                     | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***                          | ***    |        | ***    |
| 4 <> 5                     | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***                          |        |        | ***    |
| 4 <> 6                     | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***                          | ***    |        | ***    |
| 5 <> 6                     | ***                  | ***    | ***    | ***    |                              | ***    |        | ***    |
| Signifikanz                | 0,0001               | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001                       | 0,0001 | 0,0063 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                 | Buche                | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                        | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                     | ***                  | ***    |        |        | ***                          | ***    |        | ***    |
| Signifikanz                | 0,0001               | 0,0001 | 0,1263 | 0,2025 | 0,0001                       | 0,0001 | 0,1244 | 0,0001 |

Tab. A 23c: Stickstoff - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probestern

| OL-Streu\Probestern | $\mu\text{molN/gTG}$ |        |        |        |        |        | [N] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |        |        |
|---------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 1                    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1                            | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q              | ***                  |        | ***    |        | ***    |        | —                            | ***    |        | ***    |        | ***    |
| F <> B              | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            | ***    | ***    |        |        |        |
| F <> P              | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Q <> B              | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            | ***    |        |        | ***    | ***    |
| Q <> P              | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            |        | ***    |        |        |        |
| B <> P              | ***                  | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                            |        | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Signifikanz         | 0,0001               | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | —                            | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| OF-Streu\Probestern | 1                    |        |        |        |        | 6      | 1                            |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q              | ***                  |        |        |        |        | ***    | —                            |        |        |        |        |        |
| F <> B              |                      |        |        |        |        | ***    | —                            |        |        |        |        |        |
| F <> P              | ***                  |        |        |        |        | ***    | —                            |        |        |        |        |        |
| Q <> B              | ***                  |        |        |        |        | ***    | —                            |        |        |        |        |        |
| Q <> P              | ***                  |        |        |        |        | ***    | —                            |        |        |        |        |        |
| B <> P              | ***                  |        |        |        |        | ***    | —                            |        |        |        |        |        |
| Signifikanz         | 0,0001               |        |        |        |        | 0,0001 | —                            |        |        |        |        | 0,1735 |

Tab. A 23d: Stickstoff - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | N $\mu\text{mol/gTG}$ | [N] in % des Anf. vorrates | Art         | N $\mu\text{mol/gTG}$ | [N] in % des Anf. vorrates |
|-------------|-----------------------|----------------------------|-------------|-----------------------|----------------------------|
| FF <> FP    |                       |                            | QQ <> QP    |                       |                            |
| FF <> FC    | ***                   |                            | QQ <> QC    |                       |                            |
| FP <> FC    | ***                   |                            | QP <> QC    |                       | ***                        |
| Signifikanz | 0,0028                | 0,2581                     | Signifikanz | 0,0745                | 0,0059                     |
| BB <> BF    |                       | ***                        | PP <> PF    | ***                   | ***                        |
| BB <> BC    |                       |                            | PP <> PC    | ***                   | ***                        |
| BF <> BC    |                       | ***                        | PF <> PC    |                       |                            |
| Signifikanz | 0,0969                | 0,0003                     | Signifikanz | 0,0001                | 0,0001                     |

# Tab. A 24a-d: Lignin - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probetermin an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\*: signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05))

Tab. A 24a: Lignin - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | mg Lignin / g TG |             |                               | [Lignin] in % d. Anfangsvorrates |             |                               |
|--|------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut          | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | absolut                          | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt                           | 3,74             |             |                               | 5,04                             |             |                               |
| b) erklärter Varianzanteil                     | 3,13             | 0,0001      | 83,69                         | 3,58                             | 0,0001      | 71,03                         |
| c) Varianzanteil Arten                         | 1,79             | 0,0001      | 47,86                         | 1,85                             | 0,0001      | 36,71                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 1,11             | 0,0001      | 29,68                         | 1,31                             | 0,0001      | 25,99                         |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 0,24             | 0,0001      | 6,42                          | 0,42                             | 0,0001      | 8,33                          |

Tab. A 24b: Lignin - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche : Terminvergleich je Art

| Probezeitpunkt (OL-Streu) | mgLignin/gTG |        |        |        | [Lignin] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |
|---------------------------|--------------|--------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Buche        | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                             | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                    |              | ***    |        |        |                                   | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 3                    |              |        |        |        |                                   | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 4                    |              | ***    |        |        | ***                               | ***    | ***    | ***    |
| 1 <> 6                    |              |        |        | ***    | ***                               | ***    | ***    |        |
| 2 <> 3                    |              | ***    |        |        |                                   |        | ***    |        |
| 2 <> 4                    | ***          | ***    |        |        | ***                               |        |        |        |
| 2 <> 5                    |              | ***    | ***    | ***    | ***                               |        |        | ***    |
| 2 <> 6                    | ***          | ***    | ***    | ***    | ***                               |        | ***    | ***    |
| 3 <> 4                    | ***          | ***    |        |        |                                   | ***    | ***    |        |
| 3 <> 5                    |              |        |        | ***    |                                   |        |        | ***    |
| 3 <> 6                    | ***          |        | ***    | ***    | ***                               |        |        | ***    |
| 4 <> 5                    | ***          | ***    | ***    | ***    |                                   |        | ***    | ***    |
| 4 <> 6                    |              | ***    | ***    | ***    |                                   | ***    |        | ***    |
| 5 <> 6                    | ***          |        |        |        | ***                               |        |        |        |
| Signifikanz               | 0,0001       | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001                            | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                | Buche        | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche                             | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                    |              |        |        | ***    | ***                               | ***    |        | ***    |
| Signifikanz               | 0,0677       | 0,7153 | 0,9848 | 0,0229 | 0,0009                            | 0,0121 | 0,8221 | 0,0016 |

Tab. A 24c: Lignin - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probetermin

| OL-Streu\Probetermin | mgLignin/gTG |        |        |        |        |        | [Lignin] in % des Anfangsvorrates |        |        |        |        |        |
|----------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 1            | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1                                 | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q               |              | ***    |        | ***    |        | ***    | —                                 | ***    |        |        | ***    | ***    |
| F <> B               | ***          |        |        | ***    | ***    | ***    | —                                 | ***    | ***    | ***    |        |        |
| F <> P               | ***          | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                                 | ***    | ***    |        | ***    | ***    |
| Q <> B               | ***          | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                                 |        | ***    |        |        |        |
| Q <> P               | ***          | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | —                                 |        |        |        | ***    | ***    |
| B <> P               | ***          | ***    | ***    | ***    |        |        | —                                 |        |        |        | ***    | ***    |
| Signifikanz          | 0,0001       | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | —                                 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0029 | 0,0001 | 0,0001 |
| OF-Streu\Probetermin | 1            |        |        |        |        | 6      | 1                                 |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q               |              |        |        |        |        |        | —                                 |        |        |        |        |        |
| F <> B               | ***          |        |        |        |        |        | —                                 |        |        |        |        |        |
| F <> P               |              |        |        |        |        |        | —                                 |        |        |        |        |        |
| Q <> B               | ***          |        |        |        |        |        | —                                 |        |        |        |        |        |
| Q <> P               | ***          |        |        |        |        |        | —                                 |        |        |        |        |        |
| B <> P               | ***          |        |        |        |        |        | —                                 |        |        |        |        |        |
| Signifikanz          | 0,0001       |        |        |        |        |        | —                                 |        |        |        |        | 0,0588 |

Tab. A 24d: Lignin - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | Lignin $\mu\text{mol/gTG}$ | [Lignin] in % Anf.vorrates | Art         | Lignin $\mu\text{mol/gTG}$ | [Lignin] in % Anf.vorrates |
|-------------|----------------------------|----------------------------|-------------|----------------------------|----------------------------|
| FF <> FP    | ***                        | ***                        | QQ <> QP    |                            |                            |
| FF <> FC    | ***                        | ***                        | QQ <> QC    |                            |                            |
| FP <> FC    |                            |                            | QP <> QC    |                            | ***                        |
| Signifikanz | 0,0047                     | 0,0001                     | Signifikanz | 0,0791                     | 0,0248                     |
| BB <> BF    | ***                        | ***                        | PP <> PF    | ***                        | ***                        |
| BB <> BC    |                            |                            | PP <> PC    | ***                        |                            |
| BF <> BC    | ***                        | ***                        | PF <> PC    | ***                        | ***                        |
| Signifikanz | 0,0001                     | 0,0001                     | Signifikanz | 0,0001                     | 0,0002                     |

# Tab. A 25a-d: C/Mg, C/K - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probetermin an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\*: signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05))

Tab. A 25a: C/Mg, C/K - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|   | C/Mg    |             |                                       | C/K     |             |                                       |
|---|---------|-------------|---------------------------------------|---------|-------------|---------------------------------------|
|   | absolut | Signifikanz | Anteil in %<br>der Gesamt-<br>varianz | absolut | Signifikanz | Anteil in %<br>der Gesamt-<br>varianz |
| a) Varianz insgesamt                                | 78,31   |             |                                       | 105,04  |             |                                       |
| b) erklärter<br>Varianzanteil                       | 75,32   | 0,0001      | 96,18                                 | 93,01   | 0,0001      | 88,55                                 |
| c) Varianzanteil Arten                              | 72,85   | 0,0001      | 93,03                                 | 73,80   | 0,0001      | 70,26                                 |
| d) Varianzanteil Zeit                               | 2,74    | 0,0001      | 3,50                                  | 12,77   | 0,0001      | 12,16                                 |
| e) Varianzanteil Wechsel-<br>wirkungen Arten x Zeit | 0,00    |             | 0,00                                  | 6,52    | 0,0001      | 6,21                                  |

Tab. A 25b: C/Mg, C/K - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Terminvergleich je Art

| Probezeit-<br>punkt (OL-Streu) | C/Mg   |        |        |        | C/K    |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                         | ***    |        |        |        | ***    | ***    | ***    |        |
| 1 <> 3                         |        |        | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| 1 <> 4                         |        | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| 1 <> 5                         |        |        | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| 1 <> 6                         | ***    |        | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| 2 <> 3                         |        |        | ***    |        |        |        | ***    |        |
| 2 <> 4                         |        | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| 2 <> 5                         |        | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        | ***    |
| 2 <> 6                         |        |        | ***    | ***    | ***    |        |        |        |
| 3 <> 4                         |        |        | ***    |        | ***    |        | ***    |        |
| 3 <> 5                         |        | ***    |        |        |        |        |        | ***    |
| 3 <> 6                         |        |        |        |        | ***    |        | ***    |        |
| 4 <> 5                         |        |        | ***    |        |        |        | ***    | ***    |
| 4 <> 6                         | ***    | ***    | ***    |        |        |        | ***    |        |
| 5 <> 6                         | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |
| Signifikanz                    | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0010 |
| (OF-Streu)                     | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                         |        |        | ***    |        | ***    | ***    |        |        |
| Signifikanz                    | 0,1374 | 0,0667 | 0,0045 | 0,4904 | 0,0001 | 0,0001 | 0,7408 | 0,3383 |

Tab. A 25c: C/Mg, C/K - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probetermin

| OL-Streu/Probetermin | C/Mg   |        |        |        |        |        | C/K    |        |        |        |        |        |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| F <> B               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| F <> P               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Q <> B               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| Q <> P               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| B <> P               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Signifikanz          | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| OF-Streu/Probetermin | 1      |        |        |        |        | 6      | 1      |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q               |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | ***    |
| F <> B               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        |        |
| F <> P               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        |        |
| Q <> B               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        | ***    |
| Q <> P               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        | ***    |
| B <> P               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        | ***    |
| Signifikanz          | 0,0001 |        |        |        |        | 0,0001 | 0,0001 |        |        |        |        | 0,0001 |

Tab. A 25d: C/Mg, C/K - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | C/Mg   | C/K    | Art         | C/Mg   | C/K    |
|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| FF <> FP    | ***    | ***    | QQ <> QP    | ***    | ***    |
| FF <> FC    |        | ***    | QQ <> QC    | ***    |        |
| FP <> FC    |        |        | QP <> QC    | ***    |        |
| Signifikanz | 0,0091 | 0,0001 | Signifikanz | 0,0001 | 0,0141 |
| BB <> BF    |        | ***    | PP <-> PF   | ***    |        |
| BB <> BC    | ***    |        | PP <-> PC   |        | ***    |
| BF <> BC    | ***    |        | PF <-> PC   | ***    | ***    |
| Signifikanz | 0,0001 | 0,0001 | Signifikanz | 0,0002 | 0,0028 |

# Tab. A 26a-d: C/Lignin, C/Ca - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probetermin an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\* : signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05) )

Tab. A 26a: C/Lignin, C/Ca - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|  | C/Lignin |             |                               | C/Ca    |             |                               |
|--|----------|-------------|-------------------------------|---------|-------------|-------------------------------|
|  | absolut  | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz | absolut | Signifikanz | Anteil in % der Gesamtvarianz |
| a) Varianz insgesamt                           | 4,65     |             |                               | 69,80   |             |                               |
| b) erklärter Varianzanteil                     | 3,96     | 0,0001      | 85,16                         | 61,52   | 0,0001      | 88,14                         |
| c) Varianzanteil Arten                         | 2,14     | 0,0001      | 46,02                         | 60,58   | 0,0001      | 86,79                         |
| d) Varianzanteil Zeit                          | 1,37     | 0,0001      | 29,46                         | 1,26    | 0,0001      | 1,81                          |
| e) Varianzanteil Wechselwirkungen Arten x Zeit | 0,45     | 0,0001      | 9,68                          | 0,00    |             | 0,00                          |

Tab. A 26b: C/Lignin, C/Ca - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche : Terminvergleich je Art

| Probezeitpunkt (OL-Streu) | C/Lignin |        |        |        | C/Ca   |        |        |        |
|---------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           | Buche    | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                    |          | ***    |        | ***    |        |        |        | ***    |
| 1 <> 3                    |          |        |        | ***    |        |        |        |        |
| 1 <> 4                    |          | ***    |        | ***    |        |        |        |        |
| 1 <> 5                    |          |        |        | ***    |        |        |        |        |
| 1 <> 6                    |          |        |        | ***    | ***    |        |        |        |
| 2 <> 3                    |          | ***    |        |        |        |        |        |        |
| 2 <> 4                    | ***      |        |        |        |        |        |        | ***    |
| 2 <> 5                    |          | ***    | ***    | ***    |        |        |        | ***    |
| 2 <> 6                    | ***      | ***    | ***    | ***    | ***    |        |        |        |
| 3 <> 4                    | ***      | ***    |        |        |        |        |        | ***    |
| 3 <> 5                    |          |        | ***    | ***    |        |        |        | ***    |
| 3 <> 6                    |          |        | ***    | ***    |        |        |        |        |
| 4 <> 5                    | ***      | ***    | ***    | ***    |        |        |        |        |
| 4 <> 6                    |          | ***    | ***    | ***    | ***    |        |        |        |
| 5 <> 6                    |          |        |        |        | ***    |        |        |        |
| Signifikanz               | 0,0001   | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0749 | 0,0001 | 0,7067 |
| (OF-Streu)                | Buche    | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                    |          | ***    |        |        | ***    | ***    | ***    |        |
| Signifikanz               | 0,0693   | 0,0109 | 0,4001 | 0,2942 | 0,0040 | 0,0006 | 0,0195 | 0,0851 |

Tab. A 26c: C/Lignin, C/Ca - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probetermin

| OL-Streu\Probetermin | C/Lignin |     |     |     |     |        | C/Ca   |        |        |        |        |        |        |
|----------------------|----------|-----|-----|-----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 1        | 2   | 3   | 4   | 5   | 6      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |        |
| F <> Q               |          | *** | *** | *** | *** |        | ***    |        |        |        | ***    | ***    | ***    |
| F <> B               |          | *** | *** |     |     | ***    | ***    | ***    |        |        | ***    | ***    | ***    |
| F <> P               | ***      | *** | *** | *** |     | ***    | ***    | ***    | ***    |        | ***    | ***    | ***    |
| Q <> B               |          | *** |     | *** | *** | ***    | ***    | ***    |        |        | ***    | ***    | ***    |
| Q <> P               | ***      |     | *** |     | *** | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| B <> P               | ***      | *** | *** | *** |     |        | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Signifikanz          | 0,0001   |     |     |     |     | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| OF-Streu\Probetermin | 1        |     |     |     |     | 6      | 1      |        |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q               |          |     |     |     |     |        |        |        |        |        |        |        |        |
| F <> B               |          |     |     |     |     |        |        |        |        |        |        |        |        |
| F <> P               | ***      |     |     |     |     |        | ***    |        |        |        |        |        |        |
| Q <> B               | ***      |     |     |     |     |        | ***    |        |        |        |        |        | ***    |
| Q <> P               | ***      |     |     |     |     |        | ***    |        |        |        |        |        | ***    |
| B <> P               | ***      |     |     |     |     |        | ***    |        |        |        |        |        | ***    |
| Signifikanz          | 0,0001   |     |     |     |     | 0,0008 | 0,0001 |        |        |        |        |        | 0,0001 |

Tab. A 26d: C/Lignin, C/Ca - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | C/Lignin | C/Ca   | Art         | C/Lignin | C/Ca   |
|-------------|----------|--------|-------------|----------|--------|
| FF <> FP    | ***      | ***    | QQ <> QP    |          |        |
| FF <> FC    | ***      | ***    | QQ <> QC    |          |        |
| FP <> FC    |          |        | QP <> QC    |          |        |
| Signifikanz | 0,0074   | 0,0001 | Signifikanz | 0,2152   | 0,3996 |
| BB <> BF    | ***      |        | PP <> PF    | ***      |        |
| BB <> BC    |          |        | PP <> PC    | ***      |        |
| BF <> BC    | ***      |        | PF <> PC    | ***      |        |
| Signifikanz | 0,0001   | 0,1138 | Signifikanz | 0,0001   | 0,9937 |

# Tab. A 27a-d: C/N, C/P - Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche

(Zahlen 1-6 geben den Probetermin an; unter 'Signifikanz' wird das Signifikanzniveau p der Varianzanalysen angegeben; \*\*\*: signifikanter Unterschied der Mittelwertsvergleiche (Signifikanzniveau p=0,05))

Tab. A 27a: C/N, C/P - Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen

|   | C/N     |             |                                       | C/P     |             |                                       |
|---|---------|-------------|---------------------------------------|---------|-------------|---------------------------------------|
|   | absolut | Signifikanz | Anteil in %<br>der Gesamt-<br>varianz | absolut | Signifikanz | Anteil in %<br>der Gesamt-<br>varianz |
| a) Varianz insgesamt                                | 45,64   |             |                                       | 42,93   |             |                                       |
| b) erklärter<br>Varianzanteil                       | 44,76   | 0,0001      | 98,07                                 | 40,08   | 0,0001      | 93,36                                 |
| c) Varianzanteil Arten                              | 41,30   | 0,0001      | 90,49                                 | 36,00   | 0,0001      | 83,86                                 |
| d) Varianzanteil Zeit                               | 7,93    | 0,0001      | 17,38                                 | 4,35    | 0,0001      | 10,13                                 |
| e) Varianzanteil Wechsel-<br>wirkungen Arten x Zeit | 0,00    |             | 0,00                                  | 0,00    |             | 0,00                                  |

Tab. A 27b: C/N, C/P - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Terminvergleich je Art

| Probezeit-<br>punkt (OL-Streu) | C/N    |        |        |        | C/P    |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 2                         |        | ***    | ***    | ***    | ***    |        |        |        |
| 1 <> 3                         |        | ***    | ***    | ***    |        | ***    |        |        |
| 1 <> 4                         |        | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| 1 <> 5                         | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |
| 1 <> 6                         | ***    | ***    | ***    | ***    |        |        | ***    |        |
| 2 <> 3                         |        |        |        | ***    |        |        | ***    |        |
| 2 <> 4                         |        |        |        | ***    |        |        | ***    |        |
| 2 <> 5                         | ***    |        | ***    | ***    |        |        | ***    | ***    |
| 2 <> 6                         | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        | ***    |        |
| 3 <> 4                         |        | ***    |        |        |        |        |        |        |
| 3 <> 5                         | ***    | ***    |        | ***    |        |        |        | ***    |
| 3 <> 6                         | ***    | ***    | ***    | ***    |        |        |        |        |
| 4 <> 5                         | ***    |        |        | ***    |        |        |        |        |
| 4 <> 6                         | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |        |        |
| 5 <> 6                         | ***    | ***    | ***    | ***    |        |        |        |        |
| Signifikanz                    | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| (OF-Streu)                     | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer | Buche  | Eiche  | Birke  | Kiefer |
| 1 <> 6                         | ***    | ***    |        |        | ***    | ***    | ***    |        |
| Signifikanz                    | 0,0001 | 0,0001 | 0,4100 | 0,8562 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0302 | 0,9628 |

Tab. A 27c: C/N, C/P - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Artenvergleich je Probetermin

| OL-Streu/Probetermin | C/N    |        |        |        |        |        | C/P    |        |        |        |        |        |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| F <> Q               | ***    |        | ***    | ***    | ***    | ***    |        | ***    |        |        |        |        |
| F <> B               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| F <> P               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Q <> B               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |        |        | ***    | ***    | ***    |        |
| Q <> P               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| B <> P               | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    | ***    |
| Signifikanz          | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| OF-Streu/Probetermin | 1      |        |        |        |        | 6      | 1      |        |        |        |        | 6      |
| F <> Q               | ***    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| F <> B               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        | ***    |
| F <> P               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        | ***    |
| Q <> B               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        | ***    |
| Q <> P               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        | ***    |
| B <> P               | ***    |        |        |        |        |        | ***    |        |        |        |        | ***    |
| Signifikanz          | 0,0001 |        |        |        |        |        | 0,0001 | 0,0001 |        |        |        | 0,0001 |

Tab. A 27d: C/N, C/P - Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen und Mittelwertsvergleiche: Vergleich der Sukzessionsflächen (Austauschversuche)

| Art         | C/N    | C/P    | Art         | C/N    | C/P    |
|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| FF <> FP    |        |        | QQ <> QP    |        |        |
| FF <> FC    | ***    | ***    | QQ <> QC    |        |        |
| FP <> FC    | ***    | ***    | QP <> QC    |        | ***    |
| Signifikanz | 0,0034 | 0,0001 | Signifikanz | 0,0385 | 0,0218 |
| BB <> BF    |        | ***    | PP <> PF    | ***    | ***    |
| BB <> BC    |        |        | PP <> PC    | ***    | ***    |
| BF <> BC    |        | ***    | PF <> PC    |        |        |
| Signifikanz | 0,1896 | 0,0001 | Signifikanz | 0,0001 | 0,0016 |



**Abb. A 1:** *litter bag* mit Buchenstreu ( $O_L$ -Lage) im Eichen-Buchenwald bei Unterlüß (2.3.94).



**Abb. A 2:** Probenahme von *litter bags* am Eichenstandort im Eichen-Buchenwald bei Unterlüß (17.5.94); die Markierungsstäbe bezeichnen unter der Streu liegende *litter bags* für die folgenden Probetermine.



